

LUIZ FELIPE SARTORI GONÇALVES

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE
NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA POR GNSS

São Paulo

2011

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

LUIZ FELIPE SARTORI GONÇALVES

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE
NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA POR GNSS

São Paulo
2011

LUIZ FELIPE SARTORI GONÇALVES

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE
NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA POR GNSS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
2011

LUIZ FELIPE SARTORI GONÇALVES

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE
NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA POR GNSS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia de Transportes
Ênfase: Informações Espaciais

Orientador: Prof. Dr. Edvaldo Simões
da Fonseca Júnior

São Paulo
2011

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de junho de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Gonçalves, Luiz Felipe Sartori
Desenvolvimento de navegação autônoma por GNSS / L.F.S.
Gonçalves. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.
192 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Veículos autônomos 2.Veículos terrestres não tripulados
3.Sistemas globais de navegação por satélite 4.Sistemas de navegação autônoma I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Luiz Antônio Gonçalves e Maria Ester Sartori Gonçalves e irmã Caroline Sartori Gonçalves, por serem os grandes responsáveis pela minha formação acadêmica, principalmente no ensino fundamental, quando eu ainda não compreendia a importância desta formação.

Ao Prof. Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Jr., por proporcionar esta oportunidade, orientar e direcionar o trabalho, e acima de tudo, por acreditar e confiar na viabilidade do mesmo.

Aos Professores Dr. Luís Augusto Koenig Veiga e Dr. Cláudio Luiz Marte pela colaboração e atenção empregadas no trabalho.

Ao amigo Renato Pestana de Abreu, por ter me ajudado inúmeras vezes no projeto, madrugadas adentro, e sempre com muita disposição. E por isso ganhou o apelido de “Alma Solidária”.

Ao amigo Wagner Carrupt Machado, por, no início, ter me recebido como amigo sem praticamente me conhecer, além de ter me dado diversas “aulas particulares” sobre os temas que eu precisava estudar. E também pelas ajudas que deu ao projeto, além de estar sempre acompanhando e torcendo honestamente para que as coisas dessem certo.

Ao amigo Michel Robert Veiga, por ter me incentivado a realizar o mestrado e também pela colaboração que deu ao trabalho, tanto no aspecto teórico como prático.

À amiga Beatriz Herter Pozzebon, pela colaboração na pesquisa para a obtenção de referências bibliográficas.

Ao amigo Anderson Moraes Mori, pela colaboração que deu ao trabalho.

Ao amigo Caio Domingues Reina, por estar sempre colaborando com o projeto de uma forma geral.

Aos amigos Julio Yoshinobu Missao, Gabriel do Nascimento Guimarães e todos os demais integrantes do grupo GIGA pelo apoio e participação.

À amiga Luciene Ricardo de Lima, por me ajudar a manter o equilíbrio nos diversos momentos difíceis que tiveram que ser superados.

Ao amigo Jair Duque Mariotti, por ter sido um gestor profissional de muita generosidade quando eu estava em momentos difíceis neste trabalho.

Às empresas Continental Corporation do Brasil, Freescale Semicondutores Brasil, Vincotech GmbH e Texas Instruments Brasil, por terem cedido componentes e ferramentas essenciais para a realização do projeto.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para o êxito deste trabalho.

RESUMO

Veículos autônomos são objeto de crescente estudo em todo o mundo. Face à Engenharia de Transportes, é tema que deve provocar uma revolução nas próximas décadas, pois é concreta a tendência ao uso destes veículos na sociedade. Podem-se citar como grandes beneficiados a segurança, a logística, o fluxo de trânsito, o meio ambiente e também os portadores de deficiências. Com o objetivo de fazer um veículo atingir um ponto com coordenadas conhecidas de forma autônoma, uma plataforma veicular terrestre em escala foi utilizada, a qual recebeu um sistema computacional micro controlado e tecnologias para proporcionar mobilidade através de motores elétricos para tração e servo-motores para direcionamento; posicionamento por satélite através de receptor GNSS e bússola eletrônica para orientação; sensoriamento por ultra-som para evitar colisões; e comunicação sem fio, a fim de se realizar remotamente monitoramento e instrução em tempo real através de um aplicativo para computador pessoal (PC). Foi desenvolvido um algoritmo de navegação que, fazendo uso dos recursos disponíveis, proporcionou autonomia ao veículo, de forma a navegar para pontos com coordenadas conhecidas sem controle humano. Os testes realizados visaram avaliar a capacidade de autonomia do veículo, a trajetória de navegação realizada e a acurácia de chegada aos pontos de destino. O veículo foi capaz de atingir os pontos em todos os testes realizados, sendo considerado funcional seu algoritmo de navegação e também os sistemas de mobilidade, posicionamento, sensoriamento e comunicação.

Palavras-chave: Veículos autônomos. Veículos terrestres não tripulados. GNSS. Sistemas de navegação autônoma.

ABSTRACT

Autonomous vehicles are an on growing research target around the world. Face to Transports Engineering, it is a subject which is expected to make a revolution on the next decades. The great benefits are on security, logistic, traffic flow, environment and handicap. With the goal to make a vehicle navigate autonomously to known geodesics coordinates, a reduced scale terrestrial vehicular platform was used. This platform received a microcontrolled computational system and technologies to give it mobility, through electrical motors for traction and servo-motors for direction; satellite positioning, through a GNSS receiver and magnetic compass for orientation; ultra-sound sensing in order to avoid collision; and wireless communication, in order to do remote monitoring and instruction at real time through a PC application. It was developed a navigation algorithm which, from the available resources, gave autonomy to the vehicle, in order to navigate to known geodesics coordinates without human control. The test set was intended to evaluate the autonomy capacity of the vehicle, the navigation trajectory that was done and the arrival accuracy to the destination points. The vehicle reached the destination points on all tests done, being evaluated as functional its navigation algorithm and also the mobility, positioning, sensing and communication systems.

Keywords: Autonomous vehicles. Unmanned ground vehicles. GNSS. Autonomous navigation systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Robô Shakey	22
Figura 2 – Robô Stanford Cart	23
Figura 3 – Veículo ALV	24
Figura 4 – Veículo VaMP (Mercedes-Benz 500 SEL).....	25
Figura 5 – Veículo ARGO.....	26
Figura 6 – À esquerda: Veículo Spirit concebido para exploração de Marte.....	27
Figura 7 – Diagrama de Relacionamento dos Elementos de Projeto	29
Figura 8 - ParkShuttle operando no aeroporto de Amsterdã.....	30
Figura 9 - SandStorm, o veículo vencedor do DARPA Grand Challenge 2004	31
Figura 10 - Stanley, o veículo vencedor do DARPA Grand Challenge 2005	31
Figura 11 – Boss, o veículo vencedor do DARPA Grand Challenge 2007.....	32
Figura 12 – Causas de acidentes.....	35
Figura 13 – Estrutura geral dos sistemas GNSS.....	45
Figura 14 – Constelação GPS.....	48
Figura 15 – Estrutura dos sinais GPS	51
Figura 16 – Estações monitoras do sistema GPS	54
Figura 17 – Antenas GPS tipo Microstrip e Choke Ring	55
Figura 18 – Trilateração GPS	56
Figura 19 – Geometria dos satélites	65
Figura 20 – Visão Geral do Projeto.....	77
Figura 21 – Diagrama de transição entre os 3 modos básicos de operação	79
Figura 22 – Placa DEMO9S12XEP100 da Freescale.....	81
Figura 23 – Arquitetura do Sistema.....	84
Figura 24 – Arquitetura de <i>software</i> do sistema do veículo.....	85
Figura 25 – Colossus. Versão na cor prata	86
Figura 26 - Esquema de controle de direção trapezoidal.....	87
Figura 27 – Bateria Recarregável Chumbo-Ácido Regulada por Válvula	89
Figura 28 – Curva de Descarga da Bateria.....	90
Figura 29 – Diagrama da fonte de alimentação do veículo.....	91
Figura 30 – Sensor LV-MaxSonar-EZ1	95
Figura 31 – Transceptor de radiofrequência Wi.232DTSB-EVM-R	98

Figura 32 – Bússola eletrônica CMPS03.....	103
Figura 33 – Placa de avaliação com receptor GPS Vincotech A1080.....	105
Figura 34 – Azimutes de destino, calculado e diferenças angulares entre eles.....	120
Figura 35 – Montagem final do veículo com destaque para alguns componentes.....	125
Figura 36 – Arquitetura de <i>Hardware</i>	125
Figura 37 – Interface gráfica de usuário da EMI.....	127
Figura 38 – Imagem do local de teste do veículo na Praça do Relógio (USP-SP).....	130
Figura 39 – Momento do levantamento do ponto P4	132
Figura 40 – Foto do ponto P1 com as circunferências de referência.....	133
Figura 41 – Quantidade de Satélites GPS disponíveis no período de teste.....	135
Figura 42 – HDOP para o período de teste.....	135
Figura 43 – <i>Skyplot</i> para o período de teste.....	135
Figura 44 – Interface gráfica do aplicativo CSV2KML.....	139
Figura 45 – Quantidade média de satélites utilizados em cada teste.....	144
Figura 46 – Dispersão dos pontos de chegada em P1 para a acurácia calculada	145
Figura 47 – Dispersão dos pontos de chegada em P4 para a acurácia calculada	146
Figura 48 – CEP para os pontos do Teste A.....	147
Figura 49 – Acurácia dos pontos de chegada para o teste A	147
Figura 50 – Variação média do azimute calculado.....	153
Figura 51 – Valores médios das diferenças de orientação.....	153
Figura 52 - Proporção da variação de distância para os pontos de destino	153
Figura 53 – Trajetória registrada do teste B03	155
Figura 54 – Trajetória registrada do teste B04	155
Figura 55 – Trajetória registrada do teste B06	156
Figura 56 – Trajetória registrada do teste B07	156
Figura 57 – Comportamento do azimute calculado em relação ao azimute de destino para o teste B03	158
Figura 58 – Comportamento do azimute calculado em relação ao azimute de destino para o teste B04	158
Figura 59 – Comportamento do azimute calculado em relação ao azimute de destino para o teste B06	159
Figura 60 – Comportamento do azimute calculado em relação ao azimute de destino para o teste B07	159
Figura 61 – Relação da diferença de orientação com o azimute calculado para o teste B03.	161

Figura 62 – Relação da diferença de orientação com o azimute calculado para o teste B04.	161
Figura 63 – Relação da diferença de orientação com o azimute calculado para o teste B06.	162
Figura 64 – Relação da diferença de orientação com o azimute calculado para o teste B07.	162
Figura 65 – Teste C01: Azimute calculado	164
Figura 66 – Teste C02: Azimute calculado	164
Figura 67 – Teste C03: Azimute calculado	165
Figura 68 – Teste C04: Azimute calculado	165
Figura 69 – Teste C05: Azimute calculado	165
Figura 70 – Teste C01: Trajetória prevista x registrada	167
Figura 71 - Teste C02: Trajetória prevista x registrada.....	167
Figura 72 - Teste C03: Trajetória prevista x registrada.....	167
Figura 73 - Teste C04: Trajetória prevista x registrada.....	168
Figura 74 - Teste C05: Trajetória prevista x registrada.....	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeitos do sistema ABS em acidentes	33
Tabela 2 - Sinais GPS	50
Tabela 3 - Especificações do veículo	87
Tabela 4 - Velocidade do som no ar em função da temperatura	95
Tabela 5 - Características do sensor LV-MaxSonar-EZ1	96
Tabela 6 - Estrutura das Mensagens	100
Tabela 7 - Estados de Operação do Veículo.....	102
Tabela 8 - Características da bússola eletrônica CMPS03	104
Tabela 9 - Características do receptor GPS A1035-H.....	106
Tabela 10 - Características do receptor Leica SR-20	131
Tabela 11 - Características da antena Leica AX1201.....	131
Tabela 12 - Dados dos pontos de teste (referidos a WGS 84).....	132
Tabela 13 - Distância entre os pontos (metros)	132
Tabela 14 - Azimutes geodésicos entre os pontos (graus decimais)	133
Tabela 15 - Acurácia de chegada aos pontos de destino para o teste A	144
Tabela 16 - Qualidade do posicionamento transmitida pelo veículo no momento de chegada ao ponto de destino	148
Tabela 17 - Qualidade do posicionamento gerada no aplicativo <i>Planning</i> a partir dos satélites usados na solução no momento de chegada ao ponto de destino	149
Tabela 18 - Tempo de missão (horário local).....	151
Tabela 19 - Valores médios e seus respectivos desvios padrão para a diferença absoluta entre os azimutes geodésico, magnético corrigido da declinação e calculado em relação ao azimute ideal	166
Tabela 20 - Distâncias calculadas entre pontos de partida/chegada com seus respectivos pontos de destino para o teste C	169
Tabela 21 - Qualidade média do posicionamento para o teste C.....	169

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Terceira dimensão
A/D	Analógico/Digital
ABA	<i>Active Brake Assist</i>
ABS	<i>Anti-lock Braking System</i>
ADAS	<i>Advanced Driver Assistance Systems</i>
AGV	<i>Automatic Guided Vehicles</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AS	<i>Anti-Spoofing</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Exchange</i>
bps	Bits por segundo
C/A	<i>Coarse / Acquisition</i>
CC	Corrente Contínua
CEP	<i>Circular Error Probable</i>
CHAMP	<i>Challenging Minisatellite Payload</i>
CI	Circuito Integrado
CR	<i>Carriage Return</i>
CSV	<i>Comma-separated values</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DAS	<i>Driver Assistance Systems</i>
DGPS	<i>Differential GPS</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
DOP	<i>Dillusion of Precision</i>
EC	<i>European Commission</i>
EMI	Estação de Monitoramento e Instrução
ESA	<i>European Space Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
GDOP	<i>Geometric Dillusion of Precision</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GOCE	<i>Gravity Field and steady-state Ocean Circulation Explorer</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
GSD	<i>Geodetic Survey Division</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HDOP	<i>Horizontal Dillusion of Precision</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IA	Inteligência Artificial
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>

IGS	<i>International GNSS Service</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigational Satellite System</i>
ISRO	<i>Indian Space Research Organisation</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
KML	<i>Keyhole Markup Language</i>
LDWS	<i>Lane Departure Warning System</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LTG	Laboratório de Topografia e Geodésia
MCS	<i>Master Control Station</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NAVSTAR	<i>Navigation Satellite with Time and Ranging</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
NRCan	<i>Natural Resources Canada</i>
NTRIP	<i>Network Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
OSEK	<i>Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik in Kraftfahrzeugen</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PDOP	<i>Positional Dillusion of Precision</i>
PPS	<i>Precise Positioning Service</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RF	Radiofrequência
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SA	<i>Selective Availability</i>
SCI	<i>Serial Communication Interface</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
SRI	<i>Stanford Research Institute</i>
SV	<i>Space Vehicle</i>
SVN	<i>Space Vehicle Number</i>
TDOP	<i>Temporal Dillusion of Precision</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TTF	<i>Time to First Fix</i>
TU	Tempo Universal
USERE	<i>User Equivalent Range Error</i>
UGV	<i>Unmanned Ground Vehicle</i>
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
V2V	<i>Vehicle-to-vehicle</i>
VDOP	<i>Vertical Dillution of Precision</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. HISTÓRICO	21
1.2. ESTADO DA ARTE	26
1.3. OBJETIVOS	35
1.4. JUSTIFICATIVA	35
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	37
2. SISTEMAS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE	38
2.1. HISTÓRICO	38
2.1.1. Introdução	38
2.1.2. Fase Esférica	39
2.1.3. Fase Elipsoidal	41
2.1.4. Fase Geoidal	43
2.1.5. Era Espacial	43
2.2. SISTEMAS DE POSICIONAMENTO GLOBAL POR SATÉLITE (GNSS)	45
2.3. NAVSTAR/GPS	47
2.3.1. Segmento Espacial	48
2.3.2. Segmento de Controle	53
2.3.3. Segmento de Usuários	54
2.3.4. Princípio de posicionamento	55
2.3.5. Obtenção da distância	56
2.3.5.1. Pseudodistância	57
2.3.5.2. Fase da onda portadora	58
2.3.6. Erros relacionados ao posicionamento GPS	59
2.3.6.1. Erro da órbita	60
2.3.6.2. Refração troposférica	60
2.3.6.3. Refração ionosférica	61
2.3.6.4. Multicaminhamento	62
2.3.6.5. Erro do relógio do receptor	63
2.3.7. Técnicas de posicionamento	63
2.3.7.1. Posicionamento absoluto	64
2.3.7.2. Posicionamento relativo	66
2.3.7.3. GPS Diferencial (DGPS)	70

2.4. GLONASS.....	71
2.5. GALILEO.....	72
2.6. SISTEMAS DE POSICIONAMENTO LOCAL POR SATÉLITES.....	73
2.6.1. Beidou e Compass.....	73
2.6.2. <i>Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)</i>	74
2.6.3. <i>Indian Regional Navigational Satellite System (IRNSS)</i>	75
2.7. CONSIDERAÇÕES GERAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	75
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	77
3.1. PROJETO DO SISTEMA.....	77
3.2. AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	80
3.3. ARQUITETURA DO SISTEMA.....	84
3.4. PLATAFORMA VEICULAR.....	86
3.5. FONTE DE ENERGIA.....	89
3.6. SISTEMA DE MOBILIDADE.....	92
3.7. SISTEMA DE SENSORIAMENTO.....	94
3.8. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO.....	98
3.8.1. Protocolo de Comunicação.....	100
3.9. SISTEMA DE POSICIONAMENTO.....	102
3.10. SISTEMA DE NAVEGAÇÃO.....	110
3.10.1. Modo INICIAL.....	110
3.10.2. Modo REMOTO.....	111
3.10.3. Modo AUTÔNOMO.....	112
3.10.3.1. Verificação das Condições de Navegação.....	116
3.10.3.2. Navegação no Sentido do Ponto de Destino.....	117
3.10.3.3. Determinação de Chegada a Um Ponto.....	121
3.11. ESTRUTURA FINAL DO VEÍCULO.....	124
3.12. ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO E INSTRUÇÃO (EMI).....	126
3.13. ESTRUTURA, PLANEJAMENTO E REALIZAÇÃO DE TESTES.....	129
3.13.1. Teste A – Alcance e acurácia de chegada a um ponto.....	136
3.13.2. Teste B – Missão.....	137
3.13.3. Teste C – Trajetória Prevista X Registrada.....	137
3.13.4. Análise dos dados.....	138
3.14. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	139
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	140

4.1. RESULTADOS DO TESTE A	143
4.2. RESULTADOS DO TESTE B.....	150
4.3. RESULTADOS DO TESTE C.....	163
5. CONCLUSÕES.....	170
6. TRABALHOS FUTUROS.....	173
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	176
APÊNDICE A – Fluxogramas dos Modos de Operação	180
ANEXO A – Valores de Declinação Magnética CALCULADOS para o Município de São Paulo.....	186
ANEXO B – Conteúdo das Mensagens Utilizadas do Receptor GPS.....	188
ANEXO C – Relatório do processamento dos pontos de referência	192

1. INTRODUÇÃO

Os últimos anos têm sido marcados por um grande esforço da comunidade científica no que concerne à navegação autônoma de veículos em geral, sejam eles terrestres, aéreos ou aquáticos.

Autonomia refere-se a sistemas capazes de operar no ambiente real sem nenhuma forma de controle externo, por longos períodos de tempo. (BEKEY, 2005)

No escopo do presente trabalho, cujo foco será em veículos terrestres, entende-se por veículo autônomo aquele que é capaz de “perceber” o ambiente a sua volta e movimentar-se de forma segura e orientada, sem o controle humano direto, visando cumprir objetivos a ele delegados. O veículo deverá então possuir embarcados algoritmos para prover comportamentos através de tecnologias que proporcionem essa capacidade.

As principais tecnologias a serem empregadas neste tipo de aplicação serão aquelas para proporcionar mobilidade ao veículo, sensoriamento para praticar a navegação de forma segura, posicionamento para poder atingir os locais desejados, comunicação para que possa receber comandos e reportar informações de navegação e planejamento para que sejam definidos seus objetivos.

1.1. HISTÓRICO

Esse tópico apresentará uma breve história do início e evolução até os dias atuais dos veículos autônomos terrestres, onde será dada ênfase aos veículos que operam em ambientes urbanos.

A história dos veículos autônomos se iniciou com o desenvolvimento da robótica e da chamada inteligência artificial (IA). Esses esforços proporcionaram a evolução da tecnologia necessária para aplicar autonomia a veículos.

O primeiro grande esforço no desenvolvimento de robôs móveis foi o robô *Shakey*, desenvolvido na década de 1960 no Stanford Research Institute (SRI) (NILSSON, 1969 apud GAGE, 1995)¹.

Tratava-se de uma plataforma com rodas (Figura 1) equipada com câmera de TV, sensor ultra-sônico de distância e sensores de contato. Através de enlace comunicação por radiofrequência, o robô conectava-se com o *mainframe* SDS-940, o qual realizava as tarefas de navegação e exploração. Apesar de o *Shakey* ter sido considerado uma falha em sua época, por nunca ter atingido autonomia de operação, o projeto estabeleceu um patamar funcional e de desempenho, identificando as deficiências tecnológicas e ajudando a inserir a pesquisa em IA nas áreas de planejamento, visão e processamento de linguagem natural (FLYNN, 1985 apud GAGE, 1995)².

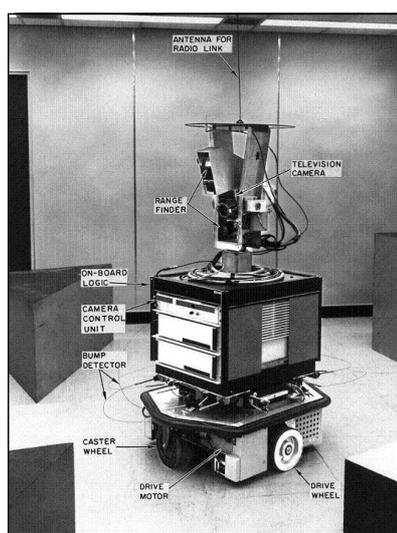


Figura 1 – Robô Shakey
(Fonte: <http://www.ai.sri.com/shakey/>)

Um dos grandes problemas da época era a capacidade de “visão” dos robôs, de forma a reconhecer objetos, principalmente em terceira dimensão (3D), para permitir a navegação de forma segura.

Na mesma época do *Shakey*, havia o projeto *Stanford Cart* (Figura 2). Era uma plataforma com pequenas rodas de bicicleta, que inicialmente possuía motores para tração, uma câmera de vídeo e bateria de carro para suprimento de energia.

¹ NILSSON, N.J. **A Mobile Automaton: An Application of Artificial Intelligence Techniques**, Proceedings of the First International Joint Conference on Artificial Intelligence, Washington DC, 1969

² FLYNN, A. M. **Redundant Sensors for Mobile Robot Navigation**, MIT AI Lab Technical Report 859p, 1985

Foi designada para testes de controle remoto de um veículo que estivesse na lua e, portanto, os comandos e movimentos deveriam considerar o tempo de propagação do sinal. Entretanto, com o anúncio do envio de uma missão tripulada à lua, a aplicação desta tecnologia foi descartada em meados de 1963.

Porém, o projeto continuou, e entre 1973 e 1981 o veículo foi utilizado para estudos de navegação e desvio de obstáculos, com uso sistema de visão estéreo que proporcionava uma reconstrução do ambiente em 3D em um *mainframe* (computador de grande porte dedicado ao processamento de grande volume de dados).

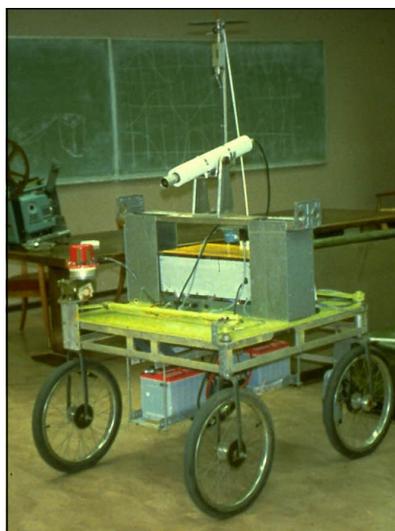


Figura 2 – Robô Stanford Cart
(Fonte: <http://www.stanford.edu/~learnest/cart.htm>)

Em 1977 o Laboratório de Engenharia Mecânica Tsukuba, no Japão, construiu o que foi considerado o primeiro veículo inteligente, o qual possuía a capacidade de rastrear marcas brancas colocadas no chão de uma via dedicada. O veículo atingia velocidades de até 30 km/h.

Na década de 1980, Ernst Dickmanns e sua equipe da Universidade *Bundeswehr Munich* (UniBW) na Alemanha, construíram um veículo inteligente que se utilizava de visão *saccadic*, abordagens probabilísticas como filtro Kalman e computadores paralelos. Este veículo atingia a velocidade de até 96 km/h em estradas sem tráfego.

Nesta mesma década, nos Estados Unidos da América (EUA), o DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) *Autonomous Land Vehicle* (ALV), construído sobre uma plataforma veicular com 8 rodas (Figura 3), possuía uma câmera colorida e um scanner laser, sendo capaz de seguir uma via urbana e desviar de obstáculos em velocidades de até 21 km/h e, em via de terra, transitar com velocidade de até 3km/h e desviar de valas, árvores, pedras e outros pequenos objetos (DOUGLASS, 1988 apud GAGE, 1995)³.

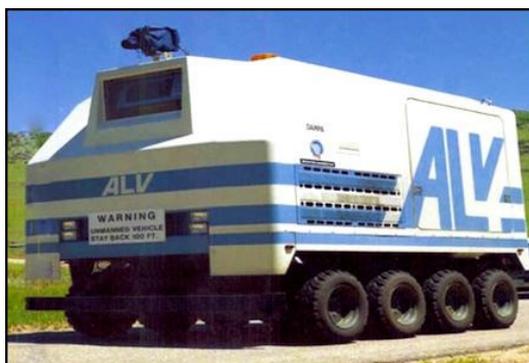


Figura 3 – Veículo ALV

(Fonte: <http://www.fastcompany.com/pics/here-come-autonomous-cars#2>)

Entre 1987 e 1995 a Comissão Europeia criou um projeto chamado *EUREKA Prometheus Project* (*Program for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety*). Na área de automóveis não tripulados foi o maior projeto já existente, tendo recebido orçamento equivalente nos dias atuais de 1 bilhão de dólares. Dois projetos deste programa atingiram os melhores resultados, sendo eles os veículos gêmeos VaMP e Vita e o veículo ARGO.

³ DOUGLASS, R. J. **The DARPA Autonomous Land Vehicle**: a Phase I Retrospective and a Prospective for the Future, Proceedings of the Conference on Space and Military Applications of Automation and Robotics, Huntsville AL, 1988



Figura 4 – Veículo VaMP (Mercedes-Benz 500 SEL)
(Fonte: DICKMANNNS, 2004)

Na demonstração final do *Prometheus Project*, os veículos VaMP (Figura 4) e Vita, cujo projeto também foi liderado por Ernst Dickmanns, demonstraram seu desempenho em uma via pública de 3 faixas, onde as seguintes tarefas foram executadas (DICKMANNNS, 2004) :

- Acompanhamento de faixa a velocidades de 130 km/h;
- Rastreamento e estimativa relativa de estado de até 6 veículos em cada hemisfério dos veículos autônomos e nas duas faixas vizinhas;
- Transição para comportamento de comboio, mantendo uma distância do veículo à frente proporcional à velocidade navegada;
- Mudança de faixa, incluindo tomada de decisão sobre quando a mudança de faixa poderia ser realizada com segurança;

Tais veículos utilizavam tecnologias como visão ativa para detecção de obstáculos em movimento e radares.

O veículo ARGO (Figura 5) foi desenvolvido no Departamento de Tecnologia da Informação da Universidade de Parma na Itália. Seu projeto foi continuado após o fim do *Prometheus Project*. Equipado com um sistema de visão estereoscópica através de duas câmeras preto e branco instaladas dentro do veículo, era capaz de seguir uma via. Fez em Junho de 1998 uma demonstração pública em uma viagem autônoma de 2.000 km pela Itália.



Figura 5 – Veículo ARG0
(Fonte: <http://vislab.it/Prototypes/view/14/ARGO>)

1.2. ESTADO DA ARTE

Do ponto de vista histórico, a robótica e a IA deram início ao desenvolvimento dos veículos autônomos. Nos dias atuais, essas áreas da ciência continuam sendo aplicadas a veículos, entretanto, são ferramentas para o estudo e realização não apenas de veículos autônomos, mas também de outros tipos de transporte inteligentes.

Com o crescimento e difusão, o conceito de veículos inteligentes tornou-se uma área de estudo independente e ganhou autonomia, sendo hoje conduzida principalmente em *Intelligent Transportation Systems* (ITS), onde estão inseridos os estudos sobre veículos autônomos.

A tecnologia atual já possibilita a viabilidade da aplicação de veículos autônomos a custos relativamente acessíveis, e sua constante evolução melhora gradativamente a qualidade de todos os elementos envolvidos, os quais serão apresentados adiante. A capacidade de processamento dos sistemas computacionais é um dos fatores mais importantes que potencializam essa evolução, pois consegue-se integrar um número crescente de sensores e atuadores no mesmo sistema, bem como a execução de complexos algoritmos com tempos de resposta que atendem aos requisitos de funcionalidade, tornando-os completos, agregando cada vez mais habilidades, eficácia, segurança e confiabilidade.

Diversos fabricantes de veículos comerciais, que são grandes interessados no tema, patrocinam projetos de pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias voltadas para o controle automático de diferentes funções dos veículos e para assistência ao motorista. Inúmeras instituições (militares e civis) ao redor do mundo incentivam essa evolução criando competições que envolvem veículos autônomos

para realizarem as mais diversas atividades, onde são criadas regras que todas as equipes participantes devem respeitar e critérios de avaliação. As atividades compreendem a prática de esportes, como o futebol de robôs, a limpeza (varredura) de um determinado ambiente, a procura, coleta e entrega de determinados objetos, o alcance de locais desejados e muitas outras. Todas as atividades, por mais particulares características que possuam, se valem sempre dos mesmos recursos tecnológicos: Sistemas computacionais, comunicação, sensores, atuadores e algoritmos.

Existem os veículos autônomos que são concebidos desde o início do projeto conforme as características de sua aplicação (Figura 6 à esquerda) e existem também os veículos convencionais que recebem toda a estrutura tecnológica para se tornarem autônomos (Figura 6 à direita). No primeiro caso, o projeto mecânico do veículo deve ser voltado para atender os objetivos propostos. No caso de um robô autônomo para uma competição de futebol, é fácil perceber essa necessidade. Entretanto, no segundo caso, um veículo que tenha o objetivo de percorrer um determinado trajeto para alcançar um ponto de destino pode possuir um projeto mecânico semelhante ao de veículos comerciais.



Figura 6 – À esquerda: Veículo Spirit concebido para exploração de Marte.
(Fonte: <http://static.howstuffworks.com/gif/mars-rover-2.jpg>)
À direita: Veículo Talos, concebido para a competição DARPA
(Fonte: http://www.hizook.com/files/users/3/MIT_Urban_DARPA.jpg)

O nível de autonomia é também fator que varia. Em uma extremidade existem aqueles que dependem de uma infra-estrutura externa e, portanto, estão limitados a ela e na outra, estão aqueles que são completamente independentes. Quanto maior for a liberdade de atuação no ambiente navegado, maior deverá ser a capacidade do veículo de sensoriá-lo e localizar-se nele.

Por esse motivo, o sensoriamento é um dos itens que recebem os maiores investimentos

Os principais elementos de projeto para veículos autônomos terrestres são (adaptado de WHYTE, 2001):

- Planejamento;
- Navegação;
- Localização;
- Comunicação;
- Sensoriamento;
- Mobilidade;

Whyte (2001) não considera Sensoriamento como um item isolado, como foi listado acima. Em seu trabalho, o sensoriamento é apresentado como parte integrante da Navegação, sendo classificado como “*Navigation in the small*”. Nesse caso, o mesmo se dá por “criar uma representação interna do ambiente, que possa ser posteriormente utilizada na execução de uma missão”.

O sensoriamento, nos dias atuais, é elemento de navegação autônoma que recebe a maior atenção da comunidade científica, permitindo a conclusão de que esse é o maior gargalo tecnológico para tornar viável o uso de veículos autônomos de forma cotidiana.

A proposta de sensoriamento do presente trabalho se dá apenas por evitar colisões frontais, sendo uma forma simples de sensoriamento, a qual não pretende extrair informações do ambiente para criar uma representação deste, tendo, portanto, uma correlação menor com a Navegação e nenhuma com o Planejamento. Por esse motivo, decidiu-se tratar Sensoriamento como um item isolado.

A figura 7 demonstra o diagrama de relacionamento entre os elementos de projeto.

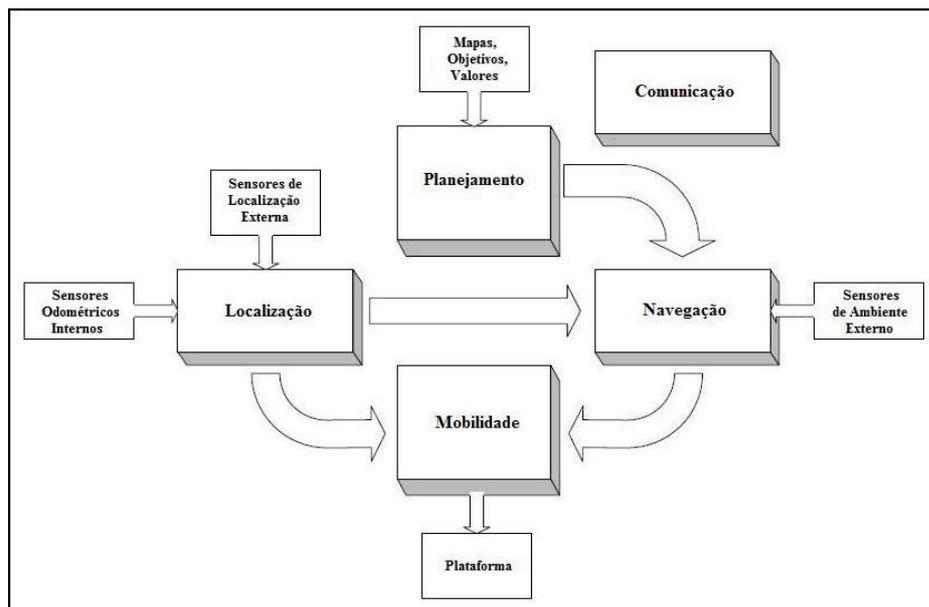


Figura 7 – Diagrama de Relacionamento dos Elementos de Projeto
(Traduzido de WHYTE, 2001)

O uso de veículos autônomos terrestres já é uma realidade na sociedade, embora ainda de forma discreta. Um dos principais aeroportos de Amsterdan (*Amsterdam Airport Schiphol*) utilizou por 7 anos um sistema de transporte autônomo, chamado *ParkShuttle* (figura 8). Desenvolvido pela empresa *2getthere*, o veículo transportava os usuários do estacionamento até o saguão de passageiros (http://www.2getthere.eu/Group_Transit/Projects/Amsterdam_Airport_Schiphol - Jun. 2010). Neste sistema, um caminho foi materializado na via de forma que o veículo podia sensoriá-lo, e então, segui-lo. Adicionalmente sensores foram utilizados para evitar acidentes e um sistema de comunicação implantado para que os usuários pudessem solicitar o uso do veículo, que atendia sob demanda.

Alguns fabricantes de veículos comerciais possuem veículos autônomos que fazem transporte de peças e componentes na linha de produção e estoque, com estrutura de projeto muito semelhante à do *PakShuttle*. É o caso da fábrica de caminhões da Mercedes-Benz, localizada no município de São Bernardo do Campo – SP, onde veículos autônomos transportam cabinas novas até o local de instalação na linha de produção, para que sejam instaladas, por um funcionário, em um caminhão que se encontra em fabricação.



Figura 8 - ParkShuttle operando no aeroporto de Amsterdã
(Fonte: <http://www.2getthere.eu>)

Pode-se notar, atualmente, que os veículos autônomos em operação comercial atuam em ambientes dedicados ou controlados, onde a infra-estrutura externa ainda é um elemento necessário nestes sistemas.

Limitados ainda a ambientes acadêmicos e competições, estão os veículos autônomos totalmente independentes de infra-estrutura externa. Nestes casos, os riscos são muito maiores e, portanto, muito mais recursos são necessários para que o veículo possa navegar de forma orientada e segura.

Atualmente, uma das fontes de maiores avanços em veículos autônomos tem sido uma competição organizada pela agência de pesquisa do Departamento de Defesa (DoD) dos EUA chamada DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*). Esta competição, nomeada de *DARPA Grand Challenge*, é motivada pelo objetivo do governo dos EUA em possuir 1/3 de sua frota de veículos militares autônomos até 2015. Até o momento foram realizadas 3 edições, nos anos de 2004, (DARPA, 2009a) 2005 (DARPA, 2009b) e 2007 (DARPA, 2009c). Em todas elas foram utilizados veículos comerciais adaptados para serem autônomos e independentes de infra-estrutura externa (BRAID; BROGGI; SCHMIEDEL, 2006; CHEN; ÖZGÜNER; REDMILL, 2004; LEONARD et al, 2008; THRUN et al, 2006).

A primeira edição da competição foi realizada no deserto de Mojave, nos EUA. A meta era cumprir um trajeto de 240 km. Nenhum dos 13 veículos participantes conseguiu terminar o trajeto, sendo considerado ganhador o veículo chamado *SandStorm* (figura 9) projetado pela equipe *Red Team* da Universidade *Carnegie Mellon*. Este veículo conseguiu viajar por cerca de 12 km, a qual foi a maior distância alcançada entre os competidores.



Figura 9 - SandStorm, o veículo vencedor do DARPA Grand Challenge 2004
(Fonte: WHITTAKER, 2007)

Na segunda edição, também em terreno off-road, o trajeto a ser percorrido era de 212 km. Apenas 5 dos 23 veículos conseguiram terminar o trajeto, sendo ganhador o veículo *Stanley* (figura 10) da equipe *Stanford Racing Team* da universidade de Stanford, com o tempo de 06h54min.



Figura 10 - Stanley, o veículo vencedor do DARPA Grand Challenge 2005
(Fonte <http://www.darpa.mil/grandchallenge05/awardphotogallery.html>)

A terceira edição adotou novas regras e conceitos. Foi abandonado o ambiente *off-road* e adotado agora o ambiente urbano. O desafio desta vez era atingir uma série de pontos determinados, respeitando diversas regras, como por exemplo, a legislação local de trânsito. Ao contrário das outras edições, os veículos estavam todos no mesmo ambiente ao mesmo tempo, sendo necessário também evitar colisões entre si. Desta vez, 6 dos 11 veículos participantes completaram a prova, embora 2 deles tenham excedido o tempo limite estabelecido de 6 horas. O ganhador foi o veículo *Boss* (figura 11) da equipe *Tartan Racing* desenvolvido por

uma parceria entre a universidade *Carnegie Mellon* e a *General Motors Corporation*, que concluiu a prova em 04h10min.



Figura 11 – Boss, o veículo vencedor do DARPA Grand Challenge 2007
(Fonte <http://www.tartanracing.org/gallery.html>)

A partir de experiências como essas pode-se vislumbrar como deverá ser o futuro em termos de veículos autônomos, pois sabe-se que aqueles que hoje já operam em caráter comercial, tempos atrás eram apenas projetos experimentais.

Paralelamente, muitas tecnologias que hoje são utilizadas em veículos autônomos são também comercialmente empregadas em *Driver Assistance Systems* (DAS) e *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS).

Pode-se citar o sistema *Active Brake Assist* (ABA) (<http://www.daimler.com/dccom/0-5-1210220-1-1210349-1-0-0-1210338-0-0-8-7165-0-0-0-0-0-0-0.html> - Jun. 2010) aplicado a alguns modelos de ônibus e caminhões da Mercedes-Benz. Através de sensores radar, este sistema é capaz de identificar um veículo à frente em um campo de 7 a 150 metros. Pela medida da velocidade relativa dos veículos, o sistema determina um possível risco de colisão e avisa o motorista sobre a iminência do fato. Se este não tomar nenhuma ação frente ao risco, o sistema assume o controle dos freios e faz a frenagem automaticamente, inicialmente de forma suave e mais bruscamente em caso de emergência.

Outro sistema também presente no mercado é o *Lane Departure Warning System* (LDWS) (HOUSER; PIEROWICZ; FUGLEWICZ, 2005). Através do uso de visão computacional, imagens do caminho imediatamente a frente do veículo são analisadas de forma a detectar as faixas da via em que o veículo trafega. O sistema alerta o motorista caso o veículo esteja saindo dos limites de sua faixa sem sinalizar

corretamente com o uso da luz indicadora de direção (seta). Dessa forma, serão evitadas distrações ou mesmo se o motorista dormir ao volante.

Ainda não disponível no mercado comercial, mas como uma tecnologia com grande potencial de aplicação a veículos autônomos é o *Inter-Vehicle Communication*, também conhecido como V2V (*Vehicle to Vehicle Communication*). Este tipo de tecnologia utiliza sistemas de posicionamento integrados a sistemas de comunicação por radiofrequência para trocar informações com outros veículos próximos. Existem diversas aplicações desta tecnologia, que abordam temas como a segurança, informações sobre as condições da via, fluidez do tráfego e outras. Um exemplo é o estudo (TANG; YIP, 2010), que simulou a aplicação desta tecnologia para a segurança, onde os veículos trocam informações de posicionamento e movimento. A partir desses dados, o sistema calcula uma possível rota de colisão entre veículos, especialmente aqueles que ainda não possuem linha direta de visão entre si, por exemplo, em um cruzamento. Desta forma, o motorista é alertado com suficiente antecedência para evitar o acidente.

Entretanto, existem casos em que a aplicação de um sistema DAS, pode, ao invés de aumentar a segurança, não causar impacto significativo ou até mesmo diminuí-la. Um dos fatores que podem levar a essa situação é que em muitos casos o comportamento do motorista se torna mais agressivo quando ele se sente protegido por um sistema DAS que proporcionará mais segurança (VAA; PENTTINEN; SPYROPOULOU, 2007). Por isso, o risco real de acidente muitas vezes é avaliado ignorando-se qual a sensação de risco que o motorista experimenta e/ou gerencia. Como pode ser visto na tabela 1, que mostra os efeitos da presença do Sistema de Freio Anti-bloqueio (ABS) em acidentes, para alguns fatores a segurança piorou.

Tabela 1 - Efeitos do sistema ABS em acidentes
(Adaptada de: VAA; PENTTINEN; SPYROPOULOU, 2007)

Tipo de Acidente	Mudança de porcentagem no número de acidentes
Capotamento	+22%
Acidente com apenas um veículo sem capotamento	+15%
Acidentes em intersecção	-2%
Colisão traseira	-1%
Colisão com objetos fixos	+14%
Colisão com veículos realizando curva	-8%
Colisão com pedestres, ciclistas e animais	-27%

Um sistema autônomo que gerencie o tráfego de um veículo não irá gerenciar o risco da mesma forma que um humano o faria, preservando os aspectos de segurança introduzidos com uso de novas tecnologias.

Existem diversos outros tipos de tecnologias DAS, mas as citadas nos parágrafos anteriores são exemplos de especial aplicação a veículos autônomos, onde, no caso, estas são modificadas para, ao invés de alertar o motorista (que não existe no cenário proposto), fornecer informação para que o sistema gestor possa tomar decisões e/ou ações.

Para que possam se tornar comercialmente aplicáveis, essas tecnologias devem atender a requisitos, a legislação e a normas de funcionamento e de segurança. Essas condições garantem confiabilidade aos sistemas e, dessa forma, atestam sua aplicação em veículos autônomos.

As tecnologias DAS incorporam mais segurança no tráfego de veículos, atuando, na maior parte dos casos, sobre falhas, possíveis falhas ou imperícia dos motoristas. Por esse motivo, a tendência é que os sistemas atuem sobre o controle do veículo quando o motorista não o fizer corretamente. Nota-se então, que à medida que um veículo possui mais tecnologias DAS embarcadas, este tende a se tornar mais independente do motorista, ou seja, autônomo.

Portanto, observa-se que tanto de uma forma direta, quanto de uma forma indireta, existe uma tendência à adoção de veículos terrestres autônomos.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho pretende fazer com que um veículo terrestre em escala seja capaz de navegar, de forma autônoma, até um ponto determinado fazendo uso de GPS.

Para tanto, o veículo deve ser adaptado para receber a infra-estrutura e as tecnologias necessárias para proporcionar mobilidade, posicionamento, comunicação sem fio, sensoriamento e algoritmos para proporcionar autonomia. Adicionalmente, é necessário o desenvolvimento de um sistema remoto para monitorar e instruir o veículo à distância e em tempo real.

1.4. JUSTIFICATIVA

Segundo Rumar (1985)⁴ apud Lum e Reagan (1995), 57% dos acidentes de trânsito são causados apenas por fatores humanos, e outros 36% possuem também fator humano como uma das causas (figura 12). O apelo a veículos autônomos em ambientes urbanos mostra grande potencial de aumento da segurança viária. Portanto, é notável a tendência a esse tipo de veículo começar a operar nas vias públicas nas próximas décadas.

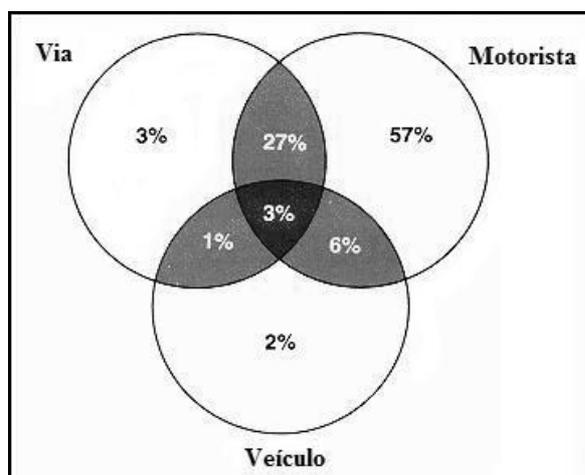


Figura 12 – Causas de acidentes
(Adaptado de: RUMAR, 1985 apud LUM; REAGAN, 1995)

⁴ RUMAR, K. **The Role of Perceptual and Cognitive Filters in Observed Behavior**, Human Behavior in Traffic Safety, eds. L. Evans and R. Schwing, Plenum Press, 1985

Na literatura consultada durante o desenvolvimento do trabalho, é notável o massivo apelo à segurança como a maior, e muitas vezes única motivação para o desenvolvimento e aplicação de tecnologias DAS e veículos autônomos. Entretanto, existem outros fatores que podem ser citados.

Beneficia-se também o país, através do desenvolvimento de tecnologia nacional e conseqüente redução da dependência de tecnologia externa.

Um cenário onde veículos autônomos trafegam no mesmo ambiente, considerando-se o fato de comunicarem-se entre si, ou seja, caracterizarem uma rede de veículos, possibilita a troca constante de informações entre os mesmos, que reportarão as condições de tráfego enfrentadas e muitas outras informações, proporcionando uma melhor distribuição dos veículos em circulação e planejamento de rotas, causando impacto positivo no fluxo de transito. É provável que características assim cheguem à sociedade através das tecnologias DAS, antes mesmo do uso comercial de veículos autônomos, mas certamente estarão presentes quando estes veículos estiverem comercialmente operacionais.

Adicionalmente, o compartilhamento de veículos deve ser considerado, uma vez que um mesmo veículo poderá levar e trazer pessoas com os mesmos destinos, ou ainda, da mesma família, para seus locais de trabalho, para o lazer, para casa e outros lugares desejados. Esse fator também contribui para a melhoria do fluxo de transito, diminuindo a quantidade de veículos presentes nas ruas. Portanto, com menor quantidade de carros e melhor fluxo de trânsito, o meio ambiente é outro beneficiado, em função da menor emissão de poluentes.

Cita-se ainda, o transporte de deficientes físicos que hoje estão impossibilitados de guiar um veículo, ou mesmo se locomoverem sozinhos, fazendo com que os mesmos, do ponto de vista automotivo, possuam mobilidade semelhante à de pessoas que não possuem deficiência.

É necessário algum esforço para poder imaginar todos os benefícios, e talvez, malefícios, que estes veículos podem trazer para a sociedade, pois é uma tendência concreta sua adoção, embora seja algo para o médio e longo prazo. A evolução continuará a se desenrolar e mais fatores virão à tona nos próximos anos, os quais, sucessivamente, permitirão uma melhor caracterização de um cenário viário onde haja veículos autônomos até que, de fato, eles sejam uma realidade.

