

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CUSTO
REDUZIDO PARA GERAÇÃO DE SINAL DE CORREÇÃO
DIFERENCIAL, EM TEMPO REAL, PARA GPS**

THALES COELHO BORGES LIMA

CAMPINAS
MAIO DE 2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CUSTO
REDUZIDO PARA GERAÇÃO DE SINAL DE CORREÇÃO
DIFERENCIAL, EM TEMPO REAL, PARA GPS**

Tese submetida à banca examinadora para
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Agrícola na área de concentração de Máquinas
Agrícolas.

THALES COELHO BORGES LIMA

Orientador: Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli

CAMPINAS
MAIO DE 2006

*“Não é o desafio que determina quem somos,
mas a maneira com que respondemos a esse desafio.
Somos combatentes, idealistas, mas plenamente conscientes,
porque o ter consciência não nos obriga a sermos conscientes.
Enquanto acreditarmos no nosso sonho, nada será por acaso.”*

(Henfil)

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais
Jovino Coelho de Lima e Maria Marleni Borges Lima,
que sempre me ajudaram e me apoiaram,
incondicionalmente, em todos os momentos de minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, e em especial:

- *À Fapesp pelo apoio financeiro a este trabalho;*
- *À Faculdade de Engenharia Agrícola pela oportunidade concedida;*
- *Ao meu orientador Prof. Dr. Nelson L. Cappelli pela orientação e incentivo no desenvolvimento deste trabalho;*
- *Ao amigo Cláudio K. Umezu pelas valiosas contribuições para a realização deste trabalho e acima de tudo pela grande amizade;*
- *Aos professores da Feagri com os quais tive a oportunidade de conviver dentro e fora da sala: Paulo S. G. Magalhães, Luiz Henrique A. Rodrigues e Antonio J. S. Maciel pelos conselhos na elaboração deste trabalho;*
- *À minha família: Jovino Coelho de Lima, Maria Marleni Borges Lima, Themis Coelho Borges Lima, Ary Perez Junior, Gabriel Perez Lima e Sayuri Zanandrea Umezu pela ajuda incondicional para a concretização deste trabalho;*
- *Aos amigos: Alencar de Melo Junior, Fábio Alexandre Gaion Casotti, João Carlos Perciani, Michele Umezu, Noeli Pereira Rosa, Paulo Eduardo Silveira, Peter Jandl Junior, Omar Carvalho Branquinho, Sidney Pio de Campos e Vandeir Aniceto Pinheiro pelas amizades, contribuições e incentivos;*
- *Aos amigos da Feagri: Angel Pontin Garcia, Edison Russo e Eduardo Nunes Ferreira pela ajuda na realização deste trabalho;*
- *Aos colegas da Feagri: Ana Paula, André, Marta e Rosângela, pelo auxílio prestado;*
- *Às empresas DLG Automação Industrial e T&S Equipamentos Eletrônicos;*
- *Agradeço a Deus, acima de tudo, por ter conseguido concluir mais esta etapa em minha vida.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Agricultura de Precisão	4
2.1.1 Geração de Mapas	9
2.1.2 Aplicação Localizada de Insumos	14
2.2 Sistemas de Navegação Global por Satélite	15
2.2.1 Sistema NAVSTAR GPS	16
2.2.2 Sistema GLONASS	31
2.2.3 Sistema GALILEO	32
2.3 Sistema de Posicionamento Global Diferencial – DGPS	33
2.3.1 Sistemas de Correção Diferencial Pós-processado e em Tempo Real	36
2.3.2 Estações de Sinais DGPS	37
2.3.3 Justificativa para o uso do DGPS	40
2.3.4 Aplicações de DGPS na Agricultura	42
2.3.5 Outras Técnicas de Correção para GPS	44
2.4 Receptores GPS	47
2.4.1 Protocolos de Comunicação para GPS	48
2.4.2 Erros em Receptores GPS	53
2.5 Sistemas de Comunicação de Dados	56
2.5.1 Modems	56
2.5.2 Modulação	57
2.5.3 Modems Digitais	60
2.5.4 Sistema de Transmissão Via Rádio	60

3	<i>MATERIAL E MÉTODOS</i>	63
3.1	Material	63
3.1.1	Estação Base	63
3.1.2	Estação Móvel	67
3.1.3	<i>Softwares</i> Utilizados	68
3.2	Métodos	70
3.2.1	Protótipo do Sistema DGPS	73
3.2.2	Sistema DGPS	99
3.2.3	Testes do Sistema DGPS	121
4	<i>RESULTADOS E DISCUSSÕES</i>	136
4.1	Protótipo do Sistema DGPS	136
4.1.1	Software para Geração da Mensagem RTCM	137
4.1.2	Testes e Avaliação do Protótipo do Sistema DGPS	140
4.2	Sistema de Comunicação	148
4.2.1	Testes e Avaliação do Sistema de Comunicação	150
4.3	Sistema DGPS	152
4.3.1	<i>Hardware</i> do Sistema DGPS	153
4.3.2	<i>Software</i> do Sistema DGPS	155
4.3.3	Testes e Avaliação do Sistema DGPS	166
5	<i>CONCLUSÕES</i>	176
6	<i>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</i>	178
	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	179

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Etapas da agricultura de precisão – adaptado de STAFFORD (1996a)</i>	6
<i>Figura 2 – Mapas de produtividade da colheita – adaptados de Sudduth (1999)</i>	11
<i>Figura 3 – Mapas de solo – adaptado de Sudduth (1999)</i>	13
<i>Figura 4 – Constelação de satélites – adaptado de Danna (1994)</i>	17
<i>Figura 5 – Funcionamento do sistema GPS – adaptado Morgan Ess (1997)</i>	21
<i>Figura 6 – Conteúdo do quadro da mensagem de navegação</i>	25
<i>Figura 7 – Cut Off Angle – adaptado de ROCHA (2000)</i>	30
<i>Figura 8 – Conceito da correção diferencial em tempo real – adaptado de MORGAN e ESS (1997)</i>	33
<i>Figura 9 – Modulação ASK (o primeiro sinal corresponde à informação, o segundo a forma de onda da portadora e o terceiro à forma de onda do sinal modulado.)</i>	57
<i>Figura 10 – Modulação FSK (o primeiro sinal corresponde à informação, o segundo a forma de onda da portadora e o terceiro à forma de onda do sinal modulado)</i>	58
<i>Figura 11 – Modulação PSK (o primeiro sinal corresponde à informação, o segundo a forma de onda da portadora e o terceiro à forma de onda do sinal modulado)</i>	59
<i>Figura 12 – Diagrama em blocos do sistema de correção e unidade móvel</i>	71
<i>Figura 13 – Diagrama de blocos com os principais componentes da estação de correção diferencial</i>	72
<i>Figura 14 – Diagrama de blocos da Unidade Móvel</i>	72
<i>Figura 15 – Diagrama interno do receptor GPS Motorola Oncore VP (modificado do manual técnico do fabricante)</i>	75
<i>Figura 16 – Plataforma computacional para o desenvolvimento do aplicativo para geração do sinal de correção diferencial</i>	76
<i>Figura 17 – Esquema de conexão dos equipamentos do protótipo</i>	77
<i>Figura 18 – Esquema do módulo receptor GPS móvel</i>	77
<i>Figura 19 – Formato do cabeçalho para todas as mensagens</i>	79
<i>Figura 20 – Mensagem tipo 1 – Correção diferencial para GPS</i>	82
<i>Figura 21 – Tela do software Tac32 utilizado para configuração do receptor de GPS</i>	86
<i>Figura 22 – Tela principal do software WinOncore 12, Motorola</i>	87
<i>Figura 23 – Tela principal do software SA Watch</i>	88
<i>Figura 24 – Formato das palavras para 3 satélites</i>	94
<i>Figura 25 – Dimensões da placa receptora GPS Motorola, modelo M12+ Oncore (extraído do manual técnico do fabricante)</i>	101
<i>Figura 26 – Aspecto da antena ativa Oncore Hawk</i>	102
<i>Figura 27 – Dimensões da antena ativa Oncore Hawk (extraído do manual técnico do fabricante)</i>	103
<i>Figura 28 – Placa de desenvolvimento do GPS Motorola M12+ Oncore</i>	104
<i>Figura 29 – Conexão das interfaces seriais com a placa processadora de correção</i>	105

<i>Figura 30 – Pinagem do microcontrolador MSP430F14 (extraído do manual técnico do fabricante).</i>	106
<i>Figura 31 – Diagrama de blocos do microcontrolador MSP430F149 (extraído do manual técnico do fabricante).</i>	106
<i>Figura 32 – Diagrama de blocos do circuito modulador e conversor de taxa</i>	111
<i>Figura 33 – Componentes externos recomendados para uma aplicação típica (extraído do manual técnico do fabricante)</i>	112
<i>Figura 34 – Pinagem do microcontrolador PIC16F876A (extraído do manual técnico do fabricante)</i>	113
<i>Figura 35 – Diagrama de blocos do circuito demodulador e conversor de taxa</i>	114
<i>Figura 36 – Rádio de comunicação GM300</i>	115
<i>Figura 37 – Equipamentos utilizados no sistema de transmissão da estação base</i>	117
<i>Figura 38 – Receptores de GPS utilizados para monitoramento das condições operacionais da estação de correção diferencial</i>	118
<i>Figura 39 – Antena utilizada para os receptores de GPS modelo III Plus</i>	119
<i>Figura 40 – Rádio de comunicação Motorola TalkAbout T5720</i>	120
<i>Figura 41 – Distribuição espacial dos pontos geo-referenciados</i>	123
<i>Figura 42 – Equipamentos portáteis de GPS utilizados nos testes</i>	124
<i>Figura 43 – Estacionamento do Ginásio Multidisciplinar da Unicamp</i>	125
<i>Figura 44 – Equipamentos instalados no interior do veículo utilizado nos testes cinemáticos</i>	126
<i>Figura 45 – No-break e baterias utilizadas no veículo</i>	127
<i>Figura 46 – Antenas do receptor de rádio e receptores de GPS e do instaladas no teto do veículo</i>	128
<i>Figura 47 – Aparelhos receptores GPS map76S</i>	129
<i>Figura 48 – Tela de visualização das mensagens</i>	139
<i>Figura 49 – Tela para a visualização e interpretação das mensagens de correção no formato proprietário Motorola</i>	139
<i>Figura 50 – Tela para a visualização e interpretação das mensagens de correção no formato RTCM SC-104</i>	140
<i>Figura 51 – Distribuição espacial dos pontos observados durante aproximadamente 24 horas consecutivas, sem correção diferencial</i>	141
<i>Figura 52 – Distribuição temporal dos desvios de posição em relação à posição média, sem correção diferencial</i>	142
<i>Figura 53 – Distribuição espacial dos pontos observados com correção diferencial fornecida pelo protótipo</i>	143
<i>Figura 54 – Distribuição temporal dos desvios de posição em relação à posição média, com correção diferencial fornecida pelo protótipo</i>	143
<i>Figura 55 – Distribuição espacial dos pontos observados durante 24 horas consecutivas, com correção diferencial fornecida estação comercial</i>	144
<i>Figura 56 – Distribuição temporal dos desvios de posição em relação à posição média, com correção diferencial fornecida pela estação comercial</i>	145
<i>Figura 57 – Distribuição espacial dos pontos coletados nos marcos, sem correção diferencial.</i>	146

<i>Figura 58 – Distribuição espacial dos pontos coletados nos marcos, com correção diferencial fornecida pelo protótipo</i>	147
<i>Figura 59 – Distribuição espacial dos pontos coletados nos marcos, com correção diferencial fornecida estação comercial</i>	148
<i>Figura 60 – Gráfico ilustrando a rota gerada pelo receptor GPS operando sem correção diferencial</i>	151
<i>Figura 61 – Gráfico ilustrando a rota gerada pelo receptor GPS operando com correção diferencial</i>	152
<i>Figura 62 – Placa do processador de correção baseado no MSP430 (silk screen)</i>	153
<i>Figura 63 – Placa do teclado do processador de correção diferencial (silk screen)</i>	154
<i>Figura 64 – Placa do teclado do processador de correção diferencial (silk screen)</i>	155
<i>Figura 65 – Tela de visualização de informações sobre o GPS base</i>	157
<i>Figura 66 – Tela para configuração do GPS base</i>	158
<i>Figura 67 – Tela para envio de comandos para o GPS base</i>	159
<i>Figura 68 – Tela para execução de funções</i>	160
<i>Figura 69 – Janela contendo os cálculos estatísticos</i>	161
<i>Figura 70 – Tela do sistema para a geração de relatórios</i>	162
<i>Figura 71 – Tela do sistema para a exibição dos gráficos</i>	162
<i>Figura 72 – Opções do menu “Principal” do sistema DGPS</i>	163
<i>Figura 73 – Opções do menu Configuração.</i>	164
<i>Figura 74 – Opções do menu Correção Diferencial</i>	165
<i>Figura 75 – Opções do menu Geo-referenciamento</i>	165
<i>Figura 76 – Gráfico comparativo do Erro Absoluto – EA para os dias de realização dos testes</i>	167
<i>Figura 77 – Gráfico comparativo do Erro Radial Médio – ERM para os dias de realização dos testes</i>	168
<i>Figura 78 – Gráfico comparativo do Erro Circular Padrão – σ_c para os dias de realização dos testes</i>	168
<i>Figura 79 – Gráfico comparativo do Erro Circular Provável – CEP para os dias de realização dos testes</i>	169
<i>Figura 80 – Gráfico comparativo da Acurácia Circular Padrão de Mapa – CMAS para os dias de realização dos testes</i>	169
<i>Figura 81 – Gráfico comparativo do índice $3,5 \sigma_c$ para os dias de realização dos testes</i>	170
<i>Figura 82 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 09/11/2004</i>	171
<i>Figura 83 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 10/11/2004</i>	171
<i>Figura 84 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 11/11/2004</i>	172
<i>Figura 85 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 12/11/2004</i>	172
<i>Figura 86 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 13/11/2004</i>	173

Figura 87 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 16/11/2004 _____ 173

Figura 88 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 17/11/2004 _____ 174

Figura 89 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 18/11/2004 _____ 174

LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 1 – Características dos códigos C/A e P</i>	24
<i>Quadro 2 – Erros que afetam a determinação das observáveis</i>	29
<i>Quadro 3 – Campos de uma sentença NMEA.</i>	49
<i>Quadro 4 – Distribuição Linear e equações para os índices lineares.</i>	54
<i>Quadro 5 – Probabilidades e cálculos dos índices de erros em função do erro circular padrão.</i>	55
<i>Quadro 6 – Configuração QAM.</i>	59
<i>Quadro 7 – Frequências de rádio.</i>	61
<i>Quadro 8 – Equipamentos do Protótipo da Estação DGPS</i>	74
<i>Quadro 9 – Equipamentos do protótipo da estação DGPS</i>	78
<i>Quadro 10 – Descrição dos campos das palavras 1 e 2</i>	79
<i>Quadro 11 – Indicador do estado da estação de referência</i>	80
<i>Quadro 12 – Conteúdos da mensagem Tipo 1</i>	83
<i>Quadro 13 – Fator de Escala</i>	84
<i>Quadro 14 – Valores de UDRE</i>	84
<i>Quadro 15 – Equações para geração dos bits de paridade</i>	85
<i>Quadro 16 – Descrição da mensagem de correção @@Ce</i>	89
<i>Quadro 17 – Mensagem de Correção gerada pelo receptor GPS VP Oncore</i>	90
<i>Quadro 18 – Exemplo de Informações dos satélites capturados para a geração da mensagem de correção no formato RTCM</i>	90
<i>Quadro 19 – Valores dos campos da mensagem RTCM</i>	96
<i>Quadro 20 – Valores em binário das palavras de 30 bits</i>	96
<i>Quadro 21 – Primeira palavra do cabeçalho da mensagem em binário</i>	96
<i>Quadro 22 – Segunda palavra do cabeçalho da mensagem em binário</i>	97
<i>Quadro 23 – Palavras de correção com os bits de paridade</i>	97
<i>Quadro 24 – Palavras de correção invertidas de acordo com o bit 30 da palavra anterior</i>	98
<i>Quadro 25 – Representação em binário dos bytes das palavras da mensagem de correção</i>	98
<i>Quadro 26 – Mensagem de correção codificada em hexadecimal</i>	99
<i>Quadro 27 – Pinagem do conector de alimentação e comunicação de dados do GPS Motorola, modelo M12+ Oncore (extraído do manual técnico do fabricante)</i>	101
<i>Quadro 28 – Protocolos de interfaceamento do GPS Motorola, modelo M12+ Oncore (extraído do manual técnico do fabricante).</i>	102
<i>Quadro 29 – Mensagens utilizadas para inicialização e configuração do receptor GPS</i>	108
<i>Quadro 30 – Pinagem do conector RJ-45 do rádio de comunicação GM300</i>	115
<i>Quadro 31 – Canais e respectivas frequências do rádio de comunicação T5720</i>	120
<i>Quadro 32 – Resumo dos resultados dos testes em laboratório</i>	145
<i>Quadro 33 – Número de satélites visíveis nos dias de realização dos testes</i>	166

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Número total de palavras e bytes das mensagens de correção em função do número de satélites capturados</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 2 – Separação dos campos da mensagem de correção</i>	<i>94</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3,5 σ – *Circular Near-Certainty Error*
3 σ –: *Three Sigma Error*
AS – *Selective Availability*
ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*, Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informação
ASK – *Amplitude Shift Keying*
CAS-1: *Controlled Acces Service 1*
CAS-2: *Controlled Acces Service 2*
CDGPS – *Canadian DGPS*
CDMA – *Code Division Multiple Access*
CEP – *Circular Error Probable*
CMAS – *Circular Map Accuracy Standard*
CPD – *Carrier Phase Differential*
CR/LF – *Carriage Return/Line Feed*
DGNSS – *Differential GNSS*
DGPS – *Differential Global Positioning System*
DPSK – *Differential Phase Shift Keying*
EGNOS – *European Geostationary Navigation Overlay Service*
FRS: *Family Radio Service*
FSK – *Frequency Shift Keying*
GIS – *Geographical Information System*
GLL – *Geographic Latitude and Longitude*
GLONASS – *Global Navigation Satellite System*
GNSS – *Global Navigation Satellite System*
GP: *Global Positioning System Receiver*
GPS – *Global Positioning System*
HOW – *Hand Over Word*
IDE – *Integrated Development Environment*
INMARTSAT – *International Maritime Satellite Organization*
IOD – *Issue of Data*
MAS – *Map Accuracy Standard*
MSAS – *The Japan Civil Aviation Bureau's MTSAT Satellite Augmentation System*
MSPE – *Mean Square Positional Error*
NAVSTAR GPS – *Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System*
NMEA – *National Marine Eletronic Association*
PE – *Probable Error*
PPS – *Precise Positioning Service*
PRC – *Pseudo Range Correction*
PRN – *Pseudo-Random Code*
PSK – *Phase Shift Keying*
PZ-90: *Parametry Zemli 1990*
QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*
QFP – *Quad Flat Pack*
RISC – *Reduced Instruction Set Computer*

RRC – *Rate Range Correction*
RTCM SC-104 – *Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee n^o 104*
RTK – *Real-Time Kinematic*
SBAS – *Satellite Based Augmentation System*
SF – *Scale Factor*
SMD – *Surface Mounted Device*
SMD – *Surface Mounting Device*
SPS – *Standard Positioning Service*
TLM – *Telemetry*
TOW – *Time of Week*
UDRE – *User Differential Range Error*
USNO – *United State Naval Observatory*
UTC – *Universal Time Coordinated*
UTM – *Universal Transverse Mercator*
VRT – *Variable Rate Technology*
WAAS – *Wide Area Augmentation Systems*
WGS84: *World Geodetic System 1984*

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento microprocessado, de custo reduzido, para geração de sinal de correção diferencial para GPS, em tempo real e configuração e supervisão do receptor GPS base.

Foi estruturado em duas etapas. Na primeira, desenvolveu-se um protótipo com o intuito de comprovar a viabilidade técnica e econômica e na segunda, o desenvolvimento do equipamento de correção diferencial capaz de atuar de forma autônoma.

O aplicativo computacional desenvolvido é responsável pela geração do sinal de correção diferencial no formato do protocolo RTCM SC-104, configuração e inicialização do receptor GPS e operações de geo-referenciamento.

O equipamento de correção diferencial possui um microcontrolador dedicado, display alfanumérico, teclado multifunção para configuração e operação do sistema e interfaces de comunicação. A placa processadora possui duas interfaces seriais padrão RS-232C. Uma delas tem a função de configuração e leitura das informações geradas pelo receptor GPS base. A outra atua somente como saída, enviando o sinal de correção diferencial.

Desenvolveu-se um sistema de modulação/demodulação e conversão de taxa, de custo reduzido, para ajustar o sinal ao meio de comunicação. Este sistema é constituído por dois módulos independentes, onde um deles está conectado ao equipamento de correção diferencial na transmissão e o outro no módulo receptor para o envio ao receptor GPS móvel. Fez-se uso de rádios de comunicação VHF/UHF para o envio do sinal de correção.

