

Masaki Kawabata Neto

**UTILIZAÇÃO DO MÓDULO “CREATALINK”
PARA A TRANSMISSÃO, EM TEMPO REAL,
DE SINAIS DE CORREÇÃO PARA SISTEMAS
GPS DIFERENCIAIS (DGPS)**

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universi-
dade de São Paulo, como parte dos re-
quisitos para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Ernesto Schaal

São Carlos

2005

Dedico este trabalho à minha mulher Célia
e ao meu filho Daniel,
cuja colaboração e compreensão permitiram a sua realização.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Ricardo Ernesto Schaal pela paciência e dedicação na orientação deste trabalho.

Agradeço à minha família por estar sempre presente nas horas difíceis do caminho percorrido.

Agradeço também aos colegas de trabalho do SET pelo apoio prestado, sobretudo o apoio dos chefes de departamento Prof. Wilson Sérgio Venturini e Prof. Francisco Antônio Rocco Lahr.

Por fim, agradeço a Deus, que me deu forças para prosseguir e compreensão para aceitar o meu caminho.

Resumo

KAWABATA N., M. (2005). *Utilização do módulo “Creatalink” para a transmissão em tempo real de sinais de correção para sistemas GPS Diferenciais (DGPS)*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

O GPS é um sistema de radio navegação baseado em satélites operando 24 horas por dia no fornecimento de sinais de rádio para determinação de coordenadas em todo o globo terrestre. Estas coordenadas apresentam uma precisão de 10 metros, que em muitas aplicações é inadequada. O DGPS ou GPS diferencial é uma técnica que permite passar a precisão para o nível do metro por meio da recepção de informações adicionais. Estas informações são recebidas pelo receptor de GPS por meio de rádio a partir de satélites geo-estacionários ou enlaces locais.

Este trabalho apresenta um sistema DGPS com enlace local para aplicações urbanas com a utilização de um receptor de mensagens de texto, e de baixo custo, pager Motorola Creatalink operando na faixa de 931 MHz. Foi montado um projeto piloto na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) com a Base de Referência no Departamento de Engenharia Elétrica. Os resultados mostram que o método apresenta uma sensível melhora na qualidade das coordenadas e que apresenta um grande potencial para aplicação em cidades de médio porte.

Palavras-chave: GPS; DGPS; pager; rádio enlace

Abstract

KAWABATA N., M. (2005). *Use of Creatalink module to transmit in real time corrections signals for differential GPS (DGPS) systems*. M.Sc. Dissertation. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

GPS is a radio navigation system base on a satellite network providing 24 hours radio data to determine point coordinates and world wide coverage. The precision is in the decametric range which is not adequate to many applications. DGPS or Differential GPS is a technique used to improve this precision down to metric level adding information to the receiver. The GPS receiver can receive the information from geostationary satellites or radio links.

This work presents a DGPS system with local radio link to support urban applications based on the low price pager Motorola Creatalink, operating in 931 MHz band. A pilot project was developed at the Engineering School of Sao Carlos (EESC) with the Reference Station at the roof of Electrical Engineering Department. The results show a good improvement in the precision of the coordinates, presenting a high potential usage in medium size cities.

Keywords: GPS; DGPS; pager; radio link

Lista de figuras

Figura 2.1 – Concepção artística de um satélite GPS.	18
Figura 2.2 – Representação simplificada da constelação nominal dos satélites GPS (DANA 1995).	19
Figura 2.3 – Sinais transmitidos pelos satélites (DoD 1996).	20
Figura 2.4 – Sinais no domínio do tempo e frequência: (a) sinal modulador e (b) portadora modulada (BRAASCH 1999).	21
Figura 2.5 – Mensagem de navegação (DoD 1995).	22
Figura 2.6 – Distribuição de potência do sinal L1 (DoD 1996).	24
Figura 2.7 – Diagrama esquemático de um receptor genérico (BRAASCH 1999).	24
Figura 2.8 – Diagrama esquemático do receptor de GPS da IBM/LEICA e diagrama em blocos do chip GPS (IBM 2000).	25
Figura 2.9 – Estações de monitoramento GPS.	26
Figura 2.10 – Antena de superfície localizado no Hawaii.	27
Figura 2.11 – Configuração espacial dos vetores.	28
Figura 2.12 – Trilateração do GPS (BRAIN 2002).	29
Figura 2.13 – Programa em GNU OCTAVE do cálculo por código C/A.	34
Figura 2.14 – Resultado da posição por código.	35
Figura 3.1 – Diagrama de um sistema DGPS.	36
Figura 3.2 – Correção associada a um satélite.	37
Figura 3.3 – Cobertura DGPS nos EUA em 08/03/2004 (NAVCEN 2004).	40
Figura 3.4 – Cobertura DGPS no Canadá (CANADIAN 2005).	40
Figura 3.5 – Cobertura DGPS no Brasil (radiofaróis da marinha).	41
Figura 3.6 – Rede de estações WAAS dos EUA.	43
Figura 3.7 – Cobertura do satélite geo-estacionário da Omnistar (OMNISTAR 2004).	44
Figura 4.1 – Elipsóide de revolução.	45
Figura 4.2 – Elipse.	46
Figura 4.3 – Latitude e longitude geodésicas.	47
Figura 4.4 – Altura elipsoidal (h).	47
Figura 4.5 – Altura ortométrica (H) e ondulação geoidal (N).	48
Figura 4.6 – Raio de curvatura da primeira vertical.	50
Figura 5.1 – Receptor Creatalink da Motorola.	55
Figura 5.2 – Pageboy I da Motorola.	56
Figura 5.3 – Espectro de rádio FM.	58

Figura 5.4 – Formato de um sinal POCSAG.	59
Figura 5.5 – Formato da palavra POCSAG.	59
Figura 6.1 – Diagrama em blocos do sistema DGPS.	62
Figura 6.2 – Diagrama esquemático do gerador DGPS.	63
Figura 6.3 – Antena GPS da estação base.	64
Figura 6.4 – Fotos do local da antena.	64
Figura 6.5 – Receptor Novatel OEM-3: (a) vista geral; (b) vista frontal.	65
Figura 6.6 – GPSolution, dispersão de coordenadas em PSEL.	66
Figura 6.7 – Mensagem DCSA de correções diferenciais.	68
Figura 6.8 – Valores de correção DGPS.	69
Figura 6.9 – Registro de uma época em RINEX.	70
Figura 6.10 – Tela de coleta de dados do programa GPSolution.	71
Figura 6.11 – Correções no ponto A.	72
Figura 6.12 – Diagrama esquemático do enlace de comunicação.	75
Figura 6.13 – Condicionador de sinal entre PC e COM3.	75
Figura 6.14 – Monitor RAMSEY COM-3.	76
Figura 6.15 – Indicação dos ajustes feitos no modulador COM-3.	76
Figura 6.16 – (a) Receptor industrial Creatalink e (b) Receptor Memo Elite Flx.	77
Figura 6.17 – Implementação de testes do enlace de comunicação.	78
Figura 6.18 – (a) Receptor Garmin GPS 12 MAP; (b) Antena externa para GPS 12 MAP.	79
Figura 6.19 – Esquema de ligação do receptor Garmin com Creatalink.	80
Figura 6.20 – Diagrama esquemático do receptor do usuário com PC.	81
Figura 6.21 – Esquema de ligação do receptor Garmin com Creatalink e PC.	81
Figura 6.22 – Tela do GPS Track Maker na opção de interface NMEA.	82
Figura 6.23 – Receptores GPS para PCs.	82
Figura 6.24 – Interfaces entre os módulos DGPS.	84
Figura 7.1 – Coordenadas autônomas e corrigidas representadas no plano em P2.	86
Figura 7.2 – Altura autônoma e corrigida no ponto P2.	87
Figura 7.3 – Enlace de comunicação utilizado no ponto P3.	87
Figura 7.4 – Foto do céu vista pela antena no ponto P3.	88
Figura 7.5 – Coordenadas autônomas e corrigidas no ponto P3.	89
Figura 7.6 – Detalhe das coordenadas autônomas e corrigidas no ponto P3.	89
Figura 7.7 – Altura autônoma no ponto P3.	90
Figura 7.8 – Altura corrigida no ponto P3.	90

Figura 7.9 – Coordenadas planimétricas autônomas ao longo do tempo no ponto P3. .	91
Figura 7.10 – Coordenadas corrigidas ao longo do tempo no ponto P3.	91
Figura 7.11 – Coordenada autônoma e média móvel de 2 min. em P3.	92
Figura 7.12 – Coordenada corrigida e média móvel de 2 min. em P3.	92
Figura 7.13 – Coordenadas planas autônomas e respectivas médias móveis de 2 minutos.	93
Figura 7.14 – Coordenadas planas corrigidas e respectivas médias móveis de 2 minutos.	93
Figura 7.15 – Coordenadas planas corrigidas com comportamento anômalo.	94
Figura 7.16 – Coordenadas planas autônomas no mesmo período.	94

Lista de Abreviaturas e Siglas

AS – *anti spoofing*

AGI – Associação Geodésica Internacional

bps – bits por segundo

BPSK – *bi-phase shift key*

C/A – *coarse acquisition*

CDGPS – *Canadian DGPS*

CDMA – *code division multiple access*

com1 – *communication port 1*

com2 – *communication port 2*

CORS – *continuously operating reference stations*

DC – *direct current*

desvpad – desvio padrão

DGPS – *differential GPS*

DoD – *Department of Defense* (dos EUA)

ECEF XYZ – *earth centered earth fixed XYZ*

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos (da USP)

EUA – Estados Unidos da América

FAA – *The Federal Aviation Administration* (dos EUA)

FI – frequência intermediária

FM – *frequency modulation*

FSK – *frequency shift keying*

GBAS – *ground based augmentation system*

GNSS – *global navigation satellite system*

GNU/GPL - GNU's *not* UNIX / *general public license*

GPS – *global positioning system*

GPSTM – *GPS Track Maker*

HOW – *hand over word*

ISO – *International Standard Organization*

IP – *internet protocol*

IRM – *International reference meridian*

ITU – *International Telecom Union*

L1 – sinal GPS em 1575,42 MHz

L2 – sinal GPS em 1227,60 MHz

LNA – *low noise amplifier*

min – minutos

MS – Microsoft

NAT – *network address translator*

NGS – *National Geodetic Survey*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration* (dos EUA)

P – *precise*

PC – *personal computer*

PPS – *precise positioning service*

PRN – *pseudo random noise*

PVC – cloreto de polivinila

RF – rádio frequência

RINEX – *receiver independent exchange*

RTCM SC 104 – *Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee no. 104*

RTK – *real time kinematics*

SA – *selective availability*

SBAS – *satellite based augmentation system*

SEL – sigla que identifica o Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP

SPS – *standard positioning service*

TLM – *telemetry*

TMC – *traffic message system*

USP – Universidade de São Paulo

VHF – *very high frequency*

WGS 84 – *world geodetic system of 1984*

Wi-fi – *wireless fidelity*

Lista de símbolos

μs – microssegundo

ms – milissegundo

s – segundo

m – metro

V – volts

kHz – quilohertz

MHz – megahertz

dB – decibel

h – altura elipsoidal

H – altura ortométrica ou altitude

N – ondulação geoidal

a – semi-eixo maior da elipse

b – semi-eixo menor da elipse

f – achatamento do elipsóide de revolução

X, Y, Z – eixos do sistema de coordenadas cartesianas ECEF XYZ.

dx, dy, dz – variação em x, y, z respectivamente no sistema cartesiano de coordenadas

φ_G – latitude geodésica

λ_G – longitude geodésica

R – distância medida eletronicamente entre o receptor e o satélite

\vec{S} – vetor que representa a posição do satélite no espaço

$\vec{\rho}$ – vetor que representa a diferença entre a posição do receptor do usuário e o satélite

\vec{U} – vetor que representa a posição do usuário a ser determinada

t_r – resíduo de tempo de sincronismo do receptor GPS

d – outros erros presente nas medidas GPS

Mbps – megabits por segundo

Sumário

RESUMO	4
ABSTRACT	5
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Motivação	15
1.2 Justificativa	15
1.3 Objetivos	16
1.4 Estrutura do texto	16
2 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GPS	18
2.1 O Segmento espacial	19
2.1.1 Mensagem de navegação	21
2.2 O segmento do usuário	23
2.2.1 Receptor GPS	24
2.3 O segmento de controle	26
2.4 Posicionamento por meio do código C/A	28
3 MÉTODOS DIFERENCIAIS DE GPS	36
3.1 Erros removíveis pelo DGPS	38
3.2 Implementações de DGPS por código	39
3.3 Outros sistemas DGPS	42
4 SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA	45
4.1 Conversão de coordenadas entre sistemas geodésicos	49
4.2 Exemplo numérico	51
5 INFRA-ESTRUTURA DE PAGER	55
5.1 Histórico	56
5.2 Protocolos utilizados em pager	56
5.3 Princípio de funcionamento do protocolo POCSAG	58
5.4 Alocação de frequências no Brasil	61

6	IMPLEMENTAÇÃO DO DGPS	62
6.1	Gerador DGPS	63
6.1.1	Processamentos parciais	67
6.1.2	Problemas encontrados na implementação	73
6.1.3	Teste VELO1	74
6.2	Enlace de comunicação	74
6.2.1	Problemas encontrados na implementação	77
6.3	Receptor do usuário	79
6.3.1	Estudos relacionados ao receptor do usuário	83
6.4	Integração dos módulos	83
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
7.1	Receptor Garmin	85
7.2	Receptor Novatel.....	86
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	95
	REFERÊNCIAS.....	97
	GLOSSÁRIO	100

1 Introdução

O NAVSTAR GPS ou simplesmente GPS (*Global Position System*) é um sistema de radionavegação baseado em satélites que fornece serviços 24 horas por dia em toda a superfície terrestre. Radionavegação consiste na determinação da posição, velocidade e/ou outras características de um objeto por meio das propriedades de propagação de ondas de rádio usadas com a finalidade de navegação, incluindo perigos de obstrução (RTCM 1998).

Em 01/05/2000, com o fim da degradação dos códigos de tempo e de efemérides dos satélites (efeito SA - *selective availability*) imposta pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD – *Department of Defense*), o GPS passou a apresentar precisão de posição de cerca de dez metros ao invés dos cem metros anteriores ao fim do efeito SA. Isto significa que, atualmente, a posição indicada por um receptor de bolso deve estar em torno de ± 10 metros da posição verdadeira em 67% das observações (GPS World 2003).

GPS Diferencial (DGPS - *Differential GPS*) é um método que permite melhorar a qualidade da determinação da posição e da velocidade de usuários do sistema GPS por meio da recepção dos dados de correção geradas em uma estação de referência. O DGPS é uma técnica utilizada em tempo real e necessita de um enlace de comunicação entre a estação de referência e o usuário.

Utilizando as correções e os códigos de tempo enviados pelos satélites, o sistema DGPS apresenta uma exatidão de um a dois metros na determinação da posição, e pode ser utilizado em múltiplas aplicações urbanas e não urbanas. Segundo Stansell (1983), artigo clássico sobre futuras aplicações civis do GPS, são citados como aplicações do GPS:

- Sistemas de referência para navegação fluvial ou de cabotagem em condições de visibilidade reduzida (neblina, chuva intensa). O DGPS pode, dentre outras aplicações, auxiliar nas manobras de aproximação das embarcações e na determinação precisa de rotas;
- Nos trabalhos de ecobatimetria de leitos dos rios e lagos nas operações de dragagem;

- Auxiliar a agricultura com o levantamento das condições do solo com coordenadas precisas, a chamada **agricultura de precisão**, uma vez que os dados obtidos podem ser utilizados posteriormente na aplicação precisa de adubos e outros insumos;
- Posicionamento automático de veículos em ambientes industriais;
- Mapeamento de áreas urbanas degradadas e locais de despejo de lixo ilegal;
- Levantamento de áreas inundadas no meio urbano.

1.1 Motivação

Existem no mercado equipamentos de comunicação de dados nas faixas de VHF e UHF que permitem ser conectados diretamente aos receptores de GPS, porém de custo elevado e de dimensões físicas tipicamente maiores que a dos próprios receptores de GPS. Também existem empresas que disponibilizam serviços DGPS, transmitindo as correções por meio de satélite geo-estacionário e com utilização de equipamentos específicos. O custo inicial desses equipamentos é da ordem de US\$ 8.000 existindo ainda uma taxa anual de US\$ 1500 para utilização dos serviços básicos.

Esta proposta tem como diferencial a utilização de um sistema de comunicação de dados de baixo custo como parte da implementação do sistema DGPS. Futuramente, este serviço poderá ser oferecido por uma empresa prestadora de serviço de mensagens via pager. O preço final de utilização do serviço DGPS poderá ser próximo ao preço do serviço de mensagens tradicional.

No ano de 2000, a Escola de Engenharia de São Carlos, por meio do Departamento de Engenharia Elétrica, venceu o concurso nacional **Missão XXI** promovido pela Motorola do Brasil na categoria “**Novos Negócios que utilizam a infra-estrutura em *paging***” com o projeto “**Utilização do Módulo Creatalink para a Transmissão em Tempo Real de Sinais de Correção para Sistemas GPS Diferenciais (DGPS)**”. A instituição recebeu um prêmio de US\$ 100.000,00 para ser aplicado em pesquisas em telecomunicações. Com os recursos do prêmio foi possível adquirir equipamentos para o desenvolvimento deste trabalho.

1.2 Justificativa

A utilização do sistema de navegação GPS pela sociedade civil encontra-se em crescimento, inclusive no Brasil, e tem sido grande a procura por posicionamento de qualidade. Devido à pressão da comunidade científica e de outros setores, o DoD desli-

gou a degradação proposital (SA) na determinação da posição imposta à sociedade civil, resultando em uma precisão da ordem de 10 metros (GPS World 2003) no posicionamento horizontal com um receptor em modo absoluto. Em muitos casos esta precisão não é adequada, requerendo uma metodologia mais sofisticada. O método clássico para melhora na determinação de posição e velocidade de um receptor móvel é baseado na correção diferencial, com dados fornecidos por uma estação de referência (DGPS). Já existem disponíveis no mercado diversos sistemas, mas todos apresentam custos elevados. A redução no custo de operação de um sistema diferencial é crucial para a disseminação desse tipo de tecnologia no Brasil. Dessa forma, este projeto propõe um sistema DGPS alternativo, de baixo custo, implementando o enlace de comunicação por meio do serviço de pager.

No Brasil, as operadoras de serviços de pager possuem uma planta instalada bastante grande, com cobertura nos principais centros urbanos. Com o advento da telefonia celular, as operadoras de pager têm diversificado seus serviços a fim de se manterem no mercado. A possibilidade do reaproveitamento dessa infra-estrutura justifica a pesquisa de novas técnicas e novos serviços a serem oferecidos à comunidade.

1.3 Objetivos

A importância do uso do GPS dentro da sociedade civil dirigiu o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, levando a elencar os seguintes objetivos:

- Ampla revisão bibliográfica do funcionamento e uso do GPS;
- Apresentar um sistema de correção de posicionamento de GPS que possa ser utilizado no Brasil, com o fornecimento de resultados de melhoria da qualidade da coordenada a preços acessíveis;
- Implementação de um projeto piloto completo com a base de referência no Departamento de Engenharia Elétrica da EESC que possa auxiliar outros trabalhos de ensino, pesquisa e extensão.

1.4 Estrutura do texto

No capítulo 2 são apresentados os conceitos do sistema GPS, seus fundamentos e a teoria envolvida. São apresentados também os cálculos envolvidos na determinação da posição por meio dos códigos de tempo GPS. No capítulo 3 são apresentados os conceitos e algumas das técnicas diferenciais de GPS. As técnicas diferenciais são amplamente utilizadas como forma de melhorar a qualidade dos resultados obtidos por

meio do GPS. No capítulo 4 são apresentados os conceitos de geodésia relacionados ao estudo do GPS. O capítulo 5 é dedicado à infra-estrutura de pager. É abordada sua origem histórica, suas aplicações, os protocolos empregados, e a situação atual no Brasil. O capítulo 6 contém a descrição da implementação efetuada nessa pesquisa. São apresentados também os problemas encontrados no decorrer da pesquisa. No capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos com a implementação do sistema DGPS e no capítulo 8 estão as conclusões a respeito dessa pesquisa.

Por fim, estão as referências bibliográficas consultadas para a realização deste trabalho.

2 Sistema de navegação GPS

O NAVSTAR GPS é um sistema completo de rádio-navegação baseado em satélites que fornece serviços 24 horas por dia em toda a superfície terrestre. Ele foi implementado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos – DoD, inicialmente para aplicações militares. Posteriormente foi popularizado na comunidade civil pela qualidade dos resultados obtidos e pelo baixo custo dos equipamentos receptores (RTCM 1998).

O sistema GPS consiste em um conjunto de satélites devidamente organizados no espaço transmitindo dois sinais de rádio na direção da Terra nas faixas de frequências de 1,2 e de 1,5 GHz. Os receptores que captam esses sinais têm a capacidade de calcular a distância que os separam dos satélites e, por trilateração, determinar suas coordenadas com erros inferiores a algumas dezenas de metros, processo detalhado no capítulo 2.4. Os satélites são controlados por uma base terrestre que tem a função de manter o sistema em operação. A figura 2.1 mostra uma concepção artística de um satélite GPS no espaço.



Figura 2.1 – Concepção artística de um satélite GPS.

O sistema GPS, desde 1995, teve a sua funcionalidade completada, com os primeiros satélites lançados na década de 70. Além das principais aplicações do GPS

que são a navegação, o posicionamento e seus derivados como velocidade e aceleração, este tem sido amplamente utilizado como referência de relógio, pois sua exatidão é comparável a de relógios atômicos com a vantagem do custo do usuário ser extremamente reduzido.

O sistema GPS pode ser separado em três segmentos. O **segmento espacial** é composto pelos satélites em órbita que transmitem os sinais de rádio. O **segmento do usuário** é formado pelos receptores de rádio que fazem uso das informações transmitidas. O **segmento de controle** possui as estações que observam os satélites e as informações transmitidas e são capazes de enviar informações e comandos de telemetria aos satélites.

2.1 O Segmento espacial

O segmento espacial, atualmente, é composto por uma constelação de 29 satélites em órbita a uma altitude aproximada de 20.000 km. Os satélites estão dispostos em seis planos orbitais nomeados de “a” a “f” e inclinados a aproximadamente 55° em relação ao plano equatorial. O período de cada satélite é de doze horas siderais. Com esta combinação de altura e de inclinação da órbita, dependendo da latitude do local do usuário, os satélites permanecem visíveis acima do horizonte por mais de quatro horas. A figura 2.2 apresenta de forma simplificada a disposição dos satélites e suas respectivas órbitas.

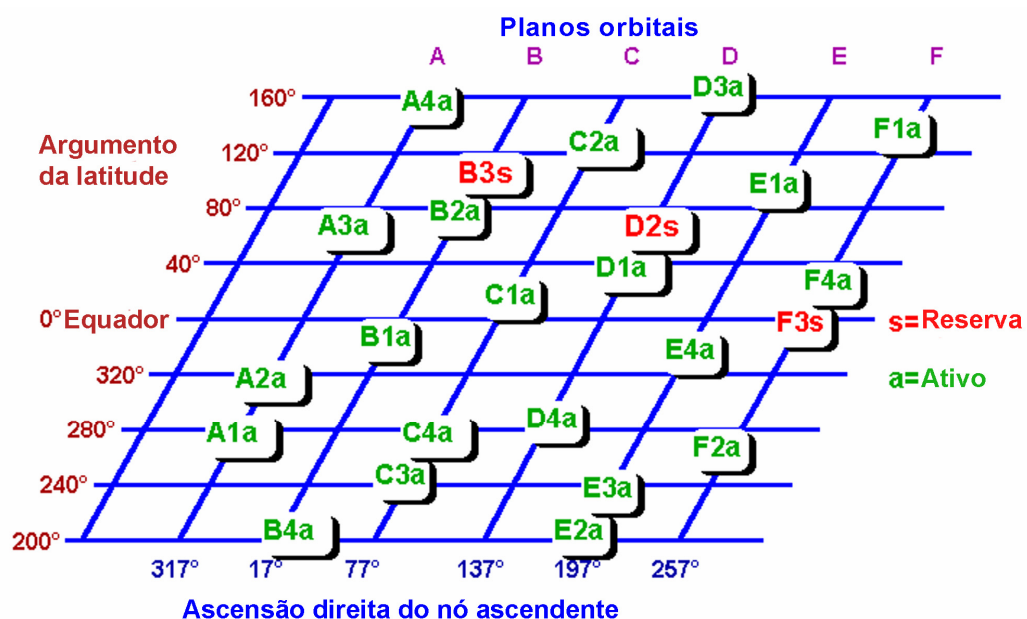


Figura 2.2 – Representação simplificada da constelação nominal dos satélites GPS (DANA 1995).

Até o presente momento existem 4 gerações de satélites GPS. Os satélites do bloco I foram utilizados para testar os princípios do sistema. Foram lançados 11 satélites que desde 1995 não são mais utilizados. Os satélites do bloco II e bloco IIA formam a segunda geração e compõe a constelação atual. Os satélites do bloco IIR estão em implementação na medida em que os satélites do bloco II/IIA atingem fim da vida e são aposentados. Os satélites do bloco IIF são os de quarta geração e estão em fase de definição. Nenhum satélite deste bloco foi lançado ainda. Segundo Andrew (2004), os satélites do bloco II/IIA foram projetados para uma vida útil de 7,5 anos e os do bloco IIR para 10 anos.

Todos os sinais gerados nos satélites são baseados em relógios atômicos internos (mais de um). Todos os satélites transmitem dados chamados de mensagens de navegação na portadora L1 em 1575,42 MHz e na portadora L2 em 1227,60 MHz. O compartilhamento da mesma banda de transmissão é por meio da tecnologia CDMA (*code division multiple access*) de espectro espalhado. Cada satélite utiliza dois códigos CDMA: o código C/A (*coarse acquisition*) de aquisição rápida e sem restrições e o código P (*precise*) mais preciso e criptografado para uso militar dos EUA. A figura 2.3 ilustra a composição dos sinais transmitidos pelos satélites. A portadora L1 transmite os dois códigos e a portadora L2 transmite somente o código P.

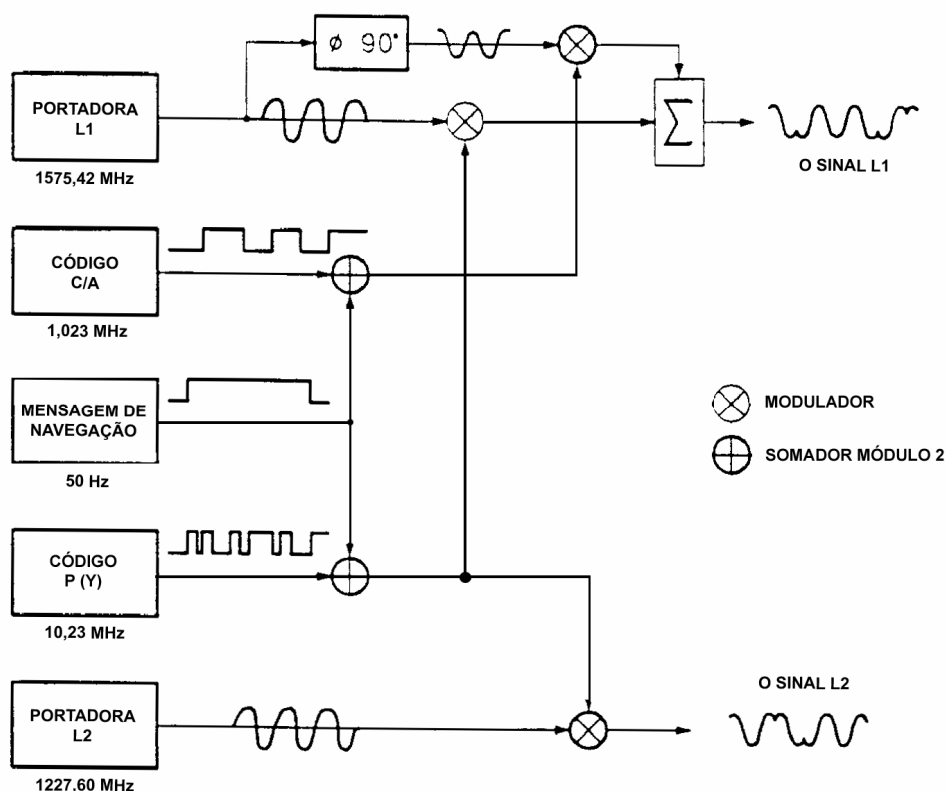


Figura 2.3 – Sinais transmitidos pelos satélites (DoD 1996).

As mensagens de navegação são transmitidas a uma taxa de 50 bps. O código C/A possui comprimento de 1023 bits, frequência base (*chip rate*) de 1,023 MHz, período de repetição de 1 ms e a transmissão ocorre somente na portadora L1. O código P possui um comprimento muito longo (235.469.592.765.000 bits) e frequência base de 10,23 MHz. Seu período de repetição deveria ser de aproximadamente 266 dias, porém a transmissão, a cada semana, é reinicializada em um trecho diferente do código. A transmissão ocorre nas duas portadoras L1 e L2. A transmissão do código C/A ocupa uma banda de 2,046 MHz enquanto a do código P ocupa 20,46 MHz. Na portadora L1, os códigos C/A e P são defasados de 90°.

As mensagens de navegação são somadas aos códigos em módulo 2, ou seja, é feita uma soma binária direta. Segundo Hofmann (1997), a portadora é modulada em BPSK (*bi phase shift keying*) com rotação de 180° em cada mudança de 0 para 1 ou de 1 para 0 (figura 2.4).

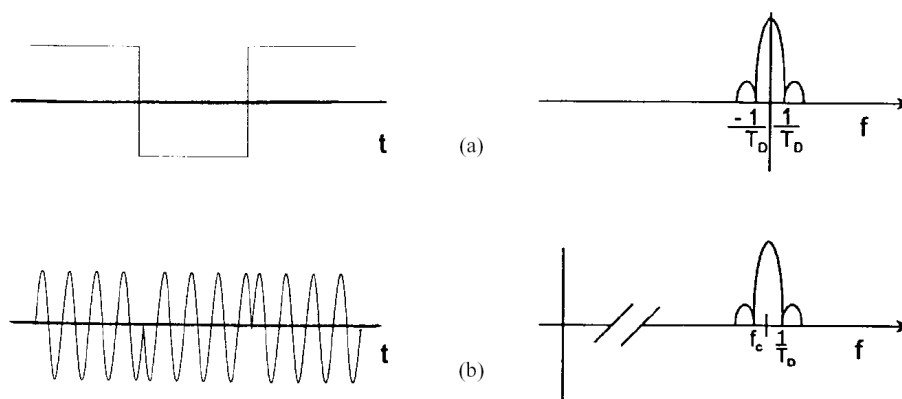


Figura 2.4 – Sinais no domínio do tempo e frequência: (a) sinal modulador e (b) portadora modulada (BRAASCH 1999).