Hoje, este é assunto mais relacionado com a tecnologia que o viabilizará, mas no futuro, será certamente um assunto extensivo de transportes.

Neste sentido, diversas universidades estão se voltando para o estudo desse tipo de aplicação que a tecnologia atual já possibilita e de todo o potencial que há no uso de veículos autônomos.

É o caso do Laboratório de Topografia e Geodésia (LTG) do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que inicia uma linha de pesquisa em veículos autônomos através da presente pesquisa.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em 6 capítulos: Introdução, Sistemas de Posicionamento por Satélite, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão, Conclusões e Trabalhos Futuros.

O primeiro capítulo introduz o leitor ao universo dos veículos autônomos, iniciando pelo histórico e finalizando com o estado da arte, o que demonstra a importância do assunto em estudo. Neste capítulo, também são apresentados os objetivos, as justificativas e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo descreve os sistemas de posicionamento por satélite, abordando seu histórico e os sistemas atualmente disponíveis e também em desenvolvimento.

O terceiro capítulo descreve os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa, apresentado toda a estrutura de projeto e seu desenvolvimento, o planejamento dos testes e o método de análise.

O quarto capítulo apresenta a análise e os resultados obtidos. As conclusões são apresentadas no quinto capítulo e, no sexto capítulo, são apresentadas as recomendações para trabalhos futuros.

2. SISTEMAS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE

O uso de posicionamento por satélite pela sociedade em todo o planeta já é uma realidade comum nos dias atuais, para as mais diversas atividades.

Além dos sistemas de posicionamento global que estão operando ou ainda em desenvolvimento, existem também os sistemas de posicionamento regional.

Este capítulo descreve de forma breve a história do posicionamento do ser humano até a chegada aos satélites artificiais, onde serão explorados os sistemas de posicionamento global e também abordados os sistemas regionais.

Será dada ênfase ao sistema de posicionamento global desenvolvido pelos EUA, denominado *Navigation Satellite with Time and Ranging / Global Positioning System* (NAVSTAR/GPS), o qual é utilizado no presente trabalho.

2.1. HISTÓRICO

O presente tópico relata a evolução da Geodésia, desde seus princípios até os dias atuais, tomando como referência a determinação e evolução das técnicas de posicionamento e localização terrestre.

De uma forma geral, foi baseado no trabalho de Fischer (1975) e complementado com outras fontes, que são citadas pontualmente.

2.1.1. Introdução

A necessidade de locomover-se de forma orientada sobre a superfície terrestre se tornou necessária assim que o homem começou a desbravar o território, e posteriormente, determinar o local de recursos necessários e ainda rotas para alcançar lugares desejados.

Essa necessidade impulsionou a mente de diversos pensadores e filósofos da antiguidade na tentativa de compreender a forma e o tamanho da Terra como um todo. Desde as suposições sem critério científico algum, o pensamento humano

evoluiu passo a passo, passando ao conceito esférico, depois ao elipsoidal, então ao geoidal.

A tecnologia moderna trouxe a revolução da eletrônica e da computação, com contribuição especial à Geodésia, principalmente pela chegada da era espacial. Esses novos horizontes tecnológicos possibilitaram um avanço no estudo da Terra, os quais proporcionaram ir além do conhecimento da topografia e localização, possibilitando o entendimento de características físicas e comportamentais do planeta e de sua natureza em constante transformação.

2.1.2. Fase Esférica

As tentativas de conhecer a forma e tamanho do planeta Terra foram inicialmente realizadas de forma “filosófica”, sem rigor científico algum.

Conceitos dos mais primitivos relatam que a Terra era um enorme disco plano, sendo suportado por quatro elefantes que estavam sobre o casco de uma tartaruga gigante, a qual nadava no leite.

Ao longo do tempo os conceitos foram evoluindo, mas ainda sem critérios científicos. O não conhecimento de toda a extensão da superfície da Terra colaborava para a imaginação de grandes filósofos da época que faziam suposições sobre o mundo inabitado. No entanto, as evidências foram trazendo as conclusões para a esfericidade da Terra. Observações como as realizadas por *Anaximander* concluíram que as estrelas e o sol percorriam um caminho circular ao redor da terra, mesmo quando não podiam ser vistos, o que obrigaria então que a Terra fosse um objeto finito e flutuante no espaço.

O conceito da esfericidade da Terra é atribuído a *Pythagoras*, no século 6 AC, mas observações melhores fundamentadas realizadas por *Aristotle* (século 4 AC) deram consistência à esfericidade da Terra. Ele observou o fenômeno da gravidade, no qual todos os corpos pesados têm a tendência de cair verticalmente, observou a mudança do horizonte quando se desloca para norte, observou a sombra circular da Terra sobre a lua nos eclipses lunares e observou ainda o fato de o mastro dos navios aparecerem primeiro no horizonte quando os mesmos se aproximavam da costa.

Estava concretizado o conceito de esfericidade da Terra. Qual então seria o seu tamanho?

Baseado nas observações de *Aristotle*, um matemático da época (não se sabe ao certo, mas há indícios de que foi *Archytas of Tarent*) estimou o tamanho da Terra em 400.000 stadia. Uma segunda determinação dada por *Archimedes* mostrava o valor de 300.000 stadia.

Utilizando um *skaphe* (relógio solar que também indica solstício de verão e de inverno), *Eratosthenes* conseguiu com melhor critério medir o tamanho da Terra chegando ao valor de 252.000 stadia. Vários outros cientistas fizeram cálculos do diâmetro da Terra e, portanto, várias medidas diferentes foram encontradas. Além dos métodos possuírem significativa margem de erro, há também o problema relacionado à unidade de medida que cada um utilizava, pois não havia um sistema padrão universal de medidas à época.

Hoje estima-se que a medição realizada por *Eratosthenes* teve boa qualidade, com margem de erro de cerca de 2%, o que é excelente dada a época e os métodos de medição.

Uma vez conhecidas a forma e o tamanho da Terra, facilita-se o trabalho de estabelecimento de uma forma de localização e referência na sua superfície.

Como a Terra até então era um objeto esférico, a utilização de uma grade regular de meridianos e paralelos, medidos em graus foi sugerida inicialmente por *Hipparchus* (século 2 AC) e também realizada por *Marinus of Tyre* e *Ptolemy* (século 2 DC), sistema esse que deu origem à Latitude e Longitude hoje utilizados.

Muitos séculos se passaram sem evolução considerável até que no século 17, a triangulação foi utilizada para mensuração de distância. *Willebrord Snellius* foi quem aplicou o método para uma melhor determinação da circunferência terrestre através do método de *Eratosthenes*.

Este novo método de medição de distância tornou-se muito promissor, alavancando a criação da *Academie Royale des Sciences* pelo governo Francês, com o intuito de, entre outros, de criar um mapa confiável da França, onde estivessem presentes não apenas as cidades e áreas cultivadas exibidas nos mapas comerciais, mas também a topografia, com os campos, rios e montanhas e suas posições relativas.

Para estabelecer uma escala da grade de latitude e longitude era necessário um valor acurado do tamanho da Terra. *Jean Picard*, em 1669, e *Philippe de Lahire*

e os irmãos *Cassinis*, entre 1683 e 1716, realizaram trabalhos de triangulação ao longo de um arco de meridiano da Terra para a determinação do comprimento de 1º de arco do meridiano. Como se acreditava que a Terra era esférica, o mesmo valor obtido seria também verdade para o paralelo.

O resultado foi misterioso: O comprimento de 1º de arco do meridiano diminuía à medida que deslocava-se para norte, colocando em descrédito a esfericidade da Terra. Parecia que a Terra era alongada nos pólos, com uma forma oval.

2.1.3. Fase Elipsoidal

A partir deste momento, diversos meios científicos se voltaram para a determinação da forma da Terra.

A lei universal da atração, formulada por *Isaac Newton* em 1687, concluía que a Terra seria achatada nos pólos, como fruto da sua rotação, e não alongada, como concluíram os Franceses. Entretanto, essa era uma hipótese baseada apenas em teoria.

Expedições em países distantes, como a realizada por *Jean Richer* em *Cayenne* na Guiana, entre 1672 e 1673, relatam que houve problemas com o relógio, que havia sido bem calibrado em Paris. Foi necessário diminuir o comprimento do pêndulo para que a perda de 2,5 minutos por dia fosse corrigida. Fatos como esse caracterizaram que havia diferentes intensidades de gravidade ao longo do meridiano, sendo estas mais intensas nos pólos e, portanto, menos intensas no equador.

Era necessário, neste momento, determinar se a Terra era alongada nos pólos, como acreditavam os franceses ou achatada, como acreditavam os ingleses.

A *Académie Royale des Sciences* patrocinou duas famosas expedições para que a dúvida fosse sanada. A primeira expedição, lançada em 1735, fora realizada próxima ao equador e a segunda, no ano seguinte, fora realizada próximo ao pólo. Se o comprimento de 1º de arco do meridiano próximo ao pólo fosse menor que o comprimento de 1º próximo ao equador, os franceses estariam certos, caso contrário, os ingleses o estariam.

Descobriu-se que os ingleses estavam certos.

Agora então, podia-se retomar as atividades para a determinação de uma escala acurada de latitude e longitude para o recém aceito elipsóide de revolução.

Com a disseminação da ciência e diversos problemas de compatibilidade de unidades de medidas enfrentados, tornou-se necessário criar um padrão internacional para a medida de comprimento. Esse esforço deu origem ao metro, que à época foi determinado como sendo a décima milionésima parte de um quarto do meridiano da Terra, obtido pela medição ao longo de um arco entre *Dunkerque* e *Barcelona*.

Como os métodos da época continham margem significativa de erros, a definição do metro evoluiu e hoje é estipulada como sendo o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de 1/299.792.458 de segundo (INMETRO, 2007).

A mudança do conceito esférico para o conceito elipsoidal da Terra, marcada pela teoria gravitacional, determinou uma mudança no escopo da Geodésia, desmembrando duas frentes de estudo, sendo elas a Geodésia dinâmica e a Geodésia geométrica.

O conceito da Terra como um elipsóide, embora válido do ponto de vista geométrico, não pode ser considerado fiel à forma da Terra. A constatação de tal fato fora realizada pelo matemático alemão *Karl Friedrich Gauss* que, após aplicar o método dos mínimos quadrados numa série de medições geodésicas, verificou que os resíduos obtidos estavam muito acima dos erros aleatórios inerentes às observações, indicando que o elipsóide de revolução não era um modelo adequado e, portanto, a linha que limita a superfície da Terra não poderia ser regular (BLITZKOW; ALMEIDA; MATOS, 2008). Constata-se isso, por exemplo, ao verificar que uma distância cuidadosamente medida na superfície da Terra difere de forma significativa de um valor obtido para a mesma distância medida sobre o elipsóide. Constatou-se então que a Terra possuía uma superfície desconhecida e irregular. A essa forma foi dado o nome de geóide por *J. B. Listing* por volta de 1872.

2.1.4. Fase Geoidal

A irregularidade da superfície da Terra foi constatada como sendo fruto de vários fatores, como a distribuição irregular de massa, tanto na superfície quanto no interior da crosta, e também pelos efeitos de rotação.

Essa distribuição irregular de massa acaba por causar uma variação do campo gravitacional ao longo da superfície. Portanto, uma superfície que limitasse o geóide deveria ser aquela que fosse equipotencial com o campo de gravidade da Terra.

Materializar essa superfície seria tarefa quase impossível, pois seria necessário conhecer a distribuição de massa na Terra.

Porém, valendo-se do fato que a água representa um papel fundamental na superfície da Terra em relação a seu campo de gravidade, estabeleceu-se que o geóide seria limitado por uma superfície que coincidissem com o nível do mar.

Entretanto, medições maregráficas apontaram diferentes valores do nível do mar para diferentes lugares. Descobriu-se que essas diferenças eram decorrentes de diversos fatores, como salinidade, temperatura, correntes oceânicas e outros fenômenos.

Dessa forma, ficou estabelecido que a superfície geoidal fosse materializada pelo nível médio não perturbado das marés e o geóide passou a exercer um papel com sentido físico e não geométrico como o elipsóide, revelando duas maneiras diferentes e complementares de se estudar a forma da Terra.

2.1.5. Era Espacial

O início da era espacial se deu em 1957, com o lançamento do satélite russo Sputnik e, posteriormente em 1958 com o satélite norte-americano Vanguard. Essa revolução tecnológica trouxe muitos benefícios para a Geodésia, que posteriormente realizaria missões espaciais dedicadas para suas finalidades, como as recentes missões CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*), GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e GOCE (*Gravity Field and steady-state Ocean Circulation*

Explorer), que visam principalmente estudar os campos gravitacional e magnético da Terra.

O posicionamento terrestre também fora beneficiado pela era espacial. Uma vez conhecida as coordenadas de um ponto na superfície terrestre, podia-se determinar, através de efeito Doppler-Fizeau, a posição de um satélite em sua órbita. Portanto, se a órbita do satélite fosse bem conhecida, pela mesma técnica, mas desta vez de forma inversa, podia-se calcular as coordenadas de uma estação em solo terrestre. Desse conceito surgiu o primeiro sistema de posicionamento global por satélites artificiais, denominado TRANSIT. O mesmo entrou em operação em 1967 e foi desenvolvido pela Universidade John Hopkins nos EUA (BLITZKOW et al., 2007).

Por sofrer limitações de estrutura, o TRANSIT impunha restrições de posicionamento que culminaram, em 1973, em um novo projeto, fruto da união de dois projetos americanos: o TIMATION da Marinha e 621B da Força Aérea. O novo sistema, denominado NAVSTAR/GPS, fora desenvolvido para proporcionar posicionamento instantâneo em qualquer ponto da superfície terrestre ou próximo a ela e a qualquer momento.

Simultaneamente, no início da década de 1970, a antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas), desenvolveu um sistema de posicionamento com características muito semelhantes ao NAVSTAR/GPS. Denominado de *Global'naya Navigastonnaya Sputnikowaya Sistema* (GLONASS), hoje está em processo de revitalização por ter recebido manutenção insuficiente nos últimos anos.

Atualmente, um novo sistema de posicionamento global está sendo desenvolvido pela comunidade européia. Denominado GALILEO, este sistema está sendo concebido para uso civil, diferente dos sistemas GPS e GLONASS, que foram concebidos e, inicialmente, eram restritos para uso militar.

Outros países também possuem ou desenvolvem sistemas de posicionamento por satélites. Pode-se citar os sistemas Beidou e *Compass* da China, o sistema QZSS (*Quasi Zenith Satellite System*) do Japão e o sistema INRSS (*Indian Regional Navigational Satellite System*) da Índia.

2.2. SISTEMAS DE POSICIONAMENTO GLOBAL POR SATÉLITE (GNSS)

Usualmente se utiliza o termo GPS quando se faz referência à navegação por satélites. Esse é um engano comum, provavelmente causado pelo fato de o sistema GPS ser o mais conhecido e utilizado. No entanto, o uso equivocado dessa terminologia vem sendo extinto pelo extensivo uso de posicionamento por satélite pela sociedade, com a revitalização do sistema GLONASS e a ascensão do sistema Galileo. A terminologia GPS faz referência a um sistema específico, enquanto que GNSS faz menção a qualquer sistema de posicionamento global por satélite, ou seja, GPS, GLONASS e Galileo são sistemas GNSS.

Os sistemas GNSS são compostos basicamente por três componentes principais: o segmento espacial, o segmento de controle e o segmento de usuários (Figura 13).

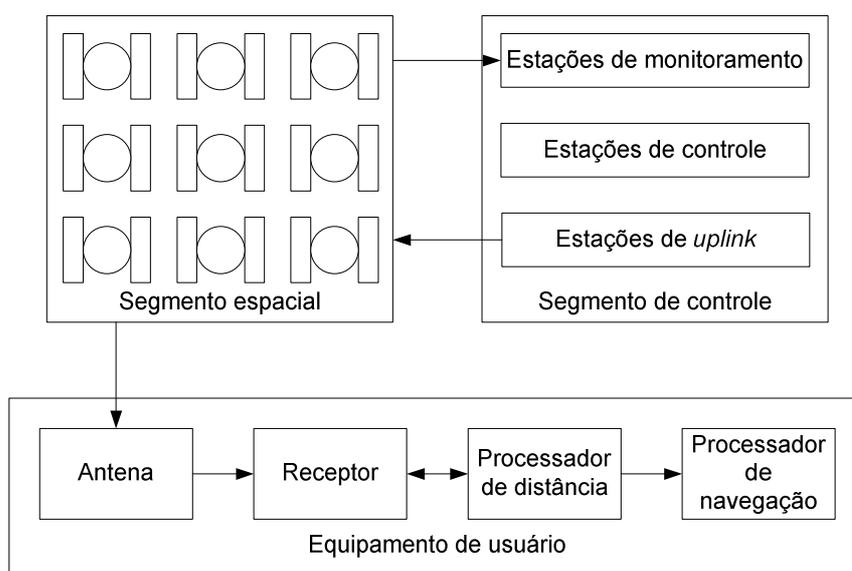


Figura 13 – Estrutura geral dos sistemas GNSS
(Adaptada de: GROVES, 2007)

O segmento espacial compreende os satélites, também denominados de SV (*Spacial Vehicle*), os quais transmitem informações para os outros dois segmentos. Em relação aos sistemas GPS, GLONASS e Galileo, a constelação de SV's é distribuída em planos orbitais, inclinadas aproximadamente 60° em relação ao equador, cujos satélites realizam cerca de duas órbitas por dia. Se comparada a

órbitas geoestacionárias, estas fornecem melhor geometria de sinal para o posicionamento e melhor cobertura nas regiões polares (GROVES, 2007).

Os sinais transmitidos pelos satélites possuem dados que permitem aos usuários determinar o momento em que os sinais recebidos foram transmitidos e também há informações relativas à temporização do sistema e das órbitas dos satélites.

Para que possuam estabilidade em suas referências de tempo, os satélites utilizam relógios atômicos.

O segmento de controle é responsável por monitorar e controlar continuamente o segmento espacial, efetuando as correções e modificações necessárias.

É composto por estações monitoras, estações de controle e estações monitoras com antenas para transmitir dados para os satélites, estando todas na superfície terrestre. As estações monitoras obtêm medidas de distâncias dos satélites e as envia às estações de controle. Para isso, devem estar bem localizadas e com seus relógios sincronizados, para que possam determinar a órbita dos satélites e corrigir o relógio destes. As estações de controle então determinam se é necessário realizar alguma manobra em algum satélite para corrigir sua órbita, ou ainda para contornar a falha de um outro satélite, sendo então as correções enviadas através das estações monitoras com antenas (GROVES, 2007).

O segmento de usuários, por sua vez, através de seus receptores, recebe os dados da constelação GNSS e os processa para calcular seu posicionamento. Basicamente, os receptores utilizados para essa tarefa são compostos por alguns dispositivos com funções específicas.

Os sinais eletromagnéticos emitidos pelos SV's são recebidos pelas antenas dos receptores e transformados em sinais elétricos. Esses sinais são demodulados pelo receptor utilizando um relógio para fornecer uma referência de tempo. O processador faz uso de algoritmos para decodificar as mensagens de navegação e determinar a distância entre a antena do receptor e cada um dos satélites rastreados, sendo essa a informação base para que sejam computados a posição, velocidade e tempo.

2.3. NAVSTAR/GPS

O NAVSTAR/GPS, também conhecido apenas como GPS, foi desenvolvido pelo DoD dos EUA na década de 1970. Foi elaborado com o intuito de ser o principal sistema de navegação das forças armadas e funcional sob qualquer condição climática.

Com a disponibilização do uso gratuito para a sociedade, emergiu um novo mercado que introduziu inúmeras aplicações da tecnologia para a sociedade, conquistando um grande e crescente número de usuários.

Entre outras aplicações, hoje utiliza-se para navegação marítima, aérea e terrestre, agricultura de precisão, controle de frotas e posicionamento geodésico.

“A concepção do sistema GPS permite que um usuário, em qualquer local da superfície terrestre, ou próximo a ela, tenha a sua disposição, no mínimo, quatro satélites para serem rastreados” (MONICO, 2000).

Se houvesse sincronia entre os relógios dos satélites e dos usuários, apenas 3 satélites seriam suficientes para o cálculo de uma posição tri-dimensional, porém, como não há, um quarto satélite é necessário para que o cálculo seja efetuado.

Como foi elaborado inicialmente para uso militar, deve possuir métodos que garantam sua segurança, não podendo ser vulnerável a interferências ou uso de possíveis inimigos. Dessa forma, existem dois serviços que o sistema GPS disponibiliza. São eles o *Standard Positioning Service* (SPS) e o *Precise Positioning Service* (PPS).

O SPS é o serviço disponibilizado gratuitamente para a comunidade civil. Inicialmente, era operado com um recurso chamando *Selective Availability* (SA). Esse recurso era utilizado para deteriorar intencionalmente a qualidade do posicionamento oferecido, através da manipulação das mensagens de navegação (técnica *epsilon* ϵ) e da frequência dos relógios dos satélites (técnica *dither* δ). Dessa forma, o serviço oferecia acurácia de posicionamento horizontal e vertical dentro de 100 m e 140 m, respectivamente. Porém, às 0 h TU (Tempo Universal) de 2 de maio de 2000, o governo norte-americano desativou o recurso, fazendo a acurácia de posicionamento melhorar cerca de 10 vezes (MONICO, 2000).

O PPS é o serviço de uso exclusivo das forças armadas e usuários autorizados. Seu código é criptografado através de um recurso chamado *Anti-*

Spoofing (AS). Fornece acurácia horizontal e vertical de, respectivamente, 10 e 20 m. Não se espera que tal recurso de criptografia seja desativado pelo DoD.

2.3.1. Segmento Espacial

Atualmente (fevereiro de 2011), a constelação GPS é composta por 32 satélites (31 operacionais), que estão distribuídos em 6 planos orbitais, os quais estão inclinados 55° em relação ao plano do equador (Figura 14). Os SV's orbitam a uma altitude de cerca de 20.200 km a partir da superfície terrestre, realizando um período de revolução de aproximadamente 12 horas siderais, onde a posição de cada satélite se repete em relação ao dia anterior 4 minutos mais cedo.



Figura 14 – Constelação GPS

(Fonte: <http://www.defenseindustrydaily.com/the-gps-constellation-now-and-future-01069>)

Existem diversas formas de identificar cada satélite. São elas (ABREU, 2007):

- SVN (*Space Vehicle Number*);
- Número da posição orbital;
- Número catalogado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA);

- PRN (*Pseudo Random Noise*), o qual é recebido assim que o satélite entra em sua órbita. Este é o meio mais utilizado para identificação;

Os satélites GPS estão divididos nos blocos I, II, IIA, IIR, IIR-M, IIF e III, que são descritos a seguir (USNO, 2010):

- Bloco I: é composto por 11 satélites protótipos (SVN 1 até 11) que foram lançados entre 1978 e 1985. Atualmente, não se encontram mais em operação, tendo o último sido desativado em novembro de 1995. Os satélites desse bloco foram os únicos a orbitar em um plano com inclinação de 63° em relação ao plano do equador;
- Bloco II: é composto por 9 satélites (SVN 13 até 21), que foram lançados entre fevereiro/1989 e outubro/1990. Foram desenvolvidos para operar por até 14 dias sem comunicar-se com o segmento de controle, sendo o primeiro bloco totalmente funcional do sistema GPS. Atualmente, nenhum dos satélites deste bloco está operacional;
- Bloco IIA (*Advanced*): é composto por 19 satélites (SVN 22 até 40), que foram lançados entre novembro/1990 e novembro/1997, com capacidade de operar até 180 dias sem contato com o segmento de controle. Atualmente, apenas 11 satélites deste bloco estão em operação;
- Bloco IIR (*Replenishment*): é composto por 21 satélites (SVN 41 até 61), onde os lançamentos ocorreram entre janeiro/1997 e novembro/2004. Foram desenvolvidos para operarem por até 180 dias em regime de navegação autônoma, mantendo sua acurácia através de técnicas de comunicação e mensuração de distância entre os satélites deste bloco, conseguindo, desta forma, estimar e atualizar os parâmetros da mensagem de navegação sem precisar contato com o segmento de controle. Exceto um satélite (SVN 42), que não obteve êxito no lançamento, todos os outros 20 satélites deste bloco estão em operação;
- Bloco IIR-M (*Modernized Replenishment*): são 8 satélites modernizados do bloco IIR (SVNs 48, 49, 50, 52, 53, 55, 57, 58), que transmitem um novo sinal de uso civil (L2C) na frequência L2 e mais dois novos sinais de uso militar, o chamado M-code. O SVN 49, especificamente, também tem a capacidade transmitir na frequência L5;

- Bloco IIF (*Follow-on*): deverá ser composto por 12 a 16 satélites que terão a capacidade de transmitir todos os sinais, incluindo a frequência L5. O primeiro satélite deste bloco (SVN 62) foi lançado em maio/2010 e entrou em operação em agosto daquele mesmo ano;
- Bloco III: deverá ser composto por 24 satélites que deverão transmitir com potências maiores e introduzir novos sinais. O lançamento dos satélites está previsto para ocorrer entre 2011 e 2013 (GROVES, 2007);

Existem 10 diferentes sinais de navegação GPS que podem ser transmitidos através de três bandas conhecidas como L1, L2 e L5, cujas frequências das portadoras são, respectivamente, 1.575,42 MHz, 1.227,60 MHz e 1.176,45 MHz. Nem todos já estão sendo transmitidos, pois alguns fazem parte do plano de modernização GPS. Os sinais podem ser vistos na tabela 2 (GROVES, 2007). Serão descritos apenas os sinais *Precise* ((P) e *Coarse / Acquisition* (C/A), os quais estão presentes em todos os blocos de satélites. Mais detalhes dos outros códigos podem ser encontrados em Groves (2007).

Tabela 2 - Sinais GPS
(Adaptada de: GROVES, 2007)

Sinal	Banda	Frequência da portadora (MHz)	Serviço	Blocos de Satélite
C/A	L1	1575,42	SPS/PPS	Todos
P(Y)	L1	1575,42	PPS	Todos
M code	L1	1575,42	PPS	A partir do IIR-M
L1C-d	L1	1575,42	PPS	A partir do III
L1C-p	L1	1575,42	PPS	A partir do III
L2C	L2	1227,60	SPS	A partir do IIR-M
P(Y)	L2	1227,60	PPS	Todos
M code	L2	1227,60	PPS	A partir do IIR-M
L5I	L5	1176,45	SPS	A partir do IIF
L5Q	L5	1176,45	SPS	A partir do IIF

As portadoras L1, L2 e L5 são geradas a partir da frequência fundamental de 10,23 Mhz, que é multiplicada, respectivamente por 154, 120 e 115. A figura 15 ilustra essa estrutura.

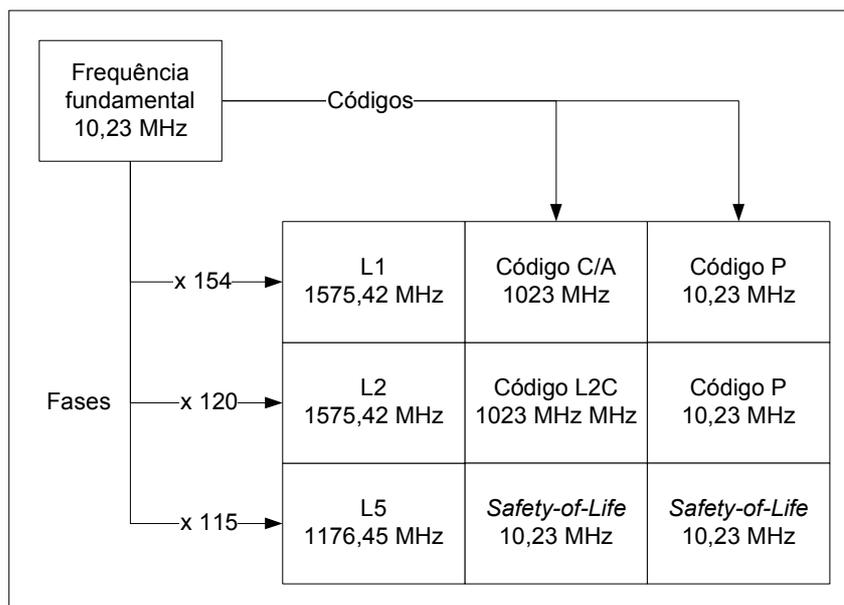


Figura 15 – Estrutura dos sinais GPS
(Adaptada de: ABREU, 2007)

O sinal C/A foi destinado a fornecer um posicionamento menos acurado que o sinal P(Y). Este é o sinal gratuito utilizado pela comunidade civil através do serviço SPS. O código C/A tem um comprimento de 1023 bits e se repete a cada milissegundo. Cada satélite transmite um código C/A diferente, entre os 37 possíveis. Em função da baixa correlação entre os membros desse código, é rápida a distinção dos sinais recebidos de vários satélites simultaneamente.

O sinal P(*Precise*) é criptografado pelo recurso AS tornando-se o sinal (Y) ou P(Y). O serviço por ele oferecido (PPS) só é acessível aos militares norte-americanos e usuários autorizados pelo governo. O código P é um produto de dois códigos PRN, sendo um de comprimento de 15.345.000 bits (1,5 segundos) e o outro de comprimento de 15.345.037 bits. Essa combinação proporciona um código com duração de 266,4 dias, o qual é arranjado de forma a produzir uma série de 37 seqüência de códigos, mutuamente exclusiva, cada qual com duração de 7 dias. Assim, tem-se 37 PRN's para o código P. Dessa forma, cada satélite possui um PRN único, o qual é modulado nas portadoras L1, L2 e L5 (MONICO, 2000).

A mensagem de navegação é modulada nas portadoras na razão de 50 bits por segundo (bps), com duração de 30 segundos, contabilizando um total de 1500 bits, também denominado de quadro. Cada quadro é dividido em 5 subquadros de 300 bits cada, e cada subquadro dividido em 10 palavras de 30 bits cada.

O conteúdo dos subquadros é organizado da seguinte forma (BLITZKOW et al., 2007):

- Subquadro 1:
 - Número da semana GPS;
 - Número do satélite;
 - Idade dos dados;
 - Saúde do satélite;
 - Coeficientes para correção do relógio do satélite;
- Subquadro 2 e 3:
 - Parâmetros orbitais (efemérides transmitidas);
- Subquadro 4:
 - Modelo para correção da refração ionosférica;
 - Diferenças de tempo GPS-TUC;
 - Almanaque para os satélites 25 a 32, no caso de mais de 24 satélites estarem em órbita;
 - Saúdes dos satélites;
- Subquadro 5:
 - Almanaque para os primeiros 24 satélite em órbita;
 - Saúde dos satélites;

A saúde dos satélites indica as condições de operação de cada um deles.

A idade dos dados indica o intervalo de tempo decorrido desde a última atualização dos mesmos.

Os coeficientes para a correção do relógio permitem o modelamento da deriva do oscilador do satélite.

Os parâmetros orbitais ou efemérides descrevem o movimento Kepleriano do satélite e são usados para o cálculo de sua posição.

O almanaque dos satélites consiste nas efemérides de toda a constelação, permitindo a obtenção menos precisa da posição de cada satélite para efeito de planejamento e rastreamento.

O modelo para correção da ionosfera é composto por um conjunto de 8 coeficientes, sendo essencial aos usuários com receptores de uma só frequência.

Os dados presentes nos subquadros de 1 a 3 são repetidos nos próximos quadros até que sejam renovados. Já os subquadros 4 e 5 trazem dados diferentes

em cada quadro, sendo necessários 25 quadros para que todo o almanaque seja transmitido. Por isso, diz-se que esses quadros possuem 25 páginas. Como cada quadro dura 30 segundos, 25 quadros durarão 750 segundos (12,5 minutos).

Os dados do almanaque (subquadros 4 e 5) são válidos por maiores períodos que os dados precisos de efemérides (subquadros 2 e 3), fornecendo as posições dos satélites com uma acurácia de 900m para um dia de transmissão, 1.200m para uma semana e 3.600m para duas semanas. (GROVES, 2007).

Essa estrutura do sistema GPS permite que haja um número ilimitado de usuários, pois cabe ao receptor realizar o posicionamento, e os satélites apenas transmitem as informações necessárias.

2.3.2. Segmento de Controle

O item 2.2. realiza uma descrição do segmento de controle GNSS, a qual engloba quase que por completo as características para o sistema GPS.

O sistema de controle GPS é composto por 5 estações monitoras da força aérea norte-americana, localizadas em: Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia, Colorado Springs e Hawaii, sendo as três primeiras também estações de *uplink*. Possui apenas uma estação de controle central (MCS – *Master Control Station*), localizada em Colorado Springs. Em conjunto com as 7 estações monitoras do NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), compõe-se as estações monitoras GPS do DoD (MONICO, 2000). A Figura 16 mostra a localização das estações monitoras e outras estações.

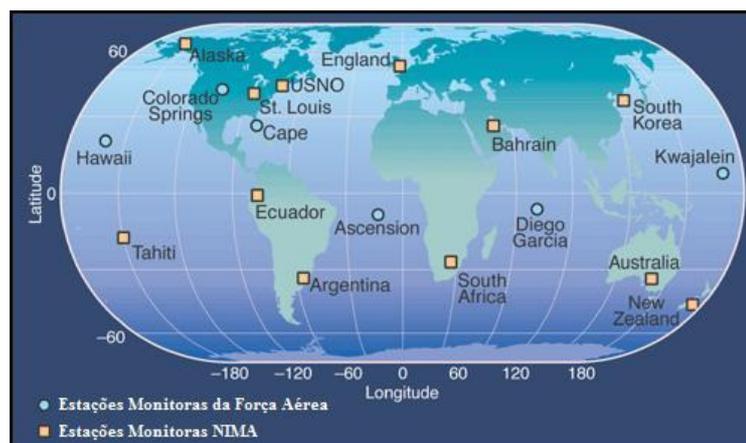


Figura 16 – Estações monitoras do sistema GPS
(Fonte: <http://www.aero.org/publications/crosslink/summer2002/04.html>)

2.3.3. Segmento de Usuários

Este segmento é representado por toda comunidade usuária através de seus receptores GPS e os diversos serviços para os quais eles são empregados.

Pode-se distinguir a categoria de usuários entre militares e civis. No primeiro caso, o uso se dá pela navegação em territórios desconhecidos e posicionamento estratégico de tropas, onde receptores estão presentes nos diversos veículos de uso militar, bem como com os próprios soldados, e ainda para a navegação de mísseis. No segundo caso, o uso se dá para as mais diversas atividades, como rastreadores veiculares, navegadores veiculares, controle de frota, navegação autônoma, mapeamento e localização de estruturas subterrâneas, levantamentos geodésicos, monitoramento de estruturas, agricultura de precisão e diversas outras aplicações onde o posicionamento possa ser empregado, facilitado ou ainda melhorado com o uso do GPS.

Os receptores GPS têm a estrutura básica de funcionamento apresentada na Figura 13.

As antenas têm um papel importante por realizarem a recepção do sinal. Existem diversos tipos de antenas que atendem a objetivos distintos. Para uso em dispositivos compactos utilizam-se predominantemente antenas *Microstrip* (Figura 17), para levantamentos geodésicos de alta precisão, utilizam-se antenas *Choke Ring* (Figura 17), que estão preparadas para receber as duas portadoras (L1 e L2) e possuem proteção contra multicaminho, que é uma fonte de erro de posicionamento.



Figura 17 – Antenas GPS tipo Microstrip e Choke Ring
(Fonte Microstrip: http://www.maxtena.com/images/mpa1575d254_full.gif)
(Fonte Choke ring: http://www.panbo.com/Novatel_20GNSS750_small1.jpg)

2.3.4. Princípio de posicionamento

O conceito básico para posicionamento por GPS é através do uso da distância da antena do receptor até cada satélite rastreado. Como se conhece a posição de cada satélite no espaço, calcula-se a posição do receptor através de trilateração 3D.

A distância calculada para um dado satélite impõe que o receptor está em qualquer ponto na superfície de uma esfera, cujo centro é o satélite e cujo raio é a distância.

A partir do momento em que há dois satélites sendo observados, haverá duas esferas que se encontrarão no espaço. A intersecção dessas duas esferas cria uma circunferência (Figura 18) que acompanha a superfície desta intersecção. O receptor pode então estar em qualquer ponto desta circunferência.

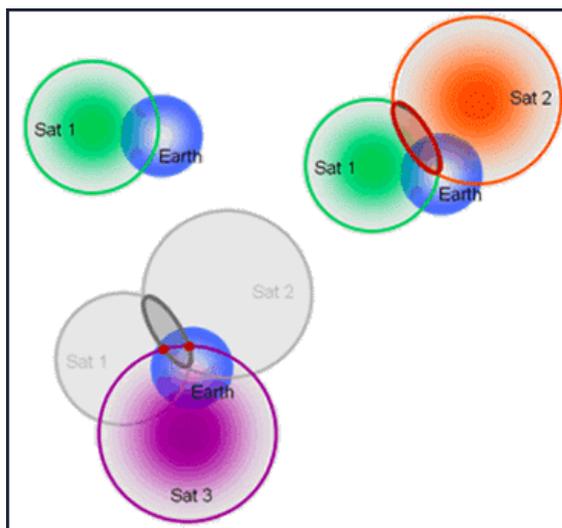


Figura 18 – Trilateração GPS
(Adaptada de: http://giscommons.org/?page_id=879)

Quando adicionado um terceiro satélite, a circunferência criada pela intersecção dos dois outros satélites é cruzada em dois pontos pela superfície da esfera oriunda do terceiro satélite (Figura 18). Um destes pontos estará no espaço e será eliminado e outro na superfície da Terra, determinando assim, qual o ponto em que se encontra o receptor.

A necessidade de um quarto satélite se dá para eliminar a incógnita resultante do não sincronismo dos relógios dos satélites e receptores.

2.3.5. Obtenção da distância

Existem duas formas principais de mensuração de distância satélite-receptor que podem ser feitas pelos sinais GPS (DRANE; RIZOS, 1997):

- Observação de distância baseada nos códigos PRN, também referidas como *code range*, *code phase* e ainda pseudodistância;
- Observação da fase de onda portadora, que é uma forma de mensuração de distância mais precisa, mas que introduz mais uma incógnita denominada “ambigüidade” diferentemente do que ocorre com o uso da observação da pseudodistância;

2.3.5.1. Pseudodistância

Essa distância é medida através da correlação entre o código que é transmitido pelo satélite e sua réplica, que é gerada no receptor.

O receptor conhece precisamente as características do sinal transmitido em um dado momento pelo satélite e então gera uma réplica deste sinal, em sincronia com seu próprio relógio. Essa réplica é comparada ao sinal recebido. Uma vez que o sinal gerado pelo satélite foi criado em um momento anterior, a réplica criada pelo receptor deverá estar atrasada para que coincida com o sinal do satélite. Este atraso é justamente o que o receptor deseja calcular, pois representa o tempo que o sinal levou para percorrer a distância entre o satélite e o receptor, o qual, multiplicado pela velocidade de propagação do sinal (velocidade da luz) resulta da pseudodistância. (TAYLOR; BLEWITT, 2006).

O receptor realiza essa medida usando a técnica de correlação do código, e considerando o comprimento total deste (1023 bits) (MONICO, 2000).

Na prática, a precisão da medida de distância é prejudicada pelo não sincronismo dos relógios dos satélites e dos receptores. Os satélites utilizam relógios atômicos de Césio e Rubídio que são muito mais estáveis (e de alto custo) que os relógios de quartzo utilizados na maioria dos receptores.

Outros efeitos também devem ser considerados, como a refração ionosférica e troposférica, que influenciam a propagação do sinal, e também os efeitos de multicaminho.

Assim, a pseudodistância (PD) entre satélite (s) e receptor (r) é dada pela equação (MONICO, 2000):

$$PD_r^s = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + \varepsilon_{PD_s}^r \quad (1)$$

onde:

ρ_r^s - distância geométrica entre o receptor (r) e o satélite (s)

c - velocidade da luz no vácuo

dt_r - erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante t_r

dt^s - erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante t^s

I_r^s - efeito sistemático devido à refração ionosférica

T_r^s - efeito sistemático devido à refração troposférica

dm_r^s - erro oriundo do multicaminho

$\varepsilon_{PD_s}^r$ - erros aleatórios e outros erros sistemáticos

2.3.5.2. Fase da onda portadora

A obtenção da distância através da fase da onda portadora é uma técnica que oferece precisão que é muito maior que a pseudodistância. Para tanto, faz uso da fase de batimento da onda portadora e não do código, para a obtenção desta grandeza.

A fase da onda portadora (ϕ_r^s) é igual à diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor (ϕ^s), e a fase do sinal gerado no receptor (ϕ_r), ambas no instante de recepção t . A fase observada (ϕ_r^s), em ciclos, é dada por (KING et al, 1988 apud MONICO, 2000)⁵:

$$\phi_r^s(t) = \phi_r(t) - \phi^s(t) + N_r^s + \varepsilon_{\phi_r}^s \quad (2)$$

onde:

t - instante de recepção do sinal na estação r

$\phi^s(t)$ - fase da portadora gerada no satélite s e recebida na estação r no instante de recepção

$\phi_r(t)$ - fase gerada no receptor no instante de recepção

N_r^s - é a chamada ambigüidade da fase

$\varepsilon_{\phi_r}^s$ - erro da fase da onda portadora

A parte fracionária da portadora é medida com precisão da ordem de até 1/1000 do ciclo, já a parte inteira, denominada ambigüidade (N_r^s), é contada de forma contínua após a obtenção da parte fracionária e é estimada no ajustamento.

⁵ KING, R. W. et al. **Surveying with GPS**. Monograph n.9. School of Surveying, The University of New South Wales. Kensington, NSW, Australia, 1988

2.3.6. Erros relacionados ao posicionamento GPS

Existem diversos erros que estão associados às observáveis GPS. Dependendo das necessidades de posicionamento do usuário, alguns erros deverão ser eliminados ou ainda minimizados para que se alcance a qualidade desejada.

Os erros podem ser classificados da seguinte forma (MONICO, 2000):

- Satélite:
 - Erro da órbita;
 - Erro do relógio;
 - Relatividade;
 - Atraso entre as duas portadoras no *hardware* do satélite;
- Propagação do sinal:
 - Refração troposférica;
 - Refração ionosférica;
 - Perdas de ciclos;
 - Multicaminhamento ou sinais refletidos;
 - Rotação da Terra;
- Receptor/Antena:
 - Erro do relógio;
 - Erro entre os canais;
 - Centro de fase da antena;
- Estação:
 - Erro nas coordenadas;
 - Multicaminhamento;
 - Marés terrestres;
 - Movimentos do pólo;
 - Carga dos oceanos;
 - Pressão da atmosfera;

Serão descritos adiante os erros encontrados no posicionamento GPS mais relevantes para o presente trabalho e que tem um impacto maior na qualidade do posicionamento.

2.3.6.1. Erro da órbita

As efemérides transmitidas nas mensagens de navegação contêm erros de posicionamento dos satélites que afetam diretamente o cálculo da pseudodistância no posicionamento absoluto (MONICO, 2000). A acurácia desses valores é de aproximadamente 100 cm (IGS, 2011).

2.3.6.2. Refração troposférica

A troposfera é a camada mais baixa da atmosfera terrestre. Estende-se da superfície terrestre até cerca de 50 km, e comporta-se, para freqüências abaixo de 30 GHz, como meio não dispersivo, isto é, a refração independe da freqüência do sinal transmitido. Seus efeitos podem variar de poucos metros até cerca de 30 m, dependendo da densidade da atmosfera e do ângulo de elevação do satélite (MONICO, 2000).

Quanto menor o ângulo de elevação do satélite, maior será a distância percorrida pelo sinal dentro da troposfera e, portanto, este estará mais sujeito aos seus efeitos.

Entre seus efeitos, pode-se citar (SPILKER, 1996 apud MONICO, 2000)⁶:

- Atenuação atmosférica: Atua sobre a potência da onda eletromagnética, diminuindo-a. Por esse motivo, observações com ângulos de elevação menores do que 5º não são recomendadas;
- Cintilação troposférica: Atua sobre a amplitude da onda eletromagnética, causando oscilação. Exceto para pequenos ângulos de elevação (< 10º), os erros causados por esse efeito são relativamente pequenos;
- Atraso troposférico: É dividido em dois efeitos.
 - Atmosfera hidrostática (seca): Devido às quantidades de nitrogênio e oxigênio, corresponde a 2,3 m no zênite. Seus

⁶ SPILKER, J. J. **Tropospheric Effects on GPS**, In: PARKINSON, B. W., SPILKER, J. J., Global Positioning System: Theory and Applications. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v.1, p.517-46

efeitos podem ser preditos com razoável precisão, em função de sua pequena variação com o tempo;

- Atmosfera úmida: Causado pela influência do vapor de água atmosférico, seus efeitos correspondem a cerca de 1 a 30 cm no zênite. Entretanto sua predição não é acessível com boa precisão, pois possui grande variação com o tempo;

2.3.6.3. Refração ionosférica

A ionosfera é a camada superior da atmosfera terrestre, localizada entre 50/70 km e 1.000 km acima da superfície. O efeito da refração ionosférica sobre os sinais GPS está diretamente relacionado com o Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presentes na ionosfera. Dessa forma, torna-se possível determinar o atraso na propagação da frequência da fase da portadora ao se determinar o TEC (FONSECA Jr., 2002).

Exceto pelos efeitos do SA, este é um dos efeitos que causa o maior erro no posicionamento GPS. O atraso ionosférico depende da frequência e poder ser da ordem de 1 m ou atingir até mais 100 m (KLOBUCHAR, 1991 apud FONSECA Jr., 2002)⁷.

O problema principal é que o TEC varia no tempo e no espaço, em razão do fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, localização do usuário e direção do raio vetor do satélite (LEICK, 1995 apud MONICO, 2000)⁸.

Da mesma forma que para a refração troposférica, menores ângulos de elevação dos satélites sujeitarão mais o sinal aos efeitos da refração ionosférica.

O trabalho FONSECA Jr., 2002 verificou que, para o Brasil, o comportamento anual do TEC é máximo para os meses de março e abril e de setembro e outubro, e mínimo para os meses de junho e julho, demonstrando que há um padrão de comportamento.

⁷ KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric effects on GPS. GPS World Magazine, Cleveland, v. 2, n. 4, p. 48-51, 1991

⁸ LEICK, A. GPS Satellite Surveying. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p

O posicionamento relativo em bases curtas praticamente elimina os erros da refração ionosférica, sendo, portanto, necessário utilizar modelos de ionosfera quando se faz posicionamento relativo com bases longas.

2.3.6.4. Multicaminhamento

Os sinais transmitidos pelos satélites nem sempre chegam apenas diretamente à antena do receptor. Muitas vezes eles são refletidos em estruturas próximas à antena para depois chegar a ela, em adição ao sinal que chega diretamente. Essas estruturas podem ser edifícios, paredes, árvores, carros e diversos outros objetos que reflitam radiação eletromagnética na frequência da banda L e estejam “estrategicamente” posicionados para tal.

Pela sua própria característica geométrica, esse efeito é potencializado quando as elevações dos satélites são baixas.

Esse fenômeno causa erro na mensuração da distância satélite-receptor.

O impacto do erro produzido sobre a fase da onda portadora é apresentado por (LEICK, 1995 apud MONICO, 2000) com as seguintes conclusões:

- O erro máximo corresponde a aproximadamente a um quarto do comprimento de onda, ou seja, 4,8 cm para a portadora L1;
- A frequência do multicaminhamento é proporcional à distância perpendicular entre a superfície refletora e a antena e inversamente proporcional ao comprimento da onda, além de ser função do ângulo de elevação do satélite;
- A fase da onda portadora livre dos efeitos da ionosfera se comporta de maneira muito complicada quando sujeita ao multicaminhamento;

Para a pseudodistância, os efeitos são semelhantes, entretanto o erro é de magnitude várias vezes maior (MONICO, 2000).

Como o sinal GPS é polarizado circularmente à direita, são construídas antenas que rejeitam ou ao menos atenuam a recepção de sinais polarizados à esquerda, caso que ocorre quando são refletidos uma única vez, dependendo do ângulo de incidência (MONICO, 2000).

Pode-se também empregar antenas do tipo *Choken ring* (Figura 17), que têm a capacidade de atenuar a recepção de sinais refletidos.

Adicionalmente, existem receptores que possuem programas internos capazes de identificar e filtrar o multicaminhamento (MACHADO, 2002 apud ABREU, 2007)⁹.

