UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ANDRES EDUARDO BAQUERO VELASQUEZ

helvis III – Desenvolvimento e Caracterização da Plataforma Robótica

São Carlos
2015

ANDRES EDUARDO BAQUERO VELASQUEZ

helvis III – DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA PLATAFORMA
ROBÓTICA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Dinâmica das Máquinas e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães

SÃO CARLOS
2015

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

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B111h Baquero Velasquez, Andres Eduardo
helvis III - Desenvolvimento e caracterização da
plataforma robótica / Andres Eduardo Baquero Velasquez;
orientador Daniel Varela Magalhães. -- São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica de
Máquinas e Sistemas - Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Caracterização. 2. Modelo de Ackerman.
3. Dinâmica para frente de um veículo FWS. 4. Veículo
FWS. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANDRES EDUARDO BAQUERO VELASQUEZ**.

Título da dissertação: "ñelvis III – Desenvolvimento e caracterização da plataforma robótica".

Data da defesa: 24/02/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Daniel Varela Magalhães**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Flavio Guilherme Vaz de Almeida Filho**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADO

Prof. Dr. **Rafael Vidal Aroca**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Dedico este trabalho a minha mãe Rosana, a minha esposa Ana e a minha família:
Porque han sido, son y serán los pilares de mi vida

A Deus por me abençoar com esta oportunidade muito especial e por me fortalecer nos momentos de maior fraqueza.

Ao meu orientador o Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães por que a confiança, o apoio e a orientação que me brindou desde o começo, foram fundamentais para virar este sonho numa realidade.

Ao Prof. Dr. Marcelo Becker porque seu apoio e sua orientação foram fundamentais no desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao Juan Fajardo Barrero e o José Carlos Risardi porque sua ajuda e contribuição foram muito importantes no desenvolvimento do meu trabalho.

Gostaria agradecer especialmente ao Henry Borrero e à Carolina Duran por nos abrir as portas da sua casa nos momentos mais críticos, por todos os ótimos momentos que temos compartilhado e pelo apoio pessoal e laboral que temos recebido durante nossa estadia no Brasil.

Ao Juan Carlos, Angie e Juan Jose porque o dia a dia foi mais agradável e permitiu lembrar a nossa terra natal, Colômbia.

Finalmente, agradeço à CAPES pela bolsa recebida e ao CNPq e FAPESP, pelo apoio financeiro que nos permitiu desenvolver esta pesquisa.

“Before anything else, preparation is the key to success”

Alexander Graham Bell – Inventor of telephone

RESUMO

VELASQUEZ, A. E. B. *helvis III* – DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA PLATAFORMA ROBÓTICA. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

O principal propósito deste trabalho é desenvolver e caracterizar o veículo robótico *helvis III*, para ser usado em pesquisas na área de controle e navegação de robôs móveis. O sistema de propulsão foi caracterizado para determinar a velocidade real do veículo em quatro tipos diferentes de terrenos (Asfalto, grama, grama-terra e terra). Também foi caracterizado o sistema de esterçamento usando o modelo cinemático da bicicleta, obtendo-se a relação entre a posição do servo motor atuador e o valor do ângulo de esterçamento. Foram estimados valores dos erros CEP (*Circular Error Probability*) e SEP (*Spherical Error Probability*) do receptor de GPS (*Global Positioning System*) embarcado no veículo em dois testes: um em São Carlos – SP (Brasil) e outro em Villavicencio – Meta (Colômbia). Também foi caracterizada a IMU (*Inertial Measurement Unit*) embarcada no veículo, além de verificado o efeito da luz solar no funcionamento do sensor tipo LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) embarcado no *helvis III*. Por último, pode-se definir a dinâmica do veículo à frente, com a determinação seu centro de massa, e é apresentado o comportamento das forças sob as rodas quando o veículo fica parado ou em movimento sobre terrenos que geram uma inclinação em algum dos eixos cartesianos.

Palavras Chave: Modelo de Ackerman. Veículo FWS (Front Wheel Steering). Caracterização. Dinâmica para frente de veículos FWS.

ABSTRACT

VELASQUEZ, A. E. B. *helvis III* – DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF A ROBOTIC PLATFORM. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

The main objective of this work is the development and characterization of the robotic vehicle *helvis III* in order to use it in research focused on the fields of mobile robotics control and navigation. Initially the propulsion system was characterized in order to determine the velocity of the vehicle in real conditions (four different kinds of terrains were used). In addition, the steering system was also characterized applying the well-known bicycle kinematic model. During these experimental tests the relation between the position of the servo-motor and the value of steering angle of the bicycle model were found. Values for CEP (Circular Error Probability) and SEP (Spherical Error Probability) of the embedded GPS receiver (Global Positioning System) were determined based on two experiments: one carried out in São Carlos – SP (Brazil) and another in Villavicencio – Meta (Colombia). During the GPS experiments the embedded IMU (Inertial Measurement Unit) was also characterized. It was observed the effect of solar incidence on the LIDAR sensor (Laser Imaging Detection and Ranging) performance. Finally, the forward vehicle dynamics is described, with the determination of the center of mass of the vehicle and the observation of the normal forces behavior in the vehicle wheels when it is stopped or moved on an inclined floor.

Key words: Ackerman model. FWS Vehicle. Characterization. Forward Vehicle Dynamics for FWS vehicle.

PUBLICAÇÕES

VELASQUEZ, A. E. B.; GUERRERO, H. B.; PEDRAZA, I. L. A.; MAGALHÃES, D.; BECKER, M.; DE PAULA CAURIN, G. A. Navigation Control in FPGA for a differential-drive mobile robot. Pages 1-6 of: Advanced Robotics, 2013. ICAR2013. 16th International Conference on. Doi: 10.1109/ICAR.2013.6766532.

GUERRERO, H. B.; VELASQUEZ, A. E. B.; BARRERO, J. F.; COCO, D. Z.; RISARDI, J. C.; MAGALHÃES, D.; BECKER, M. Orientation (Yaw) Fuzzy controller applied to a car-like mobile robot prototype. Pages 1-6 of: Circuits and Systems, 2014. CWCAS2014. 5th Colombian Workshop on. Doi: 10.1109/CWCAS.2014.6994603.

VELASQUEZ, A. E. B.; GUERRERO, H. B.; BARRERO, J. F.; TIBERTI, A. J.; PÉREZ, J. C. I.; BECKER, M.; MAGALHÃES, D.; RISARDI, J. C. MOBILE PROTOTYPE USED TO STUDY OF TRAJECTORY CONTROL STRATEGIES AND AUTO-LOCALIZATION. In: Anais do VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014, Uberlândia –M.G.

VELASQUEZ, A. E. B.; GUERRERO, H. B.; RISARDI, J. C.; COCO, D. Z.; BARRERO, J. F.; MAGALHÃES, D.; BECKER, M. Electric Car-Like Mobile Robot Used on Vehicle Robotics. In: Proceedings of 5th Colombian Workshop on Circuits and Systems, 2014 Bogota.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Robô Quince	5
Figura 2.2 - Oryx 2.0	6
Figura 2.3 – Robô Bender II.....	7
Figura 2.4 - AgriBoT.....	7
Figura 2.5 – Robô Sekur.....	8
Figura 2.6 – Robô Pneuman	9
Figura 2.7 – Carros Autônomos. Em (a) Stanley. Em (b) CADU.....	9
Figura 2.8 – Projeto SENA.....	10
Figura 3.1 - helvis III.....	11
Figura 3.2 – Diagrama de blocos da comunicação entre os dispositivos embarcados no helvis III	12
Figura 3.3 - Base da estrutura do helvis III	13
Figura 3.4 - Sistema de suspensão frontal do helvis III.....	13
Figura 3.5 - Segunda parte da estrutura do helvis III	14
Figura 3.6 - Base da antena GPS do helvis III	14
Figura 3.7 - Paralamas do helvis III	15
Figura 3.8 - Carcaça do helvis III.....	15
Figura 3.9 - Desenho CAD da estrutura final do helvis III	16
Figura 3.10 - Desenho CAD da distribuição de componentes e sensores embarcados no helvis III	16
Figura 3.11 - Acoplamento DKN-15/26 da empresa Kalatec	17
Figura 3.12 - Motor Maxon EC-4Pole	17
Figura 3.13 - Redutor Maxon	18
Figura 3.14 - Planetário do redutor Maxon	18
Figura 3.15 - Encoder usado no motor maxon	18
Figura 3.16 - Placa EPOS2 50/5.....	19
Figura 3.17 - Comportamento da velocidade no motor Maxon EC-4Pole.....	20
Figura 3.18 - Comportamento da velocidade do motor no teste de velocidade	21
Figura 3.19 - Resultados dos testes de velocidade do helvis III nos quatro terrenos	24
Figura 3.20 - Resultados da velocidade do helvis III medida com GPS	25
Figura 3.21 - Servo-motor DS8711	27
Figura 3.22 - Placa Arduino Mega 2560	27
Figura 3.23 - Sistema Miniatura de Navegação Inercial (IG500N) da SBG Systems	29
Figura 3.24 - Constelação de satélites do Sistema GPS	30
Figura 3.25 - Estações do segmento de controle do sistema GPS.....	31
Figura 3.26 - Ponto fixo escolhido para a coleta da informação usada na caracterização do IG500N.....	32
Figura 3.27 - Aplicação para análise estatística	33
Figura 3.28 - Sistema UTM.....	34
Figura 3.29 - Aplicação para a visualização da informação coletada	37
Figura 3.30 - Comportamento diário das leituras coletadas das 10 – 11 a.m.....	38
Figura 3.31 - Comportamento diário das leituras coletadas das 5 – 6 p.m.....	39
Figura 3.32 - Diagrama de deslocamento com barras de erro para o erro e desvio padrão das leituras coletadas das 10 – 11 a.m.	40
Figura 3.33 - Diagrama de deslocamento com barras de erro para o erro e desvio padrão das leituras coletadas das 5 – 6 p.m.	40

Figura 3.34 - Comportamento das leituras coletadas na Colômbia das 10 – 11 a.m.	45
Figura 3.35 - Comportamento das leituras coletadas na Colômbia das 5 – 6 p.m.	45
Figura 3.36 - Gráfico de deslocamento com barras de erro para o erro e desvio padrão das leituras coletadas na Colômbia das 10 – 11 a.m.	47
Figura 3.37 - Gráfico de deslocamento com barras de erro para o erro e desvio padrão das leituras coletadas na Colômbia das 5 – 6 p.m.	48
Figura 3.38 - Esquemático de uma IMU	51
Figura 3.39 - Leituras do ângulo Roll coletadas das 10 – 11 a.m.	52
Figura 3.40 - Leituras do ângulo Roll coletadas das 5 – 6 p.m.	52
Figura 3.41 - Leituras do ângulo Pitch coletadas das 10 – 11 a.m.	53
Figura 3.42 - Leituras do ângulo Pitch coletadas das 5 – 6 p.m.	53
Figura 3.43 - Leituras do ângulo Yaw coletadas das 10 – 11 a.m.	53
Figura 3.44 - Leituras do ângulo Yaw coletadas das 5 – 6 p.m.	54
Figura 3.45 - Laser UTM-30LX da empresa Hokuyo	58
Figura 3.46 - Varredura do UTM-30LX	58
Figura 3.47 - Luz solar durante o primeiro teste do UTM-30LX	59
Figura 3.48 - Leitura do UTM-30LX com URGViewer	60
Figura 3.49 - Ambiente do segundo teste do UTM-30LX	61
Figura 3.50 - Leituras feitas com o UTM-30LX durante o segundo teste	62
Figura 3.51 - Computador ARK-1120 de Avantech	64
Figura 3.52 - Roteador TL-MR3040 de TP-LINK	65
Figura 3.53 - Sistema de controle de orientação	65
Figura 3.54 - Conjuntos fuzzy de entrada	67
Figura 3.55 - Conjuntos fuzzy de saída	68
Figura 3.56 - Interface gráfica da aplicação feita em C#	70
Figura 3.57 - Comportamento do controlador Fuzzy	71
Figura 3.58 - Desvios obtidos para os quatro terrenos	73
Figura 3.59 - Bateria Lipo de 7 células	75
Figura 3.60 - Bateria Lipo de 7 células	75
Figura 3.61 - Processo de início do movimento do motor de propulsão do <i>hélvis</i> III	77
Figura 3.62 - Processo de posicionamento do servo motor para o esterçamento do <i>hélvis</i> III	78
Figura 4.1 - Montagem para conhecer a posição longitudinal do centro de massa	79
Figura 4.2 - Diagrama de forças de um veículo estacionado num terreno sem inclinação	81
Figura 4.3 - Montagem para conhecer a posição vertical do centro de massa	83
Figura 4.4 - Diagrama de forças de um veículo estacionado num terreno sem inclinação visto desde a parte frontal	83
Figura 4.5 - Montagem para conhecer a altura do centro de massa	85
Figura 4.6 - Diagrama de forças de um veículo estacionado num terreno com uma inclinação ϕ	86
Figura 4.7 - Diagrama de forças de um veículo se movimentando ($a \neq 0$) sobre um terreno sem inclinação	87
Figura 4.8 - Diagrama de forças de um veículo se movimentando ($a \neq 0$) sobre um terreno com inclinação ($\phi \neq 0$)	90
Figura 4.9 - Montagem usada para comprovar o ângulo máximo de inclinação de um terreno	94
Figura 4.10 - Diagrama de forças de um veículo estacionado sobre um terreno que gera uma inclinação lateral ao veículo ($\phi \neq 0$)	97

Figura 4.11 - Montagem usada para medir a força sob as rodas do lado direito do <i>helvis</i> III quando fica estacionado num terreno com inclinação lateral igual a zero	99
Figura 4.12 - Montagem usada para medir a força sob as rodas do lado direito do <i>helvis</i> III quando fica estacionado num terreno com inclinação lateral igual a 37°	100
Figura 4.13 - Diagrama de forças de um veículo se movimentado sobre uma crista.....	101
Figura 4.14 - Diagrama de forças de um veículo se movimentado sobre uma depressão.....	105
Figura 5.1 - Veículo de esterçamento dianteiro.....	108
Figura 5.2 - Cinemática de movimento lateral de um veículo.....	110
Figura 5.3 - Mecanismo de Ackerman do <i>helvis</i> III	113
Figura 5.4 - Gráfico comparativo dos esterçamentos obtidos sobre o terreno de cimento e sobre o terreno de grama	116
Figura 5.5 – Sistema de controle para a orientação do veículo	117
Figura 5.6 – Resposta do controlador proporcional com ganho $K=7$	118
Figura A. 1 - Janela principal do Epos Studio.....	129
Figura A. 2 - Painel de navegação com o botão WorkSpace ativo	130
Figura A. 3 - Painel de navegação com o botão Communication ativo	130
Figura A. 4 - Painel de navegação com o botão Wizards ativo.....	131
Figura A. 5 - Painel de navegação com o botão Tools ativo	131
Figura A. 6 - Janela de novo projeto	132
Figura A. 7 - Janela que apresenta a opção “Startup Wizard”	132
Figura A. 8 - Diagrama de fluxo (foi modificado do original fornecido pela Maxon motor) para a configuração da Epos2	133
Figura A. 9 - Janela das características do motor Maxon usado	133
Figura A. 10 - Janela do processo de “Auto Tuning”.....	134
Figura A. 11 - Sistema de controle de velocidade da placa Epos2.....	135
Figura A. 12 - Diagrama de fluxo.....	135
Figura A. 13 -Posições da memória da placa Epos2	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resultados dos testes de velocidade do helvis III num terreno de terra.....	22
Tabela 3.2 - Resultados dos testes de velocidade do helvis III num terreno de terra-grama ...	22
Tabela 3.3 - Resultados dos testes de velocidade do helvis III num terreno de grama	23
Tabela 3.4 – Resultados dos testes de velocidade do helvis III num terreno de asfalto.....	23
Tabela 3.5 - Resultados da velocidade do helvis III medida com GPS.....	25
Tabela 3.6 - Resultados da informação coletada nos oito dias durante as 10 – 11 a.m.....	41
Tabela 3.7 - Resultados da informação coletada nos oito dias durante as 5 – 6 p.m.	41
Tabela 3.8 - Resultados dos filtros aplicados à informação coletada das 10 – 11 a.m.....	43
Tabela 3.9 - Resultados dos filtros aplicados à informação coletada das 5 – 6 p.m.	43
Tabela 3.10 - Valores CEP e SEP dos filtros aplicados à informação coletada das 10 – 11 a.m.	44
Tabela 3.11 - Valores CEP e SEP dos filtros aplicados à informação coletada das 5 – 6 p.m.....	44
Tabela 3.12 - Resultados da informação coletada na Colômbia das 10 – 11 a.m.	46
Tabela 3.13 - Resultados da informação coletada na Colômbia das 5 – 6 p.m.	46
Tabela 3.14 - Resultados dos filtros aplicados à informação coletada na Colômbia das 10 – 11 a.m.....	49
Tabela 3.15 - Resultados dos filtros aplicados à informação coletada na Colômbia das 5 – 6 p.m.	49
Tabela 3.16 - Valores CEP e SEP dos filtros aplicados à informação coletada na Colômbia das 10 – 11 a.m.....	50
Tabela 3.17 - Valores CEP e SEP dos filtros aplicados à informação coletada na Colômbia das 5 – 6 p.m.....	50
Tabela 3.18 - Média das leituras dos ângulos Pitch, Roll e Yaw para a informação coletada das 10 – 11 a.m.	54
Tabela 3.19 - Média das leituras dos ângulos Pitch, Roll e Yaw para a informação coletada das 5 – 6 p.m. “continua”	54
Tabela 3.20 - Desvio padrão das leituras dos ângulos Pitch, Roll e Yaw para os dados coletados das 10 – 11 a.m.....	55
Tabela 3.21 - Desvio padrão das leituras dos ângulos Pitch, Roll e Yaw para a informação coletada das 5 – 6 p.m.....	55
Tabela 3.22 - Mudanças angulares no ângulo pitch medidas com o transferidor e com o IG500N.....	56
Tabela 3.23 - Mudanças angulares no ângulo roll medidas com o transferidor e com o IG500N	56
Tabela 3.24 - Mudanças angulares no ângulo yaw medidas com o transferidor e com o IG500N.....	56
Tabela 3.25 - Desvios padrão das leituras feitas com o IG500N	57
Tabela 3.26 - Resultados das leituras feitas com o UTM-30LX sob luz solar muito intensa ..	59
Tabela 3.27 - Resultados das leituras feitas com o UTM-30LX baixo sombra “continua”	60
Tabela 3.28 – Teste com Lidar na parte frontal do helvis III	63
Tabela 3.29 - Teste do lado esquerdo do Lidar	63
Tabela 3.30 – Teste do lado direito do Lidar.....	63
Tabela 3.31 - Desvios obtidos nos testes feitos no terreno de terra	72
Tabela 3.32 - Desvios obtidos nos testes feitos no terreno de grama.....	72
Tabela 3.33 - Desvios obtidos nos testes feitos no terreno de grama-terra	72

Tabela 3.34 - Desvios obtidos nos testes feitos no terreno de asfalto.....	73
Tabela 3.35 - Desvio médio para os testes feitos.....	74
Tabela 3.36 – Correntes, voltagens e potência reais dos dispositivos embarcados no <i>helvis</i> III	76
Tabela 5.1 - Resultados do esterçamento real do veículo sobre o terreno de grama	114
Tabela 5.2 - Resultados do esterçamento real do veículo sobre o terreno de cimento	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Termo	Descrição
4WD	<i>Four Wheel Drive</i>
4WS	<i>Four Wheel Steering</i>
4WSD	<i>Four Wheel Steering and Drive</i>
CADU	Carro Autônomo Desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais
CAN	<i>Control Area Network</i>
CEP	Circular Error Probability
CIM	Carta Internacional do Mundo ao milionésimo
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DOF	<i>Degree of Freedom</i>
fuRO	Centro de Tecnologia Robótica Futura
FWS	<i>Front Wheel Steering</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
LIDAR	<i>Laser Imaging Detection and Ranging</i>
Lipo	Polímero de Litio
MISO	<i>Multiple Inputs-Single Output</i>
PSD	Dispositivos detectores de Posição
PTZ	<i>Pan-Tilt-Zoom</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SEP	<i>Spherical Error Probability</i>
SISO	<i>Single Input-Single Output</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
USP	Universidade de São Paulo
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 84</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
X e Y	Coordenadas UTM ou coordenada globais do veículo	M
K_o	Fator de escala no meridiano central	-
Nu	Raio da curvatura da terra	M
long0	Meridiano central da terra	°
S	Meridional arc	-
Ψ_d	Orientação desejada do veículo	°
Ψ_r	Orientação real do veículo	°
A	Aceleração do veículo	m/s ²
G	Gravidade	m/s ²
F_z	Forças presentes no eixo local z do veículo	N
F_y	Forças presentes no eixo local y do veículo	N
F_x	Forças presentes no eixo local x do veículo	N
a_1	Distância que existe entre o centro de massa e o eixo dianteiro do veículo	M
a_2	Distância que existe entre o centro de massa e o eixo traseiro do veículo	M
L	Comprimento do veículo	M
M_x	Momentos que existem no eixo local x do veículo	N*m
M_y	Momentos que existem no eixo local y do veículo	N*m
M_z	Momentos que existem no eixo local z do veículo	N*m
M	Massa do veículo	Kg
W	Largura do veículo	M
b_1	Distância que existe entre o centro de massa e a roda do lado esquerdo do veículo	M
b_2	Distância que existe entre o centro de massa e a roda do lado direito do veículo	M
Φ	Ângulo de inclinação do terreno onde o veículo se movimenta ou fica estacionado	°
H	Altura do centro de massa do veículo	M
R_r	Raio das rodas do veículo	M
x, y e z	Eixos do sistema local de coordenadas	-
μ_x	Atrito existente entre as rodas do veículo e o terreno	-
R_H	Raio de curvatura da crista ou da depressão do terreno	M
Θ	Inclinação da crista	°
V	Velocidade do veículo	m/s
V_c	Velocidade crítica onde o veículo experimenta o efeito "veículo voador"	m/s
C	Centro de massa do veículo	-

Símbolo	Descrição	Unidade
O	Centro de rotação	-
R	Distância entre o centro de rotação e o centro de massa, também é chamado raio de curva do veículo	M
δ	Ângulo de esterçamento de uma bicicleta segundo o modelo cinemático da bicicleta	°
δ_i	Ângulo de esterçamento da roda interna do veículo no modelo cinemático de Ackerman	°
δ_o	Ângulo de esterçamento da roda externa do veículo no modelo cinemático de Ackerman	°
δ_f	Ângulo de esterçamento da roda frontal de uma bicicleta	°
δ_r	Ângulo de esterçamento da roda traseira de uma bicicleta	°
B	Ângulo de escorregamento do veículo	°
Y	Ângulo de curso do veículo	°
L_f	Distância que existe entre a roda dianteira e o centro de massa do veículo no modelo cinemático da bicicleta, seu valor é igual à distância a_1	M
L_r	Distância que existe entre a roda traseira e o centro de massa do veículo no modelo cinemático da bicicleta, seu valor é igual à distância a_2	M
F_x	Taxa de mudança da orientação do veículo Força de tração sob as rodas	N

SUMARIO

PUBLICAÇÕES	xviii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Organização do Trabalho	3
2 ESTADO DA ARTE.....	5
3 helvis III	11
3.1 Estrutura	12
3.2 Sistema de Propulsão	16
3.2.1 Motor, redutor e encoder usados no helvis III	17
3.2.2 Epos2.....	19
3.2.3 Testes do sistema de propulsão	19
3.3 Sistema de Esterçamento.....	26
3.3.1 Servo motor DS8711	26
3.3.2 Arduino Mega 2560	27
3.4 Dispositivos embarcados no helvis III	28
3.4.1 Sistema Miniatura de Navegação Inercial IG500N.....	28
3.4.2 Sensor Laser UTM-30LX.....	57
3.4.3 Computador ARK-1120	64
3.4.4 Roteador wireless	64
3.5 Controlador fuzzy para a orientação do helvis III.....	65
3.5.1 Descrição do controlador fuzzy desenvolvido	65
3.5.2 Aplicação feita em Visual Studio com a linguagem C#.....	69
3.5.3 Resultados do controlador Fuzzy	70
3.6 Consumo de energia dos dispositivos embarcados no helvis III e tempos mortos dos sistemas de propulsão e esterçamento.....	74
3.6.1 Consumo de energia do helvis III	74
3.6.2 Tempos mortos dos sistemas de propulsão e de esterçamento.....	76
4 DINÂMICA À FRENTE DO helvis III.....	79
4.1 Determinação da posição do Centro de Massa do helvis III.....	79
4.1.1 Posição Longitudinal do Centro de Massa	79
4.1.2 Posição Lateral do Centro de Massa	82
4.1.3 Altura do Centro de Massa.....	85

4.2	DINÂMICA À FRENTE DO <i>helvis</i> III SOBRE UM TERRENO SEM INCLINAÇÃO	87
4.3	DINÂMICA PARA FRENTE DO <i>helvis</i> III SOBRE UM TERRENO COM INCLINAÇÃO ($\phi \neq 0$)	90
4.4	DINÂMICA PARA FRENTE DO <i>helvis</i> III SOBRE UM TERRENO COM INCLINAÇÃO LATERAL($\phi \neq 0$)	97
4.5	DINÂMICA À FRENTE DO <i>helvis</i> III SOBRE UMA CRISTA.....	101
4.6	DINÂMICA À FRENTE DO <i>helvis</i> III SOBRE UMA DEPRESSÃO	104
5	CINEMÁTICA DO <i>helvis</i> III.....	107
5.1	Modelo Cinemático de Ackerman	107
5.2	Modelo Cinemático da Bicicleta	109
5.3	Modelo Cinemático do <i>helvis</i> III.....	112
5.3.1	Resultados.....	114
5.3.2	Controlador proporcional para a orientação do veículo (ângulo Yaw)	117
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	121
6.1	Trabalhos futuros	122
	REFERÊNCIAS.....	125
	ApêndiceA.....	129

1 INTRODUÇÃO

Em sua obra teatral chamada “Ros-sum’s Universal Robots”, Karel Capek introduz pela primeira vez o termo “robota” (robô), em referência aos trabalhos realizados de um jeito forçado (BATURONE, 2001). Atualmente “o termo robô abrange uma grande quantidade de mecanismos e máquinas em todas as áreas de nossa vida” (CASTILLO; CABERTA, 2003, p. 2, traduzido pelo autor) e pode ser definido “como um dispositivo mecânico programável para execução de algumas tarefas de manipulação ou locomoção com controle automático” (JÁCOBO, 2001, p. 7). Segundo Riascos (2010), os robôs podem se classificar segundo a mobilidade da sua base (móveis ou fixos), sua estrutura cinemática (aquáticos, aéreos ou terrestres) e seu espaço de trabalho (submarino, marinhos, pernas ou rodas). Segundo Victorino (1998, p. 2-3), um robô móvel pode ser definido como:

Um robô capaz de se locomover sobre uma superfície somente através da atuação de rodas montadas no robô e em contato com a superfície e é equipado com sensores (visão, sonar, infravermelho, tato, sistemas de navegação inercial, etc.) que promovem a percepção do ambiente externo totalmente ou parcialmente desconhecido e é dotado da capacidade de decisão que lhe permite cumprir uma determinada tarefa sem intervenção humana.

Para que a percepção do ambiente seja a mais real possível é preciso fazer a caracterização dos sensores embarcados no robô móvel, de modo a estimar seus erros reais, seu alcance e possíveis condições nas quais os sensores trabalham com o menor erro possível. Também deve-se caracterizar seu sistema de propulsão e de esterçamento, buscando conhecer as características reais do robô, como sua velocidade, seus ângulos máximos de esterçamento e seus tempos mortos. Com isto obtém-se uma série de informações muito importantes para o desenvolvimento dos controladores que definem a capacidade de decisão do robô.

Este trabalho propõe o desenvolvimento e a caracterização do robô móvel *helvis III*, com a finalidade de ser usado em futuras pesquisas de estratégias de controle e navegação. O *helvis III* é um veículo elétrico FWS (Front Wheel Steering) que baseia a sua mobilidade nos conceitos da geometria de Ackerman (RAJAMANI, 2006). Seu sistema de propulsão consiste num motor EC-4Pole (Maxon Motor) e uma placa Epos2 (Maxon Motor) para seu controle. O sistema de esterçamento consiste de um servo motor e uma placa Arduino. O *helvis III* ainda

tem embarcado os seguintes sensores: uma IMU, um receptor de GPS e dois sistemas LIDAR. Sua cinemática é baseada no modelo cinemático de Ackerman e no modelo cinemático da bicicleta e sua dinâmica é analisada com base na dinâmica à frente de um veículo FWS. A motivação para o *helvis III* ser um veículo FWS com propulsão nas suas rodas dianteiras é que todo trabalho desenvolvido nesta plataforma pode ser adaptado e aplicado a um veículo FWS ou 4WS (Four Wheel Steering) real, como os automóveis de passeio.