O algoritmo de geração do código CDMA é bem descrito em Hoffman (1997), onde cada código é caracterizado por seu número PRN (*pseudo random noise*). Cada satélite possui um número PRN único que corresponde à geração de um código próprio. Como todos os satélites transmitem na mesma frequência, a distinção é feita pelo código PRN e os satélites passaram a ser nominados pelo número PRN.

2.1.1 Mensagem de navegação

As mensagens de navegação possuem parte das informações utilizadas pelo receptor no cálculo de sua posição. As mensagens de navegação são geradas no segmento de controle e retransmitidas pelos satélites aos receptores do segmento do usuário repetidamente uma após a outra. Cada mensagem é composta por 25 quadros de dados, cada quadro com 1500 bits. Cada quadro é subdividido em 5 sub-quadros de 300 bits cada. Cada sub-quadro é composto por 10 palavras de 30 bits.

Na taxa de 50 bps, o receptor leva 6 s para receber cada sub-quadro, 30 s para cada quadro completo e 12,5 minutos para receber todos os 25 quadros. Por esse motivo um receptor GPS que nunca foi ligado demora alguns minutos para iniciar seu funcionamento normal.

A figura 2.5 ilustra o formato da mensagem de navegação. No início de cada sub-quadro há duas palavras especiais: a palavra de telemetria (TLM) formada por um padrão de sincronização e por mensagens específicas e a palavra de *handover* (HOW), necessária para a transição do código C/A para o código P.

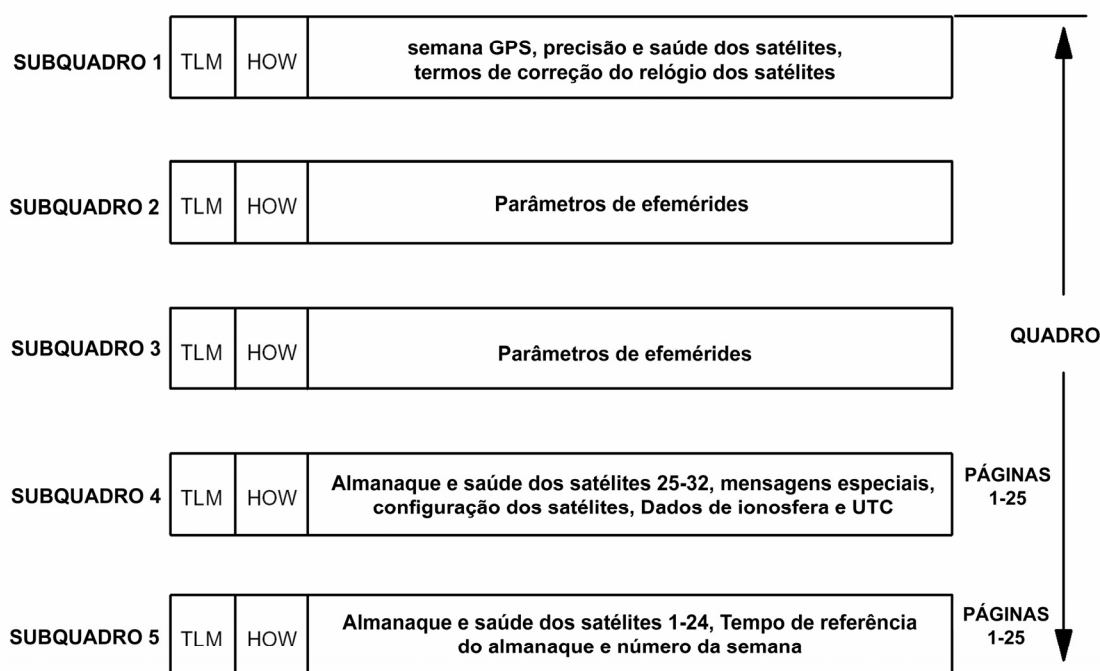


Figura 2.5 – Mensagem de navegação (DoD 1995).

Os sub-quadros 1, 2 e 3 contêm informações críticas específicas para cada satélite e são as mesmas para todos os 25 quadros. O sub-quadro 1 contém as correções de relógio dos satélites em relação ao Tempo Global GPS bem como os parâmetros que descrevem a precisão e as condições de usabilidade de cada satélite. O GPS utiliza uma base de tempo comum a todo o sistema chamado Tempo Global GPS, importante para o funcionamento do sistema. Este tempo é determinado no segmento de controle.

Os sub-quadros 2 e 3 contêm as efemérides dos satélites. Efemérides são os parâmetros keplerianos da órbita de cada satélite, necessários e suficientes para o cálculo de sua posição em qualquer instante de tempo com acurácia de alguns metros.

Os sub-quadros 4 e 5 contêm informações comuns a todos os satélites e que variam ao longo dos 25 quadros. As informações destes sub-quadros permitem aos receptores saberem a situação geral do sistema GPS. Pode-se destacar o almanaque que permite aos receptores determinarem rapidamente a posição dos satélites. Isto é impor-

tante para o receptor prever qual satélite estará visível acima do horizonte em um dado instante e preparar o correlacionador de código C/A para a operação apropriada.

A análise detalhada da mensagem de navegação pode ser vista em Hofmann (1997). Lá estão descritos todos os campos de informações presentes na mensagem.

2.2 O segmento do usuário

O sistema GPS foi implementado com a principal finalidade de prover posicionamento e navegação precisos a tropas militares dos EUA. Na comunidade civil, o GPS é utilizado nas mais diversas aplicações onde se podem destacar o posicionamento, o padrão de tempo e a navegação. O segmento do usuário corresponde aos receptores que utilizam os sinais transmitidos pelos satélites GPS.

As informações de navegação como direção, sentido, velocidade e aceleração são consequência do posicionamento e do referencial de relógio providos pelo GPS. O vetor de velocidade instantânea é determinado a partir de duas posições adjacentes no tempo. Nesta técnica, a velocidade instantânea é obtida apenas no limite do intervalo de tempo tendendo a zero. Como os receptores GPS de navegação geralmente oferecem a posição a cada segundo, a velocidade determinada por duas posições adjacentes pode ser considerada a velocidade instantânea para a grande maioria das aplicações civis. Contudo, hoje já existem receptores GPS capazes de fornecer a solução da posição a cada centésimo de segundo, como é o caso do receptor marca Javad modelo LGG100. O receptor Novatel utilizado neste trabalho oferece uma taxa de até dez soluções da posição por segundo.

O posicionamento por meio do código C/A é chamado **Serviço de Posicionamento Padrão** (SPS - *standard positioning service*) e é aberto à toda a comunidade civil mundial. O receptor deve captar apenas sinais da portadora L1, portanto é chamado receptor de frequência simples. O posicionamento por meio do código P é chamado **Serviço de Posicionamento Preciso** (PPS - *precise positioning service*), restrito a receptores militares dos EUA e a alguns outros poucos receptores autorizados. A decodificação do código P criptografado requer um chip (*hardware*) cujo fornecimento é controlado pelo governo dos EUA. Como a transmissão ocorre nas duas portadoras L1 e L2, o receptor é chamado de dupla frequência. Não faz parte do escopo deste texto a descrição do posicionamento por meio do código P.

As antenas dos satélites possuem um diagrama de irradiação que procura manter constante a potência recebida na superfície da Terra. Esse diagrama compensa a perda por propagação que ocorre na variação de distância percorrida pelo sinal em função da

elevação do satélite, vista pelo usuário. A figura 2.6 mostra a distribuição de potência da portadora L1 nas proximidades da superfície da Terra.

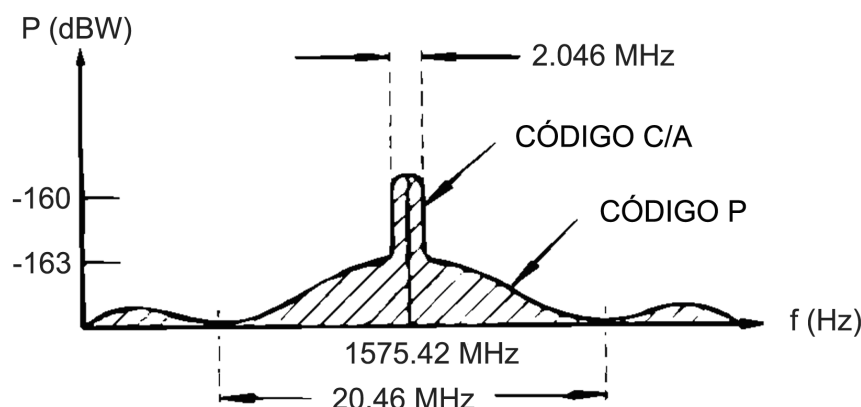


Figura 2.6 – Distribuição de potência do sinal L1 (DoD 1996).

Esta distribuição é correspondente à menor potência, quando o satélite está perto do horizonte. Segundo DoD (1996), a componente C/A da portadora L1 chega com potência de -160 dBW e a componente P chega com potência de -163 dBW.

2.2.1 Receptor GPS

Um receptor GPS é um equipamento formado por diversos blocos distintos. Por um lado ele detecta e decodifica os sinais transmitidos pelos satélites. Por outro lado, o receptor possui *hardware* e *software* capazes de processar os sinais e fornecer resultados específicos a cada aplicação como posição, velocidade, tempo e outros. A figura 2.7 apresenta um esquema simplificado das etapas realizadas por um receptor GPS.

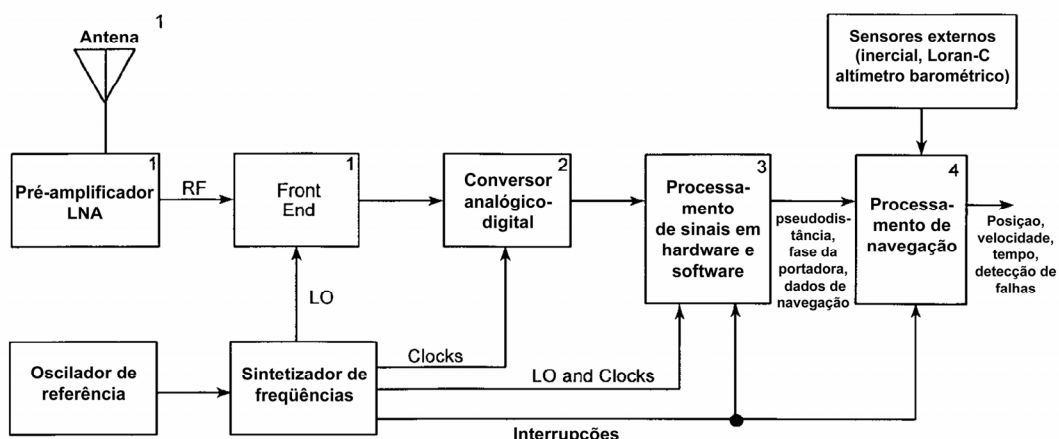


Figura 2.7 – Diagrama esquemático de um receptor genérico (BRAASCH 1999).

A antena é do tipo omni-direcional com plano de terra, polarizado circularmente à direita. Seu diagrama de irradiação é uma semi-esfera, o que confere um ganho de 3 dB. Acoplado à antena há um pré-amplificador de baixo ruído (LNA – *low noise*

amplifier), que irá determinar a figura de ruído do sistema. Segundo Braasch (1999), o ganho típico do LNA é de 25 a 40 dB e a figura de ruído é de 3 a 4 dB (GPS World 2003).

O *front end* é responsável pelo processamento analógico do sinal, que consiste em filtragem, amplificação e conversão para FI (frequência intermediária). A conversão para FI pode ser em mais de um estágio. Em receptores de código C/A, o filtro é de 2,046 MHz. Em receptores de código P, a largura necessária é de 20,46 MHz. O sinal FI é então amostrado, convertido digitalmente para a frequência base e enviado aos canais do receptor. Cada canal irá extrair as informações de um satélite em particular.

Comumente os receptores possuem 12 canais independentes em paralelo, podendo, portanto, processar sinais de até 12 satélites simultaneamente. Para cada canal é gerado um código C/A (ou P), e este é correlacionado com o sinal captado. Uma vez alinhados os códigos, é possível recuperar a mensagem de navegação transmitida à taxa de 50 bps. Com o alinhamento dos códigos é possível também determinar o atraso de propagação do sinal no espaço livre. A distância entre o receptor e o satélite é obtida por meio da multiplicação da velocidade da luz com o atraso de propagação. A distância é utilizada na técnica de trilateração para determinação da posição do receptor do usuário.

Existem outros projetos de receptores GPS que adotam técnicas diferentes na recepção e decodificação dos sinais. Um projeto da IBM em conjunto com a Leica Geosystems resultou em um chip capaz de digitalizar os sinais sem conversão em frequência, além de possuir os circuitos analógicos e digitais em um mesmo encapsulamento (IBM 2000). A figura 2.8 mostra o diagrama esquemático de um receptor completo e do chip. A alta integração de componentes num único chip produz receptores de tamanho reduzido, baixo consumo e implementação simplificada.

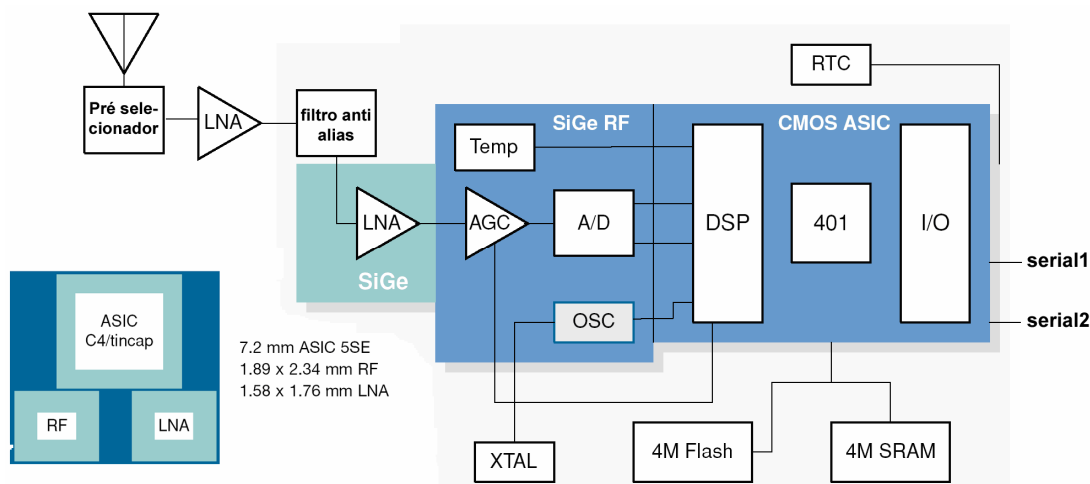


Figura 2.8 – Diagrama esquemático do receptor de GPS da IBM/LEICA e diagrama em blocos do chip GPS (IBM 2000).

2.3 O segmento de controle

O segmento de controle é composto por cinco estações de monitoramento, sendo uma delas a estação de monitoramento e controle mestre. A estação de controle mestre fica localizada na base aérea de Schriever em Falcon, Colorado, EUA. As demais estações de monitoramento estão localizadas no Havaí, na ilha de Ascensão, na ilha de Diego Garcia e na ilha de Kwajalein (figura 2.9). As estações de monitoramento estão espalhadas ao redor do globo em posições estratégicas a fim de melhor observarem os sinais transmitidos pelos satélites.



Figura 2.9 – Estações de monitoramento GPS

Cada estação de monitoramento tem sua operação totalmente automatizada e sua localização é muito bem determinada, ou seja, suas coordenadas são conhecidas com bastante exatidão. Em cada estação há receptores de GPS que captam os sinais transmitidos pelos satélites. As informações são então enviadas à estação de controle mestre. A estação de controle mestre recebe as informações de todas as estações de monitoramento e, por meio de processamento matemático, determina as seguintes informações:

- **Tempo GPS:** este tempo corresponde à base de tempo comum a todo o sistema GPS, também chamado de Tempo Global GPS. Os relógios atômicos presentes nos satélites, ao longo do tempo, acumulam desvios entre eles, uma vez que seu funcionamento é independente (*free wheel*). O tempo GPS é determinado a partir dos diversos relógios atômicos dos satélites e dos relógios atômicos das estações de controle e de monitoramento. O desvio do relógio de cada satélite em relação ao tempo global é transmitido aos receptores na forma de uma correção no relógio do satélite. Esta correção é utilizada diretamente na determinação da posição do receptor.

- **Novas órbitas dos satélites:** mesmo em órbita supostamente fixa, os satélites percorrem caminhos levemente diferentes do previsto. A posição de cada satélite é monitorada e suas novas efemérides são então calculadas. As novas efemérides traduzem com bastante exatidão a posição dos satélites no momento em que são calculadas. Porém, elas vão acumulando erros ao longo do tempo até que uma nova órbita seja calculada.
- **Modelo de ionosfera:** o modelo da ionosfera permite modelar matematicamente o atraso que o sinal de rádio sofre nesta região da atmosfera.

Estas informações compõem, entre outras, as mensagens de navegação. Uma vez geradas as novas mensagens de navegação, a estação de controle mestre as envia aos satélites por meio de uma das antenas de superfície localizadas no Hawaii (figura 2.10), e nas ilhas de Ascensão, Diego Garcia e Kwajalein. A estação mestre de controle também envia sinais de telemetria para operação dos satélites.



Figura 2.10 – Antena de superfície localizado no Hawaii.

Cada antena de superfície pode “ver” todos os satélites pelo menos uma vez por dia. Cada um dos satélites pode ser visto pela rede de controle três vezes ao dia, portanto as informações podem ser transmitidas a cada 8 horas. Normalmente, as informações são enviadas uma vez por dia, esporadicamente duas vezes.

O amadurecimento do sistema GPS permitirá aos satélites operar com grande independência do segmento de controle sem perda significativa em desempenho. Os satélites do bloco IIR e IIF (ainda não lançados) possuirão um canal de comunicação cruzado (*cross link*) entre eles. A troca de informações entre os satélites permitirá produzir informações de órbita e tempo GPS no próprio segmento espacial tornando-os mais autônomos em relação ao segmento de controle. De fato, os satélites do bloco II

foram projetados para ter seu funcionamento normal por até 14 dias sem contato com o segmento de controle (ANDREWS 2004). Já os satélites do bloco IIA foram projetados para até 180 dias de operação. Nestes casos, é evidente que há degradação na exatidão das mensagens de navegação.

2.4 Posicionamento por meio do código C/A

A seguir são descritos os conceitos, cálculos e equações envolvidos na determinação da posição de um receptor GPS por meio do código C/A.

A figura 2.11 apresenta a configuração espacial dos vetores envolvidos no processo de determinação da posição de um usuário no sistema GPS. Os vetores estão representados no sistema cartesiano de coordenadas ECEF XYZ. Nesse sistema, o eixo Z é paralelo ao eixo de rotação, o eixo X orientado na direção do meridiano de referência internacional (IRM - *International Reference Meridian*) e o eixo Y a 90° de OX, completando um sistema dextrógiro.

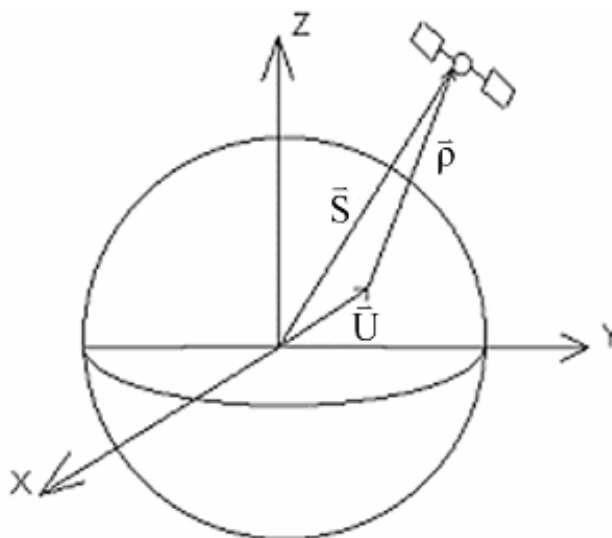


Figura 2.11 – Configuração espacial dos vetores.

O vetor \bar{S} representa a posição do satélite que é conhecida a partir da tabela de efemérides transmitida pelo satélite. O módulo do vetor \bar{p} representa a distância entre o receptor do usuário e o satélite, a sua grandeza é calculada pelo receptor GPS por meio do tempo de propagação da onda no espaço. O vetor \bar{U} representa a posição do usuário a ser determinada. Os três vetores são relacionados pela equação $\bar{U} = \bar{S} - \bar{p}$. O receptor GPS mede o módulo de \bar{p} ($|\bar{p}| = \rho$) e não sua direção e sentido. Medindo-se ρ para três satélites, obtêm-se um sistema de equações matematicamente determinado cuja solução é as componentes do vetor \bar{U} .

Geometricamente a medida ρ da distância ao satélite pode ser representada por uma casca esférica de raio ρ e centro no satélite conforme pode ser vista na figura 2.12-a. Pode-se verificar que o vetor $\bar{\rho}$ possui uma extremidade fixa no satélite e a outra livre.

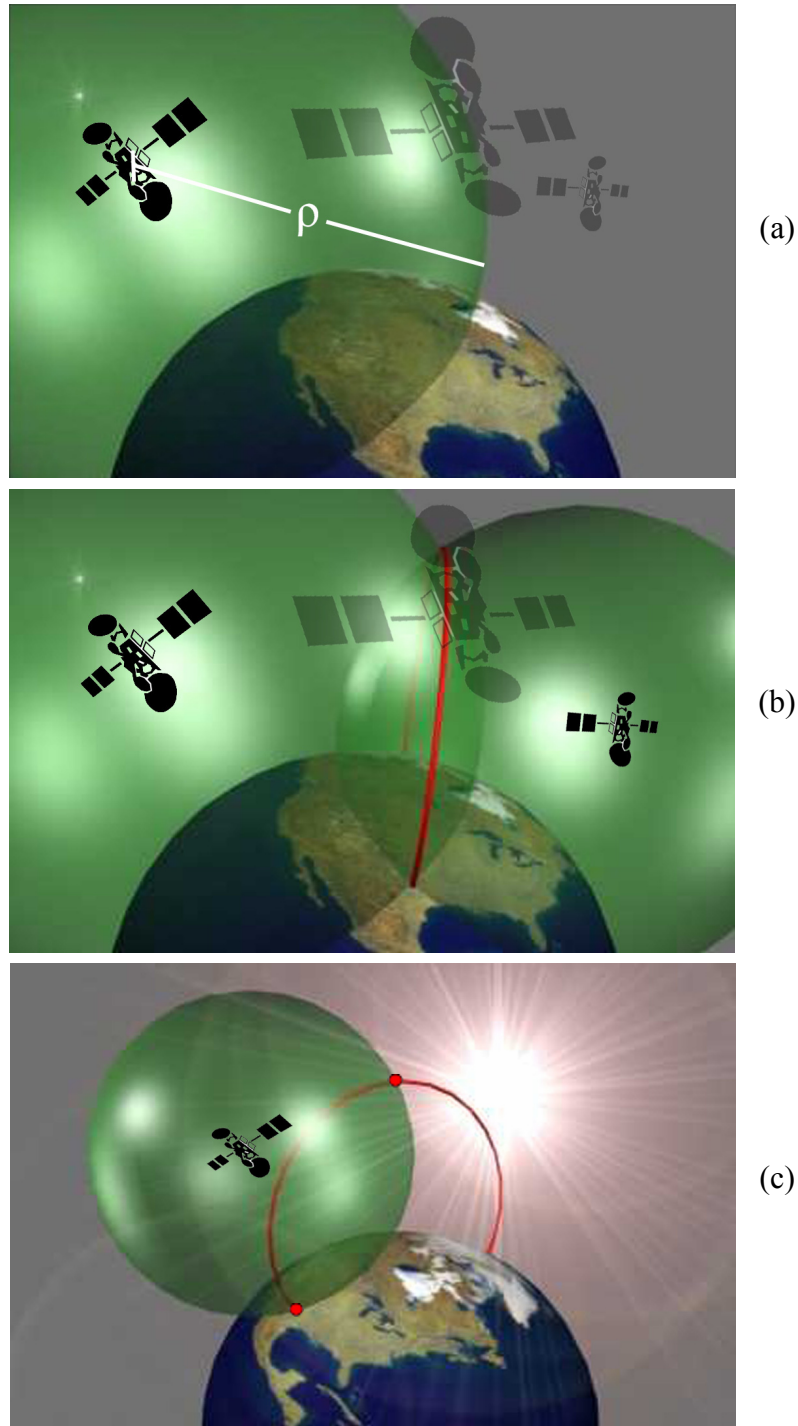


Figura 2.12 – Trilateração do GPS (BRAIN 2002).

Utilizando-se um segundo satélite, a solução das equações $\bar{U} = \bar{S}^1 - \bar{\rho}_1$ e $\bar{U} = \bar{S}^2 - \bar{\rho}_2$ corresponde à circunferência formada pela interseção das duas cascas

esféricas centradas nos satélites (figura 2.12-b). Para a completa determinação de \vec{U} é necessário utilizar um terceiro satélite, cuja solução das equações fornece dois pontos correspondentes à interseção da circunferência com a terceira casca esférica (figura 2.12-c). Um dos pontos está nas proximidades da superfície terrestre e corresponde ao vetor \vec{U} da posição do receptor. O outro ponto está claramente distante da Terra e deve ser descartado. Uma animação da figura 2.12 pode ser vista em Brain (2002).

A utilização de um quarto satélite elimina a dúvida na escolha entre os dois pontos e é necessário para determinar o resíduo de sincronização (t_r) do relógio do receptor. O receptor, ao captar os sinais GPS, sincroniza o oscilador local com um dos satélites. Em nível eletrônico, a sincronização por enlace de fase (*phase lock*) possui uma flutuação (*jitter*) inferior a um microssegundo. Um erro de 1 μ s no sincronismo corresponde ao erro de distância de $c \cdot t_r \approx 300$ m, onde c é a velocidade da luz no vácuo ($c = 299.792.458,0000$ m/s). A amplitude desta flutuação de medida pode ser considerada uma nova variável no sistema de equações do posicionamento, exposto adiante.

O **Tempo GPS** é a medida de tempo adotada nos satélites GPS determinado matematicamente pelo centro de controle. O Tempo GPS é transmitido por cada satélite indiretamente na cadência de sua transmissão e nas informações de erro dos dados de cada satélite. A correção do relógio de cada satélite para manutenção do Tempo GPS comum é transmitida ao receptor do usuário na forma de coeficientes de um polinômio de segundo grau conforme a equação:

$$\varepsilon^s = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 \quad (2.1)$$

onde:

a_0 é o termo independente da correção do relógio;

a_1 é a velocidade com que a correção varia;

a_2 é a taxa com que a velocidade da correção varia;

t é o tempo GPS no qual se quer calcular o erro;

t_{oc} é o tempo de referência para definição dos coeficientes.

A correção do relógio multiplicada por c deve ser aplicada na distância R medida pelo receptor antes do cálculo da solução. Esta correção não interfere no método de solução do sistema.

Sendo ρ a distância real entre o receptor e o satélite e chamando de R a distância medida eletronicamente, pode-se dizer que R corresponde a ρ somado ao erro provocado pelo resíduo de sincronismo ($c \cdot t_r$) e somado também a outros erros (d) presentes na medida. Essa equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$R = \rho + c \cdot t_r + d \quad (2.2)$$

O termo d representa erros que não são facilmente modelados, mas que são de pequena amplitude. Dessa forma é possível desprezá-lo. Nesta categoria de erros inclui-se, entre outros, o ruído do receptor e o erro de posição do satélite.

A distância real ρ entre o satélite e o usuário pode ser obtida geometricamente calculando-se a diferença entre os vetores \vec{S} e \vec{U} . Representando-se os vetores por suas coordenadas cartesianas $\vec{S} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$ e $\vec{U} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$, a distância real é dada pela equação 2.3.

$$\rho = \sqrt{(X^s - x)^2 + (Y^s - y)^2 + (Z^s - z)^2} \quad (2.3)$$

onde X^s , Y^s e Z^s são as coordenadas cartesianas para um satélite específico.

Substituindo-se (2.3) em (2.2) tem-se:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(X^s - x)^2 + (Y^s - y)^2 + (Z^s - z)^2} + c.t_r \\ \sqrt{(X^s - x)^2 + (Y^s - y)^2 + (Z^s - z)^2} + c.t_r - R &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

A equação 2.4 é função das coordenadas do receptor e do desvio de relógio. Chamando-se de $F(x, y, z, t_r)$ a equação 2.4 tem-se uma função de todas as variáveis a serem determinadas como mostra a equação 2.5.

$$F(x, y, z, t_r) = \sqrt{(X^s - x)^2 + (Y^s - y)^2 + (Z^s - z)^2} + c.t_r - R \quad (2.5)$$

Escrevendo-se esta equação para quatro satélites obtém-se um sistema de equações em quatro variáveis cuja solução são as coordenadas do receptor do usuário e o desvio de relógio.

$$\begin{aligned} F_1 &= \sqrt{(X^1 - x)^2 + (Y^1 - y)^2 + (Z^1 - z)^2} + c.t_r - R_1 \\ F_2 &= \sqrt{(X^2 - x)^2 + (Y^2 - y)^2 + (Z^2 - z)^2} + c.t_r - R_2 \\ F_3 &= \sqrt{(X^3 - x)^2 + (Y^3 - y)^2 + (Z^3 - z)^2} + c.t_r - R_3 \\ F_4 &= \sqrt{(X^4 - x)^2 + (Y^4 - y)^2 + (Z^4 - z)^2} + c.t_r - R_4 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Uma solução para este sistema não linear consiste em representar F por sua **série de Taylor** com apenas os primeiros termos de aproximação (2.7) e iterar numericamente até que seja encontrada a solução.

$$F_p \cong F|_{p_0} + \nabla F|_{p_0} \cdot \Delta F \quad (2.7)$$

O primeiro termo da série é a função calculada num ponto inicial p_0 . O segundo termo corresponde ao gradiente de F multiplicado pela distância entre p e p_0 . O gradien-

te é a direção para onde F cresce e a distância é a intensidade com que F cresce na direção do gradiente. O método iterativo assume um valor inicial p_0 para o passo $k=0$ e o sistema deve ser resolvido em ΔF . Sendo $\Delta F = F|_{k+1} - F|_k$, o próximo passo da iteração será $F|_{k+1} = F|_k + \Delta F$.

Devem ser calculados $k = n$ passos até que ΔF seja menor que um erro previamente definido. A convergência deste método é bastante rápida sendo necessárias apenas 2 ou 3 iterações para um bom valor inicial de p_0 . Em algumas situações, são necessárias 7 ou 8 iterações para a condição inicial p_0 correspondente ao centro da Terra e erro de relógio zero – $F(p_0) = [0;0;0;0]$.