2.3.6.5. Erro do relógio do receptor

O padrão de frequência da maioria dos receptores em uso é determinado por cristais de quartzo, que oferecem boa estabilidade a custos baixos. Entretanto, a escala de tempo de cada receptor difere da escala de tempo GPS.

A discrepância entre o tempo do relógio do receptor e do tempo GPS é o erro do relógio do receptor, que contamina todos as distancias satélite-receptor realizadas em um dado instante pelo receptor, denominando as distâncias como pseudodistâncias e criando a necessidade da adição de um quarto satélite na solução (DRANE; RIZOS, 1997).

2.3.7. Técnicas de posicionamento

Existem diversas formas de posicionamento por GPS. A escolha entre elas se dá em função da atividade exercida e suas características, e das necessidades de precisão.

As técnicas de posicionamento podem ser agrupadas em duas categorias, posicionamento absoluto e posicionamento relativo.

⁹ MACHADO, W. C. **Solução rápida das ambigüidades GPS para aplicações no posicionamento relativo de bases curtas**. 2003. 126 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2002

2.3.7.1. Posicionamento absoluto

Também conhecido por posicionamento por ponto, este método de posicionamento se utiliza de apenas um receptor para realizar posicionamento.

É um método comumente empregado quando necessário em tempo real, porém sem necessidade de alta precisão. O posicionamento é calculado a partir das posições dos satélites, obtidas das efemérides transmitidas nas mensagens de navegação e das pseudodistâncias. A precisão oferecida é cerca de 10 m.

Esta forma de posicionamento é a mais utilizada na sociedade, pois é a que faz uso de equipamentos de menores custos e dimensões e abrange uma diversidade muito grande de aplicações, como rastreadores veiculares, navegadores veiculares, controle de frota, entre outros. Entretanto, é uma técnica ruim para levantamentos geodésicos, que necessita de melhor qualidade de posicionamento.

Existem derivações desta técnica de posicionamento que conseguem melhores qualidades.

Pode-se citar o posicionamento por ponto preciso (PPP). Neste método, ao invés de utilizar as efemérides transmitidas e correções dos relógios dos satélites presentes nas mensagens de navegação, são utilizadas as efemérides precisas em conjunto com as correções dos relógios dos satélites. No entanto, essas informações devem ser disponibilizadas para o usuário através de uma fonte independente, como, por exemplo, o IGS (*International GNSS Service*) e o GSD (*Geodetic Survey Division*) do NRCan (*Natural Resources Canada*). Utilizando apenas as pseudodistâncias de uma única época, pode-se atingir precisão da ordem de 1 m ou melhor (MONICO, 2000).

A acurácia do posicionamento depende não apenas da acurácia da pseudodistância, mas também da geometria dos sinais. O efeito desta geometria é quantificado utilizando o conceito da Diluição da Precisão (DOP – *Dilution of Precision*) (GROVES, 2007).

O DOP auxilia na indicação da precisão dos resultados que serão obtidos, dependendo basicamente de dois fatores (MONICO, 2000):

- Da precisão da observação de pseudodistância, expressa pelo erro equivalente do usuário (UERE – *User Equivalent Range Error*), que é associado ao desvio padrão da observação;

- Da configuração geométrica dos satélites, obtidas pelos DOPs;

O DOP tem relação com a geometria dos satélites no céu. Quanto maior a quantidade de satélites disponíveis e melhor sua distribuição no céu, melhor será o DOP (Figura 19).

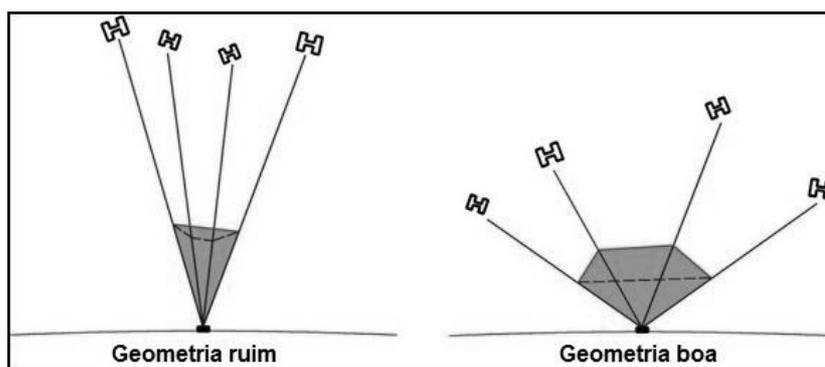


Figura 19 – Geometria dos satélites

(Fonte: <http://www.digiterra.hu/hu/hirek-esemenyek/hirek/115-hogyan-novelheto-a-valos-ideju-gps-meres-pontossaga.html>)

As seguintes denominações são utilizadas:

- HDOP: relacionada ao posicionamento horizontal;
- VDOP: relacionada ao posicionamento vertical;
- PDOP: relacionada ao posicionamento tridimensional;
- TDOP: relacionada a determinação de tempo;
- GDOP: correlaciona PDOP e TDOP;

O PDOP pode ser interpretado como o inverso do volume V de um tetraedro formado pelas posições do usuário e dos 4 satélites (Figura 19) (MONICO, 2000).

$$PDOP = \frac{1}{V} \quad (3)$$

Portanto, quanto maior o volume, melhor será o PDOP. De forma análoga, quanto menor o valor de um determinado DOP, melhor a qualidade do posicionamento.

2.3.7.2. Posicionamento relativo

Este método de posicionamento se utiliza de dois receptores. Um deles deverá estar sobre um ponto com coordenadas bem determinadas e será a estação de referência, e o outro será aquele que se deseja utilizar para obter o posicionamento de um ponto qualquer. É possível usar como estação de referência uma das estações de uma rede de monitoramento contínuo como a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) que serve ao país. Dessa forma o usuário realizará o posicionamento com apenas um receptor, mas deverá acessar os dados da estação de referência para produzir sua solução.

O conceito fundamental do posicionamento relativo é que os dois ou mais receptores envolvidos rastreiam, simultaneamente, um grupo de pelo menos dois satélites comuns (MONICO, 2000).

Dentro do contexto de posicionamento relativo, utilizam-se em geral as duplas diferenças como observáveis fundamentais (MONICO, 2000).

Para se entender as duplas diferenças é necessário antes descrever a simples diferença, da qual deriva a dupla diferença.

A simples diferença, e suas derivações, são uma combinação linear das observáveis GPS entre diferentes estações.

Essa combinação elimina o erro do relógio do satélite e são atenuados os erros devidos a posição do satélite e a refração atmosférica, principalmente em bases curtas (<10 km). Para bases longas a refração troposférica pode ser modelada e a ionosférica reduzida com o uso das duas portadoras L1 e L2 (MONICO, 2000).

Podem ser formadas entre dois receptores e um mesmo satélite, dois satélites e um mesmo receptor ou um receptor e um satélite em duas épocas. Usualmente se utilizam dois receptores e um mesmo satélite. A diferença entre as pseudodistâncias observadas simultaneamente em duas estações é a simples diferença da pseudodistância. A equação é dada por (MONICO, 2000):

$$\Delta PD_{1,2}^1 + v_{PR_{SD}} = \Delta \rho_{1,2}^1 + c(\delta\tau_1 - \delta\tau_2) \quad (4)$$

onde:

$$\Delta \rho_{1,2}^1 = \rho_1^1 - \rho_2^1 \quad (5)$$

e:

ΔPD - diferença entre as pseudodistâncias

$v_{PR_{SD}}$ - resíduos não modelados da pseudodistância

c - velocidade da luz

τ - intervalo de tempo de propagação do sinal

$\Delta \rho$ - diferença entre as distâncias geométricas

A simples diferença da fase da onda portadora é dada por (MONICO, 2000):

$$\Delta \phi_{1,2}^1 + v_{SD_\phi} = \frac{f}{c} \Delta \rho_{1,2}^1 + f[\delta\tau_1 - \delta\tau_2] + \Delta N_{1,2}^1 \quad (6)$$

onde:

$$\phi_{12}(t_0) = \phi_1(t_0) - \phi_2(t_0) \quad (7)$$

$$\Delta N_{1,2}^1 = N_1^1 - N_2^1 \quad (8)$$

e:

$\Delta \phi$ - diferença entre as fases determinadas

v_{SD_ϕ} - resíduos não modelados da fase

ϕ - fase da onda portadora

f - frequência da observável considerada

c - velocidade da luz

τ - intervalo de tempo de propagação do sinal

$\Delta \rho$ - diferença entre as distâncias geométricas

ΔN - diferença entre as ambigüidades determinadas

t_0 - época de referência

A dupla diferença é a diferença entre duas simples diferenças.

Este modelo acarreta na remoção dos erros provenientes dos relógios do satélite e do receptor. O efeito da atmosfera é, na pior das hipóteses, minimizado, bem como os parâmetros orbitais (BLITZKOW et al., 2007).

Neste caso são utilizados dois receptores e dois satélites. Sua equação para a pseudodistância é dada por (MONICO, 2000):

$$\Delta PD_{1,2}^{1,2} + v_{PR_{DD}} = \Delta \rho_{1,2}^{1,2} \quad (9)$$

onde:

$$\Delta \rho_{1,2}^{1,2} = \Delta \rho_{1,2}^1 - \Delta \rho_{1,2}^2 \quad (10)$$

e:

ΔPD - diferença entre as pseudodistâncias

$v_{PR_{DD}}$ - resíduos não modelados da pseudodistância

$\Delta \rho$ - diferença entre as distâncias geométricas

Para a fase da onda portadora, sua equação é dada por:

$$\Delta \phi_{1,2}^{1,2} = \frac{f}{c} (\Delta \rho_{1,2}^{1,2}) + N_{1,2}^{1,2} + v_{\Phi_{DD}} \quad (11)$$

com:

$$N_{1,2}^{1,2} = N_1^1 - N_2^1 - N_1^2 + N_2^2 \quad (12)$$

onde:

$\Delta \phi$ - diferença entre as fases determinadas

$v_{\Phi_{DD}}$ - resíduos não modelados da fase

ϕ - fase da onda portadora

f - frequência da observável considerada

c - velocidade da luz

$\Delta \rho$ - diferença entre as distâncias geométricas

N - ambigüidade

Existe também a técnica de tripla diferença, que é dada pela diferença entre duas duplas diferenças, envolvendo os mesmos receptores e satélites, mas em épocas distintas (MONICO, 2000). A grande vantagem do modelo é a eliminação das ambigüidades e também possibilita uma expressiva redução dos efeitos da atmosfera e dos parâmetros orbitais (BLITZKOW et al., 2007).

2.3.7.2.1. Posicionamento relativo estático

Trata-se de uma das mais utilizadas técnicas em posicionamento geodésico. Neste método de posicionamento, o rastreamento se dá pela ocupação do ponto de interesse por um tempo que pode variar de 20 minutos até algumas horas. Normalmente são incluídas como observáveis somente as duplas diferenças da fase da portadora, pois é mais precisa que a pseudodistância. Entretanto esta última deve estar disponível para estimar o erro do relógio do receptor ou calcular o instante aproximado de transmissão do sinal do satélite (MONICO, 2000).

2.3.7.2.2. Posicionamento relativo semicinemático

Nesta forma de posicionamento, é necessário que a geometria envolvida entre as duas estações e os satélites se altere. Dessa forma, os dados são coletados por, no mínimo, dois curtos períodos na mesma estação. As coletas devem ter intervalo mínimo de 20 a 30 minutos, para que a geometria dos satélites tenha sofrido alteração. Durante o intervalo, outras estações podem ser ocupadas. Uma condição é que o receptor continue rastreando os mesmos satélites durante as visitas às estações (MONICO, 2000).

2.3.7.2.2. Posicionamento relativo cinemático

Este método pressupõe o levantamento de pontos a intervalos curtos de tempo (exemplo: 1s). A fase da onda portadora é a observável fundamental e pode ser realizado com pós-processamento ou em tempo real.

Quando pós-processado, as observações simultâneas dos receptores de ocupação e de referência geram as duplas diferenças.

Conhecido como RTK (*Real Time Kinematics*), o posicionamento relativo cinemático em tempo real é utilizado quando se necessita saber as coordenadas no mesmo momento do levantamento. Nesse caso, os dados coletados na estação de referência têm que ser constantemente enviados para a estação de ocupação, formatados no protocolo de comunicação RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*). Essa transmissão é realizada através de enlace de rádio, sendo o alcance deste meio de comunicação o limitador da distância máxima entre as estações (linha de base). A transmissão pode ser realizada também através de uma conexão GSM (*Global System for Mobile Communication*), fazendo com que a linha de base possa ser aumentada de forma significativa. Uma opção muito utilizada para este caso é o NTRIP (*Network Transport of RTCM via Internet Protocol*).

2.3.7.3. GPS Diferencial (DGPS)

Esta forma de posicionamento se utiliza de princípios semelhantes as do posicionamento relativo cinemático, mas neste caso são usados apenas os códigos transmitidos dos satélites e não a fase de onda. Existem autores que a consideram como posicionamento relativo e outros que não.

Um receptor de referência é colocado sobre um ponto com coordenadas conhecidas e calcula o erro de posicionamento. Quando necessário realizar posicionamento em tempo real, essas informações de erros são enviadas ao receptor móvel através de enlace de rádio.

O cálculo do erro pode ser estimado de duas formas distintas. Uma seria comparar diretamente as coordenadas calculadas com as conhecidas e assim

estimar seu erro. A outra é comparar as distâncias aos satélites rastreados. São calculadas diferenças entre as distâncias obtidas a partir das coordenadas da estação e do satélite com as distâncias obtidas pelo rastreo. O segundo método é mais recomendável, pois as coordenadas nas duas estações (de referência e móvel), podem não resultar do rastreo dos mesmos satélites (BLITZKOW et al., 2007).

2.4. GLONASS

Paralelamente ao sistema GPS, e de características semelhantes, o GLONASS foi desenvolvido na década de 1970 pela antiga URSS como um sistema de posicionamento global para uso militar. Foi projetado para possuir uma constelação de 24 satélites (21 operacionais e 3 sobressalentes), distribuídos em 3 planos orbitais separados de 120° e inclinados a $64,8^\circ$ em relação ao equador. Seus satélites orbitam a uma altitude de cerca de 19.100 km, com um período orbital de 11 horas e 15 minutos (tempo sideral). O primeiro satélite foi lançado em 1982 e a constelação se completou no ano de 1995, já sob comando da Rússia (GROVES, 2007).

Assim como no GPS, os satélites transmitem os sinais nas bandas L1 e L2. No entanto, as frequências de transmissão dos satélites não são a mesma, entretanto são iguais para alguns satélites que se encontram em posições antípodas na órbita.

O serviço de posicionamento é também similar ao GPS, havendo o código C/A, aberto a usuários civis e o código P, apenas para usuários autorizados (MONICO, 2000).

Em função de problemas financeiros e do curto tempo de vida útil dos primeiros satélites (cerca de 4,5 anos), a constelação diminuiu até atingir o número de 7 satélites em 2001, quando então um programa de recuperação e modernização do sistema foi lançado. Neste programa, satélites mais modernos e com maior vida útil foram planejados. A previsão inicial era o lançamento de 18 satélites até o fim de 2007 e posteriormente completar a constelação até o final de 2009 (GROVES, 2007).

Nos dias atuais (Fevereiro/2011), estão em órbita 26 satélites, sendo que apenas 21 estão em operação, estando os 5 restantes em manutenção (FEDERAL SPACE AGENCY, 2011).

No dia 05 dez. 2010 houve a tentativa de lançamento de mais 3 satélites. Infelizmente um problema com o foguete que os transportava fez com que a missão fosse abortada e os satélites perdidos.

2.5. GALILEO

O sistema Galileo é uma iniciativa conjunta da Comissão Européia (EC – *European Commission*) e da Agência Espacial Européia (ESA – *European Espacial Agency*). A EC possui uma responsabilidade geral sobre o programa enquanto que a ESA é o agente designador e desenvolvedor durante a fase de estabelecimento da constelação, sendo responsável pela definição, desenvolvimento e validação da constelação e da infra-estrutura terrestre associada (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2011).

Diferente dos sistemas GPS e GLONASS, foi concebido e será gerenciado pela comunidade civil. Serão oferecidos os seguintes tipos de serviço (GROVES, 2007; EUROPEAN COMISSION, 2011):

- Open Service (OS): Serviço gratuito de localização disponibilizado em duas freqüências distintas, sendo similar ao serviço oferecido pelo sistema GPS;
- Safety-of-Life (SOL): Serviço que fará uso dos mesmos sinais do OS, porém com a adição de sinais de integridade e autenticação de dados, validando que os sinais Galileo são genuínos e, portanto, protegendo-os contra interferências intencionais;
- Commercial Service (CS): Serviço que oferecerá melhor acurácia. Um aterceira banda de freqüência emitirá sinais criptografados oferecendo melhor proteção a interferências e melhor posicionamento pela fase de onda portadora;
- Public Regulated Service (PRS): Serviço que proverá alta integridade, continuidade e resistência a interferência a usuários especiais, como serviços de emergência e segurança;

- Search and Rescue Service (SAR): Serviço de busca e salvamento que o usuário aciona diante de uma situação de emergência. Neste caso o usuário receberá de volta uma confirmação que a ajuda está a caminho;

Sua constelação consistirá de 30 satélites (27 operacionais e 3 reservas) distribuídos em 3 planos orbitais separados de 120° e inclinado 56° em relação ao equador, que orbitarão a uma altitude de 23.300 km com um período orbital de 14 horas e 5 minutos (tempo sideral).

O primeiro satélite de testes, denominado GIOVE-A, foi lançado em 28 dez. 2005 e segundo, denominado GIOVE-B, foi lançado em 27 abr. 2008.

Após atrasos nos planos de deixar o sistema funcional, atualmente a expectativa é que no ano de 2015 haverá a constelação de 18 satélites, quando estarão disponíveis, em caráter inicial, os serviços OS, PRS e SAR (EUROPEAN COMMISSION, 2011).

2.6. SISTEMAS DE POSICIONAMENTO LOCAL POR SATÉLITES

Alguns países possuem ou projetam sistemas de posicionamento regionais que servem ao seu território e países vizinhos. Alguns totalmente independentes e outros vinculados a algum outro sistema de posicionamento por satélites. A seguir serão brevemente abordados os mais relevantes para a época atual.

2.6.1. Beidou e Compass

O Beidu (*Big Dipper*) é um sistema de posicionamento regional por satélites da China. Consiste em 3 satélites geoestacionários e entrou em operação no início de 2004. O sistema foi concebido para aplicações rodoviárias, marítimas e ferroviárias e opera totalmente independente de sistemas GNSS. Por suas características de geometria dos satélites, não se pode adquirir altitude independente da latitude, dessa forma assume-se a altitude que coincide apropriadamente com a superfície que o usuário se encontra (GROVES, 2007).

O princípio de funcionamento difere dos sistemas GNSS também pelo fato de os receptores terem que transmitir para poder se posicionar, permitindo dessa forma se obter posicionamento com apenas 2 satélites. Os satélites enviam continuamente sinais, que são recebidos e uma pequena parte gravados. Esses sinais gravados são enviados de volta para os satélites, que então transmite as informações para uma estação de controle. Esta estação realiza o cálculo das distâncias entre o receptor e os satélites, obtém a posição do usuário e envia as informações de volta através dos satélites.

A acurácia de posicionamento dentro da área de operação do sistema é de 20m (BION; JIN; FANG apud GROVES, 2007)¹⁰.

Em função da necessidade de processamento da posição pelo sistema de controle e comunicação bi-direcional, o Beidou opera com número limitado de usuários, entretanto, é um sistema de posicionamento sob total controle do governo Chinês.

A expansão do sistema Beidou, no intuito de torná-lo um sistema GNSS está ocorrendo de forma a caracterizar um novo sistema, chamado Compass. Dois novos satélites geoestacionários e mais três geossíncronos já foram lançados até Julio/2010. Estes satélites geossíncronos acompanharão o movimento de rotação da Terra, variando apenas na latitude, com um plano orbital a 55º do plano do equador, e permitirão o posicionamento tri-dimensional. Posteriormente, tem-se a intenção de lançar mais 27 satélites para tornar global a cobertura deste sistema.

2.6.2. *Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)*

Trata-se de um sistema de posicionamento desenvolvido pelos japoneses e que foi concebido para suplementar o GPS aumentando a quantidade de satélites disponíveis em vales urbanos e locais com alta incidência de edifícios ou montanhas. Para tanto, sua constelação de 3 satélites em 3 órbitas geossíncronas (órbita que acompanha a velocidade de rotação da Terra, mas pode ter inclinação e excentricidades diferentes de zero) diferentes, com seus planos inclinados 45º em

¹⁰ BION, S.; JIN, J.; FANG, Z. **The Beidou Satellite Positioning System and Its Positioning Accuracy**, Navigation: JION, Vol. 52, No. 3, 2005, pp. 123–129

relação ao plano do equador, garante que sempre haverá ao menos um satélite sobre o território do Japão com alto ângulo de elevação.

O QZSS não é um serviço SBAS, pois não transmite informações de integridade (PETROVSKY apud GROVES, 2007)¹¹.

O primeiro satélite deste sistema, chamando *Michibiki*, foi lançado em setembro/2010 e é o único em órbita no presente momento.

2.6.3. Indian Regional Navigational Satellite System (IRNSS)

O IRNSS é um sistema indiano que está sendo desenvolvido pela Organização de Pesquisa Espacial da Índia (ISRO). Foi concebido para prover um serviço GNSS independente para este país.

Planejava-se que o sistema estivesse operacional entre 2009 e 2012, o que não ocorreu até o presente momento (fevereiro/2011). O serviço deverá prover acurácia no território Indiano de 20 para posicionamento horizontal e vertical. (SINGH; SARASWATI apud GROVES, 2007)¹².

Este sistema possuirá uma constelação de 7 satélites, sendo 3 geoestacionários e os outros 4 em duas órbitas geosíncronas com seus planos inclinados 29º em relação ao plano do equador.

2.7. CONSIDERAÇÕES GERAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

É notável a sólida evolução das técnicas de posicionamento terrestre ao longo do tempo, o crescente interesse de diversas nações para possuírem seus próprios sistemas de posicionamento, para que tenham total controle dos mesmos e também posse da tecnologia necessária para realizar tal atividade, e ainda eliminando a dependência de sistemas alheios.

¹¹ PETROVSKY, I. G. QZSS - Japan's New Integrated Communication and Positioning Service for Mobile Users. GPS World, p. 24–29, June 2003

¹² SINGH, A.; SARASWATI, S. K. India Heading for a Regional Navigation Satellite System. Coordinates, p. 6–8, November 2006

Adicionalmente, os sistemas já existentes estão sendo modernizados para que proporcionem melhor qualidade de posicionamento e novos recursos.

No que concerne aos sistemas de posicionamento global, espera-se para os próximos anos uma superabundância de satélites de diversos sistemas diferentes, o que vem impulsionando uma tendência na adoção de receptores GNSS que façam uso desta maior constelação e, portanto, sejam capazes de posicionar-se através destes diferentes sistemas ao mesmo tempo e ainda integrar a solução dos mesmos gerando assim um posicionamento com qualidade ainda melhor e com maior disponibilidade na superfície terrestre.

Pode-se notar, portanto, que a evolução dos sistemas de posicionamento terrestre continuará sendo realizada a longo prazo, e também movida pela necessidade da reposição dos satélites que expiram sua vida útil.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreverá as etapas do desenvolvimento do projeto, bem como as ferramentas, métodos e critérios utilizados para a busca aos objetivos propostos.

3.1. PROJETO DO SISTEMA

Numa visão geral, o projeto proposto compreende basicamente o desenvolvimento de dois agentes, o Veículo Autônomo e a Estação de Monitoramento e Instrução, ora denominada EMI (Figura 20).

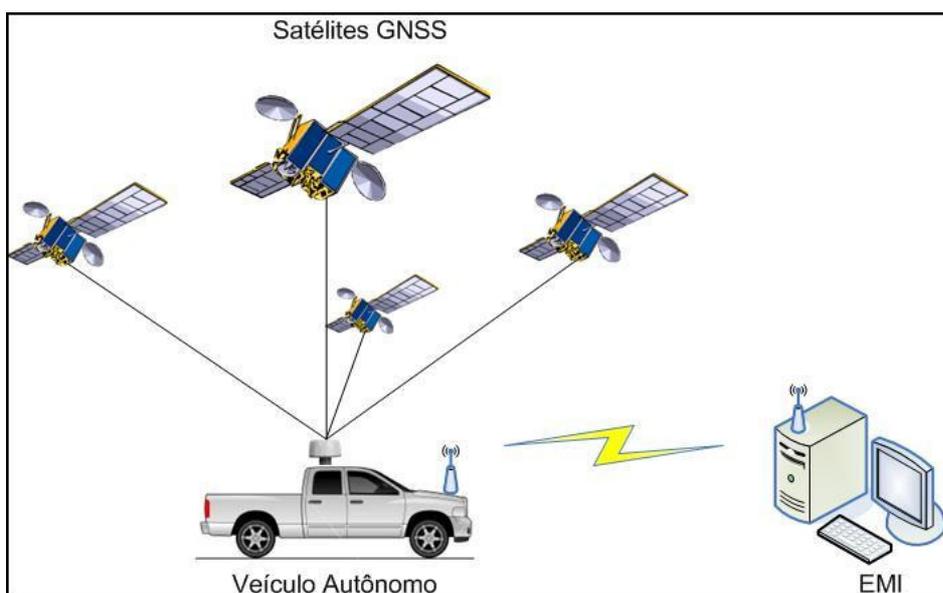


Figura 20 – Visão Geral do Projeto
(Fonte: O autor)

Para tanto, as seguintes etapas foram realizadas:

- Desenvolvimento do veículo:
 - Desenvolvimento do Sistema de Mobilidade;
 - Desenvolvimento do Sistema de Posicionamento;
 - Desenvolvimento do Sistema de Comunicação;
 - Desenvolvimento do Sistema de Sensoriamento;
 - Desenvolvimento do Sistema de Navegação;

- Concepção de uma arquitetura de sistema modular que proporcione fácil expansão e manutenção da mesma;
- Desenvolvimento da estação de monitoramento e instrução (EMI);

Nota-se que o Sistema de Planejamento não está sendo considerado no desenvolvimento do projeto, como fora relacionado no item 1.2. Os veículos autônomos atualmente em estudo se utilizam de planejamento realizado no próprio veículo. Essa capacidade está vinculada a um poder de processamento e armazenamento que é utilizado para traçar rotas sobre mapas previamente conhecidos, segundo os objetivos a se cumprir.

Como não é objetivo do presente projeto o planejamento de missão através de rotas sobre mapas, e sim apenas sua execução, é responsabilidade da EMI possuir uma forma básica de planejamento, que consiste em determinar pontos com coordenadas conhecidas sobre uma via onde o veículo possa navegar. Essa seqüência de pontos é denominada de missão. Portanto, o veículo deverá navegar por um ambiente conhecido, onde sabe-se ser possível o trânsito do mesmo, que apenas deverá prevenir-se contra colisões através de sensoriamento.

Além do planejamento básico, a EMI é responsável por enviar comandos e delegar missões ao veículo e ainda monitorá-lo, recebendo deste informações pertinentes sobre o andamento da missão e sua localização. Estas informações são então exibidas em tela e gravadas para posterior análise e projeção da trajetória do veículo sobre mapa digital.

O veículo é responsável por receber as mensagens da EMI, executar os comandos recebidos e reportar à EMI as informações requeridas.

O meio de comunicação entre os dois agentes se dá através de enlace de comunicação por radiofrequência, onde a EMI é denominada MESTRE da comunicação e o veículo ESCRAVO.

Neste modelo de comunicação, cabe ao agente MESTRE iniciar toda comunicação necessária, sendo o ESCRAVO relegado a esperar por uma mensagem para então processá-la e respondê-la. Este método faz com que o enlace de comunicação seja ocupado por apenas um agente de cada vez, ou seja, é um método de comunicação bi-direcional não simultâneo. Portanto um dado agente não enviará uma mensagem ao mesmo tempo em que recebe outra. Esse método recebe a denominação de comunicação *half-duplex*.

No contexto do presente projeto, o veículo deve executar um comando assim que receber requisição para tal, provinda da EMI. Esta, por sua vez, deve manter-se constantemente enviando mensagens ao veículo para efetuar seu monitoramento.

O sistema desenvolvido para o veículo possui três modos básicos de operação: INICIAL, REMOTO e AUTÔNOMO.

A divisão entre modos de operação é uma forma de organizar os diferentes regimes de trabalho que o veículo pode assumir, pois cada um deles tem um objetivo específico, embora compartilhem os mesmos recursos. Dessa forma, quando em um determinado modo de operação, o veículo não executará comandos que sejam específicos de outro modo, respondendo com uma mensagem de erro nesses casos.

A transição entre os modos de operação é dada por comandos específicos para tal, provindos da EMI, conforme ilustrado na figura 21.

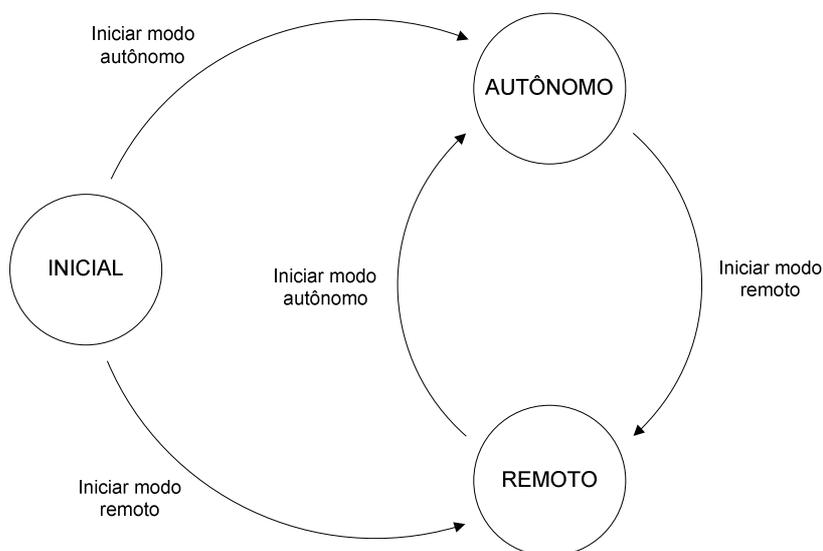


Figura 21 – Diagrama de transição entre os 3 modos básicos de operação
(Fonte: O autor)

O modo INICIAL é assumido apenas quando o veículo é ligado, nele são inicializados todos os sistemas.

No modo INICIAL apenas é possível efetuar o monitoramento do veículo, trocar o modo de operação e enviar o comando PARAR. Este último é um comando

global, ou seja, é aceito em qualquer modo de operação, pois trata-se de uma medida de segurança.

No modo REMOTO os movimentos do veículo são controlados por um operador humano através da EMI. Neste caso o veículo não é autônomo. Este modo foi desenvolvido em uma primeira etapa do projeto para que o funcionamento dos diversos elementos do veículo pudesse ser testado e ainda medições realizadas para levantamento das características de operação do mesmo, como por exemplo, a mensuração de velocidade. Posteriormente será uma maneira de assumir o controle do veículo, como medida de segurança.

No modo AUTÔNOMO, o veículo é totalmente controlado pelo algoritmo de *software* nele embarcado, atendendo aos objetivos do presente projeto de pesquisa.

3.2. AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O ambiente de desenvolvimento consiste nas ferramentas de desenvolvimento e execução do projeto e também na estrutura tecnológica básica sobre o qual será desenvolvido.

Fundamentalmente, o projeto se deu com o emprego de tecnologias de *hardware*, *software* e mecânica.

A plataforma veicular utilizada já possui quase toda a estrutura mecânica necessária, tendo sido feitas apenas algumas adaptações para o sistema de direcionamento e para a fixação de placas de circuito eletrônico e outros componentes.

Os diversos dispositivos de *hardware* foram provenientes de aquisição, doação de fornecedores e também de construção manual.

O ambiente de desenvolvimento do *software* do veículo foi elaborado sobre a plataforma de *hardware* DEMO9S12XEP100 (figura 22). Trata-se de uma placa eletrônica onde estão contidas, além do microcontrolador, diversas interfaces de comunicação, entrada/saída de sinais analógicos e digitais, *debug* e gravação de *software*.

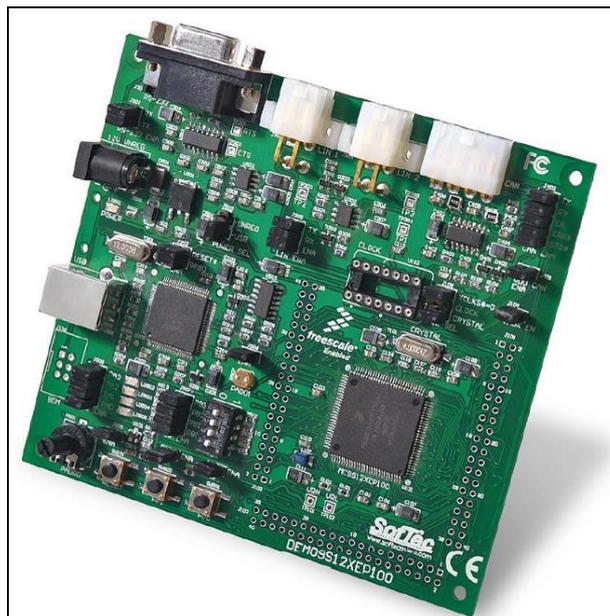


Figura 22 – Placa DEMO9S12XEP100 da Freescale
(Fonte: <http://www.freescale.com>)

A placa adotada, fabricada e doada ao presente projeto pela empresa *Freescale*, contém o microcontrolador MC9S12XEP100, o qual é o “cérebro” do sistema do veículo, responsável por todo o gerenciamento do mesmo. Possui um processador de 16bits que opera na frequência de 48Mhz, 64 Kbytes de memória RAM (*Random-access memory*), 4 kbytes de memória não-volátil e 1Mbyte de memória de programa (*Flash memory*). Possui também diversos outros recursos que são utilizados no projeto, como interrupção, entradas/saídas digitais, conversores analógico / digital (A/D), comunicação serial e gerador PWM (*Pulse Width Modulation*).

A presença de todos esses recursos acelera de forma considerável o desenvolvimento do *software*, pois se elimina a necessidade da construção e teste de todas as interfaces necessárias, fator este, importante para a escolha deste produto. Adicionalmente os recursos disponíveis vêm ao encontro das necessidades do projeto, fazendo deste produto um sistema computacional completo para aplicação neste projeto.

Como plataforma de software foi escolhido o sistema operacional de tempo real OSEK (*Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik in Kraftfahrzeugen*). Numa tradução livre, o nome significa “Sistemas abertos e suas interfaces para eletrônica em veículos motorizados”.

Sistema operacional é um programa que gerencia o *hardware* do computador. Ele também provê uma base para programas de aplicativos e atua como um intermediário entre o usuário do computador e o *hardware* deste. (SILBERSCHATZ; GALVIN; GAGNE, 2004). Essas plataformas otimizam a utilização dos recursos dos sistemas computacionais, de forma a fazer melhor aproveitamento destes.

Segundo Laplante (2004), sistema operacional de tempo real é um sistema que deve satisfazer restrições explícitas de tempo (limitado) de resposta, sob risco de severas conseqüências, incluindo a falha. Isso significa que se algum limite de tempo for extrapolado, pode haver mau funcionamento ou insucesso da tarefa sendo executada.

O OSEK foi desenvolvido em um projeto conjunto com vários fabricantes da indústria automotiva, com o objetivo de ser um padrão industrial em uma arquitetura aberta para unidades de controle distribuído, presentes em diversos veículos de diferentes montadoras.

É um sistema multitarefa, ou seja, pode executar diversas tarefas com atividades diferentes de forma intercalada, fazendo com que o resultado final seja muito próximo de que se essas tarefas estivessem sendo executadas ao mesmo tempo. Essa capacidade proporciona o melhor uso do processador, pois garante que sempre alguma tarefa estará sendo processada, enquanto outra estiver esperando por algum evento, resposta de algum dispositivo ou ainda que seja de menor prioridade.

O OSEK disponibiliza também, entre outras, as seguintes ferramentas:

- RECURSO: Utilizados para coordenar a concorrência ao acesso por duas tarefas a um mesmo recurso que ambas compartilham. Essa ferramenta garante que apenas uma tarefa por vez irá acessar um dado recurso compartilhado;
- EVENTO: Serviço utilizado para “avisar” a uma tarefa que um determinado evento por ela esperado ocorreu;
- ALARMES: Serviço para o processamento recorrente de eventos, com temporização especificada;
- MENSAGENS: Serviço de comunicação entre tarefas;
- PRIORIDADE: Ferramenta utilizada para delegar prioridade de execução para as várias tarefas presentes;

A opção por esse sistema possibilita o desenvolvimento do *software* com melhor organização e modularidade, além de possuir tempos de respostas confiáveis, por ser um sistema de tempo real.

A modularidade traz muitas vantagens no desenvolvimento de *software*, isso inclui a melhor organização, compreensão e coesão do código, e também maior facilidade na manutenção e portabilidade do mesmo. Esses fatores foram fundamentais na escolha do referido sistema.

A implementação dos algoritmos de controle do veículo foi realizada em linguagem C ANSI (*American National Standards Institute*), sendo utilizado como Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE – *Integrated Development Environment*) e compilador o *software CodeWarrior*, também fabricado pela *Freescale*.

O ambiente de desenvolvimento do projeto apresentado (*hardware*, sistema operacional, linguagem de programação, compilador e IDE) é freqüentemente utilizado e difundido na indústria automobilística nos dias atuais, o que certifica a qualidade dos elementos envolvidos. Adicionalmente, são ferramentas de domínio prévio do autor, fator que acrescenta produtividade ao desenvolvimento.

3.3. ARQUITETURA DO SISTEMA

Da concepção do projeto, modelou-se a arquitetura geral do sistema, a qual é representada pelo diagrama exibido na figura 23. Nela, pode-se verificar o relacionamento entre os diversos elementos do projeto.

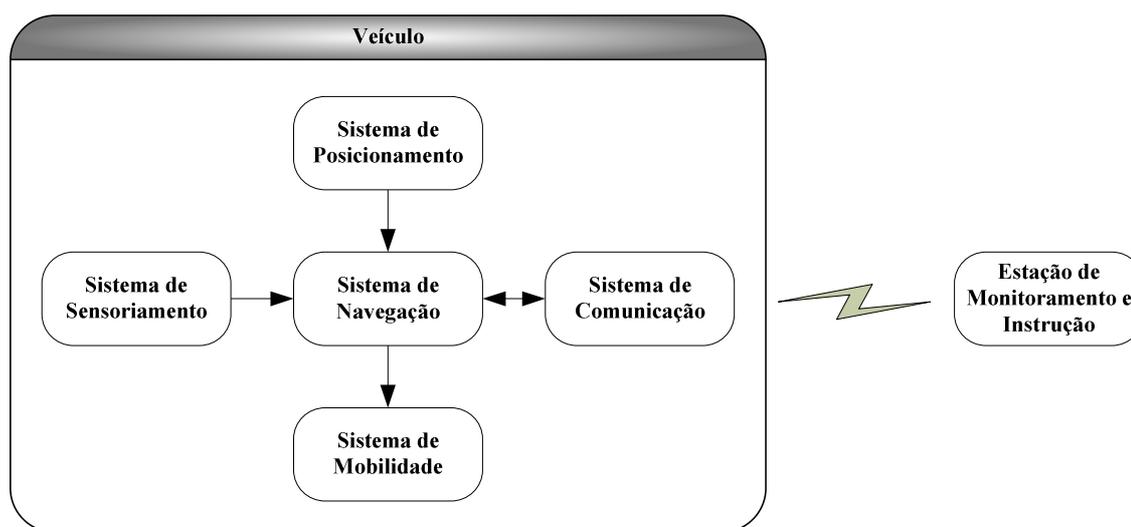


Figura 23 – Arquitetura do Sistema
(Fonte: O autor)

De uma forma geral, observa-se que todo o algoritmo de *software* do veículo foi decomposto em sistemas com finalidades específicas. Estes, por sua vez, são decompostos em módulos de *software*, os quais serão abordados na descrição de cada sistema.

A arquitetura de *software* foi desenvolvida para garantir a modularidade e expansibilidade do código e atender à arquitetura geral do sistema.

Uma arquitetura bem definida e modular traz o benefício da redução do impacto no projeto, numa possível troca de um dispositivo de *hardware* ou mudança de comportamento e também para a adição de novas funcionalidades. Com o estabelecimento de camadas, e a definição de “protocolos” de comunicação entre estas, torna-se mais fácil a troca ou inclusão de uma camada, desde que a nova respeite o protocolo de comunicação com suas camadas vizinhas. Quando usado o termo protocolo neste parágrafo, se faz menção ao método de comunicação entre as camadas.

A figura 24 ilustra a arquitetura de *software* elaborada para a aplicação do veículo.

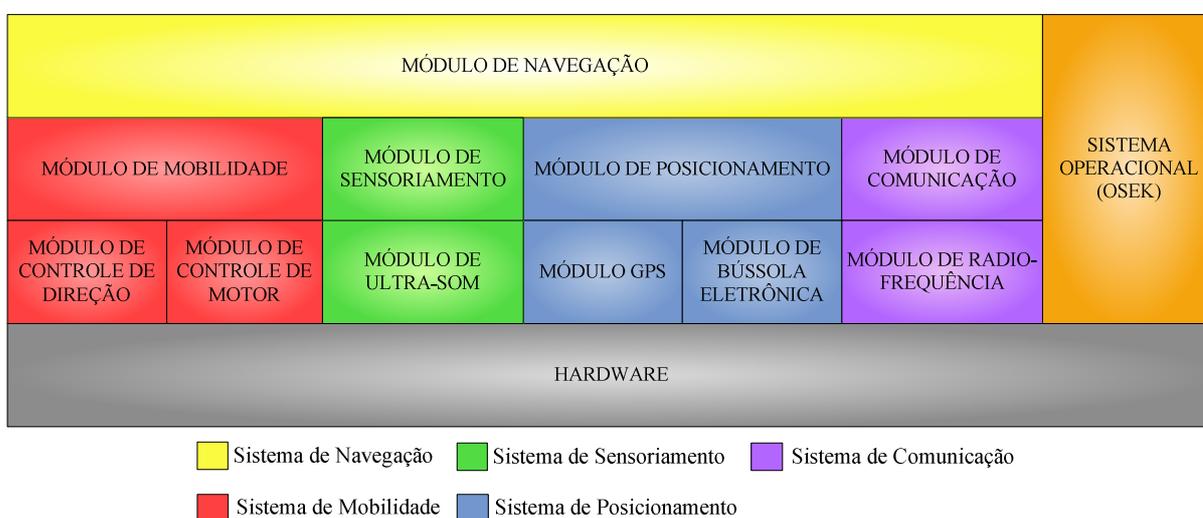


Figura 24 – Arquitetura de *software* do sistema do veículo
(Fonte: O autor)

Exceto para o sistema operacional, que interage com todos os módulos, as camadas presentes na arquitetura de *software* respeitam a interação vertical. Isso significa, por exemplo, que o MÓDULO DE NAVEGAÇÃO não interage diretamente com o MÓDULO DE RÁDIO-FREQUÊNCIA (e vice-versa), sendo necessário, para isso, interagir com o MÓDULO DE COMUNICAÇÃO. Esse critério garante que as camadas mais altas abstraíam o funcionamento das mais baixas, ou seja, não vinculam diretamente seu comportamento em função das camadas inferiores. Portanto, poder-se-ia, ao invés de utilizar transceptor de radiofrequência, utilizar um modem GSM para comunicação, sendo necessário apenas trocar a camada correspondente, causando pouco ou nenhum impacto às superiores.

3.4. PLATAFORMA VEICULAR

Como plataforma de projeto, optou-se por um veículo em escala reduzida que possuísse as mesmas características de um veículo comercial urbano, onde fosse possível embarcar toda a estrutura tecnológica para torná-lo autônomo.



Figura 25 – Colossus. Versão na cor prata
(Fonte: O autor)

Escolheu-se o veículo denominado Colossus (figura 25), que nada mais é que um veículo rádio controlado de brinquedo, que foi fabricado e comercializado no Brasil entre 1984 e 1990 pela empresa Estrela.

A escolha se deu em razão deste veículo possuir um projeto mecânico completo e pronto para uso. Nele é possível escolher entre tração em duas (4x2) ou nas quatro rodas (4x4). No primeiro modo consegue-se maiores velocidades em superfícies planas enquanto que no segundo maior torque e a capacidade de trafegar por superfícies relativamente irregulares como grama e terra, ondulações, e ainda superfícies inclinadas. A mudança entre 4X2 e 4x4 se dá através de alavanca mecânica que se encontra na parte inferior do veículo, entre o eixo traseiro e o compartilhamento de pilhas.

No presente projeto, o veículo sempre será utilizado no modo 4x4. A escolha é justificada pelos seguintes motivos:

1. A adaptação para veículo autônomo requer a adição de diversas placas de circuitos eletrônicos, sensores e bateria. Esses elementos, principalmente a bateria, aumentam de forma significativa a massa carregada pelo veículo, de forma que este modo de tração se mostrou

apto a carregar a massa testada (~ 2,5 Kg). No outro modo de operação, o veículo encontrou dificuldades para iniciar o movimento com a carga citada.

2. O veículo será submetido a testes e operação predominantemente em ambientes externos, onde a superfície será relativamente irregular, considerado um veículo desta dimensão.

O veículo ainda possui tração com transmissão diferencial nos dois eixos e controle de direção trapezoidal (figura 26) (BENEVENUTI, 2009). As especificações podem ser vistas na tabela 3.

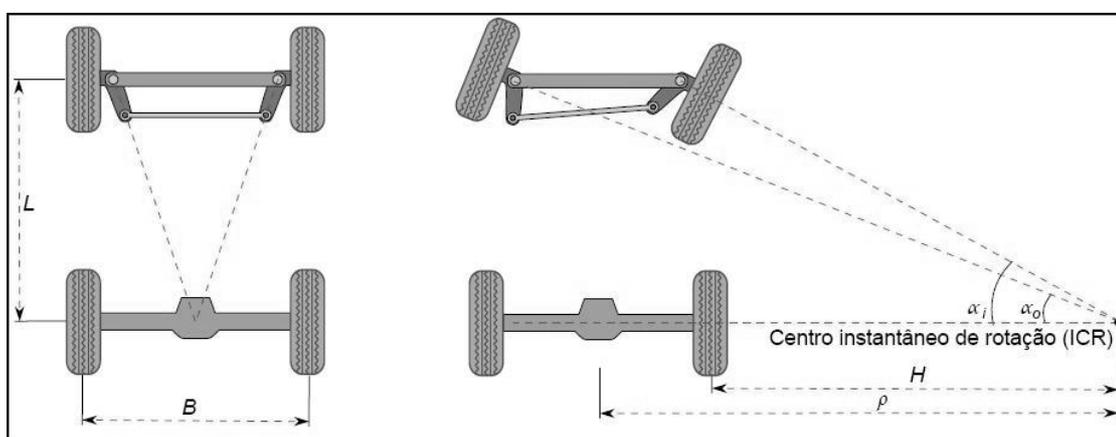


Figura 26 - Esquema de controle de direção trapezoidal
(Fonte: BENEVENUTI, 2009)

Tabela 3 - Especificações do veículo
(adaptada de BENEVENUTI, 2009)

Massa	~ 1,2 kg
Velocidade máxima	~ 61 cm/s (2,2 km/h)
Distância entre eixos (L)	234 mm
Distância entre rodas traseiras (B)	169 mm
Ângulo de desvio das rodas (α_i, α_o)	-27° a 27°
Diâmetro da roda	81 mm

Para a tração, o veículo possui dois motores elétricos de corrente contínua (CC) que atuam sobre a mesma caixa de transmissão, que, por sua vez, atua sobre o diferencial, o qual, finalmente atua sobre as rodas.

Através do circuito original não foi possível descobrir qual a tensão de operação dos motores. Dispositivos como este normalmente operam na faixa de 5 a 12 Volts. No trabalho (BENEVENUTI, 2009) foram identificados os motores como

sendo fabricados pela empresa *Mabushi Motor Co*, embora o modelo dos mesmos não tenha sido identificado. Como originalmente o veículo utilizava 5 pilhas de 1,5 Volts em série, a tensão máxima atingida é de 7,5 Volts e, como não existem multiplicadores de tensão no circuito original, os motores não poderiam ser alimentados com tensão maior. Testes em bancada mostraram que o motor teve um comportamento considerado bom, com e sem carga, utilizando-se a tensão de 7 Volts.