1.1 Motivação

Fazer o processo de caracterização da plataforma robótica *helvis III* nos permite conhecer parâmetros (velocidade real, tempos mortos decorrentes da comunicação entre o computador e os sistemas de esterçamento e propulsão e o consumo de energia) ou determinar erros reais (desvio padrão do GPS, desvio padrão da IMU, alcance máximo do Lidar) que podem ser levados em conta em futuras pesquisas de estratégias de controle a ser desenvolvidas nesta plataforma. Outra motivação é que, mediante a caracterização dos sensores embarcados no *helvis III*, pode-se estimar certas condições ideais nas quais o valor do erro das medições seja reduzido. Além disso, como o *helvis III* conta com a mesma arquitetura de um veículo real (FWS), a maioria dos trabalhos desenvolvidos nesta plataforma podem ser adaptados para serem utilizados numa plataforma de maior tamanho e complexidade, como um automóvel de passeio.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver e caracterizar a plataforma robótica *helvis III* para ser usada no desenvolvimento de pesquisas na área de controle e navegação. Sua estrutura foi caracterizada com respeito aos seus sistemas de propulsão e de esterçamento, parâmetros dinâmicos e cinemáticos, além de verificados seus sensores embarcados (Lidar, IMU e GPS). A caracterização da cinemática e da dinâmica do *helvis III* foi baseada no modelo cinemático da bicicleta e na dinâmica à frente de um veículo FWS.

1.3 Organização do Trabalho

O **capítulo 2** apresenta exemplos de veículos autônomos com arquitetura Ackerman desenvolvidos por diversos grupos de pesquisa, plataformas robóticas cujo modelo cinemático foi baseado no modelo de Ackerman ou da bicicleta e plataformas robóticas cujo sistema de propulsão consiste em um ou mais motores.

O **capítulo 3** apresenta a descrição do *helvis III* (sistema de propulsão, estrutura, sistema de esterçamento, dispositivos embarcados, velocidade real e consumo de energia), a caracterização feita para cada sensor embarcado e o desenvolvimento de um controle fuzzy para sua orientação.

O **capítulo 4** descreve a dinâmica à frente do *helvis III*, com a determinação da posição do seu centro de massa e do comportamento das forças sob as rodas do robô em movimento ou estacionado sobre terrenos planos horizontal e inclinados(eixo x ou y).

O **capítulo 5** descreve a cinemática do *helvis III*, baseada na teoria dos modelos cinemáticos de Ackerman e da bicicleta para veículos FWS. Também apresenta os resultados da caracterização do sistema de esterçamento, onde é relacionado o posicionamento do servo motor com o ângulo de esterçamento do modelo da bicicleta.

O **capítulo 6** apresenta as conclusões do trabalho e alguns trabalhos futuros propostos para serem desenvolvidos no *helvis III*.

2 ESTADO DA ARTE

Como o *helvis III* é um veículo elétrico FWS que conta com um motor Maxon EC-4Pole no seu sistema de propulsão e cujo esterçamento é baseado no modelo cinemático de Ackerman, foram sumarizadas a seguir algumas plataformas robóticas móveis que usaram estas mesmas características no seu sistema de propulsão ou de esterçamento.

A primeiro exemplo é o robô Quince (Fig. 2.1), desenvolvido no Centro de Tecnologia Robótica Futura (fuRO) do Instituto Tecnológico de Chibano Japão. O Quince é um sistema de resgate que foi usado no desastre nuclear de Fukushima no Japão, tem uma massa de 27 Kg e conta com quatro mecanismos móveis de tração por lagarta (*flippers*) para se adaptar à posição angular da superfície sem importar o tipo de terreno. Também conta com motores Maxon EC-4Pole 30 (sem escovas) de corrente contínua para sua propulsão, quatro motores Maxon EC 22 que permitem aos *flippers* adaptar-se à superfície do terreno, sensores PSD (dispositivos detectores de posição) situados nos *flippers* para fazer a medição da distância com o solo, dois sensores laser que registram a estrutura do terreno, uma câmera de visão de pássaro, um equipamento especializado para pegar amostras de pó radioativo e um sistema de comunicação sem fio que entra em operação no momento que a comunicação com fio interrompida (SCHÜTZ, 2012).

Figura 2.1 - Robô Quince (SCHÜTZ, 2012)

Um segundo exemplo de robô móvel que usa motores fabricados pela Maxon Motor no seu sistema de propulsão é o robô Oryx 2.0. Desenvolvido pelo Instituto Politécnico de Worcester (Estados Unidos), tem a finalidade de explorar terrenos ásperos na superfície da terra (AMATO et al., 2012). Para a propulsão o robô conta com um motor maxon EC-4Pole

em cada roda, capaz de fornecer potência de até 200 W. Foi usado um mecanismo de redução 156:1 para atingir torques e velocidades de propulsão desejadas para o robô. Além disso, os controladores dos motores permitem fazer um ótimo controle da velocidade, gerando movimentos precisos em baixas velocidades e potências. O robô tem uma velocidade máxima de 1,2 m/s e pode suportar esta velocidade em terreno com inclinações de até 44° (AMATO et al., 2012). O Oryx 2.0 (Fig. 2.2) tem embarcado um sensor inercial para ler os ângulos de Euler (*yaw*, *pitch* e *roll*), um conjunto de sensores digitais de temperatura que são usados para monitorar as baterias, o ambiente, o computador embarcado no robô e a placa mãe do computador, e uma placa Epos2 (AMATO et al., 2012) para verificação da condição atual do motor.

Figura 2.2 - Oryx 2.0 (AMATO et al., 2012)

Um robô móvel que usa a geometria de Ackerman para esterçamento é o Bender II, desenvolvido pela Universidade Tecnológica de Brno na República Checa. O Bender II (Fig. 2.3) tem rodas de tamanho médio, comprimento de 0,6m e largura de 0,3m. Conta com duas unidades de esterçamento, usando dois motores DC Maxon RE40 com um redutor tipo planetário de 43:1. Ele usa a geometria de Ackerman misturada com as duas unidades de esterçamento controladas por um algoritmo diferencial de software (HRBÁČEK, 2010).

Figura 2.3 – Robô Bender II(HRBÁČEK, 2010)

Um segundo robô que usa a geometria de Ackerman no seu esterçamento é o AgriBoT(Fig. 2.4),que é uma plataforma desenvolvida pela Jacto *Company* e está sendo automatizada pelos estudantes de pós graduação da Escola de Engenharia de São Carlos. O AgriBoT é um robô móvel 4WSD (*Four Wheel Steering Drive*) com quatro rodas ligadas a módulos mecânicos, que proporcionam o esterçamento e movimentação cada roda independentemente. Cada módulo mecânico é composto de um motor hidráulico encarregado da propulsão e de um acionador hidráulico encarregado do esterçamento. Os equipamentos eletrônicos embarcados comunicam-se através de protocolo CAN (*Control Area Network*) e para medir a orientação do robô é usado um mini sistema de medição inercial (SBG SYSTEMS). O AgriBoT conta com esterçamento independente de cada roda, de modo que, baseando-se na geometria de Ackerman, é possível calcular o grau de esterçamento necessário a cada roda para gerar um esterçamento desejado do veículo (BORRERO et al., 2012).

Figura 2.4 - AgriBoT (BORRERO et al., 2012)

Um terceiro robô com esterçamento baseado na geometria de Ackerman é o Sekur (Fig. 2.5), desenvolvido pela *Adept MobileRobots*. O Sekur é uma plataforma 4WSD comercial

holonômica usada para segurança, inspeção e investigação ao ar livre. Suas dimensões são 1,4x1,3x1,1m e sua velocidade máxima é de 1,8m/s. Tem embarcado um DGPS (*Differential Global Positioning System*), PTZ (*Pan-tilt-zoom*) câmera, 2 lasers e 3 câmeras estéreo. Conta com 4 rodas omni-direcionais para seu esterçamento com propulsão independente. Para determinar a velocidade e o ângulo de esterçamento de cada roda, o Sekur usa a geometria de Ackerman, de modo a criar ligações entre os ângulos de esterçamento de cada roda similares aos sistemas mecânicos de cremalheira e pinhão usados em muitos sistemas de esterçamento para automóveis (LOONEY, 2010).

Figura 2.5 – Robô Sekur (LOONEY, 2010)

Um último robô que usa a geometria de Ackerman é o Pneuman (Fig. 2.6), desenvolvido na Universidade da Flórida nos Estados Unidos. O Pneuman é um robô humanóide que tem uma altura igual a 1,49m e uma largura de 0,7m. Tem dois braços com 5 graus de liberdade (DOF - *Degree of Freedom*) que permitem ao robô pegar objetos a 0,5m de distância e sua massa total é 46,26 Kg. Seu sistema de propulsão consiste em 4 rodas arranjadas num quadrado, cada roda tem a capacidade de esterçar independentemente e o sistema de propulsão pode operar em 3 diferentes modos de esterçamento: esterçamento de derrapagem (do inglês “*Steer-skid*”), Ackerman e esterçamento a quatro rodas.

Figura 2.6 – Robô Pneuman (NORTMAN *et al.*, 2002)

Dois carros autônomos que existem ao nível mundial e no Brasil são o Stanley e o CADU. O Stanley (Fig. 2.7) foi desenvolvido pela Universidade de Stanford nos Estados Unidos. Este veículo ganhou em 2005 a competição DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*). O Stanley é um veículo 4WD (*Four Wheel Drive*) baseado num veículo Diesel Volkswagen Touareg R5. Conta com um motor DC para seu esterçamento, 5 sensores lasers (SICK LMS 291), uma antena GPS, uma IMU interna, uma câmera e dois radares.

(a)

(b)

Figura 2.7 – Carros Autônomos. Em (a) Stanley (THRUN *et al.*, 2006). Em (b) CADU (HERNANDES, 2012)

O CADU foi desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais, conta com um sensor GPS, uma IMU, uma câmera estéreo e um sensor LIDAR SICK. Para finalizar é apresentado o SENA (Sistema Embarcado de Navegação Autônoma), que está sendo usado como um laboratório de provas de tecnologia veicular e é desenvolvido no Laboratório de Mecatrônica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo

(USP). Um dos objetivos do projeto SENA é obter um veículo autônomo que possa fazer percursos urbanos.

Figura 2.8 – Projeto SENA

3 helvis III

O helvis III (Fig. 3.1) é um protótipo de veículo elétrico do tipo Ackerman, com esterçamento e propulsão dianteira. Tem um sistema de propulsão (descrito na seção 3.2) composto por um motor Maxon EC-4Pole da empresa Maxon Motor e uma placa EPOS2 fabricada pela Maxon Motor. Para o esterçamento (descrito na seção 3.3), possui um servo-motor DS8711 da empresa JR Americas e uma placa Arduino Mega 2560. Seguindo a classificação de sensores dada por Siegwart e Nourbakhsh (2004, p. 91), o helvis III conta com um sensor de rumo (do inglês *Heading Sensor*) que é o mini sistema inercial IG500N (descrito na seção 3.4.1) da empresa SBG System, um sensor de localização (do inglês *ground-based beacons*) que é o GPS do sistema inercial IG500N (descrito na seção 3.4.1.1) e um sensor do tipo LIDAR (*active ranging*) que é o sensor laser UTM-30LX da empresa Hokuyo (descrito na seção 3.4.2).

Figura 3.1 - helvis III

A velocidade máxima do helvis III é 1,28 m/s (descrito na seção 3.2.3), seu esterçamento máximo é de 20° à esquerda e 21° à direita (descrito na seção 5.3.1) e suas dimensões são 0,65 m x 0,3 m x 0,6 m. Um diagrama de blocos da comunicação entre os dispositivos embarcados no helvis III é apresentado na Fig. 3.2.

Figura 3.2 – Diagrama de blocos da comunicação entre os dispositivos embarcados no helvis III

Na Fig. 3.2 observa-se que a comunicação entre o computador e os dispositivos dos sistemas de esterçamento e de propulsão do veículo é feita por portas seriais, bem como a comunicação do LIDAR e do IG500N.

3.1 Estrutura

A estrutura do helvis III foi feita em alumínio e consta de três partes. A primeira parte é uma placa base (Fig. 3.3) de comprimento 0,65m Ede largura 0,3m, onde foram fixados o sistema de suspensão do robô, o mecanismo de Ackerman usado para o esterçamento, os dois sensores Laser UTM-30LX, o motor maxon EC-4Pole, o servo-motor e as duas baterias usadas na alimentação do robô.

Figura 3.3 - Base da estrutura do helvis III

“O sistema de suspensão permite manter o nível correto da altura do veículo, reduz o efeito de impacto da estrada e mantém o alinhamento correto do veículo” (TENNECO, 2011). O sistema de suspensão do helvis III é composto por quatro amortecedores ligados às rodas do robô, dois frontais (Fig. 3.4) e dois traseiros

Figura 3.4 - Sistema de suspensão frontal do helvis III

A segunda parte de estrutura do helvis III consiste numa estrutura metálica de dois níveis (Fig. 3.5), fixada à base. Tem comprimento de 0,11m, largura de 0,18m e altura de 0,13m. A separação entre a base do veículo e o primeiro nível é de 0,07m e a separação entre o primeiro e o segundo nível é de 0,06m. No primeiro nível fica o computador ARK-1120 da empresa Advantech responsável pela execução dos algoritmos desenvolvidos para a navegação do veículo e armazenagem das rotinas de software de interface requeridas para o uso dos sensores e atuadores do robô. No segundo nível fica a placa Arduino Mega 2560 e o sistema de medidas inerciais IG500N.

Figura 3.5 - Segunda parte da estrutura do helvis III

A terceira parte da estrutura do robô consiste de uma plataforma para a antena do GPS. Uma vara metálica de comprimento igual a 0,54m foi fixada na parte frontal do veículo (Fig. 3.6). Dois braços metálicos com comprimento de 0,3m fixados à segunda parte da estrutura servem de apoio estrutural para reduzir oscilações na vara longa. Na parte superior, um disco de 0,06m de raio serve de base para a antena do receptor GPS do mini sistema inercial IG500N.

Figura 3.6 - Base da antena GPS do helvis III

A última parte da estrutura do helvis III é a carenagem do robô. A primeira parte da carenagem tem dois paralamas (Fig. 3.7) de raio igual a 0,09m e largura 0,3 m. Ambos foram feitos a partir de uma folha de pvc e fixados na parte frontal e traseira do robô. A finalidade desta parte da carenagem é proteger os componentes embarcados no veículo da terra ou pó gerado pelo movimento das rodas. O raio dos paralamas foi definido em função do raio das rodas do veículo (0,075m).

Figura 3.7 - Paralamas do helvis III

A parte final da carenagem do helvis III é uma carcaça feita de alumínio de 0,235m de largura, 0,205m de comprimento e com 0,195m de altura. Ela tem a finalidade de proteger e ocultar a parte da estrutura onde ficam os componentes e atuadores do helvis III e é apresentada na Fig. 3.8.

Figura 3.8 - Carcaça do helvis III

Para finalizar a descrição da estrutura do helvis III, são apresentados dois desenhos. O primeiro mostra a estrutura final do robô (Fig. 3.9) e o segundo a distribuição dos componentes, sensores e atuadores embarcados, junto com as dimensões finais do veículo (Fig. 3.10).

Figura 3.9 - Desenho CAD da estrutura final do helvis III (BAQUERO et al., 2014)

Figura 3.10 - Desenho CAD da distribuição de componentes e sensores embarcados no helvis III (BAQUERO et al., 2014)

3.2 Sistema de Propulsão

O sistema de propulsão do helvis III possui uma placa Epos2, um motor EC-4Pole (referência: 309756), um redutor (referência: 326661) e um *encoder* (referência: 225778), todos fabricados pela Maxon Motor. O *encoder* está ligado na parte traseira do motor e o redutor fica ligado ao eixo do motor. Para transmitir o movimento existente na saída do redutor até as rodas frontais do veículo foi necessário o uso de um cardan. Para a ligação entre o redutor e o cardan foi necessário de um acoplamento flexível que permitisse a transmissão do movimento. O acoplamento usado (Fig. 3.11) (Kalatec, referência: DKN-15/26), tem um comprimento total de 26 mm e suporta um torque máximo de 1,5 Nm.

Figura 3.11 - Acoplamento DKN-15/26 da empresa Kalatec¹

Como controlador do motor maxon foi usada uma placa EPOS2 do mesmo fabricante, configurada no software “*Epos Studio*” e acionada com uma aplicação feita em linguagem C# (executada no computador embarcado no helvis III). A comunicação entre o computador e a placa Epos2 é serial, transmitida através de um cabo USB.

3.2.1 Motor, redutor e encoder usados no helvis III

Segundo a folha de dados do fabricante, o motor de referência 309756 (Fig. 3.12) é um motor sem escovas que precisa de uma alimentação de 24 V, tem um consumo nominal de corrente igual a 5,7 A, seu intervalo de velocidade vai desde 0 até 16700 rpm e seu torque nominal é 61,9mNm.

Segundo Schütz (2012, p. 2, tradução própria), “devido à tecnologia especial de enrolamento e aos ímãs de quatro pólos, os motores maxon EC-4Pole são imbatíveis na hora de oferecer a máxima potência pela unidade de volume e peso. Estes motores oferecem um elevado rendimento e uma ótima dinâmica de regulação. A carcaça metálica assegura uma boa dissipação do calor e estabilidade mecânica”. Este tipo de motor tem sido usado em robôs como o robô de resgate Japonês “Quince” (SCHÜTZ, 2012).

Figura 3.12 - Motor Maxon EC-4Pole²

¹ Foto disponível em: < <http://www.ecommercekalatec.com.br/acoplamentos/dkn-15-26-acoplamento-de-fole-metalico.html#> >. Acesso em 28/04/2014

A saída do motor está ligada a um redutor (referência 326661) do tipo planetário, com uma redução de 23:1, tem um torque máximo de 4 Nm e seu eixo de saída tem um diâmetro de 10 mm. A parte externa do redutor é apresentada na Fig. 3.13 e a parte interna na Fig. 3.14.

Figura 3.13 - Redutor Maxon³

Figura 3.14 - Planetário do redutor Maxon

Para fazer a medição da velocidade do motor é usado um *encoder* (referência 225778, Maxon Motor) de 3 canais (saídas auxiliares) com uma resolução de 500 contagens por volta, máxima velocidade mecânica é 24000 rpm e frequência máxima de operação de 200 kHz. Na Fig. 3.15 é apresentado o encoder usado.

Figura 3.15 - Encoder usado no motor maxon⁴

² Foto disponível em: <<http://www.directindustry.es/prod/maxon-motor/pequenos-motores-electricos-dc-alto-par-7173-1397587.html>>. Acesso em: 25/04/2014.

³ Foto disponível em: <<http://www.directindustry.com/prod/maxon-motor/planetary-gear-reducers-7173-1114121.html>>. Acesso em: 25/04/2014.

⁴ Foto disponível em: <http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8813576355870/14-319-EN.pdf>. Acesso em: 25/04/2014.

3.2.2 Epos2

A placa Epos2 embarcada no helvis III é de referência 50/5 (Fig. 3.16) e fabricada pela empresa Maxon motor. Segundo o fabricante (HARDWARE REFERENCE, 2013), “a Epos2 50/5 é um controlador inteligente muito flexível de tamanho pequeno e completamente digital que tem uma etapa de alta potência muito eficiente. Devido a suas características, a epos2 tem a capacidade de controlar motores DC com escovas e motores EC sem escovas mediante o uso de sensores Hall ou encoders digitais. O uso de uma comutação senoidal com o controle de vetores de espaço faz com que a Epos2 possa oferecer a possibilidade de controlar um motor EC sem escovas com uma ondulação de torque mínima e um baixo nível de ruído”.

Figura 3.16 - Placa EPOS2 50/5 (HARDWARE REFERENCE, 2013)

A placa Epos2 50/5 conta com três modos de operação: posição, velocidade e controle de corrente. Para ligá-los é necessária uma configuração pelo software Epos Studio ou por uma aplicação feita nas linguagens de programação C++, C# ou Visual Basic com ajuda da biblioteca “EposCmd”. Os protocolos de comunicação aceitos pela Epos2 são RS232, USB (serial) ou CAN. A alimentação mínima requerida é de 11 V e a máxima que suporta é 50 V, sendo o valor definido pela alimentação do motor, que deve estar nessa faixa de tensões.

3.2.3 Testes do sistema de propulsão

O primeiro teste do sistema de propulsão foi feito com o software Epos Studio e consistiu em deixar as rodas do helvis III suspensas e pegar informação do comportamento da velocidade do motor para gerar a curva da resposta do sistema com o controlador da Epos2. Com isto foi possível analisar algumas características do comportamento do sistema com o controlador da Epos2.

Figura 3.17 - Comportamento da velocidade no motor Maxon EC-4Pole

O software usado para coletar a informação da velocidade do motor e gerar o gráfico da resposta do sistema com o controlador foi o “*Epos Studio*”. Nesse teste trabalhou-se uma velocidade desejada do motor de 400 rpm (pré-determinada pelo software). Na Fig. 3.17, o gráfico da cor verde apresenta o comportamento ideal da velocidade do motor e o gráfico da cor azul apresenta o comportamento real. Desse teste é possível verificar que:

- A resposta do sistema com o controlador de velocidade é muito similar à resposta de um sistema criticamente amortecido (OGATA, 1998, p. 148) com uma entrada degrau.
- O tempo de subida (KUO, 1996, p. 386) foi de 700 ms, o tempo de acomodação (KUO, 1996, p. 386) foi 800ms e o sobre sinal (KUO, 1996, p. 386) foi nulo.

O segundo teste foi feito num campo de futebol onde o terreno é de grama. Este teste consistiu em movimentar (sem trajetória definida) o *helvis III* sobre o terreno e coletar a informação da velocidade do motor com uma aplicação feita em Visual Studio 2010. O objetivo do teste é analisar a curva de velocidade do motor (Fig. 3.18) quando existe um atrito maior entre as rodas do robô e o terreno.

Figura 3.18 - Comportamento da velocidade do motor no teste de velocidade

Da Fig. 3.18 obtém-se que o tempo de subida foi 2,7s e houve um incremento de 2s com respeito aos resultados do primeiro teste. O tempo de acomodação foi de 3,7s, levando a um incremento de 2,9s com respeito ao valor apresentado no primeiro teste. Embora os tempos de subida e acomodação apresentem um incremento, o sobressinal máximo foi zero e o comportamento do sistema de velocidade com o controlador da Epos2 continuou sendo similar à resposta ao degrau de um sistema criticamente amortecido.

Por último foi feita uma série de testes para conhecer a velocidade real do helvis III em diferentes velocidades do motor. Os testes consistiram em o veículo percorrer uma linha reta (comprimento = 14m) sobre um terreno de terra a uma determinada velocidade do motor. O tempo que o veículo levou para fazer o percurso foi tomado, com a finalidade de calcular a velocidade média do robô. O comprimento percorrido foi medido com uma trena (com erro estimado de 7mm) e o tempo com o software Visual Studio usando como referência o relógio interno do computador embarcado. Foi também usado o controlador fuzzy de orientação (descrito na seção 3.5) para que o veículo fizesse o percurso. No total foram 36 testes diferentes com três testes para cada velocidade do motor desde 1000rpm até 12000rpm. Os resultados são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Resultados dos testes de velocidade do helvis III num terreno de terra

Velocidade motor (rpm)	Velocidade helvis III (m/s)	Velocidade helvis III (Km/h)
1000	0,075	0,270
2000	0,193	0,695
3000	0,296	1,067
4000	0,394	1,420
5000	0,511	1,842
6000	0,596	2,146
7000	0,709	2,554
8000	0,819	2,951
9000	0,914	3,293
10000	1,021	3,676
11000	1,107	3,988
12000	1,232	4,435

Deste teste pode-se observar a velocidade máxima do helvis III sobre este terreno de terra de 1,232 m/s e a velocidade mínima de 0,075 m/s. Para conhecer como muda a velocidade do veículo quando se movimenta num terreno diferente a este de terra, foram feitos novos testes mas agora em terrenos de grama, terra-grama e asfalto (todos os terrenos usados são planos). Para cada terreno repetiram-se os mesmos 36 testes (3 testes para cada velocidade do motor) e os resultados são apresentados nas Tabela 3.2, Tabela 3.3 e Tabela 3.4.

Tabela 3.2 - Resultados dos testes de velocidade do helvis III num terreno de terra-grama

Velocidade motor (rpm)	Velocidade helvis III (m/s)	Velocidade helvis III (Km/h)
1000	0,072	0,260
2000	0,195	0,703
3000	0,300	1,082
4000	0,392	1,414
5000	0,532	1,916
6000	0,631	2,273
7000	0,721	2,597
8000	0,866	3,119
9000	0,918	3,304
10000	1,025	3,691
11000	1,103	3,972
12000	1,211	4,362

Tabela 3.3 - Resultados dos testes de velocidade do helvis III num terreno de grama

Velocidade motor (rpm)	Velocidade helvis III (m/s)	Velocidade helvis III (Km/h)
1000	0,079	0,285
2000	0,188	0,680
3000	0,313	1,127
4000	0,409	1,473
5000	0,512	1,844
6000	0,659	2,375
7000	0,744	2,680
8000	0,853	3,074
9000	0,980	3,529
10000	1,074	3,867
11000	1,200	4,320
12000	1,285	4,629

Tabela 3.4 – Resultados dos testes de velocidade do helvis III num terreno de asfalto

Velocidade motor (rpm)	Velocidade helvis III (m/s)	Velocidade helvis III (Km/h)
1000	0,077	0,279
2000	0,202	0,727
3000	0,308	1,110
4000	0,413	1,489
5000	0,505	1,819
6000	0,625	2,250
7000	0,739	2,662
8000	0,833	2,999
9000	0,945	3,403
10000	1,059	3,814
11000	1,156	4,162
12000	1,285	4,627

Figura 3.19 - Resultados dos testes de velocidade do helvis III nos quatro terrenos

A Fig. 3.19 apresenta as curvas dos resultados dos testes de velocidade do helvis III em terra (azul), terra-grama (vermelha), grama (amarela) e asfalto (preta). Segundo os resultados obtidos, o comportamento do veículo (em velocidades do motor menores a 4000 rpm) foi muito similar nos quatro terrenos. Em velocidades maiores a 4000 rpm, o veículo teve velocidades mais altas quando se movimentou na grama e foi mais lento quando se movimentou em terra.

Durante os testes no terreno de asfalto, a estimativa da velocidade também foi feita com leituras das coordenadas do GPS no sistema UTM (a projeção das coordenadas de latitude e longitude para o sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) usando como modelo o WGS84 (World Geodetic System 84) será descrita na seção 3.4.1.1.2). A finalidade foi de conhecer a diferença entre as duas medições e verificara confiabilidade da medição da velocidade com os dados fornecidos pelo GPS do IG500N. Para estimar velocidade do veículo com o GPS, fez-se a leitura do tempo inicial (hora do computador) e da coordenada do ponto inicial do percurso (x_1 e y_1) e quando o veículo chegava ao ponto final do percurso, era feita a leitura da posição atual do veículo (x_2 e y_2) e do tempo do computador. Para conhecer o tempo total que o veículo levou para fazer o percurso, se subtrai o tempo final medido com o tempo inicial e para conhecer a distância percorrida pelo veículo foi usada a Eq. 3.1.

$$d(m) = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} \quad (3.1)$$

Para apresentar os resultados obtidos da medição da velocidade do veículo com o GPS do IG500N, um gráfico comparativo entre os valores obtidos na Tabela 3.4 e os resultados obtidos neste teste (Tabela 3.5) é apresentado na Fig. 3.20.

Tabela 3.5 - Resultados da velocidade do helvis III medida com GPS

Velocidade motor (rpm)	Velocidade helvis III (Km/h)	Velocidade medida com GPS (Km/h)
1000	0,279	0,258
2000	0,727	0,710
3000	1,110	1,088
4000	1,489	1,554
5000	1,819	2,454
6000	2,250	2,133
7000	2,662	3,446
8000	2,999	3,219
9000	3,403	3,415
10000	3,814	4,056
11000	4,162	4,034
12000	4,627	4,704

Figura 3.20 - Resultados da velocidade do helvis III medida com GPS

As leituras do GPS foram coletadas com 8 satélites. Segundo os resultados, em velocidades do motor menores a 4000rpm a velocidade obtida com o GPS e a velocidade de referência (medida com a trena e o tempo do computador) apresentaram o mesmo comportamento. Em velocidades do motor maiores a 4000rpm a velocidade medida com o

GPS diferiu mais (a maior diferença foi de 0,22 m/s e ocorreu no teste feito com velocidade do motor igual a 5000 rpm) com respeito à velocidade de referência.

Como conclusão do último teste feito, obtém-se que a leitura da velocidade do veículo com o uso do GPS é um método ainda impreciso, já que depende da incerteza do receptor GPS que pode mudar segundo as condições climáticas no momento do teste.

3.3 Sistema de Esterçamento

O sistema de esterçamento do helvis III consiste de um servo motor DS8711 da empresa JR Americas ligado às rodas dianteiras do veículo através de um mecanismo de Ackerman para gerar um diferencial mecânico de esterçamento. Para esterçar o servo motor foi embarcada uma placa Arduino Mega 2560 que se comunica com o computador para receber o valor do esterçamento desejado e gerar um sinal PWM (*Pulse-Width Modulation*) para que o servo se posicione no ângulo desejado. A comunicação entre o computador e a placa Arduino é serial do tipo USB. Esclarece-se que o servo motor tem um controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) interno para a sua posição de modo que não é necessário manter um controle com a placa Arduino. Para a validação do sistema foram feitos alguns testes com o modelo de Ackerman (descrito na seção 5) e os resultados são apresentados na seção 5.3.

3.3.1 Servo motor DS8711

O DS8711 (Fig. 3.21) é um servo motor fabricado pela empresa JR Americas. Conta com engrenagens metálicas, alimentação de 4,8 – 6V, peso de 66,9g e suas dimensões são 40,13 x 20,8 x 39,62 mm. O DS8711 tem uma velocidade de esterçamento igual a 0,19s/60° para uma alimentação de 4,8V e 0,15 s/60° para uma alimentação de 6V.