Reescrevendo-se a equação 2.7 para o método numérico e expandindo o termo $\nabla F|_k \cdot \Delta F$ tem-se:

$$F|_k + F_x|_k \Delta x + F_y|_k \Delta y + F_z|_k \Delta z + F_{t_r}|_k \Delta t_r = 0 \quad (2.8)$$

As derivadas parciais no ponto k são apresentadas na equação 2.9.

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{X^s - x}{\sqrt{(X^s - x)^2 + (Y^s - y)^2 + (Z^s - z)^2}} \\ F_y &= \frac{Y^s - y}{\sqrt{(X^s - x)^2 + (Y^s - y)^2 + (Z^s - z)^2}} \\ F_z &= \frac{Z^s - z}{\sqrt{(X^s - x)^2 + (Y^s - y)^2 + (Z^s - z)^2}} \\ F_{t_r} &= c \end{aligned} \quad (2.9)$$

Escrevendo-se a equação 2.9 para 4 satélites e utilizando-se notação matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} F_x^1|_k & F_y^1|_k & F_z^1|_k & F_{t_r}^1|_k \\ F_x^2|_k & F_y^2|_k & F_z^2|_k & F_{t_r}^2|_k \\ F_x^3|_k & F_y^3|_k & F_z^3|_k & F_{t_r}^3|_k \\ F_x^4|_k & F_y^4|_k & F_z^4|_k & F_{t_r}^4|_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F^1|_k \\ -F^2|_k \\ -F^3|_k \\ -F^4|_k \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\text{Fazendo } A = \begin{bmatrix} F_x^1|_k & F_y^1|_k & F_z^1|_k & F_{t_r}^1|_k \\ F_x^2|_k & F_y^2|_k & F_z^2|_k & F_{t_r}^2|_k \\ F_x^3|_k & F_y^3|_k & F_z^3|_k & F_{t_r}^3|_k \\ F_x^4|_k & F_y^4|_k & F_z^4|_k & F_{t_r}^4|_k \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -F^1|_k \\ -F^2|_k \\ -F^3|_k \\ -F^4|_k \end{bmatrix} \text{ e substituindo em}$$

(2.10) tem-se:

$$A.\Delta F = B \quad (2.11)$$

$$\Delta F = A^{-1}.B \quad (2.12)$$

Sendo $\Delta F = F|_{k+1} - F|_k$, o próximo passo da iteração será $F|_{k+1} = F|_k + \Delta F$. Em notação matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k+1} - x_k \\ y_{k+1} - y_k \\ z_{k+1} - z_k \\ t_{rk+1} - t_{rk} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ z_{k+1} \\ t_{rk+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k + \Delta x \\ y_k + \Delta y \\ z_k + \Delta z \\ t_{rk} + \Delta t_r \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

São necessários, pelo menos, os dados de quatro satélites para se resolver o sistema. Para cada satélite adicional medido, obtém-se uma nova equação e ainda assim são mantidas as mesmas quatro incógnitas. Para sistemas com mais de quatro satélites, há redundância na solução e, por conseguinte, o resultado será mais preciso. Supondo-se que sejam observados $N > 4$ satélites, a matriz A terá dimensão $N \times 4$ não sendo possível a sua inversão. Nesse caso, a solução do sistema pode ser obtida por meio do **método dos mínimos quadrados**, que utiliza contribuições de todas as N medidas para minimizar a soma dos quadrados dos erros das medidas. A **forma matricial** dos mínimos quadrados consiste em multiplicar à esquerda, pela matriz A transposta (A^T), os dois termos da igualdade em (2.11) obtendo-se:

$$A^T A.\Delta F = A^T B \quad (2.14)$$

Dessa forma, o produto $A^T A$ resulta em uma matriz quadrada e inversível, portanto:

$$\Delta F = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (2.15)$$

A solução final desse sistema de equações em F corresponde às coordenadas tridimensionais x, y, z do usuário e ao resíduo de sincronização do receptor t_r .

A propagação dos sinais transmitidos pelo GPS ocorre, em grande parte, no vácuo, porém atravessa também a ionosfera e a troposfera onde a velocidade de propagação é menor que no vácuo. O atraso do sinal pode ser modelado matematicamente, gerando uma correção que também pode ser aplicada na distância medida pelo receptor.

A figura 2.13 apresenta o código na linguagem GNU/OCTAVE (similar a Matlab) que efetua o cálculo descrito neste capítulo. Tomou-se como exemplo uma época coletada no ponto nomeado PSEL. As coordenadas dos satélites e a distância medida estão em metros. A correção do relógio de cada satélite ε^s está em microssegundo e corresponde ao primeiro termo do polinômio. Neste caso, os demais termos são nulos.

```

clear; pack; format free;

% Entrada de dados
% Posição XYZ e erro de relógio dos satélites, distância medida,
% flag de uso do satélites na solução (1 usa, 0 não usa)
S=[ 23401815.621   -1073326.691  -12387628.907   246.947136  22038268.180  1;
    -12346923.025  -19308168.462  -13113463.849    55.400089  24559890.192  1;
         7437727.831  -18652134.171  -16724987.688    79.605914  20503237.692  1;
         8253508.586  -20917785.490   14074098.035   -89.666341  23736063.020  1;
        14442771.094    6742354.149  -20508567.376  -259.183542  23794399.799  1;
        22114764.744   12140359.334   -8597120.623    60.691793  25305805.264  1;
       -5404698.032  -25849187.599   -446524.847   301.371563  23405247.732  1;
        1415255.972  -25014037.402   -8679105.020   507.368492  21564165.783  1;
       14922976.016   -9429156.926  -19847090.451   -13.276342  21233305.621  1;
       21987257.758   -9839275.604   11168491.505  -185.473031  23247269.060  1;
       26096383.141    4601296.848    3277349.668   361.040024  24437736.489  1];

% Numero de satélites a serem utilizados no cálculo
% Geralmente usa-se todos mas alguns satélites podem ser excluídos manualmen-
te
N=11;

% velocidade da luz no vácuo m/s*10^-6
c=299792458*10^-6;

% condição de parada da iteração
ErroMax=0.012;

% Condição inicial: posição inicial do receptor do usuário
F0 = [0; 0; 0; 0];

% -----
% O cálculo começa aqui.
count=0;
ErroRel=1;
ErroAtual=0;

% Loop do método iterativo
while (ErroRel>ErroMax)
    count=count+1;

    % Calcula as matrizes A e B
    for i=1:N
        for j=1:3
            A(i,j)=(S(i,j)-F0(j)) *
                ((S(i,1)-F0(1))^2+(S(i,2)-F0(2))^2+(S(i,3)-F0(3))^2)^-0.5;
        end
        A(i,4)=c;
        B(i)=S(i,4)*c - S(i,5) -
            ((S(i,1)-F0(1))^2+(S(i,2)-F0(2))^2+(S(i,3)-F0(3))^2)^0.5 - c*F0(4);
    end

    % Resolve o sistema
    F1=inv(A.'*A)*(A.'*B);
    F0=F0-F1;
    ErroAnt=ErroAtual;
    ErroAtual=abs(F1.'*F1);
    ErroRel=abs(ErroAnt-ErroAtual);

    % Mostra resultados parciais
    count
    ErroRel
    F0
end

```

Figura 2.13 – Programa em GNU OCTAVE do cálculo por código C/A.

O resultado obtido na última iteração do programa está na figura 2.14. Foram utilizados nos cálculos os onze satélites. As coordenadas estão em metros no sistema XYZ e o desvio de relógio do receptor está expresso em microssegundos.

```
count = 6
ErroRel = 4.9556963220565e-10
F0 =
 3967129.336108
-4390110.1594612
-2375390.5906517
-0.054390979650626
```

Figura 2.14 – Resultado da posição por código.

Observa-se que mesmo considerando o ponto inicial do receptor no centro da Terra, que é a opção óbvia, porém bastante ruim, a solução convergiu em seis iterações. O desvio de relógio, da ordem de $0,05 \mu\text{s}$, corresponde a $3 \times 10^8 \times 0,05 \times 10^{-6} \approx 15 \text{ m}$, que é um bom resultado. Não se pode, porém inferir a qualidade do cristal do receptor com apenas uma medida. Neste cálculo não estão aplicadas as correções matemáticas dos modelos de atraso de propagação na ionosfera e troposfera.

Esta solução, por definição, está dentro da tolerância do posicionamento padrão SPS, ou seja, a posição verdadeira do ponto PSEL está, com 95% de chance, dentro de um raio de 100 metros deste ponto. De fato, considerando-se a posição verdadeira do ponto PSEL como sendo:

$$X = 3.967.078,26 \text{ m}$$

$$Y = -4.390.121,60 \text{ m}$$

$$Z = -2.375.369,89 \text{ m}$$

a solução calculada no exemplo está a 56,3 metros da posição verdadeira. A posição verdadeira de PSEL foi assumida a partir de técnicas de cálculo que garantem a exatidão dentro do decímetro, o que é bastante razoável para este caso.

3 Métodos diferenciais de GPS

As especificações do posicionamento padrão, em muitos casos, não atendem às necessidades dos usuários quanto a precisão e a confiabilidade. O GPS diferencial (DGPS) de código é uma técnica amplamente utilizada para a melhoria da qualidade dos resultados obtidos por meio do GPS, onde a qualidade está associada com a exatidão, a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Esta técnica consiste em utilizar informações de uma ou mais estações base DGPS a fim de remover erros de medida em receptores móveis. Um receptor habilitado para DGPS possui um canal de recepção de dados DGPS. Os dados recebidos permitem ao receptor determinar alguns erros de medida associados a cada um dos satélites e eliminá-los. Os dados também informam problemas nos satélites de forma a não serem utilizados nos cálculos. A figura 3.1 ilustra os elementos associados à técnica DGPS.

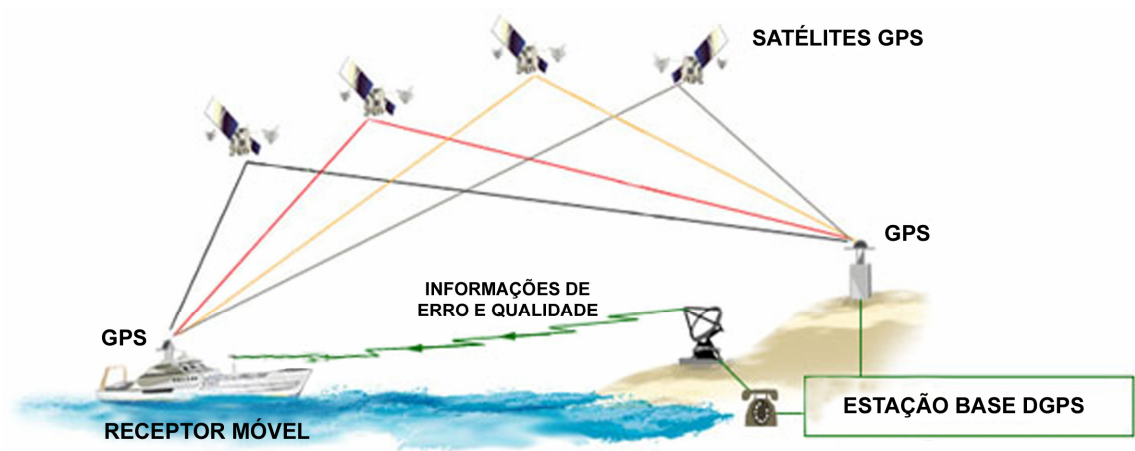


Figura 3.1 – Diagrama de um sistema DGPS.

O funcionamento da estação base DGPS geralmente é autônomo e contínuo. Na estação base há um receptor GPS, cuja antena encontra-se em posição muito bem determinada, que monitora o erro associado a cada satélite. O receptor determina a pseudo-distância a partir da temporização do código C/A e calcula a distância geométrica para cada satélite em cada instante de tempo. A distância geométrica corresponde à distância entre as coordenadas cartesianas da antena e as coordenadas de cada satélite. A diferença entre a distância geométrica e a distância medida corresponde ao erro de medida associado àquele satélite. Caso o erro para um satélite esteja fora de certos limites, a estação base pode considerar este satélite inadequado ao uso. Estas informa-

ções dos satélites e os erros de medida são transmitidos em rádio difusão para que receptores móveis possam utilizá-las em seus cálculos.

O monitoramento da qualidade do sinal GPS feito na estação DGPS pode, em poucos segundos, detectar e informar a ocorrência de algum problema nos satélites. No modo autônomo esta demora pode levar várias horas.

Além dos erros de medida realizados na estação base, são também transmitidas as taxas de variação do erro. Com o erro em um dado instante e sua taxa de variação, o microprocessador no receptor móvel pode inferir com maior exatidão os erros em instantes futuros.

A figura 3.2 ilustra o valor da correção que deve ser somado à medida de distância de um satélite arbitrário. As medidas foram realizadas no ponto PSEL e os valores apresentados correspondem à diferença entre a distância média e a distância geométrica.

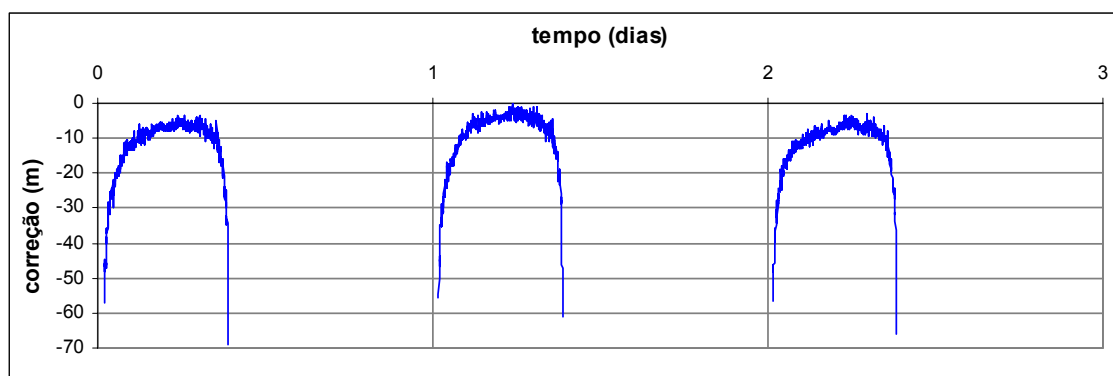


Figura 3.2 – Correção associada a um satélite.

Pode-se observar nessa figura que variação do erro ao longo do tempo ocorre em função da mudança na elevação do satélite. Quanto menor a elevação, maior o caminho percorrido pelo sinal e maior o atraso. Pode-se concluir que a principal componente do erro corresponde ao atraso de propagação do sinal.

Pode-se notar também na figura 3.2 que a passagem de um satélite repete-se a cada 24 horas apesar do período do satélite ser de 12 horas. Isto ocorre em função do período da Terra ser de 24 horas. De fato, descontando-se a rotação da Terra, o período do satélite possui 4 minutos a menos que 12 horas.

O protocolo utilizado nas transmissões de sinais DGPS é um padrão (RTCM 1998) recomendado pelo **Comitê Especial no. 104 da Comissão Técnica de Rádio para Serviços Marítimos** (RTCM SC-104 - *Radio Technical Commission for Maritime Services, special committee no. 104*). Este documento define diversos tipos de mensagens padronizadas e outros tipos não definidos ainda ou reservados para uso proprietário. As mensagens de correção diferencial de código são do tipo 1, escopo desse traba-

lho. Segundo o documento, o enlace de comunicação deve possuir uma taxa útil de pelo menos 50 bps para uma transmissão eficaz, porém é comum utilizar enlaces de 200 bps. Como cada mensagem RTCM tipo 1 tem comprimento máximo de 990 bits, isso resulta em um intervalo de no máximo 18 segundos entre as atualizações das correções. O protocolo tem seis bits de redundância para cada vinte e quatro bits de dados o que o torna imune a alguns erros de transmissão. Considerando o fato das correções e suas variações serem transmitidas continuamente e considerando também que os canais possuem taxa muito superior ao mínimo, é permitido que uma sequência de dados transmitidos possa ser descartada se necessário sem perda significativa da qualidade dos resultados.

3.1 Erros removíveis pelo DGPS

A técnica DGPS baseia-se no fato de que alguns erros de medida são semelhantes quando medidos simultaneamente em locais distintos próximos. Dessa forma, quantificando-se os erros em um determinado local, podem-se subtrair esses erros de medidas feitas por outros receptores em sua vizinhança.

São três os principais tipos de erros associados às medidas GPS. Os erros relacionados aos satélites e aos dados transmitidos, como os erros de relógio e de efemérides, são igualmente visto por todos os receptores. Eles são, portanto, completamente removidos pelo DGPS.

Os erros relacionados à propagação do sinal na atmosfera são dependentes do caminho percorrido pelo sinal. Tomando-se dois receptores exatamente na mesma posição, os caminhos percorridos pelos sinais transmitidos são os mesmos, consequentemente os erros de propagação são os mesmos. A ionosfera é bastante homogênea na frequência transmitida pelos satélites e ao longo de poucas centenas de quilômetros, portanto, a diferença de atraso do sinal captado por dois receptores próximos é pequena. Nesse caso, o erro da distância entre o satélite e o receptor provocado pela ionosfera pode ser considerado muito parecido para receptores distantes até cerca de 100 km entre si (DANA 1995). A correlação dos sinais propagados na ionosfera diminui com o aumento da distância entre os receptores. Já o atraso do sinal que ocorre na troposfera depende fortemente da pressão atmosférica, temperatura e umidade. A variação desses parâmetros ao longo da superfície também pode ser considerada suave para várias dezenas de quilômetros. Atrasos na troposfera, portanto, são razoavelmente removidos pela técnica diferencial. De fato, os erros relacionados à propagação do sinal são relacionados com a distância entre o receptor móvel e a estação base. Quanto mais próximo o

receptor móvel da estação base, mais parecidos são os caminhos percorridos pelos sinais GPS e melhores removidos são os erros de propagação.

Os erros relacionados aos próprios receptores GPS são específicos e não podem ser eliminados pela técnica diferencial. Estes erros intrínsecos normalmente são relacionados com o oscilador local. Osciladores a quartzo estabilizado propiciam resultados melhores que osciladores comuns, porém o custo é maior. As estações base DGPS devem utilizar bons osciladores a fim de minimizar estes erros. Os receptores móveis, porém, costumam utilizar osciladores comuns. Outro erro é relacionado ao local da antena do receptor. Os sinais GPS podem sofrer interferências pelos objetos próximos à antena receptora como multicaminhamento ou recepção indireta do sinal. Nesse caso, o atraso provocado no sinal depende exclusivamente do local de recepção e não tem como ser removido pelo DGPS. Construir a base DGPS em local de boa visibilidade direta e pouca probabilidade de multicaminhamento contribui para um melhor resultado das correções diferenciais. No receptor móvel, problemas de multicaminhamento podem ser minimizados por meio de antenas especiais e por meio de técnicas especiais de correlacionamento de código.

3.2 Implementações de DGPS por código

Nos EUA, o DGPS por código foi implementado e é mantido pela guarda costeira. Inicialmente o DGPS foi aplicado na aproximação de embarcações na região costeira dos EUA. A faixa de 285 kHz a 325 kHz é alocada para rádio navegação marítima e é padronizada mundialmente. Os radiofaróis transmitem sinais para detecção de direção de rádio (**rdf** - *radiodirection finding signals*) espaçados de 1 kHz. Como as embarcações em geral utilizam radiofaróis para sua navegação, adotou-se utilizar a infraestrutura dos radiofaróis e sua portadora para transmitir os sinais DGPS.

Hoje, a rede de estações DGPS está sendo expandida para todo o território nacional dos EUA pela associação de 7 agências federais. O projeto é chamado de DGPS de cobertura nacional (*nationwide DGPS*) e deverá estar concluído em 2005. Pode-se observar na figura 3.3 que a cobertura está quase completa e em muitos lugares há cobertura por mais de uma estação base.

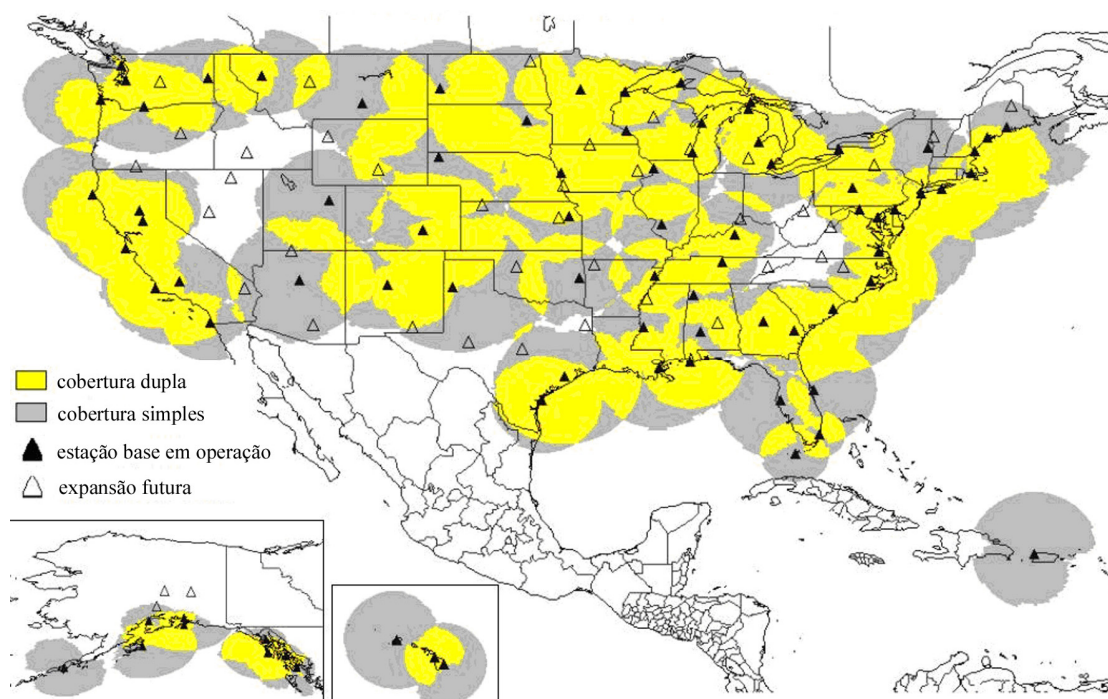


Figura 3.3 – Cobertura DGPS nos EUA em 08/03/2004 (NAVCEN 2004).

A implementação de DGPS no Canadá também é ampla em sua região costeira. A figura 3.4 mostra a distribuição e cobertura das estações base DGPS do Canadá.



Figura 3.4 – Cobertura DGPS no Canadá (CANADIAN 2005).

A rede DGPS no Brasil é mantida pela marinha brasileira e contempla os principais portos do país, como pode ser visto na figura 3.5.



Figura 3.5 – Cobertura DGPS no Brasil (radiofaróis da marinha).

O padrão RTCM aceita qualquer sistema de transmissão, desde que mantenha a taxa útil mínima de 50 bps. O protocolo RTCM é encapsulado na transmissão e o receptor correspondente remove a sobrecarga de dados para entregar RTCM puro ao receptor GPS. A grande maioria de receptores GPS aceita dados RTCM por meio de sua porta serial RS-232. De fato, os receptores geralmente aceitam alguma forma de correção diferencial, seja RTCM ou outro.

Em algumas aplicações específicas, como por exemplo, agricultura de precisão, onde é necessário o uso do DGPS dentro de uma área limitada, é comum o uso de rádio-modem VHF como enlace de comunicação. Um rádio-modem, tipicamente, possui uma entrada RS-232 no transmissor e uma saída RS-232 no receptor e alcance de algumas dezenas de quilômetros. A estação base DGPS é montada num ponto estratégico juntamente com o transmissor de forma a garantir a segurança física dos equipamentos e a abrangência desejada.

Em algumas implementações, utiliza-se uma subportadora de dados da faixa de FM em 57 kHz. Nos EUA foi padronizado o protocolo RBDS (*radio broadcast data system*) cuja banda é de 1187,5 bps. Segundo Itis (2002), além de dados DGPS, podem ser transmitidos diversas outras informações como **id** de programação, frequências alternativas da rádio, *paging*, data e hora, anúncios de viagem e TMC (*traffic message system*).

Uma outra implementação de DGPS utiliza a internet como sistema de comunicação. O software DGPS-IP (RUPPRECHT 2003) é um servidor de dados RTCM distribuído sob licença GNU-GPL. Os clientes conectados ao servidor reproduzem os dados RTCM na porta serial do computador local. Nesse caso, deve-se tomar cuidado com a distância entre o GPS móvel e a estação base. As correções serão efetivas somente para distâncias não superiores a algumas centenas de quilômetros. Em pesquisa pela internet, não foi encontrado nenhum servidor DGPS-IP no Brasil. O NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*), descrito em Weber (2003), é um sistema DGPS via internet com diversas bases instaladas na Europa com capacidade para DGPS (0.5 kbps) e RTK (5 kbps). Em Hada (2003) é descrito outro sistema DGPS com correções via internet e GSM implementado no Japão em fase de testes.

3.3 Outros sistemas DGPS

A forma mais simples de DGPS é chamada **DGPS de código** e consiste na determinação e transmissão das correções de distância por uma estação base de DGPS, conforme descrito anteriormente. No entanto, a área de cobertura de uma estação é limitada a um raio de poucas centenas de quilômetros na região costeira e menos ainda nos trechos continentais. O DGPS por código é apropriado para sistemas locais como aproximação de navios em portos e agricultura de precisão em fazendas, entre outros. Para a implementação em regiões muito extensas o DGPS por código pode não ser o mais apropriado pois o erro é diretamente relacionado com a separação entre a estação móvel e a estação de referência.

Nesse contexto, uma outra técnica de DGPS foi desenvolvida e amplamente implementada, onde o sistema de transmissão ocorre por meio de satélite geo-estacionário. Esta técnica é classificada como SBAS (*satellite based augmentation system*). Nessa técnica, as estações de monitoramento calculam parâmetros que modelam os erros associados às medidas GPS em função da posição do receptor do usuário. Os parâmetros são transmitidos por satélites geo-estacionários na mesma frequência dos satélites GPS. De fato, a transmissão do satélite geo-estacionário é idêntica à transmissão do satélite GPS a não ser pelos dados de navegação. Isso simplifica a recepção dos sinais, podendo-se aproveitar toda a parte analógica do receptor bem como o correlacionador de código. O satélite geo-estacionário é chamado falso satélite (*pseudolite* - *pseudo-satellite*) por se fazer passar por um satélite GPS. De fato, o *pseudolite* pode ser utilizado nos cálculos de posição da mesma forma que qualquer satélite GPS. A título de classificação, os sistemas diferenciais cuja transmissão das correções é feita a partir de antenas em solo podem ser chamados de GBAS (*ground based augmentation system*) em oposição ao SBAS. O DGPS por código é enquadrado no GBAS.

O SBAS, diferentemente do DGPS por código, não depende do funcionamento de uma estação base, mas sim de uma rede de estações de monitoramento espalhadas por toda a região de atuação do sistema. Os parâmetros de correção são determinados a partir de todas as estações. Caso alguma estação pare de funcionar, esta não compromete o funcionamento global. O erro associado ao SBAS é uniforme e não depende da distância do usuário a nenhuma estação de monitoramento. Quanto maior o número de estações melhores serão os parâmetros de correção dentro de uma área de cobertura. A área de cobertura do SBAS geralmente é continental e é relacionada com a área de cobertura (*footprint*) do satélite geo-estacionário.

Nos EUA, o SBAS é chamado WAAS (*wide area augmentation system*) e foi o primeiro sistema implementado no mundo. O WAAS foi uma necessidade do FAA (departamento de aviação comercial dos EUA) para adequar as características do GPS para utilização em aeronaves. O WAAS acrescenta informações necessárias ao sinal de navegação do GPS para sua utilização em todas as etapas da aviação. Além de prover informações para melhorar a exatidão das medidas GPS, o sistema provê informações para melhorar a confiabilidade do sistema, da mesma forma que o DGPS por código. A figura 3.6 mostra a posição das estações pertencentes à rede WAAS dos EUA.

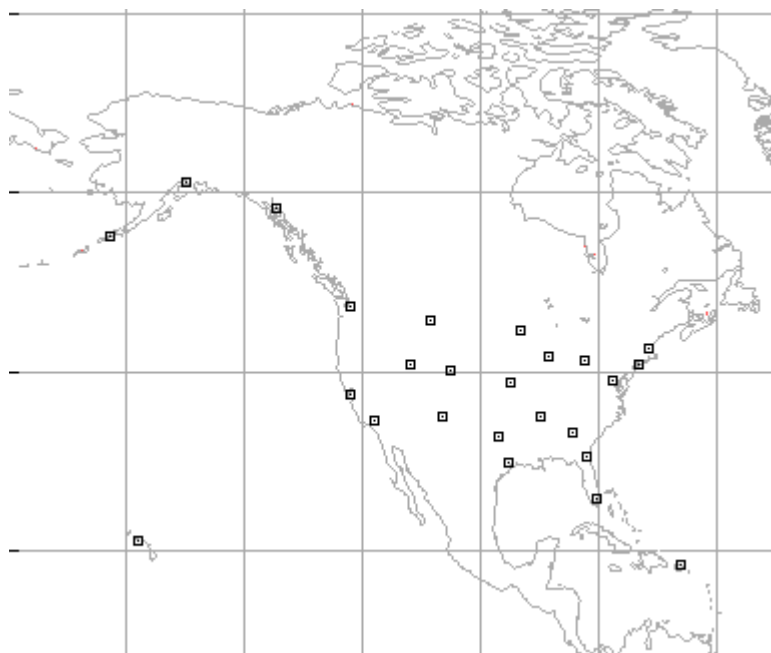


Figura 3.6 – Rede de estações WAAS dos EUA.

Outros sistemas similares e interoperáveis como WAAS americano estão sendo implementados na Europa e Japão chamados respectivamente EGNOS (*European GPS Navigation Overlay System*) e MSAS (*The Japan Civil Aviation Bureau's MTSAT Satellite Augmentation System*). Sistemas similares permitirão que usuários tenham posicionamento diferencial em diversos países com o mesmo receptor GPS.

Em 2003, o Canadá lançou um sistema chamado CDGPS – DGPS Canadense (*Canadian DGPS*) onde as correções são também transmitidas por um satélite geo-estacionário. A portadora, porém, possui frequência específica o que torna necessário um receptor próprio. Este receptor capta os sinais do CDGPS e converte os parâmetros de correção em correções de distância segundo o padrão RTCM, permitindo seu uso em qualquer receptor GPS preparado para DGPS por código.