Para direcionamento, o veículo possui um motor de corrente contínua acoplado a uma caixa de redução e um potenciômetro, o qual é utilizado para mensurar a direção atual das rodas através de um conversor analógico/digital. Ao verificar essa estrutura, percebeu-se que a haste que aplica a força no eixo de direção estava quebrada, não sendo possível utilizá-la e nem era passível de conserto, pois trata-se de uma peça pequena e especificamente feita para o projeto do veículo. Inicialmente houve a idéia de adquirir outro veículo deste modelo para utilizar sua haste, mas uma pesquisa sobre modos de direcionamento de veículos em escala atualmente presentes no mercado, mostrou que praticamente todos os fabricados hoje em dia utilizam servo-motores, os quais são mais fáceis de acionar e atendem às necessidades de precisão e torque. Decidiu-se então remover o sistema de direcionamento original e adaptar um servo-motor ao eixo de direção do veículo.

Como o veículo receberia diversas placas eletrônicas que ficariam alocadas internamente, dentro da cabina e também abaixo do capô e caçamba, a temperatura poderia se tornar um problema, principalmente para o circuito acionador dos motores. O projeto original possuía apenas uma placa, alocada dentro da cabina, onde estava concentrado todo o circuito eletrônico de controle. Não havia sistema de resfriamento. Em função da maior quantidade de placas e pequeno espaço entre elas, decidiu-se realizar o resfriamento do ambiente interno do veículo, o qual foi realizado com a aplicação de um pequeno ventilador (*cooler*) que foi alocado à frente do veículo, abaixo do capô, que coleta o ar fresco de fora do veículo para seu interior, criando uma corrente de ar para proporcionar resfriamento das placas.

Todo o restante da estrutura eletrônica original do veículo foi removida, pois não seria possível utilizá-la. As novas soluções empregadas serão descritas oportunamente.

3.5. FONTE DE ENERGIA

No projeto original do veículo são utilizadas em série, 5 pilhas tamanho D de 1,5 Volts cada. Essa configuração permite o uso do veículo original por cerca de 30 a 40 minutos. Como a tensão fornecida nesse caso é de 7,5 volts, essa configuração não poderia ser usada no projeto proposto, pois algumas placas eletrônicas embarcadas no veículo recebem alimentação de 12 volts. Adicionalmente o presente projeto emprega mais circuitos eletrônicos que o original, fazendo com que seu consumo seja maior.

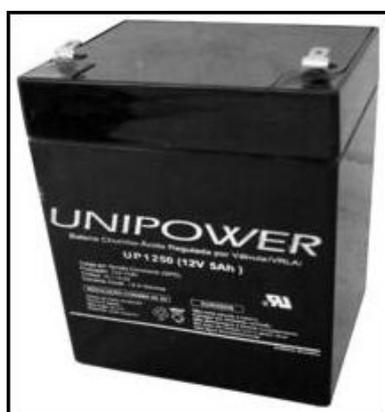


Figura 27 – Bateria Recarregável Chumbo-Ácido Regulada por Válvula
(Fonte: <http://www.unicoba.com.br>)

Portanto, uma fonte de alimentação de 12 Volts e com maior capacidade de carga foi dimensionada para o uso no projeto. Escolheu-se a bateria modelo UP1250 (figura 27) fabricada pela empresa UNICOBA (<http://www.unicoba.com.br>) e foram adquiridas duas unidades. Trata-se de uma bateria recarregável de chumbo-ácido regulada por válvula de 12 V e 5 A/h. Essas baterias são facilmente encontradas no mercado por serem utilizadas em diversos produtos comerciais, como alarmes residenciais, no-breaks, entre outros. Em testes preliminares, o consumo médio do veículo em movimento foi menor do que 2 Amperes, sendo então possível permanecer em operação por cerca de 1 a 2 horas, segundo a curva de descarga apresentada pelo fabricante da bateria (figura 28).

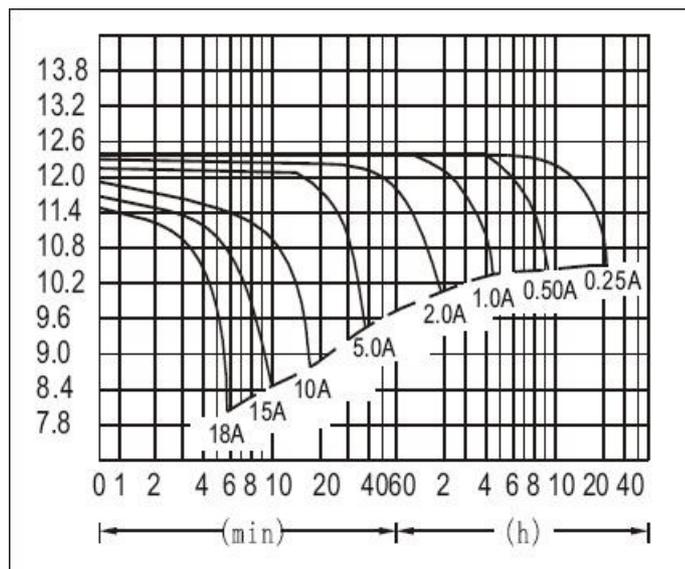


Figura 28 – Curva de Descarga da Bateria
(Fonte: <http://www.unicoba.com.br>)

O local de fixação da bateria não poderia ser escolhido de forma aleatória e sim, considerando a dinâmica veicular. Isso se deve ao fato de a bateria ter uma massa maior que a do próprio veículo. (1,7 kg a bateria e 1,2 kg o veículo). O compartimento de pilhas certamente foi dimensionado em função da dinâmica veicular em seu projeto original, entretanto, não possui volume suficiente para abrigar a bateria escolhida. A solução foi então fixar a bateria acima da caçamba, próxima à cabina. Esse é um local praticamente centralizado da plataforma e foi o melhor encontrado para que o centro de gravidade do veículo sofresse o menor deslocamento possível, não comprometendo a sua dinâmica. Adicionalmente, um elástico foi utilizado para fixar a bateria em seu local, ainda que o veículo esteja deitado ou com as rodas para cima.

Como a tensão de 12 Volts não é padrão para todos os dispositivos presentes no veículo, foi necessária também a disponibilidade de fontes de 7 V, 5 V e 3,3 V. Para tanto, conversores de tensão de corrente contínua foram utilizados para disponibilizar as tensões necessárias a partir da tensão base de 12 Volts da bateria.

Para as fontes de alimentação de 5 V e 7 V foram utilizadas, respectivamente, as placas modelo TPS5450EVM e TPS54620EVM fabricadas e doadas pela empresa *Texas Instruments* (<http://www.ti.com>). A fonte de alimentação de 3.3V foi manualmente construída a partir do uso de um regulador de tensão modelo LM1117 fabricado pela empresa *National Semiconductor* (<http://www.nsc.com>). A figura 29 apresenta o diagrama da fonte de alimentação do projeto.

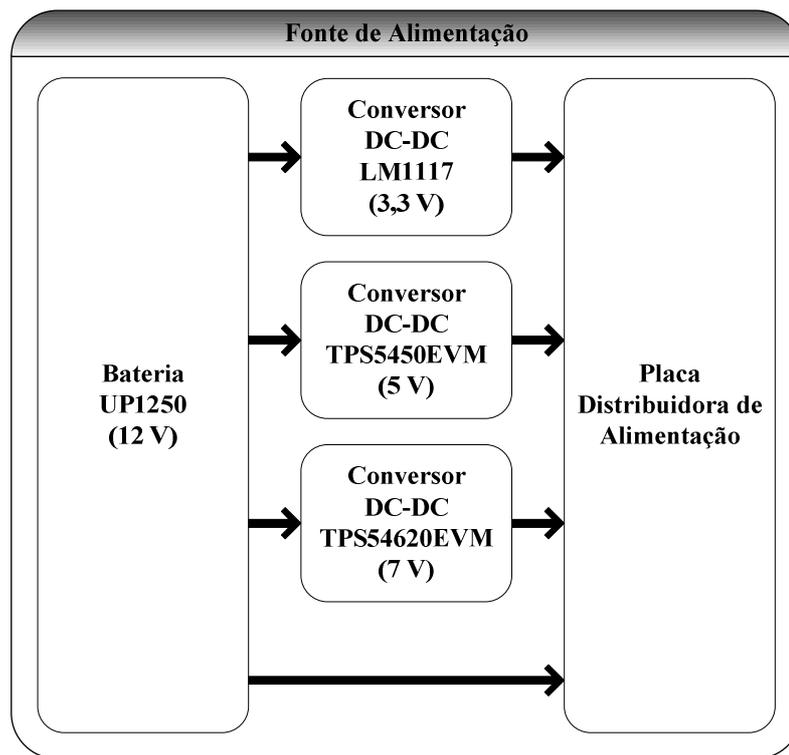


Figura 29 – Diagrama da fonte de alimentação do veículo
(Fonte: O autor)

Uma placa distribuidora de energia foi construída para a disponibilização e centralização de todas as opções de energia possíveis. Essa placa foi fixada em uma posição central do veículo, dentro da cabina e abaixo da placa que controla os motores de tração.

Acoplada à placa distribuidora está a fonte de alimentação de 3,3 V. A fonte de 5 V foi fixada internamente na traseira do veículo, abaixo da caçamba e a fonte de 7 V foi fixada abaixo do veículo, dentro do compartimento de pilhas.

3.6. SISTEMA DE MOBILIDADE

O Sistema de Mobilidade foi concebido para controlar os movimentos do veículo. Para tanto, deve ser capaz de acionar os atuadores de tração e direcionamento do veículo.

Como trata-se de uma interface de controle, o sistema é responsável apenas por movimentar e direcionar o veículo segundo comandos recebidos e, portanto, não possui a capacidade de determinar qual movimento será feito, tarefa que é de responsabilidade do sistema de navegação.

Testes de tração, realizados a partir da alimentação do motor com 7 V e a aplicação de cargas diferentes mostraram um consumo que variou de 300 a 2500 mA.

Para atender a esse padrão de consumo, foi construída uma placa eletrônica baseada no circuito integrado (CI) L298, fabricado pela *STMicroelectronics* (<http://www.st.com>). Este CI tem a capacidade de operar com os valores de tensão e corrente determinados nos testes. Possui capacidade de mover os motores nas duas direções (frente e ré), sendo o comando dado por entradas digitais e ainda disponibiliza um sinal de saída para a medição do consumo instantâneo dos motores.

A placa foi fixada internamente no veículo, dentro da cabina, de onde suas interfaces de alimentação e acionamento do motor estão disponíveis.

O acionamento dos motores se dá através de PWM com frequência base de chaveamento de 200 Hz. Esse método possibilita o arranque e parada dos motores de forma gradativa, além de permitir a movimentação com diferentes velocidades.

O direcionamento do veículo é realizado por um servo-motor acoplado ao eixo de direção, abaixo do capô dianteiro. Este dispositivo é acionado por PWM, onde o tempo de duração do ciclo em alta da onda (*duty cycle*) determina o ângulo de posicionamento do dispositivo. Nominalmente o servo-motor tem uma liberdade de 180°, e os tempos de *duty cycle* para direcionamento em 0° e 180° são, respectivamente, 1 ms e 2 ms. Foi utilizado o servo-motor modelo S148 fabricado pela empresa Futaba (<http://www.futaba-rc.com>). Testes em bancada mostraram que os valores de tempo de *duty cycle* para direcionamento em 0° e 180° foram, respectivamente, 800µs e 2400µs. Em função do acoplamento mecânico, o ângulo

de direcionamento das rodas é alcançado em seus valores máximos para esquerda e direita (-27° e 27°) com, respectivamente, os valores de 20° ($980\mu\text{s}$) e 150° ($2130\mu\text{s}$) do servo-motor, considerando-se 90° ($1600\mu\text{s}$) para as rodas em direção reta.

Decidiu-se não utilizar o direcionamento do veículo com ângulo variável, de forma que as rodas sempre são viradas no ângulo máximo possível (-27° e 27°) para a realização de manobras. Essa decisão se deu pelo fato da complexidade que deveria ser aplicada ao projeto para se obter tal nível de controle do direcionamento, o que acarretaria em maior tempo de execução de projeto e também em função do acoplamento mecânico do eixo de direção que possui folga de atuação, impedindo que o ângulo de curvatura da roda fosse mensurado apenas em função da própria posição do servo-motor que o controla, sendo necessária a aplicação de sensores para tal.

Os módulos de *software* que compõem o Sistema de Mobilidade são:

- MÓDULO DE MOBILIDADE: Responsável por receber os comandos de movimento e manobra a serem executados e acionar os módulos correspondentes;
- MÓDULO DE DIREÇÃO: Responsável por direcionar as rodas dianteiras do veículo, através do controle do servo-motor aplicado para tal propósito.
- MÓDULO DE TRAÇÃO: Responsável por controlar os motores de tração do veículo.

Os Sistema de Mobilidade é capaz de executar os seguintes comandos, que refletem os 7 movimentos básicos que o veículo pode realizar:

- PARAR;
- AVANÇAR;
- AVANÇAR A DIREITA;
- AVANÇAR A ESQUERDA;
- RECUAR;
- RECUAR A DIREITA;
- RECUAR A ESQUERDA;

Os comandos são enviados pelo Sistema de Navegação, provindos do operador da EMI, quando em modo REMOTO ou da inteligência embarcada, quando em modo AUTONOMO.

3.7. SISTEMA DE SENSORIAMENTO

Este sistema é responsável por realizar o sensoriamento do ambiente navegado. No presente projeto, esta atividade se dá com o intuito de evitar colisões, valendo-se de sensores capazes de detectar obstáculos e medir a distância até estes. Portanto, o sensoriamento aplicado deverá ter a capacidade de mensurar distâncias suficientes para que o veículo possa parar antes de atingir o obstáculo, conforme será abordado adiante.

Embora com poucas opções de custo acessível no mercado, sensores com capacidade de medir distância e com pequenas dimensões predominantemente utilizam métodos de medição a partir de ultra-som e infravermelho. As duas técnicas são boas soluções diante das necessidades deste projeto, no entanto, os sistemas que se utilizam do infravermelho, por se tratarem de sensores óticos, têm sua capacidade de medição prejudicada com a presença de sujeira, óleo e água, sendo considerados inadequados para uso externo em um veículo. Por este motivo a aplicação deste tipo de sensor foi descartada, uma vez que o veículo trafegará em ambiente aberto e exposto ao tempo.

Os sensores ultra-som são menos suscetíveis a prejuízos na medição, oriundos dos problemas que sensores óticos apresentam, haja vista sua utilização nos sensores de estacionamento de veículos comerciais e também em projetos de robótica. Dessa forma, foi o tipo de sensor adotado para integrar o Sistema de Sensoriamento.

A tecnologia de ultra-som, há muito tempo difundida no mercado, tem um funcionamento simples: Ondas sonoras na frequência de ultra-som (acima de 20.000 Hz) são emitidas. Ao encontrar obstáculos, as ondas refletem e parte retorna. Um detector recebe a onda refletida e, baseado no tempo de percurso da onda e velocidade de propagação, calcula a distância até o objeto. Entretanto, a velocidade de propagação do som não é constante e varia em função do meio em que se

propaga e também da temperatura deste meio. A tabela 4 apresenta valores de velocidade de propagação do som no ar para diferentes temperaturas.

Tabela 4 - Velocidade do som no ar em função da temperatura
(Adaptado de <http://www.sengpielaudio.com/calculator-speedsound.htm>)

Temperatura (C°)	Velocidade (m/s)
-10	325,16
-5	328,24
0	331,30
5	334,33
10	337,33
15	340,31
20	343,26
25	346,18
30	349,08

Foi escolhido e adquirido o sensor modelo LV-MaxSonar-EZ1 (figura 30) fabricado pela empresa MaxBotix (<http://www.maxbotix.com>).



Figura 30 – Sensor LV-MaxSonar-EZ1

(Fonte: <http://www.maxbotix.com/uploads/LV-MaxSonar-EZ1-Datasheet.pdf> - Abr. 2010)

Existem sensores empregáveis no projeto com custos menores, mas o sensor escolhido tem características mais atrativas, como dimensões menores, baixo consumo, calibração automática em função da temperatura, opção entre três diferentes interfaces de captura de dados, além de realizar ele mesmo o cálculo da distância e fornecer esse valor, ao contrário de outros modelos que informam o tempo de propagação da onda e, portanto, o sistema deve realizar o cálculo.

A calibração automática da temperatura, entretanto, só é realizada cada vez que o sensor é ligado novamente, implicando nesta necessidade caso a variação de temperatura seja crítica para a mensuração de distância na aplicação utilizada, o que não ocorre no presente projeto.

A tabela 5 apresenta as características do referido sensor.

Tabela 5 - Características do sensor LV-MaxSonar-EZ1
(Adaptado de <http://www.maxbotix.com/uploads/LV-MaxSonar-EZ1-Datasheet.pdf>)

Dado	Valor	Unidade de medida	Observações
Tensão de Alimentação	2,5 a 5,5	V	-
Consumo	2	mA	-
Precisão de detecção	1	pol	1 polegada equivale a 2,54 cm
Campo de detecção de objetos	0 a 254	pol	Distâncias de 0 a 6 pol são informadas como 6 pol.
Frequência de atualização	50	ms	-
Frequência de operação	42	kHz	-
Dimensões (A x L x C)	16,4 x 19,9 x 22,1	mm	-
Interface de aquisição de dados	Comunicação serial, largura de pulso ou saída analógica.		-

O sensor adotado possui três opções de interface de comunicação: Serial, largura de pulso e saída analógica. A seguir, são descritas as características de cada uma delas.

- Comunicação Serial: Neste modo, é disponibilizada uma interface de comunicação serial (SCI) com as seguintes configurações:
 - Taxa de transmissão de dados: 9600 bps;
 - Tamanho de dado: 8 bits;
 - Não utiliza paridade;
 - 1 bit de parada;

O protocolo de comunicação utilizado é no formato ASCII (*American Standard Code for Informarion Exchange*). Toda mensagem se inicia com o caractere “R” seguido por três caracteres numéricos, que representam a distância detectada expressa em polegadas, sendo o valor máximo possível igual a 255 e é finalizada com o comando de *carriage return* (CR). Portanto, toda mensagem é composta de 5 caracteres.

- Largura de Pulso: Este modo aciona um sinal digital em formato de onda quadrada, onde o tempo de duração em nível alto da onda determina a distância medida. Cada 147 μ s equivale a 1 polegada.

- Saída Analógica: Esta interface informa a distância fazendo variar a tensão de saída em função da medida efetuada. Para se obter o valor que representa uma polegada, basta dividir o valor de tensão de entrada do sensor (V_{cc}) por 512. O sensor é alimentado com a tensão de 5 V e, portanto, o valor por polegada será $\sim 9,8$ mV.

Foi escolhida como interface de captura de dados a Saída Analógica. Essa é uma interface já disponível no microcontrolador utilizado e de fácil configuração.

Com o intuito apenas de evitar colisões, decidiu-se aplicar apenas um sensor à frente do veículo, o qual foi fixado na grade frontal do veículo, e horizontalmente no centro.

Este sistema é composto pelos seguintes módulos de *software*:

- MÓDULO DE SENSORIAMENTO: Responsável por capturar as informações do sensoriamento e repassá-las ao sistema que o solicita (no caso o Sistema de Navegação).
- MÓDULO DE ULTRA-SOM: Responsável por realizar a interface com o sensor de ultra-som, fazendo leitura dos dados sensorizados e disponibilizando-os para o Módulo de Sensoriamento;

Quando em operação, este sistema realiza a mensuração de distância a possíveis objetos e disponibiliza essa informação, a qual é lida de forma cíclica durante a operação do veículo, impedindo que o mesmo inicie ou fazendo com que cesse o movimento se houver barreira a uma determinada distância mínima.

Testes no veículo demonstraram que a distância mínima de 45 cm é suficiente para a frenagem do veículo, através do desligamento dos motores. Com esse valor o veículo parou a cerca de 5 cm do obstáculo. A distância restante de 40 cm percorrida antes de parar é consequência dos seguintes fatores:

- Tempo de verificação cíclica da distância;
- Tempo de execução do comando de parar;
- Distância que o veículo percorre por inércia após o desligamento dos motores;
- Margem de erro do sensor de ultra-som;

3.8. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

O presente sistema tem como tarefa ser um meio de comunicação sem fio do veículo com a EMI. Por esse meio trafegam todas as mensagens trocadas entre os dois agentes.

Este meio de comunicação deverá proporcionar distância máxima adequada de comunicação, para que os objetivos do projeto possam ser cumpridos. Concluiu-se que uma distância máxima de cerca de 200 metros entre veículo e EMI é satisfatória para a operação do veículo.

Estudou-se a possibilidade de se utilizar *modem* GSM para a comunicação remota do veículo. Em relação à utilização de transceptor RF, essa proposta oferece a vantagem de eliminar o limite de distância de comunicação por ele imposto, entretanto, oferece também duas desvantagens principais: 1) *Modems* GSM tem custo maior que transceptores RF e também existe o custo de operação, que é cobrado por volume de dados trafegados. 2) A estrutura necessária de *software* para controlar esse tipo de dispositivo é consideravelmente maior que a utilizada para um transceptor RF, o que elevaria o tempo de desenvolvimento.

Diante do projeto de pesquisa, a solução GSM seria uma boa opção, porém, a validação dos objetivos propostos não fica prejudicada pela utilização de transceptores RF, fazendo desta solução mais econômica e rápida. Não se descarta, entretanto, a utilização de tecnologia GSM para esta atividade.

Para realizar a comunicação foi escolhido o transceptor RF modelo Wi.232DTSB-EVM-R (figura 31) fabricado pela empresa *RadioTronix* (<http://www.radiotronix.com>) e duas unidades foram adquiridas, sendo uma para o veículo e outra para a EMI.



Figura 31 – Transceptor de radiofrequência Wi.232DTSB-EVM-R
(Fonte: <http://www.radiotronix.com> – Mar. 2009)

Devidamente certificado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), o transceptor atua na faixa de 915 Mhz, com potência máxima de transmissão de 25mW (+14 dBm) e alcance de cerca de 400 metros com linha direta de visada, conforme relata sua documentação técnica (http://www.radiotronix.com/datasheets/WI232DTS-R_um_1_5_0.pdf - Mar. 2009).

Foi construída uma placa para receber cada receptor, onde estão disponíveis as conexões para as interfaces de comunicação, controle e alimentação dos transceptores. No veículo, a placa foi fixada sobre o capô dianteiro, do lado esquerdo, e para a EMI a placa foi construída para ser colocada sobre uma superfície plana.

Sua interface de comunicação com o dispositivo que a utiliza é através de uma SCI. Esse tipo de interface é constantemente presente em microcontroladores por ser uma forma clássica de se fazer comunicação serial.

A interface entre microcontrolador e também entre EMI com o transceptor foi configurada da seguinte maneira:

- Taxa de transmissão de dados: 9600 bps;
- Tamanho do dado: 8 bits;
- Não utiliza paridade;
- Bits de parada: 1;

O formato das mensagens foi definido em um protocolo de comunicação proprietário, o qual foi criado para tal propósito. É inserido em cada mensagem um código (*checksum*) onde o agente que a recebe faz uma verificação de forma a garantir a integridade da mesma, sendo descartadas mensagens corrompidas ou incompletas. Portanto, este mecanismo não garante a entrega de mensagens, mas sim, de que toda aquela recebida é íntegra.

Conforme citado anteriormente, a EMI é MESTRE da comunicação e o veículo ESCRAVO. Assim, determinou-se que para toda mensagem válida existe uma resposta. Ser válida significa que a mensagem trafegada está corretamente estruturada segundo o protocolo de comunicação e seus dados são íntegros. Entretanto, esta mensagem pode trazer um comando desconhecido. Neste caso será retornada uma mensagem de erro sinalizando tal situação. Só não haverá resposta se a mensagem estiver corrompida ou incompleta.

3.8.1. Protocolo de Comunicação

O protocolo de comunicação entre veículo e EMI é composto de 5 mensagens (também denominadas de comandos), cada qual com uma resposta.

Os dados presentes nas mensagens estão em formato binário e sua estrutura é dividida em 5 blocos subseqüentes (tabela 6).

Tabela 6 - Estrutura das Mensagens

Iniciador de Mensagem	Quantidade de Dados	Identificador de Mensagem	Informações	<i>Checksum</i>
-----------------------	---------------------	---------------------------	-------------	-----------------

O bloco **Iniciador de Mensagem** tem o tamanho de 1 byte e é sempre o valor 0x3E (os caracteres “0x” representam uma notação hexadecimal). É usado para identificar o início de uma nova mensagem.

O bloco **Quantidade de Dados** tem o tamanho de 1 byte e seu valor representa o somatório da quantidade de bytes presentes nos blocos **Identificador de Mensagem** e **Informações**.

O bloco **Identificador de Mensagem** tem o tamanho de 1 byte e é uma identificação exclusiva de qual tipo de mensagem está sendo transmitida.

O bloco **Informações** tem tamanho variável e seus dados são as informações trafegadas na mensagem. Este é o único bloco não necessário em uma mensagem, pois em determinados casos o próprio **Identificar de Mensagem** já é suficiente.

Finalmente, o bloco **Checksum** tem o tamanho de 2 bytes e seu valor representa o resultado de um algoritmo de cálculo que envolve os bytes a partir do bloco **Quantidade de Dados** até o bloco **Informações**. Esse bloco é usado para garantir a integridade dos dados presentes na mensagem.

Abaixo são descritas as mensagens presentes no protocolo de comunicação:

- Pedido de *status*: Mensagem global utilizada para monitoramento do veículo, onde serão reportadas as seguintes informações do mesmo:
 - Estado de operação (Tabela 7):
 - Modo de operação;
 - *Status* do modo de operação;
 - Informação sobre o *status* do modo de operação;
 - Registro de data e hora do posicionamento;

- Velocidade (cm/s);
- Latitude (grau decimal);
- Longitude (grau decimal);
- Altitude Geodésica (m);
- Azimute geodésico (graus);
- Azimute magnético (graus) sem correção da declinação magnética;
- Lista de quais satélites foram usados na presente solução;
- HDOP (número inteiro arredondado);
- Número de satélites usados na solução;
- Erro estimado de posicionamento horizontal (m);
- *Status* do receptor GPS;
- Validade do posicionamento;
- Distância atual até o próximo ponto de destino (m) (válida apenas para modo AUTÔNOMO);
- Comando de movimento: Mensagem utilizada para enviar um comando de movimento para o veículo. Exceto o comando PARAR, que é global, todos os outros são exclusivos do modo de operação REMOTO.
- Comando de nova missão: Mensagem utilizada para delegar uma nova missão (conjunto de coordenadas) que o veículo deverá cumprir. Este é um comando exclusivo do modo de operação AUTÔNOMO.
- Pedido de coordenadas de chegada: Mensagem utilizada para requisitar as coordenadas utilizadas pelo Sistema de Navegação na consideração de chegada aos pontos de destino, sendo, portanto um comando exclusivo do modo AUTÔNOMO.
- Comando para troca de modo de operação: Mensagem global utilizada para selecionar um novo modo de operação, que deverá ser assumido pelo veículo.

É importante ressaltar que os valores de azimute de deslocamento (geodésico e magnético), HDOP e distância até o próximo ponto de destino estão sendo arredondados para valores inteiros, de forma que será informado o valor 1 sempre que se obtiver valores entre 0,5 e 1,4. Da mesma forma, será informado valor 2 sempre que se obtiver valores entre 1,5 e 2,4, e assim sucessivamente.

Tabela 7 - Estados de Operação do Veículo

Modo de Operação	Status	Informação
Inicial	Operando	-
Remoto	Operando	-
	Aguardando nova missão	-
Autônomo	Em Missão	Nenhum ponto alcançado
	Em Missão	Ponto P1 alcançado
	Em Missão	Ponto P2 alcançado
	Em Missão	Ponto P3 alcançado
	Em Missão	Ponto P4 alcançado
	Em Missão	Aguardando Posicionamento
	Em Missão	Aguardando Desbloqueio de Via
	Missão Cumprida	-
	Missão Abortada	Sem Posicionamento
	Missão Abortada	Via Bloqueada
Missão Abortada	Abortada pela EMI	

O Sistema de Comunicação é composto pelos seguintes módulos de *software*:

- **MÓDULO DE COMUNICAÇÃO**: Responsável por receber e enviar as informações das mensagens trafegadas. Para tanto, no ato do envio, encapsula as informações no protocolo para formar uma mensagem, disponibilizando-a para envio e, no ato da recepção, verifica a integridade da mensagem recebida e, quando íntegra, extrai suas informações, disponibilizando-as para leitura;
- **MÓDULO DE RÁDIO-FREQUÊNCIA**: Responsável por gerenciar o *hardware* do transceptor de radiofrequência e processar o envio e recepção das mensagens trafegadas entre veículo e EMI;

3.9. SISTEMA DE POSICIONAMENTO

O presente sistema tem a tarefa de mensurar a movimentação e o posicionamento do veículo em tempo real, e disponibilizar essas informações ao Sistema de Navegação. Para a realização dessa atividade está sendo utilizado posicionamento por GNSS auxiliado por bússola eletrônica.

Os sistemas GNSS, além do posicionamento, fornecem informações suficientes para o cálculo de diversos outros dados do receptor. Entre eles, está o azimute geodésico, que o próprio receptor calcula, o que só pode ser feito quando o

receptor está em movimento. Isso significa que o veículo não conhecerá o azimute para o qual sua frente está direcionada quando estiver parado. Essa carência de informação não limita a viabilidade do projeto, entretanto impõe a necessidade de começar a se mover antes de se ter conhecimento do azimute.

Para evitar esse problema, decidiu-se aplicar ao projeto uma bússola eletrônica. A informação fornecida por ela será usada quando o veículo estiver parado e auxiliá-lo quando estiver em movimento. Para esta atividade foi escolhido e adquirido o dispositivo CMPS03 (figura 32) fabricado pela empresa DevanTech (<http://www.devantech.co.uk>).

Foi construída uma placa para receber a bússola. Nela estão disponibilizadas as interfaces de comunicação e alimentação do dispositivo. A placa foi fixada sobre o capô do veículo, do lado direito. A fixação da placa foi orientada para que o seu lado de referência fosse direcionado para a frente do veículo, fazendo com que esse seja o ponto de referência da medição realizada, de forma que se a frente do veículo estiver alinhada com o norte magnético, a bússola informa o azimute de 0°.



Figura 32 – Bússola eletrônica CMPS03
(Fonte: <http://www.robot-electronics.co.uk>)

Esse dispositivo eletrônico foi especificamente desenvolvido para uso em robótica no auxílio à navegação. Ele é capaz de informar o valor do azimute magnético para o qual o seu lado de referência está apontado. A tabela 8 exhibe suas características principais.

Tabela 8 - Características da bússola eletrônica CMPS03
(Fonte: <http://www.robot-electronics.co.uk>)

Alimentação	5 V
Consumo	25 mA
Resolução	0,1 °
Acurácia	3° a 4°
Interface de Saída 1	Largura de Pulso
Interface de Saída 2	I2C
Dimensões (A x L x C)	5 mm x 32 mm x 35 mm

O microcontrolador escolhido não possui interface de comunicação I2C (*Inter-integrated circuit*), ficando como única possibilidade a utilização da interface de largura de pulso para a leitura do azimute.

Conforme documentação do fabricante (<http://www.robot-electronics.co.uk/html/cmeps3tech.htm>), o sinal de largura de pulso é digital, sendo 0V o nível baixo e 5V o nível alto. O tempo em que o sinal permanece em nível alto (pulso) representa o azimute. Esse valor varia de 1 ms (0°) até 36,99 ms (359,9°), ou seja, 100 µs por grau com 1 ms de *offset*. O sinal vai para nível baixo por 65 ms entre cada pulso.

Conforme descrito, esse dispositivo informa o azimute magnético, o qual não coincide com azimute geodésico que os sistemas GNSS informam. Portanto, é preciso compatibilizar ambos para que possam ser utilizados como referência na navegação.

O norte magnético sofre constante modificação em função da constante fusão do núcleo da Terra. A diferença entre esses dois nortes é chamada de declinação magnética. Adicionalmente, esse valor também difere dependendo do lugar na superfície terrestre em que o observador se encontra. Na prática, para se conhecer o valor da declinação magnética, é necessário saber qual o local e data desejados.

O Observatório Nacional disponibiliza gratuitamente um serviço chamado “Cálculo da Declinação Magnética (modelo da IGRF-11 – *International Geomagnetic Reference Field*)”, que pode ser utilizado acessando-se o seguinte endereço eletrônico: (<http://obsn3.on.br/~jlk/magdec/index.html>).

Após indicar a localidade e o ano desejados, o serviço informa, para todos os dias do ano, os valores de declinação magnética, entre outros. Os testes do veículo foram realizados no mês de janeiro de 2011 no município de São Paulo - SP. A tabela com os valores para o mês e para o local indicado pode ser vista no anexo A.

O valor da declinação magnética para o dia de testes foi de $-20,51^\circ$. Esse foi o valor utilizado na correção do valor indicado pela bússola eletrônica.

Para realização do posicionamento escolheu-se o receptor GPS modelo A-1080 (figura 33) fabricado e doado pela empresa *Vincotech* (<http://www.vincotech.com>) já em uma placa com as interfaces de comunicação e alimentação disponíveis, além de uma antena externa ativa. Trata-se de uma placa de avaliação.



Figura 33 – Placa de avaliação com receptor GPS Vincotech A1080
(Fonte: <http://www.vincotech.com>)

Este receptor é muito utilizado na indústria de navegadores e rastreadores veiculares por possuir baixo consumo, pequenas dimensões e bom desempenho. Outro recurso interessante é a entrada auxiliar de fonte de energia de *backup*, a qual permite fazer o receptor entrar em modo de *standby* (baixo consumo sem realização de posicionamento) sem perder os dados de efemérides e almanaque, o que possibilita uma inicialização *hot start* quando ativado novamente. Portanto, é uma solução bastante completa. Mais detalhes do dispositivo podem ser vistos na tabela 9.

Tabela 9 - Características do receptor GPS A1035-H
(Adaptado de <http://download.vincotech.com/positioning/documents/GPS%20Receiver%20A1080%20V4.0.pdf> – Dez. 2010)

Sistema de Referência	WGS84	-
Canais	20	Rastreo em paralelo.
Correlacionadores	200.000	-
Frequência	L1	1575 Mhz
Sensibilidade de Rastreo	-159 dBm	-
Acurácia de posicionamento 3D	< 10 m CEP	SA desabilitado.
Acurácia de posicionamento horizontal	< 2,5 m CEP	SA desabilitado.
<i>Time to First Fix</i> (TTFF)	Recuperação após obscurecimento	0,1 s
	<i>Hot Start</i>	< 1 s
	<i>Warm Start</i>	< 32 s
	<i>Cold Start</i>	< 35 s
Dimensões	Comprimento	19 mm
	Largura	16,2 mm
	Altura	5 mm
Alimentação	3,3 V	-
Consumo	<i>Standby</i>	20 µA
	Pico de Aquisição	52 mA
	Média de Aquisição	36 mA
	Rastreo	31 mA

Valores teóricos para condições ideais.

Este receptor comunica-se com o microcontrolador através de uma interface SCI, cuja configuração é:

- Taxa de transmissão de dados: 4800 bps;
- Tamanho de dado: 8 bits;
- Não utiliza paridade;
- Bits de parada: 1;

O dispositivo disponibiliza dois protocolos de comunicação distintos.

O primeiro deles é o padrão do dispositivo, ou seja, é o protocolo assumido caso não seja feita nenhuma configuração. Este protocolo é baseado no padrão NMEA 0183 (*National Marine Eletronics Association*), o qual é mundialmente usado para receptores GNSS. Nele, o formato dos dados é no padrão ASCII onde os dados são codificados em caracteres do alfabeto inglês.

A outra opção de protocolo é o *Sirf Binary Protocol* (www.usglobalsat.com/downloads/SiRF_Binary_Protocol.pdf - Mar. 2009). Trata-se de um protocolo proprietário, onde o formato dos seus dados é no padrão binário. Nele existe uma disponibilidade maior de informações e também o uso de recursos úteis criados pelo fabricante. Abaixo são listados alguns mais relevantes:

- *DOP Mask Control*: Este recurso é usado para restringir o uso de soluções quando o valor DOP é maior que o desejado. Dessa forma, soluções com um valor DOP maior que o limite estabelecido são consideradas inválidas. Quando não configurado assume o valor 8 como padrão.
- *Elevation Mask*: A menos que o ângulo de elevação de um determinado satélite seja maior que o valor especificado, este satélite não será usado na solução. Quando não configurado assume o valor de 5º como padrão.
- *Power Mask*: Recurso usado para estabelecer um limite no qual as observáveis dos satélites serão usadas na solução, em função do nível de sinal-ruído (*carrier-to-noise*). Satélites com sinal de valor menor que o valor especificado não são usados. Quando não configurado assume o valor de 28 dB-Hz como padrão.
- *Static Navigation*: Este recurso é um filtro de posicionamento designado para ser utilizado em aplicações para veículos motorizados. Quando a velocidade do veículo for menor que um determinado limite, o posicionamento e direção são congelados no valor atual e a velocidade assumida como zero. Essa condição permanece até que a velocidade calculada seja 20% maior que o limite estabelecido ou até que o posicionamento calculado esteja a uma dada distância do ponto de congelamento. Esses valores limites podem variar de acordo com a versão de *software* do receptor. Para o utilizado no projeto, os valores são:
 - Limite de velocidade: ~3 km/h.
 - Limite de distância: ~50 m.

Quando não configurado, este recurso é desabilitado por padrão.

- *Set Message Rate*: Recurso utilizado para especificar quais mensagens serão automaticamente enviadas pelo receptor em um intervalo de tempo desejado. A taxa mínima e máxima de envio são, respectivamente, 1s e 30s. Se o

usuário desejar, esse recurso pode ser utilizado para fazer uma requisição única de uma mensagem desejada.

Inicialmente pretendia-se utilizar apenas o recurso *Static Navigation*, entretanto, testes demonstraram que ele não é funcional para o veículo. Foram realizados dois testes onde em ambos o veículo passou do ponto de destino e navegou por mais de 20 m além, até que a missão fosse abortada.

Pelo fato de o veículo navegar a uma velocidade de 2,2 km/h e o posicionamento possuir acurácia horizontal de 2,5 m, utilizar o *Static Navigation* prejudicou a navegação, pois como apresentado anteriormente, ao utilizar esse recurso, a posição informada é congelada quando a velocidade é menor do que 3 km/h e um valor diferente de posicionamento só será fornecido pelo receptor GPS quando a velocidade for maior que 3 km/h ou a distância percorrida for maior do que 50 m do ponto de congelamento, o que faria com que o veículo raramente conseguisse fazer uso da melhor acurácia fornecida pelo receptor.

O formato de dados que este protocolo faz uso, apresenta a vantagem de consumir menos *bytes* por informação, diminuindo o espaço ocupado em memória e o tempo de transmissão, e ainda exigindo menos processamento na manipulação e utilização da informação para a execução de cálculos. Isso se deve ao fato de os dados estarem em formato compreensível pelos processadores (binário) ao invés de um formato compreensível pelo ser humano (ASCII). Como exemplo, um valor de longitude em formato ASCII ocupa 10 bytes, enquanto que em formato binário ocupa apenas 4 bytes.

Apesar de não ser um padrão mundial, mas pela sua flexibilidade e vantagens expostas, decidiu-se utilizar o *Sirf Binary Protocol* para a comunicação com o receptor GPS.

Para diagnóstico visual sobre o posicionamento e configuração do receptor GPS, é acionado um diodo emissor de luz (LED – *Light Emitting Diode*) vermelho na placa processadora. O comportamento do LED foi determinado para que se possa verificar visualmente e rapidamente se o receptor GPS foi configurado corretamente e ainda se veículo tem posicionamento GPS válido. Caso o veículo não seja visível, essa informação está também presente nas mensagens de Pedido de *Status* apresentadas no Protocolo de Comunicação (item 3.8.1).

O comportamento do LED foi especificado de forma que permanece apagado por 1 segundo e após esse tempo, pisca em intervalos de 300 ms. A quantidade de vezes que pisca determina o estado do receptor e sinal GPS.

Quando piscar três vezes, significa que o Sistema de Posicionamento ainda não terminou (ou não conseguiu) realizar as configurações de operação no receptor.

Ao piscar duas vezes, significa que o receptor foi corretamente configurado para operar, no entanto, ainda não conseguiu gerar uma solução de posicionamento. Esse caso ocorre também sempre que o sinal dos satélites é perdido, temporariamente ou não.

E ao piscar apenas uma vez, significa que o receptor está configurado e calculando posicionamento corretamente. Naturalmente, quando o veículo estiver em operação, este deve ser o comportamento predominante.

A placa do receptor foi fixada na caçamba do veículo e a antena, acima da bateria, local este, mais alto e com melhor visibilidade para os satélites.

O Sistema de Posicionamento é composto pelos seguintes módulos:

- MÓDULO DE POSICIONAMENTO: Responsável por concentrar e disponibilizar para consulta os dados de posicionamento do veículo;
- MÓDULO GPS: Responsável por controlar o receptor GPS e extrair de suas mensagens as informações de posicionamento;
- MÓDULO DE BÚSSOLA ELETRÔNICA: Responsável por controlar a bússola, fazer a captura do azimute magnético e aplicar a correção da declinação magnética;

Ao inicializar, o presente sistema, realiza a configuração de operação do receptor GPS, onde são determinadas as mensagens de navegação que o sistema deseja receber e a frequência de envio delas. Estão sendo utilizadas as seguintes mensagens:

- *Geodetic Navigation Data – Message ID 41*: Recebida a cada 1 segundo, essa mensagem traz todos os dados de posicionamento e navegação GPS;
- *Software Version String – Message ID 6*: Recebida a cada inicialização do sistema, essa mensagem informa qual a versão de *software* atual do receptor GPS;

O Anexo B apresenta o conteúdo total das mensagens citadas, extraídas do *Sirf Binary Protocol*.

Uma vez configurado, o receptor inicia a transmissão das mensagens com a frequência estabelecida e da mesma forma, a bússola eletrônica inicia a mensuração do azimute magnético.

Todos os dados de interesse são coletados e disponibilizados em local de memória compartilhada, onde o Sistema de Navegação os consulta.

3.10. SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

Este é o principal sistema do projeto, onde foram desenvolvidos todos os algoritmos de controle, que determinam o comportamento do veículo.

O Sistema de Navegação é o agente que toma as decisões e executa as ações, baseado nos comandos recebidos e na interação com os outros sistemas. Os outros sistemas que compõem o projeto atuam como fornecedores de serviço e informação, enquanto esse faz o papel de cliente, e os utiliza para cumprir o comando desejado. Portanto, deve ter acesso a todos os outros sistemas principais para realizar interação com eles.

É um sistema exclusivamente de *software*, composto apenas pelo MÓDULO DE NAVEGAÇÃO.

Seu comportamento está relacionado ao modo de operação do veículo, que pode ser INICIAL, REMOTO ou AUTÔNOMO, os quais são abordados a seguir.

3.10.1. Modo INICIAL

Este modo de operação é executado sempre que o veículo é ligado. Suas atividades compreendem principalmente a inicialização dos sistemas do veículo.

São aceitos os seguintes comandos:

- Pedido de *status*;
- Comando para troca de modo de operação;
- Comando de movimento PARAR;

Qualquer outro comando é respondido com uma mensagem de erro, a qual indicia que o referido comando é inválido para o presente modo de operação. Isso inclui todos os comandos de movimento, exceto o PARAR.

Uma vez que troca-se de modo de operação, este não voltará a ser executado até que o veículo seja desligado e ligado novamente (figura 21).

No Apêndice A pode ser consultado o fluxograma que detalha o comportamento deste modo de operação.

3.10.2. Modo REMOTO

Este modo de operação foi designado para que o veículo possa ser remotamente controlado por um operador humano através da EMI.

Neste modo são aceitos os seguintes comandos:

- Pedido de *status*;
- Comando para troca de modo de operação;
- Comando de movimento;

Os comandos são aceitos a qualquer momento, independente se o veículo está ou não em movimento. Qualquer outro comando é respondido com uma mensagem de erro, a qual indicia que o referido comando é inválido para o presente modo de operação.

Ao receber comandos de movimento, o veículo executa o movimento requerido, mas apenas pelo tempo de 600ms, exceto, obviamente, para o comando PARAR. Expirado esse tempo, um comando de PARAR é automaticamente executado para cessar o movimento do veículo. Isso obriga o operador a reenviar o comando desejado antes que o tempo expire, sempre que desejar dar continuidade ou a troca instantânea de movimento. Na prática, o operador escolhe o movimento e a EMI se encarrega de fazer o reenvio periódico enquanto o comando desejado estiver acionado.

O tempo especificado foi determinado após testes em laboratório, onde constatou-se ser um tempo ideal para atender ao comportamento desejado, o qual, foi adotado como medida de segurança, para que um possível problema no enlace

de comunicação não fizesse com que o veículo se mantivesse em movimento por um tempo maior que o desejado ou ainda de forma permanente, podendo causar acidentes.

Adicionalmente o sistema verifica a presença de obstáculo de duas maneiras distintas. Em um primeiro momento, sempre que um comando para avançar é recebido, impedindo o veículo de se movimentar se houver obstáculo. Nesse caso o comando não é executado e um erro é retornado à EMI. Em um segundo momento, após o início do movimento, o sistema verifica os sensores a cada 100 ms, cessando o movimento quando houver obstáculo.

No Apêndice A pode ser consultado o fluxograma que detalha o comportamento deste modo de operação.

3.10.3. Modo AUTÔNOMO

Este é o principal modo de operação do veículo, onde está presente a capacidade necessária para fazer o veículo alcançar pontos com coordenadas conhecidas de forma autônoma.

Neste modo são aceitos os seguintes comandos:

- Pedido de *status*;
- Comando para troca de modo de operação;
- Comando de movimento PARAR;
- Pedido de coordenadas de chegada;
- Comando de nova missão;

Os comandos são aceitos a qualquer momento, independente se o veículo está em missão ou não. Qualquer outro comando é respondido com uma mensagem de erro, a qual indica que o referido comando é inválido para o presente modo de operação.

Uma missão é composta por um conjunto de pontos com coordenadas conhecidas que o veículo deve atingir. São no máximo cinco pontos que devem ser alcançados na ordem em que estão presentes no comando de nova missão. As

coordenadas de cada ponto são pares latitude/longitude geodésicas expressas em graus decimais e referidas ao referencial WGS84, o qual é utilizado pelo GPS.

Neste modo de operação o veículo pode assumir diversos estados, os quais são listados na tabela 7 e descritos a seguir:

- Aguardando nova missão: É o estado assumido quando o veículo entra no modo de operação autônomo. Neste momento o veículo encontra-se parado e aguardando uma nova missão;
- Em missão – Nenhum ponto alcançado: Após receber uma missão, o veículo inicia a busca do primeiro ponto a ser alcançado, momento em que permanece neste estado;
- Em missão – Ponto P1 alcançado: O veículo assume este estado quando há mais de um ponto na atual missão, e este momento representa que o mesmo já atingiu o primeiro ponto e agora está buscando o segundo;
- Em missão – Ponto P2 alcançado: O veículo assume este estado quando há mais de dois pontos na atual missão, e este momento representa que o mesmo já atingiu o segundo ponto e agora está buscando o terceiro;
- Em missão – Ponto P3 alcançado: O veículo assume este estado quando há mais de três pontos na atual missão, e este momento representa que o mesmo já atingiu o terceiro ponto e agora está buscando o quarto;
- Em missão – Ponto P4 alcançado: O veículo assume este estado quando há cinco pontos na atual missão, e este momento representa que o mesmo já atingiu o quarto ponto e agora está buscando o quinto e último;
- Em missão – Aguardando posicionamento: Este estado é assumido quando, durante uma missão, o veículo perde o posicionamento;
- Em missão – Aguardando desbloqueio da via: Este estado é assumido quando, durante uma missão, o veículo encontra um obstáculo no caminho;
- Missão Cumprida: Estado assumido quando o último ponto da atual missão é atingido com sucesso;
- Missão Abortada – Sem posicionamento: Estado assumido quando uma missão é abortada por falta de posicionamento por período superior a 2 minutos;

- Missão Abortada – Via bloqueada: Estado assumido quando uma missão é abortada por bloqueio na via por período de 40 segundos;
- Missão Abortada – Abortada pela EMI: Estado assumido quando a EMI envia um comando que implica no cancelamento da missão atual;

Ao receber uma nova missão, a primeira etapa é a verificação da mesma. Foram definidas condições de validação que devem garantir, a partir dos recursos disponíveis no veículo, que é possível iniciar imediatamente a missão requerida. As condições são as seguintes:

- Ter posicionamento GPS válido;
- Não haver nenhum obstáculo presente;
- Nenhum dos pontos da missão pode estar a uma distância maior que 200 m do ponto inicial;

O último item foi determinado para garantir que o veículo não sairá de um raio de cerca de 200 m do ponto de partida. Esse valor foi adotado em função do tempo de missão, que poderia se tornar longo demais para raios de atuação maiores que esse, e também para que o veículo não trafegue para distâncias desnecessariamente grandes, pois entende-se que os objetivos do presente trabalho podem ser validados dentro deste limite de distância.