Foram realizados diversos testes ao longo do desenvolvimento de todas as etapas deste trabalho. Inicialmente, avaliou-se o aplicativo computacional responsável pela geração do sinal de correção diferencial no formato RTCM-SC 104. Nos testes subsequentes avaliaram-se o sistema de comunicação proposto, as rotinas desenvolvidas para a configuração do receptor GPS e o equipamento de correção diferencial final.

O projeto do equipamento microprocessado mostrou que é possível a construção de uma estação privada para a geração do sinal de correção diferencial, de custo reduzido, possibilitando o aumento do número de usuários no segmento agrícola, por meio da redução do custo dos sistemas de posicionamento.

PALAVRAS CHAVES: Correção Diferencial, DGPS, RTCM SC-104,
Microcontrolador.

ABSTRACT

This work presents the development of low cost microprocessor-based equipment that generates differential correction signal to GPS, in real time, and the configuration and supervision of GPS base receptor.

It was structured in two phases. In the first one, a prototype was developed aiming to prove its economical and technical viability and in the second one, the development of the equipment of differential correction able to act in an autonomous way.

The computer application developed is responsible to generate the differential correction signal in the RTCM SC-104 protocol format, the configuration and initialization of the GPS receptor and the geo-reference operations.

The equipment developed has a dedicated microcontroller, alphanumeric display, multifunctional keyboard for the configuration and operation of the system and the communication interfaces. The motherboard has two serial interfaces RS-232C standard. The first interface function is to configure and to read the information generated by the GPS base receptor. The second performs only as “gate”, to send the differential correction signal.

A low cost system of modulation/demodulation and “tax” conversion was developed, to adjust the signal and communication channel. This system has two independent modules, one module is connected to the differential correction equipment in the transmission and the second is connected to the receptor to send the signal to the mobile GPS. Radio communication UHF/VHF was used to send the correction signal.

Several tests were performed during the all the phases of the development. First, the computer application responsible to generate the differential correction signal RTCM-SC 104 standard was evaluated. Second, the proposed communication system and the configuration routines for the GPS receptor and the final differential correction equipment were tested.

The micro processed equipment project proved that is possible to build a private low cost station to generate the differential correction signal, allowing the increase the number of agriculturist business users, by reducing the cost of the positioning systems.

KEY-WORDS: Differential Correction, DGPS, RTCM SC-104, Microcontroller

1 INTRODUÇÃO

O Sistema de Posicionamento Global – GPS¹ fornece o posicionamento instantâneo e a velocidade de um ponto sobre a superfície da Terra ou próximo a ela. Foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América e, inicialmente, concebido para uso militar. A partir de meados da década de 70, seu uso foi estendido para aplicações civis, tendo passado por uma contínua evolução, tanto nos aspectos de *hardware*, quanto nos programas computacionais.

O GPS representa uma alternativa de posicionamento com aplicações nas mais variadas áreas, tendo seu uso crescido significativamente em diversas aplicações nas áreas agrícolas e florestais. No Brasil, face a sua extensão territorial e escassez de informações georeferenciadas, é grande o potencial de uso do sistema GPS.

Os receptores GPS utilizados por civis possuem uma imprecisão no posicionamento gerada por diversos fatores, entre os quais se destacam: localização dos satélites em relação uns aos outros sob a perspectiva do receptor GPS (geometria dos satélites), interferência resultante da reflexão do sinal em algum objeto, atraso na propagação dos sinais devido aos efeitos atmosféricos e alterações do relógio interno. Este erro na medição do posicionamento, dependendo do tipo da aplicação, pode interferir significativamente nos resultados esperados.

Para obtenção de uma maior precisão do sinal, utiliza-se o Sistema de Geração de Sinal de Correção Diferencial para GPS, denominado GPS Diferencial, ou simplesmente, DGPS². Esse sistema permite uma maior precisão através do processamento de correções nos sinais. A correção pode ser feita em tempo real ou pós-processada. O sinal de correção diferencial em tempo real pode ser obtido de: radiofaróis operados pela marinha, estações de rádio terrestres ou ainda, pelo uso de satélites de comunicação. Uma alternativa para a obtenção do sinal de correção diferencial é a utilização de uma estação de correção privada.

¹ GPS: *Global Positioning System*.

² DGPS: *Differential Global Positioning System*.

Para a utilização do DGPS é necessário que o receptor GPS seja compatível com tal tecnologia e que permita o recebimento do sinal de correção através do meio de transmissão escolhido. O protocolo de comunicação mais utilizado na atualidade para a transmissão de sinais de correção diferencial em tempo real para os sistemas de GPS é o RTCM SC-104³.

Com a utilização do DGPS, a precisão no posicionamento pode aumentar até valores sub-métricos, dependendo da qualidade do receptor e do sinal de correção empregados. Este fato amplia a possibilidade de uso do GPS nas mais diversas atividades. A correção diferencial em tempo real é necessária em todas as operações onde existe a necessidade de localizar instantaneamente e com precisão, um determinado objeto de interesse a partir de coordenadas geográficas.

O uso do sistema GPS diferencial na agricultura permite uma maior precisão de posicionamento para a coleta de dados. Dessa forma, é possível a obtenção de diversos tipos de mapas de variabilidade espacial e temporal de atributos da área de produção e aplicação localizada de insumos agrícolas. Pretende-se, devido ao custo reduzido do sistema de correção diferencial proposto e a sua versatilidade, ampliar significativamente o potencial de utilização de sistemas de posicionamento no meio agrícola e contribuir com o desenvolvimento da agricultura de precisão.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho partiu da constatação da limitada disponibilidade de equipamentos para a montagem de uma estação base privada para correção diferencial, em tempo real, de sinais GPS. Isso cria obstáculos de ordem técnica, geralmente na compatibilidade entre os equipamentos e na adequação às necessidades do usuário. Porém, o maior obstáculo, sem dúvida nenhuma, é o elevado custo dos equipamentos e de suas instalações o que, certamente, inviabiliza o uso de tal tecnologia para a maioria das aplicações.

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema, de custo reduzido, para fornecimento de sinal de correção diferencial para GPS, em tempo real, com sistema de transmissão em radiofrequência, possibilitando que vários aparelhos façam uso do

³ RTCM SC-104: *Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee n° 104.*

sinal de correção dentro da área de abrangência, bastando estarem equipados com receptores de rádio apropriados para a recepção do sinal de correção.

Este trabalho está integrado ao projeto de pesquisa financiado pela FAPESP para o desenvolvimento de um receptor GPS base, de custo reduzido, para a geração do sinal de correção diferencial para GPS (UMEZU e CAPPELLI, 2002).

A hipótese deste trabalho é mostrar que é possível o desenvolvimento de um sistema de correção diferencial para GPS, em tempo real, de custo reduzido se comparado aos sistemas de correção diferencial disponíveis comercialmente. Como resultados adicionais, têm-se o domínio das tecnologias empregadas, disponibilidade de um produto nacional e a possibilidade em se ter uma solução que melhore a precisão do sinal do GPS para uma gama de aplicações nas mais diversas áreas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A motivação para o desenvolvimento deste projeto partiu da constatação da necessidade de se ter a localização conhecida em diversas aplicações na área da agricultura de precisão. Desta forma, faz-se necessário o uso de um sistema de posicionamento para prover tal localização. O sistema de posicionamento mais usado e difundido atualmente é o GPS. Entretanto, este sistema pode prover uma imprecisão no sinal de posicionamento podendo inviabilizar algumas destas aplicações que necessitem de uma maior precisão.

A revisão bibliográfica abordará os seguintes tópicos: Agricultura de Precisão, sistema GPS, sistema DGPS e os meios de comunicação necessários para o desenvolvimento e validação de uma estação DGPS.

2.1 *Agricultura de Precisão*

Segundo FRAISSE e FAORO (1998), antes da revolução industrial e do processo de mecanização da agricultura, os agricultores já eram capazes de reconhecer a variabilidade espacial de certas características físico-químicas e biológicas das áreas cultivadas. A própria divisão destas áreas em campos reflete o conhecimento desta variabilidade. Até então, o uso do trabalho braçal e/ou da tração animal permitia aos agricultores tratar áreas com menor ou maior fertilidade ou infestação por pragas e doenças de forma diferenciada.

Na agricultura hoje praticada, a busca pelo aumento da capacidade de trabalho do homem e da produtividade da lavoura levou à mecanização em larga escala. A solução adotada, atualmente, é focar em grandes áreas produtivas e considerá-las como homogêneas, levando ao conceito da necessidade média para a aplicação de insumos, como: água, fertilizantes, defensivos, etc., e faz com que, por exemplo, a mesma formulação e/ou dosagem seja utilizada para toda área. Assim, atende-se apenas pelas médias, não considerando as necessidades específicas de cada parte do campo. O mesmo acontece com os demais insumos, tendo como consequência, excessos nas regiões onde os mesmos são menos necessários e falta nas regiões onde há uma maior necessidade. O resultado final é uma lavoura com produtividade não uniforme e custo de produção onerado, além da possibilidade de danos ambientais significativos, como, por exemplo, a contaminação dos recursos hídricos existentes.

A agricultura de precisão vem com a promessa de reverter a situação atual, possibilitando a aplicação de insumos agrícolas localizados e somente na quantidade necessária. Esta nova tecnologia faz uso intenso do sistema GPS, permitindo a coleta automática de dados geo-referenciados.

Colhedoras, equipadas com antena GPS e sensores de produtividade, são usadas para o mapeamento da colheita o que possibilita, num segundo estágio, determinar quais as áreas que tiveram maior ou menor produtividade.

A coleta de amostras de solo em pontos geo-referenciados permite a geração de mapas de diversas variáveis importantes para o processo produtivo, como a quantidade de nutrientes, água e pH do solo, entre outros. Os Sistemas de Informações Geográficas – GIS⁴ são utilizados para o armazenamento, tratamento, análise e visualização das informações coletadas no campo. A análise dos dados permite otimizar o uso de insumos agrícolas e criar mapas de aplicação localizada de insumos que levam em consideração a variabilidade espacial encontrada no campo. Estes, por sua vez, são armazenados em sistemas processados instalados em máquinas agrícolas equipadas com antenas GPS que permitem variar a taxa de aplicação de insumos. Desta maneira, pode-se aplicar a quantidade correta de insumos em toda a extensão do campo.

Segundo MORAES (2001), no Instituto Agrônomo de Campinas – IAC, a aplicação da tecnologia GPS iniciou-se em trabalhos de planejamento agro ambiental de microbacias hidrográficas, onde este sistema é utilizado como ferramenta auxiliar na elaboração de mapas de solo e uso da terra. Mais recentemente, com o surgimento da agricultura de precisão, o GPS passou a ter grande emprego no posicionamento de várias operações agrícolas, desde colheitas até a aplicação localizada de insumos.

A agricultura de precisão permite ainda construir bancos de dados espaciais e temporais que são importantes no desenvolvimento de técnicas de uso racional do solo, com conseqüente redução de custos e impactos ambientais. Segundo alguns autores, para a implementação de um programa de agricultura de precisão, três etapas devem ser cumpridas:

- Coleta de dados com o objetivo de mapear a variabilidade espacial e temporal do campo;
- Análise dos dados e tomada de decisões;
- Aplicação localizada de insumos agrícolas.

A Figura 1 ilustra as etapas necessárias para realizar as atividades de agricultura de precisão.

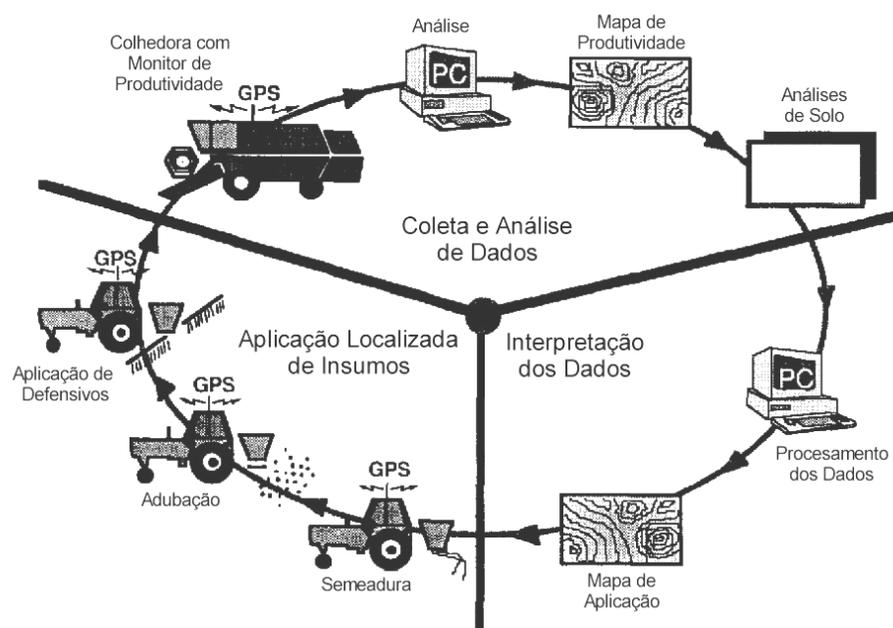


Figura 1 – Etapas da agricultura de precisão – adaptado de STAFFORD (1996a)

As etapas da agricultura de precisão constituem-se de um ciclo que é repetido a cada safra. Uma cuidadosa avaliação dos resultados deve ser realizada em cada uma das etapas, reavaliando a estratégia utilizada e permitindo um refinamento de todo o processo.

O fenômeno da globalização da economia tem obrigado os diversos setores produtivos nacionais a buscar tecnologia de ponta para poderem enfrentar os seus grandes concorrentes no mercado internacional. A agricultura brasileira não foge à regra, e somente

⁴ GIS: *Geographical Information System*.

poderá enfrentar concorrentes como Estados Unidos, Inglaterra, França, Canadá, Austrália e outros, se dispuser de tecnologias avançadas que possibilitem aos seus produtos, serem competitivos em preço e qualidade.

Segundo FRAISSE e FAORO (1998) a agricultura de precisão é uma tecnologia de informação que possibilita o gerenciamento da atividade agrícola, levando em consideração a variabilidade espacial e temporal das condições do solo e da cultura, permitindo a otimização da utilização do uso dos insumos agrícolas. Os autores ressaltam ainda que a tecnologia da agricultura de precisão traz a promessa de aumento da produtividade e redução do impacto ambiental, fato esse que atrairia a atenção de todos, pois conciliaria objetivos antes considerados antagônicos, já que o aumento da produtividade sempre esteve associado ao uso intensivo de insumos e conseqüente aumento do risco ambiental.

A agricultura de precisão enfoca a variabilidade espacial e temporal dos requisitos de aplicação de insumos durante todo o processo produtivo, em oposição à agricultura tradicional. Para o sucesso de tal tecnologia é necessária à utilização de tecnologias avançadas e interpretação da maior quantidade de informações possíveis sobre o processo.

Sobre esse assunto, STAFFORD et al. (1996) colocam que a maioria dos campos agrícolas tem uma variabilidade espacial inerente em fatores como tipo de solo, disponibilidade de nutrientes, condição de drenagem, declividade, entre outros. Culturas aráveis possuem esta variabilidade em diferentes níveis, mas o resultado final obtido na colheita é uma produção que varia em qualidade e quantidade ao longo do campo. Geralmente, a metodologia utilizada pelos agricultores é tratar os campos como uma área uniforme na aplicação de insumos tais como fertilizantes e agro químicos. O gerenciamento da produção é usualmente baseado no conhecimento de culturas anteriores e na sua produtividade média.

Pode-se esperar que a eficiência de um processo altamente organizado tenda a aumentar com o decorrer do tempo e à medida que mais informações sobre o mesmo sejam agregadas, pois dependem de fatores como a tecnologia empregada e a quantidade de informação para o gerenciamento de cada recurso.

SARAIVA et al. (1998) afirmam que a agricultura de precisão é uma tecnologia que necessita de uma grande quantidade de dados para a tomada de decisão. Assim sendo, há a

necessidade de uma quantidade muito maior de dados para a tomada de decisão do que na agricultura tradicional.

Os mesmos autores esclarecem que a etapa de coleta dos dados tem o objetivo de identificar a variabilidade existente em um campo da produção e dos diversos fatores de produção (principalmente parâmetros de solo, mas também presença de pragas, ervas daninhas, etc.). Os autores colocam que nesta etapa, uma extensa coleta de dados da própria produção (colheita) e dos fatores de produção deve ser feita, sempre com um nível de detalhe que evidencie a variabilidade espacial em campo. Para isso, diversos equipamentos são utilizados: coletores de dados e amostradores de solo – automáticos ou manuais, imagens de satélite, fotos aéreas, entre outros.

Quanto à etapa de análise de dados e tomada de decisões, SARAIVA et al. (1998) ponderam que é necessário processar os dados para inicialmente quantificar a variabilidade existente medida e avaliar sua relevância. Em seguida, o processamento tenta relacionar a variabilidade da produção com a dos fatores de produção, buscando relações inequívocas de causa-efeito, a partir das quais se possam propor estratégias de gerenciamento agrícola que levem em conta esse cenário de variabilidade. O procedimento, normalmente *off-line*, é baseado em programas específicos - sistemas especialistas, GIS, etc., normalmente executados em microcomputadores. O resultado final desta etapa, continuam os autores, deve constituir em mapas que quantificam as ações a serem tomadas em campo, a cada ponto, para as diversas operações do processo produtivo, em particular aquelas relacionadas à aplicação dos diversos insumos, e levando em conta o potencial de produção de cada parte do talhão. Esses mapas serão transferidos para as máquinas que irão realizar a aplicação localizada de insumos.

Para a aplicação supra-citada é necessário dispor-se de máquinas agrícolas com a capacidade de realizar a aplicação de insumos em taxa variável, de forma automática, e levando em conta a posição, descrevem SARAIVA et al. (1998). A aplicação é feita com base nos mapas elaborados numa etapa anterior, que contêm a recomendação detalhada para cada ponto do campo.

FRAISSE e FAORO (1998) afirmam que a agricultura de precisão faz uso intensivo de tecnologias que foram desenvolvidas fora do contexto tradicional de pesquisa agropecuária,

tais como sistemas de posicionamento por satélite, sistemas de informações geográficas e sensoriamento remoto.

A implementação da agricultura de precisão depende do desenvolvimento tecnológico para coletar e utilizar a grande quantidade de dados requeridos para se entender a variabilidade espacial da produtividade da lavoura e os fatores que a influenciam.

Um dos fatores mais importantes para a adoção de novas tecnologias no campo é o econômico. Porém, os benefícios econômicos da aplicação de novas tecnologias dependem do tipo de cultura, da heterogeneidade da área plantada e ainda, de outros fatores como, por exemplo, o clima. Neste sentido, a agricultura de precisão requer o uso intensivo de tecnologias de ponta, sendo necessário o estabelecimento de um programa de treinamento adequado de mão-de-obra e de disponibilidade de assistência técnica eficiente.

As pesquisas devem ser implementadas em conjunto com os produtores agrícolas, fabricantes e pesquisadores, para a determinação da cultura e as regiões que possam ser beneficiadas com a agricultura de precisão. Embora muitos autores encarem a agricultura de precisão como uma tecnologia que pode conseguir ganhos de produtividade, observa-se uma tendência crescente na valorização dos aspectos de otimização da utilização dos insumos agrícolas e com a preservação do meio ambiente.

De acordo com CAPPELLI (1997) a decisão de investir na pesquisa agropecuária nacional é, antes de mais nada, estratégica, já que, dada as características distintas do nosso processo produtivo, grande parte das tecnologias necessárias não estão disponíveis em qualquer outro lugar do mundo para que simplesmente sejam importadas e aplicadas.

2.1.1 Geração de Mapas

A partir da Figura 1 observa-se a geração de diversos mapas entre os quais podem-se destacar os mapas de produtividade e aplicação de insumos. Com o uso do sistema GPS pode-se obter um levantamento mais eficaz quando consideradas as variáveis custo e produtividade. Segundo GOMES et al. (2001), sua comparação com os métodos de levantamento convencionais permite um ganho de três vezes em tempo e redução substancial das equipes de campo.

2.1.1.1 Mapas de Produtividade

O mapa de produtividade é realizado no processo de colheita de uma determinada cultura e mostra a quantidade colhida do produto em cada ponto geo-referenciado da lavoura e tem como objetivo inicial, determinar a variabilidade espacial da produtividade. Os mapas são criados através de colhedoras equipadas com GPS e sensores para medição de fluxo de massa e teor de umidade de grãos.

Segundo BALASTREIRE et al. (1999), o mapeamento da produtividade de culturas de cereais tem sido estudado desde 1984 quando foram realizadas as primeiras tentativas de se utilizar sensores para se determinar a quantidade de grãos conduzidos ao tanque da colhedora por unidade de tempo. BALASTREIRE (1998b) relata o uso de um sistema DGPS para o mapeamento da produtividade de uma cultura de café.