A demanda por serviços DGPS no mundo propiciou o surgimento de empresas comerciais prestadoras deste tipo de serviço. No Brasil a principal empresa que opera SBAS é a Omnistar. A transmissão ocorre em frequência própria e as antenas do serviço diferencial e do GPS estão num mesmo invólucro. O custo do aparelho receptor é da ordem de 8000 dólares e o serviço de correção diferencial é da ordem de 1500 dólares por ano. Este custo é bastante elevado para muitas aplicações no Brasil.

A figura 3.7 mostra a cobertura do satélite geo-estacionário da Omnistar na América do Sul. A Omnistar é um dos provedores de serviço de correção diferencial com cobertura global. Outros satélites da empresa provêm cobertura nas outras regiões do globo.

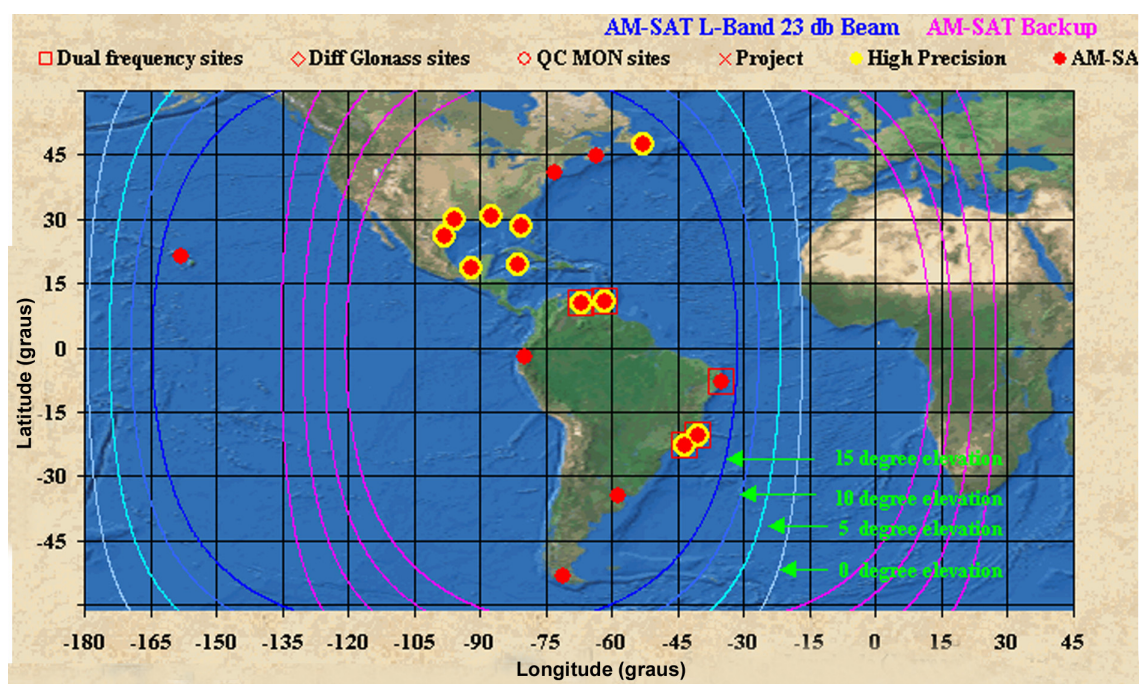


Figura 3.7 – Cobertura do satélite geo-estacionário da Omnistar (OMNISTAR 2004).

Observa-se pela figura que no Brasil a elevação do satélite pode chegar a pouco mais de 20°. Em regiões urbanas, devido às edificações, a recepção dos sinais desse satélite pode ser comprometida.

4 Sistema geodésico de referência

O sistema de coordenadas usado no GPS é sistema cartesiano geocêntrico fixo na Terra, conhecido por ECEF (*Earth Centered Earth Fixed*) com o eixo Z paralelo ao eixo de rotação, o eixo X orientado na direção do meridiano de referência internacional (IRM - *International Reference Meridian*) e o eixo Y a 90° de OX, completando um sistema dextrógiro.

Na prática usar as coordenadas “xyz” de um ponto na superfície da Terra no dia a dia é pouco conveniente. Dessa forma, fica melhor migrar para o sistema usado na geodésia com coordenadas curvilíneas, denominadas de latitude que varia entre $+90^\circ$ (N) e -90° (S) e longitude que varia de $+180^\circ$ (E) e -180° (W). Estas coordenadas dependem do modelo geométrico para substituir a forma da Terra, que não é regular.

Segundo Gemaél (1987), o elipsóide de revolução (figura 4.1) é um modelo matemático utilizado para representar a Terra nos cálculos geodésicos. Utilizando certas técnicas espaciais, os cálculos geodésicos são conduzidos sobre a superfície do elipsóide de revolução, razão pela qual é adotado este modelo matemático.

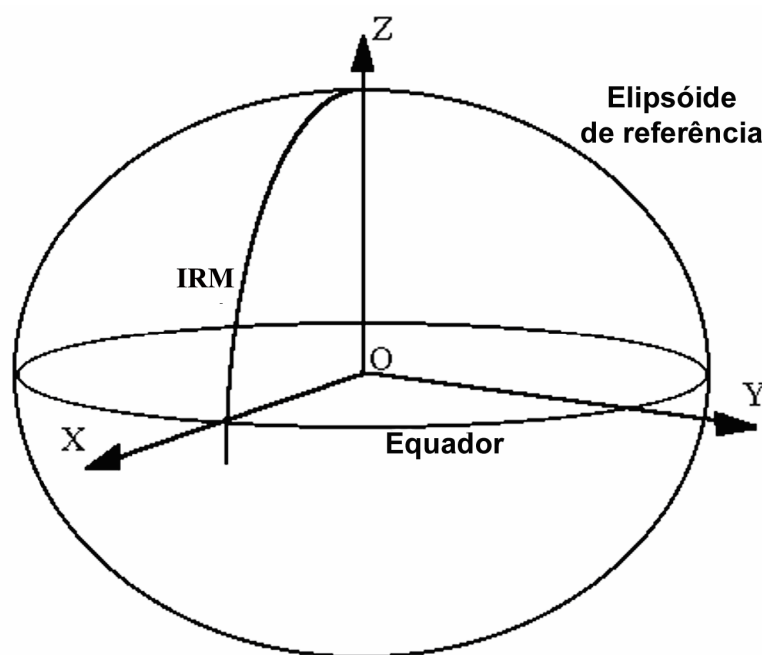


Figura 4.1 – Elipsóide de revolução.

O elipsóide de revolução é obtido a partir da rotação de uma semi-elipse sobre seu eixo menor. Esse elipsóide é chamado de elipsóide geodésico de referência. Neste caso as coordenadas são denominadas geodésicas ou geográficas com os ângulos denominados de latitude e longitude e a distância do ponto ao elipsóide denominado de altura elipsoidal ou altura geométrica.

Uma elipse pode ser caracterizada pelos comprimentos do semi-eixo maior “a” e do semi-eixo menor “b” (figura 4.2). Girando-se a elipse sobre seu eixo menor, obtém-se um elipsóide cuja forma assemelha-se a uma casca esférica achatada nos pólos. O elipsóide gerado possui como parâmetros fundamentais as mesmas grandezas da elipse que o originou, os semi-eixos a e b.

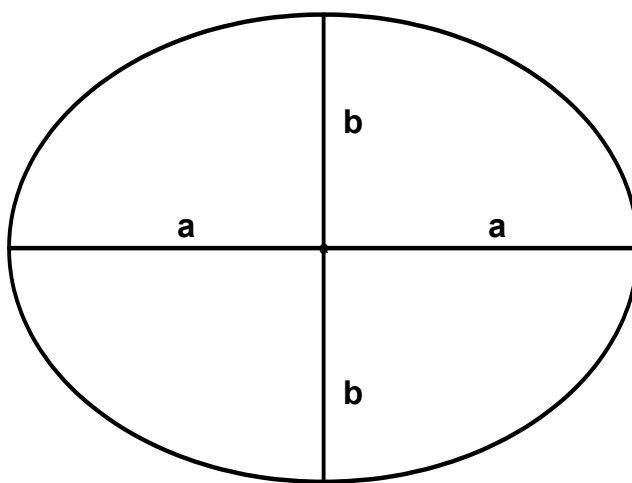


Figura 4.2 – Elipse.

Por outro lado, na geodésia tradicional, um elipsóide de revolução é mais comumente caracterizado pelo comprimento do semi-eixo maior **a** e pelo valor do achatamento f , este definido na equação 4.1.

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (4.1)$$

O semi-eixo maior caracteriza o tamanho de um elipsóide e o achatamento caracteriza sua forma.

Para a perfeita definição do elipsóide como sistema de coordenadas é necessário conhecer sua posição em relação ao sistema ECEF XYZ. Segundo Bomford (1980), na Geodésia clássica, isso é feito adotando-se arbitrariamente valores de coordenadas geodésicas para um ponto de origem. Esse ponto é chamado **datum** do sistema geodésico de referência. Por meio de fórmulas matemáticas, o semi-eixo menor **b** do elipsóide é mantido paralelo ao eixo médio de rotação da Terra, ou seja, paralelo ao eixo Z do sistema cartesiano ECEF XYZ.

Considerando-se um ponto P sobre a superfície da Terra, suas coordenadas geodésicas são definidas como sendo as coordenadas elipsoidais da projeção perpendicular desse ponto P sobre a superfície do elipsóide de referência, ilustrado na figura 4.3. A reta perpendicular à superfície do elipsóide que passa sobre o ponto P é chamada de reta **Normal** do ponto P.

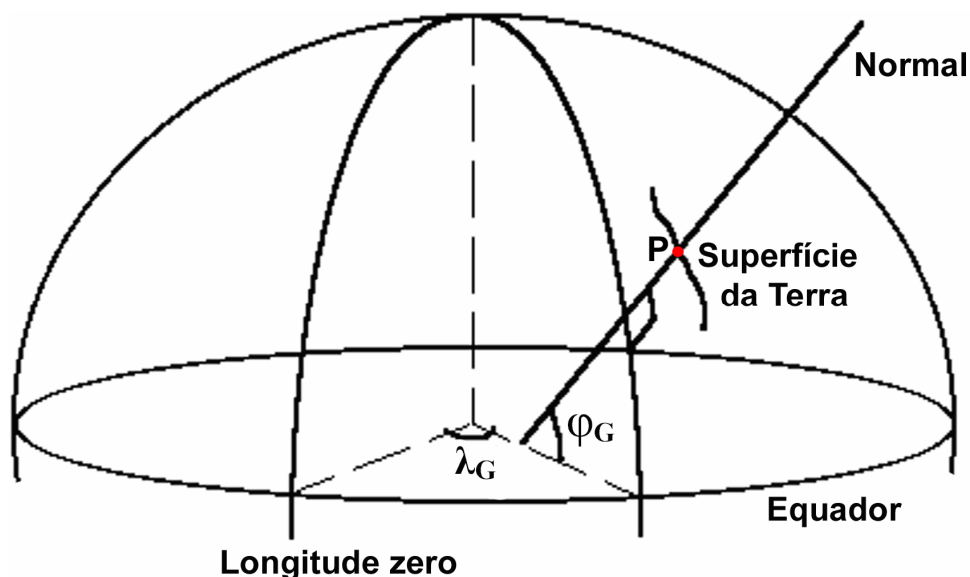


Figura 4.3 – Latitude e longitude geodésicas.

A latitude geodésica (ϕ_G) de um ponto é definida como sendo o ângulo entre a reta normal do ponto e o plano que contém o semi-eixo maior do elipsóide. O plano que contém o semi-eixo menor e a normal do ponto é chamado de plano meridiano geodésico do ponto. A longitude geodésica (λ_G) de um ponto é definida como o ângulo entre o plano meridiano geodésico do ponto e um plano meridiano de origem arbitrário.

No sistema de coordenadas geodésicas, a terceira dimensão é dada pela **altura elipsoidal (h)** ou **altura geométrica** do ponto, que é definido como sendo a distância entre o ponto e a superfície do elipsóide medido ao longo de sua normal (figura 4.4).

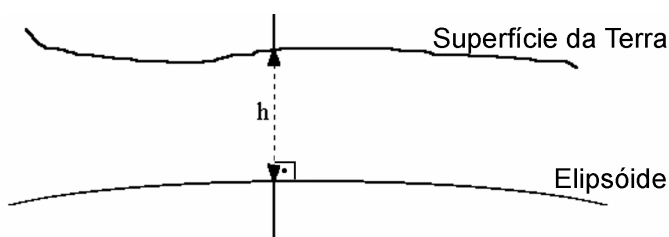


Figura 4.4 – Altura elipsoidal (h).

Nos estudos da geodésia física se usa o conceito de **geóide** que tem como tese uma superfície equipotencial gravitacional que melhor representa o nível médio dos mares. Podem-se definir outras superfícies equipotenciais, acima e abaixo do geóide que

são chamadas geópes. A reta perpendicular ao geóide num dado ponto é chamada vertical do ponto. A distância de um ponto sobre a superfície da Terra até a superfície do geóide, medida na direção vertical do ponto, é chamada **altura ortométrica (H)** ou **altitude** (figura 4.5) (GEMAEL 1987).

Para um dado ponto, a diferença entre altura geométrica (**h**) para um específico elipsóide e a altura ortométrica (**H**) é denominada de **altura geoidal** ou **ondulação geoidal (N)**.

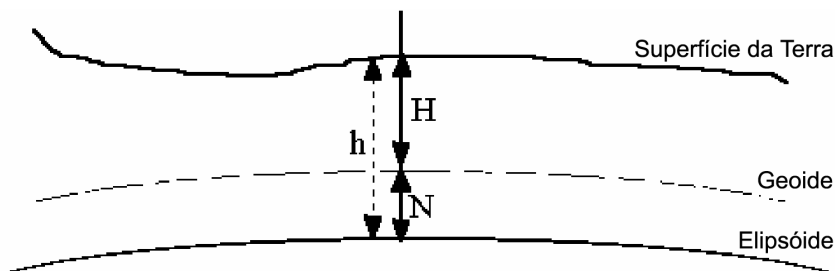


Figura 4.5 – Altura ortométrica (H) e ondulação geoidal (N).

Existem diversos elipsóides adotados no mundo. Na realidade, cada país adota um elipsóide e um datum que melhor se ajustam sobre a superfície real da região. No caso do GPS, as coordenadas obtidas são representadas utilizando-se o elipsóide de referência WGS 84 (*World Geodetic System of 1984*). O WGS 84 é um elipsóide que se ajusta melhor a toda a superfície terrestre não beneficiando nenhuma região do globo. Os parâmetros desse sistema são:

$$a = 6.378.137 \text{ m (semi-eixo maior)}$$

$$f = 1/298,257223563 \text{ (achatamento)}$$

O WGS 84 não possui datum. O sistema cartesiano do WGS 84 é o próprio sistema ECEF XYZ correspondente a uma data arbitrária.

O Brasil, por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), adota atualmente em suas cartas o sistema SAD 69 (*South American Datum of 1969*) que utiliza o elipsóide da Associação Geodésica Internacional (AGI) de 1967 e o datum **VT Chuá**, localizado perto de Uberaba, MG. O elipsóide adotado no SAD 69 possui os seguintes parâmetros:

$$a = 6.378.160 \text{ m}$$

$$f = 1/298,25$$

Brevemente, o Brasil e diversos países das Américas deverão adotar o sistema SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas. Este sistema substituirá o SAD 69 nos trabalhos geodésicos do Brasil. Segundo IBGE (1997), o SIRGAS é

um sistema geocêntrico cujos parâmetros são muito próximos do WGS 84, podendo, em muitas práticas, serem considerados idênticos. Segundo Farfan (2005), a conversão dos mapas para o sistema SIRGAS começará neste ano de 2005 e terá início assim que o presidente assinar o decreto, que já se encontra no ministério do planejamento.

Segundo documento em PMRG (2004), “o SIRGAS foi criado com o objetivo de compatibilizar os sistemas geodésicos utilizados nos países da América do Sul, com vistas a promover a definição e estabelecimento de um referencial único compatível em termos de precisão com a tecnologia atual (entenda-se GPS)”. O site oficial do SIRGAS na internet é <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas/principal.htm>.

4.1 Conversão de coordenadas entre sistemas geodésicos

São chamados **parâmetros de transformação** os dados necessários para se converter a coordenada de um sistema geodésico para outro. Segundo IBGE (1989), os parâmetros de transformação entre SAD69 e WGS84 correspondem aos valores de translação apresentados na equação 4.2.

$$\begin{aligned}X_B &= X_W + 66,87 \text{ m} \\Y_B &= Y_W - 4,37 \text{ m} \\Z_B &= Z_W + 38,52 \text{ m}\end{aligned}\tag{4.2}$$

Onde:

X_B, Y_B e Z_B = coordenadas cartesianas referidas ao sistema SAD69;

X_W, Y_W e Z_W = coordenadas cartesianas referidas ao sistema WGS 84.

A conversão de coordenadas de um sistema geodésico para outro é usualmente feito em três etapas: primeiramente convertem-se as coordenadas geodésicas para o sistema cartesiano solidário ao elipsóide, depois se aplica os parâmetros de transformação para o novo sistema geodésico, e por fim converte-se para as coordenadas geodésicas do novo sistema.

Neste texto é adotada a notação abaixo, algumas delas repetidas aqui para maior clareza.

X, Y e Z = coordenadas cartesianas do ponto;

φ, λ e h = coordenadas geodésicas do ponto;

f = achatamento do elipsóide;

a, b = semi-eixos maior e menor do elipsóide;

$e, e' =$ primeira e segunda excentricidades do elipsóide, onde:

$$e^2 = f(2 - f) \quad (4.3)$$

$$e'^2 = \frac{e^2}{1 - e^2} \quad (4.4)$$

Define-se N , o **raio de curvatura da primeira vertical** num dado ponto como sendo a distância entre o eixo Z e a projeção do ponto sobre a superfície do elipsóide, medida na direção da normal ao ponto. Na figura 4.6, o raio de curvatura da primeira vertical do ponto P corresponde à distância entre P_1 e P_2 .

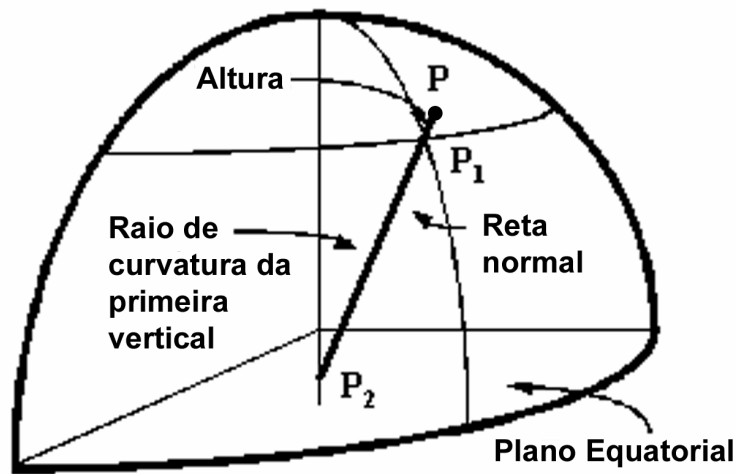


Figura 4.6 – Raio de curvatura da primeira vertical.

O raio de curvatura da primeira vertical depende somente da latitude do ponto e do elipsóide adotado e pode ser calculado por meio da equação 4.5. Pode-se observar geometricamente que na linha do equador ($\varphi = 0$), N coincide com o semi-eixo a do elipsóide e que no pólo ($\varphi = 90^\circ$), N coincide com o semi-eixo b do elipsóide.

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (4.5)$$

A representação cartesiana das coordenadas de um ponto, dadas suas coordenadas geodésicas, pode ser obtida pelas equações 4.6, 4.7 e 4.8.

$$X = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \quad (4.6)$$

$$Y = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \quad (4.7)$$

$$Z = (N(1 - e^2) + h) \sin \varphi \quad (4.8)$$

A representação geodésica das coordenadas de um ponto, dadas suas coordenadas cartesianas, pode ser obtida pelas equações 4.9, 4.10 e 4.11.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Z + e^2 b \sin^3 \theta}{p - e^2 a \cos^3 \theta}\right) \quad (4.9)$$

$$\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (4.10)$$

$$h = \frac{p}{\cos \varphi} - N \quad (4.11)$$

onde

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{Z.a}{p.b}\right)$$

OBS.: Os arcos tangentes devem estar entre $-\pi$ e π .

Para maiores detalhes sobre conversões de coordenadas, elipsóides e sistemas geodésicos de referência, veja Gemaël (1987).

4.2 Exemplo numérico

Tomemos um exemplo numérico de conversão de coordenadas entre sistemas geodésicos. Vamos utilizar a posição da antena receptora GPS situada no alto do prédio do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC. Vamos nomear o local da posição da antena de PSEL. Vamos partir de sua representação no sistema WGS 84 e representá-lo no sistema SAD 69.

Dadas as coordenadas de PSEL em WGS 84:

$$\varphi = 22^\circ 00' 22,5884''$$

$$\lambda = -47^\circ 53' 52,2664''$$

$$h = 834,82 \text{ m}$$

Iremos determinar as coordenadas no sistema SAD 69.

O sufixo S indica sul e W indica oeste. As coordenadas estão representadas em graus/minutos/segundos/décimos de segundos (GMMSS,SSSS), representação esta bastante usual. Nos cálculos, no entanto, as coordenadas geralmente devem estar em

radianos. Convertendo-se as coordenadas para graus/décimos de graus e depois para radianos obtém-se:

$$\varphi = -22,00627456^\circ \rightarrow \varphi = -0,384081947 \text{ rad}$$

$$\lambda = -47,89785178^\circ \rightarrow \lambda = -0,835975218 \text{ rad}$$

Os sinais negativos na latitude e longitude representam respectivamente os sentidos sul e oeste.

Primeiro passo: conversão para XYZ

Os parâmetros do elipsóide WGS 84 foram repetidos aqui para melhor entendimento.

$$a = 6.378.137 \text{ m (semi-eixo maior) (WGS 84)}$$

$$f = 1/298,257223563 \text{ (achatamento) (WGS 84)}$$

$$e^2 = f(2 - f) \rightarrow e^2 = 0,00669438$$

O raio de curvatura da primeira vertical no ponto PSEL, dado pela equação 4.5 é:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \rightarrow N = \frac{6.378.137}{\sqrt{1 - 0,00669438 \cdot \sin^2(-0,384081947)}} \rightarrow$$

$$N = 6.381.136,623 \text{ m}$$

As coordenadas cartesianas podem ser calculadas diretamente pelas equações 4.6, 4.7 e 4.8.

$$X = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \rightarrow$$

$$X = (6381136,623 + 834,8) \cdot \cos(-0,384081947) \cdot \cos(-0,835975218)$$

$$\rightarrow X = 3.967.078,261 \text{ m}$$

$$Y = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda$$

$$\rightarrow Y = -4.390.121,598 \text{ m}$$

$$Z = (N(1 - e^2) + h) \sin \varphi$$

$$\rightarrow Z = -2.375.369,888 \text{ m}$$

Segundo passo: aplicação dos parâmetros de transformação

Com as coordenadas cartesianas do ponto, aplicam-se os parâmetros de transformação de WGS 84 para SAD 69, segundo a equação 4.2.

$$X_B = X_W + 66,87 \text{ m} \rightarrow X_B = 3.967.145,131 \text{ m}$$

$$Y_B = Y_W - 4,37 \text{ m} \rightarrow Y_B = -4.390.125,968 \text{ m}$$

$$Z_B = Z_W + 38,52 \text{ m} \rightarrow Z_B = -2.375.331,368 \text{ m}$$

Terceiro passo: conversão para o sistema geodésico final

Os parâmetros do elipsóide SAD 69 estão repetidos aqui para melhor entendimento.

$$a = 6.378.160 \text{ m (SAD 69)}$$

$$f = 1/298,25 \text{ (SAD 69)}$$

$$e^2 = f(2-f) \rightarrow e^2 = \frac{1}{298,25} \left(2 - \frac{1}{298,25}\right) \rightarrow e^2 = 0,006694542$$

$$e'^2 = \frac{e^2}{1-e^2} \rightarrow e'^2 = \frac{0,006694542}{1-0,006694542} \rightarrow e'^2 = 0,006739661$$

$$f = \frac{a-b}{a} \rightarrow b = a(1-f) \rightarrow b = 6.378.160 \left(1 - \frac{1}{298,25}\right)$$

$$\rightarrow b = 6.356.774,719 \text{ m}$$

A partir das coordenadas cartesianas já referentes a SAD 69, pode-se obter as coordenadas geodésicas por meio das equações 4.9, 4.10 e 4.11.

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2} \rightarrow p = \sqrt{3.967.145,131^2 + (-4.390.125,968)^2} \rightarrow$$

$$p = 5.917.047,110$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{Z \cdot a}{p \cdot b}\right) \rightarrow \theta = \arctan\left(\frac{-2.375.331,368 \cdot 6.378.160}{5.917.047,110 \cdot 6.356.774,719}\right) \rightarrow$$

$$\theta = -0,38290850$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Z + e'^2 b \sin^3 \theta}{p - e'^2 a \cos^3 \theta}\right) \rightarrow$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{-2.375.331,368 + 0,006739661 \cdot 6.356.774,719 \cdot \sin^3(-0,38290850)}{5.917.047,110 - 0,006694542 \cdot 6.378.160 \cdot \cos^3(-0,38290850)}\right)$$

$$\rightarrow \varphi = -0,38407355 \text{ rad}$$

$$\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad \rightarrow \quad \lambda = \arctan\left(\frac{-4.390.125,968}{3.967.145,131}\right)$$

$$\rightarrow \lambda = -0,835967328 \text{ rad}$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad \rightarrow \quad N = \frac{6.378.160}{\sqrt{1 - 0,006694542 \cdot \sin^2(-0,386394529)}} \quad \rightarrow$$

$$N = 6.381.159,509$$

$$h = \frac{p}{\cos \varphi} - N \quad \rightarrow \quad h = \frac{5.917.047,110}{\cos(-0,38407355)} - 6.381.159,509$$

$$\rightarrow h = 842,043 \text{ m}$$

Portanto, o ponto PSEL, referido ao sistema SAD 69 é:

$$\varphi = -0,38407355 \text{ rad} \rightarrow \varphi = -22,00579314^\circ \rightarrow \varphi = -22^\circ 00' 20,8553''$$

$$\lambda = -0,835967328 \text{ rad} \rightarrow \lambda = -47,89739973^\circ \rightarrow \lambda = -47^\circ 53' 50,6390''$$

$$h = 842,043 \text{ m}$$

Considerando-se pequenas variações em torno de um ponto, esta região do elipsóide pode ser aproximada por um plano. Tomando-se como origem do plano o ponto PSEL na altitude de ~850 m, a variação de um segundo de arco na latitude corresponde a 30,19 m na direção Norte-Sul e na longitude corresponde 28,69 m na direção Leste-Oeste. Estes valores são obtidos calculando-se a correspondência entre o segundo de arco e a distância no plano topográfico. Estes cálculos podem ser efetuados no programa GEOBASE desenvolvido pela firma BASE-Aerofotogrametria de São Paulo.

As coordenadas geodésicas do ponto PSEL nos sistemas WGS 84 e SAD 69 apresentam um diferença numérica de aproximadamente 2'' em latitude e longitude e aproximadamente 7 m na altura (h). A diferença de coordenadas representada é da ordem de 85 metros na posição de um ponto, podendo causar um erro significativo se não for informado corretamente em qual sistema as coordenadas estão referidas.

5 Infra-estrutura de Pager

O pager é um receptor RF que opera em canais na faixa de 931 MHz com sinais digitais modulados em FM. Internamente o receptor possui um número identificador único no sistema que permite ao usuário receber as mensagens transmitidas em radiodifusão em um dos canais de uma rede de estações rádio base. Cada mensagem é irradiada em todas as direções, porém apenas o receptor destinatário decodifica a mensagem para seu usuário.

Inicialmente, o pager foi utilizado por profissionais de saúde para se contatar rapidamente um médico em plantão. A central transmitia bips ao pager do médico em questão e este entrava em contato com a central por meio de telefone e então recebia a mensagem. Posteriormente, passou-se a transmitir a própria mensagem em texto e os sistemas passaram a ter cobertura ampla, quando então o serviço foi popularizado. Hoje existem operadoras com cobertura em diversas cidades e estados e sistemas de pager com comunicação bidirecional, que permitem a confirmação do recebimento da mensagem.

A infra-estrutura de pager também é utilizada em telemetria e controle remoto de equipamentos e veículos. Neste caso são utilizados receptores industriais como o **Creatalink** da Motorola (figura 5.1), que possui interface serial RS 232 e interface para relês. Neste trabalho, este aparelho será utilizado para receber as mensagens DGPS transmitidas via pager.

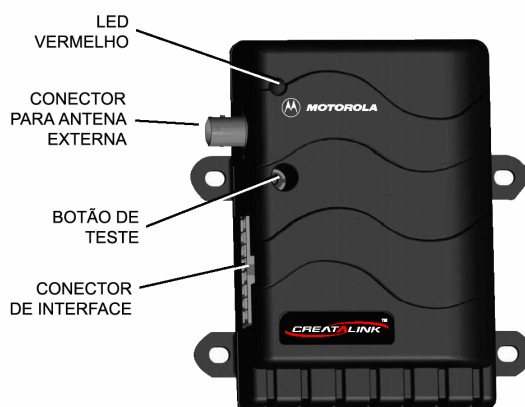


Figura 5.1 – Receptor Creatalink da Motorola.

5.1 Histórico

O primeiro sistema similar a pager foi utilizado em 1921 pelo departamento de Polícia de Detroit dos EUA. O termo pager foi utilizado pela primeira vez em 1959, para um aparelho de comunicação por rádio da Motorola, que era um receptor de mensagens específicas para este aparelho. O primeiro receptor de pager de consumo, da forma como é conhecido hoje, foi o Motorola Pageboy I (figura 5.2), em 1974. Não havia display e não armazenava mensagens, porém era portátil e notificava quando da chegada de uma mensagem.



Figura 5.2 – Pageboy I da Motorola.

Por volta de 1980 havia 3,2 milhões de usuários de pager no mundo com uso limitado a pequenas distâncias como médicos em hospitais. Por volta de 1990 foi criado o pager de longo alcance e havia mais de 22 milhões de usuários. Por volta de 1994, o sistema tornou-se popular para uso pessoal e havia mais de 61 milhões de usuários (BELLIS 2003).

5.2 Protocolos utilizados em pager

Existem diversos protocolos utilizados em sistemas de pager. A seguir estão os principais protocolos que foram ou ainda estão em uso no mundo de hoje (SCALSKY 1997).

POCSAG (1981) - Post Office Code Standardization Advisory Group: foi considerado um protocolo de alta velocidade na época. Tem capacidade de 2 milhões de endereços por portadora e suporta tons, dados numéricos e alfanuméricos. Opera nas taxas de 512, 1200 e 2400 bps e foi amplamente utilizado. A especificação deste protocolo é

uma recomendação do ITU (*International Telecom Union*) cujo texto mais atual é o M548-2 de 1997.