Figura 3.21 - Servo-motor DS8711⁵

Para sua ativação conta com uma entrada digital que precisa receber um PWM entre 3 – 5V. Seu torque pode variar dependendo da alimentação, se a alimentação é 4,8 V o torque do servo motor é 24,98 Kg.cm e se a alimentação é 6V o torque será de 29,01 Kg.cm.

3.3.2 Arduino Mega 2560

A placa Arduino Mega 2560 é uma placa baseada no microcontrolador ATmega2560. A placa tem 54 pinos (pinos 0- 53) de entrada/saída digitais, das quais 14 podem ser usadas como saídas PWM (pinos 2 -13). Também tem 16 pinos de entradas analógicas (A0 – A15) e quatro portas de comunicação serial (Serial0 – Serial3) TTL (Transistor-Transistor Logic), uma memória flash de 256 KB, dos quais 8 KB são reservados para a inicialização da placa, uma memória SRAM de 8 KB e uma EPROM de 4 KB (ARTERO, 2013).

Figura 3.22 - Placa Arduino Mega 2560⁶

A placa Arduino Mega 2560 (Fig. 3.22) precisa de uma alimentação de 5 - 12 V que pode ser fornecida por um adaptador de tomada ou pelo cabo USB. Em cada pino usado como saída, a placa fornece uma corrente de até 40mA e a velocidade de seu processador é de 16

⁵ Fotografia disponível em: <<http://www.jramericas.com/72931/JRPS8711/?pcat=295>>. Acesso em 03/01/2015

⁶ Foto disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>>. Acesso em 24/04/2014

MHz. Para usar componentes externos aos embarcados no Arduino é possível adquirir módulos adicionais como o de Gps, IMU, *Xbee* ou *wi-fi*. A programação da placa é feita via USB e usa-se uma adaptação da linguagem C para Arduino.

Para fazer o controle do servo-motor o Arduino recebe a posição desejada do servo-motor vinda do computador embarcado no veículo. A comunicação entre o Arduino e o computador é feita através de uma das suas portas seriais e a taxa de transmissão usada é 9600. Uma vez recebida a posição desejada é gerado o PWM para posicionar o servo-motor, usando a biblioteca “servo.h”.

Para declarar o pino de saída do sinal PWM a instrução “servoMain.attach(10)” indica que o pino 10 é o pino de saída do sinal PWM. Depois é preciso usar “servoMain.write(Steering)” para indicara geração de um sinal PWM que defina um esterçamento no servo-motor equivalente ao valor da variável chamada “Steering”, cujo valor provém da comunicação serial (esterçamento desejado) com o computador embarcado.

3.4 Dispositivos embarcados no helvis III

Para que o helvis III possa percorrer autonomamente um percurso, é necessário que tenha a capacidade de conhecer sua localização, sua orientação e o terreno pelo qual está se movimentando. Para tanto, o robô tem embarcado um Sistema Miniatura de Navegação Inercial (IG500N - SBG System) e dois módulos LIDAR (UTM-30LX – Hokuyo). Além dos sensores, o helvis III conta com um computador embarcado (ARK-1120 – Advantech) e um roteador (TL-MR3040 – TPLINK) para acessar remotamente o computador.

3.4.1 Sistema Miniatura de Navegação Inercial IG500N

O IG500N (Fig. 3.23) é um sistema miniatura de navegação Inercial (INS) que tem uma Unidade de Medição Inercial (IMU) com 3 acelerômetros, 3 giroscópios e 3 magnetômetros, além de GPS, sensor de pressão atmosférica e sensor de temperatura. Segundo os dados fornecidos pelo fabricante, o IG500N tem um consumo de energia de 800mW, sua massa é de 44 g. Ele trabalha a temperaturas entre -40°C e 85°C, tem um filtro de 1kHz para imunidade

às vibrações, a exatidão do GPS é de 1m e tem três opções interface de comunicação: RS-232, CAN 2.0 A/B e USB (SBG SYSTEMS, 2007).

Figura 3.23 - Sistema Miniatura de Navegação Inercial (IG500N) da SBG Systems⁷

De acordo com o fabricante o IG500N é usado em aplicações marítimas, aeroespaciais e veiculares. Em aplicações veiculares o IG500N pode ser usado para conhecer as características da aceleração, trajetória, orientação, localização de um veículo enquanto faz um percurso (SBG SYSTEMS, 2007).

Para usar o sistema miniatura de navegação inercial, foi necessário programar uma biblioteca que permitiu trabalhar o IG500N a partir do Visual Studio usando a linguagem C#. Para isso, foi adaptada a biblioteca “*SBGLib*” fornecida pela SBG Systems para usar o IG500N com a linguagem C. A nova biblioteca “*SBGLib.dll*” permite coletar as leituras dos acelerômetros e giroscópio da IMU, do GPS e obter os valores dos ângulos *Roll*, *Yaw* e *Pitch*.

3.4.1.1 Receptor GPS do IG500N

Nesta seção, primeiro é feita uma breve descrição do Sistema de Posicionamento Global (GPS) e depois se apresenta os resultados das medidas com o receptor GPS do IG500N.

⁷ Foto disponível em: < <http://www.sbg-systems.com/products/ig500n-miniature-ins-gps> >. Acesso em 25/04/2014

3.4.1.1.1 Sistema de Posicionamento Global (GPS)

Na descrição da força aérea dos Estados Unidos (2014), “o Sistema de Posicionamento Global (GPS) é um serviço de sua propriedade, que oferece aos usuários informação sobre o posicionamento, navegação e tempo. O sistema GPS consiste de três segmentos: espacial, controle e de usuário. O segmento espacial é uma constelação de satélites (Fig. 3.24) que transmitem sinais de rádio para os usuários, são disponibilizados pelo menos 24 satélites durante 95% do tempo”⁸.

Figura 3.24 - Constelação de satélites do Sistema GPS⁹

O segmento de controle consiste numa rede global de instalações terrestres que rastreiam os satélites, monitoram suas transmissões, realizam análises e encaminham comandos e dados para a constelação de satélites. As instalações terrestres do segmento de controle consistem de estação de controle mestre, estação de controle mestre alternativo, 12 antenas de comando e controle, e 16 locais de monitoramento¹⁰. As localizações de todas as estações são apresentadas na Fig. 3.25.

⁸ Tradução da informação disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/>>. Acesso em: 04/01/2015.

⁹ Foto disponível em: <<http://www.gps.gov/multimedia/images/constellation.jpg>>. Acesso em 04/01/2015

¹⁰ Tradução da informação disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/control/>>. Acesso em: 04/01/2015.

Figura 3.25 - Estações do segmento de controle do sistema GPS¹¹

Por último o segmento de usuário são os equipamentos receptores do GPS que recebem os sinais dos satélites GPS e processa-os para calcular a posição tridimensional e a hora precisa¹².

3.4.1.1.2 Medidas com o GPS do IG500N

Segundo a folha de dados, o IG500N possui 16 canais, uma taxa de atualização de 4 Hz e um tempo de aquisição para começo frio <1s e para começo quente <29s. O GPS usa a banda de frequência L1 (1575,42 MHz) e seu tipo de sinal é código C/A (coarse/Acquisition). A precisão horizontal CEP da antena GPS é de 2,5m e a vertical SEP é de 5m.

A fim de verificar os valores da precisão horizontal CEP (*Circular Error Probability*) e da precisão vertical SEP (*Spherical Error Probability*) do GPS do IG500N, fez-se a leitura (duas vezes por dia) das coordenadas de um ponto fixo (Fig. 3.26) durante oito dias (10 a 17 de julho de 2014). Optou-se por coletar as leituras duas vezes ao dia para observar a influência da temperatura nas leituras do receptor GPS, por isso as primeiras leituras foram coletadas de 10 às 11 horas da manhã (hora com valores de temperaturas altas) e as segundas leituras foram coletadas de 5 às 6 horas da tarde (hora com valores de temperaturas baixas). As leituras foram feitas durante vários dias, a fim de observar o deslocamento da posição média de cada dia com respeito ao primeiro. A localização do ponto fixo foi em

¹¹ Foto disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/control/>>. Acesso em 04/01/2015.

¹² Tradução da informação disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/>>. Acesso em: 04/01/2015.

frente ao laboratório NEPAS do campus I da USP-SC. O local escolhido não conta com um ponto de coordenadas conhecidas, mas as análises concentram-se na precisão do GPS, não na exatidão. Para conhecer a exatidão do receptor pode-se seguir o procedimento descrito neste capítulo mas com leituras coletadas num ponto de coordenadas geo-referenciadas.

Figura 3.26 - Ponto fixo escolhido para a coleta da informação usada na caracterização do IG500N

Além da informação da latitude e da longitude do ponto fixo, foi coletada a informação referente ao número de satélites usados, a qualidade estimada do sinal de cada satélite (saúde) e a temperatura do sensor. Todas estas informações foram armazenadas em arquivos de texto (.txt).

A fim de conhecer os valores da precisão horizontal e vertical do receptor GPS do IG500N, se fizeram análises estatísticas da informação (média, desvio padrão e erro padrão) usando uma rotina feita em Matlab chamada “*Displacementmeters*” (Fig.3.27). A rotina faz uma projeção de coordenadas WGS84 para coordenadas UTM, já que as coordenadas obtidas com o receptor GPS do IG500N são em graus (coordenadas do sistema WGS84) e deseja-se trabalhar seu valor em metros (coordenadas do sistema UTM) para logo fazer a análise estatística e finalmente conhecer o valor CEP e SEP do receptor GPS. Essa aplicação tem um gráfico que apresenta os deslocamentos dos dias 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 com respeito ao primeiro dia. Também é possível visualizar no gráfico as barras do desvio padrão (cor rosa) e do erro padrão da media (cor azul) para cada dia.

Figura 3.27 - Aplicação para análise estatística

Para fazer o algoritmo de conversão em Matlab, é preciso lembrar que o sistema UTM tem as coordenadas em metros, que expressam a distância existente entre a localização do receptor GPS e algum dos 60 fusos UTM (coordena X) e a distância entre o receptor GPS e o equador (coordenada Y). Segundo Meneguette (2009), algumas características do sistema UTM (Fig. 3.28) são:

Por um acordo geográfico mundial, os fusos UTM são de 6° de largura, começando no fuso 180° a 174° W Gr. e continuando para leste, resultando em 60 fusos de 6°. A área abrangida pelos fusos é limitada ao norte e ao sul pelos paralelos 84°N e 80°S, respectivamente. Trata-se do sistema de projeção mais utilizado no mundo, suas especificações são definidas a partir das características da CIM (Carta Internacional do Mundo ao Milionésimo), foi adotado pelo Brasil em 1955 e o território brasileiro é coberto por 8 fusos. Para evitar coordenadas negativas, é atribuído o valor 500.000 m ao meridiano central. Para o eixo N, a referência é o equador e o valor atribuído (no hemisfério sul) é igual a 10.000.000 m.

Figura 3.28 - Sistema UTM¹³

O algoritmo de conversão faz uso das equações dadas por Dutch (2003) que são uma modificação das equações originais geradas pelo exército dos Estados Unidos no ano 1973. Segundo Dutch (2003), as coordenadas do sistema UTM (X e Y) são definidas como:

$$X = K_4 p + K_5 p^3 \quad (3.2)$$

$$Y = K_1 + K_2 p^2 + K_3 p^4 \quad (3.3)$$

Onde:

$$K_1 = K_0 s \quad (3.4)$$

$$K_2 = \frac{K_0 n_u \sin(2lat)}{4} \quad (3.5)$$

$$K_3 = \left(\frac{K_0 n_u \sin(lat) \cos^3(lat)}{24} \right) (5 - \tan^2(lat) + 9e'^2 \cos^2(lat) + 4e'^2 \cos^4(lat)) \quad (3.6)$$

$$K_4 = K_0 n_u \cos(lat) \quad (3.7)$$

¹³ Foto disponível em: <<http://arlete.meneguette.zip.net/repcarto/>>. Acesso em 04/01/2015

$$K_5 = \left(\frac{K_0 n_u \cos^3(lat)}{6} \right) (1 - \tan^2(lat) + e'^2 \cos^2(lat)) \quad (3.8)$$

$$p = (long - long_0) \quad (3.9)$$

K_0 é o fator de escala no meridiano central (MC), n_u é o raio de curvatura da terra perpendicular ao plano meridiano, lat é a latitude da coordenada expressa no WGS84, $long$ é a longitude da coordenada expressa no WGS84 (no formato grau, décimos de grau), $long_0$ é o meridiano central da área e s é o comprimento do arco de meridiano desde o Equador até uma latitude geográfica. As variáveis e'^2 , n e n_u dependem do raio equatorial (a), raio polar (b) e excentricidade da seção transversal elíptica da terra (e), e são definidas como:

$$n = \frac{a-b}{a+b} \quad (3.10)$$

$$n_u = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2(lat)}} \quad (3.11)$$

$$e'^2 = \left(\frac{ea}{b} \right)^2 \quad (3.12)$$

Os valores do raio equatorial (a), do raio polar (b) e da excentricidade da seção transversal elíptica da terra (e) são:

$$a = 6378137m \quad (3.13)$$

$$b = 6356752,3142m \quad (3.14)$$

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} = 0,08 \quad (3.15)$$

O valor do meridiano central da área ($long_0$) depende da localização do receptor GPS. Como este trabalho foi feito na cidade de São Carlos no estado de São Paulo (Brasil), o meridiano usado foi o fuso 23 do sistema UTM que passa pela cidade de São Paulo no Brasil. O valor do fuso 23 é -45° (FERNANDES). Por último tem-se que o valor de “ s ” pode ser obtido mediante a fórmula de Helmert (KAWASE, 2011):

$s \cong$

$$\frac{a}{1+n} \left[\left(1 + \frac{n^2}{4} + \frac{n^4}{64} \right) lat - \frac{3}{2} \left(n - \frac{n^3}{8} \right) \sin(2lat) + \frac{15}{16} \left(n^2 - \frac{n^4}{4} \right) \sin(4lat) - \frac{35}{48} n^3 \sin(6lat) + \frac{315}{512} n^4 \sin(8lat) \right] \quad (3.16)$$

Para estimar o erro da projeção UTM feita, comparou-se com as projeções online fornecidas em 3 páginas *web*. O erro com respeito à primeira *web*¹⁴ (projeção feita por Steven Dutch da Universidade de Wisconsin) foi de 0,0583 m para a coordenada X e 0,059m para a coordenada Y. O erro com respeito à segunda *web*¹⁵ (projeção feita por Chuck Tylor) foi de 0,02576 m para a coordenada X e 0,004731 m para a coordenada Y. Finalmente o erro com respeito à terceira *web*¹⁶ (projeção feita por APSalin) foi de 0,004911 m para a coordenada X e 0,004914 m para a coordenada Y.

Além da rotina para as análises estatísticas da informação, foi feita uma segunda aplicação em Matlab chamada “*conversorutm*” (Fig. 3.29) para visualizar a dispersão das leituras em coordenadas UTM (gráfico da cor azul), a informação referente aos satélites usados e a saúde de cada um (tabela), a média das coordenadas X e Y (primeira e segunda caixa de texto da parte inferior), a média da temperatura lida pelo sensor (terceira caixa de texto da parte inferior) e a média do número de satélites usados durante a coleta dos dados (quarta caixa de texto da parte inferior). Os botões nomeados com “*Day 1*” até “*Day 8*” permitem visualizar os resultados do dia escolhido. Uma vez escolhido o dia, os botões nomeados “*10 am*” e “*5 pm*” permitem visualizar os resultados da hora e do dia escolhidos.

¹⁴Projeção online disponível em: < <http://www.uwgb.edu/dutchs/usefuldata/ConvertUTMNoOZ.HTM>>. Acesso em: 15/01/2015.

¹⁵ Projeção online disponível em: < <http://home.hiwaay.net/~taylorc/toolbox/geography/geoutm.html>>. Acesso em: 15/01/2015.

¹⁶ Projeção online disponível em: < <http://www.apsalin.com/convert-geodetic-to-universal-transverse-mercator.aspx>>. Acesso em: 15/01/2015.

Figura 3.29 - Aplicação para a visualização da informação coletada

Para visualizar o comportamento das leituras coletadas, os gráficos foram agrupados em duas figuras. A Fig. 3.30 apresenta o comportamento diário das leituras coletadas das 10 – 11 a.m. e a Fig. 3.31 das leituras das 5 – 6 p.m.

Na Fig. 3.30 e Fig. 3.31 é visualizada a posição média das leituras coletadas, a dispersão dos dados coletados diariamente e o deslocamento existente entre a posição média de um dia com respeito a outro. Por exemplo, para o quinto dia entre as 5 – 6 p.m. o intervalo das leituras sobre o eixo X foi de 5,3m e o intervalo das leituras sobre o eixo Y foi 8,7m. A posição média das leituras foi $X=200747,01\text{m}$ e $Y=7563553,321\text{m}$. Fazendo uma comparação com o sexto dia à mesma hora, a posição média do quinto dia teve um deslocamento de 2,3m para o lado leste da posição média do sexto dia (eixo X) e um deslocamento de 2,9 m para o sul da posição média do sexto dia (eixo Y).

Como resultado pode-se ver, nas Figs. 3.30e 3.31, que o segundo dia, das 10 – 11 a.m., apresentou o menor intervalo sobre o eixo X com um valor de 4,7m e o dia com o maior intervalo foi o quarto, das 10 – 11 a.m., com um valor de 26m. O quinto dia, das 5 – 6 p.m., e o oitavo dia, das 5 – 6 p.m., foram os que apresentaram o menor intervalo sobre o eixo Y, com um valor igual a 8m e o sexto dia, das 5 – 6 p.m., foi o que apresentou o maior intervalo sobre o eixo Y, com um valor de 37m.

Figura 3.30 - Comportamento diário das leituras coletadas das 10 – 11 a.m.

Figura 3.31 - Comportamento diário das leituras coletadas das 5 – 6 p.m.

Foram traçados dois gráficos de deslocamento para os dias 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 com respeito ao primeiro dia, nos quais se apresentam barras para o desvio padrão e para o erro padrão da média das leituras coletadas. A Fig. 3.32 apresenta as barras de erro, o desvio padrão das coordenadas X e Y e o erro padrão da média de cada dia para os dados coletados das 10 – 11 a.m.. A Fig. 3.33 apresenta a mesma informação para os dados coletados das 5 – 6 p.m.

Figura 3.32 - Diagrama de deslocamento com barras de erro para o erro e desvio padrão das leituras coletadas das 10 – 11 a.m.

Figura 3.33 - Diagrama de deslocamento com barras de erro para o erro e desvio padrão das leituras coletadas das 5 – 6 p.m.

A Fig. 3.32 mostra que o maior desvio padrão para as leituras coletadas das 10 -11 a.m. ocorreu no quarto dia (2,2 m para X e 3,27 m para Y) e o menor no segundo dia (0,83 m para X e 1,7 m para Y). Para as leituras coletadas das 5 – 6 p.m. (Fig. 3.33) o maior desvio padrão ocorreu no sexto dia (3,81 m para X e 5,73 m para Y) e o menor no oitavo dia (1,24 m para X e 1,22 m para Y). A informação dos desvios padrão das leituras coletadas é apresentada na Tabela 3.6 e na Tabela 3.7. Nestas tabelas também estão: a média dos valores da temperatura interna do sensor, a temperatura ambiente, a média do número de satélites usados e a saúde média de cada um.

Tabela 3.6 - Resultados da informação coletada nos oito dias durante as 10 – 11 a.m.

Dia	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	Temperatura média do sensor (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Média do número de satélites usados	Saúde média dos satélites usados
1	1,092	2,060	41,44	18	10	41,43
2	0,838	1,701	41,26	17	10	41,68
3	1,314	1,437	41,92	15,8	9	41,72
4	2,201	3,273	40,35	20	8	41,05
5	2,001	2,826	40,16	18	9	40,55
6	1,547	2,215	38,77	15	9	41
7	1,682	2,640	41,27	18	9	41,72
8	1,598	2,181	42,89	20	9	41,54
Médias	1,534	2,292	41,007	17,725	9,125	41,33

Tabela 3.7 - Resultados da informação coletada nos oito dias durante as 5 – 6 p.m.

Dia	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	Temperatura média do sensor (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Média do número de satélites usados	Saúde média dos satélites usados
1	2,047	1,995	34,11	18	9	42,36
2	1,200	2,156	34,25	20	9	42,4
3	2,360	2,584	37,52	23	9	42,56
4	1,109	1,699	37,65	23	9	42,37
5	1,022	1,539	37,46	23	10	41,51
6	3,815	5,738	36,96	24	8	42,38
7	0,851	1,622	39,17	26	10	40,86
8	1,244	1,228	40,21	26	10	40,91
Médias	1,706	2,320	37,17	22,88	9,25	41,92

Da informação apresentada nas Tabelas 3.6 e 3.7 pode-se observar que o maior desvio padrão ocorreu nos dias onde a média do número de satélites usados foi de 8 satélites, como o sexto dia das 5 – 6 p.m., também pode-se ver que os menores valores do desvio padrão aconteceram nos dias onde a média do número de satélites usados foi 10. Segundo os resultados, a temperatura não afeta os valores dos desvios padrão das leituras coletadas, isto se comprova comparando os resultados obtidos no oitavo dia das 5 – 6 p.m. com os resultados obtidos no primeiro dia na mesma hora. O desvio padrão em X e Y do primeiro dia foi maior ao desvio padrão em X e Y do oitavo dia, mas a temperatura foi maior no oitavo dia.

O cálculo dos valores das precisões horizontal (CEP) e vertical (SEP) é apresentado a seguir. Segundo Novatel (2003) o valor da precisão horizontal é definido como:

$$CEP = 0,56\sigma_x + 0,63\sigma_y \quad (3.17)$$

Onde σ_x é o valor do desvio padrão da coordenada X e σ_y é o valor do desvio padrão da coordenada Y. Da Tabela 3.6, a média do valor do desvio padrão de X para os dados coletados das 10 – 11 a.m. é 1,534m e da Tabela 3.7, a média do valor do desvio padrão de X para os dados coletados das 5 – 6 p.m. é 1,706m. Então, para o cálculo do CEP toma-se como o desvio padrão para a coordenada X o maior valor ($\sigma_x=1,706m$). Da mesma forma o valor do desvio padrão considerado para a coordenada Y ($\sigma_y=2,320m$). Obtido os valores dos desvios padrão para as coordenada X e Y, obtém-se que o valor da precisão horizontal (CEP) é:

$$CEP = 0,56(1,706m) + 0,63(2,32m) = 2,416m \quad (3.18)$$

Obtido o valor da precisão horizontal, pode-se calcular o valor da precisão vertical (SEP). Segundo Novatel (2003), o valor da precisão vertical é:

$$SEP = 2CEP \quad (3.19)$$

Então o valor da precisão vertical do receptor GPS do IG500N é:

$$SEP = 2(2,416m) = 4,833m \quad (3.20)$$

Os valores achados nesta caracterização são muito similares aos valores obtidos dos dados do IG500N fornecidos pelo fabricante. A fim de analisar o efeito do número de satélites usados sobre o valor da precisão horizontal (CEP) e da precisão vertical (SEP), filtrou-se a informação coletada de acordo com a quantidade de satélites usados. Os resultados destes filtros são apresentados na Tabela 3.8 e na Tabela 3.9.

Tabela 3.8 - Resultados dos filtros aplicados à informação coletada das 10 – 11 a.m.

Nº de satélites	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	Dados usados (%)
Sem filtro	1,534	2,292	100
8 ou mais	1,051	1,469	89,1
9 ou mais	1,039	1,454	86,5
10 ou mais	0,961	1,395	72,2

Tabela 3.9 - Resultados dos filtros aplicados à informação coletada das 5 – 6 p.m.

Nº de satélites	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	Dados usados (%)
Sem filtro	1,706	2,320	100
8 ou mais	1,327	2,116	92,8
9 ou mais	1,031	1,862	83,9
10 ou mais	1,073	1,735	63,0

Dos resultados apresentados na Tabela 3.8 e na Tabela 3.9 pode-se observar como os valores dos desvios padrão das coordenadas X e Y foram menores à medida que o número de satélites usados foi maior. Quando só foi considerada a informação coletada com 9 ou mais satélites usados, o desvio padrão da coordenada X melhorou 32,28% e o desvio padrão da coordenada Y melhorou 36,55% só com uma perda de informação (refere-se a perda de informação para todos os dados que foram descartados pelo programa do filtro no momento da análise estatística) igual a 14% para a informação coletada das 10 – 11 a.m.. Para a informação coletada das 5 – 6 p.m. observa-se uma melhora de 39,58% do desvio padrão da coordenada X e uma melhora de 19,76% do desvio padrão da coordenada Y só com uma perda de informação igual a 17%. Disto é possível propor que, no momento de usar o receptor GPS do IG500N, sejam consideradas as leituras só quando o número de satélites usados é maior ou igual a 9. Não se aconselha um número menor de satélites usados pelo resultado do desvio padrão das coordenadas X e Y.

Tabela 3.10 - Valores CEP e SEP dos filtros aplicados à informação coletada das 10 – 11 a.m.

Nº de satélites	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	CEP (m)	SEP (m)
Todos	1,534	2,292	2,234	4,468
8 ou mais	1,051	1,469	1,470	2,939
9 ou mais	1,039	1,454	1,454	2,908
10 ou mais	0,961	1,395	1,375	2,750

Tabela 3.11 - Valores CEP e SEP dos filtros aplicados à informação coletada das 5 – 6 p.m.

Nº de satélites	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	CEP (m)	SEP (m)
Todos	1,706	2,320	2,348	4,70
8 ou mais	1,327	2,116	2,013	4,03
9 ou mais	1,031	1,862	1,694	3,39
10 ou mais	1,073	1,735	1,642	3,28

Dos resultados apresentados na Tabela 3.10 e na Tabela 3.11, vê-se que o valor CEP para os dados coletados (com 9 ou mais satélites usados) das 10 – 11 a.m. teve uma redução de 1m. Para os dados coletados das 5 – 6 p.m. (com a mesma quantidade de satélites) houve uma redução de 0,8m. O valor SEP também teve uma redução do 1,8m para os dados coletados (com 9 ou mais satélites usados) das 10 – 11 a.m. e para os dados coletados (com a mesma quantidade de satélites) das 5 – 6 p.m. houve uma redução de 1,5m. Isto confirma a melhora da precisão horizontal e da vertical do receptor GPS como uso de 9 ou mais satélites.

Para complementar a caracterização do receptor GPS do IG500N, repetiu-se o teste feito na cidade de São Carlos – SP (Brasil), mas agora na cidade de Villavicenio – Meta (Colômbia). Foram coletadas as leituras das coordenadas de um ponto fixo (duas vezes por dia) durante 6 dias (28 – 30 de setembro e 1 – 3 de outubro de 2014). As horas escolhidas foram as mesmas do Brasil (10 – 11 a.m. e 5 – 6 p.m.) e foram coletadas com a mesma aplicação feita em Visual Studio com a linguagem C#. Com o algoritmo de conversão feito em Matlab, as leituras foram projetadas no sistema UTM. O comportamento das leituras (no sistema UTM) é apresentado na Fig. 3.34 (leituras coletadas das 10 – 11 a.m.) e na Fig. 3.35 (leituras coletadas das 5 – 6 p.m.).

Figura 3.34 - Comportamento das leituras coletadas na Colômbia das 10 – 11 a.m.

Figura 3.35 - Comportamento das leituras coletadas na Colômbia das 5 – 6 p.m.

Do comportamento das leituras coletadas tem-se que o menor intervalo sobre o eixo X foi no segundo dia, das 5 – 6 p.m., com um valor de 11m e o maior intervalo no quinto dia, das 10 -11 a.m., com um valor de 78m. Sobre o eixo Y as leituras apresentaram o menor intervalo no quarto dia, das 10 – 11 a.m., com um valor de 15m e o maior intervalo no quinto dia, das 5 – 6 p.m., com um valor de 127m. Fazendo a comparação com a informação coletada no Brasil, o valor dos intervalos foram maiores nos dados coletados na Colômbia. Assim como no Brasil, na Colômbia tem-se a informação da média da temperatura do sensor, da temperatura ambiente, a média do número de satélites usados e a saúde média de cada um. Esta informação é apresentada na Tabela 3.12 e na Tabela 3.13.

Tabela 3.12 - Resultados da informação coletada na Colômbia das 10 – 11 a.m.

Dia	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	Temperatura média do sensor (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Média do número de satélites usados	Saúde média dos satélites usados
1	3,043	5,743	54,37	29	8	40,41
2	4,357	4,103	56,86	31	7	38,75
3	2,960	4,508	54,86	29	6	38,78
4	4,096	2,958	56,92	30	8	41,73
5	7,224	10,293	49,98	28	6	38,16
6	4,405	3,856	49,78	26	7	38,36
Médias	4,347	5,243	53,80	28,83	7	39,37

Tabela 3.13 - Resultados da informação coletada na Colômbia das 5 – 6 p.m.

Dia	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	Temperatura média do sensor (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Média do número de satélites usados	Saúde média dos satélites usados
1	3,116	5,658	38,21	25	6	41,08
2	2,429	5,614	45,94	33	7	40,89
3	1,979	3,304	41,3	28	7	38,29
4	3,145	4,703	43,52	30	7	41,54
5	2,868	5,294	42,19	28	7	40,76
6	4,132	4,286	41,47	29	7	37,36
Médias	2,945	4,810	42,11	28,83	6,8	39,99

Dos resultados apresentados na Tabela 3.12 e na Tabela 3.13 vê-se que o desvio padrão obtidos para os dados coletados nas duas horas durante os seis dias foi maior na Colômbia com respeito aos valores obtidos com os dados coletados no Brasil. Por exemplo, para os dados coletados na Colômbia das 10 – 11 a.m. o desvio padrão em X teve um incremento de

2,9m e o desvio padrão em Y teve um incremento de 1m com respeito aos valores obtidos no Brasil.