Os primeiros mapas de produtividade foram para áreas com culturas comerciais de milho, soja, trigo e sorgo granífero e foram produzidos no início dos anos 90 como afirmam FRAISSE e FAORO (1998). Segundo os mesmos autores, mapas de produtividade são excelentes fontes de informação e diagnósticos das condições de produção encontradas no campo. A variabilidade encontrada no campo tem sido surpreendente, segundo os autores, e, na maioria dos casos, os índices de produtividade medidos nas áreas mais produtivas são duas vezes superiores às medidas nas menos produtivas.

Ainda segundo FRAISSE e FAORO (1998), a produtividade medida no campo, em um determinado ano, pode ser extremamente diferente da medida no ano seguinte devido às variações das condições climáticas. A quantificação desta variabilidade, tanto espacial quanto temporal, permite identificar áreas com maior potencial produtivo, nas quais se pode fazer um maior investimento em insumos buscando maximizar a produtividade.

As colhedoras devem possuir um sistema de posicionamento que permita determinar sua exata posição no campo. O sistema GPS, atualmente, é o mais empregado para o posicionamento, porém outros sistemas de posicionamento por rádio, microondas ou laser⁵

⁵ Das iniciais de *light amplification by stimulated emission of radiation*.

também podem ser usados. Um exemplo de mapas de produtividade pode ser observado na Figura 2.

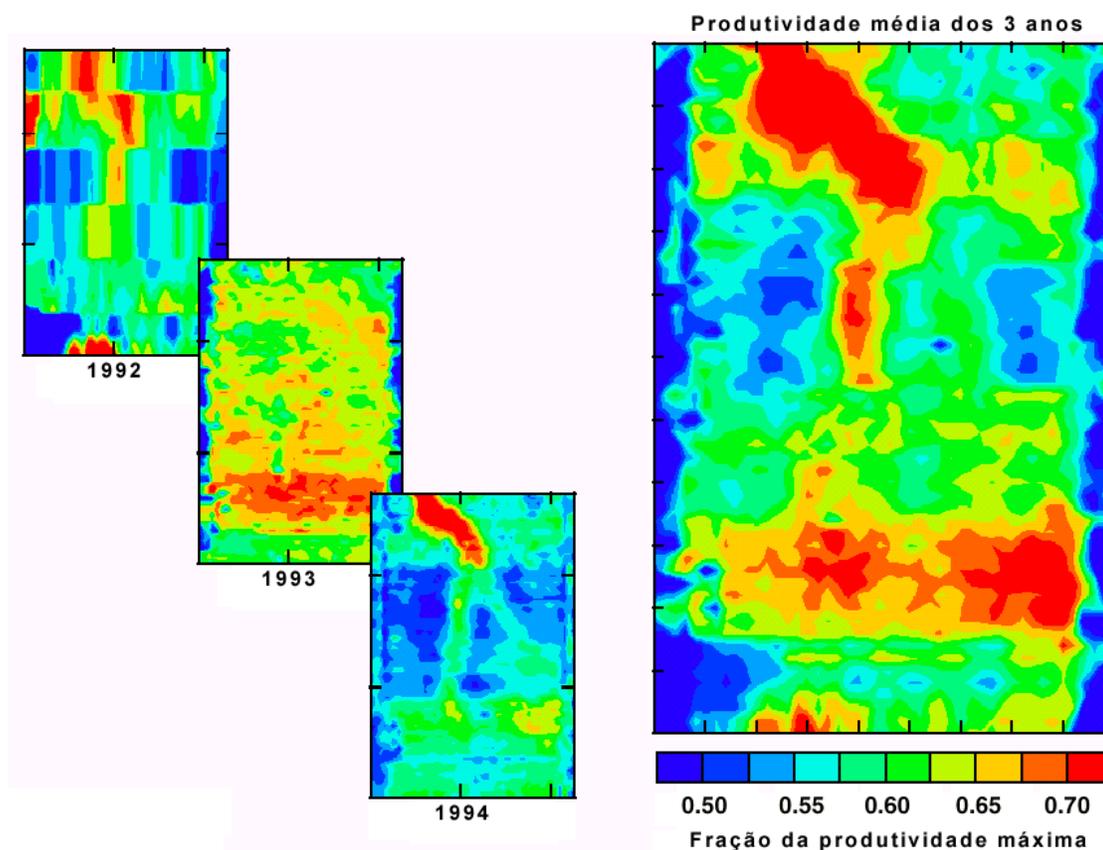


Figura 2 – Mapas de produtividade da colheita – adaptados de Sudduth (1999)

CAPPELLI (1997) comenta que o mapa de produção é apenas uma etapa de todo o processo que envolve a agricultura de precisão e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Ressalta ainda que uma parte dessa variabilidade pode ser atribuída a fatores que são constantes ou variam lentamente, enquanto outros fatores são transitórios, mudando em sua importância e distribuição espacial de uma safra para outra.

Quanto à variabilidade espacial e temporal, FRAISSE e FAORO (1998) colocam que o desenvolvimento de uma cultura depende de diversos fatores como o índice de radiação solar, concentração de oxigênio e gás carbônico, temperatura adequada e disponibilidade de água e nutrientes. A disponibilidade de água para a cultura, por exemplo, varia espacialmente

de acordo com o tipo de solo, topografia da área, presença de ervas daninhas e depende ainda de processos estocásticos como o clima.

FRAISSE e FAORO (1998) sugerem que para áreas com menor potencial produtivo, medidas corretivas visando a melhoria da produtividade, podem ou não ser tomadas, dependendo do fator a ser corrigido e da viabilidade econômica da correção. Certos fatores, geralmente chamados de primários, estão relacionados com as características físicas do terreno, como a profundidade do solo, e são de difícil correção. Outros fatores, chamados de secundários, como o nível de fertilidade ou de pH do solo, são mais facilmente corrigidos, dependendo principalmente de aspectos econômicos.

BALASTREIRE et al. (1998a) consideram o mapeamento da produtividade como uma das fases da agricultura de precisão que apresenta maior facilidade de execução devido ao número de pesquisas já realizadas nos países mais desenvolvidos, e o grande número de opções de equipamentos existentes para esta finalidade, principalmente para culturas de cereais.

2.1.1.2 Mapas de Solo

FRAISSE e FAORO (1998) afirmam que a variabilidade do solo no campo é um dos fatores mais importantes em um programa de agricultura de precisão, pois influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes e água para as culturas. Atualmente, a maneira mais comum para amostragem do solo é o estabelecimento de uma rede de pontos (*grid*) espaçados regularmente no campo. O espaçamento utilizado nas áreas experimentais varia entre 20 e 30 metros. No caso de áreas comerciais, o número de amostras coletadas cai para 1 a 2,5 amostras por hectare, devido ao custo envolvido no processo de amostragem e análise do solo.

FRAISSE e FAORO (1998) colocam que as variações encontradas no solo são devidas às variáveis taxas nas quais atuaram os processos de sua formação e devidas às diversas atuações do homem durante o seu cultivo. Certos parâmetros do solo como textura, por exemplo, são independentes das técnicas de manejo empregadas. Todavia, a variabilidade espacial e temporal dos índices de fertilidade é resultante da combinação de diversos fatores como tipo de solo, clima e técnicas de manejo empregadas. A Figura 3 apresenta exemplos de mapas de solo para concentração de fósforo e potássio e também dos níveis de pH.

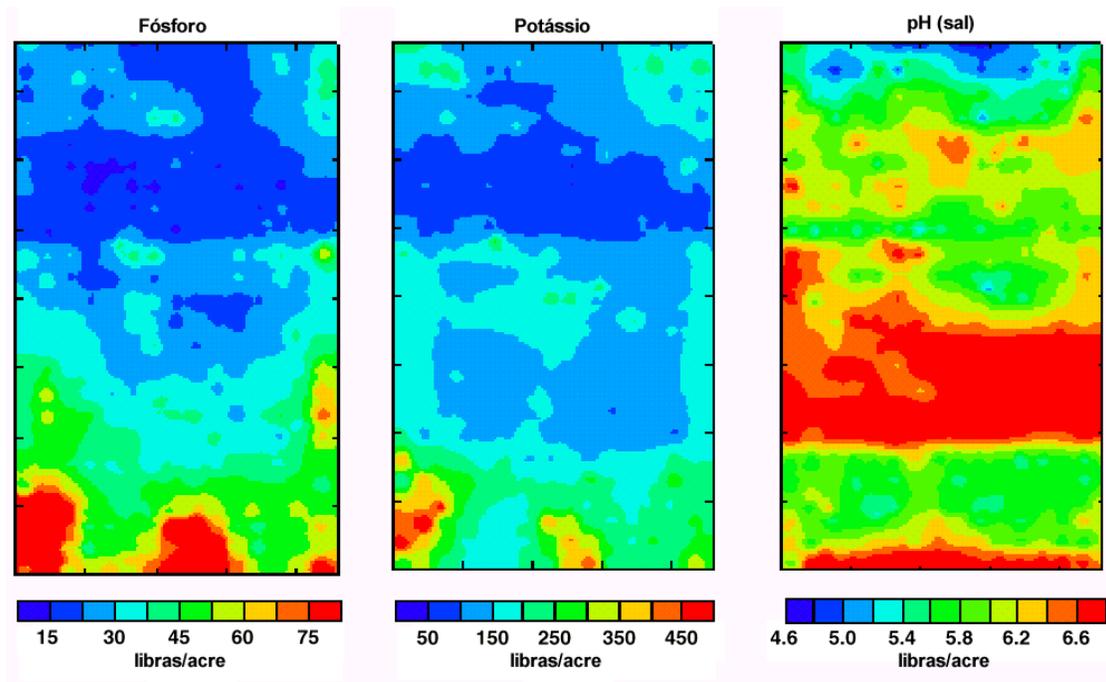


Figura 3 – Mapas de solo – adaptado de Sudduth (1999)

2.1.1.3 Mapas de Aplicação

Segundo CAPPELLI (1997), basicamente as informações espaciais e temporais georeferenciadas do meio físico, associadas a um mapa de produtividade, possibilitarão a confecção dos mapas de aplicação localizada de insumos. Os mapas deverão ser utilizados pelas máquinas de aplicação localizada. O autor prossegue afirmando que as correlações existentes entre a produtividade e as informações provenientes do meio físico em que se desenvolve a cultura precisam ainda ser bem determinadas e entendidas, possibilitando um amplo campo para a investigação científica.

MARTINS (1999) expõe que, tradicionalmente, a recomendação para a adubação tem sido realizada baseada na fertilidade do solo, obtida através de amostras e análises do solo, e na quantidade necessária de nutrientes para o desenvolvimento da cultura, considerando um determinado nível esperado da produção. Esta recomendação fundamenta-se em dados médios e não permite a correção da variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Para SUDDUTH (1999), o mapa de aplicação de insumos constitui a interface entre o processamento de dados e o equipamento para tal fim. Um equipamento para aplicação de um

único produto necessita apenas de um mapa, porém, um equipamento para a aplicação de múltiplos produtos necessita de um conjunto de mapas.

2.1.1.4 Mapas de Pragas e Doenças

Segundo FRAISSE (1998), a aplicação de agro-químicos somente nas áreas com maior índice de infestação possibilita a redução de custos e de danos ambientais. Em áreas úmidas e quentes, onde há maior susceptibilidade às doenças, os benefícios potenciais são enormes.

As ervas daninhas, geralmente ocorrem de forma concentrada em certas áreas, não uniformemente e distribuídas por toda a extensão do campo. Neste caso faz mais sentido a aplicação localizada de herbicidas, atacando-se apenas as áreas onde existe maior concentração, ao invés de usar o método tradicional de aplicação cobrindo todo o campo.

2.1.2 Aplicação Localizada de Insumos

A aplicação localizada de insumos a taxa variáveis necessita de equipamentos projetados para esta finalidade. Segundo UMEZU (2003), o desenvolvimento da Tecnologia de Aplicação Variável – VRT⁶ necessita de pesquisas tanto na área de gerenciamento de dados quanto no projeto de novos equipamentos.

De acordo com SARAIVA et al. (1998), uma característica importante que muitos dos novos equipamentos devem possuir é a capacidade de aplicar os insumos à taxa variáveis, como por exemplo: sementes, defensivos, fertilizantes, entre outros, e que vem impulsionando muitas empresas a realizar pesquisa e desenvolver produtos para atender a essa necessidade.

MONICO (2000) destaca que o GPS possibilita a localização e a orientação das máquinas em qualquer lugar do campo, como por exemplo, durante uma operação de colheita. O equipamento VRT integrado ao GPS e GIS possibilita a aplicação de insumos em local específico, com doses variáveis. Essa integração fornece informações que permitem aos

⁶ VRT: *Variable Rate Technology*.

produtores aplicar insumos, tais como fertilizantes, herbicidas e defensivos, em doses e locais apropriados, o que favorece a proteção do meio ambiente.

BALASTREIRE (1994) afirma que a precisão do sistema de posicionamento deve ser sub-métrica, para permitir que a aplicação seja feita exatamente no local e na quantidade requerida, utilizando-se assim o máximo potencial de produtividade da cultura.

Segundo FRAISSE e FAORO (1998), para o posicionamento das máquinas utilizadas na aplicação de produtos agro-químicos é desejável uma maior precisão, evitando-se a dupla aplicação ou a aplicação em locais incorretos.

Pode-se concluir que o uso do sistema GPS é componente fundamental para as mais diversas aplicações na agricultura de precisão, devido principalmente a aspectos como: custo reduzido, facilidade de uso e elevada disponibilidade do serviço. Entretanto, há de se considerar ainda que, em muitas destas aplicações, faz-se necessário uma maior precisão e que o sistema GPS operando de maneira autônoma não é capaz de prover em função dos diversos erros inerentes ao sistema e que ocasionam uma degradação na medição da posição.

2.2 Sistemas de Navegação Global por Satélite

Um Sistema Global de Posicionamento e de Navegação por Satélite – GNSS⁷ é constituído por uma constelação de satélites em órbita terrestre, que enviam continuamente informações através de ondas eletromagnéticas para receptores de usuários situados na Terra. O tratamento adequado desses dados permite a determinação da posição e da velocidade do receptor.

Os sistemas de navegação global por satélite tornaram-se disponíveis para uso civil a partir de 1995. No momento, há dois sistemas GNSS em operação: o sistema NAVSTAR GPS⁸ desenvolvido pelo EUA e o GLONASS⁹ de propriedade russa.

⁷ GNSS: *Global Navigation Satellite System*.

⁸ NAVSTAR GPS: *Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System*.

⁹ GLONASS: *Global Navigation Satellite System*.

A União Européia, dada a importância científica e tecnológica destes sistemas, associada ao fato de serem ambos sistemas militares, iniciou o desenvolvimento de um GNSS civil, denominado GALILEO. Os primeiros satélites desta nova constelação foram lançados em ainda em 2005 e o sistema estará operacional em 2008. Tem-se ainda o sistema EGNOS que faz uso dos satélites geoestacionários INMARSAT¹⁰, desenvolvido pela União Européia, que tem por objetivo complementar as informações dos sistemas GPS e GLONASS.

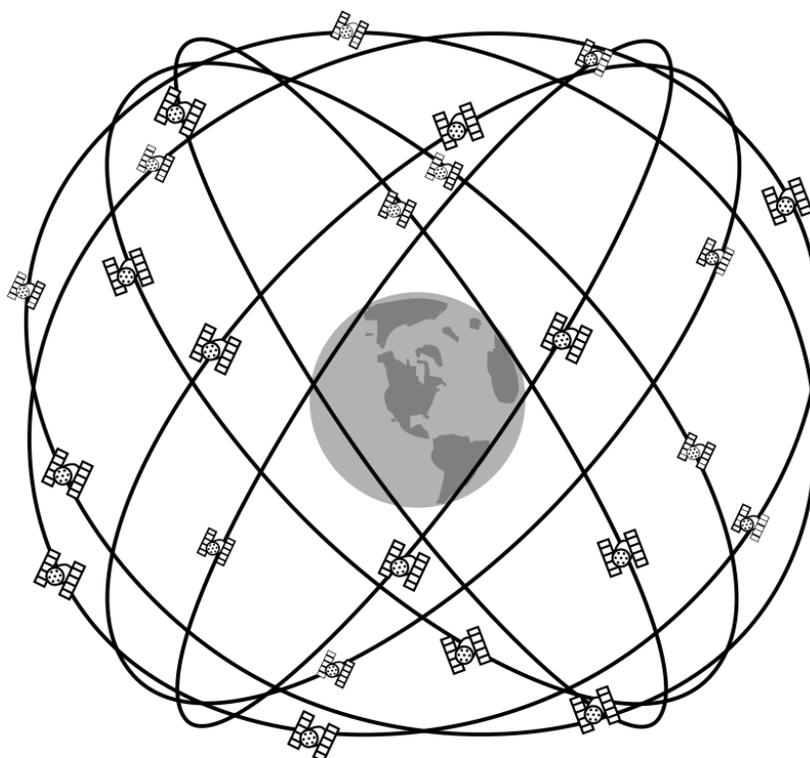
O Sistema NAVSTAR GPS ou simplesmente GPS é, na atualidade, o sistema de posicionamento global mais difundido e utilizado e, portanto, o foco deste trabalho é voltado a este sistema de navegação por satélite.

2.2.1 Sistema NAVSTAR GPS

O acrônimo GPS advém da simplificação de NAVSTAR GPS. O sistema GPS pode ser definido resumidamente como um sistema de rádio navegação por satélites, sendo constituído de três segmentos: espacial, de controle e do usuário. Segundo GOMES et al. (2001), o sistema GPS foi declarado totalmente operacional em janeiro de 1994, ocasião em que a sua constelação atingiu 24 satélites em órbita.

Segundo NETO (2005), o segmento espacial, atualmente, é formado por 29 satélites operacionais, existindo 3 de reserva, distribuídos em seis planos orbitais inclinados 55° em relação ao Equador e em órbita de aproximadamente 20.200km da Terra. Nesta distância, cada satélite realiza duas órbitas completas por dia (órbita de 12 horas). Devido à altitude dos satélites há pouca resistência atmosférica e sua órbita é muito estável. A Figura 4 ilustra a distribuição dos satélites na órbita terrestre.

¹⁰ INMARTSAT: *International Maritime Satellite Organization*.



Constelação nominal do GPS
24 satélites em 6 planos orbitais
4 satélites em cada plano

20.200 km de altitude, 55 graus de inclinação

Figura 4 – Constelação de satélites – adaptado de Danna (1994)

Esta configuração final prevê a possibilidade de observar, durante as 24 horas do dia, pelo menos 4 satélites simultaneamente, em qualquer parte da superfície terrestre. O tempo para cada satélite dar uma volta na terra é de 12 horas (duas vezes por dia). Isto garante uma leitura com precisão adequada, a qualquer hora e em qualquer ponto do planeta.

De acordo com NETO (2005) há quatro categorias de satélites. A primeira, denominada Bloco I foi composta por onze satélites que não são mais utilizados desde 1995. Os satélites do Bloco II e IIA constituem a segunda categoria e compõem a constelação atual. Os satélites da terceira categoria, Bloco IIR, vêm sendo lançados desde 1995 para reposição e manutenção do sistema. Os satélites do bloco IIF são os da quarta geração e ainda estão em fase de definição e ainda não foram lançados.

Segundo MONICO (2000) o rádio montado em cada satélite transmite sinais em duas portadoras diferentes, denominadas de Banda L (faixa de frequência de microondas, que corresponde, ao intervalo de 1.400 a 1.725MHz), geradas por um mesmo relógio atômico. Os

dois sinais, L1 e L2, funcionam cada um com uma frequência diferente. O sinal L1 é transmitido na frequência de 1.575,42MHz e transporta dois códigos: o C/A (*Coarse/Aquisition*) e o código P (*Precision*). O sinal L2, transmitido na frequência de 1.227,60MHz, transporta somente o código P, sendo disponível apenas para os militares dos Estados Unidos ou para aparelhos receptores autorizados.

Ainda de acordo com MONICO (2000) o código C/A é utilizado por civis, sendo conhecido como Serviço de Posicionamento Padrão – SPS¹¹. O serviço que faz uso do código P é denominado de Serviço de Posicionamento Preciso – PPS¹². Há algumas diferenças entre ambos os sistemas. O receptor GPS para o PPS trabalha com precisão de 22,0 metros na horizontal e 27,7 metros na vertical em 95% do tempo, enquanto que no caso do sistema SPS, receptor padrão de uso civil, tem precisão estimada em 100 metros na horizontal e 156 metros na vertical em 95% do tempo.

Segundo ROCHA (2002) os satélites enviam informações moduladas nas frequências predefinidas dos sinais L1 e L2. Estas informações contêm sua posição, horário de transmissão, os meios para o cálculo da distância satélite-receptor GPS (dados de efemérides¹³), parâmetros de correção das influências atmosféricas e o almanaque. O almanaque contém dados genéricos de localização e “saúde” de todos os satélites da constelação e pode ser obtido a partir de qualquer um dos satélites.