GOLAY (1983): protocolo proprietário da Motorola, onde os pagers são divididos em grupos. É enviado um preâmbulo e somente os pagers do grupo informado no preâmbulo analisam esta mensagem. Os endereços são enviados a 300 bps e os dados a 600 bps. Este protocolo apresenta melhorias no consumo de bateria do receptor e maior probabilidade de recepção comparado ao POCSAG, porém está obsoleto. A Motorola hoje utiliza o protocolo FLEX.

ERMES (1990) - European Radio Message System: protocolo desenvolvido pela *European Telecommunications Standard Institute*. Foi utilizado pela comunidade europeia para cobertura em todos os países da região. Possui melhor recepção em condições adversas, maior capacidade de códigos, velocidade de 6250 bps e foi estruturado para haver cobertura em toda a comunidade europeia utilizando múltiplos canais de RF quando o usuário está fora de sua área de cobertura local (*home*). O pager faz busca automática em outros canais caso esteja em *roaming*. O ERMES usa sinalização FSK de 4 níveis, opera na faixa de 169 MHz e suporta 16 canais adjacentes. Ao contrário do POCSAG, que pode transmitir informações a qualquer instante, o ERMES utiliza *time slot*, onde cada pager ativa seu módulo receptor no início de seu *slot* para verificar se há transmissão ou não, economizando bateria.

APOC (1993) - Advanced Pager Operating Code: desenvolvido pela Philips Telecom com compatibilidade retroativa à sinalização POCSAG, oferece maior velocidade (1200 bps a 6400 bps usando modulação FM de 2 tons ou 4 tons) e novas características como endereçamento estendido que suporta mais de dois milhões de endereços.

FLEX (1993): protocolo proprietário da Motorola, amplamente utilizado atualmente, que opera em três velocidades (1600 bps, 3200 bps, 6400 bps) com modulação FM de 2 tons (1600 Hz e 4800 Hz) e suporta cinco milhões de endereços. O sistema de correção de erros é mais robusto que do POCSAG e utiliza, como no ERMES, *time slot* síncrono com ciclo de quatro minutos. O pager ativa seu receptor somente na sua janela de tempo predefinida, economizando bateria. A família de protocolos FLEX também inclui o REFLEX, protocolo bidirecional para sistemas pager. No Brasil, segundo a Motorola, seis empresas licenciaram o protocolo FLEX: Mobilcom, Mobitel, Pagenet, Promptel, PCS e Teletrim.

RDS/RBDS (1987) – Radio Data System/Radio Broadcast Data System: protocolo padronizado na Europa (RDS) e nos EUA (RBDS) para transmissão de dados por meio de subportadora de rádio FM/VHF em 57 kHz com taxa de 1187,5 bps (figura 5.3). Dentre os dados transmitidos estão **id** de programação, frequências alternativas da rádio, *paging*, data e hora, anúncios de viagem, TMC – *traffic message system* e DGPS (ITIS 2002).



Figura 5.3 – Espectro de rádio FM.

Apesar deste protocolo não ser utilizado em sistemas de pager tradicional, existem aparelhos similares a pager capazes de decodificar as informações transmitidas em RDS e apresentá-las em uma tela.

5.3 Princípio de funcionamento do protocolo POCSAG

O receptor Creatalink da Motorola, que está sendo utilizado nesta pesquisa para receber as correções DGPS, opera sob o protocolo POCSAG na taxa de 1200 bps e na faixa de 929 a 932 MHz. Por este motivo é feito um melhor detalhamento deste protocolo.

Cada receptor POCSAG tem um endereço de 21 bits, único no sistema chamado CAPCODE, usualmente representado em decimal a partir da conversão direta do endereço binário. É possível cadastrar mais de 2 milhões de receptores por canal de frequência. Cada canal possui largura de 25 kHz.

O POCSAG utiliza modulação FM onde o sinal binário modula diretamente a portadora produzindo desvios de $\pm 4,5$ kHz. Há diversas frequências usualmente alocadas para pagers nas faixas de 152 MHz, 454 MHz, 929 MHz e 931 MHz.

Uma transmissão POCSAG (figura 5.4) consiste em um preâmbulo seguido por blocos (*batches*) de palavras (*codewords*) de 32 bits. O preâmbulo é uma sequência de 1 e 0 de pelo menos 576 bits, cuja função é auxiliar o receptor a obter sincronização suficiente para receber a transmissão. Cada bloco é composto por uma palavra de sincronização e 8 quadros de duas palavras cada, num total de 17 palavras. A palavra de sincronização que inicia cada quadro é representada pela sequência de bits

01111100110100100001010111011000. Os quadros são numerados de 0 a 7. Os receptores de pager são divididos em 8 grupos de forma a cada receptor pertencer a um dos 8 quadros, de acordo com os 3 bits menos significativos do CAPCODE (000 – quadro 0, 111 – quadro 7).

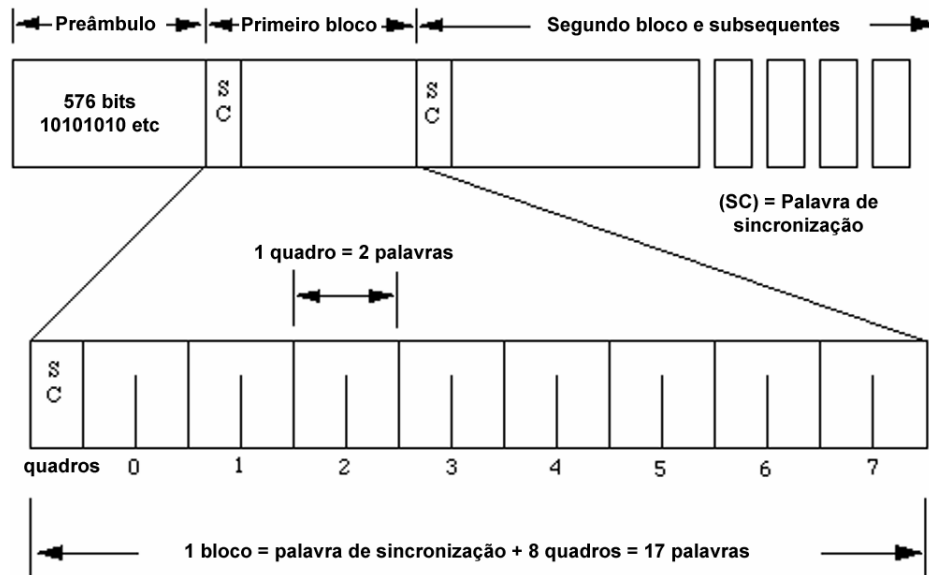


Figura 5.4 – Formato de um sinal POCSAG.

Cada receptor examina apenas o conteúdo de seu quadro onde são transmitidos os 18 bits restantes do CAPCODE e a mensagem. A palavra onde é transmitido o endereço começa sempre com o bit “zero”. A palavra onde é transmitida a mensagem começa sempre com o bit “um” (figura 5.5).

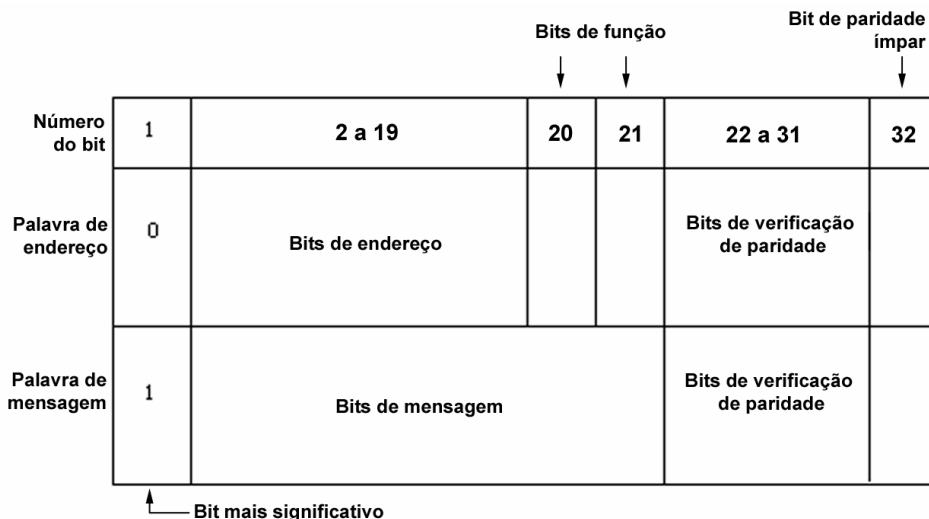


Figura 5.5 – Formato da palavra POCSAG.

A palavra de mensagem é transmitida imediatamente após a palavra de endereço. São transmitidas tantas palavras de mensagens quanto necessárias. A transmissão é

finalizada quando for transmitida uma nova palavra de endereço ou quando for transmitida uma palavra de preenchimento. A palavra de preenchimento é representada pela seqüência 01111010100010011100000110010111 e é utilizada sempre que um quadro não for preenchido completamente. Esta seqüência corresponde a CAPCODEs de 2007664 a 2007671 que não é utilizável por receptores.

A mensagem alfanumérica transmitida é codificada segundo a norma ISO 646 onde são utilizados 7 bits por caractere (tabela 5.1). Como cada palavra de mensagem possui 20 bits úteis um caractere pode ser “quebrado” de forma a preencher os 20 bits. Ao final da transmissão, a palavra deve ser preenchida com o caráter NULL (0000000) que pode estar truncado.

Tabela 5.1: Conjunto de caracteres codificados em 7 bits segundo ISO 646.

Bits b1.....b7				b7	0	0	0	0	1	1	1	1
				b6	0	0	1	1	0	0	1	1
				b5	0	1	0	1	0	1	0	1
b4	b3	b2	b1		0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	NUL	TC (DLE)	SP	0		P		p
0	0	0	1	1	TC (SOH)	DC	!	1	A	Q	a	q
0	0	1	0	2	TC (STX)	DEC	"	2	B	R	b	r
0	0	1	1	3	TC (ETX)	DC	#	3	C	T	c	s
0	1	0	0	4	TC (EOT)	DC	\$	4	D	S	d	t
0	1	0	1	5	TC (ENQ)	TC (NAK)	%	5	E	U	e	u
0	1	1	0	6	TC (ACK)	TC (SYN)	&	6	F	V	f	v
0	1	1	1	7	BEL	TC (ETB)	'	7	G	W	g	w
1	0	0	0	8	FE (BS)	CAN	(8	H	X	h	x
1	0	0	1	9	FE (HT)	EM)	9	I	Y	i	y
1	0	1	0	10	FE (LF)	SUB	*	:	J	Z	j	z
1	0	1	1	11	FE (VT)	ESC	+	;	K		k	
1	0	0	0	12	FE (FF)	IS (FS)	,	<	L		l	
1	1	0	1	13	FE (CR)	IS (GS)	-	=	M		m	
1	1	1	0	14	SO	IS (RS)	.	>	N	^	n	-
1	1	1	1	15	SI	IS (US)	/	?	O	-	o	DEL

Em cada transmissão, excluindo-se o preâmbulo, cada receptor de pager pode aproveitar um quadro por bloco. O tamanho da mensagem a ser transmitida determina o número de blocos da transmissão. Em uma mesma transmissão podem ser transmitidas mensagens independentes para até oito receptores de grupos distintos. A alimentação pode ser removida do receptor durante todos os quadros que não o seu, estendendo a vida da bateria.

5.4 Alocação de frequências no Brasil

Segundo a norma 17/96 da Anatel (ANATEL 2003), no Brasil existem 60 canais de frequências alocados para o serviço de pager, onde o pager, segundo a norma, se enquadra no serviço denominado **Serviço Especial de Radiochamada**. Vinte canais estão na faixa de 929 MHz, iniciando em 929,5125 MHz e 40 canais estão na faixa de 931 MHz, iniciando em 931,0125 MHz. A largura de cada canal é de 25 kHz. Todas as operadoras de pager cadastradas na Anatel operam em 931 MHz.

As frequências 931,8875 MHz, 931,9125 MHz e 931,9375 MHz são destinadas ao uso exclusivo das estações do **Serviço Nacional**, sendo vedada sua consignação para uso local.

Na exploração do Serviço Especial de Radiochamada é admitida a utilização do canal secundário de emissora de radiodifusão sonora em frequência modulada (RBDS), mediante solicitação encaminhada ao Ministério das Comunicações.

6 Implementação do DGPS

A descrição da implementação do sistema DGPS pode ser facilitada se dividida em módulos com funções específicas. Nesse contexto, podem-se caracterizar três partes distintas como mostra a figura 6.1. O **gerador DGPS** é o módulo onde são gerados os sinais de correção. O **enlace de comunicação** é a parte que trata da transmissão e recepção das correções. Já o **receptor do usuário** corresponde ao receptor GPS que utiliza as correções transmitidas.

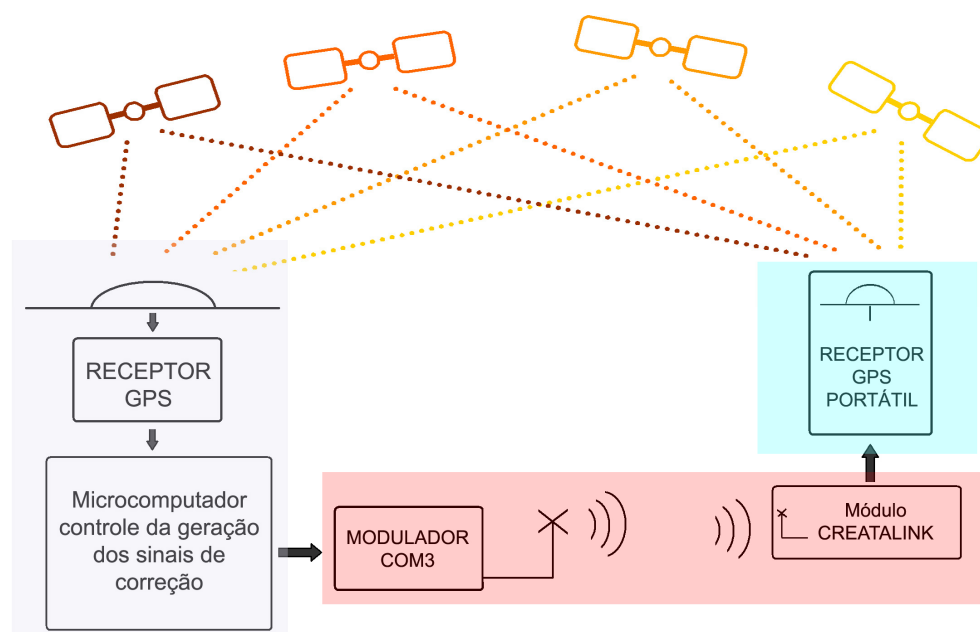


Figura 6.1 – Diagrama em blocos do sistema DGPS.

O sistema DGPS proposto nesse trabalho foi testado e implementado em partes e posteriormente integrado para a real verificação de sua funcionalidade. A modularidade foi importante para a correção de diversos problemas encontrados ao longo do desenvolvimento.

6.1 Gerador DGPS

O **gerador DGPS** é constituído por um receptor GPS e um computador controlador. O gerador capta os sinais GPS, processa as correções e deixa disponível para o enlace de comunicações por meio de uma interface RS-232. A figura 6.2 apresenta um diagrama esquemático do gerador.

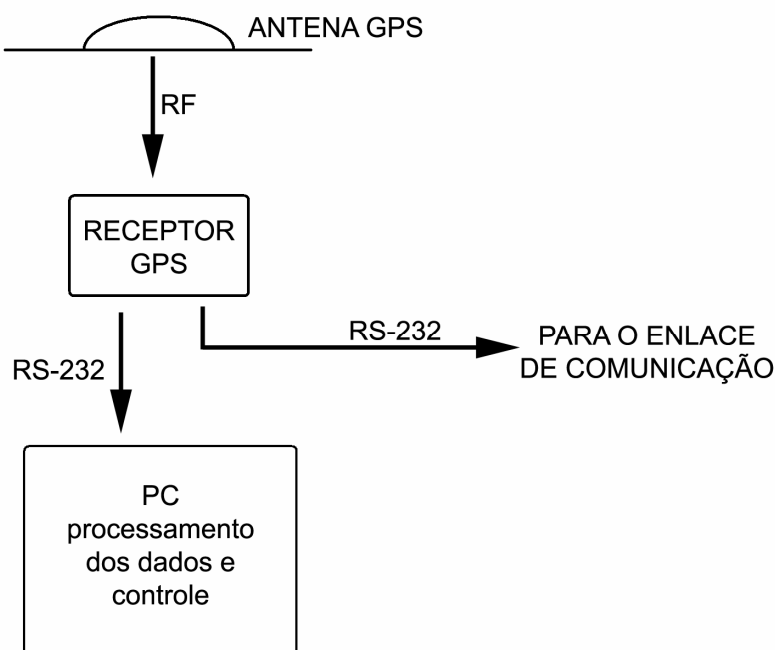


Figura 6.2 – Diagrama esquemático do gerador DGPS.

O gerador DGPS foi implementado no Laboratório de Telecomunicações, Microondas e Ótica do Departamento de Engenharia Elétrica (SEL) da EESC/USP. A antena do GPS foi fixada no telhado do departamento no local batizado de PSEL.

A visibilidade do céu é um pouco prejudicada por algumas árvores próximas e pelo novo prédio do departamento, porém não deve prejudicar significativamente os resultados.

A antena utilizada é da marca Garmin modelo GA-29, apresentada na figura 6.3. Esta não é a antena mais apropriada para este tipo de aplicação, porém suas especificações atendem às necessidades desta pesquisa, onde as coordenadas do centro de fase podem ser determinadas dentro do decímetro. Esta antena foi projetada para ser utilizada com receptores GPS portáteis em automóveis ou barcos a fim de propiciar melhor receptividade que suas antenas embutidas. Em uso comercial são recomendadas antenas com plano de terra do tipo *choke ring* que minimiza interferências causadas por objetos próximos.



Figura 6.3 – Antena GPS da estação base.

A antena foi fixada por meio de um eletroduto de PVC a aproximadamente dois metros do piso da plataforma, rosqueado na base da antena e parafusado na mureta de proteção (figura 6.4). O cabo passa por dentro do eletroduto e por meio de um corrugado chega a um dos dutos de descida existentes no local. Tomou-se o cuidado de não deixar parte alguma do cabo exposta de modo a evitar seu envelhecimento precoce. A altura de dois metros permite que se circule livremente pela plataforma sem interferir significativamente na receptividade da antena.



Figura 6.4 – Fotos do local da antena.

O cabo que acompanha a antena possui impedância de $50\ \Omega$ e conector TNC, padrão para sinais RF de GPS. A antena possui um amplificador de baixo ruído (LNA - *low noise amplifier*) cuja alimentação DC vem pelo próprio cabo RF. Segundo o manual da antena, o LNA aceita alimentação entre 2 V e 8 V. Todas as antenas GPS possuem LNA e alimentação pelo cabo RF, porém a tensão de alimentação pode variar de um fabricante para outro.

A descida leva o cabo da antena a um quadro dentro do laboratório, com folga de 1,5 m. Ao lado do quadro foi colocado o receptor GPS. Utilizou-se o receptor GPS marca Novatel modelo Propack OEM 2, apresentado na figura 6.5. O receptor OEM 2 possui diversos recursos agregados, com grande versatilidade na programação e capaci-

dade para exportar diversos tipos de informações em formato proprietário ou aberto, incluindo o padrão RTCM de mensagens de correção diferencial. A comunicação com o receptor se dá por meio de duas portas seriais RS-232 e uma interface com sinais especiais. A configuração padrão das portas seriais é 9600 bps, 8 bits de dados, sem bit de paridade, 1 bit de parada, sem eco. O receptor GPS foi conectado a uma fonte de alimentação DC de 12 V, porém aceita qualquer valor entre 10 V e 36 V.

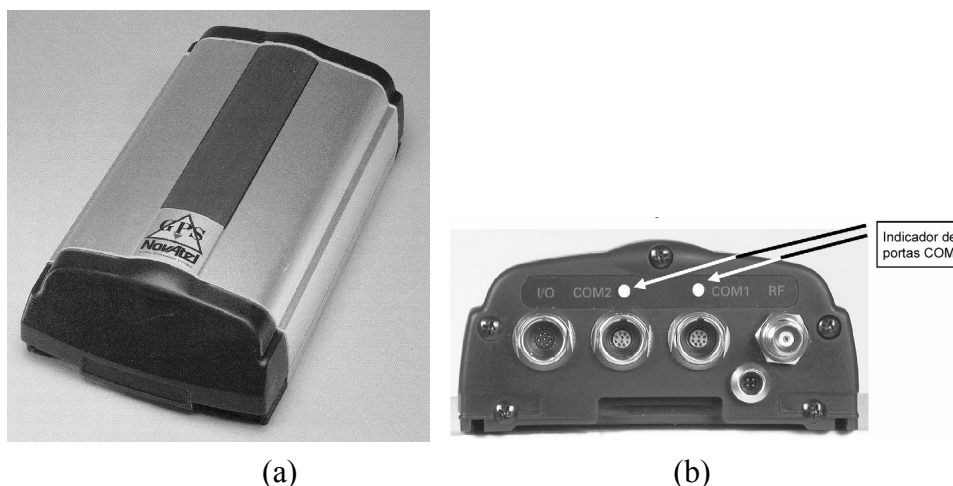


Figura 6.5 – Receptor Novatel OEM-3: (a) vista geral; (b) vista frontal.

Não foi encontrada no manual do receptor a tensão de alimentação fornecida ao LNA da antena. Utilizando-se um multímetro, mediu-se a tensão no conector TNC do receptor o qual indicou aproximadamente 5 V, o que é compatível com a antena a ser utilizada. A antena foi ligada ao receptor no conector adequado.

O microcomputador PC utilizado é um Pentium 3 de 550 MHz e 128 MB de RAM. O sistema operacional inicialmente utilizado foi o Windows 2000 Server com o intuito de utilizar seu **servidor de terminal** e gerenciar remotamente a estação base. Posteriormente instalou-se o Windows XP Pró que possui o recurso de **área de trabalho remota**, similar ao servidor de terminal e que atende às expectativas como transporte para o gerenciamento remoto.

A porta serial com1 do GPS foi conectada à porta com1 do PC. O software de interface utilizado inicialmente foi o Winsat da própria Novatel. Posteriormente este foi atualizado para o GPSolution versão 3.1, recomendado pela Novatel e com funcionalidades semelhantes ao anterior. Poder-se-ia, porém utilizar qualquer emulador de terminal com a configuração inicial padrão do GPS.

Todos os equipamentos estão ligados a uma unidade ininterrupta de energia elétrica (*no-break*).

Com todos os equipamentos conectados e ligados verificou-se que o sistema estava operando normalmente observando-se as coordenadas da antena na tela do

GPSolution. Pôde-se verificar que após várias horas em funcionamento, a variação das coordenadas formava uma mancha de diâmetro da ordem de 5 metros no plano horizontal, como mostra a figura 6.6. A posição da antena é calculada pelo receptor por meio de código C/A. Este resultado era esperado para um receptor desta categoria, superior a receptores portáteis de navegação. Em alguns momentos notou-se, por meio de um indicador luminoso no receptor, que a taxa de comunicação na porta serial era insuficiente. Esta foi alterada para 38.400 bps, conforme as instruções no manual.

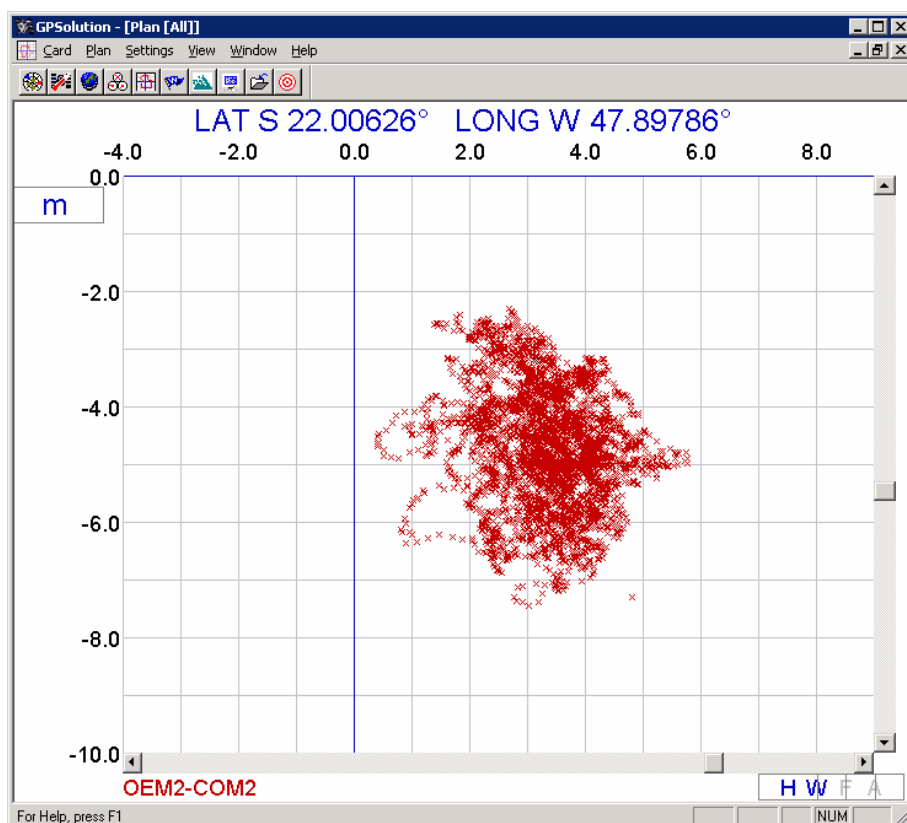


Figura 6.6 – GPSolution, dispersão de coordenadas em PSEL.

A antena do receptor do gerador DGPS deve possuir coordenadas conhecidas para sua operação. As coordenadas do ponto PSEL foram determinadas por meio de técnicas tradicionais de transferência de coordenadas a partir de um ponto denominado FED1. O ponto FED1 está localizado na Universidade Federal de São Carlos e é utilizado correntemente como referência para diversos trabalhos de geodésia.

Após o processamento, as coordenadas do ponto PSEL, em WGS 84, foram:

latitude: 22° 00' 22,5884" S

longitude: 47° 53' 52,2664" W

altura elipsoidal: 834,8 m

Estas coordenadas serão consideradas como verdadeiras durante todo o trabalho.

Após determinar o ponto PSEL, para prosseguir com a geração de sinais DGPS, foi necessário programar o receptor com as coordenadas conhecidas e programar a geração das mensagens RTCM. Essas mensagens serão enviadas ao enlace de comunicação por meio da porta com2 do receptor GPS. A seguir estão listados os comandos utilizados para programar o receptor adequadamente:

```
fix position -22.0062746 -47.8978518 840.999
log com2 RTCM ontime 20
```

onde:

-22.0062746 e **-47.8978518** são a latitude e longitude em graus;

840.999 é a altura ortométrica em metros (observar o ponto separador decimal);

com2 é a porta serial pela qual será enviada a mensagem (com1 ou com2);

RTCM é o tipo de dado a ser enviado e;

ontime define a geração imediata de mensagem e depois periodicamente nas marcas de tempo múltiplas de **20** segundos (0, 20 e 40 s).

A ondulação geoidal, necessária para a determinação da altura ortométrica a partir da altura elipsoidal, foi obtida por meio do receptor Novatel que possui internamente um modelo matemático para essa grandeza.

As mensagens RTCM tipo 1, conforme descrito no capítulo 3, contém as correções da pseudodistância calculadas para todos os satélites visíveis em épocas predefinidas. De posse das coordenadas da antena receptora, é possível calcular geometricamente a distância para cada satélite conforme a equação 2.3 e compará-la com a distância medida eletronicamente. A diferença entre o valor calculado e o valor medido corresponde ao erro na medida de distância em cada satélite. Este erro, uma vez transmitido ao receptor móvel, deverá ser subtraído da pseudodistância medida localmente para se obter as coordenadas do receptor. Na geração das correções, o receptor de referência pode ou não utilizar modelos de ionosfera e troposfera. A configuração padrão é não utilizar estes modelos nos cálculos.

6.1.1 Processamentos parciais

De forma a verificar a eficácia do DGPS, foram realizados experimentos que analisaram os ganhos na exatidão da coordenada, quando aplicada a correção diferencial. Esta implementação é similar à correção DGPS proposta nesse trabalho, onde são aplicadas correções na distância medida por código. A exatidão dessa técnica deve ser equivalente ao sistema DGPS original, porém o resultado não é em tempo real, pois os dados são guardados em arquivos e depois processados.

A técnica utilizada consiste em coletar dados do gerador DGPS e de um receptor remoto e comparar, ao longo do tempo, a posição do receptor remoto sem correção e com correção diferencial. No gerador DGPS são coletadas as informações de correção diferencial. No receptor remoto, são coletadas as medidas de distância aos satélites onde serão aplicadas as correções. São coletadas também as outras informações necessárias à determinação das coordenadas do receptor conforme descrito no capítulo 2.4.

Os dados coletados no gerador DGPS são mensagens no formato proprietário chamado DCSA, que são equivalentes às mensagens RTCM a serem enviadas ao enlace de comunicação. A figura 6.7 mostra uma mensagem no formato DCSA.

\$DCSA, 182, 159600.50, 0, 7, 13, 112, -9.048, -0.011, 10, 229, -26.750,
-0.002, 7, 54, -22.754, 0.002, 29, 222, -26.682, -0.000, 27, 215,
-5.907, 0.004, 8, 226, -6.807, 0.007, 28, 223, -9.732, -0.000*14

época satélite correção

Figura 6.7 – Mensagem DCSA de correções diferenciais.

Em cada mensagem estão contidos, dentre outras informações, a indicação da época corrente, os satélites em observação e as correções correspondentes. Nas mensagens DCSA a época é representada pelo número da semana GPS e pela quantidade de segundos dentro da semana. Na figura 6.7, a mensagem corresponde à semana 182 e 159.600,50 segundos. Na realidade, geralmente a semana GPS é representada por 10 bits o que permite apenas 1024 semanas. No entanto, desde que o GPS entrou em operação já se passaram semanas suficientes para reinicializar uma vez o contador de semanas. Portanto a semana 182 na realidade corresponde à semana $1024+182 = 1206$. A correspondência entre a semana GPS, os dias dos meses e os dias do ano pode ser obtida por meio da internet no endereço <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Gpscal.html>. A tabela 6.1 mostra o mês que inclui a semana 1206.

Tabela 6.1 – Correspondência entre semana GPS e o calendário normal.