Também se observa que a média do número de satélites usados em cada dia não foi maior a 8 satélites, enquanto no Brasil houveram dias com uma média de 10 satélites usados durante a coleta dos dados. O maior valor do desvio padrão ocorreu no quinto dia, das 10 – 11 a.m., com uma média do número de satélites usados igual a 6 e o menor valor do desvio padrão foi no terceiro dia, das 5 – 6 p.m., onde a média do número do satélites usados foi 7.

Para observar os deslocamentos dos dias com respeito ao primeiro dia os resultados são apresentados na Fig. 3.36 (para os valores coletados das 10 – 11 a.m.) e na Fig. 3.37 (para os valores coletados das 5 – 6 p.m.). As figuras também mostram as barras para o desvio padrão (cor rosa) e para o erro padrão da média (cor azul).

Figura 3.36 - Gráfico de deslocamento com barras de erro para o erro e desvio padrão das leituras coletadas na Colômbia das 10 – 11 a.m.

Figura 3.37 - Gráfico de deslocamento com barras de erro para o erro e desvio padrão das leituras coletadas na Colômbia das 5 – 6 p.m.

Na Fig. 3.36 e na Fig. 3.37 pode-se visualizar que o desvio padrão de maior valor ocorreu no quinto dia das 10 – 11 a.m., também se vê que os deslocamentos são maiores para os dados coletados das 5 – 6 p.m.. O menor valor do desvio padrão se apresentou no terceiro dia das 5 – 6 p.m.

Da mesma forma que nas medidas feitas no Brasil, foram coletadas as leituras da temperatura interna do sensor e da temperatura do ambiente para observar o efeito destas nas leituras do receptor GPS. Como resultado observa-se que estas temperaturas não afetam a precisão do receptor GPS, isto pode ser observado na Tabela 3.13, onde a menor temperatura (38,21°C) ocorreu no primeiro dia e a maior temperatura (45.94°C) no segundo. Embora a temperatura do primeiro dia tenha sido menor, o desvio padrão das coordenada X e Y foi maior (3,11 m para X e 5,65 m para Y) com respeito ao desvio padrão obtido das leituras do segundo dia (2,42 m para X e 5,61 m para Y).

Para obter o valor da precisão horizontal (CEP) e o valor da precisão vertical (SEP), a Eq. 3.17 e a Eq.3.19 foram novamente usadas e os valores das médias do desvio padrão são apresentados na Tabela 3.12 e Tabela 3.13. Como existem dois valores de médias do desvio padrão para cada coordenada, foi escolhido o máximo valor de cada ($\sigma_x=4,34m$ e $\sigma_y=5,24m$).

$$CEP = 0,56(4,34m) + 0,63(5,24m) = 5,57m \quad (3.21)$$

$$SEP = 2(5,24m) = 11,15m \quad (3.22)$$

O valor do CEP obtido na coleta de dados na Colômbia é 3,07m maior que o valor especificado para o receptor GPS do IG500N e o valor do SEP obtido dos dados coletados na Colômbia é 6,15m. Isto deve ter sido efeito da baixa quantidade de satélites utilizados durante a coleta dos dados (não maior a 8 satélites em média). Para analisar o efeito da quantidade de satélites usados sobre os valores dos desvios padrão, da precisão horizontal e da precisão vertical, a informação coletada foi filtrada com respeito à quantidade de satélites usados e os resultados obtidos destes filtros são apresentados na Tabela 3.14 e na Tabela 3.15.

Tabela 3.14 - Resultados dos filtros aplicados à informação coletada na Colômbia das 10 – 11 a.m.

Nº de satélites	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	Dados usados (%)
Sem filtro	4,347	5,243	100
8 ou mais	3,373	2,948	44,196
9 ou mais	2,327	1,870	21,732
10 ou mais	1,513	1,865	21,528

Tabela 3.15 - Resultados dos filtros aplicados à informação coletada na Colômbia das 5 – 6 p.m.

Nº de satélites	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	Dados usados (%)
Sem filtro	2,945	4,809	100
8 ou mais	2,562	4,011	35,066
9 ou mais	2,010	3,028	9,135
10 ou mais	1,280	1,850	7,083

Dos resultados obtidos dos filtros, pode-se ver que os valores dos desvios padrão tiveram uma redução, mas a perda de informação foi maior que 50%. Considerando-se só os valores coletados com um número de satélites igual ou maior a 8, o desvio padrão de X para as 10 – 11 a.m. tem uma redução do 22,39%, mas a perda de informação foi 55%, ou seja,

que mais da metade da informação foi coletada com menos de 8 satélites usados. Considerando-se a informação coletada com 10 ou mais satélites usados, a redução é maior, mas a perda de dados é maior que 80% da informação coletada. A Tabela 3.16 e a Tabela 3.17 apresentam como fica a redução do valor da precisão horizontal e o valor da precisão vertical quando é aplicado cada um dos filtros à informação coletada

Tabela 3.16 - Valores CEP e SEP dos filtros aplicados à informação coletada na Colômbia das 10 – 11 a.m.

Nº de satélites	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	CEP (m)	SEP (m)
Sem filtro	4,347	5,243	5,74	11,48
8 ou mais	3,374	2,948	3,75	7,49
9 ou mais	2,328	1,871	2,48	4,96
10 ou mais	1,514	1,865	2,02	4,05

Tabela 3.17 - Valores CEP e SEP dos filtros aplicados à informação coletada na Colômbia das 5 – 6 p.m.

Nº de satélites	Desvio Padrão de X (m)	Desvio Padrão de Y (m)	CEP (m)	SEP (m)
Sem filtro	2,945	4,809	4,68	9,36
8 ou mais	2,562	4,011	3,96	7,92
9 ou mais	2,010	3,028	3,03	6,07
10 ou mais	1,280	1,850	1,88	3,77

Pode-se observar na Tabela 3.16 e na Tabela 3.17 que a redução dos valores CEP e SEP depende do incremento do número de satélites usados no momento da coleta de dados, embora a perda de informação aumente bastante. Pelo fato, fica mais difícil para a coleta de dados em Villavicencio – Meta (Colômbia) usar a quantidade de satélites como parâmetro de melhora dos valores CEP e SEP dada a perda elevada de informação coletada (mais de 50%).

3.4.1.2 Unidade de Medida Inercial (IMU) do IG500N

Nesta seção se apresenta uma breve descrição do conceito de uma IMU (Unidade de Medida Inercial) e depois se apresenta os resultados obtidos da caracterização da IMU do IG500N.

3.4.1.2.1 Unidade de Medida Inercial (IMU)

Segundo Gil (2006, p. 16, tradução própria), uma Unidade de Medida Inercial (IMU) é um sistema fechado que é usado para detectar a orientação, localização e movimento. Usa uma combinação de acelerômetros e sensores de velocidade angular (giroscópios) para conhecer como o sensor se movimenta ou qual é a sua posição. Geralmente as IMU's detectam a aceleração e as mudanças da orientação instantânea (ângulos *roll*, *pitch* e *yaw*).

Segundo Groves (2008), uma IMU conta com pelo menos 3 acelerômetros, 3 giroscópios, um processador, uma memória de parâmetros de calibração, um sensor de temperatura e uma fonte de tensão. São usadas para medir posição, velocidade, aceleração e os ângulos de Euler. Algumas IMU's tem sensores inerciais adicionais para ajudar no caso de falhas. O esquema da IMU é apresentado na Fig. 3.38.

Figura 3.38 - Esquemático de uma IMU (GROVES, 2008)

O processador da IMU realiza o tratamento de sinais provenientes dos acelerômetros e giroscópios. Estas saídas são diferenças de potencial ou corrente e são convertidas em unidades de força e de velocidade angular. O processador também compensa erros relacionados à variação de temperatura. Para isso o sensor interno de temperatura é utilizado e os valores de correção são armazenados na memória interna da IMU (GROVES, 2008).

3.4.1.2.2 Caracterização da IMU do IG500N

Para a caracterização da IMU do IG500N um primeiro teste consistiu em coletar as leituras dos ângulos *pitch*, *roll* e *yaw* de uma posição fixa do sensor, com o objetivo de medir como as leituras mudam com o tempo sem movimentar o sensor (teste estático). Este teste foi repetido durante cinco dias (duas vezes por dia) na mesma posição, para ver como as leituras mudam de um dia para outro ou em duas horas diferentes de um mesmo dia. Estas leituras foram coletadas nos mesmos horários os dados dos testes do receptor GPS e essa é a razão da escolha do horário. O comportamento das leituras do ângulo *Roll* durante os 5 dias é apresentado em dois gráficos, o primeiro (Fig. 3.39) apresenta as leituras coletadas das 10 – 11 a.m. e o segundo (Fig. 3.40) apresenta as leituras coletadas das 5 – 6 p.m. A Fig. 3.41 (leituras coletadas das 10 – 11 a.m.) e a Fig. 3.42 (leituras coletadas das 5 – 6 p.m.) apresentam o comportamento das leituras do ângulo *Pitch*. Finalmente, a Fig. 3.43 (leituras coletadas das 10 – 11 a.m.) e a Fig. 3.44 (leituras coletadas das 5 – 6 p.m.) apresentam o comportamento das leituras do ângulo *Yaw*.

Figura 3.39 - Leituras do ângulo *Roll* coletadas das 10 – 11 a.m.

Figura 3.40 - Leituras do ângulo *Roll* coletadas das 5 – 6 p.m.

Figura 3.41 - Leituras do ângulo *Pitch* coletadas das 10 – 11 a.m.

Figura 3.42 - Leituras do ângulo *Pitch* coletadas das 5 – 6 p.m.

Figura 3.43 - Leituras do ângulo *Yaw* coletadas das 10 – 11 a.m.

Figura 3.44 - Leituras do ângulo *Yaw* coletadas das 5 – 6 p.m.

Nas figuras anteriores pode-se ver para as leituras do ângulo *Yaw* um comportamento similar nos dois primeiros dias, mas um deslocamento de 2° com respeito ao comportamento das mesmas leituras nos dias 3, 4 e 5. Também observa-se que os comportamentos das leituras do ângulo *Pitch* foram similares durante as coletas feitas nos cinco dias e ficaram dentro de uma faixa não maior a 2° . O comportamento das leituras do ângulo *Roll* foi similar nas leituras coletadas das 10 – 11 a.m., mas as leituras coletadas das 5 – 6 p.m. no dia 4 apresentaram um deslocamento de 1° com respeito aos demais dias. As médias das leituras coletadas dos ângulos *Pitch*, *Roll* e *Yaw* são apresentadas na Tabela 3.18 (para as leituras coletadas das 10 – 11 a.m.) e na Tabela 3.19 (para as leituras coletadas das 5 – 6 p.m.).

Tabela 3.18 - Média das leituras dos ângulos *Pitch*, *Roll* e *Yaw* para a informação coletada das 10 – 11 a.m.

Dia	Média do ângulo Roll ($^\circ$)	Média do ângulo Pitch ($^\circ$)	Média do ângulo Yaw ($^\circ$)
1	0,829	-1,02	-62,36
2	0,514	-0,89	-62,13
3	1,09	-0,84	-60,50
4	-0,301	-1,38	-60,09
5	0,636	-1,51	-60,43

Tabela 3.19 - Média das leituras dos ângulos *Pitch*, *Roll* e *Yaw* para a informação coletada das 5 – 6 p.m.
“continua”

Dia	Média do ângulo Roll ($^\circ$)	Média do ângulo Pitch ($^\circ$)	Média do ângulo Yaw ($^\circ$)
1	0,909	-1,23	-61,95
2	1,421	-0,72	-59,57
3	1,26	-0,62	-59,70

Tabela 3.19 - Média das leituras dos ângulos *Pitch*, *Roll* e *Yaw* para a informação coletada das 5 – 6 p.m. “conclusão”

Dia	Média do ângulo Roll (°)	Média do ângulo Pitch (°)	Média do ângulo Yaw (°)
4	0,511	-0,93	-58,60
5	1,042	-0,59	-61,23

Das médias das leituras coletadas o ângulo *roll* foi de 1,7°, o ângulo *pitch* foi de 1° e o ângulo *yaw* foi de 3,7°. Por último foram calculados os valores dos desvios padrão para as leituras coletadas dos ângulos *pitch*, *roll* e *yaw*, apresentados na Tabela 3.20 e na Tabela 3.21.

Tabela 3.20 - Desvio padrão das leituras dos ângulos *Pitch*, *Roll* e *Yaw* para os dados coletados das 10 – 11 a.m.

Dia	Desvio padrão do ângulo Roll (°)	Desvio padrão do ângulo Pitch (°)	Desvio padrão do ângulo Yaw (°)
1	0,235	0,249	0,284
2	0,233	0,277	0,330
3	0,289	0,247	0,377
4	0,234	0,216	0,343
5	0,237	0,26	0,287

Tabela 3.21 - Desvio padrão das leituras dos ângulos *Pitch*, *Roll* e *Yaw* para a informação coletada das 5 – 6p.m.

Dia	Desvio padrão do ângulo Roll (°)	Desvio padrão do ângulo Pitch (°)	Desvio padrão do ângulo Yaw (°)
1	0,248	0,242	0,328
2	0,238	0,242	0,316
3	0,307	0,235	0,246
4	0,244	0,271	0,389
5	0,23	0,249	0,285

Finalmente observa-se que o desvio padrão médio para as leituras do ângulo *roll* foi 0,249°, para as leituras do ângulo *pitch* foi 0,248° e para as leituras do ângulo *yaw* foi 0,318°. Estes valores estão dentro da faixa dada pelo fabricante, que é de 0,35°(este valor de erro fornecido pelo fabricante é valido para os três ângulos).

Um segundo teste foi feito com o objetivo de comparar os valores obtidos das medições dos ângulos *pitch*, *roll* e *yaw* feitas com o IG500N com respeito aos valores obtidos de um transferidor. O teste consistiu em fixar o IG500N sobre uma superfície plana que se possa movimentar em sentido do eixo x, y ou z do sensor. Em seguida esta superfície foi

posicionada sobre um plano de referência (uma mesa) para medir as leituras iniciais dos ângulos *pitch*, *roll* e *yaw*. Obtidas estas leituras iniciais, foram geradas cinco mudanças angulares sobre cada eixo do sensor para obter as novas leituras dos ângulos *pitch*, *roll* e *yaw*. Estas mudanças também foram medidas com um transferidor (a incerteza do transferidor é de aproximadamente 1°) para comparar as duas leituras. As mudanças angulares escolhidas foram de 20°, 30°, 40°, 50° e 70° da posição original. Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 3.22 (ângulo *pitch*), na Tabela 3.23 (ângulo *roll*) e na Tabela 3.24 (ângulo *yaw*).

Tabela 3.22 - Mudanças angulares no ângulo *pitch* medidas com o transferidor e com o IG500N

Mudança angular medida com o transferidor (°)	Medições das mudanças nos valores do ângulo <i>pitch</i> feitas com o IG500N (°)				
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
20	22	21,5	20,85	21,6	20,8
30	31,7	32	31,4	31,2	31
40	40,4	39,5	39,6	38,3	40,9
50	50,07	51,03	51,3	50,2	49,3
70	71,70	70,2	71,4	70,3	71,04

Tabela 3.23 - Mudanças angulares no ângulo *roll* medidas com o transferidor e com o IG500N

Mudança angular medida com o transferidor (°)	Medições das mudanças nos valores do ângulo <i>roll</i> feitas com o IG500N (°)				
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
20	19,7	20,5	19,4	19,9	19,45
30	29,1	29,4	30,1	29,3	31
40	39,9	39,7	40,5	40,6	40,9
50	51,00	51,3	48,8	50,6	50,3
70	71,20	69,7	70,1	69,1	70,7

Tabela 3.24 - Mudanças angulares no ângulo *yaw* medidas com o transferidor e com o IG500N

Mudança angular medida com o transferidor (°)	Medições das mudanças nos valores do ângulo <i>yaw</i> feitas com o IG500N (°)				
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
20	19,5	19,5	19	19,5	20,4
30	30,4	29,6	30,8	30,3	30,4
40	40,3	39,8	39,2	39,7	40,1
50	50,60	50,2	50,6	49,8	49,9
70	70,50	70,3	69,9	69,9	70,8

É importante esclarecer que os valores obtidos com o transferidor são os valores de referência para achar os desvios padrão das leituras feitas com o IG500N. O erro das leituras dos ângulos *pitch*, *roll* e *yaw* feitas com o IG500N com respeito aos valores de referência (medidos com o transferidor), não foi maior que 2°. Os valores dos desvios padrão das leituras obtidas com o IG500N serão apresentados na Tabela 3.25.

Tabela 3.25 - Desvios padrão das leituras feitas com o IG500N

Ângulo	Desvio padrão (°)
Pitch	1,07
Roll	0,95
Yaw	0,55

Na Tabela 3.25 pode-se ver que as leituras (feitas com o IG500N) do ângulo pitch apresentaram o maior desvio padrão com respeito aos valores de referência. O menor desvio padrão se apresentou nas leituras do ângulo yaw e nenhum desvio padrão apresentou valores maiores que 1,1°. Considerando que a incerteza inserida pelo transferidor é de aproximadamente 1°, pode-se dizer que os desvios padrões das leituras feitas com o IG500N estão dentro da faixa do erro do transferidor e que estas leituras têm uma boa exatidão.

3.4.2 Sensor Laser UTM-30LX

O UTM-30LX (Fig. 3.45) é um sensor LIDAR da empresa HOKUYO. Segundo dados fornecidos pelo fabricante, o UTM-30LX tem uma fonte laser de $\lambda=905\text{nm}$ para fazer uma varredura de abertura igual a 270°. Sua saída é serial e transmitida por interface RS-232 ou USB, seu alcance de detecção fica entre 0,1 m até 30 m. A alimentação é de 12 V e tem um consumo de corrente de 1 A (HOKUYO AUTOMATICO, 2012).

O UTM-30LX tem uma velocidade de varredura igual a 2400 rpm, trabalha a temperaturas de -10°C até 50°C, sua massa é 210 g, sua vida útil é de 5 anos e tem um nível de ruído menor que -25 dB. Para que o sensor faça uma varredura de 270° são necessários 1080 passos de 0,25° (Fig. 3.46).

Figura 3.45 - Laser UTM-30LX da empresa Hokuyo¹⁷

Figura 3.46 - Varredura do UTM-30LX (HOKUYO AUTOMATICO, 2012)

Fizeram-se dois testes para verificar o alcance do UTM-30LX em diferentes condições de luz solar (não foi medida a incidência luminosa de modo que se fala de luz solar intensa e menos intensa, mas não é quantificada a intensidade) e ver seu efeito sobre o alcance do sensor. O primeiro teste consistiu em posicionar um obstáculo a diferentes distâncias (começando a 1m de distância do veículo e incrementando de metro em metro até chegar aos 30m de distância do veículo), a medição da distância foi feita com uma trena (o erro da trena é de 0,007 m) e depois foi usado o software URGViewer (fornecido por Hokuyo Automático) que permite obter as leituras feitas pelo sensor UTM-30LX. Estas leituras indicam em que ângulo e a qual distância o sensor detecta um obstáculo. O teste foi feito às 3:00 p.m. com luz solar intensa e a Fig. 3.47 ilustra o desenvolvimento do teste. Na Tabela 3.26 são apresentados os resultados deste teste. Para cada uma das distâncias foram feitas 5 medições para o cálculo da média destas leituras e seu desvio padrão, estas informações são apresentadas na Tabela 3.26.

¹⁷ Foto disponível em: <https://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/utm_30lx.html>. Acesso em 25/04/2014

Figura 3.47 - Luz solar durante o primeiro teste do UTM-30LX

Tabela 3.26 - Resultados das leituras feitas com o UTM-30LX sob luz solar muito intensa

Distância medida com a trena(m)	Média da distância medida com o software URGViewer(m)	Desvio padrão da distância medida com o software URGViewer (m)
1	1,04	0,01
2	2,06	0,016
3	3,00	0,009
4	4,00	0,013
5-30	∞	∞

Segundo os resultados obtidos, quando o obstáculo foi posicionado a distâncias menores que 4m, os valores dos desvios padrões das leituras não foram maiores a 0,02 m e ficam dentro da faixa de erro fornecida pelo fabricante (0,03 m para distâncias menores a 10 m e 0,05 m para distâncias maiores a 30 m. Embora o objetivo fosse fazer medições a cada metro de distância com respeito ao robô até chegar aos 30m de distância, a Tabela 3.26 só apresenta os resultados obtidos até 4m com respeito ao veículo devido ao fato do sensor não ser capaz de detectar o obstáculo depois de 4 m. Pode-se observar que o alcance do sensor foi reduzido de 30m a 4m devido à forte luz solar no desenvolvimento do teste. A Fig. 3.48 apresenta a leitura feita com o software URGViewer quando o obstáculo ficou a 2,7m. O obstáculo é ressaltado num retângulo de cor vermelha e pode-se ver que existem muitas leituras não desejadas que precisam ser filtradas para reconhecer melhor o obstáculo. O software conta com um gráfico que permite observar todos os obstáculos detectados pelo sensor e uma tabela

que apresenta os valores obtidos em cada passo da varredura do sensor. A linha verde representa um dos passos da varredura onde se quer conhecer a leitura.

Figura 3.48 - Leitura do UTM-30LX com URGViewer

O segundo teste foi feito num ambiente controlado, onde a luz solar era menos intensa. Posicionou-se o obstáculo a diferentes distâncias com ajuda da trena e logo se obteve o valor das distâncias com o software para fazer uma comparação entre os valores obtidos. A Tabela 3.27 apresenta os resultados obtidos no teste, com a distância medida com a trena, as médias das leituras (5 leituras para cada distância) feitas com o software URGViewer e seus desvios padrões.

Tabela 3.27 - Resultados das leituras feitas com o UTM-30LX baixo sombra “continua”

Distância medida com a trena(m)	Média da distância medida com o software URGViewer (m)	Desvio padrão da distância medida com o software URGViewer (m)
1	1,020	0,018
2	1,984	0,007
3	2,992	0,012
4	3,998	0,01
5	4,982	0,005
6	6,005	0,02
7	6,981	0,019
8	7,975	0,012

Tabela 3.27 - Resultados das leituras feitas com o UTM-30LX baixo sombra “conclusão”

Distância medida com a trena(m)	Média da distância medida com o software URGViewer (m)	Desvio padrão da distância medida com o software URGViewer (m)
9	8,981	0,007
10	9,979	0,014
11	10,882	0,021
12	11,882	0,016
13	12,884	0,008
14	13,912	0,01
15	14,877	0,014
16	15,864	0,01
17	16,863	0,018
18	17,859	0,013
19	18,874	0,009
20	19,896	0,017
21	20,831	0,01
22	21,879	0,013
23	22,906	0,009
24-30	∞	∞

Figura 3.49 - Ambiente do segundo teste do UTM-30LX

Segundo os resultados obtidos, quando o veículo ficou à sombra, o alcance do UTM-30LX aumentou de 19m com respeito ao primeiro teste, mas não chegou ao alcance mencionado nos dados do sensor (30m). Também se calculou o desvio padrão das leituras feitas com o software com respeito aos valores obtidos das medições feitas com a trena, o valor da média dos desvios padrão foi 0,0126m e fica dentro da faixa de erro fornecida pelo fabricante (descrita no teste anterior). Na Fig. 3.49 se apresenta o ambiente onde foi

desenvolvido o teste e na Fig. 3.50 o gráfico (obtido com o software) das leituras feitas com o UTM-30LX.

Figura 3.50 - Leituras feitas com o UTM-30LX durante o segundo teste

Na Fig. 3.50 observam-se duas linhas paralelas de cor azul que representam as duas paredes que ficam a cada lado do veículo. A linha ressaltada no retângulo vermelho representa o obstáculo. Comparando os dois gráficos obtidos com o software URGViewer verifica-se que quando a luz solar foi menor, o gráfico obtido apresenta melhores detalhes do ambiente.

Fez-se um teste final para observar como variam as leituras do Lidar coletadas continuamente durante um intervalo de tempo sem movimentar o obstáculo. Para isto foram coletadas, durante 60 segundos, as leituras do Lidar com um obstáculo a 2,53 m no passo 540 (frente do Lidar). O procedimento foi repetido com o obstáculo a 4,53 m e depois a 6,53 m. Com os dados coletados nos três testes foram calculadas as médias das leituras e seus respectivos desvios padrões (Tabela 3.28). Foi feito um programa em Visual Studio com a linguagem C# para coletar, a cada 200 ms, as leituras do Lidar. Além da leitura do Lidar, a distância entre o obstáculo e o veículo foi medida com uma trena (erro de 0,007 m).

Tabela 3.28 – Teste com Lidar na parte frontal do helvis III

Distância medida com a trena(m)	Média das leituras (m)	Desvio padrão das leituras (m)
2,53	2,536	0,007
4,53	4,539	0,009
6,53	6,531	0,004

Como resultado deste teste pode-se observar que os valores dos desvios padrões ficam dentro da faixa de erro dada pelo fabricante (0,030 m para distâncias menores a 10 m). O teste foi repetido para comprovar o comportamento das leituras quando são coletadas no passo 1079 (lado esquerdo do Lidar) e no passo 0 (lado direito do Lidar). Os resultados são apresentados nas Tabelas 3.29 e 3.30.

Tabela 3.29 - Teste do lado esquerdo do Lidar

Distância medida com a trena(m)	Média das leituras (m)	Desvio padrão das leituras (m)
2,54	2,543	0,004
4,54	4,536	0,014
6,54	6,569	0,029

Tabela 3.30 – Teste do lado direito do Lidar

Distância medida com a trena(m)	Média das leituras (m)	Desvio padrão das leituras (m)
2,54	2,546	0,008
4,54	4,540	0,004
6,54	6,539	0,004

Segundo os resultados obtidos, o maior valor de desvio padrão (0,029 m) ocorreu nas leituras feitas no lado esquerdo do Lidar e ficou próximo ao erro fornecido pelo fabricante. Também se pode observar que todos os valores dos desvios padrões ficaram dentro da faixa de erro fornecida pelo fabricante e que as leituras feitas no lado esquerdo do Lidar apresentaram os maiores valores de desvio padrão.

3.4.3 Computador ARK-1120

O ARK-1120 (Fig. 3.51) é um computador de arquitetura X86 da empresa Avantech. Conta com um processador Intel Atom N455 de 1,66 GHz, uma memória Ram DDR3 de 1 GB e um disco rígido de 1 TB. Como portas de comunicação, tem 2 USB 2.0 e 4 RS-232.

Figura 3.51 - Computador ARK-1120 de Avantech¹⁸

O computador ARK-1120 trabalha a 12 V e tem um consumo máximo de potência igual a 10,8W. Sua massa é 0,7 Kg e pode trabalhar a temperaturas desde -40°C até 85°C. Suas dimensões são de 133,8 x 43,1 x 94,2 mm e trabalha com o sistema operacional Windows XP, embora possa trabalhar com sistemas operacionais como Linux. Também conta com uma porta RJ45 para conexão Ethernet de 10/100/1000 Mbps e uma porta VGA (*Video Graphics Array*). Todos os algoritmos desenvolvidos são armazenados neste computador. Para acessar ao ARK-1120 é necessária uma conexão remota. Essa conexão é possível pois o *hélvis III* conta com um roteador sem fio *wi-fi*, apresentado a seguir.

3.4.4 Roteador wireless

Para poder acessar remotamente o computador ARK-1120 foi embarcado no veículo um roteador wireless de referência TL-MR3040 (Fig. 3.52) fabricado pela TP-LINK. Segundo o fabricante, o roteador tem uma porta WAN/LAN de 10/100 Mbps, uma USB 2.0 para modem 3G/4G e uma porta micro-USB para alimentação. Suas dimensões são 100 x 62 x 16 mm e sua massa é 94g e a antena é interna. A velocidade do sinal é de 150Mbps e sua frequência é 2,4 – 2,4835 GHz. O roteador pode trabalhar a temperaturas entre 15°C a 41°C e é compatível para trabalhar com Windows, Linux ou MAC® OS. O TL-MR3040 tem uma bateria interna recarregável de 5V e 2000mAh para um tempo de uso aproximado de 4 horas contínuas.

¹⁸ Foto disponível em: <http://www.advantech.com.br/products/1-2JKBYZ/ARK-1120F/mod_4BE6FE03-.aspx#>. Acesso em 24/04/2014

Figura 3.52 - Roteador TL-MR3040 de TP-LINK¹⁹

3.5 Controlador fuzzy para a orientação do helvis III

Nesta seção é apresentado o sistema de controle fuzzy para a orientação do veículo. Na primeira parte há uma descrição do controlador, na segunda parte uma descrição da aplicação desenvolvida em Visual Studio com a linguagem C# para ligar todo o sistema de controle fuzzy para a orientação do veículo e, finalmente, os resultados obtidos dos testes feitos ao sistema de controle fuzzy desenvolvido são apresentados.

3.5.1 Descrição do controlador fuzzy desenvolvido

O primeiro sistema de controle feito para o helvis III foi um sistema de controle para a orientação do veículo. Este sistema de controle permite ao veículo manter uma orientação fixa desejada ao longo de uma linha reta. Se o veículo perde a orientação, o sistema de controle tem a capacidade de retornar para a orientação desejada, mas ele irá se movimentar numa linha reta paralela ao percurso original. O diagrama de blocos do sistema de controle usado é apresentado na Fig. 3.53.