Os satélites são equipados com relógios atômicos que utilizam a frequência de vibração molecular de um material radioativo, normalmente o Césio, para fazer a medida do tempo. A precisão desses relógios torna possível o uso de satélites para navegação e mapeamentos. Para um funcionamento correto de todo o sistema, apenas um relógio por satélite é necessário, porém cada satélite possui mais 3 relógios atômicos de reserva.

¹¹ SPS: *Standard Positioning Service*.

¹² PPS: *Precise Positioning Service*.

O segmento de controle é constituído por cinco estações terrestres, uma principal e quatro secundárias, e tem a função de monitorar e controlar os satélites. Existem problemas como a interferência do campo gravitacional e outros fenômenos que podem afetar as órbitas dos satélites. As estações secundárias captam e processam os sinais dos satélites, enviando informações para a estação principal. Tais informações são utilizadas para calcular as órbitas exatas dos satélites, ajustar os parâmetros do relógio e atualizar os sinais de navegação emitidos pelos mesmos. Os resultados são então transmitidos, periodicamente, pela estação principal, a cada um dos satélites para efetuar as devidas correções. As principais tarefas do segmento de controle são:

- Monitorar e controlar o sistema de satélites;
- Determinar o sistema de tempo do GPS;
- Predizer as efemérides dos satélites;
- Calcular as correções dos satélites e;
- Atualizar as mensagens de navegação dos satélites.

O segmento do usuário, constituído pelos receptores GPS, pode ser dividido em civil e militar. Os receptores podem ser instalados em veículos ou utilizados por pessoas para a obtenção da posição dos mesmos. Os dados obtidos podem ser armazenados no próprio receptor ou, em alguns casos, em coletores de dados eletrônicos a ele acoplados.

De acordo com MONICO (2000), o princípio básico de funcionamento da tecnologia do GPS está na trilateração¹⁴, utilizando os satélites como pontos de referência (Figura 5). Coordenadas exatas podem ser calculadas em qualquer posição na Terra medindo a distância a partir de um grupo de satélites a esta posição. Os satélites são usados como pontos de referência exatos, onde a localização é conhecida. Supondo que a distância a partir de um

¹³ Trata-se de uma parte dos dados de navegação transmitida por cada satélite contendo informação da órbita precisa e correção de horário para o satélite em questão. A efeméride é utilizada pelo receptor para calcular as coordenadas de posição precisas dos satélites utilizados para a obtenção da distância.

¹⁴ A trilateração é um processo de levantamento semelhante à triangulação, sendo que em lugar da formação dos triângulos a partir da medição dos ângulos, o levantamento será efetuado através da medição dos lados.

satélite seja conhecida, a posição pode ser restringida à superfície de uma esfera que circunda aquele satélite. Se a distância a partir de um segundo satélite também é conhecida, limita a posição à interseção de duas esferas. Adicionando um terceiro satélite a posição limita-se para um dos dois pontos. Desconsidera-se um desses pontos porque é uma resposta pouco provável; esta posição está no espaço ou movimentando-se em alta velocidade. Sabendo-se a distância entre a posição e os três satélites, as coordenadas podem ser calculadas.

Conforme ROCHA (2002), o GPS determina a posição medindo a distância entre o aparelho receptor e os satélites no espaço. Cada satélite emite, de forma contínua, informações de sua posição e um sinal de tempo para sincronismo. O receptor determina o tempo que o sinal leva para percorrer a distância entre o satélite e o receptor. Conhecendo as coordenadas do satélite num sistema de referência adequado, pode-se determinar as coordenadas do usuário. Pelo ponto de vista puramente geométrico (distância tridimensional) bastariam apenas três satélites (equivalendo ao cálculo de três distâncias). Na prática, a diferença entre os relógios do satélite e do receptor não é conhecida, o que introduz mais uma incógnita no problema e que pode ser determinada a partir de um quarto satélite. Portanto, os dados referentes à observação deste quarto satélite fazem-se necessários para sincronizar o relógio do receptor com os relógios dos satélites. O acesso ao sistema se dá de forma ininterrupta, em todo o planeta, independentemente das condições meteorológicas, embora estas interfiram de certa forma na precisão das medidas. O aparelho de GPS fornece informações de latitude, longitude e altitude (localização tridimensional) usando sinais de quatro satélites.

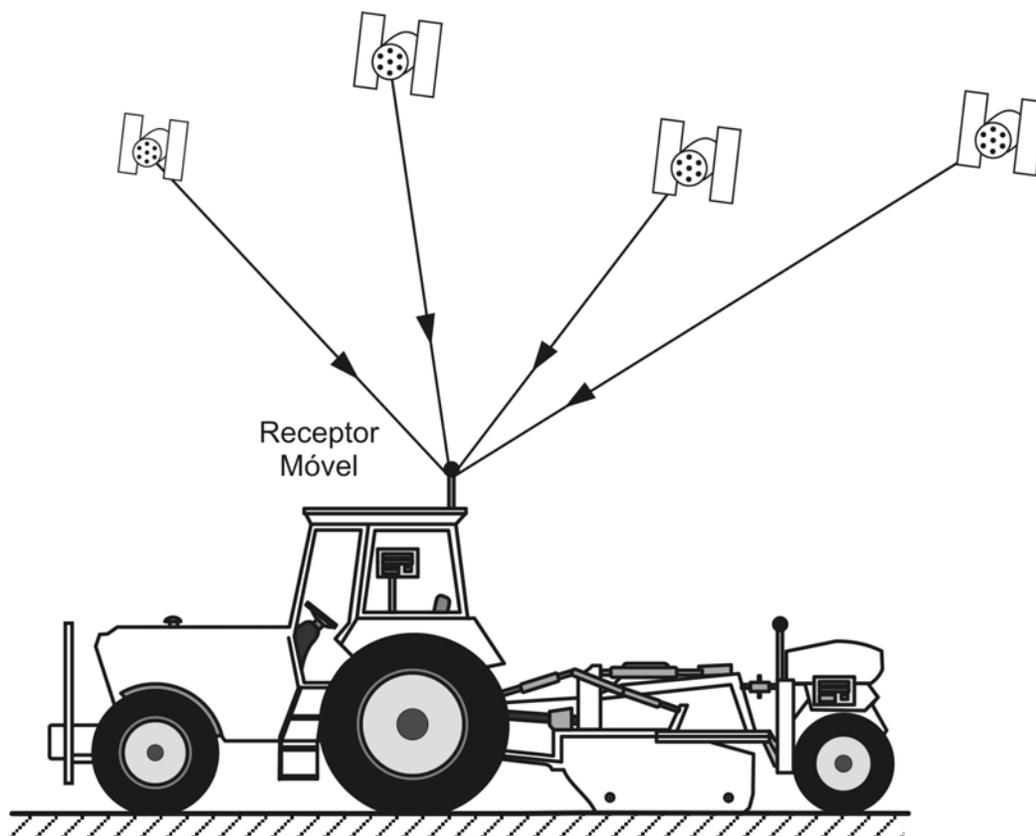


Figura 5 – Funcionamento do sistema GPS – adaptado Morgan Ess (1997)

A determinação da distância e da posição do satélite é calculada com base nos dados contidos no almanaque armazenado no receptor GPS. Uma vez calculada a posição, o receptor GPS terá de 5 a 12 satélites em vista. O receptor, continuamente, seleciona os melhores satélites para o cálculo das posições, geralmente a uma taxa de uma nova posição por segundo. Para determinação de posição bidimensional (Navegação 2D: latitude e longitude) são necessários pelo menos três satélites com boa geometria, ao passo que, para determinação de posições tridimensionais (Navegação 3D) são necessários quatro ou mais satélites.

Ainda, segundo ROCHA (2002), testes realizados com receptores de navegação civis evidenciaram uma precisão prática na ordem de 15 a 40 metros, o que obrigou os militares americanos a imporem um distúrbio proposital no relógio do satélite, de tal forma que os

receptores não autorizados determinassem posições com precisão em torno de 100 metros. Este distúrbio imposto aos usuários não autorizados é denominado Disponibilidade Seletiva – SA¹⁵. Trata-se de uma degradação proposital no serviço SPS, imposto pelo Departamento de Defesa dos EUA – DoD, para limitar a precisão do GPS para algo em torno de 100 metros na horizontal, 156 metros na vertical e 340ns no tempo. Este distúrbio foi eliminado em maio de 2000. Atualmente, este sinal de interferência se encontra desativado pelo governo norte-americano, fato que reduziu a imprecisão para até 15 metros no posicionamento horizontal. Usuários PPS e o sistema GLONASS não são afetados por este erro. Conforme tratado anteriormente, este fator de erro está desabilitado atualmente.

MONICO (2000) afirma que um receptor GPS determina o tempo de chegada de um determinado sinal de satélite, sincronizando um sinal interno gerado pelo próprio receptor GPS, que tem o mesmo código do sinal deste satélite. Esta técnica é conhecida como *code-tracking*. O conhecimento da posição do satélite é obtido a partir dos dados transmitidos. A posição do satélite em conjunto com as medidas de tempo de chegada dos sinais de 4 ou mais satélites, possibilita ao usuário estimar sua posição e tempo.

Também é possível obter as distâncias através da fase da onda portadora. Técnicas de processamento avançadas utilizam medidas a partir da fase da portadora para obter estimativas de posições mais precisas.

De acordo como a recomendação RTCM SC-104 (1998), cada satélite transmite suas informações na mesma frequência e emprega um único código. Os sinais são do tipo *spread spectrum*¹⁶, utilizando codificação bifásica. A taxa de transmissão de dados pelos satélites é de 50bps. A mensagem de dados fornece: o estado de saúde dos satélites, informações de efemérides (orbital), correção do relógio do satélite, coeficientes de correção ionosférica, entre outros.

¹⁵ SA: *Selective Availability*.

¹⁶ *Spread Spectrum* é uma técnica de codificação para a transmissão digital de sinais. Consiste em realizar um espalhamento no espectro de frequências do sinal de informação, ocupando uma banda maior que a informação original. Possui baixa densidade de potência e, portanto, apresenta uma baixa relação sinal/ruído.

2.2.1.1 Códigos dos Satélites

Cada satélite transmite dois códigos denominados P e C/A, sendo o receptor GPS capaz de identificá-los por meio destes códigos, que são únicos para cada satélite. O código P é mais complexo que o C/A, sendo quase impossível de ser decodificado. Somente os militares americanos e usuários autorizados possuem acesso a este código. Os satélites são identificados pelos códigos por eles transmitidos conhecidos como PRN¹⁷. Um PRN é uma seqüência binária gerada por um algoritmo, com característica aleatória e univocamente identificado.

Segundo JUNQUEIRA (2003), o código PRN permite que todos os satélites do sistema GPS compartilhem a mesma freqüência sem interferências. Para cada satélite é atribuído um determinado PRN que é modulado nas portadoras L1 e L2. Todos os satélites transmitem na mesma freqüência, mas podem ser identificados pelo código exclusivo de cada satélite. Trata-se da técnica denominada CDMA¹⁸, válida tanto para o código C/A quanto para o código P. Estes códigos são modulados em fase sobre as duas portadoras L1 e L2. Esta técnica possibilita a obtenção das medidas de distâncias a partir da medida do tempo de propagação do sinal modulado.

O código C/A é transmitido a uma taxa de 1,023 Mbits/s e gerado a partir do produto de duas seqüências pseudo-aleatórias denominadas G1 e G2, cada uma com 1023 bits. O código C/A resultante, também consistirá de 1023 bits, com período de 1ms. Cada satélite transmite um código C/A diferente, dentre os 37 definidos em ICD-GPS-200C (1993).

MONICO (2000) ressalta que o código C/A faz parte de uma família de códigos, denominada *Gold Codes*, que tem como característica básica, a baixa correlação entre seus membros, permitindo a rápida identificação dos sinais recebidos, simultaneamente, de vários satélites. Este código é modulado somente sobre a portadora L1, sendo utilizado por usuários civis para a obtenção de medidas que permitam alcançar a precisão estabelecida no SPS. Este código não é criptografado, embora possa ter sua precisão degradada.

¹⁷ PRN: *Pseudo-Random Code*.

¹⁸ CDMA: *Code Division Multiple Access*.

O código P, reservado para uso dos militares americanos e usuários autorizados, é transmitido a uma frequência de 10,23MHz. As medidas resultantes do código P são mais precisas. O código P ainda pode ser criptografado, passando a ser denominado de código Y.

Segundo MONICO (2000) o código P é gerado a partir do produto de dois códigos pseudo-aleatórios denominados X1 e X2, que por sua vez, são gerados a partir do produto de dois outros códigos. A combinação destes códigos produz uma série de 37 seqüências, mutuamente exclusivas, onde cada seqüência possui duração de sete dias. Há 37 PRNs para o código P que é modulado em ambas as portadores L1 e L2.

Algumas das seqüências dos códigos P e C/A são reservadas para outras aplicações como, por exemplo, transmissores terrestres (*pseudolites* – pseudo-satélites). Trata-se dos PRNs 33 a 37. As características resumidas dos códigos C/A e P utilizados no sistema GPS são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Características dos códigos C/A e P

Características	C/A	P
Período	1ms	7 dias
Taxa de Transmissão (Hz)	1,023 MHz	10,23 MHz
Portadoras	L1	L1 e L2

2.2.1.2 Mensagem de Navegação

As mensagens de navegação fornecem as informações básicas para o cálculo das posições dos satélites. Nelas estão contidas as seguintes informações: parâmetros orbitais, dados para correção da propagação atmosférica, parâmetros para correção do erro dos relógios dos satélites, saúde dos satélites, entre outras.

Os dados da mensagem de navegação do sistema GPS têm duração de 30s e são modulados em ambas as portadoras na razão de 50bps. As informações contidas em uma mensagem totalizam 1500bits (30s x 50bps) e são denominadas de quadro de dados (*data frame*). Cada quadro é dividido em 5 subquadros de mesmo tamanho e duração, ou seja, 300 bits e 6 segundos. Cada subquadro é constituído por 10 palavras de 30 bits. Todos os subquadros contêm bits de paridade que permitem a validação dos dados e correção de possíveis erros durante a transmissão.

A Figura 6 apresenta o formato da mensagem de navegação. Cada subquadro é constituído, inicialmente, pelas palavras de telemetria – TLM¹⁹ e de transmissão – HOW²⁰. De acordo com MONICO (2000), quando as mensagens estão sendo enviadas para os satélites ou outra operação estiver ocorrendo, a palavra TLM é alterada. A palavra HOW é utilizada para determinar o parâmetro TOW²¹ do próximo subquadro e a transição do código C/A para o P.

Pode-se resumir as informações dos subquadros de uma mensagem de navegação da seguinte forma:

- O primeiro subquadro contém dados para correção de relógio;
- O segundo e terceiro subquadro contêm os parâmetros da órbita do satélite e;
- O quarto e o quinto transportam diversos dados de telemetria.

Subquadro 1	TLM	HOW	Coeficientes para a correção do relógio do satélite, Número da semana GPS e saúde do GPS, Idades dos Dados.
Subquadro 2	TLM	HOW	Parâmetros orbitais
Subquadro 3	TLM	HOW	Parâmetros orbitais (continuação)
Subquadro 4	TLM	HOW	Almanaque e configuração dos satélites 25 a 32, dados da ionosfera e diferença de tempo GPS-UTC, informação do AS e mensagens especiais.
Subquadro 5	TLM	HOW	Almanaque dos satélites 1 a 24 Saúde dos satélites

Figura 6 – Conteúdo do quadro da mensagem de navegação

Os dados dos subquadros 1 a 3 se repetem nos quadros seguintes até que os dados sejam renovados. Já os subquadros 4 e 5, cada um com 25 páginas, contêm dados diferentes em cada quadro, haja visto que cada quadro conterà uma de suas páginas. Como cada

¹⁹ TLM: *Telemetry*.

²⁰ HOW: *Hand Over Word*.

²¹ TOW: *Time of Week*. Este parâmetro é um contado que indica o número de segundos da semana.

subquadro tem duração de 30 segundos, a obtenção completa do conteúdo dos subquadros 4 e 5 durará 12,5 minutos²². O almanaque dos satélites, contidos nos subquadros 4 e 5, fornece as informações necessárias para o cálculo das posições aproximadas dos satélites, mesmo daqueles que não estão sendo rastreados.

De acordo com MONICO (2000), como a duração de 1bit da mensagem de navegação é de 20ms, pode-se obter que, durante este intervalo de tempo, o código C/A se repete 20 vezes (duração de 1ms) e o número de ocorrência de ciclos da portadora²³ L1 é de 315.084.000. Uma análise detalhada da mensagem de navegação é tratada em HOFMANN-WELLENHOF et al. (1997).

Pode-se concluir que há três tipos de sinais envolvidos no GPS: as portadoras (L1 e L2), os códigos (C/A e P ou Y) e as mensagens de navegação. Essa estrutura permite medir a fase da portadora, a sua variação e também, o tempo de propagação da modulação.

2.2.1.3 Observáveis do GPS

Há duas observáveis básicas do GPS que possibilitam a determinação da posição, velocidade e tempo: pseudodistância a partir do código PRN e fase da onda portadora.

A determinação da distância entre um satélite e a antena do receptor GPS é realizada a partir do código gerado tanto no satélite quanto no receptor. Neste último, é gerada uma réplica do código produzido no satélite. O lapso entre a chegada do código gerado no satélite, e a cópia gerada no receptor, nada mais é que o tempo de propagação do sinal no trajeto entre o satélite e o receptor. A distância é obtida multiplicando este tempo de propagação do sinal pela velocidade da luz. Essa observável, na literatura GPS, é denominada pseudodistância, devido ao não sincronismo entre os relógios responsáveis pela geração do código no satélite e sua réplica no receptor. O erro de sincronismo é determinado no receptor, em conjunto com a posição da antena, a partir das medidas das pseudodistâncias.

22 A duração máxima para a transmissão dos subquadros 4 e 5 é obtida multiplicando a duração de cada subquadro pelo número de páginas (30s × 25 páginas = 750s).

23 O número de ciclos da portadora L1 é obtido multiplicando a frequência da mesma, que é de 1,575MHz por 20.

Pode-se concluir que a pseudodistância é igual à diferença entre o tempo registrado no receptor no instante da recepção do sinal e o tempo registrado no satélite no instante de transmissão do sinal, multiplicado pela velocidade da luz no vácuo. A pseudodistância pode ser obtida via correlação com o código P sobre as portadoras L1 e L2 e/ou com o código C/A, sobre a portadora L1.

Após a obtenção da pseudodistância, o código é separado da portadora (processo de demodulação). O sinal recebido pelo satélite ainda contém a mensagem de navegação, o qual deve ser novamente demodulado para a obtenção da onda portadora, para a medida de fase da onda portadora.

A medição da fase de onda da portadora é mais precisa do que a pseudodistância. A fase de onda da portadora é igual à diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor, e a fase do sinal gerado no receptor, ambas no instante de recepção. Os receptores GPS efetuam a contagem do número de ciclos, resultando em uma medida contínua.

2.2.1.4 Sistema de Tempo GPS

Os satélites fazem uso de relógios atômicos que são controlados por estações terrestres. Este sistema comanda o Tempo GPS, que é sincronizado com o Tempo Universal Coordenado – UTC²⁴. As relações entre o Tempo GPS, UTC e o padrão de frequência dos relógios atômicos dos satélites são transmitidas pelos mesmos na sua mensagem de navegação. SANTOS (1999) comenta que a medição do código C/A possibilita uma primeira sincronização do relógio do receptor, que se completa com o uso das demais informações transmitidas na mensagem de navegação.

Segundo NETO (2005) o parâmetro Tempo GPS é a base de tempo comum a todo o sistema GPS, também conhecido por Tempo Global GPS. Os relógios atômicos, contidos nos satélites, acumulam diferenças de medições entre eles com o decorrer do tempo, pois funcionam independentes entre si. O tempo GPS é calculado a partir dos diversos relógios atômicos dos satélites e das estações de controle e de monitoramento. O desvio do relógio de

²⁴ UTC: *Universal Time Coordinated*.

cada satélite em relação ao tempo Global é transmitido aos receptores GPS na forma de uma correção no relógio do satélite que é utilizada na determinação da posição do receptor.

De acordo com MONICO (2000), o GPS mede, essencialmente, o intervalo de tempo da propagação do sinal. Dessa forma, é de fundamental importância a determinação acurada do tempo. O tempo GPS é dado pelo número da semana e pelo número de segundos desde o início da semana. O número de semanas GPS de cada ciclo varia de 0 a 1023, correspondendo a aproximadamente 20 anos. O contador TOW varia de 0, no início da semana, isto é, meia-noite de sábado para domingo, até 604800 correspondente ao fim da semana (86400×7). A combinação do TOW e do número da semana GPS forma o contador Z. Este é composto por 29 bits, dos quais 19 são reservados para representar o TOW e 10 para o número da semana GPS. O número máximo de semanas possível de ser representado, neste caso, é de $2^{10} - 1 = 1023$. Dessa forma, quando encerrar a semana de número 1023, a contagem é reiniciada. O primeiro ciclo foi encerrado em 21 de agosto de 1999.