Fev 2003									Fev								
SM GPS	Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab		SM GPS	Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab	
1203							1		1203							32	
1204	2	3	4	5	6	7	8		1204	33	34	35	36	37	38	39	
1205	9	10	11	12	13	14	15		1205	40	41	42	43	44	45	46	
1206	16	17	18	19	20	21	22		1206	47	48	49	50	51	52	53	
1207	23	24	25	26	27	28			1207	54	55	56	57	58	59		

O tempo de 159.600,50 segundos corresponde a 1 dia, 20 horas, 20 minutos e 0,50 segundos. Consultando a tabela, pode-se concluir que a mensagem DCSA foi registrada no dia 17/02/2003 ou no 48º dia do ano de 2003, às 20h20min0,5s, no horário GMT 0.

Para se observar as correções em forma de gráfico foi criado um software na linguagem C, que lê as mensagens DCSA e as escreve em forma de planilha, onde as

correções de cada satélite são colocadas em uma coluna específica. Dessa forma foi possível produzir, por meio do MS Excel, gráficos que mostram o comportamento das correções ao longo do tempo para cada um dos satélites. A figura 6.8 mostra o comportamento de 3 dias de coleta para os satélites numerados de 1 a 8. As mensagens foram geradas em intervalos de 10 s.

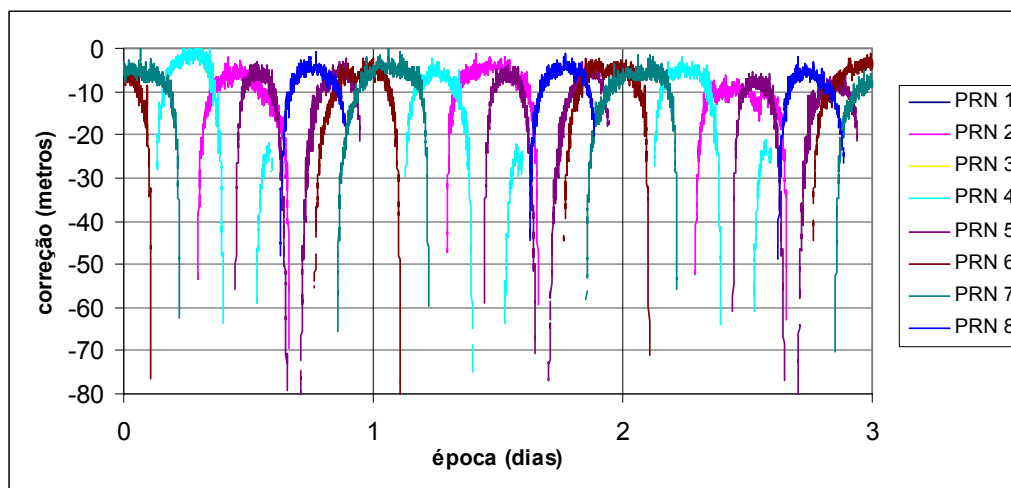


Figura 6.8 – Valores de correção DGPS.

Em primeira análise, o valor da correção varia de acordo com a elevação e com a velocidade do satélite em relação à posição do receptor, o que é aceitável pois o caminho percorrido pelo sinal no espaço depende desses fatores. De fato, porém, a correção corresponde à contribuição de todos os erros associados às medidas realizadas pelo receptor. As extremidades de cada sequência de dados correspondem a baixa elevação dos satélites, quando o receptor começa e termina de rastrear um satélite. Verifica-se então a importância de se eliminar satélites de baixa elevação, pois estes podem contribuir negativamente na qualidade da solução das coordenadas. Satélites de baixa elevação sofrem maior influência da troposfera e de objetos locais que perturbam a propagação do sinal, o que prejudica a qualidade das medidas realizadas.

No receptor remoto é necessário coletar todas as informações para determinação das coordenadas do receptor ao longo do tempo, incluindo a distância aos satélites onde serão aplicadas as correções DCSA. Serão então determinadas as coordenadas com correção e sem correção e comparadas lado a lado em gráficos.

Existe um padrão amplamente utilizado chamado RINEX (*receiver independent exchange*) onde são dadas as regras para se escrever arquivos de dados observados por sistemas de navegação por rádio, incluindo o GPS (GURTNER 2001). Os arquivos RINEX são em texto ASCII puro e neles podem estar registradas as distâncias aos satélites bem como todas as informações necessárias à solução das coordenadas. O padrão RINEX divide os dados coletados em dois arquivos, um de navegação e outro de

observação. No arquivo de navegação são colocadas as informações referentes aos satélites, como as efemérides. No arquivo de observação são colocadas as informações medidas pelo receptor como as distâncias de código, a relação sinal ruído, a leitura de fase da portadora, entre outros. A figura 6.9 mostra uma época registrada no padrão RINEX contendo a distância medida aos satélites, geralmente referenciada no arquivo como C1 (código da portadora L1).

```

03 02 17 20 20 10.000000 0 7G13G10G 7G29G27G 8G28
22394181.890 6
22241309.237 7
22947410.172 7
23426369.224 5
22121838.934 7
21816046.000 8
20191415.902 8

```

distância medida (m)

época

satélites

Figura 6.9 – Registro de uma época em RINEX.

Na primeira linha tem-se a data e o número dos satélites observados. Nas linhas subsequentes, tem-se a distância medida para cada satélite observado, neste caso 7. No arquivo RINEX a época é representada respectivamente por ano, mês, dia, hora, minuto e segundo. A definição completa do padrão RINEX pode ser vista em Gurtner (2001).

A geração dos arquivos RINEX requer a coleta de diversas mensagens do receptor Novatel. A figura 6.10 mostra o GPSolution com os dados a serem coletados para geração de arquivos RINEX. Uma vez gravados, estes dados são convertidos para RINEX por meio do software Convert32 da Novatel. As informações de todos os tipos de mensagens que este receptor Novatel pode gerar estão em Novatel (1995).

Uma vez coletados as correções do gerador DGPS e os dados do receptor remoto, é necessário aplicar as correções. Foi desenvolvido um programa em C++ chamado DCSA2RIN para aplicar as correções DCSA em um arquivo RINEX. Foi utilizado o compilador Borland C++ 5.02. O resultado é um novo arquivo RINEX do receptor remoto com as distâncias corrigidas.

O DCSA2RIN lê as correções no formato Novatel DCSA e os dados a serem corrigidos em RINEX. As correções são aplicadas nas épocas correspondentes. Cada época observada no receptor remoto deve possuir uma correção DCSA exatamente na mesma época. Em cada época de correspondência, o programa verifica também se os satélites observados são correspondentes. Os satélites e as épocas que não possuem correção foram removidos e não constam no novo arquivo RINEX corrigido.

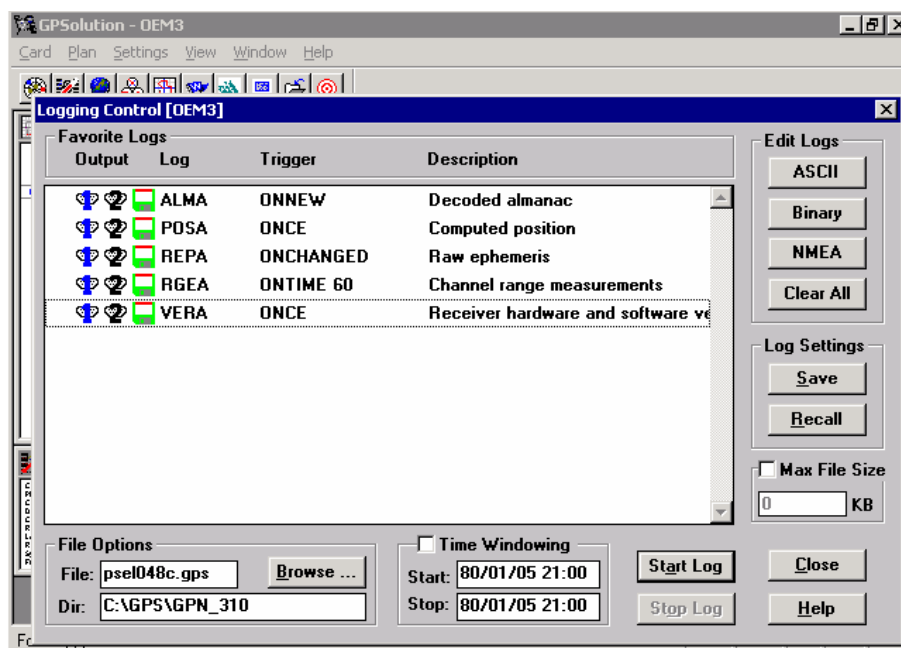


Figura 6.10 – Tela de coleta de dados do programa GPSolution.

Após a geração do arquivo RINEX com as correções, foi utilizado o programa em Java chamado PPOS (MILBERT 2002), desenvolvido por Dennis Milbert, para determinar a solução da posição em cada época. O PPOS lê arquivos RINEX e escreve em um arquivo ASCII a solução de cada época encontrada. PPOS utiliza nos cálculos efemérides transmitidas a partir do arquivo RINEX de navegação ou efemérides precisas a partir de arquivos no formato SP3 obtidos no endereço internet do NGS (*National Geodetic Survey*) (NGS 2002). Foram utilizadas as efemérides transmitidas, que melhor representam uma situação real de uso do DGPS. O padrão RTCM prevê a não utilização de modelos de correção de atrasos de ionosfera nem troposfera na geração das correções. Neste exemplo, portanto não foram utilizados estes modelos apesar de PPOS oferecer as opções da utilização de modelos. O ângulo de corte foi de dez graus suprimindo assim satélites de baixa elevação. Os dois arquivos RINEX do receptor remoto foram então processados nesse software.

O arquivo de saída foi formatado para melhor visualização convertendo-se as coordenadas geodésicas em desvios (em metros) em relação à coordenada verdadeira. A conversão é simples se aproximarmos a superfície do elipsóide por um plano, o que é verdadeiro para pequenas distâncias. Foi utilizada a correspondência de 30,193 metros para cada segundo de variação em latitude e 28,686 metros para cada segundo de variação em longitude. Essa correspondência foi obtida a partir do cálculo da distância entre dois pontos na proximidade do ponto PSEL com diferença de um segundo entre suas coordenadas.

O local ocupado pelo receptor remoto foi batizado de ponto A. Os resultados obtidos estão apresentados na figura 6.11. O zero do eixo das ordenadas corresponde à

coordenada do receptor assumida como verdadeira. O gráfico mostra a solução das coordenadas originais e a solução das coordenadas aplicando-se as correções diferenciais.

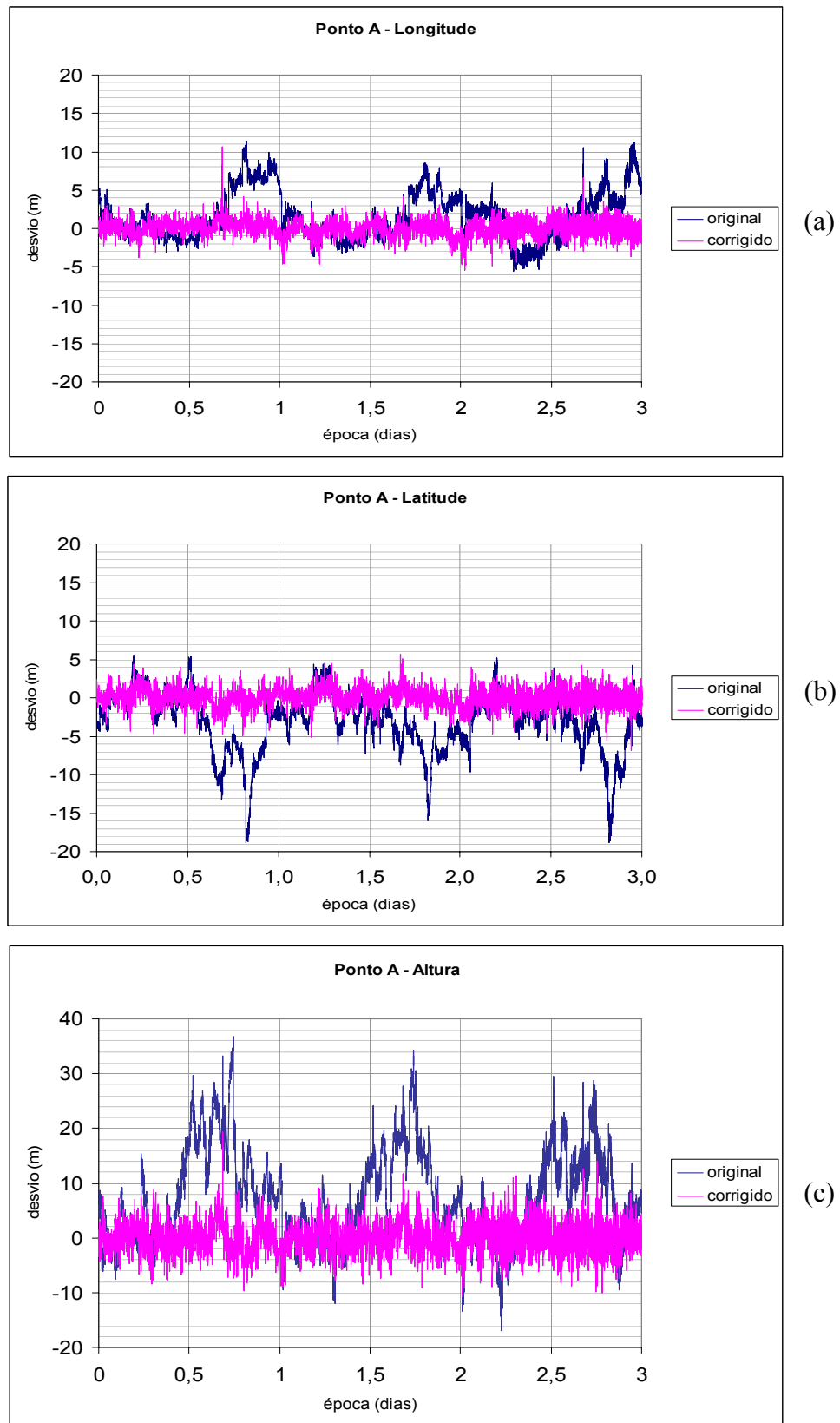


Figura 6.11 – Correções no ponto A.

Verifica-se que a variação pico a pico das coordenadas corrigidas possui bom desempenho se comparado às coordenadas sem correção. A tabela 6.2 apresenta alguns resultados numéricos que reforçam a eficácia da correção DGPS.

Tabela 6.2: Desempenho da correção diferencial.

Medidas originais		Medidas corrigidas		distância entre médias (m)
média	desvio (m)	média	desvio (m)	
$\varphi = -21,9981193^\circ$	3,8	$\varphi = -21,9980900^\circ$	1,2	3,2
$\lambda = -47,8977142^\circ$	3,3	$\lambda = -47,8977290^\circ$	1,1	1,5
$h = 830,4 \text{ m}$	8,4	$h = 823,6 \text{ m}$	2,8	6,9

Os resultados parciais mostram que a correção por código melhora significativamente a dispersão em relação à média. A média das coordenadas corrigidas também é mais próxima das coordenadas verdadeiras.

Em termos planimétricos, pode-se verificar no período analisado que a correção diferencial reduziu o desvio de 7,7 metros a 95% para 2,5 metros. Pode-se verificar também que o erro máximo sem correção, considerando a média de alguns minutos, caiu de 18 metros, no pior caso, para 4 metros, no pior caso também.

A variação em altura melhora na mesma proporção, porém seu desempenho ainda é muito inferior ao planimétrico. Para muitas aplicações são irrelevantes as informações de altura dos pontos.

6.1.2 Problemas encontrados na implementação

A implementação física do gerador DGPS foi relativamente simples, porém a teoria associada à geração de correções diferenciais não foi trivial. Foi importante a leitura criteriosa do manual de referência de comando do receptor, bem como a consulta às referências. Foram realizadas diversas coletas de dados para verificar resultados e entender o funcionamento do receptor GPS. Os testes realizados demandaram a utilização de outros softwares, alguns implementados para esta finalidade específica.

Para a utilização do gerenciamento remoto, foi necessária uma adequação na infra-estrutura de rede do laboratório. Devido a falta de IPs reais para o laboratório, foi implementado um servidor NAT (*network address translation*) em linux Conectiva. Alguns computadores foram colocados na rede de IPs falsos na faixa de 192.168.0.x, liberando assim pelo menos um IP real para o PC de controle do GPS. O IP real é necessário para facilitar conexões entrantes no PC. Foram adicionados novos pontos de acesso com tomadas e cabos CAT5 e 2 novos switches de rede 10/100 Mbps. O IP alocado para o PC de controle é 143.107.235.190 e foi registrado no DNS como **gp-susp.sel.eesc.usp.br** junto à área de informática do SEL.

6.1.3 Teste VELO1

Na época da montagem do gerador DGPS, foi utilizado um computador de mão (*handheld*) para verificar a viabilidade de sua utilização como coletor de dados GPS. O modelo testado foi da marca PHILIPS modelo VELO 1 e sistema Windows CE. Atualmente podem-se utilizar computadores de mão mais potentes para esta finalidade, como alguns modelos da Palm e da HP. Foram feitos testes com o GPS Novatel alocado no Departamento de Engenharia Elétrica. Foi utilizado um emulador de terminais para estabelecer conexão com o GPS com taxa RS 232 de 9600 bps e foi solicitada a geração de sinais RTCM a taxa de uma mensagem por segundo. Para o teste foi montado um cabo serial tipo *null modem* com conectores macho-macho que interligava o cabo do computador de mão com o cabo do GPS Novatel. Esse cabo precisou ser montado porque o receptor Novatel utiliza um conector lemo de 9 vias e o computador de mão Philips utiliza um conector proprietário. O cabo do computador de mão era utilizado para sincronizar as informações com o PC. O computador de mão recebeu e mostrou as mensagens na tela do terminal de forma tão insatisfatória que inviabilizou seu uso.

Atualmente os computadores de mão têm capacidade de processamento muito superiores ao modelo testado e são amplamente utilizados como coletor de dados. A utilização de software específico para esta finalidade também melhora bastante a eficiência do coletor. Existem no mercado coletores de dados baseados em Palm OS ou Windows CE que cumprem bem sua tarefa, porém o custo pode ser bastante elevado.

6.2 Enlace de comunicação

O **enlace de comunicação** é responsável pela transmissão e recepção das correções DGPS. O enlace utilizado é baseado no sistema de pager, onde as informações são transmitidas pelo ar na faixa de 900 MHz e encapsuladas no protocolo POCSAG.

O enlace de comunicação é composto por um computador, um modulador/transmissor e um receptor. O computador é o responsável pela codificação em POCSAG. Ele recebe as informações por uma porta serial RS-232 e envia ao modulador por outra RS-232 modificada por um circuito condicionador de sinal. O receptor de pager remove o protocolo POCSAG e entrega as correções ao receptor do usuário por meio de sua porta RS-232. O diagrama esquemático do enlace de comunicação está na figura 6.12.

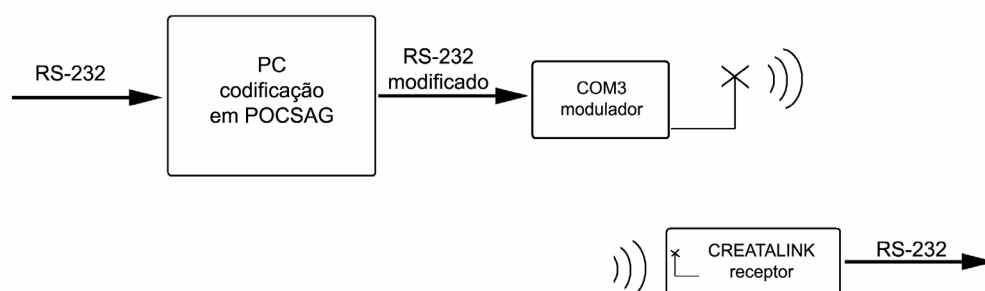


Figura 6.12 – Diagrama esquemático do enlace de comunicação.

O computador utiliza o sistema operacional MS Windows 98 em modo real, ou seja, equivalente ao MS-DOS. O software utilizado para codificar os dados em POCSAG foi o **Pocsag encoder**, versão 3.10 do autor Clive Cooper. O Pocsag encoder roda dentro de um arquivo .bat (*batch file*) que monitora dados com1 por meio de um código *assembler*. Sempre que uma seqüência de caracteres é recebida na serial, esta é passada como parâmetro ao Pocsag encoder que codifica em POCSAG e transmite pela com2. O software transmite a informação por meio do DTR (*data terminal ready*) que corresponde ao pino 4 no conector DB9. A conexão do PC com o modulador COM-3 é feita por meio do circuito apresentado na figura 6.13. O potenciômetro permite ajustar o nível de sinal de saída em 1 V de pico.

Se necessário o condicionador de sinal poderia ser mais bem elaborado a fim de “limpar” a forma de onda de saída. Nesse caso, o ajuste do nível de saída foi satisfatório para essa configuração.

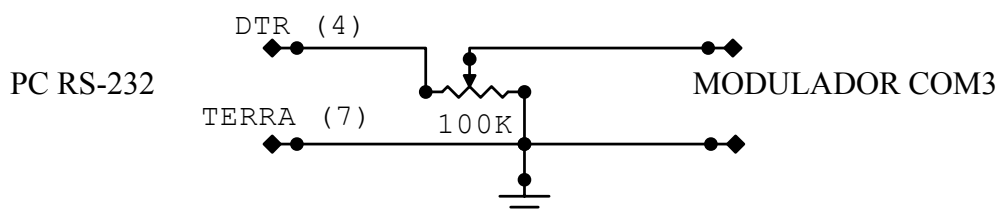


Figura 6.13 – Condicionador de sinal entre PC e COM3.

A figura 6.14 apresenta o modulador COM-3. O equipamento utilizado como modulador é de fato um monitor de serviço de comunicação da marca RAMSEY modelo COM-3. Dentre suas características, pode-se destacar a modulação AM/FM interna ou externa, faixa de frequência de 100 kHz a 1 GHz, modo de operação como modulador ou demodulador e entrada digital para modulação compatível com pager.



Figura 6.14 – Monitor RAMSEY COM-3.

O sistema de pager opera com modulação FM direta, onde o sinal digital modulante provoca desvios de 4,5 kHz na portadora. Para esta operação, foi utilizada a frequência de 931,8875 MHz para a portadora. A tabela 6.3 apresenta os passos necessários para ajustar o modulador COM-3 para modular o sinal POCSAG. A localização dos ajustes está indicada na figura 6.15, superposta à foto do painel do modulador.

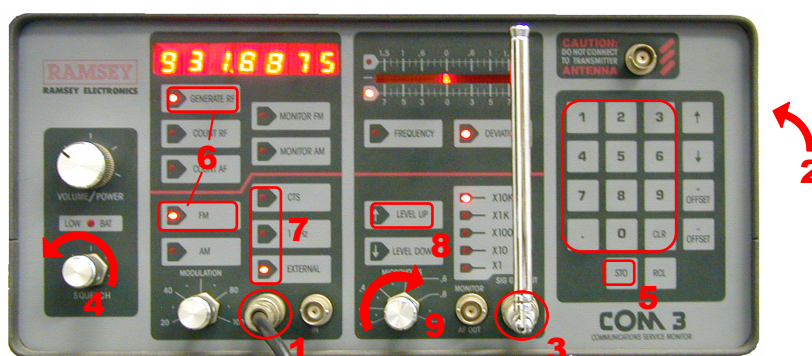


Figura 6.15 – Indicação dos ajustes feitos no modulador COM-3.

Tabela 6.3: Ajustes efetuados no modulador COM-3.

item	descrição
1	Conectar o cabo do sinal modulante no conector BNC de nome OUT
2	Colocar a chave seletora na parte traseira do aparelho na posição DIGITAL IN
3	Colocar uma pequena antena no conector ANTENNA para melhorar a transmissão do sinal já modulado
4	Girar o botão SQUELCH totalmente à esquerda
5	Digitar a frequência no teclado numérico e em seguida o botão STO
6	Apertar o botão FM e em seguida o botão GENERATE RF para colocar em modulação FM
7	Verificar se o led EXTERNAL está aceso e os outros dois estão apagados (1 kHz e CTS)
8	Ajustar o ganho de saída para 100K por meio do botão LEVEL UP
9	Ajustar a saída para 1 microvolt (máximo) girando o potenciômetro totalmente para a direita

Após estes ajustes deve-se ainda ajustar o nível de modulação para que a indicação na barra de leds (*led bargraph*) seja de aproximadamente 4,5 kHz por meio do potenciômetro próximo ao conector BNC IN/OUT.

Sempre que houver alteração na frequência da portadora deve-se apertar o botão **STO** e **GENETARE RF** para que realmente seja aplicada a nova frequência.

O receptor de pager é um aparelho industrial da marca Motorola modelo CREATALINK 900 POCSAG (figura 6.16-a) com uma interface serial RS-232 e oito interfaces para relês. O kit de desenvolvimento do Creatalink, doado pela Motorola do Brasil, é composto pelo receptor Creatalink, um receptor Memo Elite Flx (figura 6.16-b), cabos de interconexão com PC, softwares e manuais técnicos.



Figura 6.16 – (a) Receptor industrial Creatalink e (b) Receptor Memo Elite Flx.

O receptor creatalink é totalmente programável, incluindo a frequência de recepção e o capcode. As suas oito portas de interface podem ser programadas por comandos transmitidos pelo ar (OTA - *over the air*) para telemetria. Neste trabalho, o receptor foi programado para disponibilizar em sua serial todos os dados recebidos pelo ar. O software de programação opera em modo texto (DOS real ou protegido) e foi necessário programar a mesma frequência do gerador de 931,8875 MHz, o capcode 1234567, e a diretiva para direcionar os dados para a porta serial, bem como sua velocidade de 4800 bps, adequado ao receptor do usuário.

Foi utilizada também uma pequena antena externa que melhorou significativamente a receptividade do aparelho. O receptor Memo Elite Flx não foi utilizado por operar sob o protocolo FLEX e não em POCSAG.

6.2.1 Problemas encontrados na implementação

Antes de chegar na implementação final do enlace, foram utilizadas outras configurações. Primeiramente, utilizou-se um sistema no qual havia a geração, transmissão,

recepção e decodificação de dados em POCSAG. O diagrama esquemático está representado na figura 6.17.

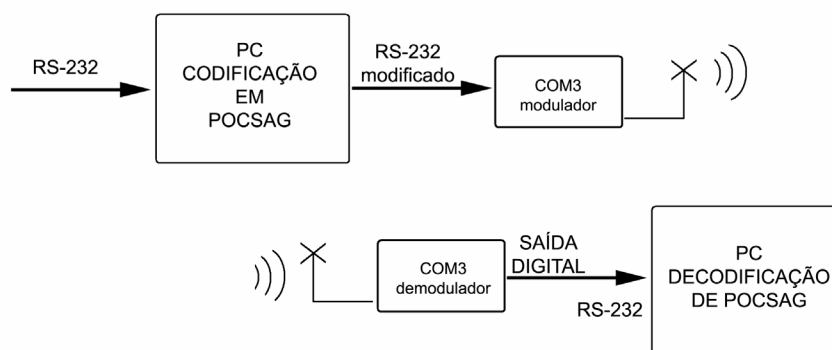


Figura 6.17 – Implementação de testes do enlace de comunicação.

O PC transmissor estava utilizando o software ENCODE40 do kit de desenvolvimento do Creatalink da Motorola. O PC de codificação era ligado ao modulador por meio de um cabo específico fornecido com o kit.

O PC receptor estava rodando o software POC32 ver. 1.00.08 *freeware* cujo autor é Deti Fliegl. O demodulador foi ligado à entrada de áudio do PC receptor por meio de um pequeno circuito condicionador de sinal. Este software foi capaz de decodificar algumas mensagens geradas pelo ENCODE40 porém com uma quantidade significativa de ruído. O ruído era identificado por caracteres estranhos no meio da transmissão.

Em uma outra configuração, utilizou-se apenas o demodulador e o PC receptor para decodificar mensagens de uma operadora comercial, cujo sinal era pego diretamente do ar. Nessa configuração, o sistema foi capaz de decodificar todas as mensagens transmitidas pela operadora comercial. Havia uma porcentagem muito pequena de erros, o que é previsto. Para melhor garantia da transmissão, geralmente as operadoras transmitem as mensagens mais de uma vez com um contador de forma que o receptor não mostre duas vezes a mesma mensagem.

Pôde-se concluir então que sistema de geração POCSAG implementado estava com problemas. Foi feita uma verificação criteriosa das ligações e das configurações do software e do modulador. Após vários testes verificou-se que o problema ocorria no software ENCODE40. O sinal POCSAG por ele gerado estava incorreto e portanto não era possível decodificar. Foram feitas algumas tentativas de contato com a Motorola do Brasil mas ela não retornou as mensagens de e-mail enviadas. Após testar diversos softwares de codificação POCSAG o que se mostrou com melhor desempenho foi o Pocsag encoder descrito acima.

Foi obtida, no site da Anatel (ANATEL 2003), uma lista de operadoras autorizadas a operar o serviço de pager no Brasil. Em São Carlos, existem três canais reservados, porém apenas um em operação de um total de 60 canais disponíveis para esse serviço. A operadora de pager em São Carlos é a Mobitel com escritório em Araraquara. Na região metropolitana de São Paulo, segundo a Anatel, onde incluem São Paulo, Osasco, Mogi das Cruzes, Santos, Bertioga e outros, existem 34 operadoras registradas para operar sistema de pager. Os principais fornecedores de serviço na grande São Paulo são Teletrim e Mobitel.

6.3 Receptor do usuário

O receptor do usuário é um receptor GPS que deve possuir uma porta de entrada serial RS-232 e um software/hardware que habilite aceitar as correções DGPS RTCM.

A implementação do receptor consiste em efetuar as ligações necessárias com o enlace de comunicação e configurar o receptor para a operação em modo diferencial.

O receptor GPS utilizado é da marca Garmin modelo GPS 12 MAP, mostrado na figura 6.18-a. Este receptor de uso geral possui 12 canais em paralelo e antena embutida. Em sua tela podem ser visualizadas diversas informações, dentre elas a posição do receptor sobre um mapa, facilitando a navegação.