Figura 3.53 - Sistema de controle de orientação

¹⁹ Foto disponível em: < <http://www.tp-link.com/mx/products/details/?model=TL-MR3040#spec>>. Acesso em 10/01/2015

Ψ_d é a orientação desejada, Ψ_r é a orientação real, “ e ” é o sinal de erro e “ u ” é o sinal de controle. O sistema de controle tem um bloco chamado “*controller*”, que é o controlador desenvolvido e o bloco “ G ”, que é a planta. Como o sistema de controle conta com uma única entrada e uma única saída, a qual é comparada com a entrada para gerar um sinal de erro, então é um sistema SISO (*Single Input – Single Output*) de malha fechada (OGATA, 1998). O controlador tem como entrada o sinal “ e ” (erro) e como saída o sinal “ u ” (ação de controle), a retroalimentação do valor real da orientação se faz mediante o uso do ângulo *Yaw* medido com o IG500N(descrito na seção 3.4.1). O sinal de erro (e) é definido como:

$$e = \psi_d - \psi_r \quad (3.23)$$

Para desenvolver o controlador optou-se por usar a lógica Fuzzy que se pode definir como um raciocínio que permite classificar quantitativamente uma realidade ou situação para sua análise ou manipulação em computadores (BOTELHO, 2013, P.116). Um sistema Fuzzy é constituído por três etapas: fuzzificação, inferência e defuzzificação. A etapa de fuzzificação usa conjuntos fuzzy de entrada para traduzir uma variável de entrada em uma ou mais variáveis fuzzy mediante o uso de funções de pertinência. Na etapa de inferência, o sistema faz um raciocínio fuzzy onde relaciona as variáveis fuzzy de entrada com as variáveis fuzzy de saída mediante um sistema de regras. Por último a etapa de defuzzificação permite traduzir a variável fuzzy de saída em um valor numérico. Para realizar a tradução se faz uso de métodos de defuzzificação como o método pelo centro de gravidade (BOTELHO, 2013).

Para a etapa de fuzzificação do controlador fuzzy desenvolvido, se definiram os conjuntos fuzzy de entrada mediante 5 funções de pertinência de tipo triangular (Muito negativo (Mn), negativo (n), zero (z), positivo (p), Muito positivo (Mp)) que permitem traduzir a variável de entrada em 5 variáveis fuzzy que tem os mesmos nomes dos conjuntos fuzzy de entrada. As funções de pertinência usadas são matematicamente descritas nas Eq. 3.24, Eq. 3.25, Eq. 3.26, Eq. 3.27 e Eq. 3.28, e apresentadas na Fig. 3.54.

Figura 3.54 - Conjuntos fuzzy de entrada

$$Mn = \begin{cases} 0, & \text{se } e \geq -5 \\ \frac{-5-e}{-5-(-35)}, & \text{se } -5 < e < -35 \\ 1, & \text{se } e \leq -35 \end{cases} \quad (3.24)$$

$$n = \begin{cases} 0, & \text{se } e \geq 0 \\ \frac{0-e}{0-(-5)}, & \text{se } -5 < e < 0 \\ \frac{e-(-35)}{-5-(-35)}, & \text{se } -35 < e < -5 \\ 0, & \text{se } e \leq -35 \end{cases} \quad (3.25)$$

$$z = \begin{cases} 0, & \text{se } e \geq 5 \\ \frac{5-e}{5-0}, & \text{se } 0 < e < 5 \\ \frac{e-(-5)}{0-(-5)}, & \text{se } -5 < e < 0 \\ 0, & \text{se } e \leq -5 \end{cases} \quad (3.26)$$

$$p = \begin{cases} 0, & \text{se } e \geq 35 \\ \frac{35-e}{35-5}, & \text{se } 5 < e < 35 \\ \frac{e-0}{5-0}, & \text{se } 0 < e < 5 \\ 0, & \text{se } e \leq 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

$$Mp = \begin{cases} 1, & \text{se } e \geq 35 \\ \frac{e-5}{35-5}, & \text{se } 5 < e < 35 \\ 0, & \text{se } e \leq 5 \end{cases} \quad (3.28)$$

Um valor da entrada (e) produz um valor em cada conjunto fuzzy de entrada, estes valores podem variar entre 1 e 0 e indicam o grau de pertinência que tem a entrada (e) com cada conjunto de entrada fuzzy (MARRO *et al.*, 2010). Estes valores são armazenados nas variáveis fuzzy de entrada e são relacionados com os conjuntos fuzzy de saída do controlador mediante um conjunto de regras definidas (etapa de inferência) que indicam o valor máximo

que pode ter cada conjunto fuzzy de saída. Os conjuntos fuzzy de saída usados foram 3 funções de pertinência de tipo triangular (esquerda (E), centro (C) e direita (D)) que são matematicamente descritas nas Eq. 3.29, Eq. 3.30 e Eq. 3.31 e apresentados na Fig. 3.55.

Figura 3.55 - Conjuntos fuzzy de saída

$$E = \begin{cases} 0, & \text{se } y \geq 0 \\ \frac{0-y}{0-(-100)}, & \text{se } -100 < y < 0 \\ 1, & \text{se } y \leq -100 \end{cases} \quad (3.29)$$

$$C = \begin{cases} 0, & \text{se } y \geq 100 \\ \frac{100-y}{100-0}, & \text{se } 0 < y < 100 \\ \frac{y-(-100)}{0-(-100)}, & \text{se } -100 < y < 0 \\ 0, & \text{se } y \leq -100 \end{cases} \quad (3.30)$$

$$D = \begin{cases} 1, & \text{se } y \geq 100 \\ \frac{y-0}{100-0}, & \text{se } 0 < y < 10 \\ 0, & \text{se } y \leq 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

As regras que relacionam os valores das variáveis fuzzy de entrada com os conjuntos fuzzy de saída são definidas como:

$$\begin{aligned} &\text{Se } M_n \neq 0, \text{ então valor máximo de } E = M_n \\ &\text{Se } n \neq 0, \text{ então valor máximo de } E = n \\ &\text{Se } z \neq 0, \text{ então valor máximo de } c = z \\ &\text{Se } p \neq 0, \text{ então valor máximo de } D = p \\ &\text{Se } M_p \neq 0, \text{ então valor máximo de } D = M_p \end{aligned} \quad (3.32)$$

Para determinar o valor da saída *desfuzzificada* usa-se o método do centróide (BOTELHO, 2013, p. 125) definido como:

$$Z = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_a(x_i)x_i}{\sum_{i=0}^n \mu_a(x_i)} \quad (3.33)$$

Onde Z é a saída *desfuzzificada*, μ_a são os valores fuzzy de entrada e x_i são os valores fuzzy de saída gerados por cada valor μ_a . Os valores x_i podem ser conhecidos isolando a variável “y” nas funções de pertinência dos conjuntos fuzzy de saída que foram descritos nas Eq. 3.29, Eq. 3.30 e Eq. 3.31, tendo em conta que o valor máximo de cada conjunto fuzzy de saída foi limitado pelas regras apresentadas na Eq. 3.32. A saída *desfuzzificada* é um valor de esterçamento (sinal u), o qual é encaminhado para a placa Arduino para movimentar o servomotor com o fim de gerar o esterçamento do veículo e assim corrigir sua orientação.

Para ajudar ao robô a manter a orientação e assim ter um melhor controle da orientação, a velocidade do motor de propulsão foi limitada por uma equação linear que depende do erro de orientação. Quando o erro de orientação está perto de zero, a velocidade do motor é máxima e quando existe um erro de orientação e o robô tem que fazer um esterçamento, a velocidade se reduz de acordo com a Eq. 3.34.

$$V(rpm) = -50|e| + V_{md} \quad (3.34)$$

Onde “ e ” é a entrada do controlador fuzzy, V_{md} é a velocidade máxima desejada do motor e o sinal negativo significa o sentido de giro do motor para que o robô caminhe para frente. O valor 50 é uma constante achada para um bom comportamento do esterçamento com relação à velocidade de propulsão e foi escolhida empiricamente.

3.5.2 Aplicação feita em Visual Studio com a linguagem C#

O sistema de controle fuzzy foi desenvolvido na linguagem de programação C# na plataforma Visual Studio 2010. As leituras dos sensores embarcados no robô são feitas usando a linguagem C#, assim como a ativação da placa Epos2. Para facilidade de visualização destas leituras foi feita uma interface gráfica em C#, apresentada na Fig. 3.56.

Figura 3.56 - Interface gráfica da aplicação feita em C#

A interface tem três botões e oito caixas de texto para apresentar as leituras feitas dos sensores e também para indicar alguma informação necessária para a aplicação. A caixa de texto chamada “Maxon RPM” apresenta a velocidade atual do motor Maxon, a “*Desired Yaw*” é usada para digitar a orientação desejada do veículo. A caixa de texto chamada “*Yaw lecture*” apresenta a leitura da orientação real e a “*Yaw Error*” apresenta o valor do sinal de erro (e). A caixa chamada “*Steering Angle Error*” apresenta o erro no ângulo de esterçamento e “*Steering Angle*” apresenta o ângulo de esterçamento atual do veículo. Por último as caixas da leitura do GPS indicam as coordenadas de localização do veículo.

O botão chamado “*Yaw Lecture*” liga o mini-sistema inercial IG500N para obter as leituras do GPS e do ângulo *Yaw* e o botão chamado “*controller*” liga o sistema de controle fuzzy para a orientação do veículo e para o motor maxon, além de inicializar a comunicação com a placa Arduino. Por último o botão chamado “*exit*” finaliza o movimento do motor e fecha a aplicação.

3.5.3 Resultados do controlador Fuzzy

Foram realizados dois testes a fim de se observar o comportamento do sistema de controle fuzzy desenvolvido. O primeiro teste consistiu em um percurso em linha reta de comprimento igual a 10m, com uma velocidade do motor igual a 2000 rpm, onde foi coletada a leitura da orientação real do veículo (ângulo *Yaw*), usada para calcular o erro da orientação (sinal “ e ”) e assim gerar o gráfico da resposta real do controlador (Gráfico azul da Fig. 3.57). Para avaliar a resposta real do controlador, foi gerada uma perturbação ao longo do percurso, também foi simulado o sistema de controle em Matlab e obtido o gráfico do comportamento ideal do controlador com a presença da perturbação (Fig. 3. 57). Para a simulação foi usada a

planta apresentada na seção 5.3.1 (resultados da cinemática do veículo). O teste foi realizado num ambiente interno e para conhecer a orientação do veículo foi usado o ângulo Yaw fornecido pelo sensor inercial IG500N.

Figura 3.57–Comportamento do controlador Fuzzy

Na Fig. 3.57 é apresentada a resposta real da saída do sistema de controle (cor azul) e sua resposta ideal (cor vermelha). Neste gráfico pode-se observar que a perturbação manual teve uma amplitude de $25,56^\circ$ e que o controlador teve a capacidade de rejeitar a perturbação e retornar à orientação desejada. Também foi possível observar que o tempo de estabelecimento é próximo a 12 s e houve um sobressinal de 10%. Esclarece-se que o controlador difuso é apresentado como uma possível solução ao problema, mas não necessariamente a melhor.

No segundo teste o veículo fez um percurso de uma linha reta de comprimento igual a 14m (medida com uma trena), cujo objetivo foi conhecer a distância entre o ponto final do percurso e a posição final do veículo em diferentes terrenos e a diferentes velocidades do motor (começando em 1000rpm até 12000rpm). Este teste foi feito na grama, terra, terra-grama e asfalto. O terreno de grama-terra foi chamado assim por que a primeira metade do terreno era em terra e a outra metade em grama. O sensor usado nestes testes foi a IMU do sensor IG500N para a leitura do ângulo yaw. Os resultados dos desvios obtidos das provas realizadas são apresentados nas Tabelas 3.31, 3.32, 3.33 e 3.34, um gráfico comparativo é apresentado na Fig. 3.58.

Tabela 3.31 - Desvios obtidos nos testes feitos no terreno de terra

Velocidade do motor (rpm)	Desvio (m)
1000	0,21
2000	0,346
3000	0,19
4000	0,143
5000	0,27
6000	0,186
7000	0,233
8000	0,313
9000	0,183
10000	0,32
11000	0,185
12000	0,27

Tabela 3.32 - Desvios obtidos nos testes feitos no terreno de grama

Velocidade motor (rpm)	Desvio (m)
1000	0,386
2000	0,196
3000	0,126
4000	0,193
5000	0,12
6000	0,266
7000	0,086
8000	0,12
9000	0,29
10000	0,506
11000	0,396
12000	0,27

Tabela 3.33 - Desvios obtidos nos testes feitos no terreno de grama-terra

Velocidade motor (rpm)	Desvio (m)
1000	0,18
2000	0,053
3000	0,076
4000	0,103
5000	0
6000	0,12
7000	0,12
8000	0,24
9000	0,166
10000	0,2
11000	0,29
12000	0,396

Tabela 3.34 - Desvios obtidos nos testes feitos no terreno de asfalto

Velocidade do motor (rpm)	Desvio (m)
1000	0,113
2000	0,04
3000	0,226
4000	0,08
5000	0
6000	0,05
7000	0,123
8000	0,12
9000	0,12
10000	0,313
11000	0
12000	0,08

Figura 3.58 - Desvios obtidos para os quatro terrenos

Dos resultados obtidos, quando o veículo se movimentou sobre a grama com uma velocidade do motor maiores a 8000rpm, se observou desvios com os maiores valores. Também se pode ver que os desvios de menor valor se apresentaram quando o veículo se movimentou sobre o terreno de asfalto. Uma conclusão que se pode dizer com os resultados obtidos é que o sistema de controle fuzzy para a orientação do veículo não permitiu que o veículo apresentasse desvios maiores a 0,5m num percurso com comprimento igual a 14m e onde o terreno não gerou grandes mudanças na orientação do veículo. Se o terreno gerasse grandes mudanças da orientação do veículo, o sistema de controle fuzzy faria o veículo retornar à orientação desejada, mas não ao percurso original, gerando desvios maiores aos obtidos nestes testes. Por último a Tabela 3.35 mostra os valores da média dos desvios obtidos com estes testes, onde o desvio médio de maior valor ocorreu no terreno de grama e o desvio

médio de menor valor se apresentou no terreno de asfalto. Isso se deve ao fato do veículo na grama ter menor atrito e escorregar com maior frequência que no terreno com asfalto.

Tabela 3.35 - Desvio médio para os testes feitos

Terreno	Desvio médio (m)
Asfalto	0,105
Terra	0,237
Terra-grama	0,162
Grama	0,246

Segundo os resultados apresentados na Tabela 3.35, se o veículo não sofre grandes perturbações o controlador fuzzy tem a capacidade de rejeitar tais distúrbios e retornar o veículo à orientação desejada, sem gerar desvios maiores que 0,3 m para percursos menores que 14 m, independentemente do tipo de terreno.

3.6 Consumo de energia dos dispositivos embarcados no *helvis III* e tempos mortos dos sistemas de propulsão e esterçamento

Para finalizar a descrição do *helvis III*, se fez uma análise do consumo de energia de todos os dispositivos embarcados e uma análise dos tempos mortos dos sistemas de propulsão e esterçamento.

3.6.1 Consumo de energia do *helvis III*

Para suprir energia aos dispositivos embarcados no robô, o *helvis III* conta com duas baterias. A primeira é uma bateria Lipo (Polímero de Litio) apresentada na Fig. 3.59, capaz de fornecer 4Ah e uma tensão de 26,9V. Sua massa é 645g e suas dimensões são 148x44x46mm. Nesta bateria está ligada a placa Epos2 com o motor maxon, o servo-motor DS8711 e o sensor UTM-30LX.

Figura 3.59 - Bateria Lipo de 7 células

A segunda é uma bateria Lipo (Fig. 3.60) de 6 células que fornece 2,2Ah e uma tensão de 22,2V. Sua massa é 197g e suas dimensões são 108x34x27mm. Nesta bateria está ligado o computador ARK-1120, o sensor IG500N e a placa Arduino.

Figura 3.60 - Bateria Lipo de 7 células

Como se descreveu nas seções anteriores, cada dispositivo embarcado no *hélvis III* requer uma corrente (Unidade: ampére) e uma tensão de alimentação (Unidade: volt) para seu funcionamento. Com estes valores pode-se calcular a potência requerida por cada dispositivo mediante a Eq. 3.35.

$$Potência(W) = Tensão(V) * Corrente(A) \quad (3.35)$$

A fim de se conhecer qual é o tempo real da duração de cada bateria, não se levou em conta os valores das correntes fornecidos pelos fabricantes. Para conhecer o valor da corrente consumida por cada dispositivo, se mediu com um amperímetro o valor real destas correntes. Na Tabela 3.36 se apresentam os valores das tensões de alimentação, das correntes reais e o valor da potência para cada dispositivo embarcado.

Tabela 3.36–Correntes, voltagens e potência reais dos dispositivos embarcados no *helvis III*

Dispositivo	Corrente (A)	Voltagem (V)	Potência (W)
Arduino Mega 2560	0,1	5	0,5
UTM-30LX	0,39	12	4,68
Epos2 e motor maxon	0,62	24	14,88
Computador ARK-1120	0,76	12	9,12
Servo DS8711	0,4	6	2,4
IG500N	0,16	5	0,8

Para conhecer quanta potência deve suprir cada bateria, se soma a potência dos dispositivos. Do anterior se obtém que a bateria Lipo de 7 células deve suprir 21,96W(pior caso) e a potência que deve suprir a bateria Lipo de 6 células é 10,42W (pior caso).

A bateria Lipo de 7 células tem a capacidade de suprir um consumo de 107,6W durante uma hora e como o consumo dos dispositivos ligados a ela é 21,96W, então sua duração é de aproximadamente 4 horas e 52 minutos. A bateria Lipo de 6 células tem a capacidade de suprir um consumo igual a 48,84W durante uma hora e como o consumo dos dispositivos ligados a ela é de 10,42 W, sua duração é de aproximadamente 4 horas e 40 minutos.

3.6.2 Tempos mortos dos sistemas de propulsão e de esterçamento

Para conhecer o tempo morto (relacionado ao tempo de comunicação entre o computador e o sistema de propulsão ou esterçamento e ao tempo de resposta do próprio dispositivo) do sistema de propulsão do *helvis III*, se fez a medição do tempo que tarda o processo de início do movimento do motor maxon. Este processo consiste no computador encaminhe o comando de início para a placa Epos2, a placa ativa o motor e depois o encoder retorna a medição da velocidade do motor para a placa Epos2, que a sua vez encaminha esta leitura para o computador. O processo de início do movimento do motor de propulsão é apresentado na Fig. 3.61.

Figura 3.61 - Processo de início do movimento do motor de propulsão do *helvis III*

Para medir o tempo total que tarda o sistema de propulsão em iniciar o movimento do motor maxon, foi usada a hora do computador, lida mediante uma aplicação feita em Visual Studio com a linguagem C#. A aplicação obtém a hora do computador no momento que se encaminha o comando de início para a placa Epos2 e imediatamente liga um “Timer” que faz a leitura da velocidade do motor a cada 1ms. Quando o valor da velocidade do motor é diferente de zero, então se toma novamente a hora do computador. Obtidas os dois instantes de tempo (início e final) obtém-se o tempo transcorrido. Assim, se obteve que o tempo transcorrido desde o envio do comando de início para a placa Epos2 até o movimento de motor foi 16ms. Este tempo é chamado o tempo morto do sistema de propulsão do *helvis III*. Depois se fizeram duas medições adicionais para conhecer o tempo transcorrido desde o envio do comando de início até se obter a velocidade máxima do motor no sentido de giro positivo (ré do veículo) e negativo (frente do veículo). Para o sentido de giro positivo se obteve que o tempo transcorrido foi 1,195s e para o sentido negativo de giro se obteve que o tempo transcorrido foi 1,187s.

Para obtenção do tempo morto do sistema de esterçamento, se fez a medição do tempo que transcorre desde o envio de um comando de posicionamento até que o servo-motor inicia seu movimento. Este tempo se mediu mediante uma aplicação feita em Visual Studio com a linguagem C#, na qual se obtém a hora do computador no momento que se encaminha o comando de início para a placa Arduino e imediatamente liga um “Timer” que faz a leitura da posição atual do servo motor cada 1ms. Quando o valor da posição atual tenha 3° de diferença com respeito à posição inicial, se pega de novo a hora do computador. O tempo transcorrido foi calculado de igual forma que no sistema de propulsão e o processo de posicionamento do servo-motor é apresentado na Fig. 3.62.

Figura 3.62 - Processo de posicionamento do servo motor para o esterçamento do *helvis III*

Para ler a posição atual do servo motor, foi ligado um cabo ao pino central do potenciômetro interno do servo, com o objetivo de medir a variação de tensão existente entre o pino central do potenciômetro e a referência da alimentação do servo. Este cabo foi ligado a uma entrada analógica da placa Arduino para fazer uma conversão de analógica para digital da leitura. Uma vez obtido o valor digital da leitura, faz-se a relação entre o valor digital da posição e a posição real do servo. Para isto se escolhe uma posição inicial do servo e toma-se o valor digital da posição. Em seguida, movimenta-se o servo a uma posição final e se obtém o valor desta posição. Como os potenciômetros são sensores resistivos lineares então se pode assumir que todas as leituras digitais vão ter uma variação linear. Assim se pode usar a função `map()` da placa Arduino, a qual permite fazer a conversão de valores de uma classe inicial (valores digitais) a outra diferente (valores em graus) e assim conhecer o valor da posição atual do servo em graus. O tempo morto do sistema de esterçamento do *helvis III* foi 103ms.

Todos os resultados apresentados neste capítulo serão usados no desenvolvimento dos controladores para a navegação do veículo. Por exemplo, no capítulo 5 a caracterização do sensor inercial é usada para os testes do controlador proporcional para a orientação do veículo. As caracterizações do Lidar e do GPS serão fundamentais no desenvolvimento de trabalhos baseados na fusão sensorial como o desenvolvimento de um Filtro de Kalman. As caracterizações do sistema de propulsão e do sistema de esterçamento são fundamentais no capítulo 5 para obter a função de transferência da mudança de orientação do veículo e a resposta simulada do controlador proporcional apresentado nesse capítulo. A informação obtida da descrição da estrutura do veículo será usada no capítulo 4 quando é calculado o centro de massa do veículo.

4 DINÂMICA À FRENTE DO *helvis* III

O presente capítulo apresenta uma modelagem do movimento à frente do *helvis* III com o fim de conhecer os limites da aceleração deste, os limites da inclinação do ambiente pelo qual se poderá movimentar sem dificuldade e as características dinâmicas necessárias para o desenvolvimento do modelo cinemático do *helvis* III (posição do centro de massa).

4.1 Determinação da posição do Centro de Massa do *helvis* III

Para determinar a posição do centro de massa do *helvis* III foram feitos três testes. O primeiro teste determinou a posição longitudinal do centro de massa e é apresentado na seção 4.1.1. O segundo teste permitiu determinar a posição lateral do centro de massa (seção 4.1.2) e com o terceiro teste se determinou a altura do centro de massa, descrito na seção 4.1.3.

4.1.1 Posição Longitudinal do Centro de Massa

Para determinar a posição longitudinal do centro de massa do *helvis* III é necessário conhecer sua massa total e o valor das forças verticais sob as duas rodas dianteiras quando estacionado num terreno sem inclinação (JAZAR, 2014). Para isto se realizou a montagem apresentada na Fig. 4.1, com uma balança onde ficam as rodas dianteiras do *helvis* III e as rodas traseiras ficam numa estrutura feita de tábuas de madeira que permitem mantê-lo nivelado. Para os cálculos é assumido inicialmente que o veículo é simétrico, mas os resultados mostram se, na verdade, o veículo é ou não simétrico.

Figura 4.1 - Montagem para conhecer a posição longitudinal do centro de massa

Para saber se o *helvis* III ficou nivelado, foi usado um nível que ficou na parte superior do robô. Uma vez nivelado, tomou-se a informação fornecida pela balança (sem o nível):

$$m = 4,655 \text{ Kg} \quad (4.1)$$

Como esta informação é em “Kg” (unidade da massa de um corpo) e se deseja saber a força vertical sob as duas rodas dianteiras quando o *helvis* III fica em repouso sobre um terreno sem inclinação, é preciso aplicar a segunda lei de Newton definida como:

$$F = m \cdot a \quad (4.2)$$

Onde “ F ” é a força vertical total sob as duas rodas dianteiras, “ m ” é a massa medida com a balança e “ a ” é a aceleração aplicada às rodas dianteiras que em nosso caso é a gravidade dado que o *helvis* III está em repouso. Para os cálculos desse trabalho o valor utilizado para a aceleração da gravidade foi:

$$g = 9,8 \frac{m}{s^2} \quad (4.3)$$

Aplicando a Eq. 4.3 e a Eq. 4.1 na Eq. 4.2 se tem que o valor da força vertical sob as rodas dianteiras é:

$$F = (4,665 \text{ Kg}) \left(9,8 \frac{m}{s^2} \right) = 45,619 \text{ N} \quad (4.4)$$

Para conhecer qual é a relação entre a força determinada na Eq. 4.4 com a posição longitudinal do centro de massa do *helvis* III, tem-se que analisar o comportamento das forças presentes num veículo. A Fig. 4.2 apresenta todas as forças presentes num veículo qualquer estacionado num terreno plano (JAZAR, 2014, p. 39).

Figura 4.2 - Diagrama de forças de um veículo estacionado num terreno sem inclinação (JAZAR, 2014)

$$\sum F_z = 0 \quad (4.5)$$

$$\sum M_y = 0 \quad (4.6)$$

Aplicando as equações planares do equilíbrio estático (CLIFFORD, *et al.*, p. 407) que são descritas nas Eq.4.4 e Eq. 4.6 (Onde F_z são todas as forças presentes no eixo “z” e M_y são todos os momentos presentes no eixo “y”) às forças mostradas na Fig. 4.2. Tem-se que:

$$2F_{z1} + 2F_{z2} - mg = 0 \quad (4.7)$$

$$-2F_{z1}a_1 + 2F_{z2}a_2 = 0 \quad (4.8)$$

Onde F_{z1} é a força vertical sob uma roda dianteira, F_{z2} é a força vertical sob uma roda traseira, m é a massa total do veículo (para o *helvis III* é 8.555Kg), g é o valor da aceleração da gravidade descrito na Eq. 4.3, a_1 é a distância que existe entre o centro de massa e o eixo dianteiro do veículo e a_2 é a distância que existe entre o centro de massa e o eixo traseiro do veículo. Isolando F_{z1} ou F_{z2} na Eq. 4.7 e substituindo na Eq. 4.8 se obtém que:

$$F_{z1} = \frac{1}{2} mg \frac{a_2}{l} \quad (4.9)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2} mg \frac{a_1}{l} \quad (4.10)$$

Onde l é a distância entre os eixos do veículo e se define como:

$$l = a_1 + a_2 \quad (4.11)$$

Tendo em conta que na Eq. 4.4 foi achado o valor da força sob as duas rodas dianteiras e que F_{z1} é a força sob uma roda dianteira (assumindo que o veículo é simétrico), então:

$$F_{z1} = \frac{1}{2}(45,619 \text{ N}) = 22,80 \text{ N} \quad (4.12)$$

Isolando a_2 da Eq. 4.9 e substituindo o valor de F_{z1} nela, se obtém:

$$a_2 = \frac{2l}{mg} F_{z1} = \frac{2(0,4 \text{ m})}{(8,555 \text{ Kg})\left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} \left(22,80 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}\right) = 0,217 \text{ m} \quad (4.13)$$

Como distância entre os eixos do *helvis* III é 0,4m, isolando a_1 na Eq. 4.11 e substituindo o valor de a_2 nela, tem-se que:

$$a_1 = l - a_2 = 0,4 \text{ m} - 0,217 \text{ m} = 0,197 \text{ m} \quad (4.14)$$

Pelas Eq. 4.13 e Eq. 4.14 se pode determinar que a posição longitudinal do centro de massa do *helvis* III fica a 0,197m do seu eixo traseiro e a 0,217m do seu eixo dianteiro.

4.1.2 Posição Lateral do Centro de Massa

Para determinar a posição lateral do centro de massa do *helvis* III é necessário medir as forças verticais sob as rodas do lado direito deste (JAZAR, 2014). Para medir estas forças se precisou fazer a montagem apresentada na Fig. 4.3, onde as rodas do lado direito ficam sobre uma balança e as rodas do lado esquerdo ficam numa estrutura feita com tábuas de madeira, para manter o *helvis* III nivelado. A informação fornecida pela balança é:

$$m = 4,42 \text{ Kg} \quad (4.15)$$

Como a balança fornece informação de massa e é preciso conhecer qual é a força vertical sob as rodas do lado direito do *helvis* III então se substitui as Eq. 4.15 e Eq. 4.3 na Eq. 4.2:

$$F = (4,42 \text{ Kg}) \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 43,316 \text{ N} \quad (4.16)$$

Figura 4.3 - Montagem para conhecer a posição vertical do centro de massa

Uma vez conhecida a força descrita na Eq. 4.16 é preciso analisar as forças (Fig. 4.4) presentes num veículo estacionado num plano sem inclinação visto desde a parte frontal.