2.2.1.5 Erros do Sistema

Algumas fontes de erros no GPS são difíceis de eliminar. Os cálculos pressupõem que os sinais GPS são emitidos a uma velocidade constante correspondente a velocidade da luz. Entretanto, a velocidade da luz só é constante no vácuo e, ao passar pelas camadas ionosfera e troposfera, a velocidade do sinal enviado pelos satélites do sistema GPS é reduzida, resultando em cálculos incorretos da distância.

GOMES et al. (2001) afirmam que a velocidade do sinal gerado no satélite é afetada ao atravessar as diversas camadas da atmosfera ocasionando erros que contaminam o resultado das coordenadas obtidas pelo receptor. Além disso, há uma incerteza da ordem de alguns metros na posição dos satélites em cada uma das órbitas, bem como a imprecisão no relógio do receptor. Tais fatores implicam em erros na obtenção das coordenadas pelo receptor GPS.

De acordo com MONICO (2000), as observáveis GPS estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para a obtenção de resultados confiáveis, as fontes de erros devem ser bem conhecidas. Erros sistemáticos podem ser parametrizados ou eliminados por técnicas apropriadas de observação. Erros aleatórios não apresentam nenhuma relação funcional com as medidas e, normalmente, são as discrepâncias remanescentes nas

observações, depois que todos os erros grosseiros e sistemáticos foram eliminados ou minimizados. Os erros aleatórios são inevitáveis sendo considerados uma propriedade inerente da observação. Os diversos erros são apresentados no Quadro 2. Observa-se que as fontes consideradas são: os satélites, a propagação do sinal, o receptor/antena e a própria estação de controle. No que se refere à estação, os efeitos das marés terrestres, das cargas dos oceanos e da pressão da atmosfera, não se tratam especificamente de erros, mas de variações que devem ser consideradas para o caso de posicionamento de alta precisão.

O atraso do sinal causado pela sua reflexão é chamado de multicaminhamento (*multipath*). Esse atraso é função da geometria de configuração dos satélites observados, que por sua vez se modifica com o tempo. Para minimizar esse problema, a região situada próximo à estação deve estar livre de estruturas artificiais como paredes e cercas metálicas. Para posicionamentos estáticos, quanto maior o período de observação, maior a probabilidade de redução dos efeitos do multicaminhamento. Devem-se evitar também locais próximos a estações de transmissão de microondas, radares, antenas rádio-repetidoras e linhas de transmissão de alta voltagem, por representarem fontes de interferência para os sinais GPS.

Quadro 2 – Erros que afetam a determinação das observáveis

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

Em sua descrição do sistema GPS, o IBGE (1994) relata a necessidade de intervisibilidade entre a estação e o satélite. Uma vez que os sinais transmitidos podem ser absorvidos, refletidos ou refratados por objetos próximos à antena ou entre a antena e o satélite, recomenda-se que o horizonte em torno da antena esteja desobstruído acima de 15 graus.

Conforme ROCHA (2002) a diluição da precisão – DOP quantifica a influência da geometria da constelação na precisão das coordenadas obtidas instantaneamente. Esta informação foi uma das primeiras a estar disponível nos receptores GPS. Este fator também é conhecido como coeficiente de rigidez. O DOP é uma grandeza adimensional, cujo objetivo é a contínua avaliação da melhor ou pior distribuição de satélites acima do horizonte, usado para indicar um momento adequado para se obter uma posição. Através de cálculos matemáticos são obtidos os valores no intervalo entre 1 e 10; sendo 1 para o melhor valor do DOP e 10 para o pior. Portanto, baixos valores indicam uma melhor distribuição dos satélites, enquanto que, altos valores para o DOP indicam uma má distribuição.

Segundo SILVA (1999), a disposição geométrica é um fator considerado de extrema importância. O fator DOP é dividido em HDOP – efeito da geometria dos satélites nas coordenadas planimétricas; VDOP – efeito da geometria dos satélites na definição da altitude; PDOP – efeito da geometria dos satélites para a posição tridimensional; TDOP – efeito da geometria dos satélites na definição do tempo e GDOP – efeito da geometria dos satélites a definição da posição e do tempo.

Segundo SILVEIRA (2004) deve-se considerar o parâmetro *Cut off Angle* que corresponde ao ângulo de posicionamento dos satélites em relação ao horizonte. De acordo com vários autores e construtores de GPS, este ângulo é considerado ideal de 15° acima do horizonte, como indicado na Figura 7.

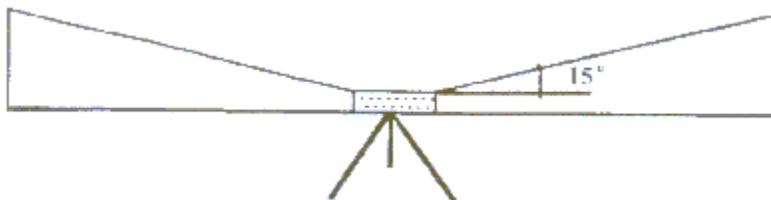


Figura 7 – *Cut Off Angle* – adaptado de ROCHA (2000)

2.2.2 Sistema GLONASS

Segundo LECHNER e BAUMANN (2000), o sistema GLONASS foi desenvolvido pela Rússia, sendo muito semelhante ao sistema GPS em termos de constelação, órbitas e estrutura do sinal. Assim como o GPS, o GLONASS também é controlado e de uso dos militares. Os sinais são transmitidos em duas frequências: 1,2 e 1,6GHz. Possui 24 satélites distribuídos em três planos orbitais. Todos os satélites do sistema GLONASS transmitem um código similar, mas em frequências diferentes.

O GLONASS, assim com o GPS, oferece dois níveis de serviços. O Canal de Precisão Padrão (CSA), disponível para os usuários civis, oferece uma precisão na posição horizontal de 60 metros com 99,7% de probabilidade e uma precisão na posição vertical de 75m com a mesma probabilidade. O canal de alta precisão (CHA) está disponível somente para usuários autorizados.

LECHNER e BAUMANN (2000) ressaltam que a constelação GLONASS completa com 24 satélites entrou em operação no mês de janeiro de 1996 e que em julho de 1999, a constelação do sistema GLONASS consistia de 15 satélites em operação.

Uma das diferenças básicas entre os sistemas GPS e GLONASS diz respeito aos sistemas de referências geográficas nos quais as coordenadas são referenciadas. O formato dos dados de saída do GPS está no Sistema Geodésico Mundial (1984) – WGS84²⁵ e o GLONASS utiliza o sistema PZ-90²⁶. Outra diferença é o sistema de tempo. O GPS trabalha em UTC e horário USNO²⁷, ao passo que o GLONASS utiliza UTC no horário de Moscou. Estes sistemas também diferem na estrutura do sinal e na forma de tratá-lo. O GPS compartilha a mesma frequência, mas difere nos códigos individuais, e o GLONASS compartilha o mesmo código, mas difere nas frequências.

²⁵ WGS84: *World Geodetic System 1984*.

²⁶ PZ-90: *Parametry Zemli 1990*.

²⁷ USNO: *United State Naval Observatory*.

É possível combinar os dois sistemas com o intuito de se obter uma melhor precisão e também uma maior disponibilidade dos sinais de satélite. Existem no mercado receptores GLONASS e GLONASS/GPS combinados.

2.2.3 Sistema GALILEO

Como visto anteriormente, o sistema GALILEO trata-se do GNSS que está em fase de desenvolvimento pela União Européia. Será capaz de transmitir sinais de posicionamento e de tempo através de um controle civil internacional, a fim de aumentar a demanda de usuários, e terá uma abrangência ilimitada de atividades.

De acordo com JUNQUEIRA (2003), como no caso do GPS, a arquitetura do GALILEO é planejada para dar cobertura planetária e realizar serviços continuamente em qualquer ponto do mundo. O sistema será construído com três segmentos: o espacial, terrestre e o do usuário.

Segundo SALABERT (2000), a estrutura do segmento espacial é baseada numa constelação de 30 satélites de órbita média, com altitude de aproximadamente 20.000km, solução semelhante adotada nos outros sistemas GNSS, devido a um menor risco técnico. Essa arquitetura espacial será combinada com uma infra-estrutura terrestre apropriada que possibilitará o serviço de navegação e posicionamento, determinando também as órbitas, a sincronização e o gerenciamento do sistema de operação como um todo.

O sistema propõe dois diferentes níveis de controle de acesso: o CAS-1²⁸, destinado às aplicações de uso comercial e profissional, e o CAS-2²⁹, voltado para aplicações críticas de segurança e governamentais. Tanto num caso como no outro, o usuário encontrará precisão horizontal melhor que 1m (95%), com excelente nível de integridade.

Embora este sistema não esteja em operação, o avanço técnico gerado pelo advento do GALILEO resultará em benefícios consideráveis para a União Européia e também para o restante dos continentes. Propiciará também a definição da próxima geração de GNSS.

²⁸ CAS-1: *Controlled Acces Service 1*.

2.3 Sistema de Posicionamento Global Diferencial – DGPS

As especificações de posicionamento padrão – SPS, em muitos casos, não atendem às necessidades de algumas aplicações quanto à precisão e à confiabilidade. Para se obter uma maior precisão do GPS, pode ser utilizada a técnica de correção diferencial, sendo conhecida como Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS) ou GPS diferencial. O funcionamento do DGPS baseia-se na hipótese de que o erro na determinação de um ponto é semelhante para todos os receptores situados num raio de até centenas de quilômetros deste ponto. A eliminação desse erro permite que o usuário reduza significativamente o erro total presente. Neste sistema, faz-se uso de um segundo receptor GPS, geralmente denominado de base ou estação de referência, fixado em um ponto de coordenadas conhecidas, que pode operar simultaneamente com o receptor GPS móvel utilizado na determinação das coordenadas do usuário. A Figura 8 ilustra a técnica DGPS.

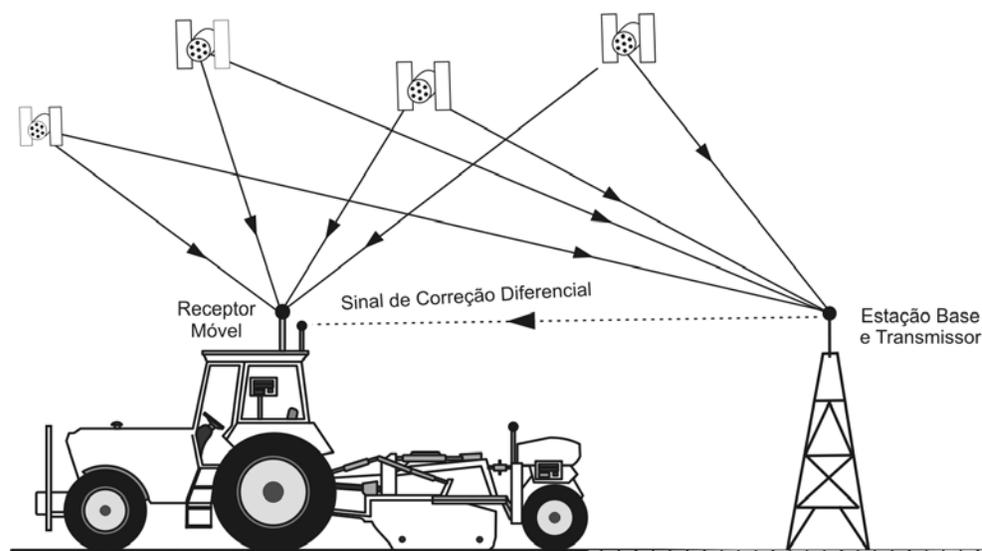


Figura 8 – Conceito da correção diferencial em tempo real – adaptado de MORGAN e ESS (1997)

Este procedimento permite calcular, no receptor GPS base, o erro que está sendo cometido na determinação das coordenadas. Pode-se conhecer a diferença entre a posição obtida através do receptor de GPS e a posição real do equipamento, possibilitando a correção

²⁹ CAS-2: *Controlled Acces Service 2.*

diferencial do erro. A eliminação deste erro possibilita reduzir o cálculo da posição para valores sub-métricos. Esta correção é feita através de processadores que calculam os erros e ajustam as coordenadas obtidas. Como os satélites estão em constante movimento, os valores para correção diferencial são válidos durante poucos segundos.

Para que a correção diferencial possa ser realizada, algumas condições devem ser preenchidas:

- A estação base (receptor fixo de referência) não deve estar muito distante da área de operação do receptor móvel, de modo que a constelação de satélites seja a mesma para os dois receptores. Os sinais de correção são válidos para uma distância de até 400km da estação base. Porém, para que a precisão máxima seja obtida, a distância entre ambos deve ser de até 50km;
- A estação base deve estar localizada em um ponto de coordenada cartográfica precisamente conhecido;
- Os dados gerados pela estação base e pela estação móvel devem ser compatíveis.

Para a utilização do DGPS é necessário que o receptor GPS seja compatível com tal tecnologia e que permita o recebimento do sinal de correção através do meio de transmissão escolhido. O protocolo de comunicação mais utilizado na atualidade para a transmissão de sinais de correção diferencial em tempo real para os sistemas de GPS é o RTCM SC-104.

Segundo FILHO e BAILO (1999) o DGPS é uma técnica específica de posicionamento com o uso do código C/A, onde a idéia é eliminar os efeitos sistemáticos dos erros impostos. Para isto, um receptor é colocado fixo em um ponto de coordenadas conhecidas (base), enquanto o outro percorre os pontos que se deseja determinar a posição. Programas específicos corrigem as posições combinando os dados obtidos pelos dois receptores. A correção da posição pode ser feita em tempo real ou os dados do levantamento podem ser armazenados para pós-processamento.

A correção diferencial em tempo real é necessária em todas as operações onde existe a necessidade de, a partir de coordenadas geográficas, localizar instantaneamente com precisão um determinado objeto de interesse.

Na maioria dos modos de operação DGPS a precisão obtida é de 1 a 20 metros, e depende de vários fatores associados ao procedimento e equipamentos utilizados. Segundo GORGULHO (2001), o GPS Diferencial é um processo que permite ao usuário civil obter uma precisão de 20 milímetros a 5 metros, pelo processamento contínuo de correções nos sinais. As correções podem ser transmitidas através de radiofrequência e estão disponíveis em alguns países por meio de serviços de subscrição taxados. É necessário ter uma antena receptora DGPS conectada ao receptor GPS convencional em ambos os casos.

De acordo com MONICO (2000) o conceito de DGPS envolve o uso de um receptor estacionário localizado em uma estação com coordenadas conhecidas, rastreando todos os satélites visíveis. O processamento dos dados nessa estação permite que se calculem correções posicionais, bem como das pseudodistâncias e da fase da portadora. As correções das coordenadas são possíveis de serem determinadas, pois as coordenadas da estação base são conhecidas. As correções das pseudodistâncias são baseadas nas diferenças entre as pseudodistâncias observadas e as calculadas a partir das coordenadas dos satélites e da estação base. Princípio similar é aplicado no cálculo das correções da fase da onda portadora. O método que utiliza as pseudodistâncias é o mais empregado na prática devido a um menor custo e maior disponibilidade.

MONICO (2000) explica ainda que o DGPS foi desenvolvido com o objetivo de minimizar os efeitos da disponibilidade seletiva imposta ao GPS no modo absoluto (SPS) e que consiste de uma técnica que melhora a precisão e a integridade (probabilidade de que a posição informada atenda às especificações exigidas) do GPS. Sua utilização original foi na navegação, mas atualmente é empregada em diversas atividades, inclusive na agricultura. O autor afirma ainda que, estando a estação base localizada nas proximidades da região de interesse, há uma forte correlação entre os erros calculados na estação base e os erros da estação móvel. Portanto, se o usuário receber estas correções, é possível corrigir as posições coletadas pela estação móvel. A aplicação de correções nas posições é o método mais simples de se utilizar em DGPS.

Quando as correções para as observações de pseudodistâncias são utilizadas, não há necessidade da estação móvel rastrear a mesma constelação de satélites rastreada pela estação base, pois as correções só se aplicam para os satélites efetivamente rastreados. Se alguns dos

satélites rastreados não dispuserem de correções enviadas pela estação base, e não houver um número suficiente de satélites para efetuar o posicionamento, é aconselhável não utilizá-los. Segundo MONICO (2000), uma estratégia que pode reduzir esse tipo de problema é a introdução de uma máscara de elevação na estação móvel à da estação de referência. Uma alternativa é acrescentar 1° a cada 100 quilômetros de afastamento em relação à estação base.

Um aspecto importante no DGPS é o intervalo de transmissão das correções e suas variações. Quanto maior o intervalo de transmissão, menor será a precisão da posição corrigida. As correlações entre as correções reduzem-se com o passar do tempo. A transmissão da variação da correção em razão do tempo, juntamente com a correção, visa reduzir este problema, e ao mesmo tempo reduzir a quantidade de informações enviadas.

2.3.1 Sistemas de Correção Diferencial Pós-processado e em Tempo Real

Segundo MARQUES (2000), as correções dos dados GPS podem ocorrer de duas formas distintas, dependendo basicamente da aplicação a que se destina o posicionamento:

Pós-Processada

A correção diferencial é realizada após a coleta dos dados. Neste caso é necessário um *software* de pós-processamento adequado e registros de dados simultâneos para ambos os receptores. As observáveis são armazenadas na memória dos receptores (ou de alguma outra forma qualquer), para futuro processamento por um programa específico. Assim, o resultado corrigido só é obtido quando ocorre o pós-processamento dos dados. Este procedimento não pode ser utilizado em atividades que necessitam, em tempo real, da posição geo-referenciada.

Com relação ao sistema DGPS pós-processado, o receptor GPS deve ser capaz de armazenar todas as observações fornecidas pelos satélites da rede GPS, para que estas informações sejam, posteriormente, processadas com o sinal rastreado por uma estação base GPS. Os erros sistemáticos do rastreo feito pelo receptor móvel são minimizados e em grande parte eliminados, viabilizando o geo-referenciamento. Com um procedimento adequado é possível obter precisões da ordem de centímetros (levantamento estático).

Tempo-Real

Neste caso, as informações são enviadas através de um sistema de transmissão de dados em tempo-real, permitindo que as coordenadas corrigidas sejam obtidas durante a coleta dos dados. Por incluir um canal de transferência de dados, um *hardware* adicional é inserido no sistema. Utiliza-se o processamento em tempo-real, especificamente, em aplicações que necessitam das coordenadas corrigidas no instante em que os dados estão sendo coletados.

Em alguns sistemas, a estação fixa envia imediatamente para o receptor móvel o sinal de correção diferencial, sendo denominado “correção diferencial em tempo real”. Normalmente, o sinal de correção diferencial em tempo real pode ser obtido através de: radiofaróis (*radio beacons*) operados pela marinha, estações de rádio terrestres ou satélites de comunicação.

No sistema DGPS em tempo real, o receptor GPS, devidamente dotado de um dispositivo de recebimento de correções diferenciais em tempo real (tipicamente por rádio, satélite banda L ou telefone celular) fica capacitado para posicionamento preciso no local e na hora do procedimento. Este processo viabiliza, por exemplo, a localização de coordenadas projetadas (encontrar o local de coordenadas pré-estabelecidas) ou a coleta em tempo real de posições.

2.3.2 Estações de Sinais DGPS

De acordo com GORGULHO (2001), as correções são transmitidas em frequência modulada ou via satélite e são disponíveis em alguns países através de serviços de subscrição taxados. Os sinais de correção também podem ser transmitidos por um segundo receptor ou por faróis de navegação localizados num raio de 100 quilômetros do usuário.

Radiofaróis – Radio Beacons

Segundo o comitê RTCM SC-104 (1998), os radiofaróis são estações de transmissão de sinais de rádio sem direção operando em faixas de baixas e médias frequências. São fixos e operam normalmente na região costeira, podendo atingir até 300 quilômetros do litoral. Para localidades situadas em regiões geograficamente favoráveis para a recepção de sinais de radiofaróis, esta é uma excelente opção.

Existe uma rede de radiofaróis da Marinha Brasileira que cobre a região litorânea. Este sistema opera na faixa entre 285kHz e 325kHz e estes sinais são tipicamente fornecidos sem custo. Ocasionalmente uma ou outra estação está em manutenção ou fora de operação³⁰.

Estações Base de Rastreamento Contínuo

Estão espalhadas pelo território e ficam 24 horas armazenando dados de rastreamento dos satélites da rede GPS. Estas estações servem basicamente de referência para procedimentos de levantamentos pós-processados, pois fornecem dados rastreados na forma de arquivos (geralmente fornecidos pela Internet). Os levantamentos pós-processados podem ter precisões sub-métricas se forem tomados certos cuidados quanto ao planejamento da missão de rastreamento. Tipicamente as precisões conseguidas são menores que 1 metro para a maioria dos levantamentos, considerando-se os cuidados com o raio de abrangência.