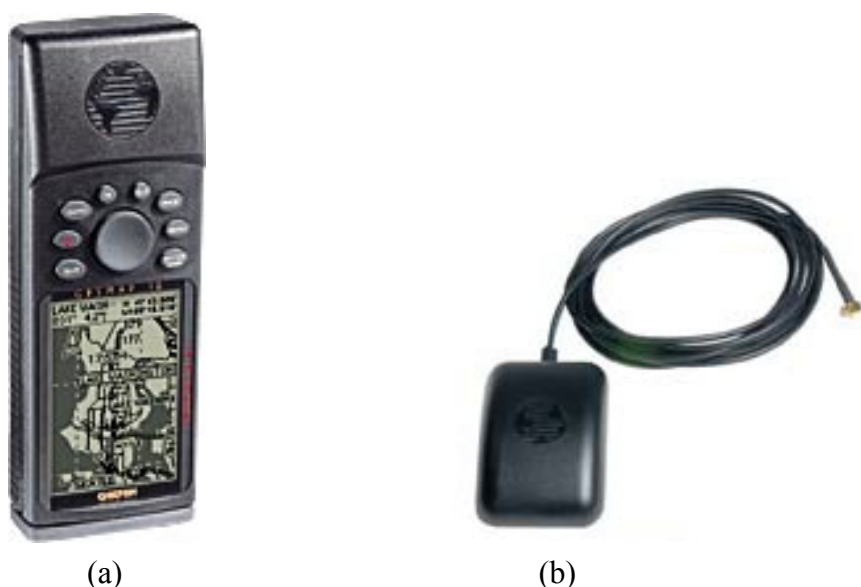


Figura 6.18 – (a) Receptor Garmin GPS 12 MAP; (b) Antena externa para GPS 12 MAP.

Em sua parte posterior, o receptor possui um conector de 4 pinos onde estão localizadas a interface serial RS-232 e a entrada de alimentação externa. A interface RS-

232 aceita diversos protocolos de comunicação, entre eles o DGPS-RTCM e o NMEA-0183. Sua alimentação interna é por meio de 4 pilhas tipo AA.

O protocolo NMEA-0183 (*National Marine Electronics Association*), descrito em Bennett (2003), comumente identificado somente por NMEA, é utilizado amplamente por receptores GPS e por softwares de navegação. Nesse protocolo, as informações são organizadas em mensagens ASCII iniciadas pelo caractere \$ seguido por 2 caracteres que identificam o tipo do transmissor, 3 caracteres que identificam o tipo de mensagem, os campos de dados separados por vírgula, um campo opcional de soma de verificação (*checksum*) e terminado pelos caracteres CR/LF. No caso do GPS, os caracteres GP identificam o tipo de transmissor. O exemplo abaixo mostra uma mensagem NMEA gerado por um receptor GPS.

\$GPGSV,2,1,08,01,40,083,46,02,17,308,41,12,07,344,39,14,22,228,45*75<CR-LF>

Há também, na parte posterior, um conector tipo MCX de RF para antena externa. A antena externa (figura 6.18-b) possui base magnética e melhora a receptividade do sinal em ambientes onde a antena interna é ineficaz, por exemplo, dentro de automóveis.

A figura 6.19 mostra o diagrama do cabo de conexão utilizado para ligar o receptor Garmin ao Creatalink. A figura mostra também a ligação da bateria externa (6 V a 18 V), que pode ser utilizada em longos períodos de funcionamento ou para economizar as pilhas internas.

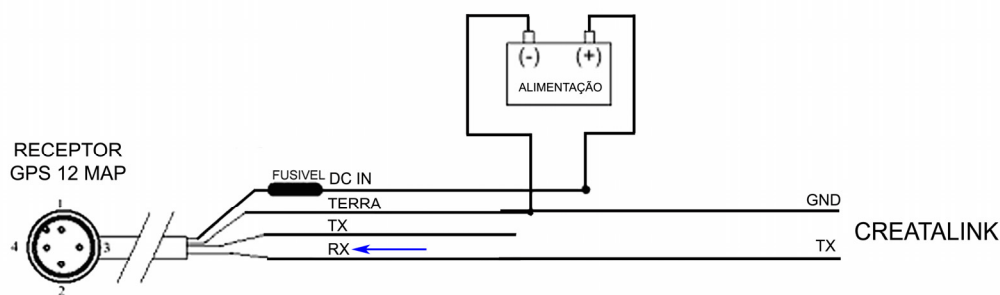


Figura 6.19 – Esquema de ligação do receptor Garmin com Creatalink.

Nesse esquema, as coordenadas corrigidas são observadas na tela do receptor por meio de uma de suas opções. Uma boa opção é utilizar a função média (*averaging*) que calcula a média das coordenadas obtidas em um intervalo de tempo. Geralmente, os receptores de navegação do tipo utilizado geram coordenadas a cada segundo (1 Hz). A utilização da média melhora a confiança estatística do resultado obtido.

Uma outra forma de conexão possível permite ao receptor GPS, além de receber mensagens DGPS, enviar mensagens NMEA a um PC rodando um software de navegação.

Como o receptor Garmin possui uma única interface serial, a recepção dos sinais DGPS provenientes do Creatalink é por meio do pino RX do receptor enquanto o PC é conectado ao pino TX para receber as mensagens NMEA. O diagrama esquemático é apresentado na figura 6.20.

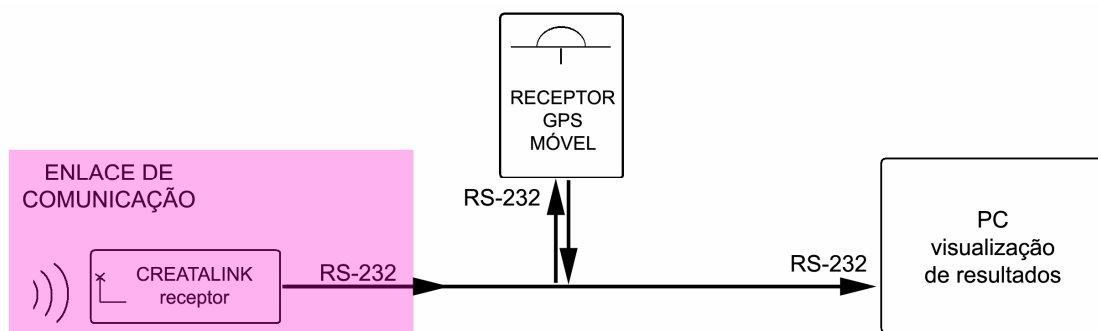


Figura 6.20 – Diagrama esquemático do receptor do usuário com PC.

Nesse esquema não há comunicação direta entre o Creatalink e o PC. O diagrama de conexão do cabo é apresentado na figura 6.21.

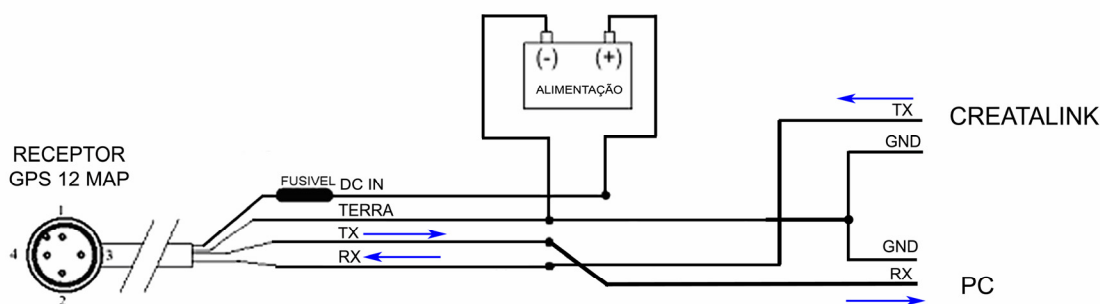


Figura 6.21 – Esquema de ligação do receptor Garmin com Creatalink e PC.

No receptor GPS, deve ser configurada a opção diferencial RTCM e mensagens NMEA.

A utilização de um PC é bastante conveniente para algumas aplicações pois os softwares disponibilizam diversos recursos ao usuário não disponíveis nos receptores em geral. Um bom software é o **GPS Track Maker (GPSTM)** do autor Odilon Ferreira Júnior. O GPSTM é um software de navegação por GPS com capacidade de armazenar dados, utilizar mapas de fundo, indicar direções, entre outras características. O GPSTM é um software brasileiro e gratuito para diversos fins. Há uma versão paga com mais recursos específicos para alguns usos profissionais. No GPSTM deve ser configurada a interface NMEA-0183, como pode ser visto na figura 6.22.

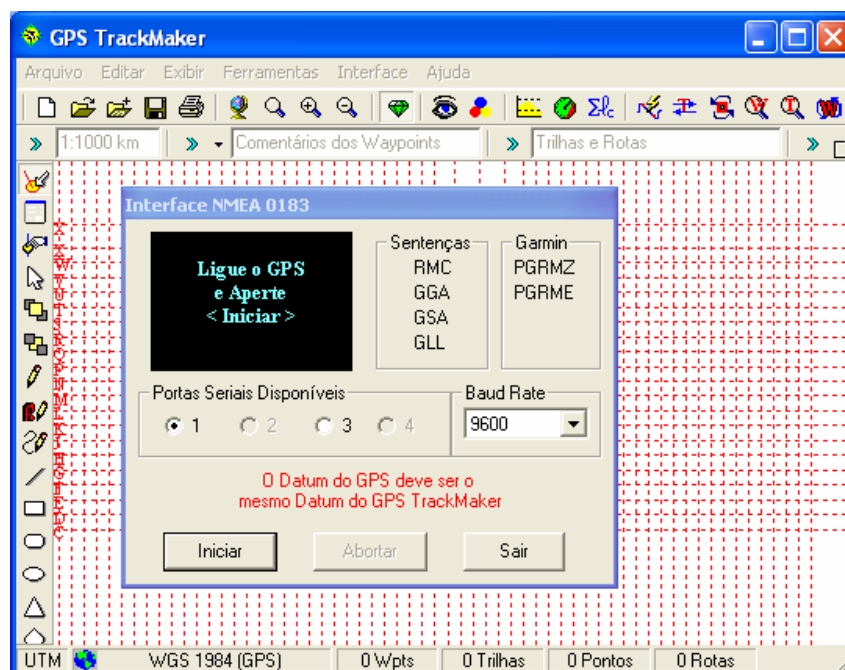


Figura 6.22 – Tela do GPS Track Maker na opção de interface NMEA.

Existe também uma outra classe de receptores GPS como os da figura 6.23 que não possuem tela nem botões, possuem apenas uma interface de comunicação e alimentação. Esses receptores são próprios para o uso com PC. Os receptores mais modernos vêm com interface USB, de onde retiram a alimentação.



Figura 6.23 – Receptores GPS para PCs.

A utilização de correção diferencial é por meio do PC que redireciona as correções recebidas para o GPS. As correções podem vir de diferentes fontes, como a interface serial, internet, modem, etc.

Um outro aparelho também utilizado como receptor do usuário é o Novatel. O receptor Novatel não possui memória interna. Geralmente é utilizado um computador ligado à sua porta serial para programar o receptor e receber os dados por ele gerados. Como este receptor possui duas interfaces seriais, o Creatalink foi ligado diretamente à

segunda porta serial e o receptor programado para aceitar as correções diferenciais. No PC o software utilizado foi o GPSolution.

6.3.1 Estudos relacionados ao receptor do usuário

Durante o trabalho foram utilizados os softwares publicados em Galán (2001). Trata-se de um procedimento não documentado pela Garmin onde é possível obter dados brutos (*raw data*) a partir de alguns receptores desse fabricante e assim gerar arquivos RINEX, normalmente disponível apenas em equipamentos profissionais. Como o receptor 12XL-MAP disponível para esta pesquisa é contemplado por este artigo, foram efetuados alguns experimentos.

O experimento consiste em coletar os dados brutos de nosso receptor por meio do ASYNC, gerar arquivos RINEX por meio do GAR2RNX e verificar a qualidade desses dados. Os softwares são para a janela DOS do ambiente Windows. Utilizou-se um notebook para coletar os dados e gerar os arquivos RINEX.

Utilizou-se o software SKI da Leica para analisar os dados coletados. Pôde-se observar que a dispersão das coordenadas é maior que no receptor Novatel, o que é compatível com o tipo de receptor. A fase da portadora registrada no RINEX possui muitas interrupções com perdas de ciclos o que prejudica seu uso nos chamados processamentos relativos. A falta de controle sobre o software também não ajuda nos trabalhos de levantamento profissional.

O aproveitamento de dados brutos de receptores Garmin pode ser descontinuado em modelos mais novos e não há garantias da Garmin quanto ao bom funcionamento. Pessoas qualificadas, porém têm condições de avaliar a qualidade dos dados e saber se são válidos para a sua aplicação em específico.

6.4 Integração dos módulos

A integração entre as partes que compõe o sistema DGPS corresponde à conexão direta entre as interfaces de cada módulo analisado anteriormente. O gerador DGPS disponibiliza uma interface RS-232 a qual é conectada na porta RS-232 de entrada do enlace de comunicação. A interface de saída do enlace de comunicação, também RS-232, é conectada à porta RS-232 do receptor do usuário, em qualquer uma das duas configurações apresentadas. A figura 6.24 mostra as interfaces entre os módulos do sistema DGPS.

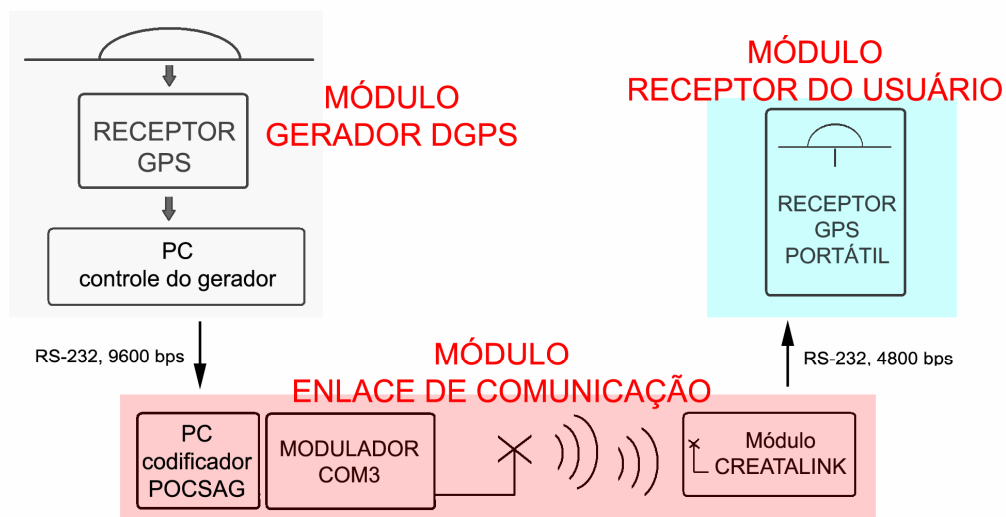


Figura 6.24 – Interfaces entre os módulos DGPS.

Como o enlace de comunicação não possui potência no transmissor, o alcance atingido foi de algumas dezenas de metros com as antenas de transmissão e recepção. Sem as antenas, o alcance chegou a alguns metros de distância. A taxa de transmissão adotada foi de 1 mensagem a cada 10 segundos, a mesma utilizada nos sistemas tradicionais de DGPS.

7 Resultados e discussões

Foram ensaiadas duas configurações do receptor do usuário, a primeira utilizando o receptor Garmin coletando as coordenadas em diversos horários com o receptor estacionado em um ponto fixo. A segunda configuração foi utilizando o receptor Novatel, também estacionado em ponto fixo. Nesse caso permitiu-se analisar o comportamento durante um longo período de tempo por meio da coleta contínua das coordenadas.

7.1 Receptor Garmin

Utilizou-se a função média (*average*) disponível no receptor Garmin, ao longo de dois minutos de observação em diversos horários na semana GPS 249 + 1024. As correções foram recebidas por meio do Creatalink com uma taxa de atualização de 0,1 Hz (1 mensagem a cada 10 s). Ao ser ligado, o receptor requer alguns minutos antes de seu uso para atualizar todos os seus dados internos. As coordenadas do local são assumidas como verdadeiras. Os resultados estão apresentados na tabela 7.1.

Tabela 7.1: Resultados obtidos com o receptor Garmin.

data	latitude (graus)	longitude (graus)	altura (m)	erro da medida (m)
Coordenas do local	-22,0040251	-47,8994664	820,5	
1/jun, 18h55min	-22,0040328	-47,8994981	825,6	3,4
2/jun, 7h56min	-22,0040408	-47,8994653	820,1	1,7
2/jun, 11h39min	-22,0040049	-47,8994443	812,3	3,2
2/jun, 22h18min	-22,0040209	-47,8994849	817,0	2,0
3/jun, 9h04min	-22,0040230	-47,8994703	824,3	0,5
3/jun, 12h23min	-22,0040320	-47,8994870	815,2	2,3
3/jun, 14h11min	-22,0040218	-47,8994910	824,9	2,6
3/jun, 19h03min	-22,0040380	-47,8994892	825,4	2,8
3/jun, 21h59min	-22,0040101	-47,8994442	834,7	2,8
4/jun, 9h52min	-22,0039995	-47,8994950	838,7	4,1
4/jun, 15h55min	-22,0039990	-47,8994919	832,9	3,9

O erro da medida planimétrico, expresso em metros, representa a distância no plano horizontal entre o valor medido e o ponto tomado como verdadeiro. Como altura apresenta uma dispersão acima de 10 metros e normalmente não deve ser utilizada. Para

contornar este problema, novos receptores estão dotados com altímetro barométrico que apresenta uma dispersão bem inferior. Os horários foram aleatórios procurando cobrir diferentes períodos do dia a fim de utilizar diferentes geometrias dos satélites.

Observa-se pelos resultados que houve significativa melhora na exatidão das coordenadas diferenciais, porém aquém do esperado inicialmente. Para trabalhos de cadastramento ambiental urbano esta melhora na qualidade das medidas permite diferenciar com garantia os lados de uma via pública.

O aumento no tempo de observação com GPS proporciona maior confiança nos resultados, porém aumenta o custo de levantamento em função do aumento de horas de trabalho do técnico em campo.

7.2 Receptor Novatel

Como o receptor Novatel não conta com modo interno de armazenamento ou média, os dados foram coletados em uma unidade externa. Neste experimento foi usado um computador PC de mesa já descrito anteriormente. Os dados foram coletados por meio do software GPSolution e posteriormente analisado no MS Excel. A figura 7.1 mostra as coordenadas obtidas ao longo de 3 dias em um receptor estacionado em um ponto localizado aproximadamente 900 metros da base de referência, batizado de P2. Como o enlace de comunicação não possui esse alcance, as correções foram aplicadas posteriormente. A origem do gráfico corresponde à média das coordenadas corrigidas. O eixo horizontal corresponde à variação na latitude e o eixo vertical na longitude, ambos representados em metros. As coordenadas autônomas são as obtidas com um receptor somente, sem as correções diferenciais.

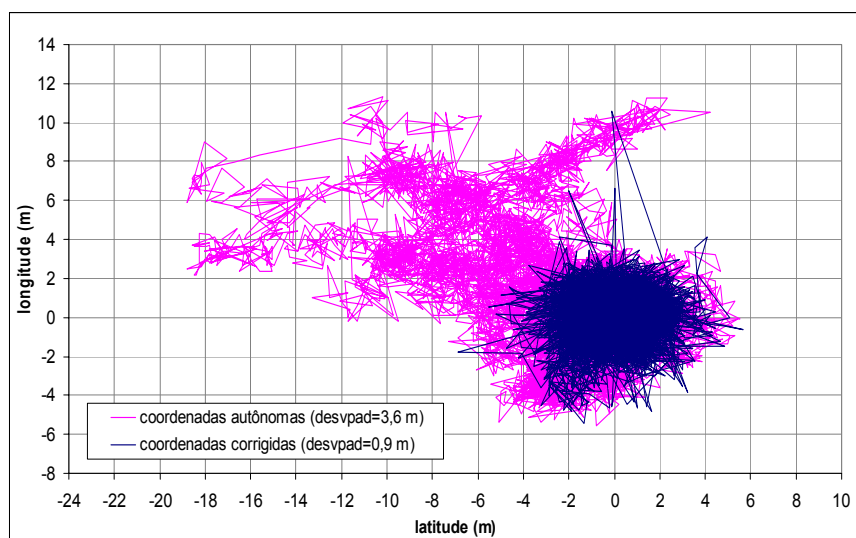


Figura 7.1 – Coordenadas autônomas e corrigidas representadas no plano em P2.

Nesse caso, o local da antena possui boa visibilidade do céu, permitindo assim boa receptividade dos sinais e poucas interferências locais. O desvio padrão das coordenadas planimétricas, inferior ao metro, é um bom resultado para a correção DGPS.

A variação em altura medida no ponto P2 está na figura 7.2. Nota-se o bom desempenho na correção de variações de baixa frequência.

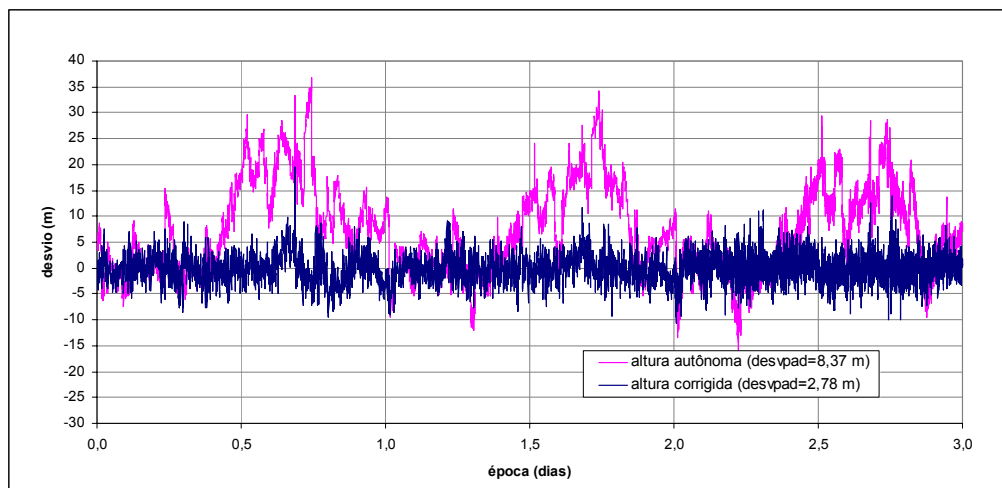


Figura 7.2 – Altura autônoma e corrigida no ponto P2.

Num outro experimento realizado como receptor Novatel, colocou-se a antena estacionada num ponto batizado de P3, que está a aproximadamente 300 metros da estação de referência. Neste experimento se procedeu a correção em tempo real. Como o enlace de comunicação não possui esse alcance, parte da comunicação foi efetuada via internet. A figura 7.3 apresenta um esboço do enlace de comunicação deste experimento.

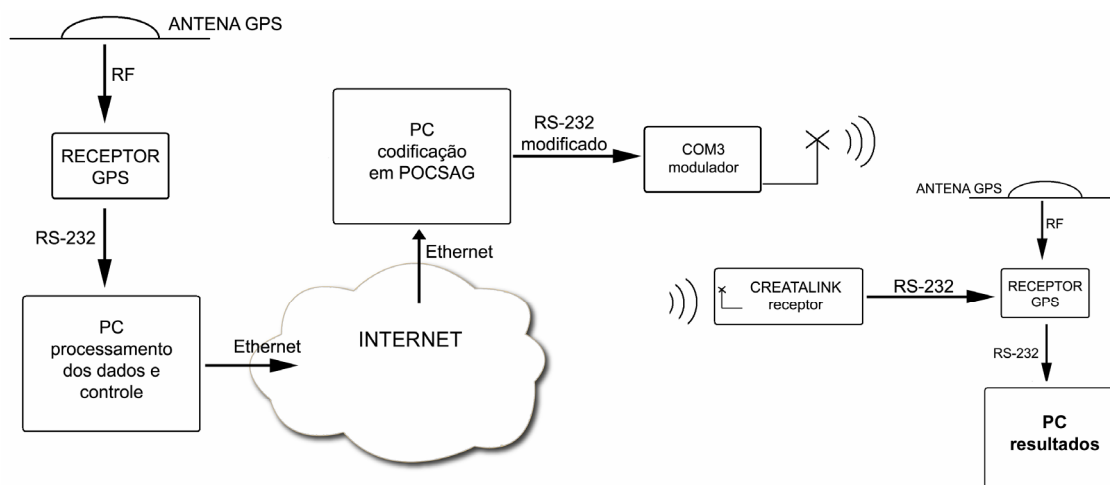


Figura 7.3 – Enlace de comunicação utilizado no ponto P3.

Foi utilizado o software SLOG da Novatel para fazer a comunicação via internet.

O SLOG é utilizado internamente em seus laboratórios como ferramenta de apoio. Este software, foi enviado pelo suporte técnico da Novatel para contornar uma limitação encontrada no software GPSolution. Dentre outras características, o SLOG permite a um computador “enxergar” a porta de serial de outro computador remoto via conexão TCP/IP. Assim, os dados disponibilizados na serial de um computador podem ser utilizados por outro computador remoto de forma transparente. O atraso na comunicação não foi perceptível, pois a rede internet utilizada é de alta velocidade.

A figura 7.4 mostra o céu visto pela antena no ponto P3. Neste local há obstruções que prejudicam a recepção dos sinais GPS. As obstruções caracterizam uma situação real em ambiente urbano. A figura foi obtida por meio de uma foto digital com lente de 180° de abertura. A foto é ilustrativa e foi tirada sem técnicas especiais. Pode-se ver na figura que as obstruções chegam a 45° de elevação em uma direção e com total visibilidade em um dos lados, situação característica de avenidas urbanas. Nessa situação, a transmissão de correções por meio de satélite geo-estacionário é inviável, pois seu sinal pode ser totalmente bloqueado.



Figura 7.4 – Foto do céu vista pela antena no ponto P3.

O receptor ficou estacionado por aproximadamente 3 dias no ponto P3. As coordenadas planimétricas estão na figura 7.5. No posicionamento por GPS podem ocorrer grandes erros de posicionamento como o visto na figura. Embora o desvio das coordenadas não corrigidas seja de 16,6 metros, pelo menos uma solução teve seu resultado a mais de 1000 metros de distância do ponto P3.

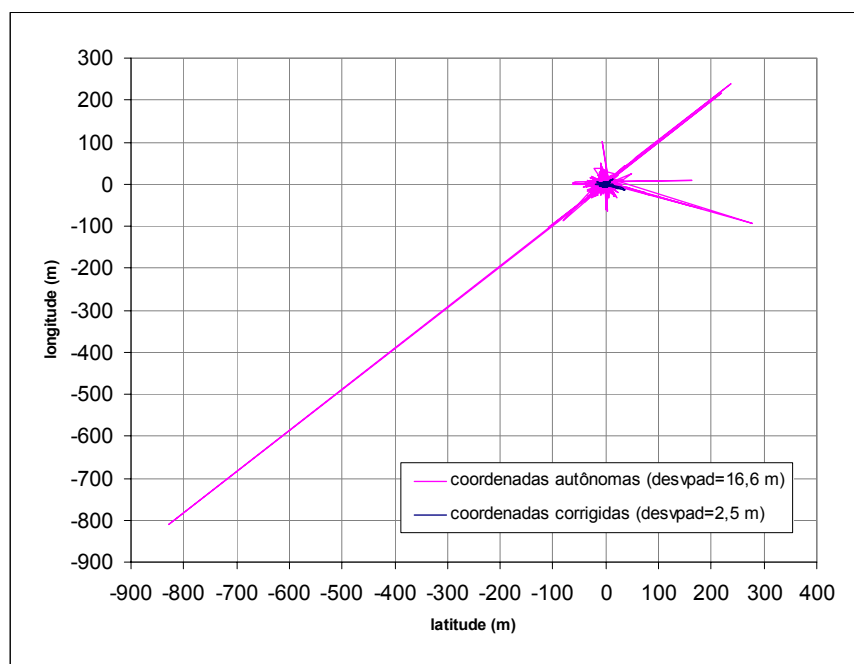


Figura 7.5 – Coordenadas autônomas e corrigidas no ponto P3.

A figura 7.6 apresenta as coordenadas planimétricas numa escala maior. Nessa escala pode-se ver que mesmo as coordenadas corrigidas, eventualmente, “fogem” de seu comportamento esperado e apresentam erros de mais de 30 metros. Mesmo assim o desvio padrão de 2,5 metros é um resultado muito superior ao desvio de 16,6 metros das coordenadas autônomas.

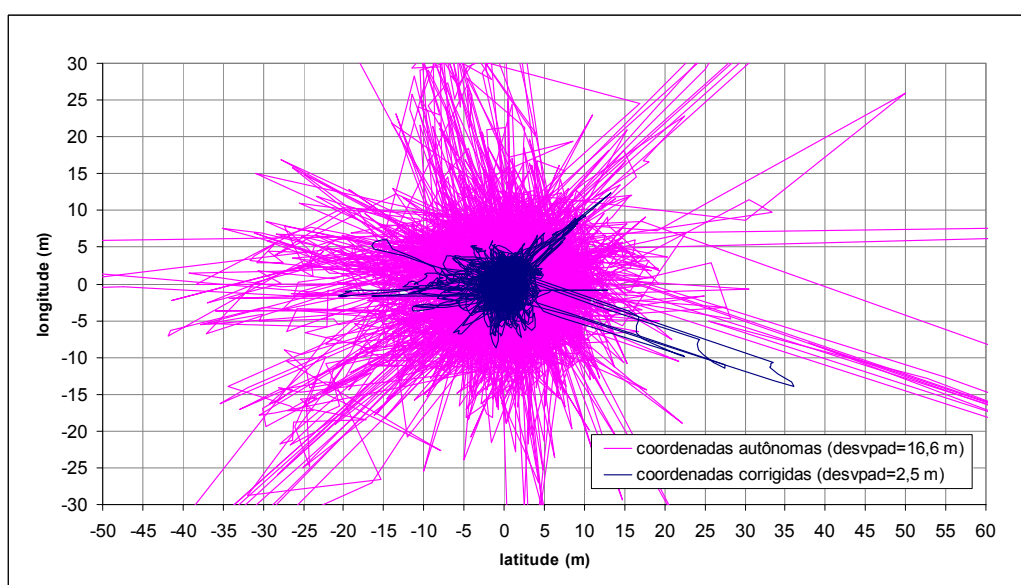


Figura 7.6 – Detalhe das coordenadas autônomas e corrigidas no ponto P3.

A figura 7.7 apresenta a componente em altura autônoma ao longo do tempo no ponto P3. Observa-se que em um momento houve um desvio de mais de 5000 metros. Seu desvio padrão é de 75 metros.