Figura 4.4 - Diagrama de forças de um veículo estacionado num terreno sem inclinação visto desde a parte frontal (JAZAR, 2014)

$$\sum M_x = 0 \quad (4.17)$$

A Eq. 4.17 é uma equação planar do equilíbrio estático para este caso (JAZAR, 2014), onde M_x são os momentos que existem no eixo x. Aplicando as equações Eq. 4.5 e Eq. 4.17 ao diagrama apresentado na Fig. 4.4 se tem que:

$$2F_{z1} + 2F_{z2} - mg = 0 \quad (4.18)$$

$$2F_{z1}b_1 - 2F_{z2}b_2 = 0 \quad (4.19)$$

Onde F_{z1} é a força vertical sob uma roda do lado esquerdo, F_{z2} é a força vertical sob uma roda do lado direito, m é a massa total do veículo (para o *helvis* III é 8,555Kg), g é o valor da aceleração da gravidade descrito na Eq. 4.3, b_1 é a distância que existe entre o centro de massa e a roda do lado esquerdo e b_2 é a distância que existe entre o centro de massa e a roda do lado direito do veículo. Isolando F_{z1} ou F_{z2} na Eq. 4.18 e substituindo na Eq. 4.19 se obtém que:

$$F_{z1} = \frac{1}{2}mg \frac{b_2}{w} \quad (4.20)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2}mg \frac{b_1}{w} \quad (4.21)$$

Onde w é a bitola do veículo (para o *helvis* III é 0,225m) e pode ser definida como:

$$w = b_1 + b_2 \quad (4.22)$$

Sabendo que F_{z2} é a força sob uma roda do lado direito do veículo e que a força total sob as duas rodas do lado direito do *helvis* III foi achada na Eq. 4.16 então se pode achar o valor de F_{z2} como:

$$F_{z2} = \frac{1}{2}(43,316N) = 21,658N \quad (4.23)$$

Isolando b_1 da Eq. 4.21 e substituindo o valor de F_{z2} nela, se obtém que:

$$b_1 = \frac{2w}{mg} F_{z2} = \frac{2(0,225\text{ m})}{(8,555\text{ Kg})(9,8\frac{\text{m}}{\text{s}^2})} \left(21,658\frac{\text{Kg m}}{\text{s}^2} \right) = 0,116\text{m} \quad (4.24)$$

Para achar o valor de b_2 , isola-se b_2 na Eq. 4.22 e substitui-se o valor de b_1 na Eq. 4.24.

$$b_2 = w - b_1 = 0,225\text{m} - 0,116\text{m} = 0,108\text{m} \quad (4.25)$$

Das Eq. 4.25 e Eq. 4.24 se pode determinar que a posição lateral do centro de massa do *helvis* III fica a 0,108m das rodas do lado direito do veículo e a 0,116m das rodas do lado esquerdo deste.

4.1.3 Altura do Centro de Massa

Para determinar a altura do centro de massa do *helvis III* se precisa conhecer a força sob as rodas dianteiras do veículo quando está estacionado num terreno com uma inclinação determinada (ϕ) (JAZAR, 2014). Para isto se fez a montagem apresentada na Fig. 4.5, na qual as rodas dianteiras ficam sobre a balança e as rodas traseiras ficam na superfície da mesa usada para fazer a montagem. Aproveitou-se a altura da balança para fazer a inclinação de 23° medidos com o sensor inercial IG500N (erro de 1° para o ângulo Pitch) e assim poder cumprir com os requisitos necessários para o teste.

Figura 4.5 - Montagem para conhecer a altura do centro de massa

$$m = 4.355 \text{ Kg} \quad (4.26)$$

A informação fornecida pela balança é apresentada na Eq. 4.26. Para obter a força sob as rodas dianteiras do *helvis III* se substitui as Eq. 4.26 e Eq. 4.2 na Eq. 4.3:

$$F = (4,355 \text{ Kg}) \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 42,679 \text{ N} \quad (4.27)$$

Para determinar a altura do centro de massa de um veículo se precisa analisar o diagrama de forças (Fig. 4.6) para um veículo estacionado num terreno com uma inclinação ϕ .

Figura 4.6 - Diagrama de forças de um veículo estacionado num terreno com uma inclinação ϕ (JAZAR, 2014)

Aplicando as equações planares do equilíbrio estático, descritas nas Eq. 4.6 e Eq. 4.5, às forças apresentadas na Fig. 4.6, se obtém que:

$$2F_{z1} + 2F_{z2} - m \cdot g = 0 \quad (4.28)$$

$$-2F_{z1}(a_1 \cos \phi - (h - R) \sin \phi) + 2F_{z2}(a_2 \cos \phi + (h - R) \sin \phi) = 0 \quad (4.29)$$

Onde F_{z1} é a força vertical sob uma roda dianteira, F_{z2} é a força vertical sob uma roda traseira, m é a massa total do veículo (para o *helvis III* é 8.555Kg), g é o valor da aceleração da gravidade descrito na Eq. 4.3, a_1 é a distância que existe entre o centro de massa e o eixo dianteiro do veículo, a_2 é a distância que existe entre o centro de massa e o eixo traseiro do veículo, R é o raio das rodas (para o *helvis III* é 0,075m), h é a altura do centro de massa e ϕ é o ângulo de inclinação do terreno onde o veículo fica estacionado. Isolando h da Eq. 4.29 se obtém que:

$$h = R + \left(\frac{2F_{z1}}{mg} l - a_2 \right) \cot \phi \quad (4.30)$$

Onde l é a distância entre os eixos do veículo e foi descrito na Eq. 4.11. Sabendo que F_{z1} é a força vertical sob uma roda dianteira e que o valor da força sob as duas rodas dianteira foi achado na Eq. 4.27, então o valor de F_{z1} é:

$$F_{z1} = \frac{1}{2}(42,679 \text{ N}) = 21,339 \text{ N} \quad (4.31)$$

Para conhecer o valor da altura do centro de massa (h) se substitui os valores de F_{z1} , da massa total do veículo (m), da aceleração da gravidade (g), do raio das rodas (R), da distância a_2 , do comprimento do veículo (l) e do ângulo de inclinação (ϕ) na Eq. 4.30.

$$h = 0,075m + \left(\frac{2(21,3395N)}{(8,555Kg)(9,8\frac{m}{s^2})} (0,4m) - 0,2176m \right) \cot(23) = 0,042m \quad (4.32)$$

Da Eq. 4.32 se pode determinar que a altura do centro de massa do *ħelvis III* fica a 0,042m do solo.

4.2 DINÂMICAÀ FRENTE DO *ħelvis III* SOBRE UM TERRENO SEM INCLINAÇÃO

Quando um veículo se movimenta com uma aceleração diferente de zero sobre um terreno sem inclinação se apresenta uma série de forças sob as rodas do veículo mostradas na Fig. 4.7.

Figura 4.7 - Diagrama de forças de um veículo se movimentando ($a \neq 0$) sobre um terreno sem inclinação (JAZAR, 2014)

Segundo Jazar (2014, p. 51), as equações de movimento de um veículo (com aceleração diferente de zero) vêm de duas equações do equilíbrio estático (Eq. 4.33 e Eq. 4.34) e uma equação de Newton na direção de “ x ” (Eq. 4.35).

$$\sum M_y = 0 \quad (4.33)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (4.34)$$

$$\sum F_x = ma \quad (4.35)$$

Onde M_y são os momentos sobre o eixo “y”, F_z são as forças verticais presentes no eixo “z” e F_x são as forças verticais presentes no eixo “x”, m é a massa total do veículo e a é a aceleração do movimento do veículo. Aplicando as Eq. 4.33, Eq. 4.34 e Eq. 4.35 ao diagrama de forças apresentado na Fig. 4.7, se obtém que:

$$2F_{x1} + 2F_{x2} = ma \quad (4.36)$$

$$2F_{z1} + 2F_{z2} - mg = 0 \quad (4.37)$$

$$-2F_{z1}a_1 + 2F_{z2}a_2 - 2(F_{x1} + F_{x2})h = 0 \quad (4.38)$$

Onde h é a altura do centro de massa do veículo, F_{x1} é a força de atrito das rodas dianteiras do veículo e F_{x2} é a força de atrito das rodas traseiras do veículo. F_{x1} e F_{x2} são descritas como:

$$F_{x1} = \mu_{x1}F_{z1} \quad (4.39)$$

$$F_{x2} = \mu_{x2}F_{z2} \quad (4.40)$$

Onde μ_{x1} é o atrito entre as rodas dianteiras e o terreno e μ_{x2} é o atrito entre as rodas traseiras e o terreno. Isolando F_{z1} ou F_{z2} da Eq. 4.37 e substituindo na Eq. 4.38 junto com a Eq. 4.36, se obtém que a força de atrito nas rodas dianteiras ou traseiras não tem relevância no valor de F_{z1} e F_{z2} :

$$F_{z1} = \frac{1}{2}mg\frac{a_2}{l} - \frac{1}{2}ma\frac{h}{l} \quad (4.41)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2}mg\frac{a_1}{l} + \frac{1}{2}ma\frac{h}{l} \quad (4.42)$$

Segundo Jazar (2014, p. 51), as Eq. 4.41 e Eq. 4.42 têm uma parte estática definida nas Eq. 4.43 e Eq. 4.44 e uma parte dinâmica que é definida nas Eq. 4.45 e Eq. 4.46.

$$(F_{z1})_{st} = \frac{1}{2}mg \frac{a_2}{l} \quad (4.43)$$

$$(F_{z2})_{st} = \frac{1}{2}mg \frac{a_1}{l} \quad (4.44)$$

$$(F_{z1})_{dyn} = -\frac{1}{2}ma \frac{h}{l} \quad (4.45)$$

$$(F_{z2})_{dyn} = \frac{1}{2}ma \frac{h}{l} \quad (4.46)$$

As partes estáticas destas forças permitem descrever as forças sob as rodas traseiras ou dianteiras de um veículo quando fica estacionado num terreno sem inclinação. Para comprovar isto se substitui os valores das variáveis m , g , l , a_2 e a_1 nas Eq. 4.43 e Eq. 4.44.

$$(F_{z1})_{st} = \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) \frac{0,2176m}{0,4m} = 22,804N \quad (4.47)$$

$$(F_{z2})_{st} = \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) \frac{0,197m}{0,4m} = 20,645N \quad (4.48)$$

O valor de F_{z1} obtido na Eq. 4.47 é aproximadamente igual ao valor de F_{z1} medido (Eq. 4.12) no teste onde o *helvis* III ficou estacionado sobre uma plano sem inclinação composto por uma balança (onde ficavam as rodas dianteiras) e uma estrutura feita de tábuas de madeira (onde ficavam as rodas traseiras). A Eq. 4.47 apresenta o valor de F_{z1} e a Eq. 4.48 apresenta o valor de F_{z2} do *helvis* III quando fica estacionado num terreno sem inclinação.

Para saber como os valores de F_{z1} e F_{z2} mudam quando o veículo tem uma aceleração diferente de zero, se substitui os valores das variáveis m , g , l , a_2 , h e a_1 nas Eq. 4.41 e Eq. 4.42.

$$F_{z1} = \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) \frac{0,2176m}{0,4m} - \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) \frac{0,042m}{0,4m} a \quad (4.49)$$

$$F_{z1} = 22,804N - (0,455N)a \quad (4.50)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) \frac{0,197m}{0,4m} + \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) \frac{0,042m}{0,4m} a \quad (4.51)$$

$$F_{z2} = 20,645N + (0,455N)a \quad (4.52)$$

Das Eq. 4.50 e Eq. 4.52 se pode determinar que a força vertical sob as rodas dianteiras (F_{z1}) do *helvis* III diminui à medida que aceleração do veículo aumenta e que a força vertical sob as rodas traseiras (F_{z2}) do *helvis* III aumenta à medida que a aceleração do veículo aumenta.

4.3 DINÂMICA PARA FRENTE DO *helvis* III SOBRE UM TERRENO COM INCLINAÇÃO ($\phi \neq 0$)

Figura 4.8 - Diagrama de forças de um veículo se movimentando ($a \neq 0$) sobre um terreno com inclinação ($\phi \neq 0$) (JAZAR, 2014)

Quando um veículo se movimenta com uma aceleração diferente de zero sobre um terreno inclinado, as forças sob as rodas do veículo podem diminuir ou aumentar, dependendo da inclinação do terreno. Para conhecer o efeito da inclinação sobre estas forças é preciso analisar o diagrama de forças apresentado na Fig. 4.8.

Segundo Jazar (2014, p. 56), as equações de movimento de um veículo se movimentando ($a \neq 0$) num terreno inclinado são determinadas mediante o uso das equações do

equilíbrio estático descritas nas Eq. 4.53 e Eq. 4.54 e usando a equação de Newton descrita na Eq. 4.55.

$$\sum M_y = 0 \quad (4.53)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (4.54)$$

$$\sum F_x = ma \quad (4.55)$$

Aplicando estas equações ao diagrama de forças apresentado na Fig. 4.8, se tem que:

$$2F_{x1} + 2F_{x2} - mg \sin \phi = ma \quad (4.56)$$

$$2F_{z1} + 2F_{z2} - mg \cos \phi = 0 \quad (4.57)$$

$$-2F_{z1}a_1 + 2F_{z2}a_2 - 2(F_{x1} + F_{x2})h = 0 \quad (4.58)$$

Onde h é a altura do centro de massa do veículo, F_{x1} (Eq. 4.39) é a força de atrito das rodas dianteiras do veículo, F_{x2} (Eq. 4.40) é a força de atrito das rodas traseiras do veículo e ϕ é o ângulo de inclinação do terreno. Isolando $(2F_{x1} + 2F_{x2})$ da Eq. 4.56 e F_{z1} ou F_{z2} da Eq. 4.57 para logo substituir os resultados na Eq. 4.58, se obtém que:

$$F_{z1} = \frac{1}{2}mg \left(\frac{a_2}{l} \cos \phi - \frac{h}{l} \sin \phi \right) - \frac{1}{2}ma \frac{h}{l} \quad (4.59)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2}mg \left(\frac{a_1}{l} \cos \phi + \frac{h}{l} \sin \phi \right) + \frac{1}{2}ma \frac{h}{l} \quad (4.60)$$

Segundo Jazar (2014, p. 56), as forças verticais sob as rodas do veículo (F_{z1} e F_{z2}) descritas nas Eq. 4.59 e Eq. 4.60 têm uma parte estática descrita nas Eq. 4.61 e Eq. 4.62 e uma parte dinâmica descrita nas Eq. 4.63 e Eq. 4.64.

$$(F_{z1})_{st} = \frac{1}{2}mg \left(\frac{a_2}{l} \cos \phi - \frac{h}{l} \sin \phi \right) \quad (4.61)$$

$$(F_{z2})_{st} = \frac{1}{2}mg \left(\frac{a_1}{l} \cos \phi + \frac{h}{l} \sin \phi \right) \quad (4.62)$$

$$(F_{z1})_{dyn} = -\frac{1}{2}ma \frac{h}{l} \quad (4.63)$$

$$(F_{z2})_{dyn} = \frac{1}{2}ma \frac{h}{l} \quad (4.64)$$

As Eq. 4.61 e Eq. 4.62 descrevem o comportamento das forças sob as rodas dianteiras e traseiras quando o veículo fica estacionado sobre um terreno com inclinação ($\phi \neq 0$). Para conhecer o valor destas forças para o *helvis* III é preciso substituir os valores das variáveis m , g , a_2 , a_1 , h , l nas Eq. 4.61 e Eq. 4.62.

$$(F_{z1})_{st} = \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2} \right) \left(\frac{0,2176m}{0,4m} \cos \phi - \frac{0,042}{0,4m} \sin \phi \right) \quad (4.65)$$

$$(F_{z1})_{st} = (22,804208N) \cos \phi - (4,456N) \sin \phi \quad (4.66)$$

$$(F_{z2})_{st} = \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2} \right) \left(\frac{0,197m}{0,4m} \cos \phi - \frac{0,042}{0,4m} \sin \phi \right) \quad (4.67)$$

$$(F_{z2})_{st} = (20,64535N) \cos \phi + (4,456N) \sin \phi \quad (4.68)$$

Se o ângulo da inclinação do terreno é zero ($\phi=0$), os valores das forças sob as rodas dianteiras (Eq. 4.69) e sob as rodas traseiras (Eq. 4.70) são os mesmos valores achados quando o *helvis* III fica estacionado sobre um terreno sem inclinação (Eq. 4.47 e Eq. 4.48):

$$(F_{z1})_{st} = 22,804N \quad (4.69)$$

$$(F_{z2})_{st} = 20,645N \quad (4.70)$$

Para comprovar as Eq. 4.67 e Eq. 4.68, o *helvis* III foi estacionado sobre um terreno inclinado ($\phi=23^\circ$) e se fez a medição da força vertical sob uma roda dianteira ($F_{z1} = 20,53N$). Para conhecer o valor de F_{z1} se substitui o valor de ϕ na Eq. 4.66:

$$(F_{z1})_{st} = (22,804N) \cos(23) - (4,456N) \sin(23) = 19,502N \quad (4.71)$$

O valor de F_{z1} achado na Eq. 4.71 e o valor medido da mesma força não são iguais, mas são muito próximos de modo que podemos dizer que as Eq. 4.66 Eq. 4.68 podem ser usadas para obter aproximações dos valores reais das forças sob as rodas dianteiras ou traseiras de um veículo quando fica estacionado num terreno inclinado.

Para obter a inclinação máxima de um terreno pelo qual o *helvis* III possa estacionar sem escorregar se deve assumir que a força de atrito da roda traseira ($F_{x2} = 0$) é igual a zero já que o freio do veículo fica nas rodas dianteiras (JAZAR, 2014, p. 48). Então as Eq. 4.56, Eq. 4.57 e Eq. 4.58 podem ser reescritas como:

$$2F_{x1} - mg \sin \phi = 0 \quad (4.72)$$

$$2F_{z1} + 2F_{z2} - mg \cos \phi = 0 \quad (4.73)$$

$$-2F_{z1}a_1 + 2F_{z2}a_2 - 2(F_{x1})h = 0 \quad (4.74)$$

Fazendo os isolamentos adequados nas Eq. 4.71, Eq. 4.72 e Eq. 4.73 se obtêm que:

$$F_{z1} = \frac{1}{2}mg \frac{a_2}{l} \cos \phi - \frac{1}{2}mg \frac{h}{l} \sin \phi \quad (4.75)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2}mg \frac{a_1}{l} \cos \phi + \frac{1}{2}mg \frac{h}{l} \sin \phi \quad (4.76)$$

$$F_{x1} = \frac{1}{2}mg \sin \phi \quad (4.77)$$

Segundo Jazar (2014, p. 48), quando o ângulo de inclinação tem o máximo valor possível, a força F_{x1} é descrita como:

$$F_{x1} = \mu_{x1}F_{z1} \quad (4.78)$$

Substituindo a Eq. 4.78 nas Eq. 4.72, Eq. 4.73 e Eq. 4.74 e isolando as novas equações, se obtém que o ângulo máximo de inclinação do terreno no qual o veículo pode ser estacionado é descrito como:

$$\tan \phi_{max} = \frac{a_2 \mu_{x1}}{l - h \mu_{x1}} \quad (4.79)$$

Para testar a Eq. 4.79 o *helvis III* foi estacionado (com as rodas freadas) sobre uma tábua de madeira (Fig. 4.9) e o ângulo da inclinação foi variado até que o veículo começou a escorregar, nesse momento se mediu o ângulo que ficava entre a tábua e o solo ($\phi=25^\circ$).

Figura 4.9 - Montagem usada para comprovar o ângulo máximo de inclinação de um terreno

Segundo Serway e Jewett (2008, p. 121) a tangente do ângulo de inclinação achado no teste anterior é o valor do coeficiente de atrito (μ_{x1}) existente entre as rodas do *helvis III* e a tábua de madeira.

$$\mu_{x1} = \tan \phi = \tan 25 = 0,49 \quad (4.80)$$

Substituindo os valores de a_2 , μ_{x1} , l e h na Eq. 4.79, se obtém o valor do ângulo máximo de inclinação no qual o *helvis III* pode ficar estacionado na tábua de madeira sem escorregar.

$$\phi_{max} = \tan^{-1} \frac{(0,2176m)(0,49)}{(0,4m) - (0,49)} = \tan^{-1}(0,2811) = 15,7^\circ \quad (4.81)$$

Da Eq. 4.81 se determina que, se o *helvis III* fica estacionado num terreno com uma inclinação maior a $15,7^\circ$ e o terreno tem um atrito de 0,49 com respeito as rodas do veículo, o *helvis III* vai escorregar. Isto foi a razão pela qual o *helvis III* escorregou no teste por que o ângulo de inclinação medido foi maior ao ângulo crítico achado na Eq. 4.81.

Para determinar qual é o efeito da aceleração nos valores das forças verticais sob as rodas dianteiras e traseiras do *helvis* III se movimentando num terreno com uma inclinação qualquer, substitui-se os valores de m , g , a_2 , l , h , a_1 nas Eq. 4.59 e Eq. 4.60.

$$F_{z1} = \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2} \right) \left(\frac{0,2176m}{0,4m} \cos \phi - \frac{0,04255m}{0,4m} \sin \phi \right) - \frac{1}{2}(8,555Kg)a \frac{0,04255m}{0,4m} \quad (4.82)$$

$$F_{z1} = (22,804N) \cos \phi - (4,459N) \sin \phi - (4,459N)a \quad (4.83)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2} \right) \left(\frac{0,197m}{0,4m} \cos \phi + \frac{0,04255m}{0,4m} \sin \phi \right) + \frac{1}{2}(8,555Kg)a \frac{0,04255m}{0,4m} \quad (4.84)$$

$$F_{z2} = (20,645N) \cos \phi + (4,459N) \sin \phi + (4,459N)a \quad (4.85)$$

Das Eq. 4.83 e Eq. 4.85 se pode determinar que à medida que a aceleração aumenta, a força vertical sob as rodas dianteiras do *helvis* III diminui e a força vertical sob as rodas traseiras aumenta.

Para determinar os limites da aceleração do *helvis* III se considera que as forças sob as rodas dianteiras (F_{z1}) e sob as rodas traseiras (F_{z2}) são maiores que zero, então as Eq. 4.59 e Eq. 4.60 podem ser escritas como:

$$\frac{a}{g} \leq \frac{a_2}{h} \cos \phi - \sin \phi \quad (4.86)$$

$$\frac{a}{g} \geq -\frac{a_1}{h} \cos \phi - \sin \phi \quad (4.87)$$

A Eq. 4.86 descreve o limite máximo da aceleração e a Eq. 4.87 descreve o limite mínimo da aceleração quando o *helvis* III se movimenta sobre um terreno com uma inclinação determinada ($\phi \neq 0$). Para achar os valores dos limites da aceleração, se tem que substituir os valores de a_2 , a_1 e h nas Eq. 4.86 e Eq. 4.87.

$$\frac{a}{g} \leq 5,113 \cos \phi - \sin \phi \quad (4.88)$$

$$\frac{a}{g} \geq -4,629 \cos \phi - \sin \phi \quad (4.89)$$

Para conhecer os limites da aceleração do *helvis* III quando se movimenta sobre um terreno sem inclinação, faz-se o ângulo da inclinação do terreno igual a zero ($\phi=0$) nas Eq. 4.88 e Eq. 4.89.

$$\frac{a}{g} \leq 5,113 \quad (4.90)$$

$$\frac{a}{g} \geq -4,629 \quad (4.91)$$

Segundo Jazar (2014, p. 58), substituindo $a = 0$ e isolando ϕ nas Eq. 4.86 e Eq. 4.87, se obtém que:

$$\phi_{max} = \tan^{-1} \left(\frac{a_2}{h} \right) \quad (4.92)$$

$$\phi_{min} = \tan^{-1} \left(-\frac{a_1}{h} \right) \quad (4.93)$$

Onde ϕ_{max} (em inglês é chamado “*tilting angle*”) é o limite do ângulo da inclinação do terreno onde o *helvis* III não pode acelerar mais e o veículo vai retornar e ϕ_{min} (em inglês é chamado “*falling angle*”) é o limite do ângulo da inclinação do terreno onde o *helvis* III não pode desacelerar mais e o veículo vai continuar seu movimento sem poder parar. Os valores limites destes ângulos de inclinação para o *helvis* III são:

$$\phi_{max} = 78,93^\circ \quad (4.94)$$

$$\phi_{min} = -77,819^\circ \quad (4.95)$$

O valor do “*falling angle*” é negativo devido a que o veículo se movimenta da parte superior do terreno inclinado para a parte inferior deste.

4.4 DINÂMICA PARA FRENTE DO *helvis* III SOBRE UM TERRENO COM INCLINAÇÃO LATERAL($\phi \neq 0$)

Assim como o veículo pode ficar estacionado sobre terrenos que gerem uma inclinação frontal no veículo, ele também pode ficar estacionado sobre terrenos que gerem inclinações laterais ao veículo. Estas inclinações laterais fazem com que as forças verticais sob as rodas de um lado do veículo sejam maior que as forças verticais sob as rodas do outro lado do veículo (JAZAR, 2014, p.66). Para calcular os valores das forças sob as rodas verticais do *helvis* III quando fica estacionado sobre um terreno que gera uma inclinação lateral ao veículo é preciso analisar o diagrama de forças apresentado na Fig. 4.10.

Figura 4.10 - Diagrama de forças de um veículo estacionado sobre um terreno que gera uma inclinação lateral ao veículo ($\phi \neq 0$) (JAZAR, 2014)

$$\sum M_x = 0 \quad (4.96)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (4.97)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (4.98)$$

Segundo Jazar (2014, p. 67), aplicando as equações de equilíbrio estático descritas nas Eq. 4.96, Eq. 4.97 e Eq. 4.98 ao diagrama de forças apresentado na Fig. 4.10, se obtém que:

$$2F_{y1} + 2F_{y2} - mg \sin \phi = 0 \quad (4.99)$$

$$2F_{z1} + 2F_{z2} - mg \cos \phi = 0 \quad (4.100)$$

$$2F_{z1}b_1 - 2F_{z2}b_2 + 2(F_{y1} + F_{y2})h = 0 \quad (4.101)$$

Onde F_{z1} é a forças sob as rodas do lado esquerdo do veículo, F_{z2} é a força sob as rodas do lado direito do veículo, F_{y1} é a força de atrito sob as rodas do lado esquerdo do veículo e F_{y2} é a força sob o lado direito do veículo. F_{y1} e F_{y2} são descritas como:

$$F_{y1} = F_{z1}\mu_{y1} \quad (4.102)$$

$$F_{y2} = F_{z2}\mu_{y2} \quad (4.103)$$

Fazendo as isolações respectivas nas Eq. 4.99, Eq. 4.100 e Eq. 4.101, se pode obter que as forças sob as rodas do lado direito ou esquerdo do veículo são descritas como:

$$F_{z1} = \frac{1}{2}mg \frac{b_2}{w} \cos \phi - \frac{1}{2}mg \frac{h}{w} \sin \phi \quad (4.104)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2}mg \frac{b_1}{w} \cos \phi + \frac{1}{2}mg \frac{h}{w} \sin \phi \quad (4.105)$$

$$F_{y1} + F_{y2} = \frac{1}{2}mg \sin \phi \quad (4.106)$$

Onde w é a bitola do veículo, b_1 é a distância entre a posição lateral do centro de massa e as rodas do lado esquerdo do veículo e b_2 é a distância entre a posição lateral do centro de massa e as rodas do lado direito do veículo. Segundo Jazar (2014, p. 67), substituindo as Eq. 4.102 e Eq. 4.103 nas equações anteriores, se obtém que o valor máximo do ângulo de inclinação do terreno que gera uma inclinação lateral no veículo é descrito como:

$$\tan \phi_{max} = \mu_y \quad (4.107)$$

Se a tangente do ângulo da inclinação do terreno é maior que o coeficiente de atrito que existe entre as rodas do veículo e o terreno então o veículo vai escorregar para um lado do terreno.

Para conhecer os valores das forças sob as rodas do *helvis* III quando fica estacionado num terreno que gera uma inclinação lateral, substitui-se os valores das variáveis m , g , b_2 , w , h e b_I nas Eq. 4.104 e Eq. 4.105.

$$F_{z1} = \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) \frac{0,10876m}{0,225m} \cos \phi - \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) \frac{0,04255m}{0,225m} \sin \phi \quad (4.108)$$

$$F_{z1} = (20,262N) \cos \phi - (7,927N) \sin \phi \quad (4.109)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) \frac{0,11624m}{0,225m} \cos \phi - \frac{1}{2}(8,555Kg) \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) \frac{0,04255m}{0,225m} \sin \phi \quad (4.110)$$

$$F_{z2} = (21,656N) \cos \phi + (7,927N) \sin \phi \quad (4.111)$$

Das Eq. 4.109 e Eq. 4.111 se pode dizer que o valor da força sob as rodas do lado do veículo que fiquem na parte superior da inclinação vai ser menor que o valor da força sob as rodas do lado do veículo que fiquem na parte inferior da inclinação. Neste caso as rodas do lado esquerdo do veículo ficam na parte superior da inclinação então o valor de F_{z1} é menor ao valor do F_{z2} .

Foram feitos dois testes com o *helvis* III para verificar o comportamento desta plataforma em terrenos que gerem uma inclinação lateral do veículo. O primeiro teste fez com um ângulo de inclinação igual a zero ($\phi=0$) e o segundo teste se fez com um ângulo de inclinação igual a 37° . A força sob as rodas do lado direito do veículo foi medida com a ajuda de uma balança e a montagem para o primeiro teste é apresentado na Fig. 4.11.