Algumas estações podem transmitir o sinal de correção diferencial no formato do protocolo RTCM SC-104 e se transformarem em estações de rádio terrestres, que operam em FM, na faixa de radiodifusão comercial, e têm alcance máximo de 100 quilômetros. O valor dos serviços depende dos custos de manutenção da estação base e geralmente equivale ao custo do aluguel de um equipamento GPS (podendo haver incentivos em caso de contratação por períodos longos de fornecimento do serviço). No Brasil, há pouca disponibilidade destas estações.

Estações de Correção Diferencial por Satélites

A transmissão dos sinais de correção se dá pelo uso de satélites geo-estacionários, sendo conhecida como SBAS³¹. Segundo NETO (2005), tais sinais são fornecidos por empresas que cobram anuidades para a sua utilização. Os dados de correção, obtidos de diversas estações terrestres estrategicamente localizadas, são enviados a uma estação central de controle da rede que, após verificações de qualidade e otimizações, os envia para os

³⁰ O endereço <http://www.spg.com.br> fornece maiores informações sobre a rede de radiofaróis brasileira. As precisões obtidas segundo informações ficam na faixa de 1 a 10 metros.

³¹ SBAS: *Satellite Based Augmentation System*.

satélites distribuidores. Com o uso de receptores de alta qualidade, consegue-se, com este sistema de correção, precisão de 1 a 5 metros no posicionamento horizontal.

Ainda de acordo com NETO (2005), a demanda por serviços DGPS propiciou o surgimento de empresas comerciais prestadoras deste tipo de serviço. Nos EUA, tem-se o sistema WAAS³², sendo o primeiro SBAS implementado. Foi desenvolvido em função da necessidade do departamento de aviação comercial dos EUA em adequar as características do GPS para utilização nas aeronaves. O WAAS acrescenta informações necessárias ao sinal de navegação do GPS para sua utilização em todas as etapas da aviação. Provê informações para melhorar a exatidão das medidas GPS e a confiabilidade do sistema. O serviço é limitado ao território dos EUA. Não está disponível para a América Latina devido à ausência de estações terrestres.

O sistema EGNOS³³ é o SBAS desenvolvido pela União Européia. Está baseado nos satélites GPS, GLONASS e INMARSAT-3 e cobre uma região que inclui a Europa, a África (leste mediano), alguns países da Ásia, e até mesmo partes da América do Sul. Possui uma rede de estações terrestres e canais de comunicação através dos satélites INMARSAT-3. Têm-se ainda o MSAS³⁴ e o CDGPS³⁵, desenvolvidos pelo Japão e Canadá, respectivamente.

No Brasil, a principal empresa que opera este tipo de serviço é a Omnistar. A transmissão ocorre em frequência própria e as antenas do serviço diferencial e do GPS estão num mesmo invólucro. Os equipamentos e os serviços são mais caros, porém podem prover correções em praticamente qualquer lugar. Porém, este sistema apresenta algumas desvantagens:

- É necessário o pagamento de uma anuidade para a empresa prestadora do serviço. É cobrado um valor para cada receptor habilitado a receber o sinal de correção;

³² WAAS: *Wide Area Augmentation Systems*.

³³ EGNOS: *European Geostationary Navigation Overlay Service*.

³⁴ MSAS: *The Japan Civil Aviation Bureau's MTSAT Satellite Augmentation System*.

³⁵ CDGPS: *Canadian DGPS*.

- Para a recepção do sinal de correção via satélite é necessário o uso de receptores especiais, capacitados a receber o sinal de correção, e que, normalmente, apresentam custos superiores aos receptores usuais.

- O custo do aparelho receptor é da ordem de US\$8.000,00 e o serviço de correção diferencial é da ordem de US\$1.500,00 por ano. Bastante elevado para muitas aplicações no Brasil.

Estações Privadas

Uma alternativa para a obtenção do sinal de correção diferencial é a utilização de uma estação de correção privada, onde, são necessários um receptor GPS e um transmissor de rádio adequados. Dentro da área de alcance do rádio transmissor tem-se o sinal de correção que pode ser captado pelo receptor GPS móvel de um receptor de rádio adequado. O sistema permite que inúmeros aparelhos façam uso do sinal de correção, dentro da área de abrangência, bastando estarem equipados com receptores de rádio apropriados. Devido à limitação de potência imposta pelos órgãos governamentais de radiodifusão, o alcance da estação de correção normalmente não pode ultrapassar alguns quilômetros. Tal limitação, porém, garante grande precisão no sinal de correção, visto que os receptores móveis estarão, obrigatoriamente, operando a uma distância pequena da estação base, garantindo assim a eficiência da correção diferencial.

2.3.3 Justificativa para o uso do DGPS

Há, atualmente, várias aplicações em diversas áreas que fazem uso do sistema DGPS, podendo-se destacar: geo-referenciamento, levantamentos topográficos (agrícolas, florestais, urbanos, etc.), cadastros para atualização de Sistemas de Informação Geográfica, posicionamento preciso de embarcações náuticas, veículos terrestres (rastreamento de posição) e aéreos, controle de terraplanagem, locação de coordenadas (furos de sondagem, implantação de projetos, etc.), navegação precisa, entre outros.

Os Sistemas de Informações Geográficas (GIS), principalmente nas áreas das engenharias agrícola, civil, florestal, cartográfica, podem fazer uso das vantagens do GPS diferencial em tempo real. Empresas públicas e privadas podem utilizar o GPS com correção diferencial para planejamento urbano como, por exemplo, em operações de plantio e poda de

árvores, mapeamento de vias públicas, estacionamentos, redes elétricas, entre outras. Também pode ser usado no mapeamento de recursos naturais, tais como: nascentes e cursos de rios, mananciais, árvores e florestas, jazidas minerais, etc. Nas atividades modernas são praticamente ilimitadas as utilizações do GPS e principalmente do GPS com correção diferencial. Atualmente, observa-se um crescimento significativo na aplicação de sistemas de GPS, principalmente devido à redução do preço de tais equipamentos.

Com o uso do GPS diferencial a precisão no posicionamento pode aumentar até valores sub-métricos, dependendo da qualidade do receptor e do sinal de correção empregados. Isso amplia a possibilidade da utilização do GPS nas mais diversas atividades.

GOMES et al. (2001) afirmam que o sistema de posicionamento baseado em satélites artificiais NAVSTAR-GPS tem revolucionado as técnicas de engenharia de mapeamento, transporte, navegação, cartografia, agrimensura, agronomia e um número crescente de atividades.

FILHO e BAILO (1999) comentam o alto potencial de uso do GPS nas atividades agrárias, em especial no Brasil. Os autores ressaltam que para grande parte das atividades com potencialidade de emprego do GPS nas áreas agrônoma e florestal, a faixa de exatidão entre 1 a 5 metros pode ser empregada satisfatoriamente.

Para a área agrícola, STAFFORD (1996b) afirmou que as necessidades de precisão dos receptores GPS podem variar de acordo com as operações ou atividades envolvidas. O autor resalta ainda que, para o mapeamento da produtividade, por exemplo, não há necessidade de usar sistemas de posicionamento com precisão menor que 10 metros e, que quanto maior a precisão dos equipamentos destinados à realização das operações localizadas, maior o custo desta operação.

FRAISSE e FAORO (1998) consideram que uma vez tomada a decisão de iniciar um programa de agricultura de precisão, um dos passos é decidir qual a precisão requerida para o GPS. Como regra geral, espera-se que o mapa base do campo tenha a melhor precisão possível, uma vez que vai servir de base para todas as análises e operações de campo. Os autores afirmam ainda que, quanto a outros dados coletados, como solo e produtividade da cultura, a precisão varia com o tipo de dado coletado e a finalidade da informação obtida. Para o posicionamento de amostras de solo (mapas de atributos) e de dados de produtividade

(mapas de colheita), geralmente se aceita uma precisão na ordem de 1 a 3 metros. Concluem ainda que o uso da correção diferencial é requerido na maioria das operações em campo, embora em alguns casos, como na coleta de dados de produtividade com colhedoras, os dados de posicionamento possam ser pós-processados.

A precisão exigida no posicionamento geográfico em uma dada operação agrícola deve ser compatível com a precisão oferecida pelo equipamento utilizado. Caso contrário, se a precisão do equipamento for insuficiente, o resultado da operação poderá ser insatisfatório. Por outro lado, se o equipamento apresentar precisão superior à exigida, o mesmo estará sendo subutilizado.

2.3.4 Aplicações de DGPS na Agricultura

De acordo com FILHO e BAILO (1999) o uso do GPS tem aumentado significativamente em aplicações agrícolas e florestais. No Brasil, face à extensão territorial e a escassez de informações de geo-referenciamento, o GPS mostra-se como um recurso particularmente promissor.

Segundo GORGULHO (2001) com a popularização do GPS, um novo conceito surgiu na agricultura: a agricultura de precisão. Uma máquina agrícola dotada de receptor GPS armazena dados relativos à produtividade em um cartão magnético que, tratados por programa específico, produz um mapa de produtividade da lavoura. As informações permitem também otimizar a aplicação de corretivos e fertilizantes.

LECHNER e BAUMANN (2000) afirmam que a tecnologia de navegação por satélite GPS, combinada aos sistemas de informações geográficas (GIS), está sendo empregada para o mapeamento do campo, dos rendimentos, gerenciar a fazenda, entre outros. Algumas aplicações na agricultura requerem precisões em torno de ± 1 metro (mapeamento de partes do campo) e até mesmo em torno de ± 50 milímetros (veículos auto-guiados). Para obter tais precisões, faz-se necessário utilizar um sistema para fornecer o sinal de correção diferencial.

MONICO (2000) afirma que o GPS é um sistema de abrangência global e tem facilitado todas as atividades que necessitam de posicionamento, fazendo com que algumas concepções antigas pudessem ser postas em prática, como é o caso da agricultura de precisão,

cujo conceito foi estabelecido por volta de 1929 e que só agora tem sido praticada, graças à integração de diversas tecnologias, dentre elas o GPS.

Segundo SAUNDERS (1996), um sistema de posicionamento é essencial à implementação de agricultura de precisão. Todas as operações desta requerem o uso de algum sistema de posicionamento, geralmente o GPS. A escolha de um sistema de navegação com maior precisão é muito importante à medida que qualquer erro de posicionamento resultará na imprecisão do mapeamento e nos processos de aplicação localizados. Para as aplicações, é necessária uma precisão no posicionamento na faixa de 0,2 a 20 metros, mantido em todo o campo.

Segundo LECHNER e BAUMANN (2000), as aplicações na agricultura da tecnologia de navegação por satélite são recentes. As experiências com detecção automática de posição em “veículos” na agricultura, utilizando DGPS, foram administradas e termos como “fazenda de precisão” foram definidos. As aplicações DGPS com precisão de alguns metros são utilizadas na agricultura de precisão. Para aplicações em “máquinas guiadas” é necessário o uso de sistema com alta precisão e erros de poucos centímetros. Alguns fabricantes oferecem sistemas para correção em tempo real com erros em torno de 10 milímetros na horizontal e 30 milímetros na vertical com taxa de atualização de 1 Hz, ou ainda, erros de 20 milímetros (horizontal) e 50 milímetros (vertical) com taxa de 5 Hz.

LECHNER e BAUMANN (2000) afirmam que o uso de máquinas autônomas na agricultura requer um sistema de posição com alta precisão, para medir e compensar os movimentos do veículo causados pelas irregularidades do terreno. Uma outra aplicação na agricultura de navegação por satélite, trata da medição da velocidade das máquinas. Até o momento, o sistema GPS é incapaz de medir velocidades baixas. Com o avanço da tecnologia dos sistemas de navegação, várias aplicações se tornarão praticáveis na agricultura.

De acordo com MORAES (2001), para trabalhos que exigem maior precisão, como é o caso do mapeamento do uso da terra em microbacias hidrográficas, delimitação de talhões, de propriedades agrícolas e mapeamento de estradas, justifica-se o uso de equipamentos com Correção Diferencial – DGPS. Tal procedimento permite uma sensível melhoria na precisão do posicionamento com uma margem de erro inferior a 1 metro. O aumento sensível da precisão desses equipamentos também é acompanhado por um aumento de custo.

Diversos trabalhos na área agrícola desenvolvidos no Brasil e que necessitam de localização de pontos geo-referenciados, fazem uso de um sistema de correção diferencial para minimizar os erros de posicionamento. Pode-se citar alguns trabalhos feitos por BALASTREIRE (1998a), como por exemplo, o levantamento da produtividade de algumas culturas utilizando uma estação privada DGPS em tempo real, onde foi possível a localização da colhedora no campo com uma acurácia suficiente para traçar as passadas desta em linhas paralelas sem desvios nem sobreposição. Uma das desvantagens verificadas para o sistema é a necessidade de se operar na "linha de visão" das antenas, sem o que se corre o risco de perder o sinal diferencial. A grande vantagem da utilização de uma estação base própria é a independência de outras fontes de sinal de correção diferencial, como satélites estacionários, cujo uso em nosso país ainda possui um custo elevado.

BALASTREIRE et al. (1999) também fez uso de uma estação DGPS em tempo real para o mapeamento da produtividade de uma cultura de laranja. O mesmo autor fez um trabalho semelhante para o mapeamento da produtividade do milho.

FRAISSE e FAORO (1998) afirmam que uma vez tomada a decisão de se iniciar um programa de Agricultura de Precisão, um dos primeiros passos é decidir qual a precisão requerida para o GPS. Como regra geral, espera-se que o mapa base do campo tenha a melhor precisão possível, uma vez que vai servir de base para todas as análises e operações de campo. Quanto a outros dados coletados, como solo e produtividade da cultura, a precisão varia com o tipo de dado coletado e a finalidade da informação obtida.

Conclui-se que são inúmeros os exemplos de aplicação do sistema DGPS nas operações agrícolas disponíveis na bibliografia e que a tendência é aumentar o uso à medida que os sistemas de correção diferencial tornem-se mais acessíveis quanto aos seus custos e disponibilidades de serviços.

2.3.5 Outras Técnicas de Correção para GPS

De acordo com ROCHA (2002) existem diversas formas de uso do sinal de GPS para calcular uma posição. As duas formas mais comuns são realizadas através de dados de código ou dos dados da portadora. Dados de código são calculados a partir do código gerado pelo satélite GPS e depois transmitidos para o usuário através de um sinal de rádio. Dados da

portadora são computados examinando-se o próprio sinal de rádio usado para transportar a informação do satélite para o usuário.

O posicionamento se refere à obtenção da posição de objetos em relação a um referencial específico. Pode ser classificado em absoluto e relativo. Segundo SILVEIRA (2004), o posicionamento absoluto é dado por medições simultâneas das distâncias entre o receptor e três satélites e conhecendo a posição atual de cada satélite, pode-se calcular, em tempo real, a posição do receptor. O posicionamento relativo faz uso de um ponto cuja coordenada sobre o sistema global de coordenadas é previamente conhecida, podendo-se determinar, com boa precisão um outro ponto, relativamente ao primeiro.

O objeto cuja posição deve ser determinada pode estar em repouso (estático) ou em movimento (cinemático). Portanto, pode-se ter:

- Posicionamento absoluto estático;
- Posicionamento absoluto cinemático;
- Posicionamento relativo estático;
- Posicionamento relativo cinemático.

MONICO (2000) afirma que não houve uma adoção de uma terminologia padrão e que é possível haver interpretação dúbia devido a grande quantidade de termos existentes na bibliografia de GPS. O autor considera ainda que o conceito DGPS é diferente do envolvido para o posicionamento relativo, pois no primeiro se aplicam as correções com respeito as fases de código, enquanto que no relativo, utiliza-se a fase da portadora que, em essência, determina um vetor ligando um ponto conhecido (estação base) a um ponto desconhecido (estação móvel).

Conforme apresentado em diversas literaturas sobre o sistema DGPS, o posicionamento relativo só com código foi designado por DGPS, enquanto que a terminologia “posicionamento relativo” se ateu à observável fase da portadora. Alguns autores preferem

designar o DGPS com fase por CPD³⁶. Neste trabalho, o termo DGPS é usado para o posicionamento relativo com código.

O posicionamento relativo com fase da portadora, em tempo real, é designado por RTK³⁷. A maior dificuldade desta técnica é o desconhecimento do número de ciclos completos decorridos desde que o sinal deixou o satélite até ao instante de sintonia (ambigüidade de ciclo). Deve-se esperar alguns minutos até que o receptor consiga resolver a ambigüidade de ciclo de cada par receptor-satélite. O sistema RTK, assim como o DGPS, requer uma estação de referência para a transmissão, geralmente via rádio, das informações a serem empregadas pelo receptor móvel para a devida correção da posição. A principal diferença do RTK em relação ao DGPS trata da observável utilizada. Para o sistema RTK é utilizada a fase da portadora, ao invés de observações de pseudodistância como no DGPS. Isto resulta em uma correção mais precisa no posicionamento do receptor móvel na ordem de 5 milímetros a 20 milímetros na horizontal e de 10 a 30 milímetros na vertical.

Segundo SANTOS (2002), duas dificuldades estão associadas ao emprego do RTK. A primeira diz respeito ao uso da fase da portadora, o que requer a resolução da ambigüidade durante a operação de levantamento. Isto, atualmente, é possível através de algoritmos específicos. Apenas com a resolução da ambigüidade é possível se obter os 10 ou 20 milímetros de precisão referidos. A segunda dificuldade diz respeito à decorrelação espacial que está relacionada à suposição de que erros comuns entre a estação de referência e o receptor móvel são comuns, e, portanto, cancelados. Embora a suposição de que estes erros se cancelem seja admissível para várias aplicações, a decorrelação espacial (isto é, a alteração dos erros à medida que o receptor móvel se afasta da estação de referência) dos erros resulta em uma maior contribuição destes erros na solução final do receptor móvel. Devido a este fator a aplicação do RTK (ao nível de precisão de 20 milímetros) se limita a um raio de 10 quilômetros em torno da estação de referência.

³⁶ CPD: *Carrier Phase Differential*.

³⁷ RTK: *Real-Time Kinematic*.

Ainda de acordo com SANTOS (2002), para se ter esta precisão para maiores distâncias, utiliza-se uma rede de estações de referência. A técnica RTK abriu uma nova perspectiva para o posicionamento com GPS. E isso já faz parte do cotidiano há 10 anos ou mais. Deve-se ressaltar que os custos dos receptores GPS que empregam a técnica RTK são bem mais elevados se comparados aos DGPS. O protocolo de comunicação RTCM SC-104 possui a descrição das mensagens para a correção nos sistemas RTK³⁸.

2.4 Receptores GPS

Segundo ROCHA (2000) os equipamentos receptores GPS que recebem os sinais do sistema NAVSTAR-GPS, podem ser classificados de acordo com a precisão e o investimento como: Navegação, DGPS, Cadastrais, Topográficos e Geodésicos. Alguns equipamentos podem pertencer a mais de uma classe.

Os equipamentos de navegação fornecem o posicionamento em tempo real, a partir dos códigos C/A ou P, através da pseudodistância. A precisão com o código C/A é da ordem de 30 a 100 m e com o código P é da ordem de 3 a 10 m. Porém, os receptores GPS que fazem uso do código P são restritos aos usuários autorizados.

Os aparelhos de DGPS são semelhantes ao anterior e são projetados para aceitar sinais de correção DGPS, sendo que alguns já possuem embutido, o sistema de rádio para a recepção do sinal de correção de uma estação base. Um receptor GPS padrão poderá ser utilizado para receber sinais DGPS somente se for projetado pelo fabricante como “*DGPS ready*”. Muitos receptores GPS são anunciados como “*differential-ready*”, entretanto, não significa que o módulo receptor do sinal esteja contido na unidade GPS. É necessário acoplar ao receptor GPS os equipamentos necessários para o recebimento do sinal. Há, no mercado, diversas empresas fabricantes de receptores DGPS de vários modelos para as mais diversas aplicações. Através dessas correções em tempo real, obtêm-se precisões da ordem de 1 a 3m.

³⁸ O estudo dos sistemas de correção diferencial que fazem uso da fase de onda da portadora para obtenção das informações inerentes ao cálculo da posição, tempo, velocidade, não será tratado com maiores detalhes em virtude de não ser o escopo principal deste trabalho.

A classe de receptores Cadastrais contém os aparelhos que trabalham com o código C/A e com a fase da portadora L1. Há a necessidade de dois receptores ou de uma estação base para prover o pós-processamento. Dependendo do método e do aparelho utilizado, conseguem-se precisões de 10cm a 1m.

Os receptores GPS classificados como topográficos também trabalham com a fase L1 (e código C/A), com pós-processamento dos dados. Porém, há melhorias significativas no próprio aparelho, nos softwares de pós-processamento, além de acessórios que ocasionam uma melhoria de precisão na ordem de até 1 cm.

Os aparelhos geodésicos recebem as frequências L1 (código C/A) e L2 (C/A ou P), chegando a precisões diferenciais pós-processadas da ordem de 5mm + 1ppm, com a metade do tempo que levaria um GPS topográfico.