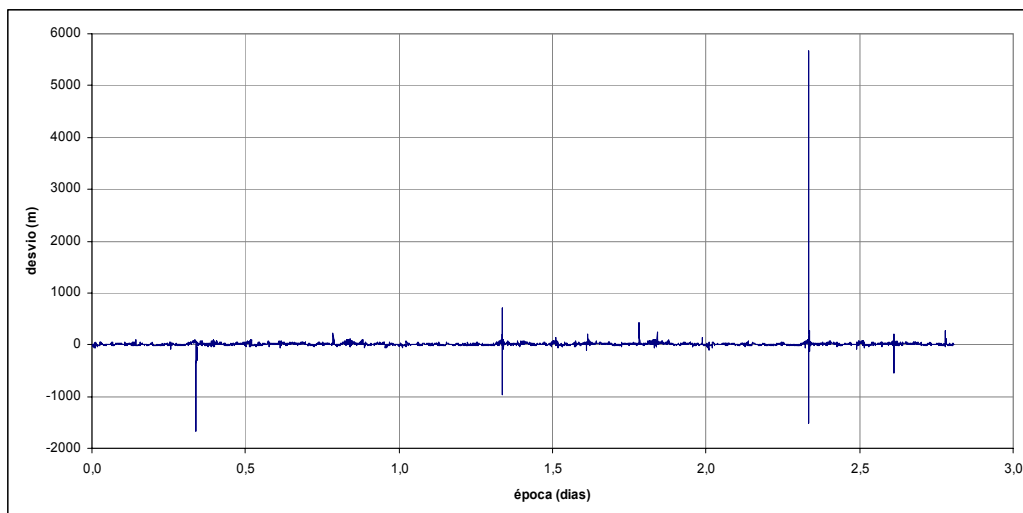


Figura 7.7 – Altura autônoma no ponto P3.

A figura 7.8 mostra a altura corrigida no ponto P3, onde o desvio padrão foi de 9 metros. Nesse caso também ocorrem saltos na altura mas são bem menores que nas medidas autônomas.

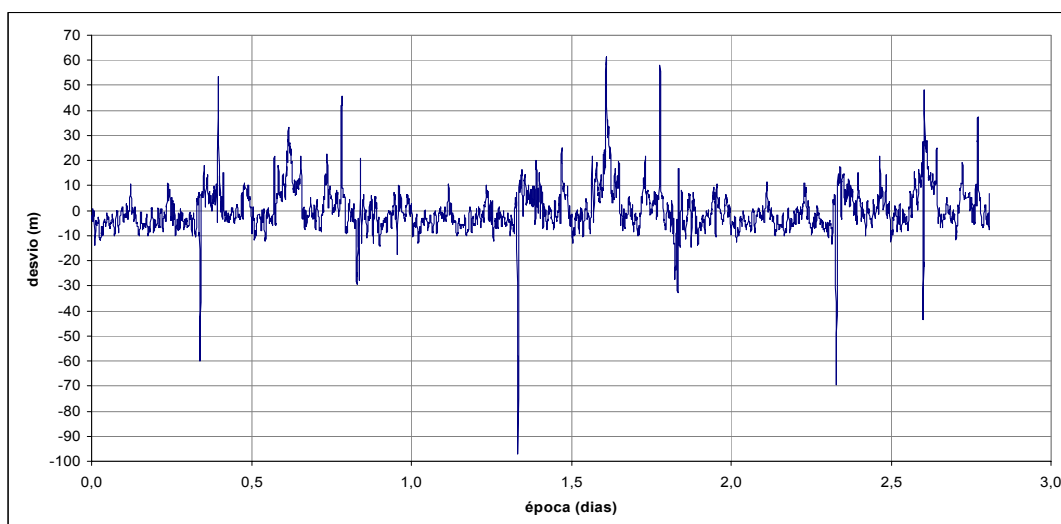


Figura 7.8 – Altura corrigida no ponto P3.

A figura 7.9 apresenta as coordenadas planimétricas sem correção ao longo do tempo, observadas no ponto P3. Esta representação deixa evidentes os saltos de posição que podem ocorrer no sistema GPS.

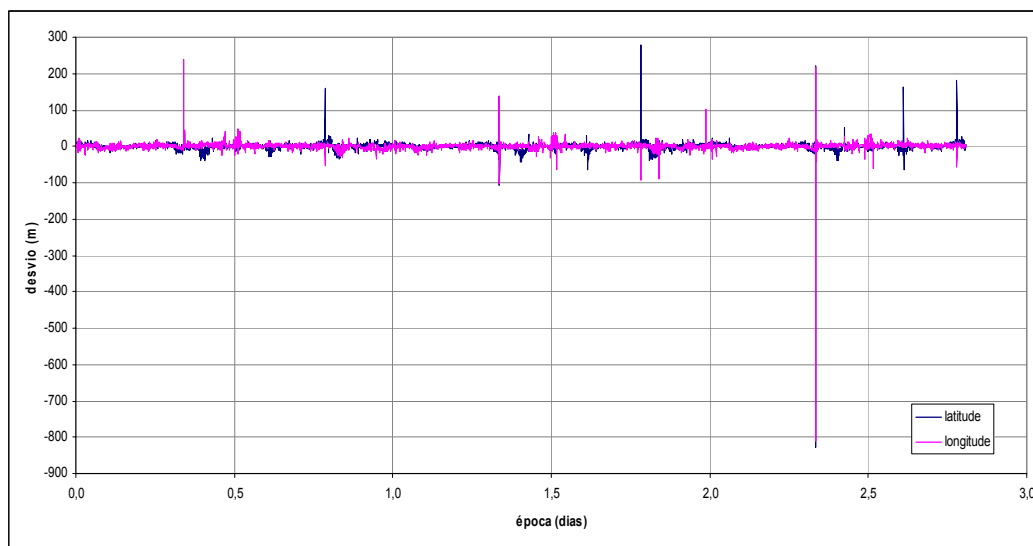


Figura 7.9 – Coordenadas planimétricas autônomas ao longo do tempo no ponto P3.

Já na figura 7.10, são apresentadas as coordenadas planimétricas corrigidas ao longo do tempo, também observadas no ponto P3.

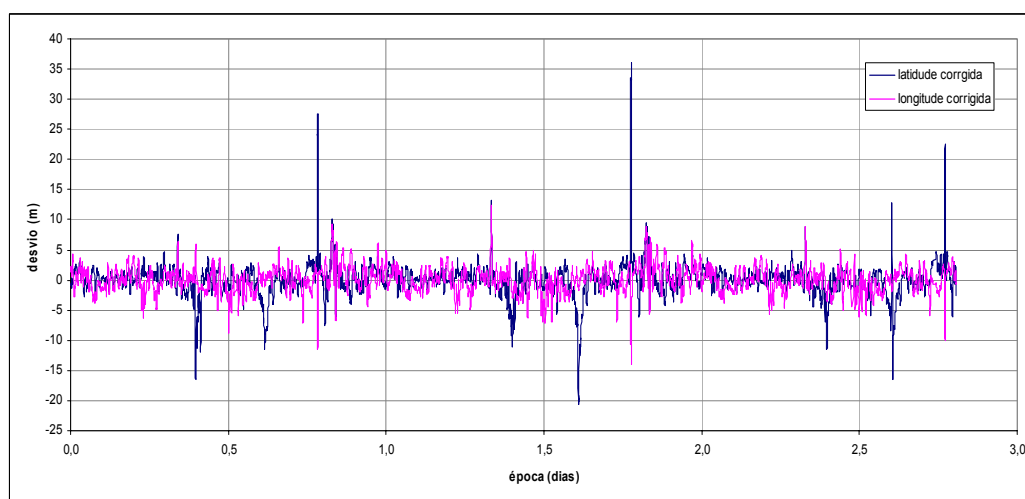


Figura 7.10 – Coordenadas corrigidas ao longo do tempo no ponto P3.

A figura 7.11 apresenta uma amostra de 20 minutos de coordenadas sem correções no ponto P3. Em um intervalo de tempo menor, é possível observar os detalhes da variação nas coordenadas. Lembrando que nesse ponto há obstruções próximas à antena e comparando-se as coordenadas medidas com sua média móvel de 2 minutos pode-se notar que há uma maior confiança nos resultados obtidos pela média. A média móvel

suaviza as variações rápidas presentes nas coordenadas autônomas. As coordenadas foram registradas a cada 5 segundos.

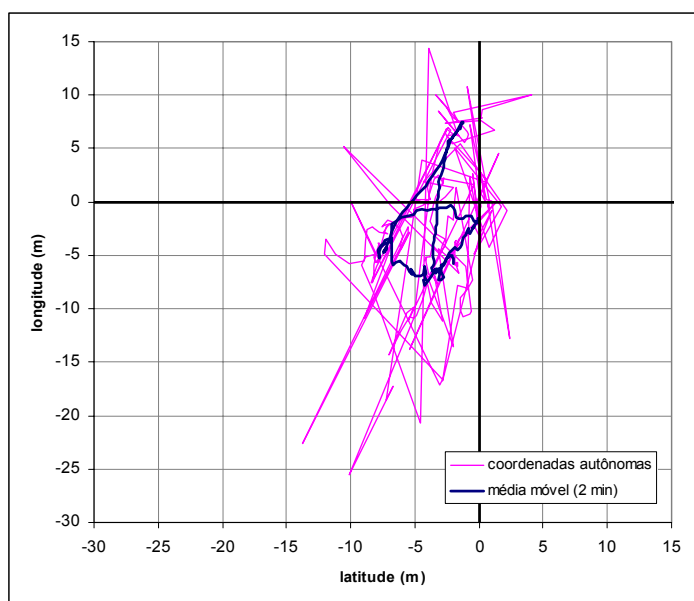


Figura 7.11 – Coordenada autônoma e média móvel de 2 min. em P3.

A figura 7.12 apresenta, no mesmo período de tempo, as coordenadas com correção diferencial e sua respectiva média móvel. Nesse caso, as coordenadas corrigidas não são muito diferentes da média móvel. Como a variação das coordenadas corrigidas já é lenta, não há grandes melhorias nos resultados. É certo que estatisticamente a média móvel melhora a confiança, porém com menor contribuição em coordenadas corrigidas por DGPS.

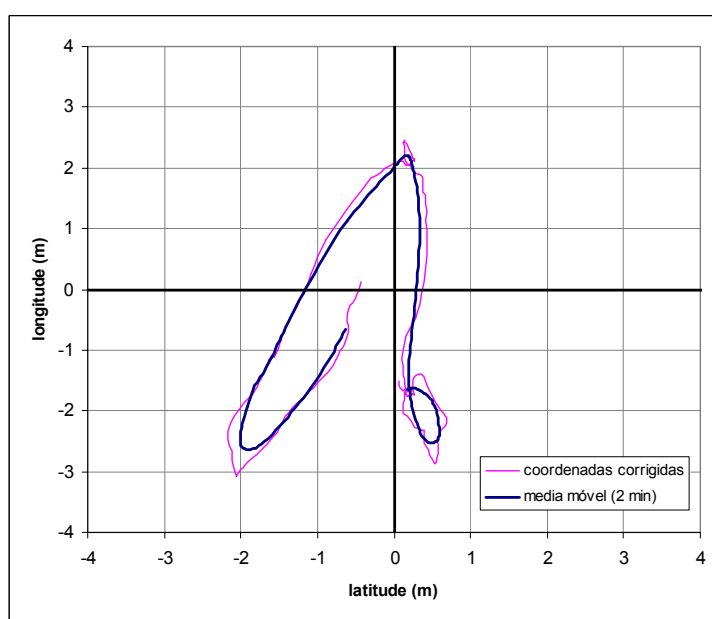


Figura 7.12 – Coordenada corrigida e média móvel de 2 min. em P3.

A figura 7.13 mostra as mesmas coordenadas da figura 7.11, agora representadas ao longo do tempo. Essa figura deixa mais evidente as variações em alta frequência suavizadas pela média móvel.

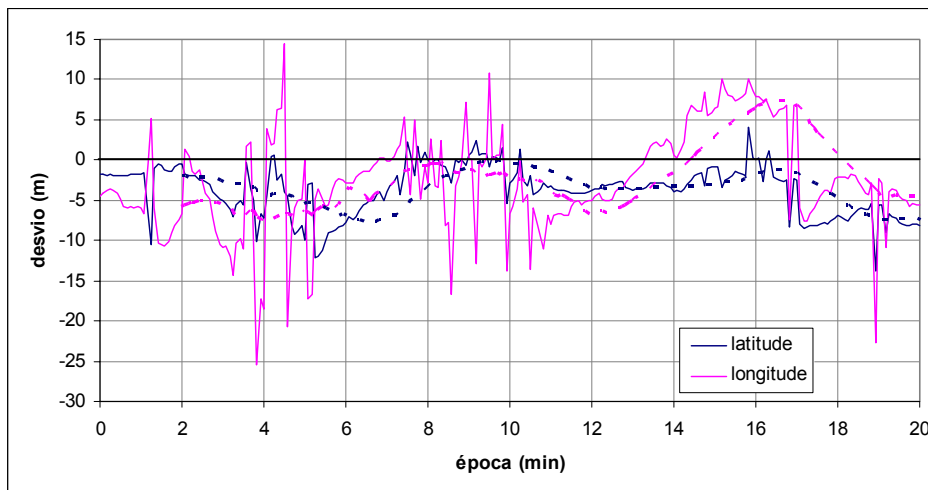


Figura 7.13 – Coordenadas planas autônomas e respectivas médias móveis de 2 minutos.

Já a figura 7.14 mostra as coordenadas corrigidas da figura 7.12 e sua média móvel, ao longo do tempo.

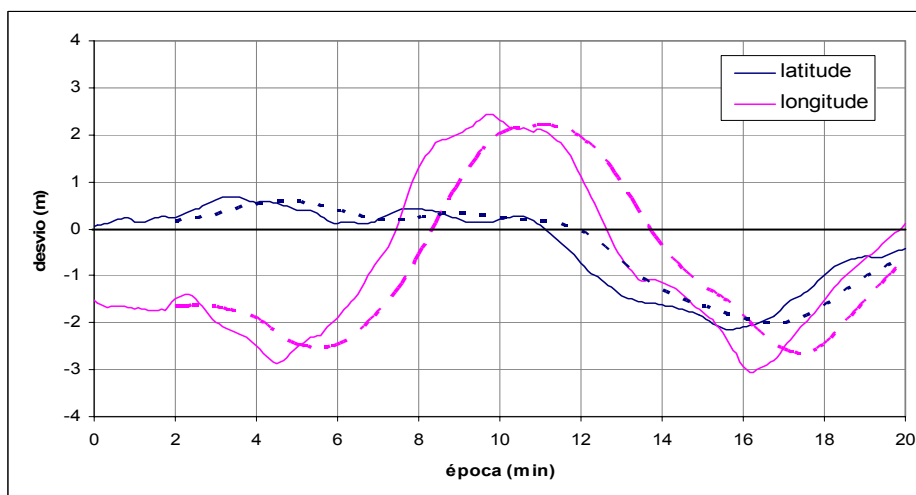


Figura 7.14 – Coordenadas planas corrigidas e respectivas médias móveis de 2 minutos.

A figura 7.15 contém uma amostra de alguns minutos do experimento no ponto P3 quando ocorreu um desvio anormal nas coordenadas corrigidas e que não existia nas coordenadas autônomas (figura 7.16). Isto deve ter ocorrido em função de alguma correção inadequada transmitida pela estação de referência. As correções geradas são a partir da diferença entre a medida geométrica e a distância medida a cada satélite. Uma análise das correções determinadas nesse período poderia indicar a causa deste compor-

tamento. Não se puderam obter maiores detalhes pois neste trabalho não foi implementada análise previa das correções a serem transmitidas.

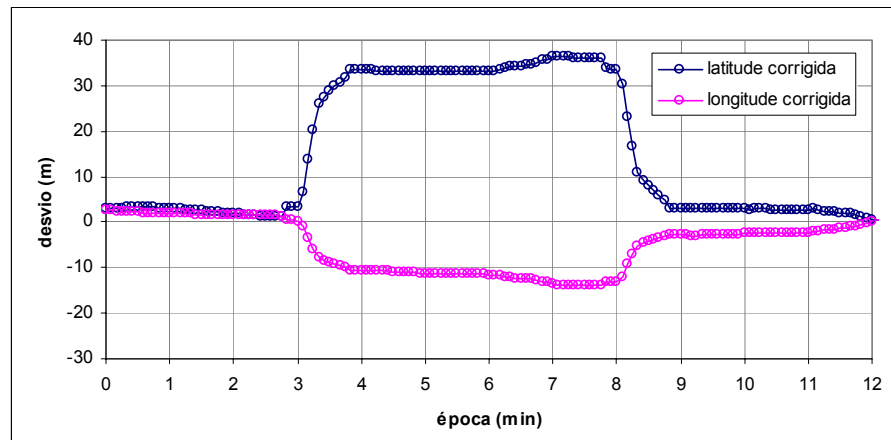


Figura 7.15 – Coordenadas planas corrigidas com comportamento anômalo.

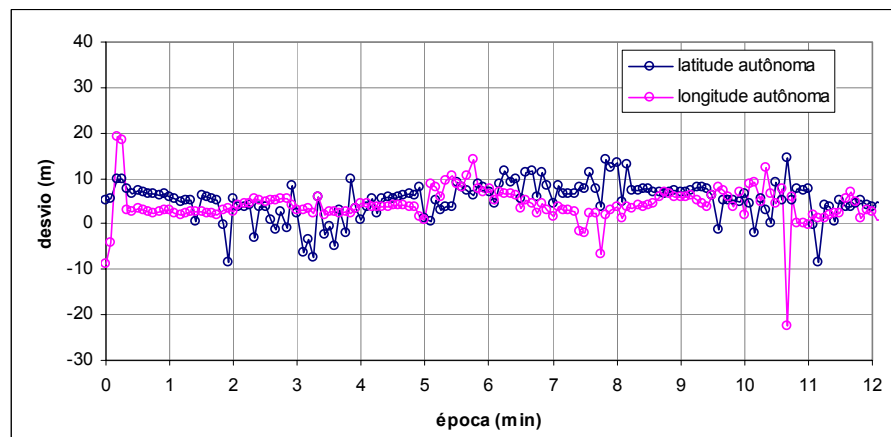


Figura 7.16 – Coordenadas planas autônomas no mesmo período.

8 Conclusões e Recomendações

A utilização de DGPS em meios urbanos com o enlace de rádio proposto neste trabalho apresenta uma melhora significativa na qualidade do posicionamento planimétrico. Considerando que a mancha urbana de uma cidade média apresente um diâmetro de 20 km, pode-se considerar que o enlace não deve ser superior a 10 km. Nesta distância, as diferenças causadas pela ionosfera e atmosfera são desprezíveis (HOFFMAN 1997), podendo-se afirmar que os erros residuais depois da aplicação da correção DGPS ficam por conta de aspectos locais, que impedem uma boa recepção dos sinais de GPS ou mesmo dos sinais do enlace.

Em locais de boa visibilidade obteve-se resultados com desvio padrão submétrico, valor este aceito pela comunidade. Em locais altamente degradados devido à presença de obstruções, a recepção dos sinais de GPS é deteriorada. Por outro lado, a recepção do enlace proposto não é tão afetada no meio urbano, dependendo mais da ondulação do relevo.

Numa situação real, com a presença de obstruções de até 45° graus de elevação, obteve-se um ganho de qualidade nos resultados proporcionalmente melhor, passando de um desvio padrão de 16,6 m para um desvio de 2,5 m.

Infelizmente não se pôde contar com um equipamento que permitisse efetuar enlaces em uma distância mais realística, lembrando que testes de distância de cobertura do enlace não foram estabelecidos como o objetivo deste trabalho.

O grau de confiança da operacionalidade de um sistema DGPS pode ser avaliado analisando-se o comportamento da correção de cada satélite ao longo do tempo. Para implementar esta análise, é necessário desenvolver um algoritmo de análise das correções a priori, ou seja, antes de serem enviadas ao sistema de comunicação. Dessa maneira satélites com problemas são removidos dos cálculos para a manutenção da integridade dos resultados.

Os sistemas de enlaces utilizando satélites geo-estacionários continuam tendo os problemas de visibilidade nos centros urbanos, onde a comunicação por rádio difusão é mais eficaz, podendo-se utilizar o pager, RBDS, celular, Wi-Fi, rádio-modems e outras tecnologias existentes no mercado. A implantação de sistemas de comunicação baseados em satélite geo-estacionário têm cobertura bastante ampla e são eficientes, observadas as ressalvas anteriores. Há sistemas em funcionamento nos EUA, Canadá, Europa e

Japão. No Japão, em particular na cidade de Tokyo que apresenta alta densidade de edificações elevadas, o problema de visibilidade, tanto para a rede GPS como para a rede de comunicação foi contornado com uma rede auxiliar de satélites em uma órbita com passagem bem próxima de 90° (NASDA 2003). No Brasil, por enquanto, não há previsão para se implantar um sistema baseado em satélites.

Coordenadas mais precisas podem ser obtidas utilizando a técnica cinemática em tempo real chamada RTK (*real time kinematics*), método baseado na determinação do vetor entre a Estação Base e o receptor Móvel. A Estação Base envia informações da fase da portadora dos sinais transmitidos pelos satélites. Enquanto para DGPS utilizam-se canais com 200 bps, sistemas RTK geralmente necessitam mais de 5000 bps de banda no enlace de comunicação (Weber 2003).

Os sistemas DGPS, com enlace de comunicação por rádio em determinadas frequências, como o pager, têm seu principal potencial de uso nas cidades de porte médio onde uma única antena propicia boa cobertura. O aproveitamento de infraestrutura existente também reduz o custo inicial de implementação.

Tem-se utilizado mais frequentemente a internet como meio de comunicação para sinais DGPS. A internet sem fio (*wireless*), sobretudo no padrão Wi-Fi 802.11b/g tem se tornado cada vez mais popular e mais confiável. O acesso a essas redes está mais fácil é mais barato sendo um dos candidatos naturais para a disseminação de correções DGPS. Em Hada (1999), Weber (2003) e Gao (2003) são descritos sistemas DGPS que utilizam a internet como meio de comunicação, sempre em *wireless* próximo ao usuário final. O principal problema enfrentado nessa tecnologia ainda é o atraso do sinal, pois o DGPS requer aplicação em tempo real e a internet nem sempre possui um padrão de qualidade adequada para tal. A cobertura de acesso à internet por meio de celular e os provedores por rádio vêm crescendo no Brasil o que tornará uma realidade o uso dessa tecnologia no futuro.

Pesquisas futuras poderão explorar melhor a aplicação com um equipamento de transmissão mais possante e poderão implementar um algoritmo de análise e filtragem das correções.

Referências

ANATEL (2003). Norma no. 17/96. **Canalização e condições de uso de frequências pelo serviço especial de radiochamada e pelo serviço limitado privado.**

Disponível em : <http://www.anatel.gov.br/index.asp?link=/biblioteca/Normas/Normas_MC/norma017_1996.htm?Cod=673>. Acesso em 07/jul/2003.

ANDREWS, Space & Technology (2004). **NAVSTAR GPS Summary.** Disponível em <http://www.spaceandtech.com/spacedata/constellations/navstar-gps_consum.shtml>. Acesso em set/2004.

BENNETT, P. (2003). **The NMEA FAQ.** v.6.4. Disponível em: <http://vancouver-webpages.com/peter/nmeafaq.txt>. Acesso em: ago/2004.

BOMFORD, G. (1980). **Geodesy**, 4th ed. Oxford Univ. Press. Oxford.

BRAASCH, M. S.; DIERENDONCK, A. J. Van.(1999). GPS receiver architectures and measurements. **Proceedings of the IEEE.** v.87, n.1, p.48-64.

BRAIN, M.; HARRIS, T. (2002). **How stuff works - how GPS receivers work.** Disponível em: <<http://electronics.howstuffworks.com/gps.htm/pritable>>. Acesso em: dez./2002.

CANADIAN Coast Guard (2005). **Differential Global Positioning System (DGPS).** Disponível em: <http://www.ccg-gcc.gc.ca/dgps/guide/guide4_e.htm>. Acesso em: jan./2005.

DANA, P. H. (1995). **Global Positioning System Overview.** Disponível em: <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html>. Acesso em: mar./2003.

DoD (1995). **GPS Standard positioning service signal specification.** USA. 2nd ed. Disponível em: <<ftp://ftp.iasi.roedu.net/mirrors/ftp.tapr.org/gps/gpspspsa.pdf>>. Acesso em: abr/2002.

DoD (1996). **NAVSTAR GPS User equipment introduction.** USA Disponível em: <https://www.spacecom.af.mil/GPS_Support/documents/gpsuser.pdf>. Acesso em: nov/2002.

- FARFAN E. (2005). Mapeamento do Brasil por GPS. **Revista de Ecologia do Século 21**. ed. 98, jan./2005. Disponível em <<http://www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=1010>>. Acesso em jan./2005.
- GALÁN, A.T. (2001). **Obtaining raw data from some Garmin units**. Disponível em: <<http://artico.lma.fi.upm.es/numerico/miembros/antonio/async>>. Acesso em: nov/2001.
- GAO, Y., Liu, Z. (2003). Differential GPS Positioning over Internet. **Journal of Geospatial Engineering**. Hong Kong. v.11, n.1, p. 1-7.
- GEMAEL, C. (1987). **Introdução à geodésia geométrica - 1ª parte**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geociências.
- GPS World (2003). **An Advanstar Communications Publication**. Vol 14. n.11.
- GURTNER, W. (2001). **RINEX-2.10 format**. Disponível em: <<http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Rinex2.html>>. Acesso em: set/2002.
- HADA, H. et all. (1999). **Differential and RTK Corrections for the Internet Car. GNSS**. Japão.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. (1997). **Global positioning system: theory and practice**. 4th, rev. ed. Wien, New York. Springer Verlag.
- IBGE (1997). **Sistema de Referência Geocêntrico da América do Sul**. Relatório final, grupos de trabalho I e II. IBGE. Rio de Janeiro.
- IBGE (1989) **Resolução no. 23 de 21 de fevereiro de 1989**. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/download/rpr.pdf>>. Acesso em: 5/2005
- IBM (2000). A revolutionary GPS receiver chipset. **IBM Micronews**, v.6, n.1, p.40, first quarter.
- ITIS (2002). **ITMC - Itis Traffic Message Channel**. Disponível em: <<http://www.rds-tmc.co.uk>>. Acesso em: set/2002.
- MILBERT, D. (2002). **Point position, kinematic**. Disponível em: <<http://mywebpages.comcast.net/dmilbert/softs/ppos.htm>>. Acesso em: jan./2003.
- NASDA (2003). Progress in new positioning research using quasi-zenith satellite system. **Nasda report**. No. 135. 2003. Disponível em: <http://www.nasda.go.jp/lib/nasda-news/2003/09/head_e.html>. Acesso em: dez/2004.

NAVCEN (2004) **DGPS general information**. Disponível em:

<<http://www.navcen.uscg.gov/dgps/default.htm>>. Acesso em: fev./2004.

NGS (2002). **National geodetic survey precise GPS orbits**.

Disponível em: <<http://www.ngs.noaa.gov/GPS/GPS.html>>. Acesso em: out/2002.

NOVATEL Inc. (1995). **GPSCard command description manual, rev. 2.0**. Canada.

OMNISTAR (2004). **Omnistar Regional Coverage Maps, by Satellite**. OmniStar

USA Inc. Disponível em: <http://www.omnistar.com/services_region.html>.

Acesso em: out./2004.

PMRG (2004). **Projeto Mudança do Referencial Geodésico**. Diretoria de Geociências – IBGE, Departamentos de Cartografia e Geodésia. Informativo Geocêntrico.

Ano 1, no. 1.

RTCM (1998). **Radio technical commission for maritime services special committee no. 104 recommended standards for differential GNSS, version 2.2**. USA.

RUPPRECHT, W. S. (2003). **DGPS over the internet**. Disponível em:

<<http://www.wsccc.com/wolfgang/gps/dgps-ip.html>>. Acesso em: jun/2003.

SCALSK, Y. S.; CHACE, M. (1997). **Digital signals FAQ version 5.0 chapter 2 –**

modes on VHF. Disponível em: <<http://mir.irisz.hu/cucc/misc/signals-hf/signals.html>>.

Acesso em: jan./2003.

STANSELL Jr, T. A. (1983). Civil GPS from a future perspective. **Proceedings of the IEEE**, v.71, n.10, p.1187-1192.

WEBER, G. et all (2003). **Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip)**. RTCM Paper 166-2003/SC 104-314. Japão.

Glossário

Almanaque – Conjunto de informações transmitidas pelos satélites GPS suficientes para o cálculo aproximado da posição dos satélites.

AS, *anti spoofing* – Técnica utilizada para minimizar o bloqueio proposital de sinais GPS.

C/A, *coarse acquisition* – Método de obtenção do código GPS utilizado no modo de posicionamento padrão.

CAPCODE – Código de sete caracteres que representa um receptor de pager no sistema POCSAG.

ECEF XYZ, *earth centered and earth-fixed XYZ* – Sistema de coordenadas cartesianas cuja origem coincide com o centro de massa da Terra, o eixo Y coincide com o eixo de rotação, o eixo X cruza com o meridiano de Greenwich no lado positivo e o eixo Z segue a regra da mão direita.

Efemérides – Informações transmitidas pelos satélites suficientes para o cálculo da posição precisa dos satélites GPS ao longo do tempo.

Exatidão – Grandeza que caracteriza a dispersão de uma medida em relação ao valor verdadeiro.

L1, *link 1* – Identificação da primeira portadora da transmissão do satélite GPS com frequência central em 1.575,42 MHz onde são transmitidos os códigos C/A e P.

L2, *link 2* – Identificação da segunda portadora da transmissão do satélite GPS com frequência central em 1.227,60 MHz onde é transmitido o código P.

P, *precise* – Código CDMA transmitido nas portadoras L1 e L2 utilizado por receptores militares dos EUA no posicionamento preciso.

PPS, *precise positioning service* – Serviço de posicionamento preciso utilizado por receptores militares dos EUA e que utiliza o código P no cálculo da posição.

Precisão – Grandeza que caracteriza a dispersão de diversas medidas em relação à sua média. É uma grandeza estatística.

PRN, *pseudo random noise* – Número decimal a partir do qual é gerado o código CDMA de um satélite GPS. Um satélite é caracterizado pelo seu código CDMA e con-

sequentemente pelo seu PRN pois é a única diferença entre as transmissões dos diferentes satélites.

Radionavegação – É a radiodeterminação usada com a finalidade de navegação, incluindo perigos de obstrução.

Radiodeterminação – É a determinação da posição, velocidade e/ou outras características de um objeto, ou obtenção de informações relativas a esses parâmetros por meio das propriedades de propagação de ondas de rádio.

RINEX, *receiver independent exchange* – Formato ASCII padronizado para intercâmbio de informações entre receptores GPS. Pode ser utilizado também em receptores GLONASS, mistos GPS/GLONASS e outros sistemas de navegação.

SA, *selective availability* – Nome dado à degradação proposital na performance do sistema GPS utilizado por toda a comunidade civil. Este efeito foi desativado em maio de 2000 pelo governo americano.

SPS, *standard positioning service* – Serviço de posicionamento padrão que garante a precisão de 100 m com 95% de probabilidade (com SA) e utiliza código C/A no cálculo da posição do receptor.

TMC, *traffic message system* – Sistema de mensagens transmitidas na sub-portadora de FM e que contém informações de trânsito/tráfego para os motoristas.

WGS 84, *World Geodetic System of 1984* – Elipsóide geocêntrico adotado no sistema GPS utilizado para representar coordenadas na superfície da Terra.