Se uma dessas condições não for atendida no momento de recepção do comando, o veículo retornará à EMI uma resposta de erro informando a condição inválida.

Uma vez aceita a missão, uma resposta de confirmação é enviada à EMI e inicia-se imediatamente sua execução.

Nesse momento, o Sistema de Navegação inicia a execução cíclica do algoritmo de missão, que consiste em realizar as três atividades básicas descritas a seguir:

- Verificação das condições de navegação;
- Navegação no sentido do ponto de destino; e
- Determinação de chegada a um ponto de destino;

No Apêndice A podem ser consultados os fluxogramas que detalham o comportamento deste modo de operação.

As atividades deste algoritmo serão abordadas adiante, mas antes, é necessário fazer algumas considerações.

O método de navegação autônoma desenvolvido neste projeto é baseado no conhecimento das coordenadas geodésicas dos pontos de destino e atual do veículo. A partir destas informações, a distância e o azimute de destino são calculados a uma frequência pré-estabelecida durante o deslocamento do veículo, a qual pode variar de 200ms a 400ms. A cada instante, o veículo corrige sua direção e verifica a distância que está do ponto de destino.

Considerou-se, inicialmente, três diferentes métodos de se realizar os cálculos necessários.

O primeiro trataria esta questão como o problema inverso da Geodésia, cujos cálculos são conduzidos sobre o elipsóide de revolução, onde as equações são mais complexas devido à necessidade de se realizar aproximações e desenvolvimento em série (BLITZKOW et al., 2007). Em Vincenty (1975), são descritas as equações do problema inverso da Geodésia que podem ser aplicadas nesse caso.

O segundo método seria considerar a Terra como um objeto esférico para a realização dos cálculos, onde as equações são mais simples, como demonstrado em Sinnott (1984).

E o terceiro seria considerar uma superfície plana, convertendo as coordenadas geodésicas para um plano topográfico local, e então aplicando equações básicas de trigonometria.

Para o presente projeto, foi escolhido o segundo método em função da maior simplicidade de aplicação do mesmo, e ainda por oferecer solução com qualidade satisfatória para os objetivos pretendidos. Nos itens 3.10.3.2 e 3.10.3.3 esta decisão será descrita com mais detalhes e o método apresentado em maior profundidade.

3.10.3.1. Verificação das Condições de Navegação

Esta atividade encarrega-se de verificar se o posicionamento GPS é válido e se não há obstáculo à frente do veículo.

Quando não houver posicionamento válido, o veículo será parado (através de comando para o Sistema de Mobilidade) e o sistema aguardará por até 2 minutos pela volta do posicionamento. Nesse momento, o veículo assume o estado “Em missão – Aguardando posicionamento” e verifica o posicionamento a cada 5 segundos. Se o tempo acabar e não houver posicionamento, a missão é abortada e assumi-se o estado “Missão abortada – Sem posicionamento”.

Quando houver obstáculo na via, o veículo será parado (através de comando para o Sistema de Mobilidade) e o sistema aguardará por até 40 segundos pela desobstrução da via. Nesse momento, o veículo assume o estado “Em missão – Aguardando desbloqueio da via” e verifica os sensores a cada segundo. Se o tempo de espera se esgotar e a via permanecer obstruída a missão é abortada e assume-se o estado “Missão abortada – Via bloqueada”.

Não havendo problemas, ou na extinção deles dentro do tempo de espera, é retomada a missão e (re)assumido o estado que representa o seu momento atual, podendo ser:

- Em missão – Nenhum ponto alcançado;
- Em missão – Ponto P1 alcançado;
- Em missão – Ponto P2 alcançado;
- Em missão – Ponto P3 alcançado;
- Em missão – Ponto P4 alcançado;

3.10.3.2. Navegação no Sentido do Ponto de Destino

Esta atividade tem a atribuição de alinhar o eixo longitudinal do veículo com o ponto de destino e navegar no seu sentido. Para tanto, é necessário conhecer duas informações:

1. O azimute de destino que o veículo deve assumir para se chegar ao ponto de destino;
2. O azimute para o qual a frente do veículo está direcionada;

O azimute de destino (θ_1) deve ser entendido como o azimute a partir do ponto atual do veículo até o ponto de destino. Para conhecê-lo, basta aplicar a equação a seguir:

$$\theta_1 = 2 \arctan\left(\frac{y}{\sqrt{(x^2 + y^2)} + x}\right) \quad (13)$$

com:

$$x = \cos(lat1) \times \sin(lat2) - \sin(lat1) \times \cos(lat2) \times \cos(\Delta long)$$

$$y = \sin(\Delta long) \times \cos(lat2)$$

onde:

$lat1$: Latitude, em radianos, do ponto de origem (ponto atual do veículo).

$lat2$: Latitude, em radianos, do ponto de destino do veículo.

$\Delta long = long2 - long1$ (diferença das longitudes dos dois pontos, em radianos)

O azimute para o qual a frente do veículo está direcionada é informado tanto pelo receptor GPS quanto pela bússola eletrônica. Entretanto, quando o receptor GPS encontra-se parado, o azimute geodésico por ele informado é inválido, como resultado dos erros que os sistemas GNSS apresentam e também pelo fato de o azimute ser calculado com relação ao ponto anterior. Como a velocidade do veículo é de ~61 cm/s, considerou-se que, quando a velocidade informada pelo receptor for menor que 40 cm/s, será utilizado como azimute que a frente do veículo está direcionada, apenas o azimute magnético. Em testes efetuados no receptor, quando

o mesmo se encontra parado, os valores de velocidade estiveram sempre abaixo de 10 cm/s.

Quando a velocidade do veículo for maior que 40 cm/s, a princípio, seria utilizado apenas o azimute geodésico, porém, nessa situação, sua trajetória descrevia um caminho excessivamente irregular, variando constantemente para direita e esquerda e realizando circunferências. Esse comportamento, causado pelos erros dos sistemas GNSS, combinado à baixa velocidade do veículo, foi melhorado de forma significativa quando se relacionou o azimute magnético (corrigido da declinação magnética) ao azimute geodésico, através do cálculo de uma média entre ambos, a qual foi denominada de azimute calculado. Portanto, este azimute será assumido como sendo aquele que indica para onde a frente do veículo está direcionada em um dado momento.

Adicionalmente, a diferença entre esses os azimutes geodésico e magnético foi denominada de diferença de orientação.

É importante citar que a média entre esses dois valores não poderia ser uma média aritmética comum, pois são valores angulares em graus, que expressam o sentido de deslocamento do veículo. Como exemplo, se os valores forem 350° e 10° , a média aritmética seria 180° . Nesse caso o Sistema de Navegação entenderia que o veículo está direcionado para praticamente o lado oposto de onde ele realmente está e provocaria uma manobra incorreta, sendo então 0° a média verdadeira entre esses dois valores.

A formulação a seguir foi concebida para o cálculo do azimute calculado.

$$d_0 = \theta_{GEO} - \theta_{MAG} \quad (14)$$

$$d_1 = |d_0| \quad (15)$$

$$m = \left(\frac{\theta_{GEO} + \theta_{MAG}}{2} \right) \quad (16)$$

Se $d_1 > 180$

Então:

$$\theta_2 = MOD((m + 180), 360) \quad (17)^{13}$$

Senão:

$$\theta_2 = m \quad (18)$$

onde:

θ_{GEO} : Azimute geodésico (informado pelo receptor GPS).

θ_{MAG} : Azimute magnético (informado pela bússola eletrônica e corrigido da declinação magnética).

θ_2 : Azimute calculado (média entre os dois azimutes).

Os azimutes geodésico, magnético e calculado estão sendo computados como números inteiros em graus e arredondados. O receptor GPS e a bússola magnética informam os valores com precisão maior, entretanto, o arredondamento se dá pela não necessidade de se trabalhar com precisão de décimo de grau ou melhor, pois a velocidade angular do veículo é aproximadamente de 75 graus/segundo. Adicionalmente, o posicionamento absoluto utilizado no projeto não oferece precisão suficiente para que seja necessário navegar no sentido do ponto de destino com tamanha precisão.

Uma vez conhecido o azimute que o veículo deve assumir para chegar ao ponto de destino (θ_1 - azimute de destino) e o azimute para o qual a frente do veículo está direcionada (θ_2 - azimute calculado), pode-se determinar se o veículo está corretamente direcionado para o ponto de destino e, caso contrário, corrigir o direcionamento.

Essa verificação é dada pela diferença entre os azimutes de destino (θ_1) e calculado (θ_2), podendo ser $\Delta\theta_A$ ou $\Delta\theta_B$ (Figura 34). O veículo, portanto, está no vértice deste ângulo, com sua frente direcionada para θ_2 , com o objetivo de seguir na direção de θ_1 e distante deste de $\Delta\theta_A$ ou $\Delta\theta_B$ graus.

¹³ A função MOD na equação retorna o valor do resto da divisão de $(m+180)$ por 360.

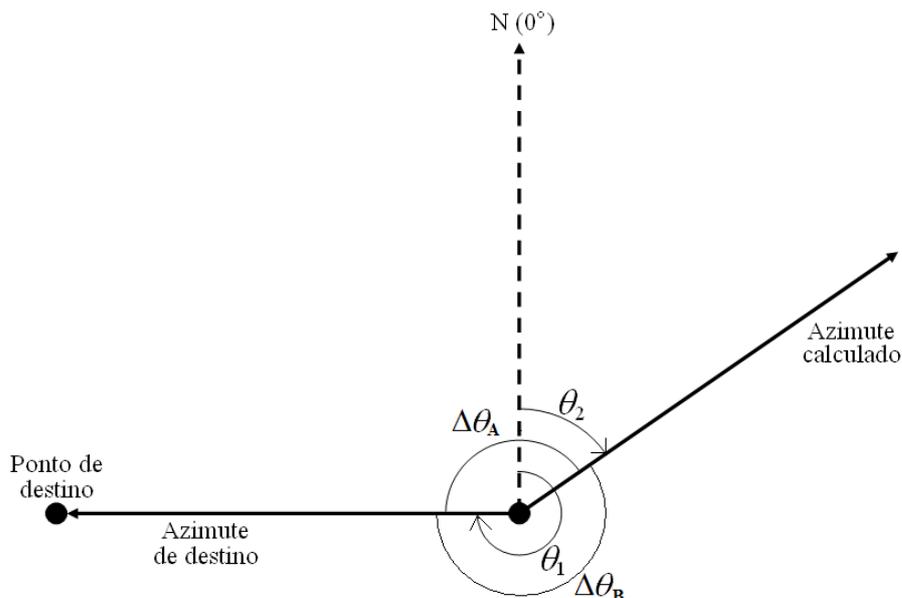


Figura 34 – Azimutes de destino, calculado e diferenças angulares entre eles
(Fonte: O autor)

A soma entre $\Delta\theta_A$ e $\Delta\theta_B$ sempre será 360° , portanto, sempre que esses valores forem diferentes entre si, um será maior e outro menor que 180° . Para que o veículo percorra a menor distância possível, é necessário que ele manobre para o lado cuja diferença é a menor, ou seja, para o lado cuja diferença entre θ_1 e θ_2 é menor ou igual a 180° . Essa diferença foi denominada de diferença angular ($\Delta\theta$).

Para se obter $\Delta\theta$, dentro dos critérios estabelecidos, a seguinte formulação é aplicada:

$$d_2 = \theta_1 - \theta_2 \quad (19)$$

$$d_3 = |d_2| \quad (20)$$

Se $d_3 > 180$

Então:

$$\Delta\theta = 360 - d_3 \quad (21)$$

Senão:

$$\Delta\theta = d_3 \quad (22)$$

Agora pode-se determinar quando o veículo trafegará em linha reta e quando o mesmo deverá realizar curvas para deslocar-se no sentido do ponto de destino.

As rodas de direção serão alinhadas em linha reta sempre que $\Delta\theta$ for menor do que 20° . Esse valor foi determinado após testes com o veículo, onde o objetivo foi minimizar a incidência de sinuosidade sem prejudicar a chegada ao ponto de destino.

Quando $\Delta\theta$ for maior que o valor apresentado, o veículo deverá realizar uma curva, cujo critério a seguir é utilizado para a escolha do lado.

As rodas serão viradas para a direita quando:

- $d_3 > 180$ e $d_2 < 0$; ou
- $d_3 \leq 180$ e $d_2 > 0$;

E serão viradas para a esquerda quando:

- $d_3 > 180$ e $d_2 > 0$; ou
- $d_3 \leq 180$ e $d_2 < 0$;

Dessa forma, garante-se que o veículo sempre irá virar para o lado cuja diferença angular for a menor.

A última tarefa a se realizar é acionar o Sistema de Mobilidade com o movimento desejado.

3.10.3.3. Determinação de Chegada a Um Ponto

Esta atividade tem a função de determinar quando um ponto de destino foi alcançado.

Atingir efetivamente um determinado ponto é uma questão intimamente relacionada à acurácia fornecida pelo método de posicionamento.

Sabe-se que a acurácia oferecida pelo posicionamento absoluto não é suficiente para a navegação de um veículo autônomo em ambiente urbano. A margem de erro deste método possibilitaria ao veículo extrapolar os limites da faixa de uma via e provocar um acidente. Entretanto, estuda-se aqui a capacidade do veículo em atingir um ponto determinado, habilidade esta, que é a mais fundamental

na autonomia e independe da acurácia do posicionamento, pois, para qualquer uma, o mesmo problema deverá ser solucionado, ou seja: Quando considerar que o veículo atingiu o ponto desejado?

Por limitações, principalmente de orçamento e tempo de projeto, não se utilizou de método de posicionamento com acurácia igual ou menor que um metro, valor este considerado adequado para tal aplicação. Dessa forma, optou-se por utilizar posicionamento absoluto com a convicção de que, para qualquer margem de erro do método de posicionamento utilizado, desde que esta seja conhecida, os mesmos critérios deverão ser utilizados para se determinar a chegada ao ponto de destino.

O receptor GPS utilizado realiza a estimativa de erro horizontal de cada posicionamento por ele informado. Este valor, fornecido em metros, corresponde à acurácia estimada que tem-se para o momento do posicionamento. Isso significa que esse valor é dinâmico, e varia em função da qualidade obtida do posicionamento, portanto, é uma informação que deve ser coletada no momento em que se deseja utilizá-la. A disponibilidade dessa informação é a mesma que a disponibilidade de uma nova solução de posicionamento do receptor, a qual é, no mínimo, a cada 1 segundo. O método utilizado pelo receptor para obter esta estimativa é desconhecido, pois não se encontra descrito na documentação do dispositivo.

Como a verificação da chegada a um ponto de destino é uma atividade cíclica, é importante que o tempo entre cada verificação não exceda 1 segundo, para que a determinação de chegada ao ponto de destino seja tão rápida quando a taxa de atualização de coordenadas do receptor GPS.

A conclusão de chegada a um ponto se dá quando a distância calculada entre o ponto atual do veículo e o ponto de destino for menor ou igual à margem de erro de posicionamento horizontal obtida naquele momento.

Quando atingido um ponto de destino, o veículo assume o estado que representa a chegada ao ponto atual ou, se este for o último ponto a ser alcançado, o movimento é cessado permanentemente e assume-se o estado “Missão Cumprida”.

Para o cálculo da distância, a formulação adotada foi aquela na qual a Terra é considerada um objeto esférico, conforme já relatado. Essa escolha se deu pelo motivo de a formulação ser mais simples do que as outras duas consideradas. Os

erros inerentes por se considerar a Terra esférica tornam-se insignificantes diante do fato de o cálculo ser executado de forma cíclica e para distâncias pequenas, que, para o presente projeto, não serão consideradas quando maior que 200 m. Adicionalmente, devido à qualidade das coordenadas oriundas do posicionamento absoluto, a formulação adotada foi testada para distância mínima de 1 metro. Da mesma forma, o melhor erro de posicionamento horizontal que o receptor utilizado pode informar é de 1 metro. Por esse motivo, optou-se por utilizar as distâncias sempre em valores inteiros de metro arredondado. Como exemplo, valores até 0,49 metros são considerados 0 metros, valores de 0,5 até 1,49 metros são considerados 1 metro, e assim sucessivamente.

Para o cálculo da distância entre dois pontos, inicialmente foi escolhida a equação dada pela lei esféricas dos cossenos (eq. 23). Porém, testes para a distância mínima de 1 metro mostraram erros de cálculo para distâncias dessa grandeza quando variada apenas a longitude. Ou seja, para dois pontos distintos, que estão na mesma latitude e distantes 1 metro na longitude, os resultados apresentados por essa equação foram extremamente grandes, fruto da precisão máxima atingida pelo sistema computacional utilizado, a qual não é suficiente para cálculos dessa grandeza, e que acaba corrompendo os valores calculados. Esses resultados impossibilitaram a utilização de tal equação, entretanto, a mesma é funcional, mas não no sistema computacional utilizado no presente trabalho. A aplicação desta mesma equação no aplicativo *Excel*, por exemplo, gerou resultados corretos.

$$D = a \cos(\sin(lat1) \times \sin(lat2) + \cos(lat1) \times \cos(lat2) \times \cos(\Delta long)) \times R \quad (23)$$

onde:

R = Raio da esfera (6.378.137 m)

$\Delta long = long2 - long1$ (radianos)

Adotou-se então, uma formulação chamada de *Haversine Formula*, a qual foi capaz de calcular distâncias de 1 metro na longitude no sistema computacional utilizado, pois requer menor precisão computacional.

A equação é dada por Sinnott (1984) e expressa na equação a seguir:

$$D = R \times c \quad (24)$$

onde:

R = Raio da esfera (6.378.137 m)

$c = 2 \times \arctan 2\left(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}\right)$ (Distância angular em radianos entre os dois pontos)

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta lat}{2}\right) + \cos(lat1) \times \cos(lat2) \times \sin^2\left(\frac{\Delta long}{2}\right)$$

$$\Delta lat = lat2 - lat1$$

3.11. ESTRUTURA FINAL DO VEÍCULO

A estrutura final do veículo se deu com a montagem de cada sistema sobre a plataforma, conforme especificado nos tópicos que descrevem cada um. Cada sistema poderia ou não ter necessidades especiais de localização de seus componentes de *hardware*, como a antena GPS que deveria estar localizada com boa visibilidade para o céu, a bússola eletrônica que deveria estar alinhada ao eixo longitudinal do veículo, a bateria que não poderia comprometer a dinâmica do veículo e o sensor de distância que deveria estar à frente do veículo.

Os itens sem necessidades especiais de localização foram alocados em lugares internos e sobressalentes do veículo, onde nem sempre são visíveis sem que seja desmontada alguma parte do mesmo.

A estrutura final do veículo pode ser vista na Figura 35, onde estão destacados os principais componentes visíveis. A arquitetura final de *hardware* é exibida na Figura 36.

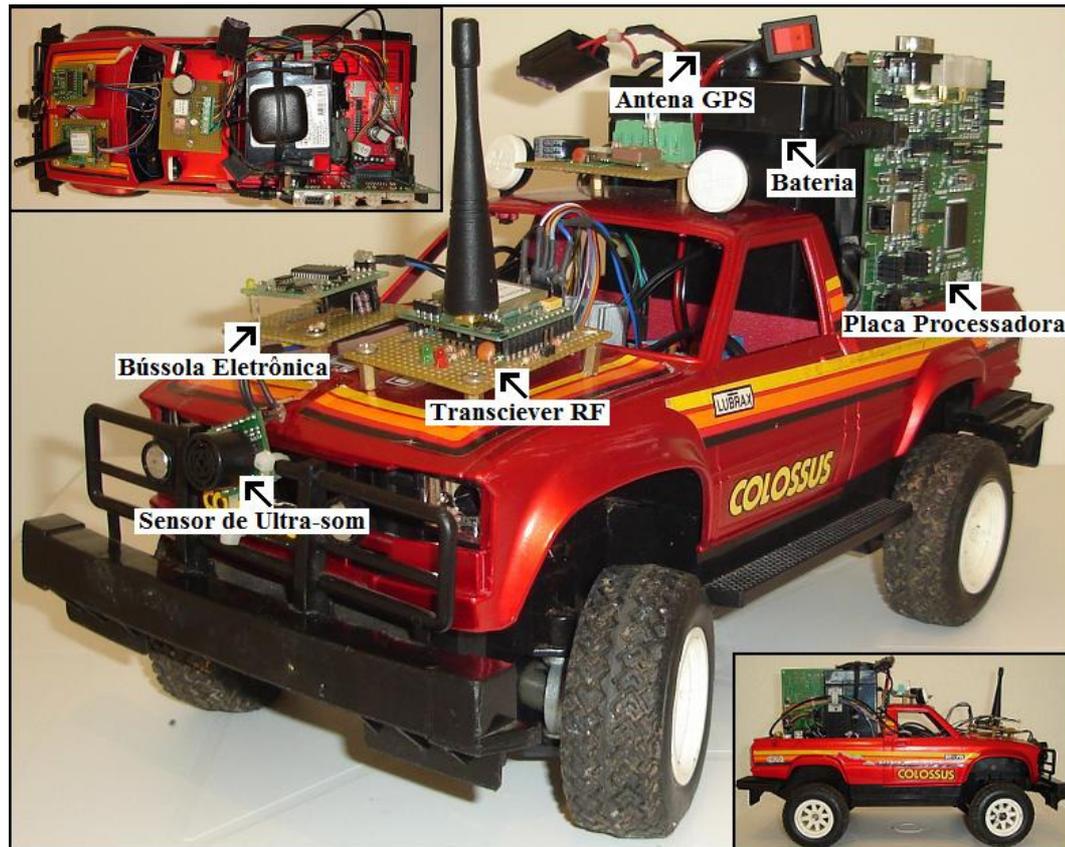


Figura 35 – Montagem final do veículo com destaque para alguns componentes
(Fonte: O autor)

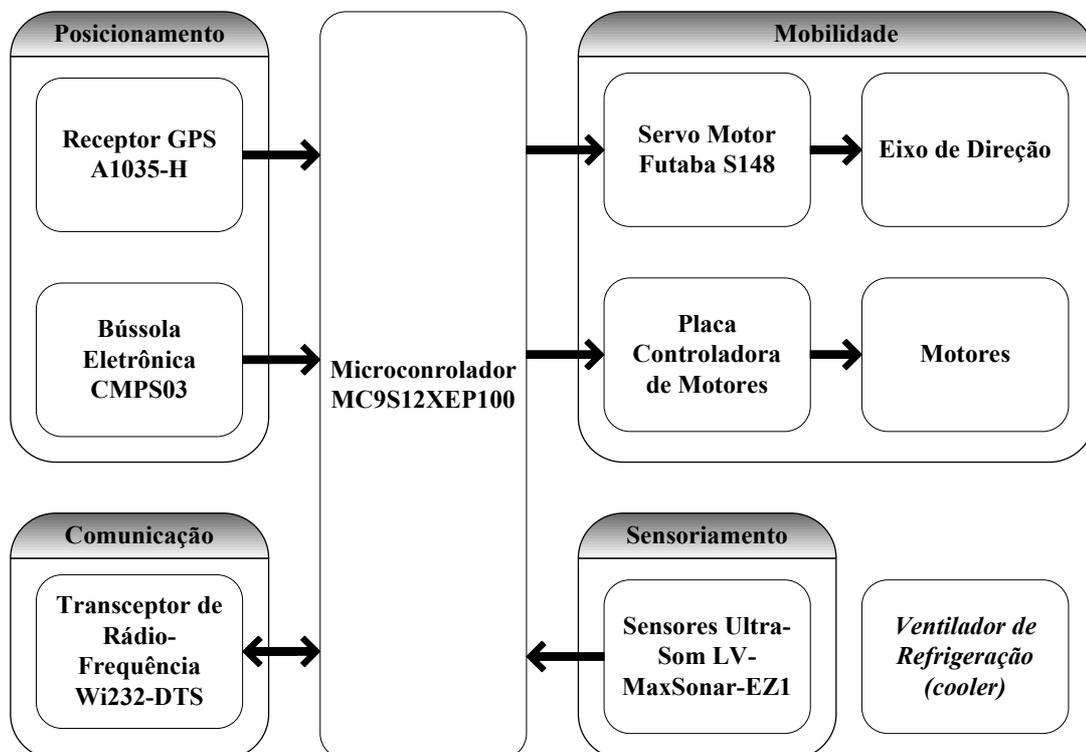


Figura 36 – Arquitetura de *Hardware*
(Fonte: O autor)

3.12. ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO E INSTRUÇÃO (EMI)

A EMI é um aplicativo para microcomputador com plataforma *Windows*, desenvolvido em linguagem *Visual Basic 6*. Esta é uma linguagem de programação desenvolvida pela *Microsoft* e muito bem difundida no mercado, por proporcionar a confecção de interfaces gráficas com muita produtividade.

Este aplicativo deve ser operado por um ser humano, e foi desenvolvido para realizar as tarefas de monitoramento e instrução do veículo, através enlace de comunicação sem fio.

O monitoramento consiste em enviar periodicamente mensagens para o veículo, solicitando suas informações de navegação e missão. Esses dados são exibidos em tela e também armazenados em meio digital para posterior análise e representação da trajetória do veículo sobre mapa digital.

Quando o veículo é operado em modo AUTÔNOMO, a instrução é uma atividade de planejamento de trajetória que consiste em determinar até 5 pontos subseqüentes com coordenadas conhecidas que o veículo deverá atingir. Quando operado em modo REMOTO, esta atividade será a de controlar remotamente os movimentos do veículo.

Possui também a capacidade de modificar o modo de operação do veículo.

O aplicativo desenvolvido possui uma interface gráfica (Figura 37) onde são disponibilizados para o operador todos os recursos necessários à execução das atividades descritas. Ao iniciá-lo, é necessário escolher o número da porta serial do microcomputador, na qual está conectado o transceptor de radiofrequência que será utilizado para a comunicação com o veículo.

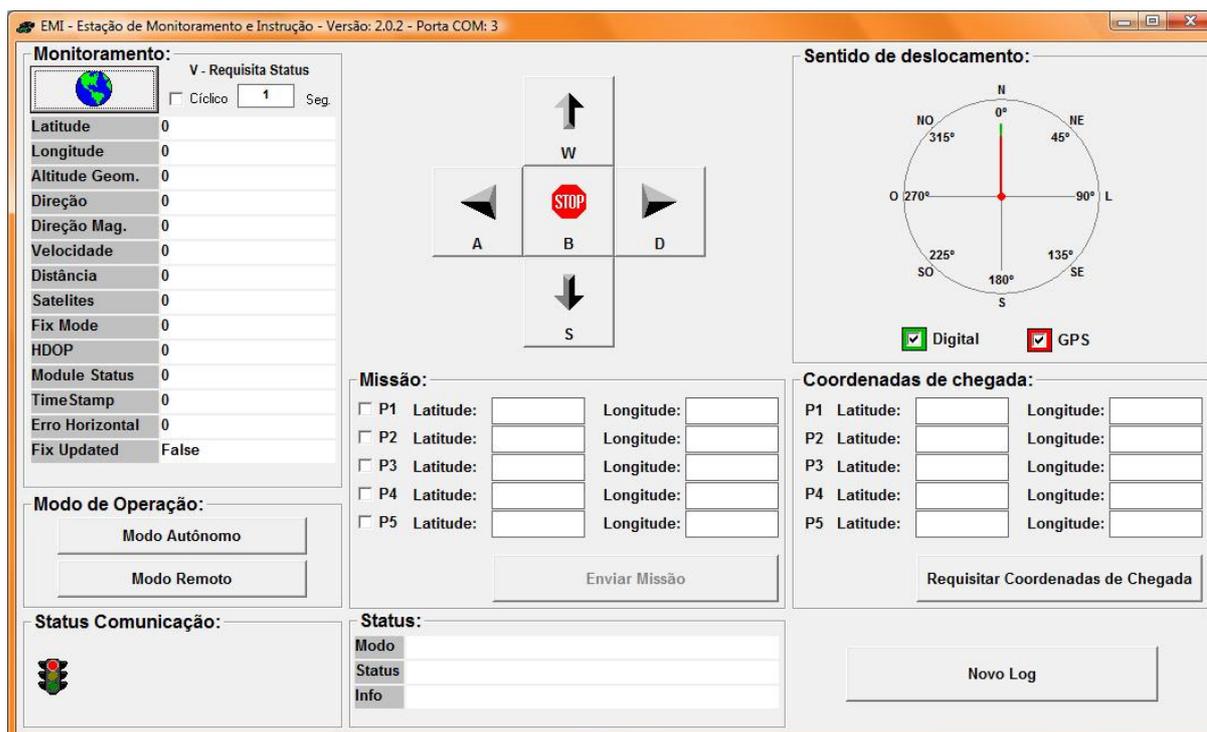


Figura 37 – Interface gráfica de usuário da EMI
(Fonte: O autor)

Como pode-se observar, a interface gráfica da EMI é dividida em campos.

O campo “Monitoramento”, que está ao lado superior esquerdo, exibe as informações de navegação do veículo em tempo real. Em sua parte superior determina-se a frequência, em segundos, que a requisição de *Status* será enviada automaticamente ao veículo. Para tanto, é necessário marcar a caixa de seleção (*checkbox*) chamada “Cíclico” e clicar no botão com o desenho de um globo terrestre. É possível também fazer o pedido manualmente, clicando no botão do globo terrestre conforme desejado, desde que o *checkbox* Cíclico esteja desmarcado. Quando se usa o termo “em tempo real” para as atividades de monitoramento, é necessário alertar que haverá um atraso de, no mínimo, 1 segundo, o qual é o tempo mínimo possível para se configurar a requisição cíclica de *Status*.

As unidades de medida das informações apresentadas, quando aplicáveis, são as mesmas apresentadas no protocolo de comunicação (item 3.8.1).

O campo “Modo de Operação”, que se encontra ao lado inferior esquerdo, consiste em dois botões que são utilizados para se determinar o modo de operação que se deseja fazer o veículo assumir. Ao clicar em um botão, um comando é enviado ao veículo para a realização da troca de modo.

O painel de setas que se encontra na parte superior central é utilizado para controlar remotamente o veículo, quando em modo REMOTO. As letras indicadas em cada botão fazem menção à tecla que pode ser utilizada para envio do respectivo comando, como alternativa à utilização do *mouse*. Adicionalmente, o comando STOP é utilizado para abortar uma missão e parar o veículo imediatamente, quando em modo AUTÔNOMO.

O campo “Missão”, localizado na parte central, é utilizado para se delegar a quantidade e as coordenadas dos pontos que compõem uma missão. O botão “Enviar Missão” faz o envio do comando para o veículo.

O campo “Sentido de Deslocamento”, encontrado na parte superior direita é um indicador visual em tempo real dos azimutes de deslocamento geodésico e magnético que o veículo está orientado no momento. Essas informações estão presentes e são oriundas do monitoramento. Pode-se escolher mostrar ou não quaisquer dos azimutes através dos *checkboxes* Digital (Para azimute magnético) e GPS (para azimute geodésico).

O campo “Status”, presente na parte inferior central, informa os dados do estado de operação (Tabela 7) do veículo. Nesse campo, a informação é descrita em palavras, porém, a mesma informação também está presente de forma numérica no item “*Module Status*” do campo “Monitoramento”.

O campo “Coordenadas de Chegada” é utilizado para se visualizar as coordenadas que o Sistema de Navegação do veículo utilizou pra concluir que chegou a um ponto de destino. Serão apresentadas tantas coordenadas quantos forem os pontos de destino já alcançados no momento, e na ordem de chegada. Para efetuar a requisição, é necessário pressionar o botão “Requisitar Coordenadas de Chegada”. Essa informação será mantida até que uma nova missão seja recebida pelo veículo ou que seja mudado o estado de operação do mesmo.

O botão “Novo LOG”, encontrado na parte inferior direita, é utilizado para que a EMI crie um novo arquivo em formato de texto (TXT) para o registro dos dados do veículo. São gravados apenas os dados das mensagens de Monitoramento (Pedido de *Status*) e Pedido de dados de chegada (item 3.8.1). Entretanto, para que as mensagens sejam gravadas, é necessário que as mesmas sejam solicitadas pela EMI, seja através do monitoramento cíclico ou manual e, no caso da mensagem de coordenadas de chegada, apenas manualmente. Dessa forma, pode-se gerar um

arquivo de registro de dados para cada teste, facilitando a organização e análise dos arquivos.

Cada arquivo é gerado utilizando-se o seguinte padrão para nomeação, o qual registra a data e hora de sua criação:

Log_AAAA_MM_DD_HHMMSS.txt

Onde:

- AAAA – Ano (4 dígitos);
- MM – Mês (2 dígitos);
- DD – Dia (2 dígitos);
- HH – Hora (2 dígitos / 24 hs);
- MM – Minuto (2 dígitos);
- SS – Segundo (2 dígitos);

Um exemplo de arquivo de LOG é dado abaixo:

Log_2011_01_15_221510.txt.

Como pode-se observar, esse arquivo foi gerado às 22:15:10 horas do dia 15/01/2011.

Por fim, o campo “*Status Comunicação*”, apresentado na parte inferior direita, traz informação sobre a comunicação com o veículo, de forma que o operador possa identificar quando foi recebida ou não uma resposta do veículo para um dado comando, e ainda se foi uma resposta de erro ou não.

3.13. ESTRUTURA, PLANEJAMENTO E REALIZAÇÃO DE TESTES

Para a realização dos testes do veículo, foi escolhida uma área na Praça do Relógio, no campus da USP na cidade de São Paulo. Trata-se de um local com boa visibilidade do céu, para minimizar possíveis obstruções do sinal GPS e com a superfície plana (Figura 38).



Figura 38 – Imagem do local de teste do veículo na Praça do Relógio (USP-SP)
(Fonte: O autor)

Nesta área, foi realizado o levantamento de 4 pontos (P1, P2, P3 e P4 – Figura 38), cujos locais foram determinados para possuírem a maior distância possível entre os pontos extremos (P1 e P3), e distribuídos na área de tal forma, a criar a necessidade de realização de manobras, quando o veículo fosse trafegar para mais de um ponto.

O levantamento dos pontos foi realizado através de posicionamento relativo estático pela fase, com ocupação de cada ponto por 20 minutos e os dados foram processados no *software Leica Geo Office*. Uma cópia completa do relatório de processamento dos pontos, com informações adicionais, pode ser consultada no Anexo C.

Para o levantamento, foi utilizada a estação de referência denominada POLI, a qual faz parte da RBMC e está localizada na Escola Politécnica da USP-SP. Suas coordenadas oficiais são (IBGE, 2007):

- Latitude: 23° 33' 20,3323" S
- Longitude: 46° 43' 49,1232" W

- Altitude geométrica: 730,62 m
- Sistema de referência: SIRGAS2000 para a época 2000,4

A estação de referência encontra-se a cerca de 742m de distância do ponto mais distante dela levantado (P2). Considera-se essa distância como posicionamento relativo de base curta, o que faz com que sejam praticamente eliminados os erros com relação à atmosfera e órbita dos satélites.

Para o referido levantamento foi utilizado um receptor modelo LEICA SR20, cujas principais características são expressas na tabela 10:

Tabela 10 - Características do receptor Leica SR-20
(Adaptada de: Leica SR20 User Manual V1.0.
Disponível em: <http://www.squalltmh.110mb.com/content/Software/sr20-manual.pdf>)

Características de Rastreamento			
Sistema(s) GNSS	GPS		
Recepção de Sinal	Simples Freqüência		
Canais de recepção	12 (L1)		
Precisão			
Diferencial por fase	Estático	10 mm + 2ppm	
	Estático rápido	10 mm + 2ppm	
	Cinemático	20 mm + 2ppm	
Diferencial por código	Estático	Pós-processamento	30 cm
		DGPS em tempo real	40 cm
	Cinemático	Pós-processamento	30 cm
		DGPS em tempo real	40 cm

Foi utilizada, para o referido receptor, uma antena LEICA AX1201, a qual foi fixada a 2 m de altura. Suas principais características são apresentadas na tabela 11.

Tabela 11 - Características da antena Leica AX1201
(Adaptada de: Leica GPS1200 User Manual V6.0.
Disponível em: http://www.cropos.hr/files/documents/manuals/leica_gps1200_user_en.pdf)

Altura	6,2 cm
Diâmetro	17 cm
Peso	0,4 Kg
Alimentação	4,5 - 18 V
Consumo	50 mA (Max)
Freqüência	GPS L1
Ganho	27 dBi



Figura 39 – Momento do levantamento do ponto P4
(Fonte: O autor)

Os dados levantados dos pontos são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados dos pontos de teste (referidos a WGS 84)

ID	Latitude (S)	Desvio padrão Latitude (m)	Longitude (W)	Desvio padrão Longitude (m)	Altitude (m)	Desvio padrão altitude (m)
P1	23° 33' 27,72591"	0,0009	46° 43' 24,59394"	0,0006	719,3220	0,0028
P2	23° 33' 28,33732"	0,0017	46° 43' 24,37731"	0,0007	719,3637	0,0055
P3	23° 33' 28,63590"	0,0010	46° 43' 25,42720"	0,0010	719,5034	0,0045
P4	23° 33' 28,11638"	0,0010	46° 43' 24,83525"	0,0008	719,3892	0,0030

As tabelas 13 e 14, informam, respectivamente, as distâncias e azimutes geodésicos entre os pontos levantados.

Tabela 13 - Distância entre os pontos (metros)

-	P1	P2	P3	P4
P1	-	19,878	36,737	13,877
P2	19,878	-	31,158	14,669
P3	36,737	31,158	-	23,229
P4	13,877	14,669	23,229	-

Tabela 14 - Azimutes geodésicos entre os pontos (graus decimais)

-	P1	P2	P3	P4
P1	-	342,01	40,01	29,53
P2	162,01	-	72,76	117,76
P3	220,01	252,76	-	226,25
P4	209,53	297,76	46,25	-

Assumindo-se cada ponto como o centro de uma circunferência, foram desenhadas no chão círculos de 50, 100, 150 e 200 centímetros de raio, para que fosse fácil a identificação da distância que o veículo parou do ponto de destino (figura 40).

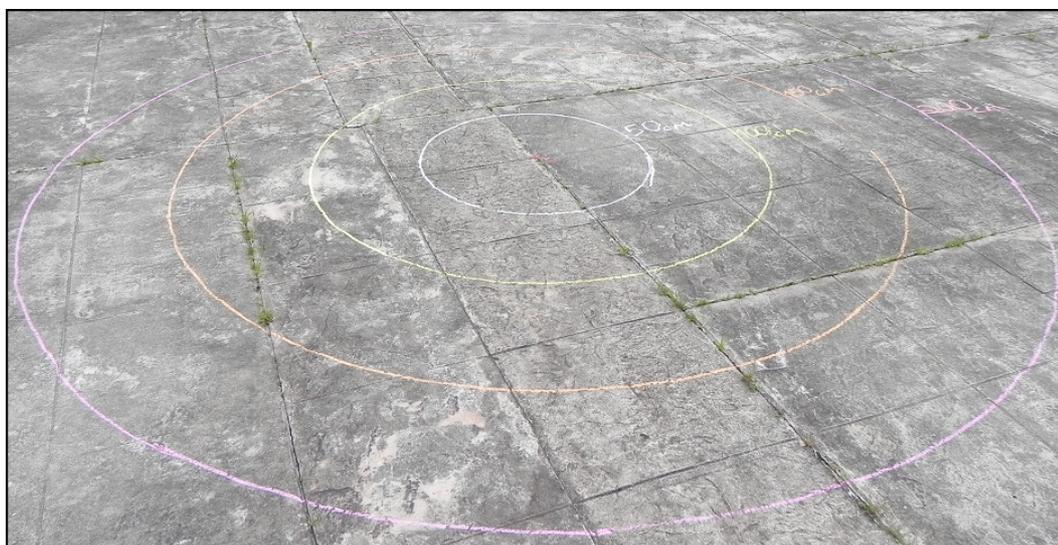


Figura 40 – Foto do ponto P1 com as circunferências de referência
(Fonte: O autor)

Para cada teste realizado, foi gravado um arquivo de registro (LOG), contendo as informações das mensagens de monitoramento e de pontos de chegada descritas no item 3.8.1, as quais são matéria prima para a análise do desempenho do veículo.

A EMI foi configurada para executar de forma cíclica o Pedido de *status* a cada 1 segundo. Entretanto, houve um problema de comunicação que culminou na repetição de algumas mensagens e, portanto, uma perda de mensagens novas que foram substituídas pelas repetidas. Esse problema foi detectado apenas na fase de análise dos resultados, onde foi necessário realizar uma filtragem nos dados, removendo as mensagens repetidas e conseqüentemente diminuindo a freqüência de mensagens (densidade de pontos) para menos de 1 por segundo.

Diversas rodadas de teste foram filmadas para posterior análise visual do desempenho do veículo.

Foram definidos três tipos diferentes de teste (A, B e C). O teste A visa avaliar a capacidade do veículo de atingir um ponto de forma autônoma e a acurácia com que o faz, o teste B visa avaliar o cumprimento de uma missão e a trajetória realizada e o teste C visa avaliar a qualidade do Sistema de Posicionamento ao comparar uma trajetória prevista com a trajetória gerada. Os próximos 3 tópicos abordarão mais detalhadamente esses experimentos.

Os testes foram conduzidos no dia 15/01/2011 e, exceto para o teste C, foram realizadas duas baterias com intervalo por volta de 2 horas entre cada uma. Dessa forma, pode-se comparar as baterias de teste em função da mudança da geometria da constelação GPS e das condições de propagação do sinal.

Cada teste recebeu uma nomenclatura para identificação única, sendo composto por 3 dígitos, onde o primeiro é a letra correspondente do tipo de teste e os dois outros são o número do teste. Portanto, o primeiro teste de cada tipo se chama A01, B01 e C01, e assim sucessivamente.

Com o auxílio do *software* gratuito chamado *Planning V2.8*, desenvolvido e disponibilizado pela Trimble (http://www.trimble.com/planningsoftware_ts.asp), foi realizada uma avaliação das condições da constelação GPS para o dia do teste. Os valores de quantidade de satélites disponíveis, HDOP e mapa do céu (*skyplot*), oriundos do planejamento realizado neste aplicativo, são exibidos nas figuras 41, 42 e 43, respectivamente.

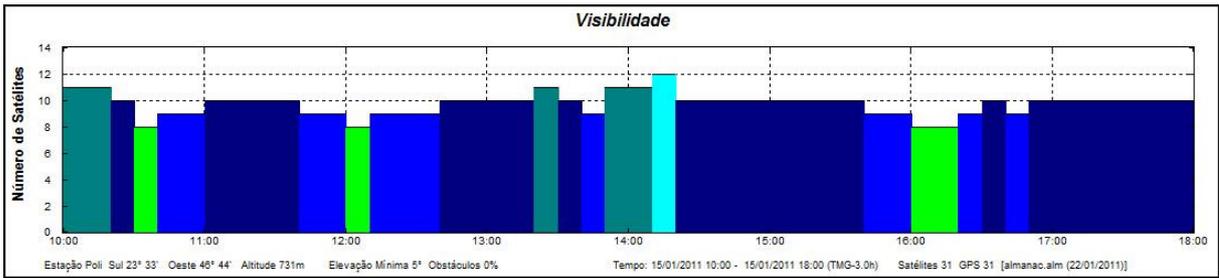


Figura 41 – Quantidade de Satélites GPS disponíveis no período de teste
(Fonte: Aplicativo *Planning* - Trimble)

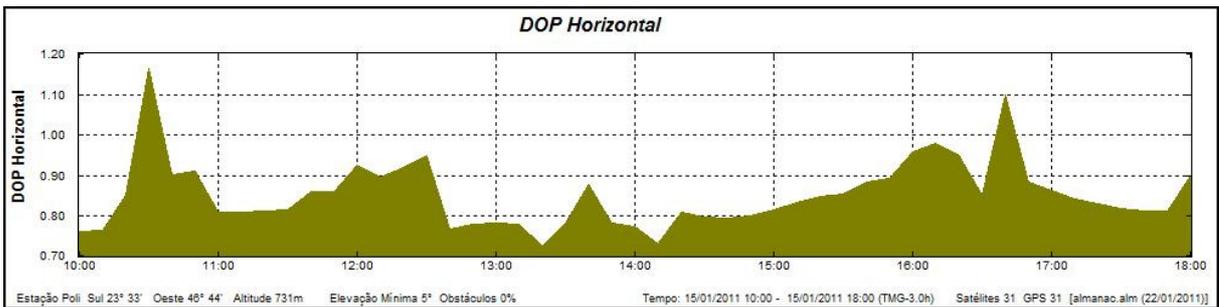


Figura 42 – HDOP para o período de teste
(Fonte: Aplicativo *Planning* - Trimble)

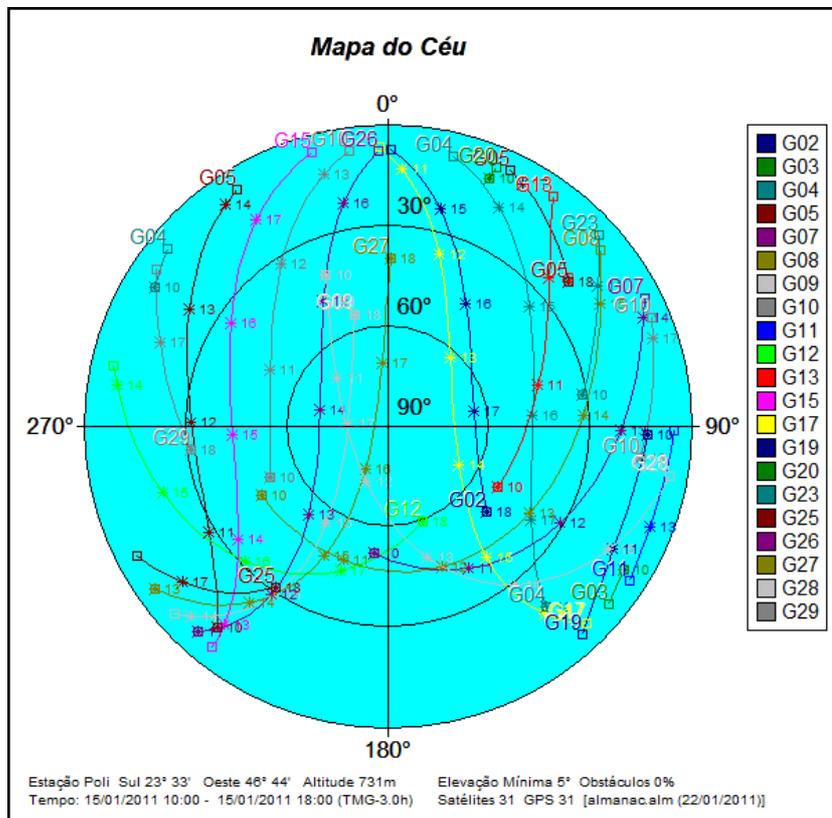


Figura 43 – Skyplot para o período de teste
(Fonte: Aplicativo *Planning* - Trimble)

3.13.1. Teste A – Alcance e acurácia de chegada a um ponto

O objetivo deste teste é verificar a capacidade do veículo de atingir, em modo AUTÔNOMO, um ponto previamente determinado, bem como verificar a acurácia com a qual se chegou ao ponto.

Para tanto, o veículo foi posicionado em pontos distintos e instruído a alcançar um ponto determinado.

Uma vez alcançado um ponto de destino, a distância horizontal entre a antena do receptor GPS e o ponto de referência foi medida, em centímetros, com o auxílio de uma trena. Esta distância foi denominada de acurácia medida. Da mesma forma, a distância entre as coordenadas de chegada e as coordenadas do ponto de destino foi calculada, e denominada de acurácia calculada.

No total foram realizados 28 testes, divididos em duas baterias.

Na primeira bateria, foram realizados 5 testes (A01 até A05), onde o veículo foi posicionado sobre o ponto P3 e instruído a navegar até o ponto P1. Os testes foram realizados entre as 11h10min e 11h40min (hora local).