Figura 4.11 - Montagem usada para medir a força sob as rodas do lado direito do *helvis* III quando fica estacionado num terreno com inclinação lateral igual a zero

Com a informação fornecida pela balança e aplicando a segunda lei de Newton, se conhece que o valor da força sob as rodas do lado direito para este teste é:

$$F_{z2} = 21,656N \quad (4.112)$$

Para determinar o valor teórico de F_{z2} para este teste, se substitui o valor do ângulo da inclinação (para o caso $\phi=0$) na Eq. 4.109.

$$F_{z2} = 21,656N \quad (4.113)$$

Das Eq. 4.112 e Eq. 4.113 se pode determinar que o valor teórico de F_{z2} é igual ao valor medido com a balança. Para o segundo teste feito, o *helvis III* foi estacionado sobre um terreno com uma inclinao lateral medida igual a 37° (Fig. 4.12) onde as rodas do lado direito ficaram sobre uma balana e as rodas do lado esquerdo ficaram sobre a superfcie da mesa usada para o teste.

Figura 4.12 - Montagem usada para medir a fra sob as rodas do lado direito do *helvis III* quando fica estacionado num terreno com inclinao lateral igual a 37°

Com a informao fornecida pela balana e aplicando novamente a segunda lei de Newton, se obtm que o valor medido para a fra sob as rodas do lado direito do veculo :

$$F_{z2} = 22,972N \quad (4.114)$$

Para obter o valor terico desta fra, tem que substituir o valor do ngulo da inclinao na Eq. 4.111, mas o sinal do segundo termo muda devido ao fato que as rodas do lado direito ficam na parte superior da inclinao.

$$F_{z2} = (21,656N) \cos 37 - (7,927N) \sin 37 \quad (4.115)$$

$$F_{z2} = 22,955N \quad (4.116)$$

Das Eq. 4.114 e Eq. 4.116 se pode dizer que novamente o valor teórico é aproximadamente igual ao valor medido com ajuda da balança. Assim, se pode concluir que as Eq. 4.109 e Eq. 4.111 descrevem o comportamento das forças sob as rodas do lado direito e esquerdo do veículo quando fica estacionado num terreno que gera uma inclinação lateral no veículo.

4.5 DINÂMICA À FRENTE DO *helvis* III SOBRE UMA CRISTA

Segundo Jazar (2014, p. 81), os valores das forças verticais sob as rodas de um veículo que se movimenta sobre uma crista são menores que os valores das mesmas forças de um veículo que se movimenta sobre um plano inclinado com a mesma inclinação. Isto é devido à força centrífuga desenvolvida na direção de $-z$. Para determinar o comportamento de um veículo se movimentando sobre uma crista, tem-se que analisar o diagrama de forças apresentado na Fig.4.13.

Figura 4.13 - Diagrama de forças de um veículo se movimentado sobre uma crista (JAZAR, 2014)

Segundo Jazar (2014, p. 81), “Para um veículo se movimentado numa crista, as direções normal e tangencial são equivalentes às direções de $-z$ e x respectivamente”. Por tanto as equações que descrevem o movimento do veículo são:

$$\sum M_y = 0 \quad (4.117)$$

$$-\sum F_z = m \frac{v^2}{R_H} \quad (4.118)$$

$$\sum F_x = ma \quad (4.119)$$

Onde v é a velocidade do veículo e R_H é o raio de curvatura da crista. Aplicando as equações anteriores ao diagrama de forças apresentado na Fig. 4.13, se obtém que:

$$2F_{x1} \cos \theta + 2F_{x2} \cos \theta - mg \sin \phi = ma \quad (4.120)$$

$$-2F_{z1} \cos \theta - 2F_{z2} \cos \theta + mg \cos \phi = m \frac{v^2}{R_H} \quad (4.121)$$

$$2F_{z1}a_1 \cos \theta - 2F_{z2}a_2 \cos \theta + 2(F_{x1} + F_{x2})h \cos \theta + 2F_{z1}a_1 \sin \theta - 2F_{z2}a_2 \sin \theta - 2(F_{x1} + F_{x2})h \sin \theta = 0 \quad (4.122)$$

Onde ϕ é o ângulo da inclinação com respeito ao horizonte e θ é o ângulo da inclinação da crista. Fazendo as manipulações adequadas nas Eq. 4.120, Eq. 4.121 e Eq. 4.122 é possível determinar que:

$$F_{x1} + F_{x2} = \frac{ma + mg \sin \phi}{2 \cos \theta} \quad (4.123)$$

$$F_{z1} = \frac{1}{2}mg \left[\left(\frac{a_2}{l \cos \theta} \cos \phi + \frac{h(1 - \sin 2\theta)}{l \cos \theta \cos 2\theta} \sin \phi \right) \right] - \frac{1}{2}ma \frac{h(1 - \sin 2\theta)}{l \cos \theta \cos 2\theta} - \frac{1}{2}m \frac{v^2}{R_H} \frac{a_2}{l \cos \theta} \quad (4.124)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2}mg \left[\left(\frac{a_1}{l \cos \theta} \cos \phi - \frac{h(1 - \sin 2\theta)}{l \cos \theta \cos 2\theta} \sin \phi \right) \right] + \frac{1}{2}ma \frac{h(1 - \sin 2\theta)}{l \cos \theta \cos 2\theta} - \frac{1}{2}m \frac{v^2}{R_H} \frac{a_1}{l \cos \theta \cos \theta} \quad (4.125)$$

Substituindo os valores de m , ga_2 , l , h e a_1 nas Eq. 4.123, Eq. 4.124 e Eq. 4.125, pode-se obter os valores das forças F_{z1} e F_{z2} para o *helvis* III em função da velocidade, aceleração, do raio de curvatura da crista (R_H) e dos ângulo de inclinação (θ e ϕ).

$$F_{x1} + F_{x2} = \frac{(8,555Kg)a + (83,839N) \sin \phi}{2 \cos \theta} \quad (4.126)$$

$$\begin{aligned} F_{z1} = & 41,919N \left[\left(\frac{0,2176m}{(0,4m) \cos \theta} \cos \phi + \frac{(0,04255m)(1-\sin 2\theta)}{(0,4m) \cos \theta \cos 2\theta} \sin \phi \right) \right] - \\ & (4,277Kg)a \frac{(0,04255m)(1-\sin 2\theta)}{(0,4m) \cos \theta \cos 2\theta} - (4,277Kg) \frac{v^2}{R_H} \frac{0,2176m}{(0,4m) \cos \theta} \end{aligned} \quad (4.127)$$

$$\begin{aligned} F_{z2} = & 41,919N \left[\left(\frac{0,197m}{(0,4m) \cos \theta} \cos \phi - \frac{(0,04255m)(1-\sin 2\theta)}{(0,4m) \cos \theta \cos 2\theta} \sin \phi \right) \right] + \\ & (4,277Kg)a \frac{(0,04255m)(1-\sin 2\theta)}{(0,4m) \cos \theta \cos 2\theta} - (4,277Kg) \frac{v^2}{R_H} \frac{0,197m}{(0,4m) \cos \theta \cos \theta} \end{aligned} \quad (4.128)$$

Segundo Jazar (2014, p. 82), considerando que o tamanho da base do veículo é muito menor que o raio de curvatura da crista, então o ângulo da inclinação é muito pequeno e usam-se as seguintes aproximações:

$$\cos \theta \approx \cos 2\theta \approx 1 \quad (4.129)$$

$$\sin \theta \approx \sin 2\theta \approx 0 \quad (4.130)$$

Aplicando as aproximações anteriores, as Eq. 4.123, Eq. 4.124 e Eq. 4.125 podem ser reescritas como:

$$F_{x1} + F_{x2} \approx \frac{1}{2}m(a + g \sin \phi) \quad (4.131)$$

$$2 \frac{F_{z1}}{mg} \approx \left(\frac{a_2}{l} \cos \phi + \frac{h}{l} \sin \phi \right) - \frac{a}{g} \frac{h}{l} - \frac{v^2/R_H}{g} \frac{a_2}{l} \quad (4.132)$$

$$2 \frac{F_{z2}}{mg} \approx \left(\frac{a_1}{l} \cos \phi - \frac{h}{l} \sin \phi \right) + \frac{a}{g} \frac{h}{l} - \frac{v^2/R_H}{g} \frac{a_1}{l} \quad (4.133)$$

Quando o veículo se movimenta sobre uma crista existem duas velocidades críticas onde o veículo pode experimentar o efeito chamado “*veículo voador*”. Esse efeito aparece quando os valores de F_{z1} e F_{z2} são iguais a zero (JAZAR, 2014, p. 83). Isolando F_{z1} e F_{z2} das Eq. 4.132 e Eq. 4.133 e aplicando a condição para o efeito “*veículo voador*”, obtém-se que:

$$\frac{1}{2}mg \left[\left(\frac{a_2}{l} \cos \phi + \frac{h}{l} \sin \phi \right) \right] - \frac{1}{2}m \frac{v^2}{R_H} \frac{a_2}{l} = 0 \quad (4.134)$$

$$\frac{1}{2}mg \left[\left(\frac{a_1}{l} \cos \phi - \frac{h}{l} \sin \phi \right) \right] - \frac{1}{2}m \frac{v^2}{R_H} \frac{a_1}{l} = 0 \quad (4.135)$$

Isolando a velocidade nas Eq. 4.134 e Eq. 4.135 obtêm-se as duas velocidades críticas onde o veículo pode experimentar o efeito “*veículo voador*”:

$$v_{c1} = \sqrt{2gR_H \left[\left(\frac{1}{2} \cos \phi + \frac{h}{l} \sin \phi \right) \right]} \quad (4.136)$$

$$v_{c2} = \sqrt{-2gR_H \left[\left(-\frac{1}{2} \cos \phi + \frac{h}{l} \sin \phi \right) \right]} \quad (4.137)$$

Para conhecer os valores das velocidades críticas do *helvis III* substitui-se os valores de g , h , e l nas Eq. 4.136 e Eq. 4.137, esses valores vão depender dos valores de R_H e ϕ .

$$v_{c1} = \sqrt{\left(19,6 \frac{m}{s^2} \right) R_H \left[\left(\frac{1}{2} \cos \phi + (0,106) \sin \phi \right) \right]} \quad (4.138)$$

$$v_{c2} = \sqrt{\left(-19,6 \frac{m}{s^2} \right) R_H \left[\left(-\frac{1}{2} \cos \phi + (0,106) \sin \phi \right) \right]} \quad (4.139)$$

4.6 DINÂMICA À FRENTE DO *helvis III* SOBRE UMA DEPRESSÃO

Segundo Jazar (2014, p. 86), quando um veículo se movimenta sobre uma curva côncava de um terreno inclinado, a força normal sob as rodas do veículo é maior que quando se movimenta sob um terreno inclinado sem depressões. Isto é devido à força centrípeta

desenvolvida na direção de z . Para determinar quais são os valores das forças sob as rodas do veículo quando se movimenta sobre uma depressão, analisa-se o diagrama de forças apresentado na Fig. 4.14.

Figura 4.14 - Diagrama de forças de um veículo se movimentando sobre uma depressão (JAZAR, 2014)

O movimento do veículo pode ser descrito com as seguintes equações:

$$\sum M_y = 0 \quad (4.140)$$

$$\sum F_z = m \frac{v^2}{R_H} \quad (4.141)$$

$$\sum F_x = ma \quad (4.142)$$

Onde v é a velocidade do veículo e R_H é o raio de curvatura da depressão. Aplicando as Eq. 4.140, Eq. 4.141 e Eq. 4.142 ao diagrama de forças (Fig. 4.14) resultam (JAZAR, 2014, p. 87):

$$2F_{x1} \cos \theta + 2F_{x2} \cos \theta - mg \sin \phi = ma \quad (4.143)$$

$$-2F_{z1} \cos \theta - 2F_{z2} \cos \theta + mg \cos \phi = m \frac{v^2}{R_H} \quad (4.144)$$

$$2F_{z1}a_1 \cos \theta - 2F_{z2}a_2 \cos \theta + 2(F_{x1} + F_{x2})h \cos \theta + 2F_{z1}a_1 \sin \theta - 2F_{z2}a_2 \sin \theta - 2(F_{x1} + F_{x2})h \sin \theta = 0 \quad (4.145)$$

Fazendo as isolações pertinentes, as forças sob as rodas do veículo são descritas como:

$$F_{x1} + F_{x2} = \frac{ma + mg \sin \phi}{2 \cos \theta} \quad (4.146)$$

$$F_{z1} = \frac{1}{2} mg \left[\left(\frac{a_2}{l \cos \theta} \cos \phi + \frac{h(1 - \sin 2\theta)}{l \cos \theta \cos 2\theta} \sin \phi \right) \right] - \frac{1}{2} ma \frac{h(1 - \sin 2\theta)}{l \cos \theta \cos 2\theta} + \frac{1}{2} m \frac{v^2}{R_H} \frac{a_2}{l \cos \theta} \quad (4.147)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2} mg \left[\left(\frac{a_1}{l \cos \theta} \cos \phi - \frac{h(1 - \sin 2\theta)}{l \cos \theta \cos 2\theta} \sin \phi \right) \right] + \frac{1}{2} ma \frac{h(1 - \sin 2\theta)}{l \cos \theta \cos 2\theta} + \frac{1}{2} m \frac{v^2}{R_H} \frac{a_1}{l \cos \theta \cos \theta} \quad (4.148)$$

Para conhecer o valor das forças sob as rodas do *helvis* III (F_{z1} e F_{z2}), é preciso substituir os valores das variáveis m , g , a_2 , l , h e a_l nas Eq. 4.146, Eq. 4.147 e Eq. 4.148. Esses valores vão depender da aceleração, da velocidade, do raio de curvatura da depressão (R_H) e dos ângulos de inclinação (θ e ϕ)

$$F_{x1} + F_{x2} = \frac{(8,555Kg)a + (83,839N) \sin \phi}{2 \cos \theta} \quad (4.149)$$

$$\begin{aligned} F_{z1} = & 41,919N \left[\left(\frac{0,2176m}{(0,4m) \cos \theta} \cos \phi + \frac{(0,04255m)(1 - \sin 2\theta)}{(0,4m) \cos \theta \cos 2\theta} \sin \phi \right) \right] - \\ & (4,277Kg)a \frac{(0,04255m)(1 - \sin 2\theta)}{(0,4m) \cos \theta \cos 2\theta} + (4,277Kg) \frac{v^2}{R_H} \frac{0,2176m}{(0,4m) \cos \theta} \end{aligned} \quad (4.150)$$

$$\begin{aligned} F_{z2} = & 41,919N \left[\left(\frac{0,197m}{(0,4m) \cos \theta} \cos \phi - \frac{(0,04255m)(1 - \sin 2\theta)}{(0,4m) \cos \theta \cos 2\theta} \sin \phi \right) \right] + \\ & (4,277Kg)a \frac{(0,04255m)(1 - \sin 2\theta)}{(0,4m) \cos \theta \cos 2\theta} + (4,277Kg) \frac{v^2}{R_H} \frac{0,197m}{(0,4m) \cos \theta \cos \theta} \end{aligned} \quad (4.151)$$

A posição do centro de massa do veículo, achada neste capítulo, foi usada no desenvolvimento do modelo cinemático do *helvis* III que é descrito no capítulo 5. Os exemplos da dinâmica à frente de um veículo FWS permitiu conhecer alguns limites que devem ser levados em conta no momento de desenvolver controladores para a navegação do *helvis* III. Por último esclarece-se que a dinâmica apresentada neste capítulo é só uma parte de todo o modelo dinâmico de um veículo FWS.

5 CINEMÁTICA DO *helvis* III

Pode-se obter um modelo cinemático para o movimento lateral de um veículo que forneça uma descrição matemática deste sem levar em conta as forças que o afetam. Como resultado da modelagem se obtém um conjunto de equações que descrevem o movimento do veículo e que somente são baseadas em relações geométricas que regem o sistema (RAJAMANI, 2006). Este capítulo apresenta uma descrição do modelo cinemático de Ackerman de um veículo FWS, depois apresenta o modelo cinemático da bicicleta e por último apresenta o modelo cinemático desenvolvido para o *helvis* III junto com os resultados obtidos.

5.1 Modelo Cinemático de Ackerman

Um veículo de quatro rodas cujo esterçamento é definido pelas rodas dianteiras é chamado veículo FWS do inglês “*Front Wheel Steering*” (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004, p. 35). Se a velocidade de um veículo FWS é baixa, pode-se definir uma relação entre o esterçamento da roda frontal externa com respeito à roda frontal interna para que o veículo possa esterçar sem escorregar. Esta condição cinemática é chamada condição de Ackerman (JAZAR, 2010). A condição de Ackerman é definida como:

$$\cot(\delta_o) - \cot(\delta_i) = \frac{w}{l} \quad (5.1)$$

Onde δ_i é o ângulo de esterçamento da roda frontal interna, δ_o é o ângulo de esterçamento da roda frontal externa, w é a distância entre as duas rodas dianteiras e l é a distância entre o eixo dianteiro e o eixo traseiro. A definição de roda externa ou interna depende da posição do centro de rotação O (JAZAR, 2010).

Figura 5.1 - Veículo de esterçamento dianteiro (JAZAR, 2010)

A Fig. 5.1 apresenta um veículo de esterçamento dianteiro onde se pode ver que a distância entre o eixo dianteiro com respeito ao eixo traseiro é chamada l e que o centro de massa do veículo (C) é posicionado a uma distância a_2 com respeito ao eixo traseiro e a uma distância a_1 com respeito ao eixo dianteiro. No momento que o veículo vai esterçar, o movimento do centro de massa com respeito ao centro de rotação se torna um círculo de raio R (JAZAR, 2010):

$$R = \sqrt{a_2^2 + l^2 \cot^2(\delta)} \quad (5.2)$$

Onde δ é a cotangente da média das somas das cotangentes dos ângulos δ_o e δ_i (JAZAR, 2010):

$$\delta = \frac{\cot(\delta_i) + \cot(\delta_o)}{2} \quad (5.3)$$

O ângulo δ obtido na Eq. 5.3 é o mesmo ângulo de esterçamento gerado por uma bicicleta que tenha a mesma base l e que gere o mesmo raio R . “Para que todas as rodas estercem livremente em um caminho curvo, todos os eixos dos pneus devem se cruzar em um ponto comum. Isto é definido como o Critério de Ackerman” (JAZAR, 2010, p. 388, tradução própria).

Para conhecer os valores dos ângulos δ_i e δ_o utiliza-se os triângulos ΔAOD e ΔOBC apresentados na Fig. 5.1 e que são definidos pelas seguintes equações:

$$\tan(\delta_i) = \frac{l}{R_1 - W/2} \quad (5.4)$$

$$\tan(\delta_o) = \frac{l}{R_1 + W/2} \quad (5.5)$$

Para as Eq. 5.4 e Eq. 5.5 isola-se o termo R_1 e igualam-se os resultados:

$$R_1 = \frac{1}{2} W + \frac{l}{\tan(\delta_i)} = -\frac{1}{2} W + \frac{l}{\tan(\delta_o)} \quad (5.6)$$

Da Eq. 5.6 obtém-se a condição de Ackerman (Eq. 5.1), uma relação direta entre δ_i e δ_o (JAZAR, 2010). “A condição de Ackerman é necessária quando a velocidade do veículo é baixa e os ângulos de escorregamento são nulos. Nestas condições, não há forças laterais nem centrífugas. Um dispositivo que forneça um esterçamento de acordo com a condição de Ackerman é chamado de mecanismo de Ackerman. Na prática não existe um mecanismo de quatro barras que forneça perfeitamente a condição de Ackerman” (JAZAR, 2010, p. 389, tradução própria).

5.2 Modelo Cinemático da Bicicleta

Particularizando a cinemática de movimento lateral (Fig. 5.2) de um veículo de 4 rodas para um modelo de bicicleta, as duas rodas dianteiras são consideradas como uma única roda (A), bem como as duas rodas traseiras (roda (B)). O ângulo de esterçamento da roda A é definido como δ_f e o ângulo de esterçamento da roda B é definido como δ_r . Para que o esterçamento do veículo seja só dianteiro, pode-se considerar que o δ_r seja zero. O Centro de gravidade do veículo é representado como o ponto C, a distância do ponto A até o ponto C é denominada l_f , a distância entre o ponto B até o ponto C é l_r e a distância entre o ponto A até o ponto B é $L = l_f + l_r$ (RAJAMANI, 2006).

Figura 5.2 - Cinemática de movimento lateral de um veículo (RAJAMANI, 2006)

Para descrever o movimento do veículo é necessário definir três coordenadas: X, Y e ψ . As coordenadas X e Y são coordenadas inerciais da localização do centro de gravidade do veículo e ψ descreve a orientação do veículo. A velocidade no centro de gravidade do veículo é o vetor V, que gera um ângulo β com o eixo longitudinal do veículo que é chamado ângulo de escorregamento (RAJAMANI, 2006).

No desenvolvimento do modelo cinemático da bicicleta deve-se considerar que as direções dos vetores de velocidade das rodas A e B do veículo são as mesmas direções de orientação das rodas. Os ângulos δ_f e δ_r são os ângulos que geram os vetores de velocidade nos pontos A e B com respeito ao eixo longitudinal do veículo. Estas condições fazem que os ângulos de escorregamento de cada roda seja zero, o que é uma consideração razoável já que a baixas velocidades, as forças laterais geradas pelas rodas são pequenas (RAJAMANI, 2006).

O ponto “O” apresentado na Fig. 5.2 é o centro instantâneo de rotação para o veículo e é definido como a interseção das linhas OB e AO, projetadas perpendicularmente à orientação de cada roda. O raio da trajetória do veículo R é definido como a distância da linha OC, ligando o centro instantâneo de rotação do veículo ao seu centro de gravidade. O ângulo de orientação é definido como ψ e o ângulo de curso para o veículo é denominado $\gamma = \beta + \psi$ (RAJAMANI, 2006). Aplicando a lei dos senos ao triângulo AOC da Fig. 5.2 obtém-se:

$$\frac{\sin(\delta_f - \beta)}{l_f} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \delta_f)}{R} \quad (5.7)$$

Da mesma forma, para o triângulo BOC da Fig. 5.2 obtém-se:

$$\frac{\sin(\beta - \delta_r)}{l_r} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \delta_r\right)}{R} \quad (5.8)$$

Obtidas as Eq. 5.7 e Eq. 5.8, se faz uso da relação trigonométrica:

$$\sin(\theta \pm \alpha) = \sin \theta \cos \alpha \pm \cos \theta \sin \alpha \quad (5.9)$$

Aplicando Eq. 5.9 em Eq. 5.7 e Eq. 5.8 obtém-se que:

$$\frac{\sin(\delta_f) \cos(\beta) - \cos(\delta_f) \sin(\beta)}{l_f} = \frac{\cos(\delta_f)}{R} \quad (5.10)$$

$$\frac{\sin(\delta_r) \cos(\beta) - \cos(\delta_r) \sin(\beta)}{l_r} = \frac{\cos(\delta_r)}{R} \quad (5.11)$$

Multiplicando $\frac{l_f}{\cos(\delta_f)}$ em cada lado da Eq. 5.10:

$$\tan(\delta_f) \cos(\beta) - \sin(\beta) = \frac{l_f}{R} \quad (5.12)$$

Multiplicando $\frac{l_r}{\cos(\delta_r)}$ em cada lado da Eq. 5.11:

$$\sin(\beta) - \tan(\delta_r) \cos(\beta) = \frac{l_r}{R} \quad (5.13)$$

Adicionando as Eq. 5.12 e Eq. 5.13 obtém-se:

$$(\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)) \cos(\beta) = \frac{l_f + l_r}{R} \quad (5.14)$$

“Assumindo que o raio da trajetória do veículo muda lentamente devido à baixa velocidade, a taxa de mudança da orientação do veículo deve ser igual à sua velocidade angular $\dot{\psi}$ ” (RAJAMANI, 2006, p. 23, tradução nossa). Assim, a velocidade angular é definida como:

$$\dot{\psi} = \frac{V}{R} \quad (5.15)$$

Usando Eq. 5.14 pode-se escrever novamente a Eq. 5.15 como:

$$\dot{\psi} = \frac{V \cos(\beta)}{l_f + l_r} (\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)) \quad (5.16)$$

As equações gerais do movimento do veículo são definidas como:

$$\dot{X} = V \cos(\psi + \beta) \quad (5.17)$$

$$\dot{Y} = V \sin(\psi + \beta) \quad (5.18)$$

$$\dot{\psi} = \frac{V \cos(\beta)}{l_f + l_r} (\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)) \quad (5.19)$$

“Neste modelo existem três entradas: δ_f , δ_r e V . A velocidade V é uma variável externa e pode ser assumida como uma função variante no tempo ou pode ser obtida do modelo longitudinal do veículo” (RAJAMANI, 2006, p. 24, tradução própria). O valor para o ângulo de escorregamento β é definido como:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{l_f \tan(\delta_r) + l_r \tan(\delta_f)}{l_f + l_r} \right) \quad (5.20)$$

5.3 Modelo Cinemático do *helvis* III

Como mencionado na seção 3.2, o sistema de esterçamento do *helvis* III conta com um servo-motor, um mecanismo de Ackerman e uma placa Arduino. O mecanismo de Ackerman permite fazer a relação apresentada na Eq. 5.3, onde se relacionam o ângulo da roda frontal externa δ_o e o ângulo da roda frontal interna δ_i , do modelo cinemático de Ackerman, para obter o ângulo de esterçamento da roda frontal δ_f do modelo cinemático da bicicleta. O mecanismo de Ackerman usado no *helvis* III é apresentado na Fig. 5.3.

Figura 5.3 - Mecanismo de Ackerman do *helvis III*

O mecanismo de Ackerman conta com uma entrada ligada ao eixo do servo motor por um braço metálico que transmite o esterçamento do servo e conta com duas saídas ligadas a cada roda frontal do veículo. O mecanismo é muito similar a um mecanismo de 4 barras, onde a barra motora é o braço que fica ligado ao motor. Desse modo, o modelo cinemático do *helvis III* é desenvolvido com a teoria do modelo cinemático da bicicleta, apresentado na Fig. 5.2.

Para desenvolver o modelo cinemático do *helvis III* tem-se que o valor do ângulo de esterçamento da roda traseira (δ_r) é zero, já que as rodas traseiras não tem esterçamento. O valor da distância entre a posição do centro de massa com respeito ao eixo dianteiro (l_f) é 0,197 m, obtido da Eq. 4.14. O valor da distância entre a posição do centro de massa com respeito ao eixo traseiro (l_r) é 0,2176m (Eq. 4.13). O valor da distância entre os eixos do veículo (l) é 0,4m e foi descrito na seção 3.1. O valor do ângulo de escorregamento (β) para o *helvis III* é zero, já que sua velocidade não é maior a 5 Km/h (ver a seção 3.2.3). R é o raio de curvatura e δ_f é o ângulo de esterçamento frontal do veículo. Aplicando na Eq. 5.14 os valores descritos anteriormente, pode-se conhecer a relação entre o ângulo de esterçamento do veículo (δ_f) e o raio de curvatura (R).

$$\tan \delta_f = \frac{0.41}{R} \quad (5.21)$$

A Eq. 5.21 permite calcular o valor do ângulo de esterçamento quando se conhece o valor do raio da curvatura do percurso. Para conhecer as equações gerais da cinemática do *helvis III*, se substituem os valores de l_f , l_r e β nas Eq. 5.17, Eq. 5.18 e Eq. 5.19.

$$\dot{X} = V \cos(\psi) \quad (5.22)$$

$$\dot{Y} = V \sin(\psi) \quad (5.23)$$

$$\dot{\psi} = \frac{V}{0,42} \tan(\delta_f) \quad (5.24)$$

As Eq. 5.21, Eq. 5.22, Eq. 5.23 e Eq. 5.24 são o modelo cinemático do *helvis III*. Suas entradas são o ângulo de esterçamento δ_f e a velocidade do veículo (v).

5.3.1 Resultados

Como caracterização do modelo cinemático do *helvis III*, se definiram os valores do ângulo esterçamento real (δ_f) do veículo para 13 posições diferentes do servo motor e para dois terrenos diferentes. Para isto ajustou-se o servo motor numa posição inicial de 176° . Depois o motor maxon foi ligado a uma velocidade de 1500rpm e se observou que o robô fez um percurso circular com um raio de curvatura constante, comprovando o descrito na teoria do modelo da bicicleta (seção 5.3). Logo, se mediu o valor do raio de curvatura do percurso circular e se substituiu na Eq. 5.21 para obter o valor real do ângulo de esterçamento (δ_f). O teste foi repetido para cada uma das 13 posições do servo motor escolhidas e os resultados são apresentados na Tabela 5.1 (terreno de grama) e na Tabela 5.2 (terreno de cimento).

Tabela 5.1 - Resultados do esterçamento real do veículo sobre o terreno de grama

Posição do servo ($^\circ$)	$R_{\text{medido}}(\text{m})$	δ_f real ($^\circ$)
56	1,29	-17,766
66	1,75	-13,096
76	2,25	-10,186
86	3,59	-6,384
96	6,585	-3,480
106	-	-
116	7,33	3,127
126	5,84	3,924
136	2,35	9,752
146	1,97	11,634
156	1,48	15,485
166	1,215	18,863
176	1,065	21,520

Tabela 5.2 - Resultados do esterçamento real do veículo sobre o terreno de cimento

Posição do servo (°)	R _{medido} (m)	δ_f real (°)
56	1,145	-20,016
66	1,725	-13,286
76	2,125	-10,785
86	3,015	-7,601
96	3,6	-6,366
106	-	-
116	5,565	4,118
126	4,8	4,775
136	2,85	8,042
146	2,2	10,417
156	1,68	13,642
166	1,325	17,297
176	1,15	19,929

O sinal negativo indica que o esterçamento foi para o lado esquerdo do *helvis* III. Segundo os resultados obtidos, o veículo tem um esterçamento máximo de 19,929° para seu lado direito e 20,016° para seu lado esquerdo quando se movimentou sobre o terreno de cimento. Quando o *helvis* III se movimentou sobre o terreno de grama, apresentou um esterçamento máximo de 21,5° para seu lado direito e 17,6° para seu lado esquerdo.