2.4.1 Protocolos de Comunicação para GPS

Há dois protocolos de comunicação largamente difundidos entre a comunidade GPS. O protocolo RTCM SC-104, destinado à transmissão de correções diferenciais para os sistemas DGPS e RTK e o protocolo NMEA³⁹, usado como interface entre equipamentos eletrônicos de navegação. Os dois padrões possuem características específicas e distintas. O padrão RTCM pode passar despercebido para a maioria dos usuários por estabelecer a comunicação entre o receptor na estação de referência e o receptor móvel. As informações deste protocolo são dependentes do tipo de operação: DGPS ou RTK. O protocolo padrão NMEA contém diversas informações como, por exemplo, as coordenadas da estação receptora GPS móvel. Estes protocolos de comunicação serão tratados com mais detalhes nos tópicos seguintes.

2.4.1.1 NMEA

Os receptores GPS transmitem sinais em diversos formatos. Trata-se de um protocolo de comunicação padrão da indústria para equipamentos de navegação. Existem diferentes

³⁹ NMEA: *National Marine Electronic Association*.

formatos NMEA, entre os quais, podem-se citar: NMEA 0180, NMEA 0182, e NMEA 0183. A maioria dos receptores tem saída NMEA de dados.

Segundo SANTOS (2003), o protocolo NMEA 0183 foi desenvolvido visando à concepção de dispositivos eletrônicos marítimos. A sua primeira versão foi liberada em março de 1983. O padrão NMEA 0183 define características elétricas do sinal, protocolo da transmissão de dados, sincronismo e formatos específicos de sentenças de transmissão. Este padrão tem sido constantemente atualizado, e a sua última versão, 3.01, foi disponibilizada em janeiro de 2002.

Todas as sentenças do protocolo NMEA consistem de no máximo 82 caracteres no código ASCII⁴⁰. O Quadro 3 apresenta a estrutura geral de uma sentença no formato NMEA 0183.

Quadro 3 – Campos de uma sentença NMEA.

\$	Código do Dispositivo	Tipo de Sentença	,	Informações da Sentença	,	(A/V)	,	*	Checksum	CR/LF
----	-----------------------	------------------	---	-------------------------	---	-------	---	---	----------	-------

Uma sentença NMEA é iniciada com o caractere \$ e finalizada com os caracteres CR/LF⁴¹. Após o caractere de início de sentença, têm-se os seguintes campos de dados:

- Código do dispositivo – indica o dispositivo que está fazendo a transmissão;
- Tipo de sentença – indica o formato da sentença;
- Informações da sentença – hora, localização, entre outras;
- A/V – indica se uma sentença é ou não válida: A para válida e V para inválida;
- Controle da soma (*Checksum*) – código de correção.

Todos os campos de dados são separados por vírgulas (,) e têm comprimento variável. Os campos nulos também são delimitados por vírgulas (,), mas não contêm nenhuma

⁴⁰ ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*, Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informação.

⁴¹ CR/LF: *Carriage Return/Line Feed*.

informação. O último campo de dados de uma mensagem NMEA 0183 termina com um asterisco (*) e o valor de controle de soma de oito bits é obtido a partir dos caracteres na mensagem, incluindo as vírgulas entre campos, mas não são considerados os caracteres \$ e *. O resultado, em hexadecimal, é convertido em dois caracteres ASCII (0-9, A-F). O caractere mais significativo aparece primeiro.

A seguir é apresentado um exemplo de seqüência NMEA:

\$GPGLL,3744.953,N,12225.319,W,182220,A,*35

onde:

- GP⁴² corresponde ao dispositivo GPS indicando posição geográfica;
- GLL⁴³ – indica a posição geográfica latitude/longitude;
- Latitude 37 graus e 44,953 minutos;
- N – Norte;
- Longitude 122 graus e 25,319 minutos;
- W – Oeste;
- 18h22min20s UTC;
- A = informação válida (V = informação inválida);
- 35 é o CRC.

SANTOS (2003) apresenta os códigos de alguns dos fabricantes de equipamentos que adotam o formato NMEA: ASH (Ashtech), Cmp (C-Map), CSI (Communications Systems Intl), DAS (Dassault Sercel), DNT (Del Norte), FEC (Furuno Electric Corp), GRM (Garmin Corp), HPK (Hewlett Packard), e HWM (Honeywell Marine). O padrão NMEA é protegido pelas leis de direitos autorais e não é gratuito.

⁴² GP: *Global Positioning System Receiver*.

⁴³ GLL: *Geographic Latitude and Longitude*.

2.4.1.2 RTCM SC-104

Os padrões do protocolo RTCM para GNSS foram desenvolvidos pelo comitê RTCM SC-104. Esta organização está situada em Washington – EUA, sendo constituída por representantes do governo americano e da iniciativa privada. Este documento está, atualmente, na versão 2.3.

Os requisitos foram desenvolvidos pelo órgão federal americano de radionavegação (FRP, DoD/DOT, 1996, Parte 2) e os membros do RTCM são responsáveis pela especificação dos requisitos e publicação dos artigos. Os documentos publicados pelo Comitê Especial RTCM SC-104 contêm os padrões recomendados para serviços diferenciais para os sistemas GNSS diferenciais – DGNSS. Os padrões não são exclusivos para o sistema GPS, pois possuem recomendações também para o sistema GLONASS.

O protocolo RTCM SC-104 é utilizado como referência para especificar a mensagem para o sinal de correção que é gerada na estação de referência e, em seguida, transmitida para as estações móveis, possibilitando assim, o posicionamento em tempo real. Este padrão é empregado em operações com GPS envolvendo posicionamento tanto no sistema DGPS quanto no RTK.

Conforme RTCM (1998), os resultados do uso do padrão RTCM SC-104 têm gerado enormes melhorias. Aplicações originais com precisão de 8 a 10 metros com probabilidade de 95%, com o uso de DGPS têm resultado em precisão de 1 a 3 metros. Estes resultados foram alcançados utilizando o código C/A para as medidas de pseudodistâncias.

A maioria dos sistemas de localização e navegação por rádio pode trabalhar no modo diferencial e prover melhorias na precisão. Este modo pode ser utilizado pelos sistemas GNSS. Para prover uma cobertura diferencial de qualquer lugar, faz-se necessário estabelecer uma estação base de referência além de um canal de comunicação por rádio.

Utilizando GNSS diferencial é possível obter: serviço contínuo, taxa de alteração rápida e amplas áreas de coberturas. Desta forma, pode-se prover informação de posicionamento em tempo real. Há várias aplicações que fazem uso do sistema GNSS diferencial, entre as quais podem-se citar: navegação marinha, navegação aérea, navegação terrestre e localização de veículos.

Os erros comuns aos diversos GNSS, tanto para a estação base quanto para a estação móvel são:

- Efeméride do satélite;
- Relógio do satélite;
- Atraso causado pela ionosfera;
- Atraso causado pela troposfera a medida que ocorrem na estação de referência;
- Erros artificiais induzidos pela técnica de Disponibilidade Seletiva;
- Atraso causado pela troposfera;
- Relógio da estação de referência.

Os seis primeiros erros são comuns tanto para a estação base quanto para o receptor móvel, enquanto que o último erro afeta apenas o receptor móvel.

Segundo MONICO (2000), se as correções geradas em uma estação de referência forem aplicadas às pseudodistâncias coletadas pelo receptor, com latência de 10 segundos, os erros comuns às duas estações serão praticamente eliminados, podendo proporcionar precisão melhor que 1 metro num raio de 50 quilômetros. O autor afirma ainda que há uma degradação da precisão com o afastamento da estação de referência, mas podendo proporcionar resultados satisfatórios até um raio de 1.000km. Para este caso, a precisão deve ficar na ordem de 1 a 10 metros.

2.4.1.3 Outros Protocolos

Existem basicamente três protocolos utilizados nos receptores GPS: NMEA, ASCII – código de caracteres e proprietário⁴⁴. Receptores GPS de diversos fabricantes possuem seus protocolos de comunicação específicos e que geralmente são proprietários. Alguns fabricantes de GPS não divulgam o formato dos protocolos empregados, pois querem limitar programas feitos por terceiros para seus receptores. Para usar um receptor GPS associado a outros equipamentos é necessário verificar a compatibilidade das linguagens aplicadas.

2.4.2 Erros em Receptores GPS

De acordo com DMA (2001), os termos precisão e acurácia são indistintamente utilizados na literatura sobre GPS, porém existe uma diferença conceitual entre ambos. A precisão corresponde à variação do valor, medido repetidamente sob mesmas condições experimentais, em torno de um valor médio observado, enquanto que o termo acurácia refere-se à exatidão da medida, ou seja, o quão próximo está o valor medido do valor real (geo-referenciado). As medidas podem ser precisas e não acuradas ao mesmo tempo, mas só podem ser acuradas se também forem precisas.

Conforme tratado anteriormente, as observáveis GPS estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. A precisão é afetada somente pelos erros aleatórios no processo de medição, enquanto que a acurácia é afetada pela existência das três classes de erros.

DMA (2001) ressalta que a definição básica de uma distribuição de erros assume a remoção dos erros sistemáticos e grosseiros e somente os erros aleatórios permanecem no conjunto de dados. Contudo, os erros sistemáticos não podem ser removidos a menos que haja uma forma para sua detecção.

Em um processo de medição o erro é definido como sendo a diferença entre o valor real e o valor medido. O valor real pode não ser determinado devido a limitações dos equipamentos ou falhas humanas. Entretanto, pode-se estimá-lo a partir de um número de medidas. Na determinação do valor de uma quantidade, somente uma medida pode ser necessária quando for suficiente o valor aproximado da quantidade medida. Aplicando-se a teoria da distribuição normal a essas medidas, o valor mais adequado para a quantidade medida é a média de todos os valores medidos. As diferenças entre a média e os valores observados são os erros aparentes usados para estimar a qualidade do processo de medição. Quando os erros forem aleatoriamente distribuídos em torno da média, a precisão da medição é expressa pelo desvio padrão (σ).

⁴⁴ Proprietário: protocolo desenvolvido pelo próprio fabricante do GPS.

Os erros podem ser unidimensionais (ou lineares) ou bidimensionais. Para estimar os erros são definidos índices de precisão que indicam a dispersão dos erros em torno de um ponto central e a magnitude limite do erro para várias probabilidades. Como exemplo, pode-se citar: 50% de todos os erros em uma série de medidas que não excedem $\pm 20\text{m}$. A Equação 1 define a probabilidade do desvio padrão, ou seja, 68,27% de todos os erros ocorrerão dentro dos limites $\pm \sigma_x$.

$$P(x) = \int_{-\sigma_x}^{+\sigma_x} p(x) dx = 0,6827 \quad \text{Equação 1}$$

DMA (2001) define que o erro médio η é definido como a média da soma dos valores absolutos de todos os erros. O desvio padrão e o erro médio são dois índices de precisão lineares teóricos. Na prática, utiliza-se outros índices de precisão. O Quadro 4 apresenta os índices de precisão, a distribuição linear dos erros e as equações para a obtenção destes índices de precisão em função do desvio padrão.

Quadro 4 – Distribuição Linear e equações para os índices lineares.

Índice	Probabilidade	Equação
Erro Médio	0,5751	$\eta = 0,7979 \sigma_x$
Erro Provável – PE ⁴⁵	0,5000	$PE = 0,6745 \sigma_x$
Acurácia Padrão de Mapa – MAS ⁴⁶	0,9000	$MAS = 1,6449 \sigma_x$
Erro Três Sigmas – 3σ ⁴⁷	0,9973	$3\sigma = 3 \sigma_x$

De acordo com DMA (2001) o erro bidimensional é o erro de medição de uma quantidade definida por duas variáveis aleatórias. Considerando-se a posição geográfica real de um ponto referenciado aos eixos coordenados X e Y, cada observação das coordenadas X e Y conterà erros “x” e “y”. Os erros bidimensionais podem ser definidos como erros elípticos

⁴⁵ PE: *Probable Error*.

⁴⁶ MAS: *Map Accuracy Standard*.

ou circulares. Na prática, os erros elípticos são substituídos por aproximações dos erros circulares. Os índices de precisão mais utilizados são:

- Erro Circular Padrão – σ_c ⁴⁸;
- Erro Circular Provável – CEP⁴⁹;
- Erro de Posicionamento Médio Quadrático – MSPE⁵⁰;
- Erro 2drms;
- Acurácia Circular Padrão de Mapa – CMAS⁵¹;
- Erro $3,5\sigma$ – $3,5\sigma$ ⁵².

O erro circular padrão é o parâmetro estatístico básico para uso na estimativa de probabilidade baseada na distribuição circular normal. O Quadro 5 apresenta as probabilidades e o cálculo dos índices circulares em função deste erro.

Quadro 5 – Probabilidades e cálculos dos índices de erros em função do erro circular padrão.

Símbolo	Probabilidade	Equação
σ_c	0,3935	$1,0000\sigma_c$
CEP	0,5000	$1,1774\sigma_c$
MSPE	0,6321	$1,4142\sigma_c$
CMAS	0,9000	$2,1460\sigma_c$
$3,5\sigma_c$	0,9978	$3,5000\sigma_c$

⁴⁷ 3σ : *Three Sigma Error.*

⁴⁸ σ_c : *Circular Standard Error.*

⁴⁹ CEP: *Circular Error Probable.*

⁵⁰ MSPE: *Mean Square Positional Error.*

⁵¹ CMAS: *Circular Map Accuracy Standard.*

⁵² $3,5\sigma$: *Circular Near-Certainty Error.*

2.5 Sistemas de Comunicação de Dados

De acordo com SILVEIRA (1991), a maioria dos sinais, e em especial os sinais digitais, não podem ser enviados diretamente através dos canais de transmissão devido a distorções sofridas quando transmitidos. Para facilitar o envio dos sinais através destes meios de transmissão e adequar as frequências aos sistemas de comunicação, faz-se uso de um sinal senoidal denominado onda portadora, cujas propriedades são mais adequadas aos meios de transmissão.

A onda portadora é caracterizada pela amplitude, frequência e fase. Este sinal é modificado para representar a informação a ser transmitida, ou seja, variando tais características da portadora, pode-se transmitir a informação desejada (sinal modulante). O referido processo é conhecido como modulação que é a alteração sistemática de uma onda portadora de acordo com a mensagem.

2.5.1 Modems

A palavra MODEM é formada pela contração das palavras Modulador e Demodulador. Trata-se de um equipamento bidirecional cuja função é adequar um sinal binário oriundo de um dispositivo digital às características da linha de transmissão. O modem é instalado nas duas extremidades de um meio de comunicação.

Segundo SILVEIRA (1991), este equipamento efetua uma transformação dos sinais digitais em sinais analógicos adequados para a transmissão. Pode ser por modulação (modem analógico) ou codificação (modem digital). Na recepção, também será necessário um modem para efetuar o processo inverso, ou seja, fará a demodulação ou decodificação do sinal transmitido, adaptando-o ao equipamento receptor.

De acordo com TANENBAUM (1999) um modem é um dispositivo que aceita caracteres (conjunto de oito bits) em forma de sinais de dois níveis e os transmite em grupos de um ou dois, modulados em amplitude, frequência ou fase. Os caracteres, geralmente, são precedidos de um bit de início seguidos de um bit de fim, totalizando 10 bits para cada caractere a ser transmitido. O modem envia os bits individuais de um caractere a intervalos de tempo igualmente espaçados. Um segundo modem, no receptor, é usado para converter a portadora modulada em um número binário.

2.5.2 Modulação

De acordo com LATHI (1998), a modulação é um processo pelo qual são modificadas uma ou mais características da onda portadora, segundo um sinal modulante, ou seja, a informação que se deseja transportar pelo meio. O processo de modulação pode ser feito variando a amplitude, a frequência ou a fase da onda portadora. Na recepção, é possível recuperar as informações digitais a partir da onda portadora. Os principais tipos de modulação utilizados em sistemas de comunicação de dados são: ASK⁵³, FSK⁵⁴, PSK⁵⁵, DPSK⁵⁶ e QAM⁵⁷.

Modulação ASK

A modulação ASK consiste em alterar o valor da amplitude da onda portadora. A Figura 9 ilustra esta técnica de modulação.

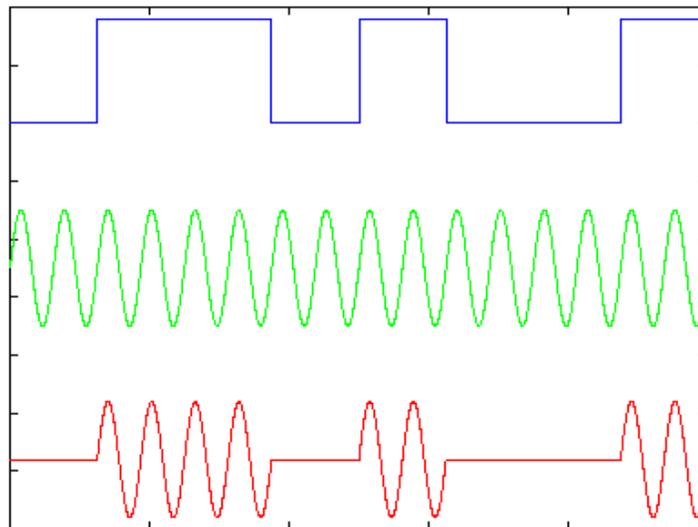


Figura 9 – Modulação ASK (o primeiro sinal corresponde à informação, o segundo a forma de onda da portadora e o terceiro à forma de onda do sinal modulado).

⁵³ ASK: *Amplitude Shift Keying*

⁵⁴ FSK: *Frequency Shift Keying*.

⁵⁵ PSK: *Phase Shift Keying*.

⁵⁶ DPSK: *Differential Phase Shift Keying*.

⁵⁷ QAM: *Quadrature Amplitude Modulation*.

Modulação FSK

A modulação FSK consiste na técnica de modulação onde a frequência da portadora é alterada conforme a informação a ser transmitida. Na comunicação de dados os valores binários são transmitidos em frequências diferentes. A Figura 10 ilustra a modulação por frequência.

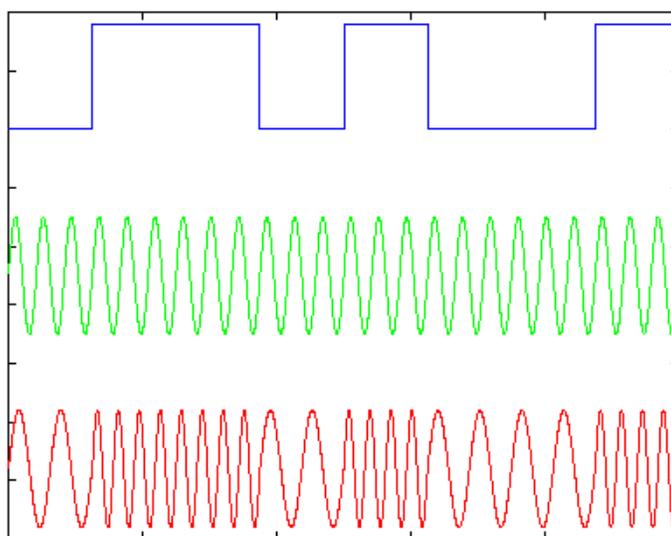


Figura 10 – Modulação FSK (o primeiro sinal corresponde à informação, o segundo a forma de onda da portadora e o terceiro à forma de onda do sinal modulado)

Modulação PSK

A modulação PSK consiste em variar a fase da portadora de acordo com os dados a serem transmitidos. Por exemplo, o bit 0 corresponde a fase 0° e o bit 1 a fase 180° . A modulação PSK é apresentada na Figura 11 onde, novamente, o primeiro sinal corresponde à informação, o segundo a forma de onda da portadora e o terceiro à forma de onda do sinal modulado.

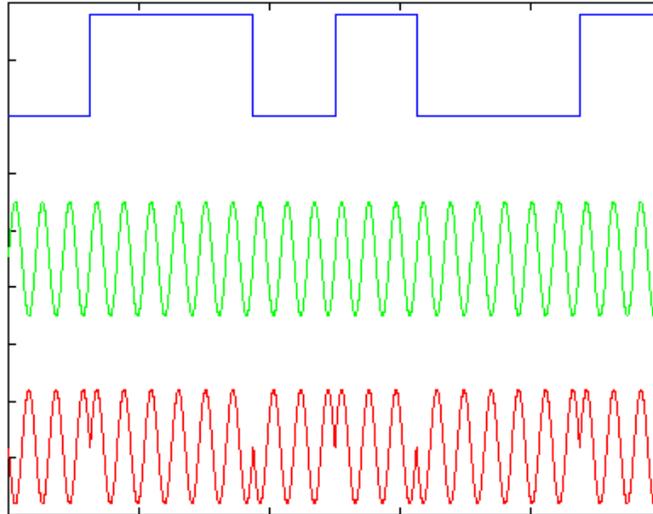


Figura 11 – Modulação PSK (o primeiro sinal corresponde à informação, o segundo a forma de onda da portadora e o terceiro à forma de onda do sinal modulado)

Modulação DPSK

A técnica DPSK consiste na modulação por desvio de fase da portadora onde a cada bit se associa ou não uma mudança de fase, ou seja, para cada bit 0 altera-se a fase da portadora em 180° , enquanto que para o bit 1 a fase não se altera.