A segunda bateria contou com a realização de 23 testes (A06 até A28). Em 5 destes (A06 até A10), o veículo foi posicionado sobre o ponto P3 e instruído a navegar até o ponto P1. Outros 4 (A11 até A14), o veículo partiu do ponto P1 e foi instruído a navegar até o ponto P4. Nos 11 testes seguintes (A15 até A25), o veículo partiu de pontos aleatórios e foi instruído a navegar para o ponto P4. Os 3 últimos testes (A26 até A28) foram realizados após modificação no *software* do Sistema de Navegação. Os dados destes testes não serão considerados na análise, exceto quando explícito no texto. A modificação de *software* realizada altera o modo como o veículo se comporta em sua trajetória, pois muda o cálculo para se gerar o azimute calculado. Dessa forma, entende-se que essa alteração afeta a trajetória do veículo, mas não a acurácia de chegada ao ponto de destino.

Devido a um erro de operação na EMI para o teste A21, não foi gerado o LOG deste percurso, tendo sido apenas coletada a acurácia medida. Os testes de A06 até A25 foram realizados entre 13h15min e 14h40min (hora local). Os testes de A26 até A28 foram realizados entre 15h45min e 15h50min (hora local).

3.13.2. Teste B – Missão

Este teste visa avaliar a capacidade do veículo em cumprir uma missão, em modo AUTÔNOMO, a qual se trata de alcançar subseqüentemente 5 pontos determinados. Avalia-se também sua trajetória e capacidade de manobra, sendo menos importante a verificação da acurácia com que se chega ao ponto de destino, e sim o cumprimento efetivo da missão.

Foram realizados 12 testes no total, tendo sido divididos em duas baterias. Em todos eles, o mesmo percurso foi estabelecido, o qual se trata de alcançar, na seqüência apresentada, os seguintes pontos: P1, P2, P3, P4 e P2.

Na primeira bateria, foram realizados 5 testes (B01 até B05). Para os testes B01 e B02, o veículo partiu de um ponto aleatório, e para os testes B03 até B05, o ponto de partida foi o ponto P2. Os testes ocorreram no período entre 11h50min e 12h30min (hora local).

Na segunda bateria, foram realizados 7 testes (B06 até B12), onde o ponto de partida de todos foi o ponto P2, e ocorreram entre 15h00min e 16h05min (hora local). Os testes B11 e B12 foram efetuados com a modificação de *software* citada no item anterior. Da mesma forma, dados destes dois testes só foram usados na análise se indicado no texto.

3.13.3. Teste C – Trajetória Prevista X Registrada

Realizado em modo de operação REMOTO, este teste visa traçar um caminho conhecido com o veículo, para posterior efeito de comparação com o caminho representado após o processamento dos dados de monitoramento. Este teste dá uma visão da acurácia de posicionamento para uma trajetória e não apenas para um único ponto.

O veículo foi controlado remotamente em uma linha reta entre os pontos P2 e P4 por 5 vezes (C01 até C05). Os testes foram realizados entre 12h30min e 12h40min (hora local).

3.13.4. Análise dos dados

O processo de análise, que buscou verificar características diferentes para cada tipo de teste, foi conduzido a partir da coleta e processamento dos LOGs gravados na EMI, de onde diversas informações são produzidas, tendo também a representação dos percursos do veículo sobre mapa digital georeferenciado. Adicionalmente, fez-se medição manual de distâncias dos pontos de chegada (Teste A) no ambiente de teste e análise visual dos testes que foram filmados.

O processamento dos LOGs se deu a partir da importação, organização e formatação dos dados das mensagens de Pedido de *status* e coordenadas de chegada no aplicativo Excel. A partir de então foi realizada análise e geração de gráficos.

Para a representação em mapa digital, foi utilizado o aplicativo *Google Earth* V5.011 em sua versão gratuita. Trata-se de um *software* que se utiliza de imagens de satélites para representar, de forma georeferenciada, a superfície da Terra. No entanto, apesar de ser georeferenciado, não se conhece a “fidelidade” do georeferenciamento por este aplicativo utilizado, ou seja, podem existir erros de posicionamento com relação às imagens exibidas. Esta possível margem de erro não afeta os dados apresentados neste trabalho, pois os pontos coletados dos testes são relativos aos pontos de referência levantados (P1, P2, P3 e P4), sendo então o *Google Earth* utilizado apenas como plataforma para visualização relativa no ambiente real de testes, dos pontos levantados.

Para se gerar pontos e rotas neste aplicativo, é necessário criar arquivos no formato KML (*Keyhole Markup Language*) com as coordenadas dos pontos e informações adicionais desejadas, como velocidade, azimute de deslocamento etc. O processo de criação de arquivos KML compreende as seguintes etapas:

- Coleta dos pontos relevantes da trajetória das planilhas geradas em Excel;
- Conversão das planilhas para o formato CSV (*comma separated values*) através de opção do próprio Excel;
- Conversão dos arquivos CSV para o formato KML através do aplicativo gratuito CSV2KML V1.0.2;

Para uma dada seqüência de pontos, o aplicativo CSV2KML pode ser orientado a gerar individualmente os pontos e/ou traçar um caminho, que nada mais

é que unir os pontos subseqüentes por retas e representá-las como uma trajetória. A figura 44 exhibe a interface gráfica deste aplicativo.

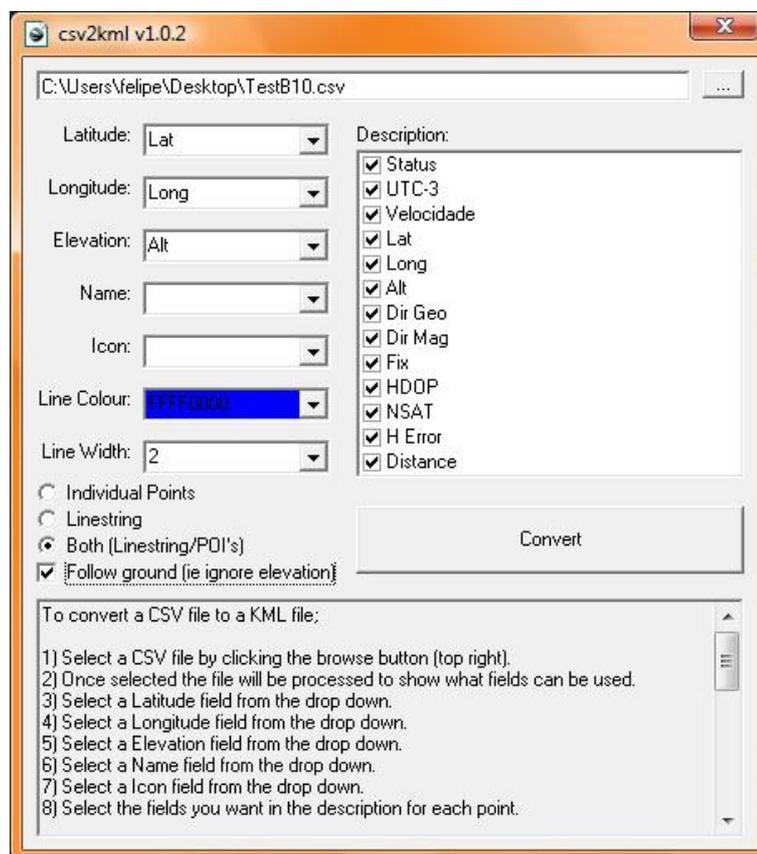


Figura 44 – Interface gráfica do aplicativo CSV2KML
(Fonte: O autor)

3.14. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com a diversidade tecnológica atualmente disponível no mercado, pode-se concluir, para o presente trabalho, que a tecnologia em si não representa uma barreira no desenvolvimento do mesmo, mas existe o desafio de escolher aquelas que melhor atendem as necessidades funcionais, as quais necessitam então estar bem definidas antes da execução do projeto, e ainda cujos custos sejam acessíveis.

Os diversos sistemas desenvolvidos para uso no projeto são, a princípio, elementos isolados, sendo então o trabalho de integração dos mesmos a etapa mais importante na caracterização do projeto como um veículo autônomo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos testes realizados, os quais foram descritos no capítulo anterior. Os arquivos de LOG coletados dos testes foram a principal fonte de análise, de onde foram extraídas as informações e processados resultados.

Um fator positivo foi que, quando em modo AUTÔNOMO, em todos os testes o veículo conseguiu chegar ao ponto de destino. Havia dúvida se, em função do valor sempre baixo do erro estimado de posicionamento horizontal (1 metro), o veículo poderia não conseguir chegar ao ponto de destino em um tempo coerente, podendo ficar realizando manobras ao redor do ponto de destino sem conseguir alcançá-lo. De fato, em alguns momentos o veículo executava trajetórias muito irregulares quando próximo do ponto de destino, mas essa situação, sempre durou pouco tempo (da ordem de unidades de segundo).

Outro fator considerado positivo foi a duração das baterias. Os testes foram conduzidos entre as 11h00min e as 17h00min (período de 6 horas), com alguns intervalos rápidos para preparação de teste e refeição. Foram utilizadas as duas baterias, não tendo a última sido utilizada até o fim da sua carga, quando terminaram os testes. Estima-se que a duração da carga de cada bateria foi além de duas horas cada, posto que não são duas horas de movimentação contínua do veículo, mas sim de procedimentos de testes, que envolvem outras atividades além da própria navegação em si, momentos estes que o veículo permanecia parado e, portanto, consumindo menos energia.

O Sistema de Navegação, como o principal agente de controle do veículo, pode assumir três estados de operação distintos, sendo INICIAL, REMOTO e AUTÔNOMO. Os testes realizados em cada modo comprovam o funcionamento não apenas dos sistemas auxiliares, como também do próprio Sistema de Navegação para cada estado de operação que pode assumir.

Os testes executados mostraram que o veículo é funcional em modo de operação INICIAL, sendo que uma de suas principais tarefas é iniciar a execução dos sistemas auxiliares do veículo (Mobilidade, Posicionamento, Sensoriamento e Comunicação).

O comando de Pedido de *status* foi atendido corretamente, reportando os dados de monitoramento do veículo, o que demonstra o correto funcionamento do Sistema de Comunicação e também do Sistema de Posicionamento.

O comando PARAR foi corretamente atendido, indicando também o funcionamento do Sistema de Mobilidade para este comando. Comandos inválidos ou exclusivos dos outros modos são respondidos com erro, informando o código de erro correspondente.

A troca de modo de operação a partir do modo INICIAL foi executada corretamente tanto na transição para o modo REMOTO quanto para o modo AUTÔNOMO.

No modo REMOTO, os comandos de movimento foram corretamente atendidos, mostrando que todas as atividades do Sistema de Mobilidade estavam operacionais, onde o tempo de resposta do veículo para um comando foi em média de 60 ms. Se um novo comando para continuidade ou transição de movimento não for enviado dentro do tempo de execução do comando atual (600ms), o veículo pára de se movimentar, conforme especificado. Entretanto, se este novo comando for enviado em frequência muito alta, por exemplo a cada 100ms, o sistema do veículo perde algumas mensagens e quando isso ocorrer poderá haver uma rápida diminuição de velocidade do veículo antes do mesmo executar o próximo comando. Essa diminuição de velocidade é fruto da expiração do tempo de execução do comando de movimento, que causa a frenagem do veículo. Portanto, não se pode sobrecarregar o veículo de comandos de movimento desnecessariamente, uma vez que cada comando tem um tempo de duração especificado.

Quando há obstrução presente a frente do veículo, o mesmo não aceita o comando de movimento para a frente, podendo apenas ser movimentado para trás. O mesmo ocorre quando surge um obstáculo à frente durante a movimentação, quando então o veículo pára de se movimentar. Este comportamento demonstra o correto funcionamento do Sistema de Sensoriamento.

A mensagem de Pedido de *status* funcionou corretamente, assim como a troca de modo de operação. As mensagens exclusivas do modo AUTONOMO foram respondidas com erro.

Os resultados obtidos nos modos INICIAL e REMOTO demonstraram o correto funcionamento de todos os sistemas auxiliares necessários para operação do modo AUTÔNOMO. Por esse motivo, foram desenvolvidos e testados do ponto

de vista funcional primeiramente, pois são necessários para o correto funcionamento do modo AUTÔNOMO e, posteriormente, para a execução dos testes de validação dos objetivos (Testes A, B e C).

É necessário frisar, no entanto, que o Sistema de Comunicação apresentou problemas quando enviadas continuamente mensagens de Pedido de *status*. Isto culminou na repetição de algumas mensagens de resposta, as quais substituíam mensagens reais que foram perdidas. Este problema foi detectado apenas na fase de análise dos resultados, onde, como consequência, houve uma menor densidade de dados do que o esperado, porém não impedindo a análise dos testes. Os arquivos de LOG precisaram ser filtrados antes da análise para a remoção deste tipo de ocorrência.

Como principal objetivo do trabalho, o modo AUTÔNOMO foi analisado mais profundamente, a partir dos resultados dos testes planejados (item 3.13).

O Sistema de Sensoriamento funcionou corretamente neste modo de operação, informando corretamente a presença de barreira. De posse dessa informação, o Sistema de Navegação também agiu corretamente. Quando uma barreira foi colocada à frente do veículo, este cessou o movimento e reportou o status “Em missão, aguardando o desbloqueio de via”. Quando a barreira foi removida antes do período estipulado de 40 segundos, a missão foi retomada e o *status* retornou para o anterior à presença da barreira. Quando o tempo máximo foi excedido, a missão foi abortada e o status corretamente atualizado para “Missão abortada, via bloqueada”.

O Sistema de Posicionamento informou corretamente a perda de sinal GPS quando em missão, permitindo que o Sistema de Navegação cessasse o movimento do veículo, reportando o *status* “Em missão, aguardando posicionamento”. Quando o posicionamento foi recuperado em até 2 minutos, a missão foi retomada e o *status* retornou ao anterior à perda de posicionamento. Quando o tempo estipulado foi excedido, a missão foi abortada e o *status* mudou para “Missão abortada, sem posicionamento”.

A interrupção intencional de uma missão, através do comando PARAR, funcionou corretamente, fazendo o veículo cessar o movimento, reportando o *status* “Missão abortada pela EMI”.

A troca de modo de operação funcionou corretamente. Quando este comando foi enviado durante a execução de uma missão, o veículo agiu corretamente, interrompendo a missão, freando o veículo e então assumindo o novo estado.

O comando de Pedido de coordenadas de chegada funcionou corretamente em todos os estados do modo de operação AUTÔNOMO. Quando não estava em missão ou ainda não havia chegado a um ponto de destino, as coordenadas foram enviadas com valores 0. Quando o veículo já havia chegado a um ou mais pontos de destino, ou ainda quando a missão já havia sido cumprida, todos os pontos já atingidos foram reportados com as coordenadas corretas.

4.1. RESULTADOS DO TESTE A

Este teste teve o objetivo de avaliar a capacidade do veículo em atingir um ponto de forma autônoma, e verificar a acurácia com que o ponto é atingido.

Em todos os 28 (25 testes e mais os 3 com modificação de *software*) testes realizados, o veículo conseguiu atingir o ponto de destino, onde o mesmo para de se movimentar e reporta o *status* de Missão Cumprida.

No total destes testes, foram reportados 959 pontos navegados, onde a qualidade do posicionamento se manteve sempre alta, tendo permanecidos constantes os valores de HDOP em 1 e do erro estimado de posicionamento horizontal em 1 m.

Considerando ainda os 3 testes com modificação de *software*, verificou-se que a quantidade média de satélites utilizados pelo receptor para cada teste (Figura 45) esteve sempre igual ou próxima à quantidade máxima de satélites disponíveis (Figura 41) no momento do respectivo teste.

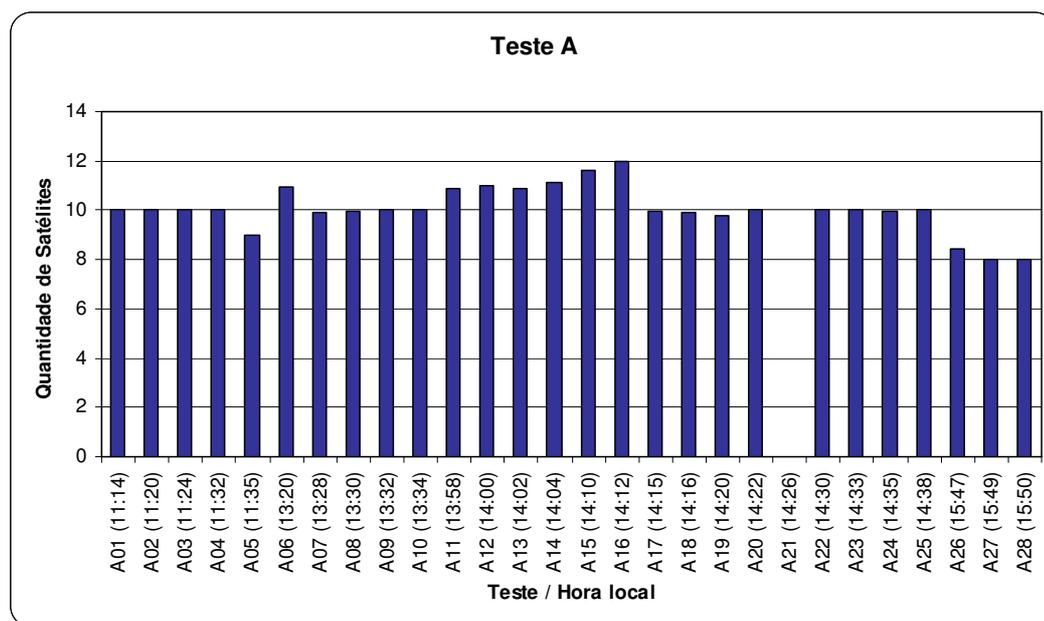


Figura 45 – Quantidade média de satélites utilizados em cada teste

Tabela 15 - Acurácia de chegada aos pontos de destino para o teste A

Dado	Acurácia medida (m)	Acurácia calculada (m)
Média	2,90	1,08
Desvio Padrão	1,98	0,36
Maior valor	6,38	1,48
Menor valor	0,12	0,27

A tabela 15 exhibe dados onde pode-se verificar a acurácia média de chegada aos pontos de destino para os 25 testes. Este valor foi medido de duas formas diferentes, sendo a primeira chamada de acurácia medida, a qual foi medida manualmente no plano horizontal entre a antena do receptor GPS do veículo, em seu ponto de parada, e o ponto de destino; e a segunda foi chamada de acurácia calculada, que resulta de um cálculo de distância entre as coordenadas de chegada do veículo e as coordenadas do ponto de destino. Esta última distância é a mesma obtida pelo Sistema de Navegação, para verificar a distância ao ponto de destino.

Pode-se notar que para a acurácia calculada, os valores ficaram sempre melhores, mas esta distância não é a que melhor representa a qualidade de posicionamento do veículo. Como o erro horizontal estimado reportado pelo veículo foi sempre de 1 m e o critério de chegada ao ponto é quando a distância calculada em relação ao ponto de destino fosse menor ou igual a este erro, e considerando-se o arredondamento para um número inteiro do valor calculado da distância, era esperado que essas distâncias nunca ultrapassassem 1,49 metros, pois o cálculo

que na análise realizada resulta 1,49 metros, foi também feito pelo Sistema de Navegação no veículo, e este valor arredondado vai para 1 metro, atendendo então à condição de chegada ao ponto de destino. As figuras 46 e 47 apresentam gráficos de dispersão para os pontos de chegada em P1 e P4 utilizando-se os dados da acurácia calculada.

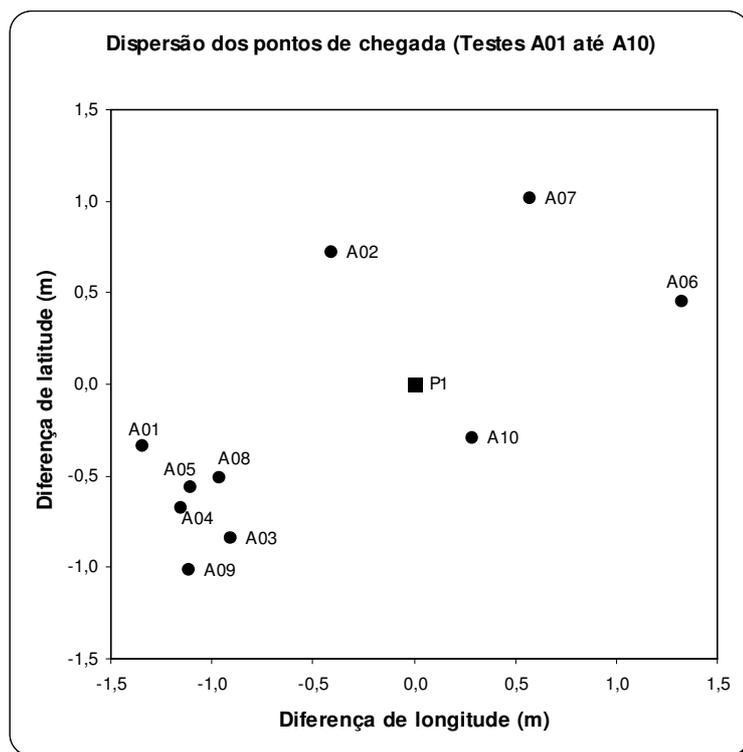


Figura 46 – Dispersão dos pontos de chegada em P1 para a acurácia calculada

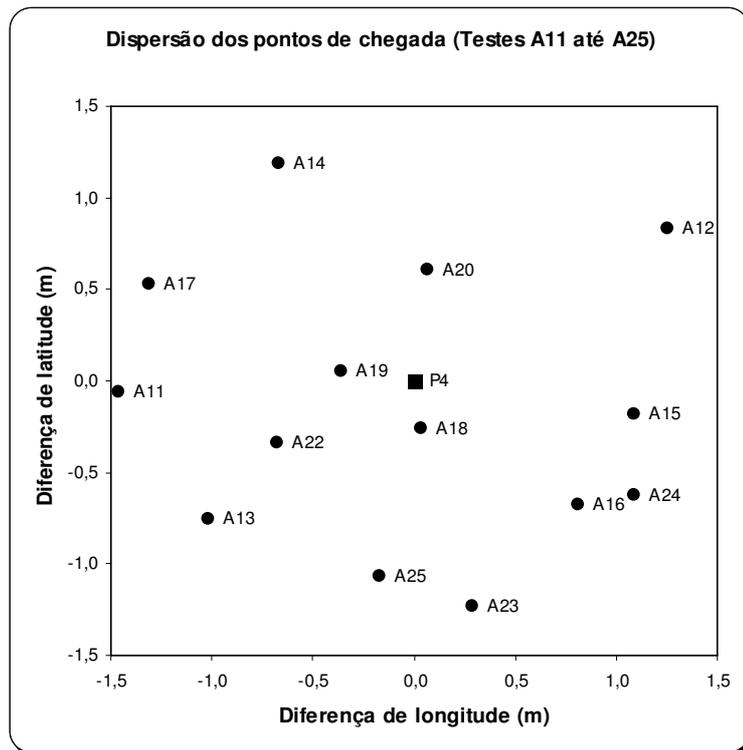


Figura 47 – Dispersão dos pontos de chegada em P4 para a acurácia calculada

Uma melhor avaliação da qualidade do posicionamento do veículo é obtida através da acurácia medida, a qual representa a distância física horizontal entre a antena do receptor e o ponto de destino.

Segundo a documentação do receptor GPS utilizado, a acurácia de posicionamento horizontal é $< 2,5\text{m CEP}$ (*Circular Error Probable*) (Tabela 9). Valores dentro deste limite, para a acurácia medida, representam 12 (ou 48%) dos 25 testes efetuados (Figura 48), o que pode ser considerado coerente com o conceito CEP, o qual pressupõe que 50% dos pontos devem estar dentro da margem estipulada.

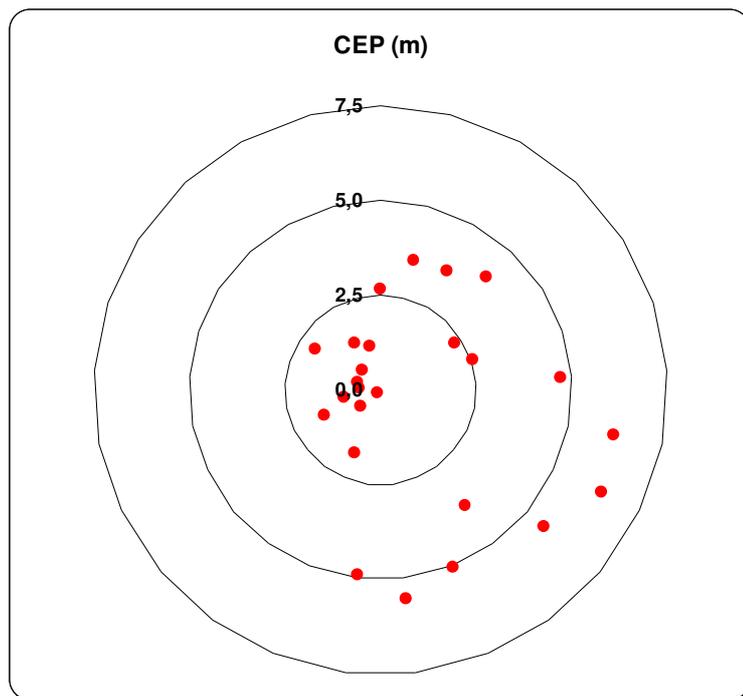


Figura 48 – CEP para os pontos do Teste A

A Figura 49 apresenta um gráfico onde são exibidas as acurácias medidas ao fim de cada teste, em função do seu respectivo horário. Pode-se ver que as distâncias até o ponto de destino nunca foram superior a 7 metros.

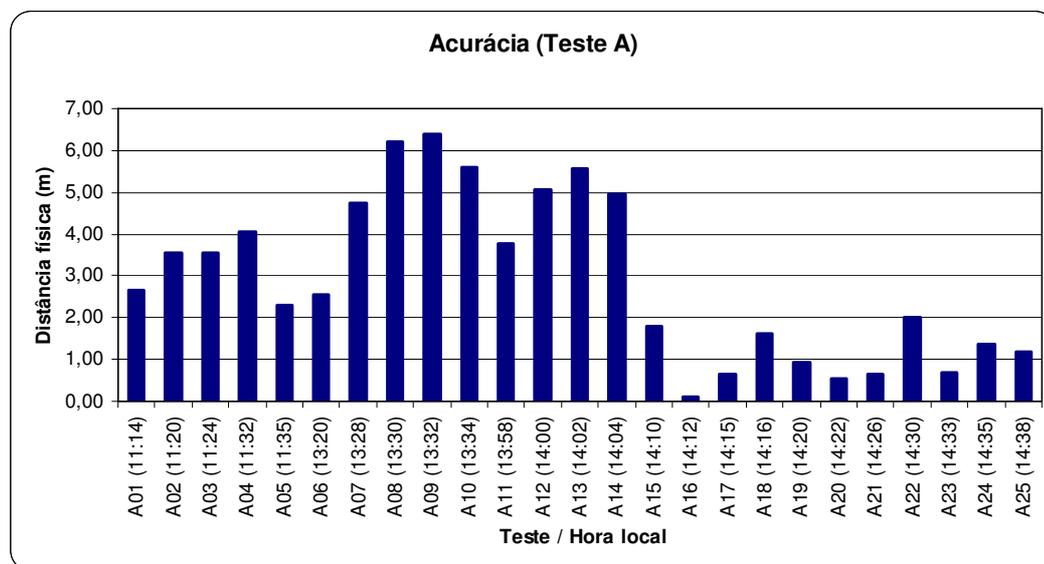


Figura 49 – Acurácia dos pontos de chegada para o teste A

No entanto, houve uma melhoria significativa nas acurácias medidas a partir das 14:10, quando foi realizado o teste A15.

No intuito de verificar quais as causas possíveis dos testes com acurácias maiores e também quais as causas possíveis da melhora de acurácia, foi realizada a seguinte análise:

Foram escolhidos os dois testes que apresentaram as piores acurácias de chegada (A08 e A09), os dois testes que apresentaram as melhores acurácias de chegada (A16 e A20) e os dois testes que representam o momento anterior e posterior à melhoria de acurácia (A14 e A15).

As informações de qualidade do posicionamento quando o ponto de destino foi atingido, e que foram transmitidas pelo veículo, não sofreram variação considerável entre os testes, como pode ser visto na tabela 16:

Tabela 16 - Qualidade do posicionamento transmitida pelo veículo no momento de chegada ao ponto de destino

Teste	Hora término	HDOP	Quantidade de SV's
A08	13:30	1	10
A09	13:32	1	10
A14	14:04	1	11
A15	14:10	1	12
A16	14:12	1	12
A20	14:22	1	10

Para uma melhor análise, utilizou-se o aplicativo *Planning* para verificar a qualidade do posicionamento, considerando apenas os satélites utilizados na solução de posicionamento no momento em que o ponto de destino foi atingido para cada teste. A tabela 17 expressa as informações geradas.

Tabela 17 - Qualidade do posicionamento gerada no aplicativo *Planning* a partir dos satélites usados na solução no momento de chegada ao ponto de destino

Elevação dos SV's e HDOP (Planning)							
Teste	A08	A09	A14	A15	A16	A20	
Hora término	13:30	13:32	14:04	14:10	14:12	14:22	
Ângulo de inclinação dos satélites usados (graus)	PRN02	-	-	6	7	8	11
	PRN04	9	10	18	20	20	23
	PRN05	14	14	7	6	6	-
	PRN07	15	15	7	5	5	-
	PRN08	38	37	32	30	30	28
	PRN09	-	-	10	12	13	16
	PRN11	5	5	-	-	-	-
	PRN12	-	-	-	11	11	13
	PRN15	25	25	36	37	38	40
	PRN17	70	70	65	63	62	58
	PRN26	66	67	68	67	67	64
PRN27	14	15	25	27	28	31	
PRN28	39	39	29	27	27	24	
HDOP	0,78	0,78	0,77	0,73	0,73	0,80	
Quantidade de SV's	10	10	11	12	12	10	

Mais uma vez, os resultados obtidos não permitem concluir que os maiores valores de acurácia, bem como a queda para os menores valores, são influenciados pela mudança de qualidade de posicionamento. Os valores de HDOP não passaram de 0,80, o que significa que a geometria dos satélites era boa no momento. A quantidade de satélites mínima foi de 10 e os valores de ângulo de inclinação não são discrepantes entre os testes.

Uma das maiores fontes de erros imposta ao posicionamento GPS, principalmente o de simples frequência, é a ionosfera. Os efeitos da refração ionosférica sobre os sinais GPS estão correlacionados ao TEC presente nesta camada da atmosfera. No trabalho de Fonseca Jr. (2002), foi realizado um estudo que avaliou um período de 5 anos (1997-2001) de dados, onde se concluiu que há um padrão de comportamento da ionosfera, e que os picos máximos para os valores diários do TEC são às 14 horas e às 22 horas (horário local) para o Brasil. Portanto, nestes períodos de pico, ocorrem os maiores índices de refração ionosférica, interferindo a propagação dos sinais GPS e, conseqüentemente, deteriorando a qualidade do posicionamento.

As acurácias medidas nos testes, e representadas no gráfico da figura 49, apresentam os piores resultados em horários entre 13h25min e 14h05min.

Entretanto, a acurácia sofreu melhoria considerável às 14:10, atingindo seu melhor resultado às 14:12. Como as mudanças de refração ionosférica ocorrem de forma relativamente lenta, a mesma dificilmente poderia ter sido a causa de uma variação de mais de 6 metros em questão de poucos minutos.

É possível que os métodos de cálculo de posicionamento e de estimativa de erro horizontal do receptor GPS tenham influenciado o resultado, pois tais métodos não são disponibilizados ao domínio público pelo fabricante do receptor.

Ainda assim, todos os valores de acurácia atingidos pelo veículo estão dentro da margem de erro de cerca de 10 metros indicada nas literaturas consultadas.

4.2. RESULTADOS DO TESTE B

Este teste teve como objetivo verificar a capacidade do veículo em cumprir uma missão de 5 pontos subseqüentes, bem como avaliar a trajetória realizada a fim de verificar o desempenho do algoritmo de navegação.

Em todos os 12 testes realizados (10 testes mais 2 com modificação de *software*), o veículo conseguiu atingir os 5 pontos da missão. O *status* do veículo foi atualizado corretamente para cada ponto alcançado e, ao fim da missão, o veículo informava o *status* de missão cumprida.

A modificação de *software* realizada nos dois últimos testes (sendo a mesma para os Testes A e C) se deu pelo cálculo do azimute calculado com o uso do azimute magnético sem a correção da declinação magnética. Portanto, esta alteração muda o comportamento do veículo do ponto de vista de sua trajetória. Por este motivo, esses dois testes não serão incluídos na análise de trajetória da qual se propõe o teste B.

O tempo médio de duração da missão foi de 5,37 minutos, sendo 6,87 minutos o maior tempo (teste B06) e 3,55 minutos o menor (teste B03). A tabela 18 exhibe os tempos de missão para todos os testes.

Tabela 18 - Tempo de missão (horário local)

Teste	Início hh:mm:ss	Fim hh:mm:ss	Tempo mm:ss
B01	11:51:26	11:57:00	05:34
B02	12:01:27	12:05:38	04:11
B03	12:08:30	12:12:03	03:33
B04	12:14:46	12:19:00	04:14
B05	12:22:21	12:27:36	05:15
B06	15:04:48	15:11:40	06:52
B07	15:12:40	15:19:08	06:28
B08	15:21:07	15:27:45	06:38
B09	15:28:26	15:33:16	04:50
B10	15:33:38	15:39:46	06:08

A trajetória efetuada pelo veículo foi freqüentemente irregular, com a excessiva ocorrência de sinuosidades durante o percurso e em alguns momentos até a realização de voltas em circunferência. O Sistema de Navegação determina a realização de uma curva quando o azimute calculado difere mais de 20° do azimute de destino. Essa margem de erro visa amenizar a incidência de sinuosidades, mas embora tenha atenuado sua ocorrência, não o fez deixar de ser um problema.

De uma forma geral, essas irregularidades de percurso foram observadas sempre que o veículo aproximava-se do ponto de destino, entretanto, ocorreram diversas vezes também em pontos intermediários na busca de um novo ponto de destino.

Quando ocorreram próximas ao ponto de destino, as irregularidades se acentuaram em função da mudança mais rápida do azimute calculado em relação ao azimute de destino. Em outras palavras, o veículo nunca está perfeitamente alinhado com o azimute de destino, portanto, quanto mais próximo deste ponto ele estiver, maior será a velocidade com que seu azimute de deslocamento (azimute calculado) se distancia do azimute de destino. Esta situação, portanto, pode causar freqüentemente a necessidade da realização de manobra para realizar o alinhamento dos azimutes. Essa realização excessiva de manobras é potencializada também pelo mesmo fator que incide sobre sua ocorrência quando em pontos intermediários do percurso, o qual foi fruto de uma maior análise.

Nestes casos, verificou-se um problema relacionado à diferença entre os azimutes geodésico e magnético durante a realização de uma manobra e sobre a freqüência de atualização destes valores.

Foi realizada uma análise da incidência de realização de manobras durante um percurso. Nessa análise, foram levantados os seguintes indicadores de quantidade de manobras:

- Variação média do azimute calculado: Verificação da variação média que o azimute calculado realiza para um dado percurso. Quanto maior essa variação, maior a realização de manobras (Figura 50).
- Valores médios das diferenças de orientação: Verificação das diferenças médias que os azimutes geodésico e magnético acusam entre si, para cada ponto de um determinado teste. Esta distância tende a aumentar quando o veículo encontra-se em manobra, e, portanto, valores menores indicam que o veículo realizou menos manobras, pois quando em linha reta, os valores dos azimutes magnéticos e geodésicos ficam muito próximos (Figura 51).
- Proporção de pontos em que a distância diminui: Cada novo Pedido de status que o veículo informa contém, entre outras informações, qual a distância atual até o ponto de destino. Este indicador é fruto da verificação da quantidade de pontos em que a distância até o destino diminui em relação ao ponto anterior. Quanto maior for a proporção desta ocorrência em uma determinada missão, menos sinuoso é o trajeto. De forma análoga, quanto menor essa proporção, mais sinuoso é o trajeto (Figura 52).
- Proporção de pontos em que a distância aumenta: Verificação da quantidade de pontos em que a distância até o destino aumenta em relação ao ponto anterior. Assim como o item anterior, mas de forma inversa, proporções maiores indicam um trajeto mais sinuoso e menores indicam um trajeto menos sinuoso (Figura 52).
- Tempo de percurso: Verificação da duração do percurso. Quanto menor o tempo de percurso, menos sinuoso foi o caminho (Tabela 18).

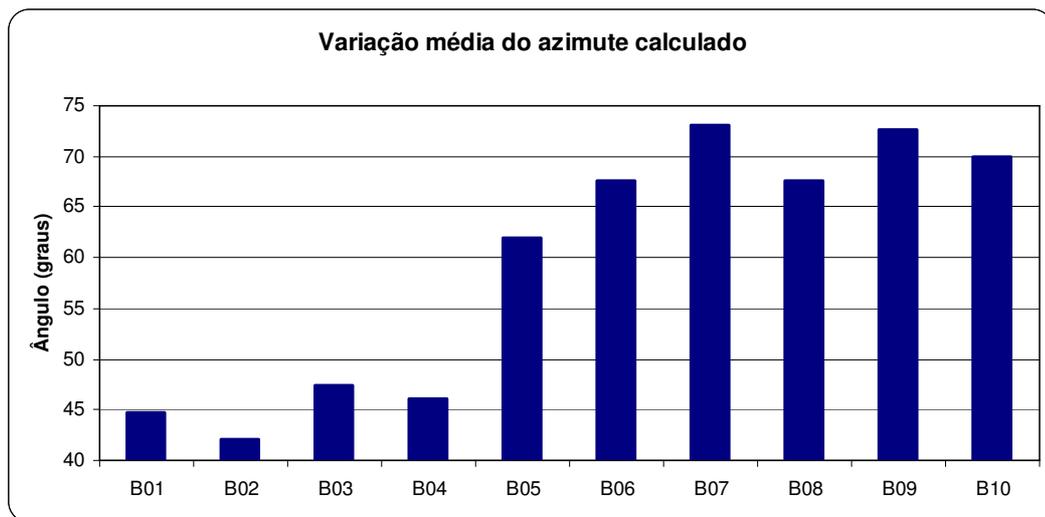


Figura 50 – Varição média do azimute calculado

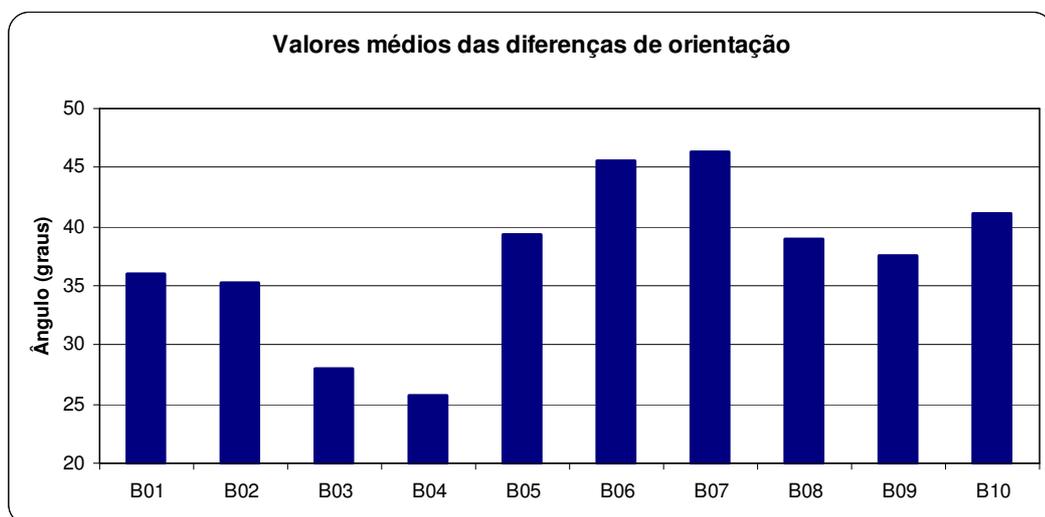


Figura 51 – Valores médios das diferenças de orientação

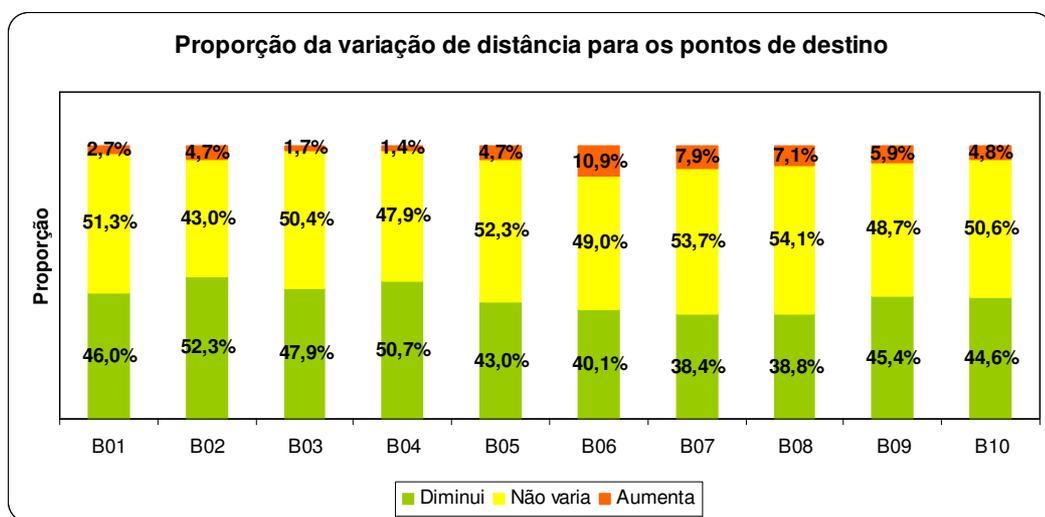


Figura 52 - Proporção da variação de distância para os pontos de destino

No gráfico da Figura 52, pode-se notar que a distância permanece igual em relação ao ponto anterior em grande parte dos testes. Essa característica pode ter duas causas, sendo a primeira, relacionada com a velocidade do veículo que se move menos do que 1 metro por segundo (1 m/s). A taxa de atualização dos pontos é de 1 segundo e a unidade de medida de distância é um valor inteiro em metros, portanto, pode haver a ocorrência de dois pontos subsequentes ainda com a mesma distância em relação ao ponto de destino. Outro fator é quando o veículo realiza manobras sinuosas muito acentuadas ou ainda em circunferência e, portanto, a distância pode não ter sofrido variação maior que um metro. Para utilizar essa medida como um indicador, seria necessário separar os dois fatores, o que não seria tarefa fácil ou até possível com as informações que se possui. Em função da presença dos outros indicadores, decidiu-se não utilizar esta medida como indicador.

Outro fator importante sobre a variação da distância é que o salto de distância decorrente da chegada a um ponto e conseqüente início de busca do próximo ponto não foi considerado para a geração do gráfico mostrado na Figura 52.

A partir dos indicadores analisados, foram escolhidas as duas melhores e as duas piores trajetórias dos testes, sendo B03 e B04 as melhores e B06 e B07 as piores. Esses testes foram analisados para melhor compreensão do seu comportamento.

A trajetória dos testes foi gerada sobre imagem digital (*Google Earth*), onde pode-se verificar a diferença entre os testes. As figuras 53, 54, 55 e 56 ilustram as trajetórias. Os pontos de destino estão indicados em vermelho, o ponto inicial do trajeto em amarelo, os pontos intermediários de chegada estão indicados em verde e o ponto final em azul.

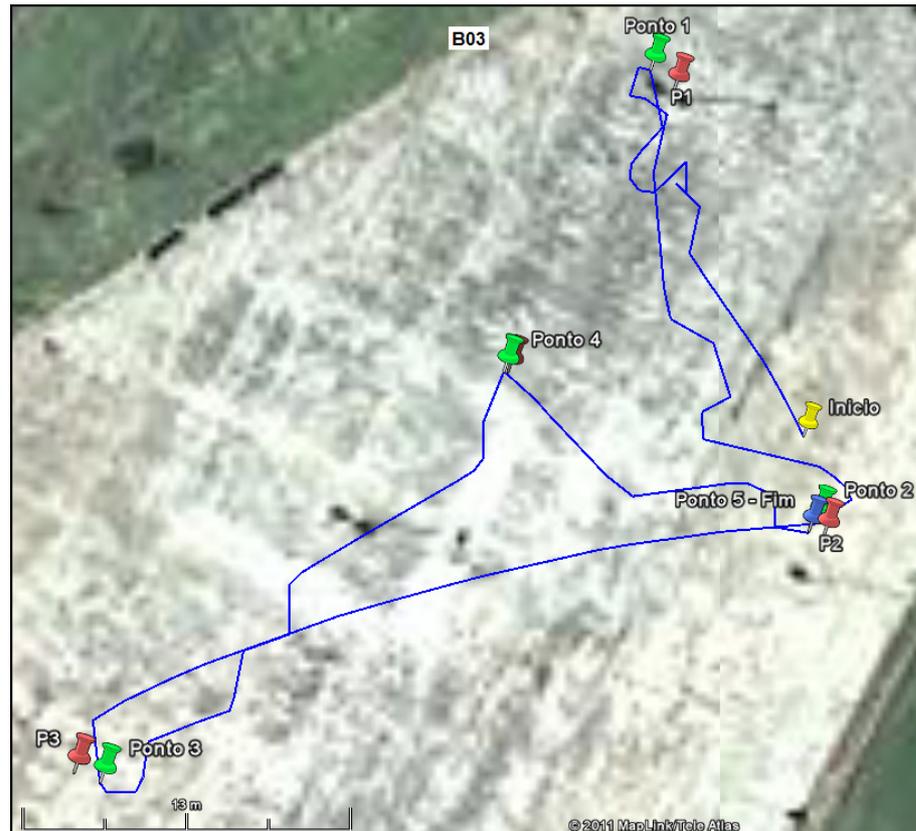


Figura 53 – Trajetória registrada do teste B03

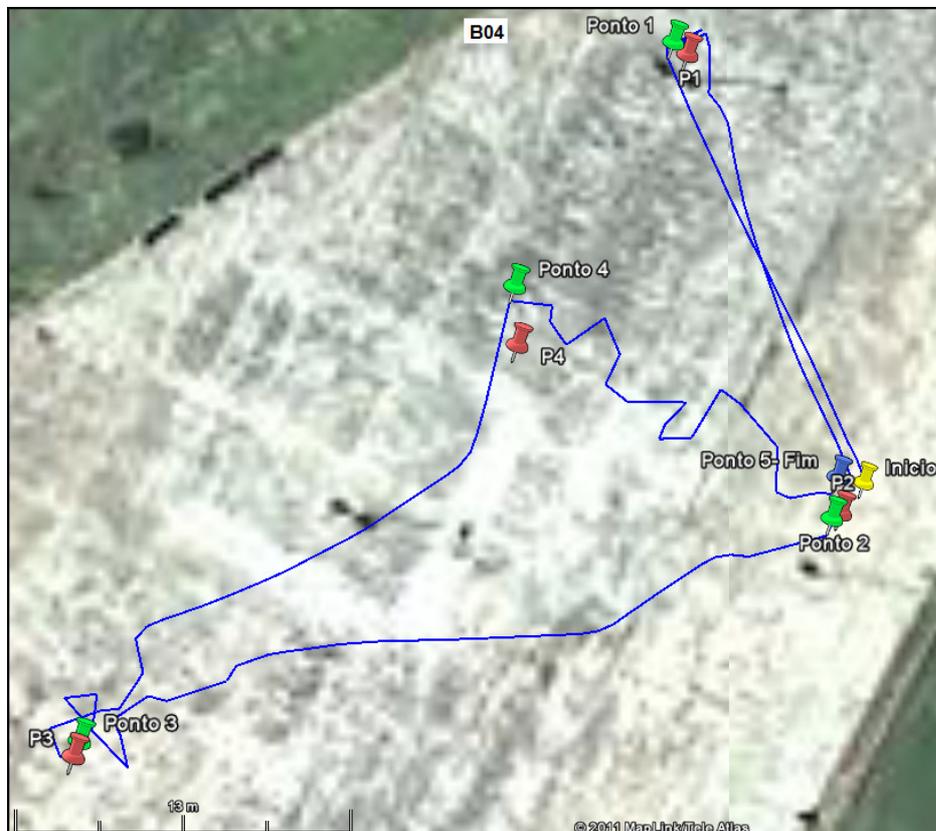


Figura 54 – Trajetória registrada do teste B04

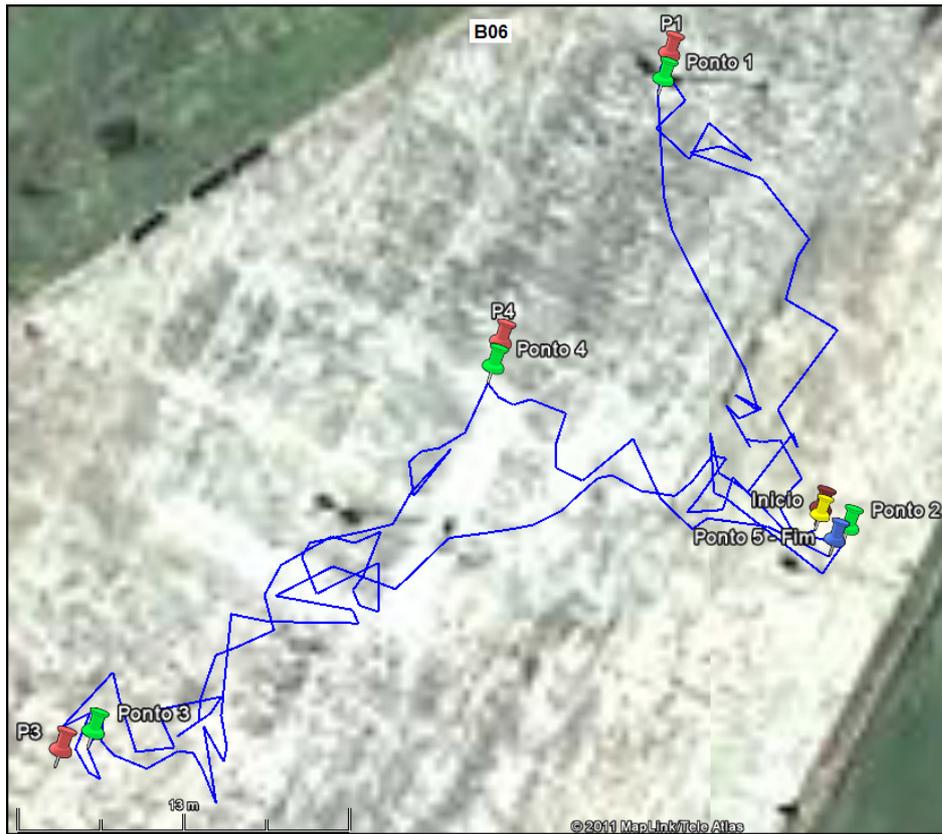


Figura 55 – Trajetória registrada do teste B06

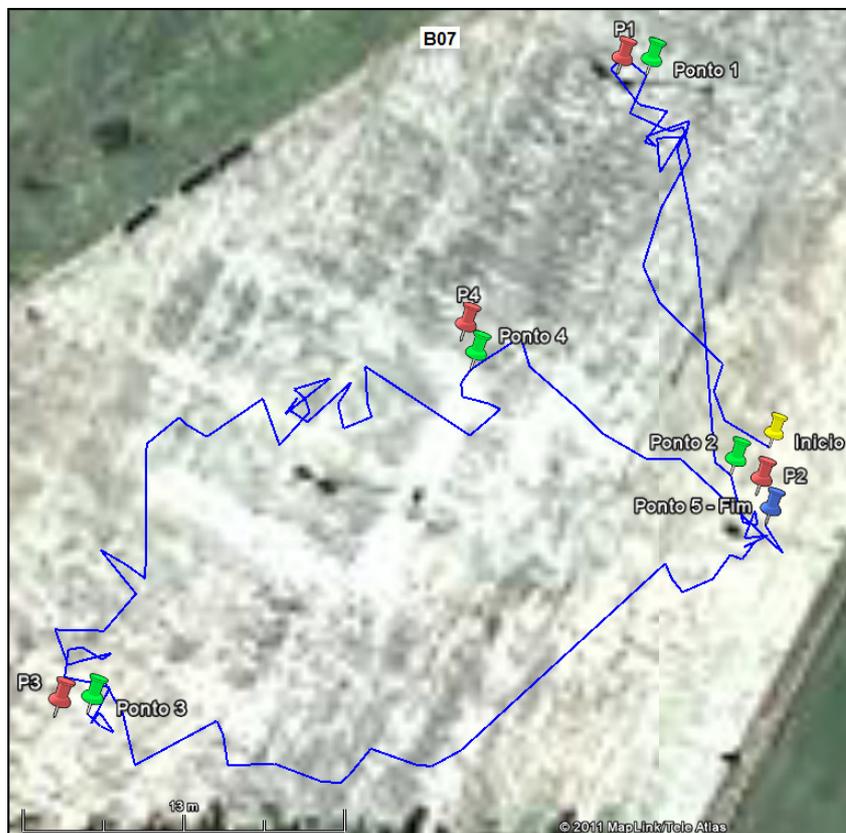


Figura 56 – Trajetória registrada do teste B07

É importante observar que as trajetórias apresentadas nas figuras anteriores não representam com fidelidade o trajeto percorrido pelo veículo, pois existem os problemas de precisão e acurácia e também de densidade de pontos por missão. Portanto, representam a trajetória aproximada que veículo realizou.