Sobre o terreno de cimento, teve a capacidade de fazer curvaturas com valores de R dentro do intervalo de 1,15m até 5,56m para seu lado direito e de 1,14m até 3,6m para seu lado esquerdo. Sobre o terreno de grama o *helvis* III fez curvaturas com valores de R dentro do intervalo de 1,06m até 7,33m para seu lado direito e de 1,29m até 6,58m para seu lado esquerdo. Por último foi traçado um gráfico comparativo (Fig. 5.4) dos resultados obtidos sobre o terreno de grama e de cimento.

Figura 5.4 - Gráfico comparativo dos esterçamentos obtidos sobre o terreno de cimento e sobre o terreno de grama

Da Fig. 5.4 pode-se observar que os maiores valores de esterçamento acontecem quando o *helvis III* se movimentou sobre o terreno de grama, embora para as posições do servo dentro do intervalo de 110° até 130° , os maiores valores de esterçamento sejam para o terreno de cimento.

Para o valor do ângulo de esterçamento real do veículo da posição 106° do servo motor não foi possível medir o raio de curvatura da circunferência. Nessa posição o veículo apresentou um desvio com respeito a uma linha reta, mas fez um percurso circular com um raio muito grande. Segundo o modelo da bicicleta se o valor do esterçamento da roda dianteira está próximo a zero, o raio de curvatura vai tender a infinito e o percurso do veículo será uma linha reta. Assim, pode-se definir que o valor zero do esterçamento real do *helvis III* fica em alguma posição do servo motor dentro do intervalo de 96° até 116° .

Para finalizar este teste, foram tomados os dados apresentados na Tabela 5.2 para fazer um ajuste polinomial relacionando a posição do servo-motor com o esterçamento real do veículo. O ajuste foi feito em Matlab e os parâmetros do polinômio de segunda ordem são mostrados na Eq. 5.25.

$$y = 0,0155u^2 + 3,0929u + 3,2019 \quad (5.25)$$

Onde y é a posição do servo-motor e u é o esterçamento real do veículo. Como as ações de controle dos controladores proporcional e difuso para a orientação do veículo são um

esterçamento feito para gerar uma mudança na orientação do veículo, fez-se uso da função descrita na Eq. 5.25 para conhecer as posições do servo-motor que geram o esterçamento indicado na ação de controle.

5.3.2 Controlador proporcional para a orientação do veículo (ângulo Yaw)

Como aplicação dos resultados obtidos com o desenvolvimento do modelo cinemático do *helvis III* foi desenvolvido um sistema de controle para orientação do veículo (Fig. 5.5). A entrada do sistema de controle é a orientação desejada do veículo (ψ_d), sua saída é a orientação real do veículo (ψ_r), a entrada do bloco de controle (K) é o sinal de erro (e), descrito na Eq. 5.26, o bloco de controle (K) é um controlador proporcional e o bloco G é planta do sistema.

Figura 5.5 – Sistema de controle para a orientação do veículo

$$e = \psi_d - \psi_r \quad (5.26)$$

Para determinar a função de transferência que descreve a mudança da orientação de um veículo FWS, foi usada a Eq. 5.26. Nessa equação foi assumido que a tangente do ângulo de esterçamento do veículo (δ_f) é igual ao valor do ângulo, já que a tangente de um ângulo menor a um radiano (aproximadamente 57°) é o mesmo ângulo, e o máximo esterçamento do veículo é 20° (apresentado na seção anterior). Então, a Eq. 5.24 pode ser reescrita como:

$$\dot{\psi} = \frac{v}{0,42} \delta_f \quad (5.27)$$

Onde v é a velocidade do veículo. Aplicando Laplace à Eq. 5.27 obtém-se que função de transferência da planta é definida pela Eq. 5.28.

$$\frac{\psi}{\delta_f} = \frac{V}{0,42s} \quad (5.28)$$

Obtida a função de transferência seguiu-se a determinação do valor do ganho K do controlador que permitisse obter a melhor resposta da sua saída. Para isto, fez-se o veículo percorrer uma linha reta de comprimento igual a 6 m (velocidade do veículo igual a 0.19 m/s) onde gerou-se uma perturbação manual para observar a resposta real do controlador com esse valor do ganho K. Ao longo do percurso foram coletadas as leituras do ângulo Yaw (fornecido pelo sensor inercial IG500N). Esta resposta foi comparada com a resposta simulada para determinar se o valor do ganho K permitia que as duas respostas fossem ou não similares. Como resultado destes testes foi determinado que o melhor valor do ganho K foi 7. As respostas simulada (cor vermelha) e real (cor azul) do controlador para K=7 são apresentadas na Fig. 5.6.

Figura 5.6 – Resposta do controlador proporcional com ganho K=7

Da Fig. 5.6 pode-se observar que a perturbação gerou uma mudança de 22,75° na orientação do veículo, o tempo de estabelecimento é de aproximadamente 10 s e existe um sobressinal aproximado de 9%. Como outro resultado dos testes com o controlador proporcional obteve-se que, para ganhos K menores que 7, o tempo de estabelecimento (da resposta real do controlador) é incrementado, fazendo com que o veículo tarde muito em retornar à orientação desejada. Também foi obtido que, para valores do ganho K maiores a 7, a resposta do controlador não consegue retornar à orientação desejada, mas se mantém oscilando num intervalo de muito próximo à orientação desejada.

Fazendo uma comparação entre os resultados obtidos com o controlador difuso com respeito aos obtidos com o controlador proporcional, vê-se que a resposta obtida com o controlador proporcional (com $K=7$) foi a melhor, pois apresentou melhor tempo de estabelecimento (10s), menor sobressinal (9%) e menor tempo de subida (1s).

Para o desenvolvimento deste controlador foi usada a caracterização do sistema de propulsão (seção 3.2.3) para conhecer a velocidade do veículo durante os testes desenvolvidos. Também foi usada a posição do centro de massa do veículo (seção 4.1) e as equações do modelo cinemático desenvolvido (seção 5.3). Para o desenvolvimento dos testes foi usada a caracterização da IMU do sensor IG500N, para levar em conta o erro de leitura do ângulo Yaw (seção 3.4.1.2.2), e a função resultante da regressão linear da relação entre a posição do servo-motor e o ângulo de esterçamento do veículo (seção 5.3.1).

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvida uma plataforma robótica móvel baseada no modelo de Ackerman de esterçamento. Suas características dinâmicas foram determinadas e foram feitas diversas verificações de tempos de resposta e uso de seus sensores, de modo a permitir que novos trabalhos feitos a partir daqui tenham mais subsídios para simulações ou melhorias.

Para o sensor LIDAR UTM-30LX foi verificado que quando a luz solar é forte e incide diretamente no sensor, seu alcance se reduz bastante (30m para 4m nas medidas). Nessa condição limitante, além do obstáculo ter sido observado apenas até 4m de distância com respeito ao veículo, ainda foram obtidas diversas leituras não desejadas (ruído) que dificultaram a determinação da sua posição real. Recomenda-se portanto, usar algum método de filtragem para eliminar a presença dessas leituras não desejadas e assim obter com maior precisão a posição do obstáculo ou apenas usar o UTM-30LX em ambientes onde a luz solar não seja forte.

Durante a caracterização do receptor GPS do sensor IG500N, detectou-se que a presença do roteador embarcado no *hélvis III* gera uma interferência no sinal de GPS, de tal modo que não era possível detectar satélites disponíveis e impossibilitava obter leituras da posição do veículo. Para evitar este problema, foi construído o disco que fica na parte superior da vara metálica posicionada na frente do veículo, o que permitiu mitigar o efeito do roteador e assim detectar os satélites disponíveis para que a posição do veículo pudesse ser obtida novamente. Embora o problema tenha sido resolvido, a melhor solução é o desenvolvimento de outro tipo de comunicação com o computador para tirar definitivamente o efeito do roteador e assim garantir leituras de boa qualidade da posição do veículo.

Ainda na caracterização do receptor GPS do sensor IG500N observou-se que os valores CEP e SEP estão diretamente relacionados ao número de satélites disponíveis no momento da coleta de dados. Por tanto, aconselha-se trabalhar com leituras obtidas com a maior quantidade de satélites disponíveis e descartar aquelas leituras obtidas com menos de 8 satélites usados, já que essas leituras geram valores CEP e SEP maiores e podem ficar fora do intervalo de valores fornecidos na folha de dados do sensor. No caso do teste em Villavicencio (Colômbia), o número de satélites usados na coleta da informação não foi maior

a 8 e isto fez com que os valores CEP e SEP fossem duas vezes maiores que os valores fornecidos na folha de dados do sensor.

Na definição da relação entre a posição real do servo-motor e o ângulo de esterçamento do veículo, usou-se o modelo cinemático da bicicleta para determinar o esterçamento a partir da medição do raio da curvatura da circunferência feita pelo veículo numa determinada posição do servo motor. Os resultados obtidos descrevem o comportamento do esterçamento real do veículo que será de grande importância no desenvolvimento dos controladores de trajetória e navegação.

Dos testes de velocidade observa-se que o veículo não pode ser usado em pesquisas que abrangem altas velocidades, já que a maior velocidade obtida é de 4,7 Km/h. Por outro lado, essa velocidade é ótima para usar o *helvis III* em aplicações de agricultura de precisão onde não é necessário que o veículo tenha velocidades superiores a esta.

O desempenho do controlador fuzzy desenvolvido para a orientação do veículo, permitiu reduzir o desvio com respeito a uma linha reta, já que o *helvis III*, mecanicamente, não tem uma posição do servo motor na qual se possa obter um esterçamento real de 0° . O desvio real (sem controlador fuzzy) do veículo numa linha reta de comprimento de 14m foi maior que 1m e quando se usou o controlador o desvio é reduzido a 0,3m.

Como resultado do desenvolvimento dos dois controladores (fuzzy e proporcional) para a orientação do veículo, foi determinado que a melhor resposta foi obtida com o controlador proporcional, que apresentou melhores tempos de subida e estabelecimento e apresentou o menor valor de sobressinal.

6.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, são colocadas a seguir algumas sugestões de continuidade no desenvolvimento da plataforma:

Desenvolver o modelo da dinâmica lateral do veículo para gerar controladores que permitam estabilizar o veículo quando o terreno tenha uma inclinação em dois eixos locais do veículo num mesmo instante de tempo.

Desenvolver um protocolo de comunicação entre o computador embarcado e um computador externo que não envolva o uso de um roteador para melhorar ainda mais o desempenho do sinal GPS do IG500N e assim ter uma precisão maior na posição do veículo.

Embarcar câmeras no veículo que facilitem o reconhecimento do terreno e que tenham robustez quando a luz solar é forte. Isso ajudaria no reconhecimento feito com os sensores do tipo LIDAR UTM-30LX.

Desenvolver os controladores de trajetória e métodos de planejamento de trajetória para que o veículo possa percorrer de forma autônoma trajetórias predefinidas.

REFERÊNCIAS

- AMATO, J. L.; ANDERSON, J. J.; CARLONE, T. J.; FAGAN, M. E.; STAFFORD, K. A.; PADIR, P. Modular drive system for a planetary exploration mobility platform. Pages 163-168 of: Technologies for Practical Robot Applications, 2012. TePRA 2012.IEEE International Conference on.Doi:10.1109/TePRA.2012.6215672.
- ARTERO, Ó. T. **ARDUINO: Curso práctico de formación**. Madrid: RC Libros, 2013. ISBN 8494072501.
- BATURONE, A. O. **Robótica: manipuladores y robots móviles**. Barcelona: Marcombo, 2001. ISBN 8426713130.
- BORRERO, H. G.; BECKER, M.; ARCHILA, J. F.; BONITO, R. Fuzzy control strategy for the adjustment of the front steering angle of a 4WSD agricultural mobile robot. Pages 1-6 of: Computing Congress, 2012. CCC 2012. 7th Colombian. Doi: 10.1109/ColombianCC.2012.6398024.
- BOTELHO, W. C. **SUSTENTABILIDADE DE EMPREENDIMENTOS HABITACIONAIS POPULARES: DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE ANÁLISE**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Paulista, São Paulo, 2013.
- CASTILLO, S. A.; CABERTA, R. Ñ. **CARACTERIZACIÓN DE UN ROBOT MANIPULADOR ARTICULADO**. 2003. Tesis de maestria (Maestria en Ciencias en Ingenieria Mecatrónica), Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, 2003.
- DUTCH, S. Converting UTM to Latitude and Longitude (Or Vice Versa). [S.I.]. 2003. Disponível: <<http://www.uwgb.edu/dutchs/usefuldata/utmformulas.htm>>. Acesso em 20 Agosto 2014.
- ESTADOS UNIDOS. Força Aérea. GPS.gov. [S.I.]. 2014. Disponível em: <<http://www.gps.gov/>>. Acesso em: 10 Janeiro 2015.
- FERNANDES, R. O. Coordenadas UTM. Juazeiro do Norte. [entre 1994-2014]. Disponível: <<http://wiki.urca.br/dcc/lib/exe/fetch.php?media=sistema-coordenadas.pdf>>. Acesso em: 20 Agosto 2014.

- GIL, M. R. UNIDAD DE MEDIDA INERCIAL ALGORITMO DE ESTIMACIÓN E IMPLEMENTACIÓN SOFTWARE. Proyecto Final de Carrera – Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 2006.
- GROVES, P. D. **Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor integrated Navigation Systems**. London: Artech House, 2008.
- HERNANDES, A. C. **Análise de Risco de Colisão Usando Redes Bayesianas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- HOKUYO AUTOMATICO. Scanning Laser Range Finder UTM-30LX/LN Specification. 2012. Disponível em: <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/pdf/UTM-30LX_spec_en.pdf>. Acesso em: 15 Janeiro 2015.
- JÁCOBO, J. E. A. **Desenvolvimento de um Robô Autônomo Móvel Versátil utilizando Arquitetura Subsumption**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- JAZAR, R. N. **Vehicle Dynamics Theory and Application**. New York: Springer. 2008. ISBN 9780387742434.
- KAWASE, K. A General Formula for Calculating Meridian Arc Length and its Application to Coordinate Conversion in the Gauss-Krüger Projection. **Bulletin of the Geospatial Information Authority of Japan**, [S.I.], v. 59, p. 1-13, 2011.
- KUO, B. C. **Sistemas de control automático**. 7.^a ed. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall Hispanoamericana, 1996. ISBN 9688807230.
- LOONEY, M. Inertial Sensors Facilitate Autonomous Operation in Mobile Robots. 2010. Disponível em: <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/44-11/mobile_robots.pdf>. Acesso em: 18 Janeiro 2015.
- MENEGUETTE, A. Representação Cartográfica. [S.I.]. 2009. Disponível: <<http://arlete.meneguette.zip.net/repcarto/>>. Acesso em: 10 Janeiro 2015.
- MARRO, A. A. SOUZA, A. M. C.; CAVALCANTE, E. R. S.; BEZERRA, G. S.; NUNES, R. O. Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações. [S.I.]. 2010. Disponível em:

<http://aquilesburlamaqui.wdfiles.com/local--files/logica-aplicada-a-computacao/texto_fuzzy.pdf >. Acesso em: 05 Janeiro 2015.

MAXON MOTOR. EPOS2 Positioning Controller (Getting Started). [S.I.]. 2013a. Disponível em: <http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8811457151006/347717-Getting-Started-En.pdf >. Acesso em: 25 Abril 2014.

_____. EPOS2 Positioning Controller (Hardware Reference). [S.I.]. 2013b. Disponível em: <http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8811457085470/347717-Hardware-Reference-En.pdf >. Acesso em: 25 Abril 2014.

_____. EPOS2 Positioning Controllers (Application Notes Collection). [S.I.]. 2013c. Disponível em: <http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8811457937438/EPOS2-Application-Notes-Collection-En.pdf >. Acesso em: 25/04/2014.

NOVATEL. GPS Positioning Accuracy Measures. Calgary. 2003. Disponível em: <<http://www.novatel.com/assets/Documents/Bulletins/apn029.pdf> >. Acesso em: 04 Janeiro 2015.

NORTMAN, S.; ARROYO, A.; NECHYBA, M.; SCHWARTZ, E. Pneuman: A Humanoid Robot Implementation. In: Proceedings of the 15th Florida Conference on Recent Advances in Robotics. 2002.

OGATA, K. **Ingeniería de Control Moderno**. 3.^a ed. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall Hispanoamericana, 1998. ISBN 9701700481.

RAJAMANI, R. **Vehicle dynamics and control**. New York: Springer, 2006.

RIASCOS, L. A. M. Fundamentos de Robótica. [2010?]. Disponível em: <<http://pgene.ufabc.edu.br/conteudo/ensino/disciplinas/Robotica/FundamentosRobotica.html> >. Acesso em: 16 Janeiro 2015.

SBG SYSTEMS. IG-500N: GPS aided miniature INS. [S.I.]. 2007. Disponível em: <<http://www.sbg-systems.com/products/ig500n-miniature-ins-gps> >. Acesso em: 25 Abril 2014.

SCHÜTZ, A. Over rough and smooth – Robots on a mission to explore. [S.I.]. 2012. Disponível em:

<http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8808093581342/2012-10-en-rescue-robot.pdf?attachment=true>. Acesso em: 25 Abril 2014.

SERWAY, R. A.; JEWETT, J. W. J. **FÍSICA para ciencias e ingenierías**. 7^a ed. Santa fe: Cengage Learning Editores, 2008. ISBN 9786074813579.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSH, I. Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press, 2004.

TENNECO INC. Manual do Amortecedor. [S.I.], [2011?]. Disponível em: <http://www.sa-tenneco-automotive.com/Brasil/pdf/manual_amortecedor.pdf>. Acesso em: 18 Janeiro 2015.

THRUN, S.; MONTEMERLO, M.; DAHLKAMP, H.; STAVENS, D.; ARON, A.; DIEBEL, J.; FONG, P.; GALE, J.; HALPENNY, M.; HOFFMANN, G.; LAU, K.; OAKLEY, C.; PALATUCCI, M.; PRATT, V.; STANG, P.; STROHBAND, S.; DUPONT, C.; JENDROSEK, L. E.; KOELEN, C.; MARKEY, C.; RUMMEL, C.; VAN NIEKERK, J.; JENSEN, E.; ALESSANDRINI, P.; BRADSKI, G.; DAVIES, B.; ETTINGER, S.; KAEHLER, A.; NEFIAN, A.; MAHONEY, P. 2006. Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. Journal of Field Robotics.

VICTORINO, A. C. Controle de Trajetória e Estabilização de Robôs Móveis Não-Holonômicos. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

Apêndice A

Configuração da placa Epos 2 50/5

- **Software Epos Studio**

O software *Epos Studio* é uma ferramenta fornecida pela *Maxon motor* que permite configurar as placas *Epos* nas suas diferentes versões. Também permite experimentar os diferentes modos de operação das placas e fazer uma calibração dos parâmetros do controlador embarcado na *Epos2 50/5* para fazer o controle de posição ou de velocidade dos motores. *Epos Studio 2.0* é a versão do software usada durante a configuração da *Epos2 50/5*.

Figura A. 1 -Janela principal do Epos Studio

A Fig. A.1 apresenta a janela principal do *Epos Studio*, onde existe um painel de navegação (*Navigation*) para fazer a configuração da placa *Epos2*. O painel de navegação consta de uma janela com o nome e conteúdo do botão ativo do painel e de quatro botões chamados “*Workspace*”, “*Communication*”, “*Wizards*” e “*Tools*”. O primeiro botão do painel de navegação é chamado “*Workspace*”. Quando o botão é ativado, o nome do projeto e as placas ligadas ao computador são visualizados. Na Fig. A.2 vê-se o painel de navegação com o botão “*Workspace*” ativo.

Figura A. 2 -Painel de navegação com o botão WorkSpace ativo

O segundo botão do painel de navegação é chamado “*Communication*” e permite visualizar que tipo de placa está ligada ao computador, a porta (USB, CAN ou RS232) e o protocolo de comunicação que vai ser usado entre a placa e o computador. Se alguma conexão apresenta falha o software mostra uma cruz vermelha para indicar sua existência. A Fig. A.3 mostra um exemplo de conexão onde o software indica que não existe placa nenhuma ligada às portas USB.

Figura A. 3 - Painel de navegação com o botão Communication ativo

O terceiro botão do painel de navegação é chamado “*Wizards*” e sua ativação permite acessar a parte do software onde é feita a configuração da placa Epos2, ativar o processo de auto-calibração dos valores dos parâmetros do controlador embarcado e a visualização da configuração das portas de entradas e saídas digitais.

Figura A. 4 - Pannel de navegação com o botão *Wizards* ativo

A Fig. A.4 apresenta o painel de navegação quando o botão *Wizard* está ativo. O último botão do painel de navegação é chamado “*Tools*” e sua ativação permite acessar os diferentes modos de operação da placa Epos2, como o modo de velocidade, de posição ou de *encoder* mestre. A Fig. A.5 apresenta o painel de navegação quando o botão *Tools* está ativo.

Figura A. 5 - Pannel de navegação com o botão *Tools* ativo

O passo preliminar para configurar a Epos2 é verificar que o motor esteja ligado à placa e ela a uma fonte de alimentação ou bateria, que forneça a alimentação requerida pelo motor e esteja no intervalo de tensões permitidas pela placa a ser usada. Depois, faz-se a conexão da placa a alguma porta (USB, RS232 ou CAN) do computador e verifica-se se o computador reconhece a placa.

O primeiro passo da configuração da *Epos2* é a criação de um projeto para este tipo de placa e a escolha da pasta onde ficará o projeto. Na Fig. A.6 vê-se a janela de criação do

projeto para a placa *Epos2*. No momento de finalizar o primeiro passo, o *software* reconhecerá a placa ligada ao computador, a porta (USB, RS232 ou CAN) onde ela está ligada e que tipo de protocolo de comunicação será usado entre o computador e a placa. Esta informação pode ser conferida ativando o botão “*Communication*” do painel de navegação apresentado na Fig. A.3.

Figura A. 6 - Janela de novo projeto (GETTING STARTED, 2013)

Uma vez conferida a inexistência de falha de conexão entre o computador e a placa *Epos2*, o botão “*Wizards*” do painel de controle é ativado e depois escolhida a opção “*Startup Wizard*” (Fig. A.7).

Figura A. 7 - Janela que apresenta a opção “*Startup Wizard*” (GETTING STARTED, 2013)

A opção “*Startwizard*” inicia a configuração da placa *Epos2*. Tal processo consiste de 6 passos que são descritos no diagrama de fluxo apresentado na Fig. A.8. Nos primeiros três passos são definidos os parâmetros da comunicação, as características do motor e dos sensores de posição usados. Os três passos seguintes são feitos internamente pelo software, baseados nessas informações.

Figura A. 8 - Diagrama de fluxo (foi modificado do original fornecido pela Maxon motor) para a configuração da Epos2 (APLICACION NOTES COLLECTION, 2013)

A Fig. A.9 mostra a janela onde são preenchidas as características do motor requeridas pelo *Epos Studio* para poder configurar a placa *Epos2*. As características são a velocidade máxima do motor, a corrente nominal do motor, a constante de tempo térmica do enrolamento e o número de pares de polos. Estas informações foram descritas na seção 3.2.1 e obtidas da folha de dados do motor.

Figura A. 9 - Janela das características do motor Maxon usado (GETTING STARTED, 2013)

Uma vez feito o processo “*Startup Wizard*” o motor fica pronto para ser usado e o software fornece os valores dos ganhos de corrente, velocidade e posição. Existe um processo da regulação destes ganhos para obter o melhor valor, usando a opção “*Regulation Tunning*”(Fig. A.10). Neste processo pode-se fazer dois tipo de regulação, a primeira é uma regulação automática “*Auto Tuning*” e a segunda é uma regulação avançada “*Expert Tuning*”.

Figura A. 10 - Janela do processo de “Auto Tuning” (GETTING STARTED, 2013)

Na opção de “Auto Tuning” o software “Epos Studio” faz o ajuste automático dos ganhos do controlador de velocidade, posição e corrente necessários para movimentar o motor maxon EC-4Pole. Para isso, o software usa as informações fornecidas no processo de “Startup Wizard” e faz três etapas de regulação, a primeira é a regulação da corrente, a segunda é a da velocidade e a última é a da posição. Quando o processo é finalizado com sucesso, o software apresenta as respostas do controlador aplicado em cada etapa. Na Fig. A.10 é apresentado um exemplo de regulação automática fornecido pela empresa Maxon Motor. Na opção de “Expert Tuning” o usuário pode escolher os valores dos ganhos a usar, a suavidade da resposta desejada, pode testar os controladores com os ganhos escolhidos e por último ver as curvas características da resposta dos controladores testados.

O sistema de controle que a placa Epos2 oferece para a velocidade do motor Maxon é um sistema MISO (Multiple Input-Single Output) de malha fechada (Fig. A.11) com um controlador Proporcional e Integral (PI), um bloco de “feed-forward” da aceleração e outro da velocidade, um com as características mecânicas do motor usado, um do sistema de controle da corrente do motor e um que contém as constantes de torque a usar. Para informação mais detalhada acerca do controlador PI que tem a placa Epos2, pode-se consultar o documento APPLICATION NOTES COLLECTION (2013) fornecido pela Maxon motor.

Figura A. 11 - Sistema de controle de velocidade da placa Epos2 (APPLICATION NOTES COLLECTION, 2013)

- **Utilização da placa Epos2 a partir da linguagem C#**

O processo de programação da *Epos2* é feito usando o software *Visual Studio 2010* e a linguagem C#. Esse processo consiste de cinco passos que são descritos no diagrama de fluxo apresentado na Fig. A.12.

Figura A. 12 - Diagrama de fluxo (APPLICATION NOTES COLLECTION, 2013)

Para fazer a comunicação e posterior ativação/desativação da *Epos2* com a linguagem C#, foi usada a biblioteca “*EposCmd.dll*” fornecida pela empresa “*Maxon Motor*”. Para configurar a comunicação entre a *Epos2* e o computador fez-se uso da função “*DeviceManager* (“EPOS2”, “MAXON SERIAL V2”, “USB”, “USB0”)”. Nesta função é fornecido o tipo de placa a usar, o protocolo de comunicação, o tipo e nome da porta onde a placa fica ligada. Para a *Epos2*, o protocolo de comunicação usado foi serial (Maxon Serial V2) pelas portas USB e a porta onde fica ligada a placa é a porta USB0. As informações fornecidas na função “*DeviceManager*” são armazenadas na memória interna da placa *Epos2*.

sem precisar detalhar a posição da memória. As posições mais relevantes da memória são apresentadas na Fig. A.13.

Object Name	Object	User Value [Default Value]
CAN Bitrate	0x2001-00	User-specific [0]
RS232 Baudrate	0x2002-00	User-specific [3]
Motor Type	0x6402-00	Motor-specific [10]
Continuous Current Limit	0x6410-01	Motor-specific [5000]
Pole Pair Number	0x6410-03	Motor-specific [1]
Thermal Time Constant Winding	0x6410-05	Motor-specific [40]
Encoder Pulse Number	0x2210-01	Sensor-specific [500]
Position Sensor Type	0x2210-02	Sensor-specific [1]
Current Regulator P-Gain	0x60F6-01	Motor-specific. Determine optimal parameter using "Regulation Tuning" in «EPOS Studio».
Current Regulator I-Gain	0x60F6-02	
Speed Regulator P-Gain	0x60F9-01	Motor-specific. Determine optimal parameter using "Regulation Tuning" in «EPOS Studio».
Speed Regulator I-Gain	0x60F9-02	
Position Regulator P-Gain	0x60FB-01	Motor-specific. Determine optimal parameter using "Regulation Tuning" in «EPOS Studio».
Position Regulator I-Gain	0x60FB-02	
Position Regulator D-Gain	0x60FB-03	

Figura A. 13 -Posições da memória da placa Epos2 (APPLICATION NOTES COLLECTION, 2013)

Para determinar o modo de operação a ser usado, faz-se uso da função “*SetOperationMode*”. Para o trabalho desenvolvido foi escolhido o modo de operação “*ProfileVelocityMode*”, que permite movimentar o motor a uma velocidade desejada com uma aceleração e desaceleração escolhidas. Para ligar este modo de operação usou-se a seguinte linha de código:

```
epos.Operation.OperationMode.SetOperationMode(EOperationMode.OmdProfileVelocityMode)
```

Após ligar o modo de operação configura-se o valor máximo permitido para a aceleração com o uso da função “*SetMaxAcceleration*”. A linha do código onde para tal função é:

```
epos.Configuration.Advanced.Safety.SetMaxAcceleration(maxaccel)
```

Onde “*maxacel*” é uma variável de tipo int32 que contém o valor da aceleração máxima permitida. Para configurar a aceleração e desaceleração usa-se a função “*SetVelocityProfile*”, a linha do código é:

```
epos.Operation.ProfileVelocityMode.SetVelocityProfile(acel, desacel)
```

A variável “*acel*” é de tipo int32 e contém o valor da aceleração desejada para o movimento do motor e a variável “*desacel*”, também do tipo int32, o valor da desaceleração. Para começar o movimento do motor usa-se a seguinte função:

```
epos.Operation.ProfileVelocityMode.MoveWithVelocity(velocidade)
```

Onde “*velocidade*” é uma variável de tipo int32 para a velocidade do motor. Por último, para frear o movimento do motor faz-se uso da função:

```
epos.Operation.ProfileVelocityMode.HaltVelocityMovement()
```