Nas imagens é notável a diferença encontrada entre os melhores e os piores testes. No primeiro caso, os trajetos dos testes B03 e B04 apresentam uma figura geométrica semelhante, com períodos de percurso em linhas retas ou pouco variadas entre os pontos de destino e linhas mais sinuosas próximas a estes. Os testes B06 e B07 fazem trajetos diferentes e irregulares, com poucos momentos de trajetória reta ou pouco sinuosa.

Para uma melhor verificação do trajeto do veículo, foi feito o levantamento de qual o azimute de destino que o veículo deveria assumir, a partir do ponto em que está em um dado momento, para se chegar ao próximo ponto de destino. De posse também do azimute calculado, pode-se comparar os dois de forma a verificar como o veículo se comporta em relação ao azimute de destino. Foram gerados gráficos que ilustram esse comportamento. Adicionalmente são indicados nos gráficos os momentos de chegada aos pontos de destino e os momentos em que o azimute calculado difere em mais de 20° do azimute de destino, quando então uma manobra é necessária. Os gráficos são exibidos nas figuras 57, 58, 59 e 60.

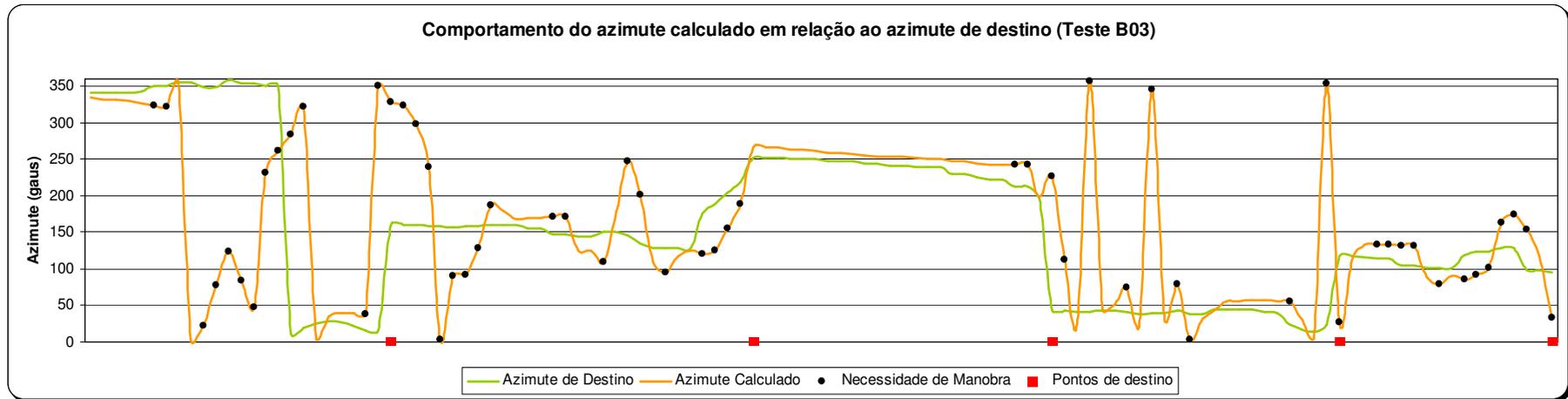


Figura 57 – Comportamento do azimute calculado em relação ao azimute de destino para o teste B03

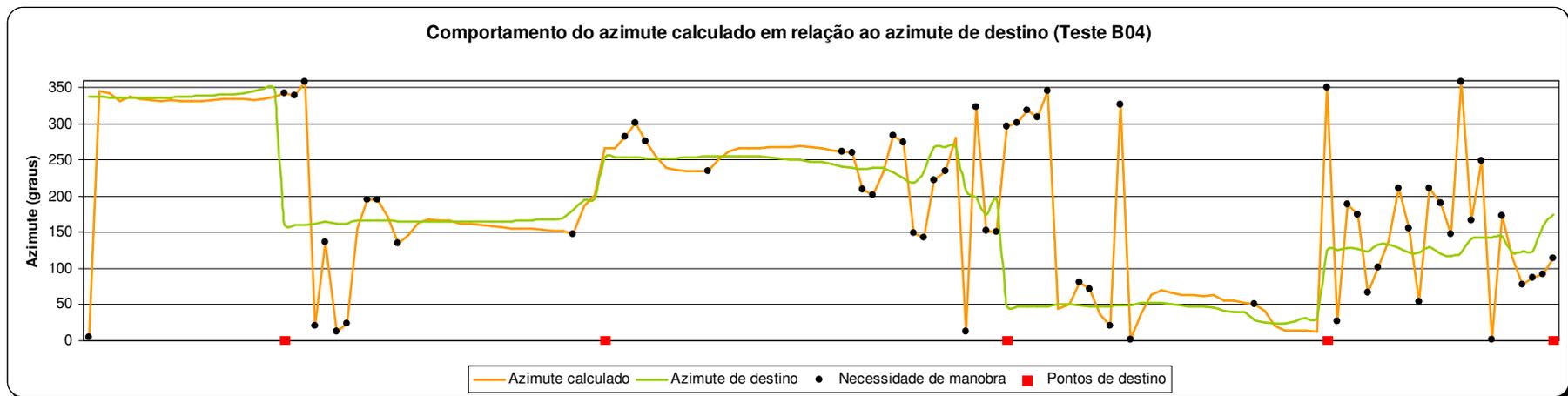


Figura 58 – Comportamento do azimute calculado em relação ao azimute de destino para o teste B04

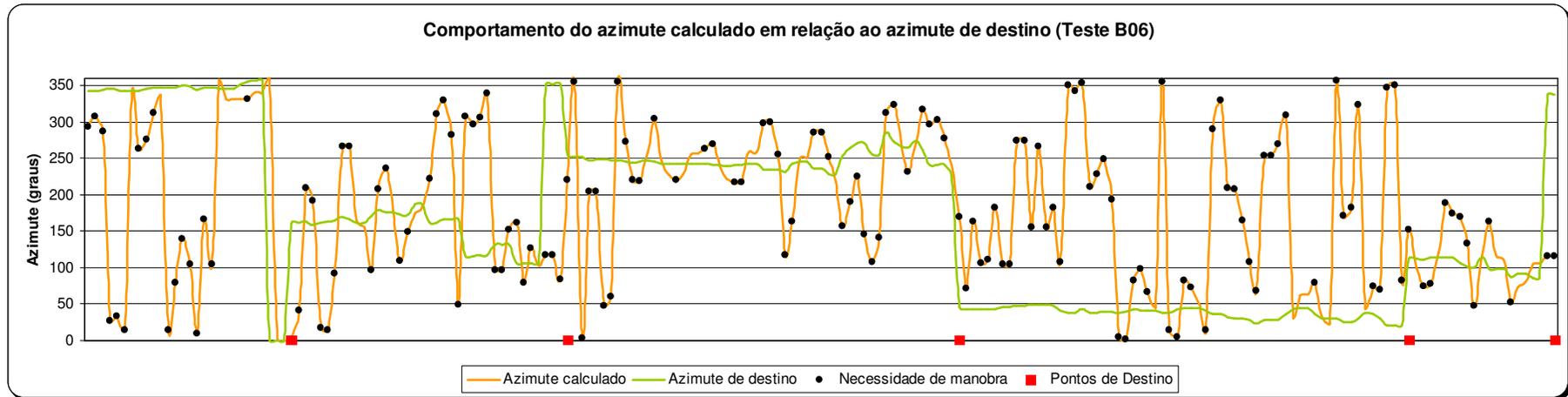


Figura 59 – Comportamento do azimuth calculado em relação ao azimuth de destino para o teste B06

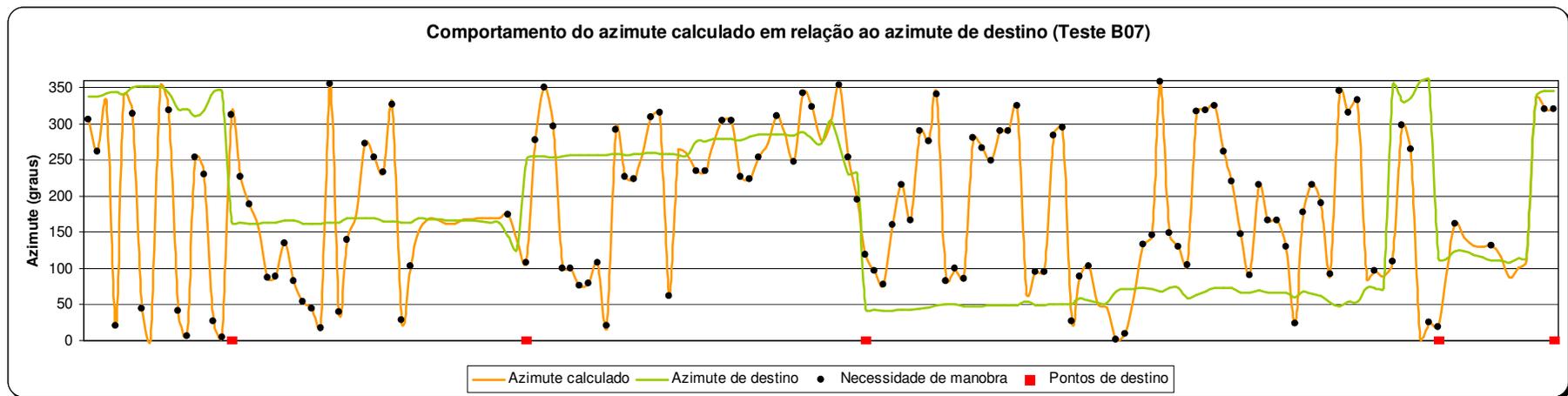


Figura 60 – Comportamento do azimuth calculado em relação ao azimuth de destino para o teste B07

Nos gráficos pode-se notar uma maior incidência de necessidades de se realizar manobras para os testes com piores trajetórias. Os testes B03 e B04 apresentaram 47,9% e 43,7%, respectivamente, de pontos com necessidade de manobras, enquanto que os testes B06 e B07 apresentaram 75,7% e 75,6%, respectivamente.

As diferenças de orientação podem ser, no máximo, de 180° . Nos testes analisados houve ocorrência de valores altos, sendo os valores máximos para os testes B03, B04, B06 e B07, respectivamente, 172° , 171° , 176° e 178° .

Essas diferenças, que aumentam de forma significativa durante a realização de manobras, fazem com que o azimute calculado seja obtido com erro. Dessa forma, freqüentemente ele estará com diferença maior que 20° do azimute de destino, provocando uma necessidade recorrente de manobras e criando um efeito em cadeia. Quanto mais manobras, maior a incidência de erros e mais necessidade de manobras.

Os gráficos apresentados nas figuras 61, 62, 63 e 64 demonstram a diferença de orientação para os testes analisados, onde pode-se ver sua correlação com o azimute calculado. Nota-se que quando a diferença de orientação é pequena, o azimute calculado sofre pequena variação, indicando que o veículo não realiza manobra.

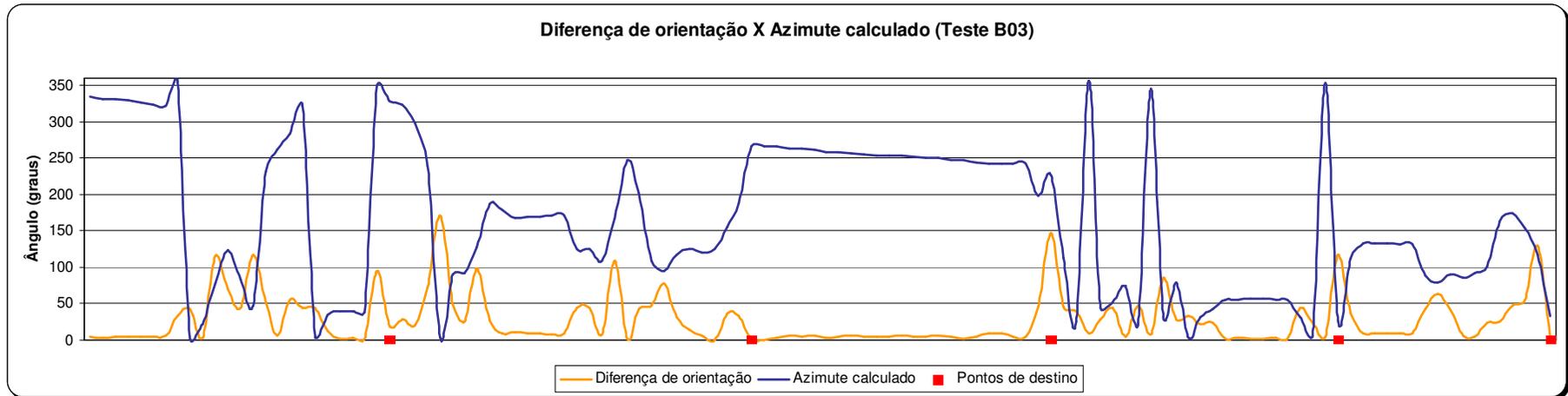


Figura 61 – Relação da diferença de orientação com o azimute calculado para o teste B03.

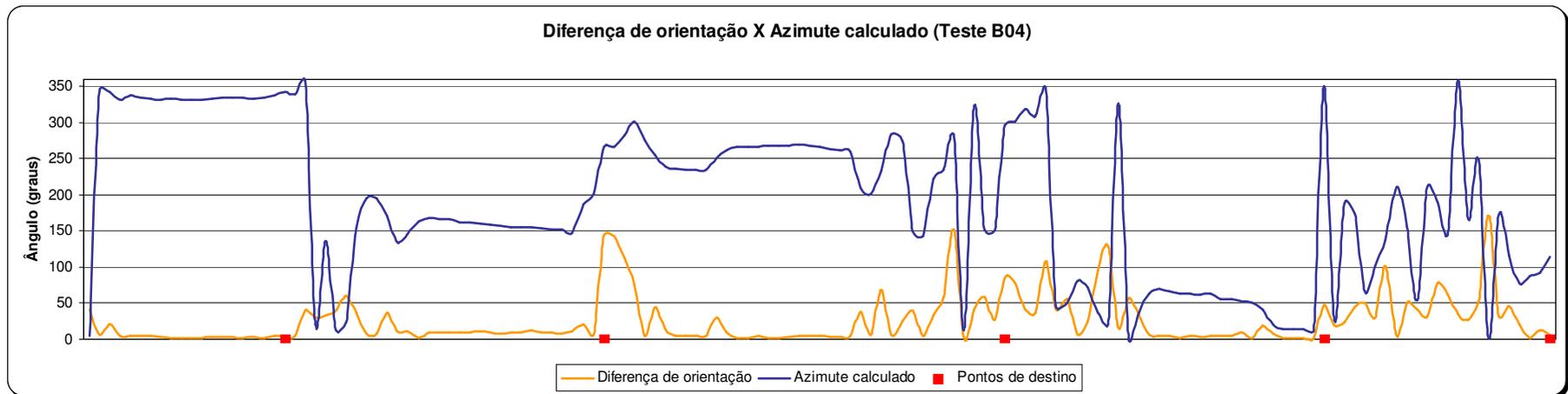


Figura 62 – Relação da diferença de orientação com o azimute calculado para o teste B04.

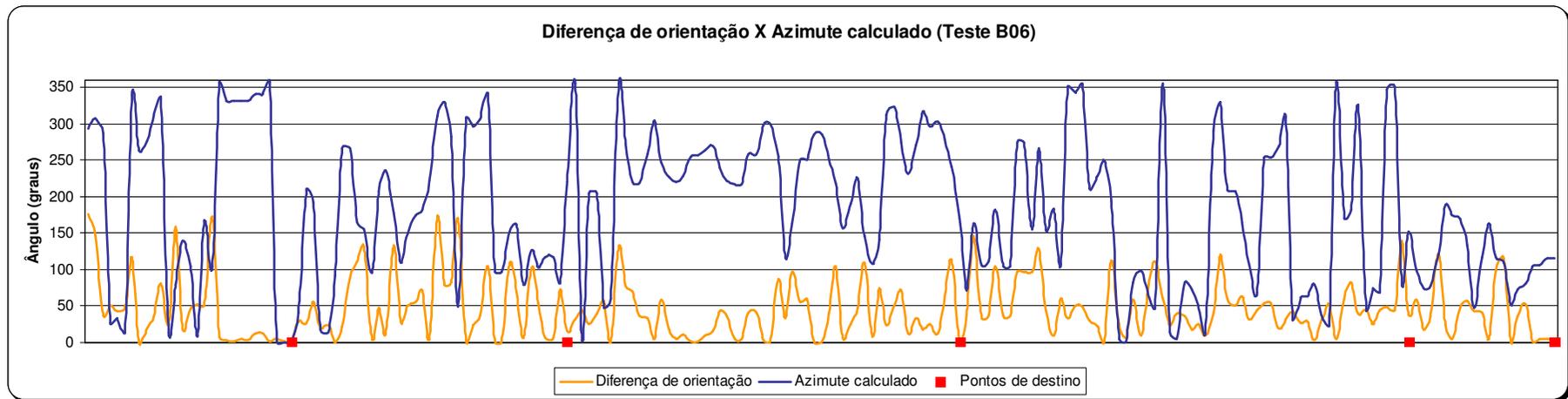


Figura 63 – Relação da diferença de orientação com o azimute calculado para o teste B06.

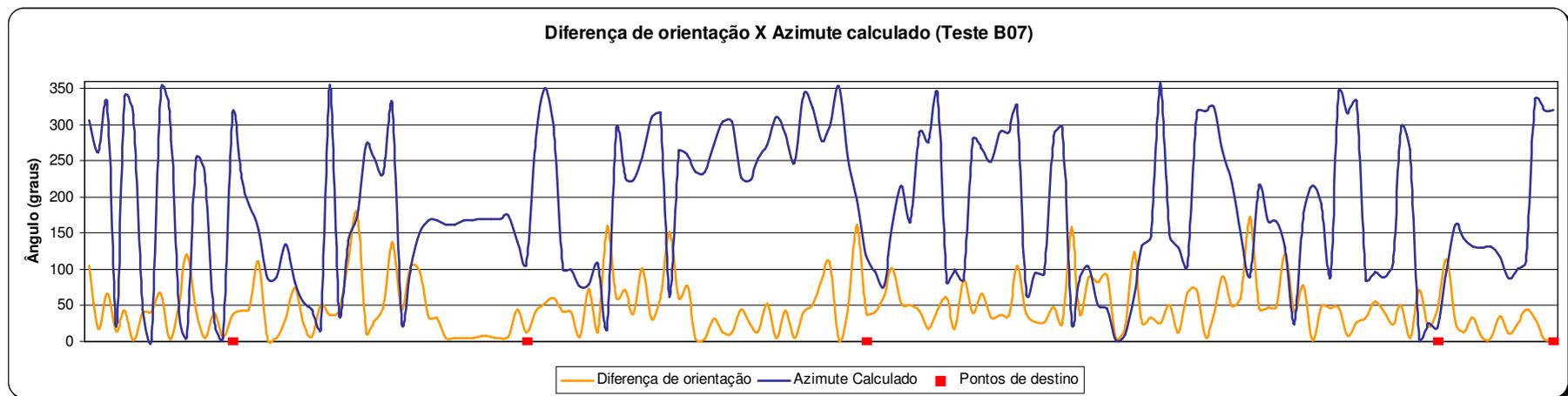


Figura 64 – Relação da diferença de orientação com o azimute calculado para o teste B07.

De todos os dados analisados, a diferença de orientação é, além de um indicador da quantidade de manobras que o veículo realiza, um dos problemas causadores da realização excessiva de manobras. Esse tipo de discrepância é natural acontecer quando o receptor GPS encontra-se sem movimento, entretanto ocorre também com o veículo em movimento, durante a realização de uma manobra.

O azimute magnético é mais estável e confiável que o geodésico, pois não faz sua mensuração relativa à medida anterior, e sim, de forma absoluta, através do campo magnético da Terra. Portanto, é possível que a discrepância esteja sendo causada pelo azimute geodésico.

A frequência de atualização dos azimutes é outra fonte de problema, pois ocorre a cada segundo, enquanto que o Sistema de Navegação, quando em missão, realiza os cálculos de distância e azimute calculado com uma frequência que varia entre 200 e 400 ms. Dessa forma, o veículo pode ter iniciado uma manobra e o Sistema de Navegação ainda estar informando valores de azimutes desatualizados.

4.3. RESULTADOS DO TESTE C

Para este teste, o trajeto do veículo foi uma linha reta entre os pontos P2 e P4 conduzido pelo operador da EMI com o veículo em modo REMOTO. O azimute geodésico ideal calculado entre as coordenadas destes pontos é $297,76^\circ$. Quando em movimento, o azimute geodésico informado pelo receptor GPS durante os testes foi, em média, $299,2^\circ$. Paralelamente, o azimute magnético sem aplicação da correção para declinação magnética foi, em média, 315° . Com aplicação da correção, o valor médio foi de 295° .

Pode-se notar, que com a correção da declinação magnética, o valor informado pela bússola eletrônica é muito próximo do valor do azimute ideal, assim como o azimute do receptor GPS. Entretanto, sem a correção, o azimute magnético foi, em média, $17,2^\circ$ maior que o azimute ideal, valor este relativamente distante do valor de declinação magnética de $20,51^\circ$, conforme informado pelo Observatório Nacional (Anexo A). O erro de $3,35^\circ$ pode ter várias causas, entre elas, o baixo volume de dados analisado, a precisão na fixação mecânica da bússola eletrônica ao veículo, os pequenos e rápidos desvios de rota executados para correção da

trajetória do veículo, a calibração da bússola eletrônica e o arredondamento para números inteiros, em graus, na aquisição do azimute através da bússola.

As figuras 65, 66, 67, 68 e 69 apresentam, para cada teste do tipo C, os gráficos que demonstram a relação entre os azimutes geodésico, magnético corrigido da declinação, calculado e ideal. Para a elaboração destes gráficos, foram descartados pontos iniciais e finais da trajetória, quando estes apresentavam velocidades baixas, indicando que o veículo estava parado. Dessa forma, elimina-se a discrepância que haveria em relação aos azimutes geodésicos incorretos informados pelo receptor GPS nesses momentos. É importante lembrar, que para tais velocidades, o Sistema de Navegação utiliza como referência apenas o azimute magnético.

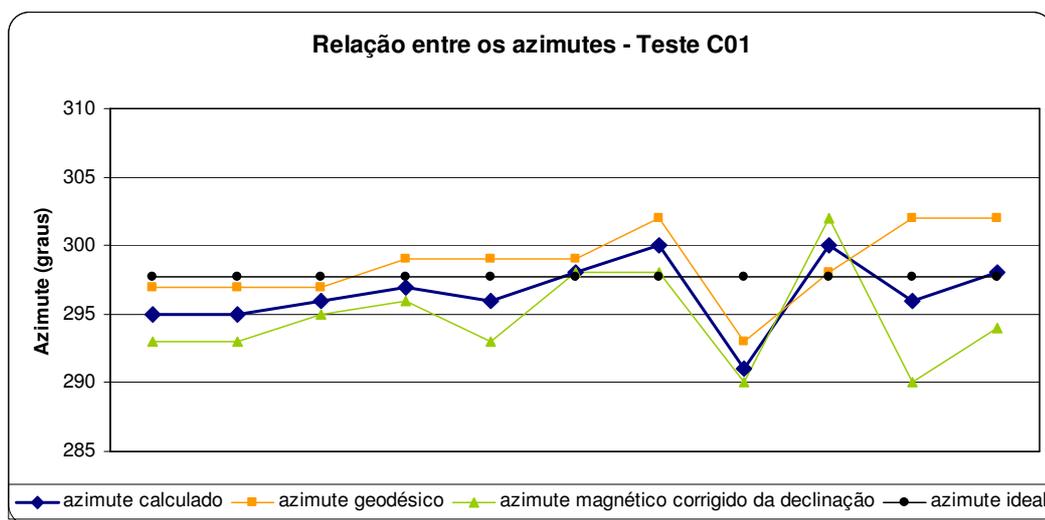


Figura 65 – Teste C01: Azimute calculado

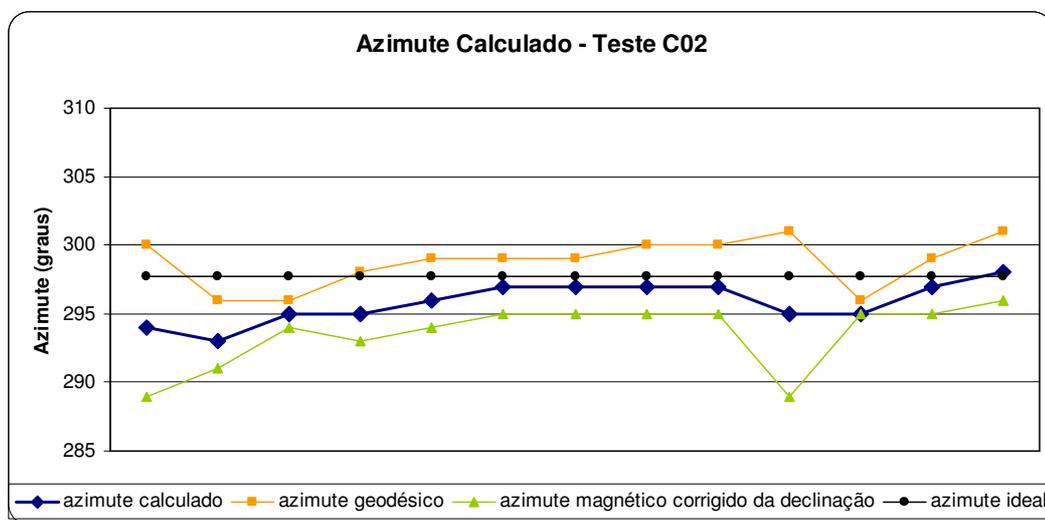


Figura 66 – Teste C02: Azimute calculado

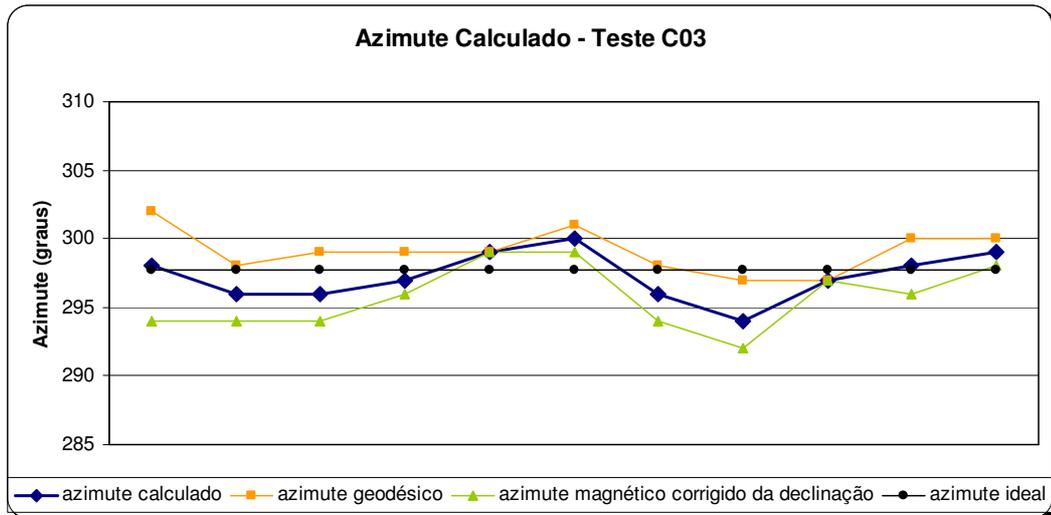


Figura 67 – Teste C03: Azimute calculado

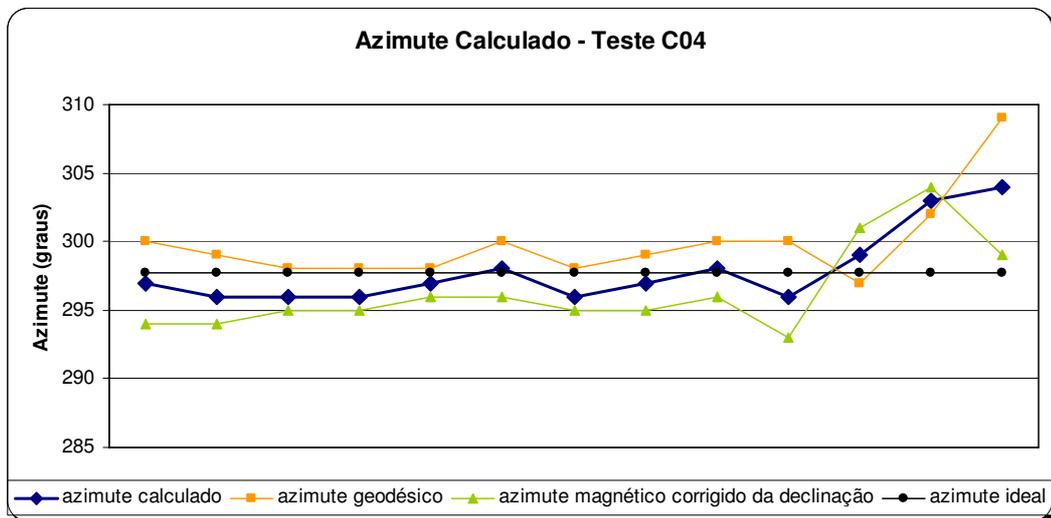


Figura 68 – Teste C04: Azimute calculado

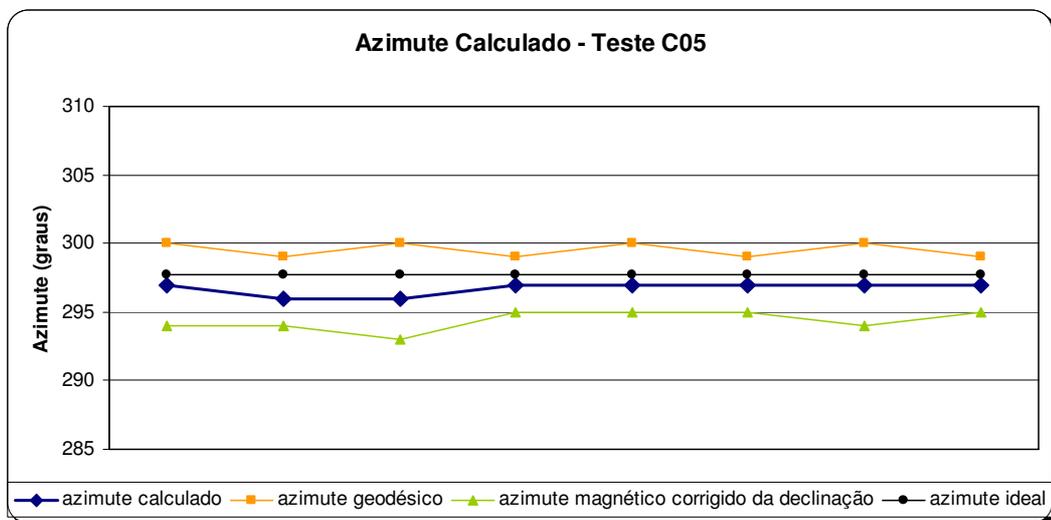


Figura 69 – Teste C05: Azimute calculado

Nos gráficos apresentados, pode-se observar que o azimute geodésico está predominantemente com valores acima do azimute ideal. De forma inversa o azimute magnético corrigido da declinação está predominantemente abaixo do azimute ideal, fazendo com que o azimute calculado esteja sempre muito próximo do azimute ideal, e portanto, uma boa solução para avaliar o sentido de deslocamento do veículo quando em linha reta (ou muito pouco sinuosa).

A tabela 19 apresenta os valores médios e seus respectivos desvios padrão para as diferenças absolutas entre os três azimutes abordados com relação ao azimute ideal, onde pode-se constatar que o azimute geodésico, neste caso, é uma informação mais acurada que o magnético corrigido da declinação, apresentando diferenças absolutas médias menores.

Tabela 19 - Valores médios e seus respectivos desvios padrão para a diferença absoluta entre os azimutes geodésico, magnético corrigido da declinação e calculado em relação ao azimute ideal

Teste	Azimute geodésico (graus)		Azimute magnético corrigido da declinação (graus)		Azimute calculado (graus)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
C01	2,16	1,78	3,89	2,55	2,12	1,78
C02	1,82	0,84	4,22	2,37	1,95	1,41
C03	1,61	1,26	2,53	1,71	1,43	1,01
C04	1,38	1,27	3,12	1,38	1,57	1,36
C05	1,74	0,53	3,38	0,74	1,01	0,46

A trajetória realizada pelo veículo, que é conhecida no plano físico horizontal, foi também gerada a partir das coordenadas informadas pelo veículo durante o trajeto. A primeira representa o percurso previsto feito pelo veículo, enquanto que a segunda representa o percurso registrado a partir das coordenadas informadas pelo receptor GPS. Portanto, são duas informações diferentes, e não se pode confundilas.

Foi gerado um arquivo KML para cada teste, o qual foi representado graficamente no aplicativo Google *Earth*.

As figuras 70, 71, 72, 73 e 74 ilustram, para cada teste, a imagem onde pode-se ver a trajetória prevista (reta em vermelho que une os pontos P2 e P4) e a trajetória registrada, em azul. Adicionalmente, são mostrados também os pontos inicial (*Point 0*) e final (*Point X*), onde $X+1$ é a quantidade total de pontos coletados para um dado teste.

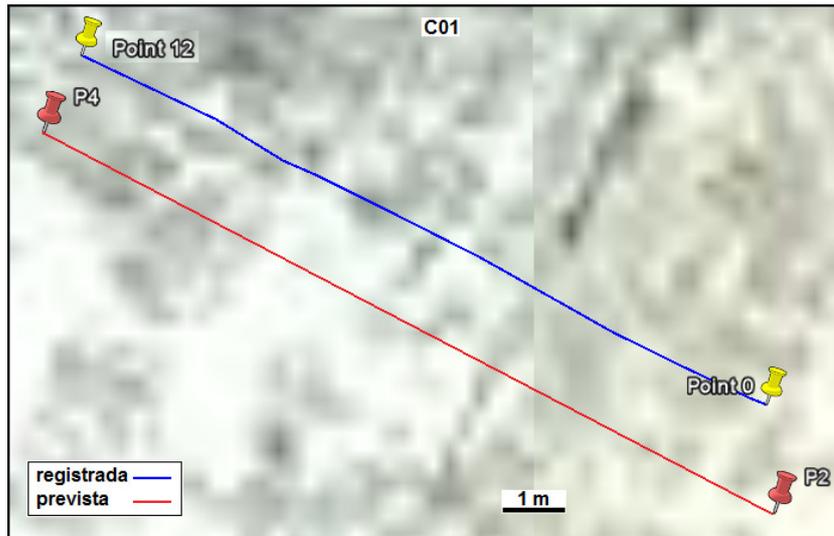


Figura 70 – Teste C01: Trajetória prevista x registrada

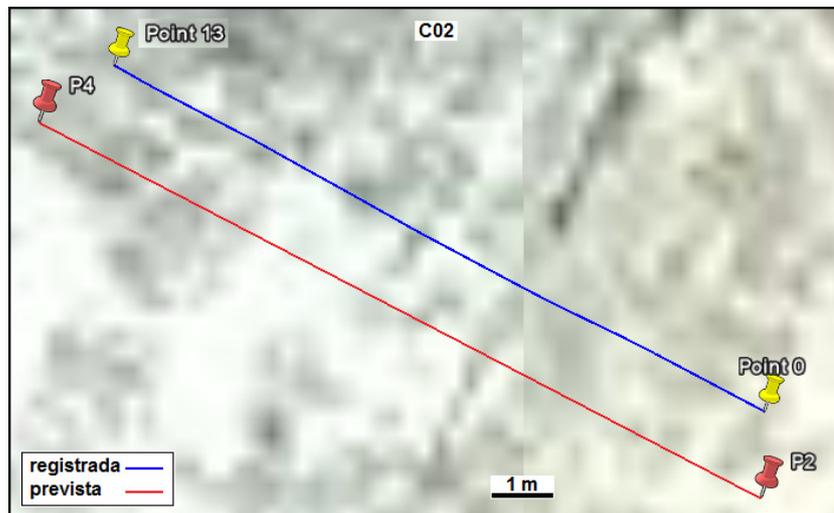


Figura 71 - Teste C02: Trajetória prevista x registrada

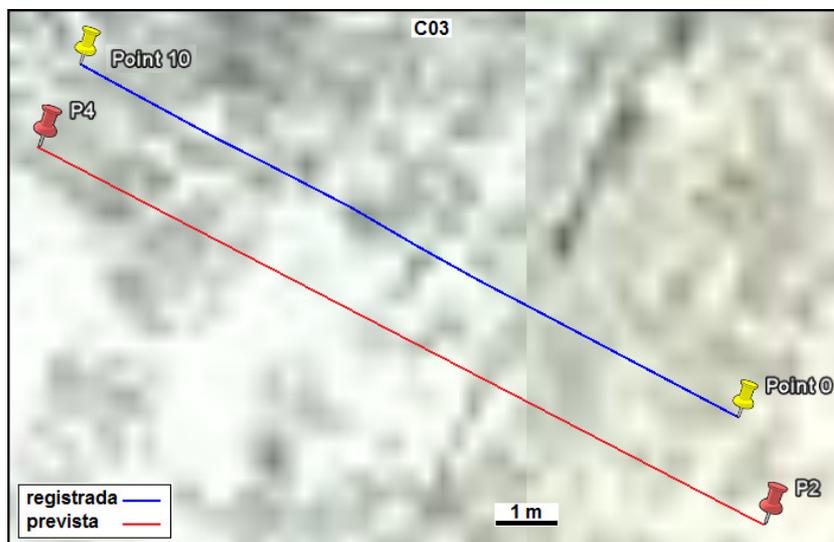


Figura 72 - Teste C03: Trajetória prevista x registrada

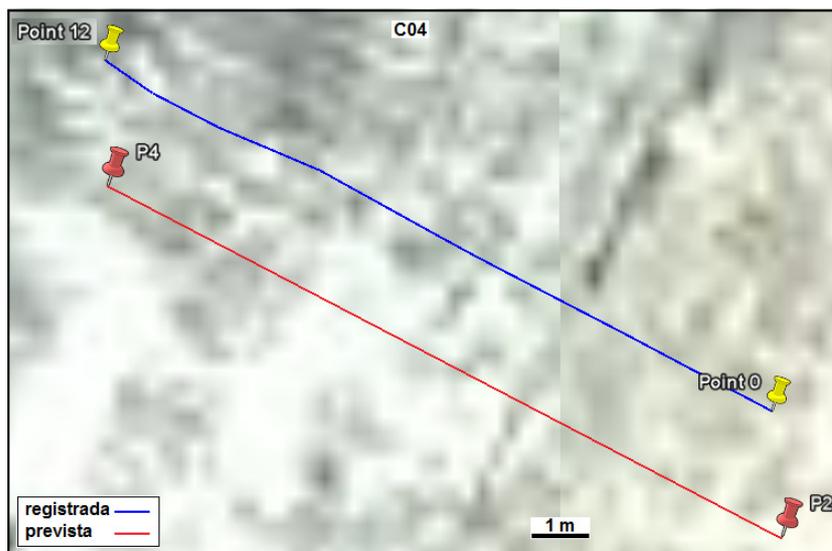


Figura 73 - Teste C04: Trajetória prevista x registrada

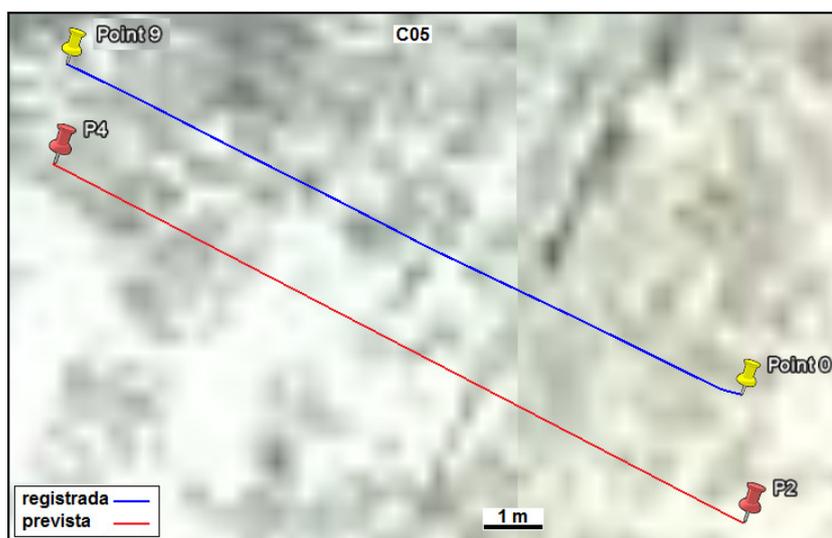


Figura 74 - Teste C05: Trajetória prevista x registrada

As trajetórias registradas apresentadas nas figuras demonstram um percurso praticamente paralelo ao trajeto previsto. As pequenas oscilações ocorridas podem estar correlacionadas com as variações na direção do trajeto do veículo, como possível fruto das correções de rota efetuadas pelo operador da EMI durante o teste, o que demonstra uma boa precisão do método de posicionamento, embora a presença de erro sistemático de posicionamento seja evidente.

As distâncias dos pontos de partida em relação ao P2 e dos pontos de chegada em relação ao P4 foram calculadas e apresentaram valores sempre abaixo de 2,4 m, como pode ser visto na tabela 20. Essas características demonstram que os erros sistemáticos de posicionamento se mantêm constantes para o período de

teste, mostrando uma variação pequena da acurácia, cujo desvio padrão foi de 0,36 m.

Tabela 20 - Distâncias calculadas entre pontos de partida/chegada com seus respectivos pontos de destino para o teste C

Teste	Distância (m)	
	Ponto de Partida em relação a P2	Ponto de Chegada em relação a P4
C01	1,86	1,45
C02	1,47	1,59
C03	1,90	1,55
C04	2,36	2,34
C05	2,34	1,80

A tabela 21 exibe informações da qualidade do posicionamento para os testes.

Tabela 21 - Qualidade média do posicionamento para o teste C

Teste	HDOP (média)	Número de satélites rastreados (média)	Erro horizontal estimado (m) (média)
C01	1	9	1
C02	1	9	1
C03	1	9	1
C04	1	9	1
C05	1	10	1

Devido ao curto tempo de cada teste (cerca de 25 segundos), a qualidade do posicionamento se manteve constante para todos os testes do tipo C.

5. CONCLUSÕES

Tratando-se de veículos terrestres autônomos, ainda há muita evolução a ocorrer para que estes veículos possam trafegar comercialmente e, portanto, seguramente no ambiente urbano. Em relação ao estado da arte, os maiores investimentos e esforços são aplicados ao sensoriamento, que é o elemento mais importante na segurança e navegação do veículo, sendo sua sensibilidade necessariamente proporcional ao nível de exposição no ambiente navegado.

O presente projeto, que teve como objetivo fazer um veículo em escala navegar de forma autônoma até um ponto com coordenadas conhecidas, se deu pela adaptação deste veículo, onde foram introduzidas as tecnologias necessárias para torná-lo autônomo, sendo também capaz de evitar colisões frontais e comunicar-se sem fio, e ainda monitorado e instruído remotamente em tempo real.

O trabalho necessário para se adaptar o veículo para que recebesse todos os sistemas e tecnologias necessários para controle, comunicação, posicionamento e sensoriamento, que a princípio tratar-se-ia de uma etapa inicial do projeto, para então a busca dos objetivos principais de navegação, logo se mostrou uma das mais trabalhosas e desafiadoras etapas do projeto, principalmente em função de sua multidisciplinaridade nas áreas da engenharia (mecânica, eletrônica e automação). A não existência prévia de um veículo já estruturado e a ausência de recursos à época para a aquisição de veículo nessas condições culminou na decisão de se construir uma plataforma.

Um fator positivo, e intencional, é que o veículo, tal como está neste momento, ainda tem capacidade para receber mais recursos e estruturas tecnológicas, tanto do ponto de vista computacional (algoritmos e capacidade de processamento) como físico, este último um pouco mais limitado, em função dos poucos espaços disponíveis e a restrição ao consumo de energia e também a quantidade de carga que poderá ser transportada.

Como trata-se de um primeiro projeto de estudo de veículos autônomos, e, portanto, uma nova linha de pesquisa no Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, certamente é uma boa plataforma para outros estudos, a qual agora estará disponível para o departamento.

A escolha pelo veículo rádio-controlado Colossus como plataforma para o projeto se mostrou adequada, pois além de possuir bom espaço interno e externo para alocação de componentes, este veículo mostrou um desempenho satisfatório durante a navegação, conseguindo superar pequenos obstáculos que havia no caminho, como irregularidades na superfície, pequenas pedras, trechos de vegetação, pequenos aclives, entre outros. A utilização do recurso de tração 4x4 certamente foi determinante para este bom desempenho.

Os Sistemas de Mobilidade, Posicionamento e Sensoriamento se mostraram funcionais em todos os modos de operação, tendo atingido com sucesso os requisitos de funcionalidade estipulados.

O Sistema de Comunicação, embora funcional, apresentou problemas ao reportar mensagens de Pedido de *status* duplicadas e, portanto, substituir mensagens novas, as quais foram perdidas. É necessário realizar uma análise do problema a fim de encontrar e eliminar as causas.

Os modos de operação INICIAL, REMOTO e AUTÔNOMO se mostraram funcionais e de comportamento coerente com a especificação e arquitetura geral do sistema.

O algoritmo de navegação autônoma desenvolvido para o projeto se mostrou funcional, fazendo com que o veículo atingisse com sucesso os pontos de destino em todos os experimentos realizados. Entretanto, a trajetória de navegação do veículo é ponto a ser melhorado para atenuar as sinuosidades de percurso, as quais estão relacionadas com a frequência de atualização de informações do receptor GPS e com as discrepâncias entre os azimutes geodésico e magnético encontradas a partir do teste B.

Em todas as referências bibliográficas consultadas a acurácia do GPS para posicionamento absoluto, em teoria, é de cerca de 10 metros. Em todos os testes tipo A efetuados, a acurácia atingida foi menor que 10 metros, sendo a maior delas 6,38 metros, a qual foi obtida em teste realizado às 13h32min (hora local) e a menor 12 centímetros, obtida em teste realizado às 14h12min (hora local). Estes resultados permitem concluir que o posicionamento do veículo está dentro da margem de erro imposta pelo método utilizado. Ainda assim, a realização de um teste com características semelhantes e faixa de horário diferente pode trazer informações esclarecedoras a respeito das variações de acurácia ocorridas.

Os resultados obtidos do teste C demonstram uma boa precisão do método de posicionamento utilizado, resultando em uma trajetória registrada praticamente paralela à trajetória prevista. Esse resultado é também fruto dos filtros aplicados ao posicionamento nos receptores GNSS modernos.

As diferenças de orientação quando o veículo trafega em linha reta são sempre pequenas, com um valor médio de 4,55 graus para os testes do tipo C, enfatizando que o aumento desta diferença está relacionado à realização de curvas.

6. TRABALHOS FUTUROS

A melhoria da trajetória de navegação do veículo é entendida como essencial para aumentar a capacidade de deslocamento do mesmo, diminuindo os tempos de percurso e não realizando trajetórias desnecessariamente sinuosas. Este progresso é possível através da melhoria do algoritmo de navegação. Estima-se que utilizar apenas o azimute magnético durante a realização de curvas, ou ainda quando a diferença de orientação for suficientemente grande, produza bons resultados, pois o azimute magnético possui disponibilidade praticamente instantânea, enquanto que o geodésico apenas a cada segundo. Adicionalmente, uma melhor análise e modelagem deste algoritmo certamente irá melhorar o desempenho. Entretanto, esta melhora deve encontrar seu limite na precisão e acurácia do sistema de posicionamento utilizado. É possível ainda fazer com que as rodas do veículo sejam gradativamente viradas, de forma a diminuir a velocidade angular do veículo, facilitando o alinhamento de seu azimute calculado com o azimute de destino. Fazer as rodas virarem proporcionalmente ao ângulo desejado é ainda uma maneira eficaz de alinhar o veículo ao seu azimute de destino, entretanto, neste caso, será necessário melhorar também o acoplamento mecânico no eixo de direção que possui folga de atuação ou ainda aplicar sensores para medir o deslocamento angular das rodas de direção.

Aprimorar a precisão e a acurácia do posicionamento é fator importante para a navegação do veículo. Esta pode ser aplicada através do uso de técnicas como GPS diferencial (DGPS) ou ainda o RTK. Uma solução para o segundo caso seria a aplicação de tecnologia NTRIP, a qual faz uso de dispositivos GSM para aquisição das correções. A vantagem desta aplicação é pela alta disponibilidade do sinal GSM ao longo do território e pela possibilidade de utilização de linhas de base de dezenas de quilômetros, se tornando uma opção interessante para um veículo autônomo.

Em um trabalho em que se avalia a tecnologia NTRIP (dissertação em fase de elaboração)¹⁴, foram obtidos resultados com precisões centimétricas quando utilizado receptor de dupla frequência.

No entanto, a disponibilidade de satélites GNSS não pode ser garantida de forma contínua, degradando a qualidade em locais com grande densidade de

¹⁴ Posicionamento preciso em tempo real: Associação entre o GNSS e o GSM, de autoria de Marcos Guandalini.

edificações e vegetação altas ou ainda não produzindo posicionamento em locais sem penetração dos sinais dos satélites, como túneis, garagens cobertas etc. Uma solução para este problema, que adicionalmente também melhora a qualidade do posicionamento, é a utilização de sistema de navegação inercial (INS) integrado ao sistema de posicionamento GNSS.

O INS é constituído por sensores inerciais que detectam o sentido e o deslocamento, possuindo a capacidade de proporcionar o posicionamento sem a necessidade de informação externa, a não ser uma posição inicial de referência.

Dispositivos denominados IMU (*Inertial Measurement Unit*) podem ser considerados como sistemas inerciais completos, os quais possuem giroscópios e acelerômetros que, atuando em conjunto, fornecem a aceleração e o sentido de deslocamento em 3 eixos, constituindo-se, portanto, do elemento mais importante da navegação inercial.

O INS possui como vantagem a determinação da posição continuamente. Por outro lado, a posição fornecida está sujeita a um erro cumulativo. Portanto, se a posição não for “calibrada” com frequência, discrepâncias significativas podem deteriorar a qualidade do posicionamento. Neste sentido, a posição advinda da utilização do GNSS pode ser empregada para calibrar o INS.

Assim, verifica-se que o emprego do GNSS para a navegação se completa com a utilização de um sistema INS e vice-versa. Erros de curto período do INS são relativamente pequenos, porém se degradam com o tempo. Em contrapartida, os erros de curto período do GNSS são maiores do que os do INS, mas não se degradam com o tempo. A integração entre estas duas tecnologias é obtida com muito sucesso com o uso do filtro de Kalman (GREWAL *et al*, 2007; GROVES, 2007; WANG *et al*, 2002).

O planejamento é elemento que pode ser empregado ao veículo através de algoritmos de rota que atuem sobre mapas digitais georeferenciados embarcados no veículo, de forma semelhante à que navegadores GPS o fazem atualmente. Entretanto, esta capacidade dá mais liberdade de atuação ao veículo, fazendo com que o sensoriamento seja um elemento de crescente importância, principalmente se considerado um ambiente dinâmico com possíveis barreiras no caminho. Dessa forma, o sensoriamento é um elemento que deve ser empregado ao veículo com a função não só de evitar colisão, mas também através de visão computacional, a fim de “criar uma representação interna do ambiente”, com o objetivo de identificar

objetos e atuar sobre a navegação e o planejamento. No entanto, entende-se este último item como um projeto que deve ser realizado em departamentos de computação e inteligência artificial, os quais já pesquisam e desenvolvem técnicas desta natureza há décadas, sendo, portanto, a área de engenharia de transportes usuária desta tecnologia.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABREU, M. A. **Análise da qualidade dos dados GPS: Um estudo de caso da estação de Cananéia**. 2007. 180 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BEKEY, G. A. **Autonomous robots: from biological inspiration to implementation and control**. Massachusetts: The Mit Press, 2005. 593 p.

BENEVENUTI, F. **Estimação de estado no subsistema de tração de um veículo de brinquedo**. São Paulo, dez. 2009. Estudo elaborado como parte da disciplina Fundamentos da Teoria da Estimação (PME5009), ministrada pelo professor Agenor de Toledo Fleury. Disponível em: <<http://www.scrib.com/doc/25865178>>. Acesso em: Mar. 2010

BLITZKOW, D.; ALMEIDA, F. G. V.; MATOS, A. C. O. C. **A forma da terra – A evolução no seu conhecimento**. Porto Alegre, 2008, v. 2, p. 101-109.

BLITZKOW, D. et al. **Informações espaciais II**. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. 153 p.

BRAID, D.; BROGGI, A.; SCHMIEDEL, G. The TerraMax autonomous vehicle concludes the 2005 DARPA grand challenge, **INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM 2006**. Tokyo, Japan, 2006.

CHEN, Q.; ÖZGÜNER, Ü.; REDMILL, K. Ohio State University at the 2004 DARPA grand challenge developing a completely autonomous vehicle, **IEEE Intelligent Systems Magazine**. Ohio State University. v. 19, n. 5, p. 8-11, 2004.

DARPA - DEFENSE ADVANCED RESEARCH PROJECTS AGENCY. **DARPA Grand Challenge 2004**. Disponível em: <<http://www.darpa.mil/grandchallenge04>>. Acesso em: Mai. 2009a.

_____. **DARPA grand challenge 2005**. Disponível em: <<http://www.darpa.mil/grandchallenge05>>. Acesso em: Mai. 2009b.

_____. **DARPA urban challenge 2007**. Disponível em: <<http://www.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>>. Acesso em: Mai. 2009c.

DICKMANN, E. D. Dynamic vision-based intelligence. **AI Magazine**. Menlo Park, 2004, v. 25, n. 2, p. 10-30.

DRANE, C.; RIZOS C. **Positioning systems in intelligent transportation systems**. Norwood: Artech House, 1997. 369 p.

EUROPEAN COMMISSION – Galileo. Disponível em:
<http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/galileo/index_en.htm>. Acesso em: fev. 2011

EUROPEAN SPACE AGENCY – Galileo. Disponível em:
<<http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>>. Acesso em: fev. 2011

FEDERAL SPACE AGENCY. Information-Analytical Centre – GLONASS. Disponível em:
<<http://www.glonass-ianc.rsa.ru>>. Acesso em: fev. 2011.

FISCHER, I. The figure of the earth – Changes in concepts. **Geophysical Surveys**, Washington, D.C., v. 2, n. 1, 1975.

FONSECA JR., E. S. **O sistema GPS como ferramenta para a avaliação da refração ionosférica no Brasil**. 2002. 176 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GAGE, D. W. UGV History 101: A brief history of unmanned ground vehicle (UGV) development efforts. **Unmanned Systems Magazine**. California, v.13, n. 3, 1995.

GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global positioning systems, inertial navigation, and integration**. 2nd Edition, New Jersey: Wiley, 2007. 525 p.

GROVES, P. D. **Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems**. Boston: Ed. Artech House, 2007. 518 p.

HOUSER, A.; PIEROWICZ, J.; FUGLEWICZ, D. **Concept of operations and voluntary operational requirements for lane departure warning system (LDWS) on-board commercial motor vehicles**. Federal Motor Carrier Safety Administration, U.S. Department of Transportation, Jul. 2005. Disponível em <<http://www.fmcsa.dot.gov/facts-research/research-technology/report/lane-departure-warning-systems.htm>>. Acesso em: Jun. 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS. **Relatório de Informação de Estação. Estação Politécnica – POLI**. 2007.

Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/RBMC/relatorio/Descritivo_POLI.pdf>. Acesso em: 26 Dez. 2010.

IGS - INTERNACIONAL GNSS SERVICE. **IGS Products**. 2011. Disponível em: <<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>> Acesso em: Fev. 2011.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **SI - Sistema Internacional de Unidades**. 8 ed. Rio de Janeiro, 2007 Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/Si.pdf>>. Acesso em: Dez. 2010.

LAPLANTE, P. A. **Real-time system design and analysis**. 3 ed. New York: John Willey & Sons, 2004. 528 p.

LEONARD, J. et al. A Perception-driven autonomous urban vehicle. **Journal of Field Robotics**, v. 25, n. 10, p. 727–774, 2008.

LUM, H.; REAGAN, J. A.; Interactive highway safety design model: Accident predictive module. **Public Roads Magazine**. v. 59, n. 2, 1995. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/95winter/p95wi14.cfm>> Acesso em: 23 Nov. 2009.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: UNESP, 2000. 287 p.

SILBERSCHATZ, A.; GALVIN, P. B.; GAGNE, G. **Operating systems concepts**. 7 ed. New York: John Willey & Sons, 2004. 886 p.

SINOTT, R.W. Virtues of the haversine. **Sky and Telescope Magazine**. Cambridge, v. 68, n. 2, 1984. 159 p.

TAYLOR, G.; BLEWITT, G. **Intelligent positioning: GIS – GPS unification**. West Sussex: Wiley, 2006. 181 p.

TANG, A.; YIP, A.; Collision avoidance timing analysis of DSRC-based vehicles. **Accident Analysis and Prevention Journal**. Melbourne, v. 42, n. 1, p.182-195, jan. 2010.

TERADA, K. **Current status of the japanese quasi-zenith satellite system (QZSS)**. 3 International Committee on GNSS, 2008. Disponível em: <<http://www.oosa.unvienna.org/pdf/icg/2008/icg3/08-0.pdf>> Acesso em: Dez. 2010.

THRUN, S. et al. Stanley the robot that won the DARPA grand challenge. **Journal of Field Robotics**. v. 23, n. 9, p. 661–692, 2006.

USNO – UNITED STATES NAVAL OBSERVATORY. USNO GPS timing operations. Disponível em <<http://tycho.usno.navy.mil/gps.html>>. Acesso em: 29 dez. 2010.

VAA, T.; PENTTINEN, M.; SPYROPOULOU, I. Intelligent transport systems and effects on road traffic accidents: State of the art. **IET Intelligent Transport Systems Journal**. v. 1, n. 2, p. 81-88, 2007.

VINCENY, T. Direct and inverse solutions of the geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. **Survey Review**. v. 23, n. 176, p. 88-93, 1975.

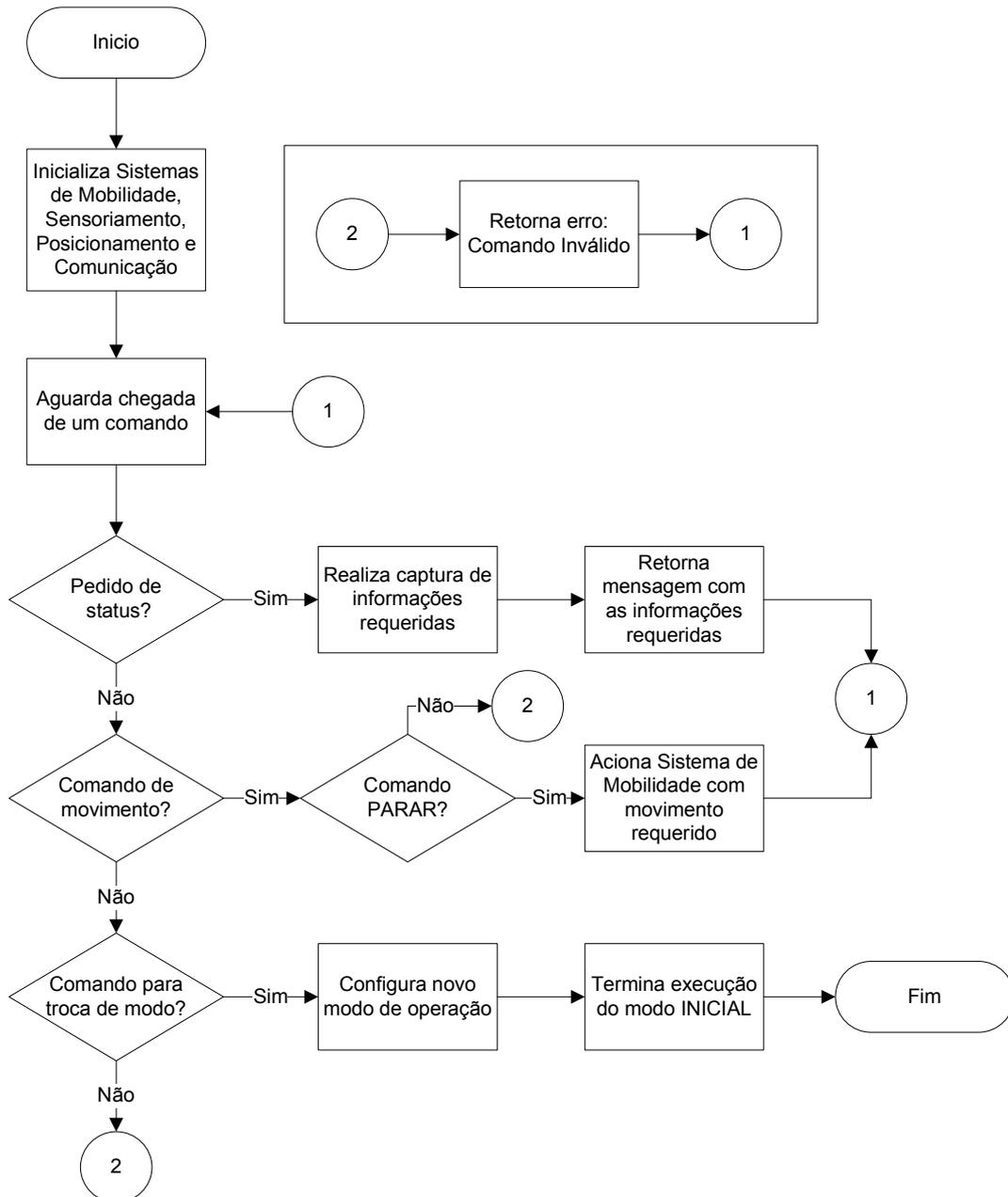
WANG, J.; LEE, H. K.; RIZOS, C. **GPS / INS integration: A performance sensitivity analysis**. Sydney, 2002.

WHITTAKER, W. R. L. **DARPA gran challenge technical paper**. Robotics Institute of Carnegie Mellon University. Pittsburg, 2004, v. 6.1.

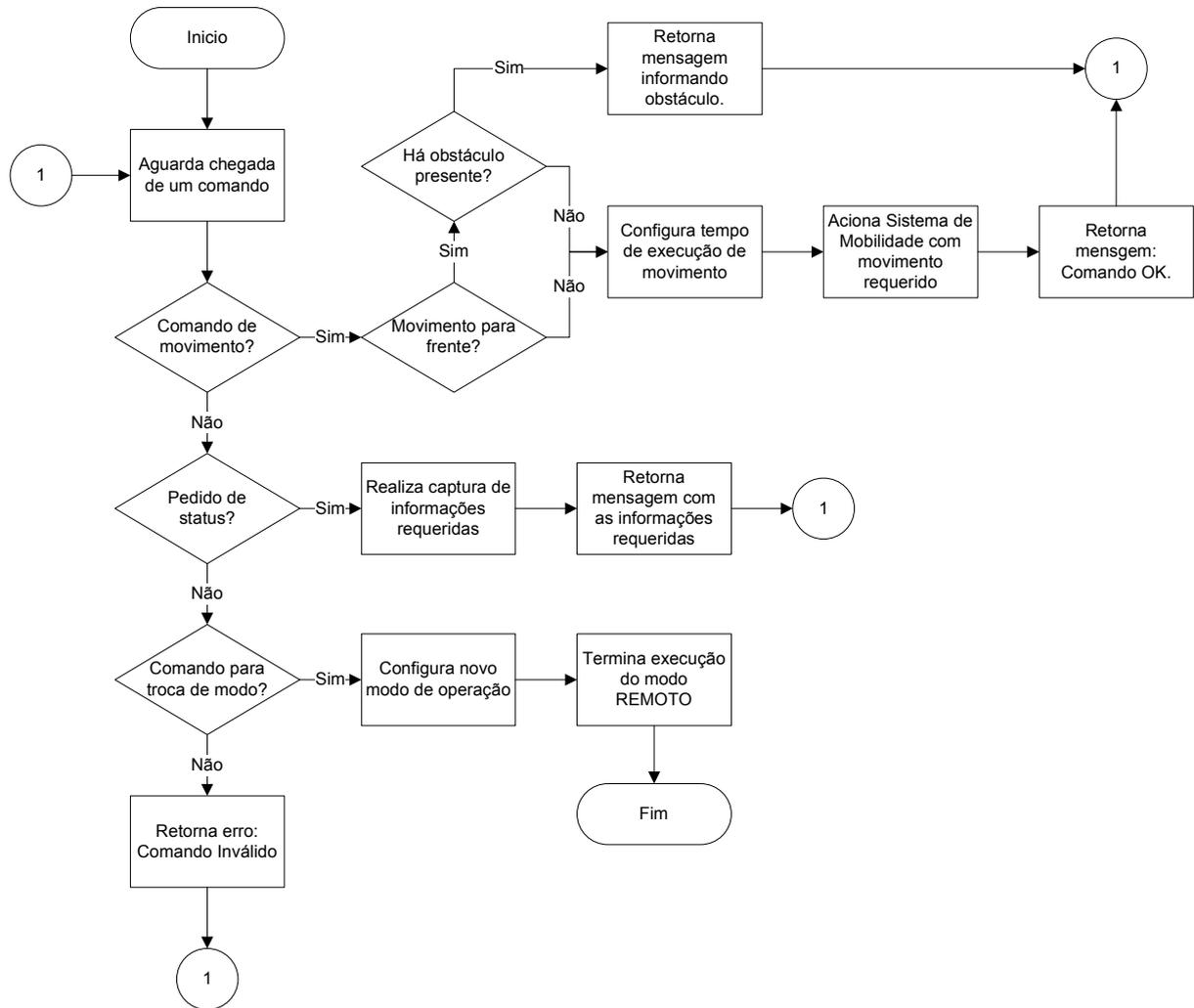
WHYTE, H. D. **A critical review of the state-of-the-art in autonomous land vehicle systems and technology**. Springfiled, 2001 (Sandia Report SAND2001-3685).

APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS DOS MODOS DE OPERAÇÃO

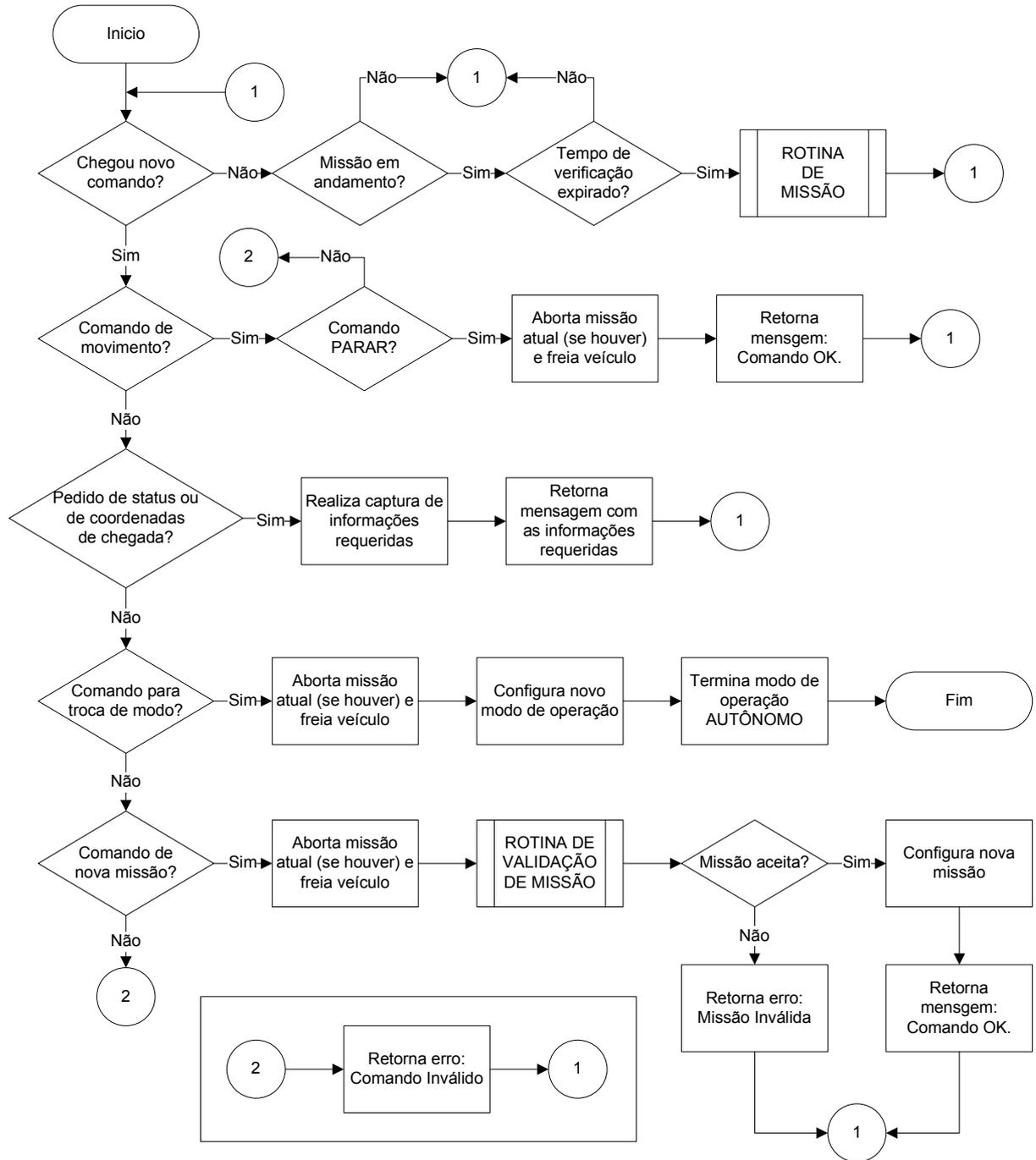
Modo Inicial

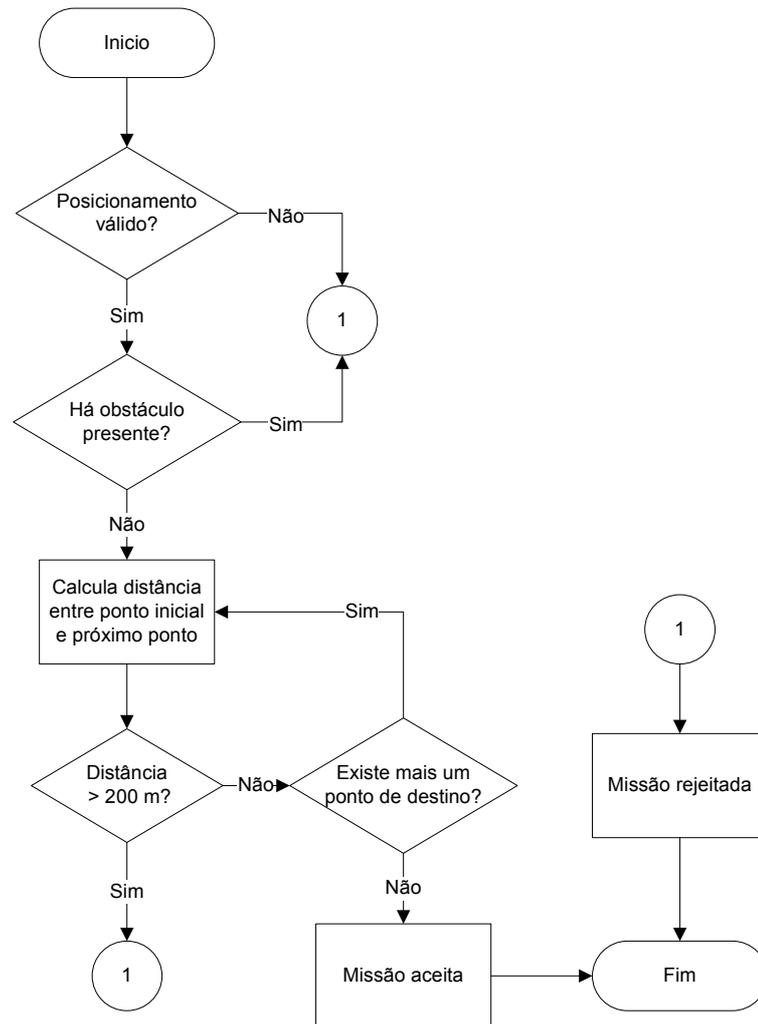


Modo Remoto

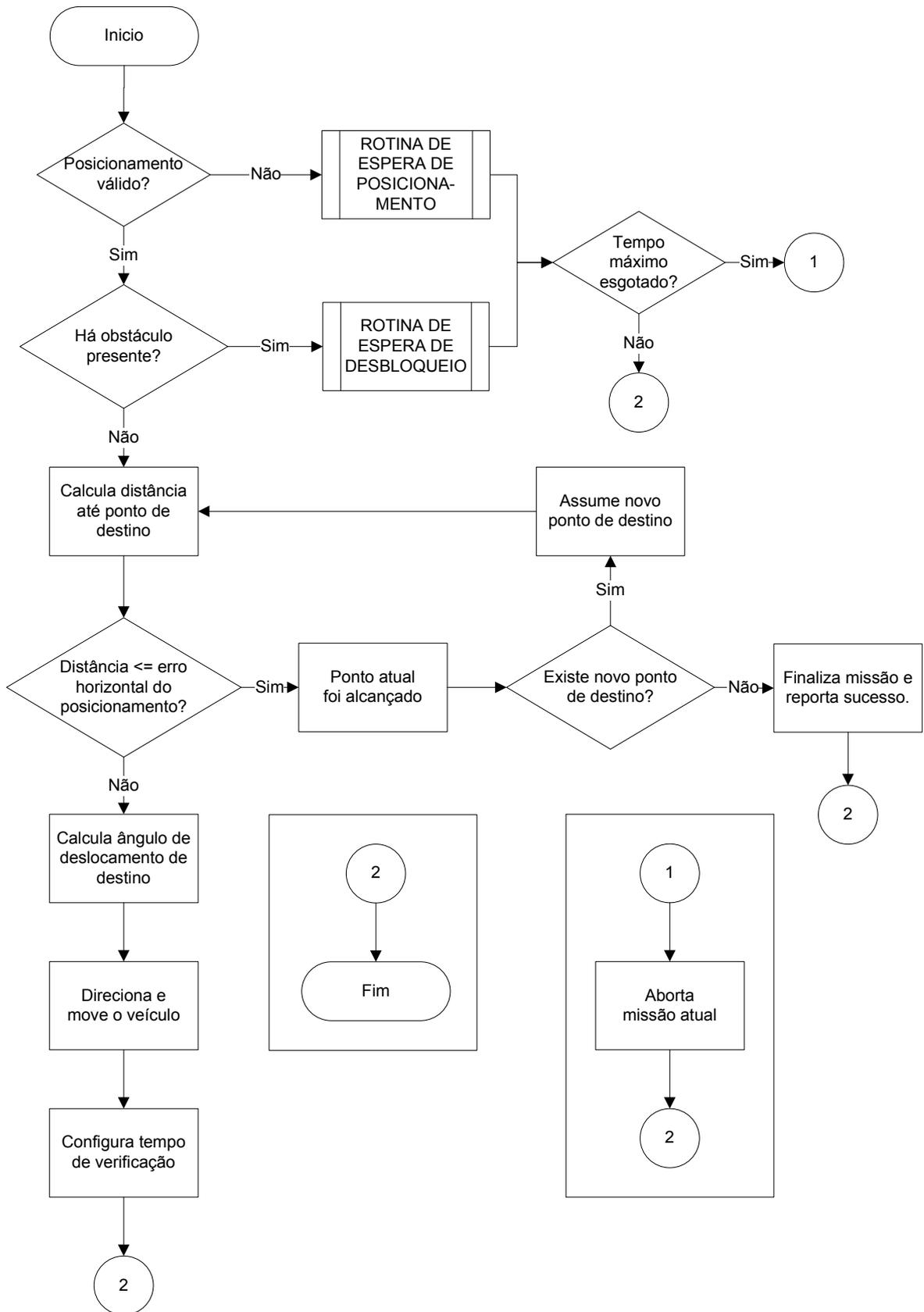


Modo Autônomo – Rotina Principal

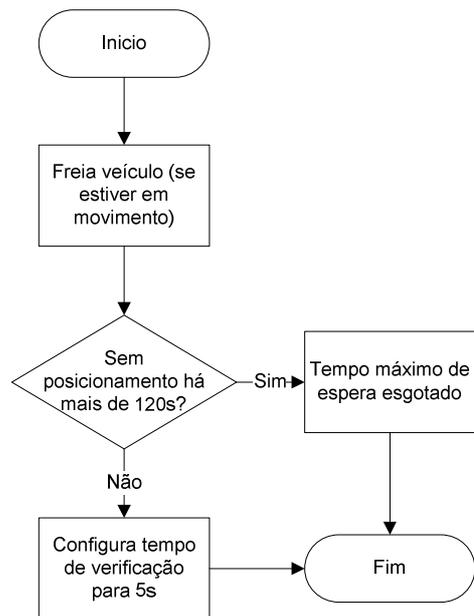


Modo Autônomo – Rotina de Validação de Missão

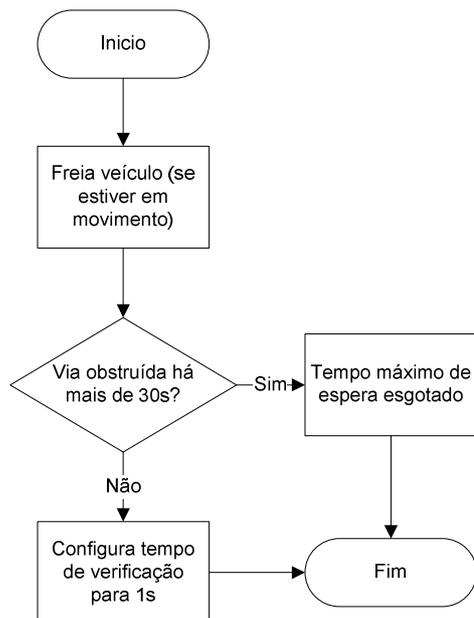
Modo Autônomo – Rotina de Missão



Modo Autônomo – Rotina de Espera de Posicionamento



Modo Autônomo – Rotina de Espera de Desbloqueio de Via



ANEXO A – VALORES DE DECLINAÇÃO MAGNÉTICA CALCULADOS PARA O MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

Declinação Magnética Observatório Nacional – MCT (<http://obsn3.on.br/~jlk/magdec/index.html>)

Localidade: SAO PAULO - SP
Ano: 2011

MODEL: IGRF-11

GEODESIC TYPE

Latitude: -23DEG -32MIN -50SEC

Longitude: 46DEG 38MIN 9SEC

	DATE	D	I	H	X	Y	Z	F
1	1 2011	-20.50	-35.50	18718	17532	-6555	-13350	22991
2	1 2011	-20.50	-35.50	18717	17532	-6555	-13350	22991
3	1 2011	-20.50	-35.50	18717	17532	-6555	-13350	22991
4	1 2011	-20.50	-35.50	18717	17531	-6555	-13351	22991
5	1 2011	-20.50	-35.50	18717	17531	-6555	-13351	22991
6	1 2011	-20.50	-35.50	18716	17531	-6555	-13351	22990
7	1 2011	-20.50	-35.50	18716	17531	-6555	-13351	22990
8	1 2011	-20.50	-35.50	18716	17530	-6555	-13352	22990
9	1 2011	-20.50	-35.50	18716	17530	-6555	-13352	22990
10	1 2011	-20.50	-35.51	18716	17530	-6555	-13352	22990
11	1 2011	-20.50	-35.51	18715	17530	-6555	-13353	22990
12	1 2011	-20.50	-35.51	18715	17529	-6555	-13353	22990
13	1 2011	-20.50	-35.51	18715	17529	-6555	-13353	22990
14	1 2011	-20.50	-35.51	18715	17529	-6556	-13353	22990
15	1 2011	-20.51	-35.51	18714	17529	-6556	-13354	22990
16	1 2011	-20.51	-35.51	18714	17529	-6556	-13354	22990
17	1 2011	-20.51	-35.51	18714	17528	-6556	-13354	22990
18	1 2011	-20.51	-35.51	18714	17528	-6556	-13354	22990
19	1 2011	-20.51	-35.51	18714	17528	-6556	-13355	22990
20	1 2011	-20.51	-35.51	18713	17528	-6556	-13355	22990
21	1 2011	-20.51	-35.51	18713	17527	-6556	-13355	22990
22	1 2011	-20.51	-35.52	18713	17527	-6556	-13355	22990
23	1 2011	-20.51	-35.52	18713	17527	-6556	-13356	22990
24	1 2011	-20.51	-35.52	18712	17527	-6556	-13356	22990
25	1 2011	-20.51	-35.52	18712	17526	-6556	-13356	22990
26	1 2011	-20.51	-35.52	18712	17526	-6556	-13356	22990
27	1 2011	-20.51	-35.52	18712	17526	-6556	-13357	22990
28	1 2011	-20.51	-35.52	18712	17526	-6556	-13357	22990
29	1 2011	-20.51	-35.52	18711	17525	-6556	-13357	22990
30	1 2011	-20.51	-35.52	18711	17525	-6556	-13357	22990
31	1 2011	-20.51	-35.52	18711	17525	-6556	-13358	22990

D is declination in degrees (+ve east)

I is inclination in degrees (+ve down)

H is horizontal intensity in nT

X is north component in nT

Y is east component in nT

Z is vertical component in nT (+ve down)
 F is total intensity in nT

 SECULAR VARIATION (SV)

DATE	D	I	H	X	Y	Z	F
2011	-7.50	-18.70	-81	-91	-9	-95	-10

 SV is secular variation (annual rate of change)
 Units for SV: minutes/yr (D & I); nT/yr (H,X,Y,Z & F)

D is SV in declination in minutes/yr (+ve east)
 I is SV in inclination in minutes/yr (+ve down)
 H is SV in horizontal intensity in nT/yr
 X is SV in north component in nT/yr
 Y is SV in east component in nT/yr
 Z is SV in vertical component in nT/yr (+ve down)
 F is SV in total intensity in nT/yr

ANEXO B – CONTEÚDO DAS MENSAGENS UTILIZADAS DO RECEPTOR GPS

Geodetic Navigation Data

Geodetic Navigation Data – Message ID 41

Name	Bytes	Description
Message ID	1 U	Hex 0x29 (decimal 41)
Nav Valid	2 D	<p>0x0000 = valid navigation (any bit set implies navigation solution is not optimal);</p> <p>Bit 0 ON: solution not yet overdetermined¹ (< 5 SVs), OFF: solution overdetermined¹ (>= 5 SV)</p> <p>Bits 1 – 2 : Reserved Bits 8 – 14 : Reserved (The following are for SiRFDRive only)</p> <p>Bit 3 ON : invalid DR sensor data Bit 4 ON : invalid DR calibration Bit 5 ON : unavailable DR GPS-based calibration Bit 6 ON : invalid DR position fix Bit 7 ON : invalid heading (The following is for SiRFNav only)</p> <p>Bit 15 ON : no tracker data available</p>
NAV Type	2 D	<p>Bits 2 – 0 : GPS position fix type</p> <p>000 = no navigation fix 001 = 1-SV KF solution 010 = 2-SV KF solution 011 = 3-SV KF solution 100 = 4 or more SV KF solution 101 = 2-D least-squares solution 110 = 3-D least-squares solution 111 = DR solution (see bits 8, 14-15)</p> <p>Bit 3 : TricklePower in use Bits 5 – 4 : altitude hold status</p> <p>00 = no altitude hold applied 01 = holding of altitude from KF 10 = holding of altitude from user input 11 = always hold altitude (from user input)</p> <p>Bit 6 ON : DOP limits exceeded Bit 7 ON : DGPS corrections applied Bit 8 : Sensor DR solution type (SiRFDRive only)</p> <p>1 = sensor DR 0 = velocity DR² if Bits 0 – 2 = 111; else check Bits 14-15 for DR error status</p> <p>Bit 9 ON : navigation solution overdetermined¹ Bit 10 ON : velocity DR² timeout exceeded Bit 11 ON : fix has been edited by MI functions Bit 12 ON : invalid velocity Bit 13 ON : altitude hold disabled Bits 15 – 14 : sensor DR error status (SiRFDRive only)</p> <p>00 = GPS-only navigation 01 = DR calibration from GPS 10 = DR sensor error 11 = DR in test</p>

Extended Week Number	2 U	GPS week number; week 0 started January 6 1980. This value is extended beyond the 10-bit value reported by the SVs.
TOW	4 U	GPS time of week in seconds $\times 10^3$
UTC Year	2 U	UTC time and date. Seconds reported as integer milliseconds only
UTC Month	1 U	
UTC Day	1 U	
UTC Hour	1 U	
UTC Minute	1 U	
UTC Second	2 U	
Satellite ID List	4 D	
Latitude	4 S	In degrees (+ = North) $\times 10^7$
Longitude	4 S	In degrees (+ = East) $\times 10^7$
Altitude from Ellipsoid	4 S	In meters $\times 10^2$
Altitude from MSL	4 S	In meters $\times 10^2$
Map Datum ³	1 S	See footnote
Speed Over Ground (SOG)	2 U	In m/s $\times 10^2$
Course Over Ground (COG, True)	2 U	In degrees clockwise from true north $\times 10^2$
Magnetic Variation	2 S	Not implemented
Climb Rate	2 S	In m/s $\times 10^2$
Heading Rate	2 S	deg/s $\times 10^2$ (SiRFDRive only)
Estimated Horizontal Position Error	4 U	EHPE in meters $\times 10^2$
Estimated Vertical Position Error	4 U	EVPE in meters $\times 10^2$
Estimated Time Error	4 U	ETE in seconds $\times 10^2$ (SiRFDRive only)
Estimated Horizontal Velocity Error	2 U	EHVE in m/s $\times 10^2$ (SiRFDRive only)
Clock Bias	4 S	In m $\times 10^2$
Clock Bias Error	4 U	In meters $\times 10^2$ (SiRFDRive only)
Clock Drift ⁴	4 S	In m/s $\times 10^2$
Clock Drift Error	4 U	In m/s $\times 10^2$ (SiRFDRive only)
Distance	4 U	Distance traveled since reset in meters (SiRFDRive only)
Distance error	2 U	In meters (SiRFDRive only)
Heading Error	2 U	In degrees $\times 10^2$ (SiRFDRive only)
Number of SVs in Fix	1 U	Count of SVs indicated by SV ID list
HDOP	1 U	Horizontal Dilution of Precision $\times 5$ (0.2 resolution)

AdditionalModeInfo	1 D	<p>Additional mode information:</p> <p>Bit 0: map matching mode for Map Matching only 0 = map matching feedback input is disabled 1 = map matching feedback input is enabled</p> <p>Bit 1: map matching feedback received for Map Matching only 0 = map matching feedback was not received 1 = map matching feedback was received</p> <p>Bit 2: map matching in use for Map Matching only 0 = map matching feedback was not used to calculate position 1 = map matching feedback was used to calculate position</p> <p>Bit 3-6: reserved</p> <p>Bit 7: DR direction for SiRFDRive only 0 = forward 1 = reserve</p>
--------------------	-----	--

Payload length: 91 bytes

1. An overdetermined solution (see bit 0 from Nav Valid and bit 9 of Nav Type) is one where at least one additional satellite has been used to confirm the 4-satellite position solution. Once a solution has been overdetermined, it remains so even if several satellites are lost, until the system drops to no-navigation status (Nav Type bits 0-2 = 000).
2. Velocity Dead Reckoning (DR) is a method by which the last solution computed from satellite measurements is updated using the last computed velocity and time elapsed to project the position forward in time. It assumes heading and speed are unchanged, and is thus reliable for only a limited time. Sensor DR is a position update method based on external sensors (e.g., rate gyroscope, vehicle speed pulses, accelerometers) to supplement the GPS measurements. Sensor DR is only applicable to SiRFDRive products.
3. Map Datum indicates the datum to which latitude, longitude, and altitude relate. 21 = WGS-84, by default. Other values are defined as other datums are implemented. Available datums include: 21 = WGS-84, 178 = Tokyo Mean, 179 = Tokyo Japan, 180 = Tokyo Korea, 181 = Tokyo Okinawa.
4. To convert Drift m/s to Hz: $\text{Drift (m/s)} * L1(\text{Hz})/c = \text{Drift (Hz)}$.

Note – Values are transmitted as integer values. When scaling is indicated in the description, the decimal value has been multiplied by the indicated amount and then converted to an integer. Example: Value transmitted: 2345; indicated scaling: 10^2 ; actual value: 23.45.

Software Version String

Software Version String (Response to Poll) – Message ID 6

Name	Bytes	Binary (Hex)		Unit	ASCII (Decimal)	
		Scale	Example		Scale	Example
Message ID	1 U		06			6
Character [80]	1 U		¹			²

Payload Length: 1-81 bytes

1. Payload example is shown above.
2. 2.3.2-GSW2-2.05.024-C1FLEX1.2

Note – Convert ASCII to symbol to assemble message (i.e., 0x4E is 'N'). Effective with version GSW 2.3.2, message length was increased from 21 to 81 bytes to allow for up to an 80-character version string.

ANEXO C – RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA



Processing Summary GIGAmovel2

Project Information

Project name:	GIGAmovel2
Date created:	12/21/2010 18:13:16
Time zone:	-3h 00'
Coordinate system name:	WGS 1984
Application software:	LEICA Geo Office 5.0
Start date and time:	12/21/2010 10:41:30
End date and time:	12/21/2010 12:40:45
Manually occupied points:	4
Processing kernel:	PSI-Pro 2.0
Processed:	01/10/2011 15:18:29

Processing Parameters

Parameters	Selected
Cut-off angle:	15°
Ephemeris type:	Broadcast
Solution type:	Automatic
GNSS type:	Automatic
Frequency:	Automatic
Fix ambiguities up to:	80 km
Min. duration for float solution (static):	5' 00"
Sampling rate:	Use all
Tropospheric model:	Hopfield
Ionospheric model:	Automatic
Use stochastic modelling:	Yes
Min. distance:	8 km
Ionospheric activity:	Automatic

Baseline Overview

POLI – P01	Reference: POLI	Rover: P01
Coordinates:		
Latitude:	23° 33' 20.33230" S	23° 33' 27.69709" S
Longitude:	46° 43' 49.12322" W	46° 43' 24.59394" W
Ellip. Hgt:	730.6197 m	719.3220 m
Solution type:	Phase: all fix	
GNSS type:	GPS	
Frequency:	L1 only	
Ambiguity:	Yes	

POLI – P02	Reference: POLI	Rover: P02
-------------------	------------------------	-------------------

Coordinates:		
Latitude:	23° 33' 20.33230" S	23° 33' 28.33732" S
Longitude:	46° 43' 49.12322" W	46° 43' 24.37731" W
Ellip. Hgt:	730.6197 m	719.3637 m
Solution type:	Phase: all fix	
GNSS type:	GPS	
Frequency:	L1 only	
Ambiguity:	Yes	

POLI – P04	Reference: POLI	Rover: P04
-------------------	------------------------	-------------------

Coordinates:		
Latitude:	23° 33' 20.33230" S	23° 33' 28.11638" S
Longitude:	46° 43' 49.12322" W	46° 43' 24.83525" W
Ellip. Hgt:	730.6197 m	719.3892 m
Solution type:	Phase: all fix	
GNSS type:	GPS	
Frequency:	L1 only	
Ambiguity:	Yes	

POLI – P03	Reference: POLI	Rover: P03
-------------------	------------------------	-------------------

Coordinates:		
Latitude:	23° 33' 20.33230" S	23° 33' 28.63590" S
Longitude:	46° 43' 49.12322" W	46° 43' 25.42720" W
Ellip. Hgt:	730.6197 m	719.5034 m
Solution type:	Phase: all fix	
GNSS type:	GPS	
Frequency:	L1 only	
Ambiguity:	Yes	