Modulação QAM

A modulação QAM modifica simultaneamente duas características da portadora: a amplitude e a fase. Para cada grupo de 4 bits, a portadora assume um valor de amplitude e fase (Quadro 6).

Quadro 6 – Configuração QAM.

Valores (Quadribit)				Fase	Amplitude
0	0	0	0	0°	3
0	0	0	1	45°	$\sqrt{2}$
0	0	1	0	90°	3
0	0	1	1	135°	$\sqrt{2}$
0	1	0	0	180°	3
0	1	0	1	225°	$\sqrt{2}$
0	1	1	0	270°	3
0	1	1	1	315°	$\sqrt{2}$
1	0	0	0	315°	$3\sqrt{2}$

1	0	0	1	270°	5
1	0	1	0	225°	$3\sqrt{2}$
1	0	1	1	180°	5
1	1	0	0	135°	$3\sqrt{2}$
1	1	0	1	90°	5
1	1	1	0	45°	$3\sqrt{2}$
1	1	1	1	0°	5

2.5.3 Modems Digitais

São equipamentos que realizam a codificação do sinal digital visando adequá-lo à transmissão. A codificação diz respeito a mudança na representação do sinal, transformando o sinal digital em outro mais adequado às condições do meio de transmissão.

Estes equipamentos são conhecidos como Modem Banda Base ou *Data Set* e não realizam a modulação/demodulação do sinal. Considerando que a largura de banda disponível nos meios de transmissão geralmente é limitada, o sinal codificado sofre várias distorções ao se propagar pelo meio. Este fator limita a utilização dos modems digitais a pequenas distâncias (alguns quilômetros). Uma das vantagens em se usar o modem digital diz respeito a custos mais acessíveis, pois a implementação dos circuitos é mais simples.

2.5.4 Sistema de Transmissão Via Rádio

O princípio da transmissão de sinais baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas. Os sinais são transmitidos de um ponto a outro através de um canal que pode ter a forma de uma linha de transmissão ou simplesmente ser um espaço aberto no qual são irradiados os sinais que carregam a informação desejada (transmissão de rádio, televisão, comunicação por satélite, etc.).

Segundo LATHI (1998) o processo de modulação tem uma importante função para os sistemas que transmitem sinais por irradiação no espaço. A partir da teoria das ondas eletromagnéticas, pode-se demonstrar que um sinal só pode ser irradiado com eficiência se a antena irradiadora for da ordem de um décimo ou mais do comprimento de onda

correspondente à frequência do sinal a ser transmitido. Assim, o processo de modulação desloca o espectro de frequência para um intervalo de frequência superior, com o intuito de facilitar a irradiação por ondas eletromagnéticas. Possuem as seguintes características:

- Transmissor e receptor não precisam estar de linha de visada;
- Atravessam obstáculos facilmente;
- Sofrem interferências de equipamentos elétricos.

As ondas de rádio são fáceis de serem geradas e podem percorrer grandes distâncias e penetrar em edifícios e construções. Por isso, são largamente utilizadas para a comunicação. São omnidirecionais, ou seja, propagam em todas as direções a partir da fonte. Desta forma, o transmissor e o receptor não necessitam estar alinhados ou ligados fisicamente.

As propriedades das ondas de rádio são dependentes das frequências. Em baixas frequências, passam por obstáculos, mas sua potência cai gradativamente com o distanciamento da fonte. Em altas frequências, tendem a viajar em estritas linhas e saltar obstáculos. Todas as frequências de ondas de rádio estão sujeitas a interferência de motores e outros equipamentos elétricos. O Quadro 7 apresenta as categorias de faixas de frequências.

Quadro 7 – Frequências de rádio.

Sigla	Significado	Faixa de frequência
LF	Baixa frequência	30kHz a 300kHz
MF	Média frequência	300kHz a 3000kHz
HF	Alta frequência	3MHz a 30MHz
VHF	Muito alta frequência	30MHz a 300MHz
UHF	Ultra alta frequência	300MHz a 3GHz
SHF	Super alta frequência	3GHz a 30GHz

Pelo fato de poderem se propagar a longas distâncias, a interferência entre usuários torna-se um problema. Para evitá-la, existem faixas (ou bandas) e a utilização e o acesso são regulamentados e controlados pelo governo. Como exemplo pode-se citar a distribuição das frequências de rádio para os diferentes serviços tais como: rádio AM, FM, televisão VHF/UHF, telefonia celular, sistemas microondas, satélites e outros.

O objetivo básico no projeto de um sistema de rádio é estabelecer um método que atenda as necessidades propostas. Alguns dos fatores básicos que devem ser considerados no projeto de um sistema de rádio:

- 1 – Área a ser coberta e região;
- 2 – Opções de combinação de produtos;
- 3 – Escolha da faixa de frequência;
- 4 – Altura e localização da antena da estação fixa;
- 5 – Desempenho a longo prazo e manutenção;
- 6 – Custo.

Para se obter maior velocidade de transmissão entre 1200bps e 9600bps e menor interferência nas transmissões de rádio, torna-se necessário utilizar frequências maiores, nas faixas de VHF e UHF. Por outro lado, frequências muito altas não permitem comunicações diretas a longas distâncias. É possível obter maiores distâncias através do uso de repetidores (estações de rádio que retransmitem as informações recebidas para uma outra estação).

Sabe-se que o sistema DGPS utiliza dois receptores GPS, sendo que um deles, de localização conhecida, é responsável pela geração do sinal de correção diferencial. Faz-se necessário um sistema de comunicação para a transmissão do sinal de correção em tempo real. Propôs-se neste trabalho, a implementação do subsistema de modulação e conversão de taxas de custo reduzido. O conhecimento dos mecanismos de modulação se justifica, pois sendo o GPS um sistema digital, é necessária a adequação do sinal digital para que possa ser enviado adequadamente. O estudo dos meios de transmissão via rádio se justifica para realizar a escolha técnica e adequação do sistema de transmissão a ser utilizado para o envio do sinal de correção diferencial.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os principais materiais e metodologias empregados no desenvolvimento deste trabalho. Os materiais utilizados foram cedidos pelo Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC da Faculdade de Engenharia Agrícola – Feagri/Unicamp, com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP.

Os projetos dos circuitos eletrônicos que compõem o sistema DGPS, integração dos componentes, desenvolvimento dos aplicativos computacionais e testes foram realizados no Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC. As empresas DLG Automação Industrial LTDA, com sede em Sertãozinho-SP e T&S Equipamentos Eletrônicos Ltda, com sede em São Carlos-SP, cooperaram na construção e montagem dos circuitos eletrônicos⁵⁸.

3.1 Material

Para o desenvolvimento do sistema e realização dos testes foram utilizados os materiais descritos a seguir, os quais foram divididos e relacionados nas duas partes do sistema DGPS: estação base e estação móvel.

3.1.1 Estação Base

A estação base constitui a parte do sistema responsável pela geração e transmissão do sinal de correção diferencial no formato do protocolo RTCM SC-104, via rádio, constituído pelos seguintes equipamentos:

3.1.1.1 Receptores GPS para geração do sinal de correção diferencial em tempo real

- GPS da marca Motorola, modelo Oncore VP, que possui as seguintes características técnicas principais: 8 canais de satélite, L1 1.575,42MHz, código C/A, capacidade para

⁵⁸ A citação de empresas ou marcas comerciais não indica recomendação do autor quanto à sua utilização.

rastrear até 8 satélites em paralelo, protocolo de comunicação nos padrões proprietário e NMEA-0183, suporte a DGPS incluindo operação como estação base, interface serial padrão TTL, dimensões: 50,8 x 82,6 x 13,3mm (L x P x A), alimentação de $5 \pm 0,25$ Vdc, temperatura de operação: -30°C a $+85^{\circ}\text{C}$ e preço aproximado de US\$ 70,00.

- GPS Motorola M12+ Oncore com as seguintes características: receptor de 12 canais de satélite, capacidade para rastrear 12 satélites em paralelo, portadora L1 1.575,42MHz, código C/A, protocolo de comunicação no padrão proprietário e NMEA-0183, suporte a DGPS incluindo operação como estação base, interface serial padrão TTL, tamanho: 40 x 60 x 10mm (L x P x A), tensão de operação de 2,85 a 3,15Vdc, consumo de potência de 185mW, temperatura de operação de -40 a $+85^{\circ}\text{C}$, peso de 25 gramas e preço aproximado de US\$ 70,00.

- GPS marca Trimble, modelo AgGPS 122 Base com as seguintes características principais: 12 canais paralelos, precisão sub-métrica, taxa de aquisição de posição de até 10 canais por segundo, com capacidade de gerar sinal de correção diferencial no formato do protocolo RTCM SC-104, receptor e antenas selados, processamento de informações em tempo real, duas interfaces seriais padrão RS-232 e preço em torno de US\$ 5.000,00.

3.1.1.2 Processador de Correção

O processador de correção é o módulo do sistema responsável pela execução dos *softwares* de geração do sinal de correção diferencial e configuração do Sistema GPS Base.

- Microcomputador para configuração do receptor GPS base e geração do sinal de correção diferencial. Foi utilizado um microcomputador da família PC para a realização dos testes preliminares do sistema DGPS com a seguinte configuração: *desktop*, processador Intel Pentium 4, frequência de *clock* de 1,8GHz, com duas interfaces seriais RS-232C e sistema operacional Windows 2000.

- Microcontrolador modelo MSP430F149, da família MSP430, fabricado pela *Texas Instruments*, com as seguintes características: processamento em 16 bits, arquitetura RISC⁵⁹, conversor Analógico/Digital com resolução 12bits, com “*sample & hold*”, 8 canais analógicos de entrada, memória Flash com 60kB de capacidade, memória RAM com 2kB de capacidade, encapsulamento QFP⁶⁰ de 64 pinos, 2 portas de comunicação serial, 48 pinos de entrada e saída, tensão de alimentação de 1,8 a 3,6 Vcc, programação *onboard*, montagem em superfície SMD⁶¹ e tamanho físico extremamente reduzido (aproximadamente 10 x 10mm).

Para o interfaceamento com o sistema microprocessado fez-se uso de um *display* alfanumérico e um teclado multifunção com as seguintes especificações:

- *Display* alfanumérico para configuração do processador de correção e também do receptor GPS base, possibilitando visualizar as informações referentes ao funcionamento do sistema de geração de sinal para correção diferencial. Foi utilizado um *display* de cristal líquido, microprocessado, com *backlight*, modelo PC1602-F, fabricado pela Powertip.

- Teclado multifunção para seleção e configuração dos diversos parâmetros operacionais do sistema tais como: identificação da base, intervalo de envio do sinal de correção, coordenadas da estação base, entre outros. O teclado numérico de 18 teclas foi implementado com o uso de micro-chaves soldadas diretamente na placa de circuito impresso. A justificativa pela opção por esse tipo de montagem foi principalmente devido à redução de custo. Outra vantagem da utilização deste tipo de teclado é a possibilidade da colocação de uma máscara em filme de policarbonato, isolando o teclado da parte externa da caixa do equipamento, aumentando assim o grau de proteção do equipamento contra poeira e umidade.

3.1.1.3 Modulador e Conversor de Taxa

Foi utilizado um circuito modulador/demodulador baseado no circuito integrado MX-614 da MX-COM, operando no modo *half-duplex*, com taxa de transmissão de 1000bps. As

⁵⁹ RISC: *Reduced Instruction Set Computer*.

⁶⁰ QFP: *Quad Flat Pack*.

⁶¹ SMD: *Surface Mounting Device*.

principais características técnicas deste CI são: taxa de transmissão de até 1800bps, operação em *half-duplex*, equalização de linha opcional, operação com baixa tensão (3,3 a 5,0Vdc), consumo de corrente de 1mA com alimentação de 3,3Vdc e modulação FSK.

3.1.1.4 Rádio Transmissor

- Rádio transmissor fixo constituído por um modulador de sinais acoplado a um transmissor de rádio, marca Trimble, modelo Trimmark II Base/Repeater, com potência de 25 watts, frequência de transmissão UHF e antena externa.

- Rádio de comunicação marca Motorola, modelo GM300, com as seguintes especificações técnicas principais: faixa de frequência: de 438 a 470MHz (UHF), 16 canais programáveis, espaçamento entre canais de 12,5/20/25kHz, tensão de alimentação de 12Vdc, potência de saída: 25 watts, consumo de corrente de 10A para transmissão e 0,4A para recepção, impedância da antena de 50Ω não balanceada, dimensões: 50,8 x 177,8 x 196,85mm e peso de 1,73kg.

3.1.1.5 Instrumentos de bancada

- Osciloscópio digital, marca Agilent, modelo 54622D, MegaZoom, frequência de varredura de 100MHz, 2 canais analógicos, função de analisador lógico com 16 canais, unidade de disco flexível para armazenamento de telas;

- Gerador de funções e de formas de onda arbitrárias, marca Agilent, modelo 33220A, com *display* gráfico para ajuste e visualização de sinais, frequência máxima de 20MHz para ondas senoidais e quadradas, geração de ondas do tipo triangular, rampa, ruído e formas de onda DC, conversor D/A de 14bits e 50MSa/s⁶², modulação AM, FM, PM, FSK e PWM;

- Multímetro digital de bancada, marca Agilent, modelo 34401A, resolução de 6½ dígitos, interfaces de comunicação HP-IB e RS-232C, memória para armazenamento de até 512 leituras;

⁶² MSa/s: milhões de amostras por segundo.

- Multímetro digital portátil, marca Protek, modelo 506, com *display* de 4 dígitos;
- Fonte de alimentação estabilizada, marca Lune, com tensão de 13,8Vdc e 10A de capacidade de corrente;
- Fonte de alimentação programável, marca Amrel American Reliance Inc., modelo PPS 35-2D/CE, com dois canais independentes, tensão máxima de 35Vdc e corrente de 2A.

3.1.2 Estação Móvel

O sistema móvel para a recepção do sinal de GPS com correção diferencial em tempo real, via rádio, é constituído pelos seguintes equipamentos:

3.1.2.1 Receptores GPS móvel para o recebimento do sinal de correção diferencial em tempo real

Foram utilizados como receptores móveis, basicamente, equipamentos de navegação, portáteis e de baixo custo, visando a minimização no custo final do sistema. A única exceção é o receptor GPS AgGPS 132 da Trimble. Todos os equipamentos possuem entrada para sinal de correção diferencial em tempo real, no padrão RTCM SC-104. A seguir são listados os receptores GPS móveis usados nos diversos testes realizados:

- Receptor GPS de navegação, marca Garmim, modelo III Plus, com 12 canais paralelos, capacidade de armazenamento de 1.900 pontos, interface RS-232C com protocolos padrão NMEA 0183, RTCM SC-104 DGPS e formato proprietário Garmin, dimensões: 127 x 59 x 41mm, peso: 255 gramas com as pilhas, visor: com 56 x 38mm, temperatura de operação de -15°C a 70°C e preço aproximado de US\$ 100,00.

- Receptores GPS de navegação, marca Garmin, modelo eTrex com 12 canais paralelos, capacidade de armazenamento de 2.000 pontos, interface RS-232C com protocolos NMEA 0183, RTCM SC-104 DGPS e formato proprietário Garmin, peso: 172 gramas, dimensões: 112 x 51 x 30mm, temperatura de operação de -15°C a 70°C e preço em torno de US\$ 100,00.

- Receptores GPS de navegação, marca Garmin, modelo GPSmap76S com 12 canais paralelos, capacidade de armazenamento de 3.000 pontos, interface RS-232C com protocolos

NMEA 0183, RTCM SC-104 e formato GARMIN, dimensões: 69 x 157 x 30mm, temperatura de -15°C a 70°C e preço estimado de US\$ 300,00.

- Receptor GPS marca Trimble, modelo AgGPS 132, 12 canais paralelos, taxa de aquisição de posição de até 10 pontos por segundo, capacidade para recepção de sinais de correção diferencial no padrão RTCM SC-104, receptor e antena selados, dimensões: 145 x 51 x 195mm, processamento de informações em tempo real, duas portas padrão RS-232C com protocolos NMEA e proprietário e preço em torno de US\$ 3.000,00.

3.1.2.2 Rádios de comunicação

- Rádio receptor móvel constituído por um receptor móvel de rádio acoplado a um demodulador de sinais, marca Trimble, modelo Trimmark II Rover, frequência de recepção UHF e antena externa.

- Rádio de comunicação Motorola modelo TalkAbout T5720, 14 canais, faixa de frequência UHF de 462,550 a 467,725MHz, alimentação realizada através de três pilhas, formato AA, ou através de bateria recarregável.

3.1.2.3 Demodulador e Conversor de Taxa

A exemplo do circuito modulador e conversor de taxa, no circuito demodulador e conversor de taxa também utilizado o circuito integrado MX-614 da MX-COM, operando no modo *half-duplex*, com taxa de recepção de 1.000bps.

3.1.3 Softwares Utilizados

Para os testes, configuração e avaliação do protótipo do sistema de correção diferencial foram empregados *softwares* comerciais e *softwares* do tipo *shareware*⁶³ e *freeware*⁶⁴. A seguir são descritos, de maneira sucinta, as características destes *softwares*.

⁶³ *Shareware* é a categoria de *software* disponibilizado com a permissão para que seja redistribuído, mas a sua utilização implica no pagamento pela sua licença.

- *Software Tac32* versão 2.7.1 desenvolvido pela CNS Systems. Usado para a configuração dos parâmetros operacionais do protótipo da estação base de correção diferencial. Utilizou-se uma versão de demonstração (licença de uso por 30 dias).

- *Software SA Watch* versão 3.75.264 desenvolvido pela SR Huntting Inc. e utilizado para determinação da posição geo-referenciada da estação de correção.

- *Software MapSource*, versão 4.0, desenvolvido pela Garmin e utilizado para interfaceamento e coleta dos pontos armazenados nos aparelhos de GPS portáteis.

- *Software GPS TrackMaker*, versão 12.3, desenvolvido por Odilon Ferreira Júnior. Usado para a transferência dos dados coletados pelos receptores GPS móveis para o microcomputador.

- *Software WinOncore12*, versão 1.2, desenvolvido pela Motorola e utilizado em conjunto com os receptores GPS Oncore. Permite configurar os receptores GPS da Motorola e determinar a posição geo-referenciada. Possibilita ainda, exibir, gerar gráficos, imprimir dados recebidos pelo GPS, em tempo real, e criação de arquivos de registro. Suporta tanto o protocolo NMEA quanto o protocolo binário da Motorola.

- Planilha eletrônica Excel, versão 2000, desenvolvida pela Microsoft. Utilizada para o processamento dos dados, geração de gráficos e análise estatística dos resultados.

- Ambiente Integrado para Desenvolvimento C++ Builder, versão 5.0, desenvolvido pela Borland. *Software* usado no desenvolvimento do programa responsável pelo gerenciamento do sistema DGPS.

- Ambiente de desenvolvimento com compilador C Cross Work for MSP430, versão 1.2, desenvolvido pela Rowley Associates, utilizado na elaboração do aplicativo computacional executado no microcontrolador MSP430, para o gerenciamento do sistema DGPS.

⁶⁴ O termo *freeware* diz respeito a uma categoria de programas que permitem a redistribuição mas não a modificação, e seu código fonte não é disponibilizado.

- Trimble Planning, versão 2.7, desenvolvido pela Trimble, para análise da visibilidade dos satélites a partir dos dados do almanaque.

3.2 Métodos

A estação base para o fornecimento do sinal de correção diferencial é composta por um receptor GPS cuja antena é fixa e instalada em um local geo-referenciado. O sinal gerado pelo receptor de GPS base é processado por um sistema eletrônico microprocessado (podendo ser um microcomputador), transformando-se no sinal de correção RTCM SC-104. Este sinal é então enviado ao modem que fará sua modulação, enviando-o ao rádio para a transmissão. Todos os equipamentos da estação base são portáteis e com possibilidade de alimentação por baterias.

Para o recebimento do sinal de correção diferencial são necessários, para cada receptor GPS móvel, um receptor de rádio e um modem. O sinal de correção é, inicialmente, recebido pelo rádio, sendo então demodulado para a obtenção do sinal de correção diferencial no formato RTCM SC-104. O receptor de GPS móvel, ao receber o sinal de correção nesse formato, faz o processamento das informações do sinal de correção juntamente com a sua posição obtida pela captação dos sinais de satélite. Dessa forma, obter-se-á uma informação de posição corrigida com um considerável acréscimo de precisão. A Figura 12 ilustra o funcionamento do sistema de correção proposto.

O protocolo RTCM SC-104 é aceito pela maioria dos receptores GPS, inclusive os considerados de baixo custo e portáteis. Há diversos fabricantes e modelos de GPS disponíveis no mercado.

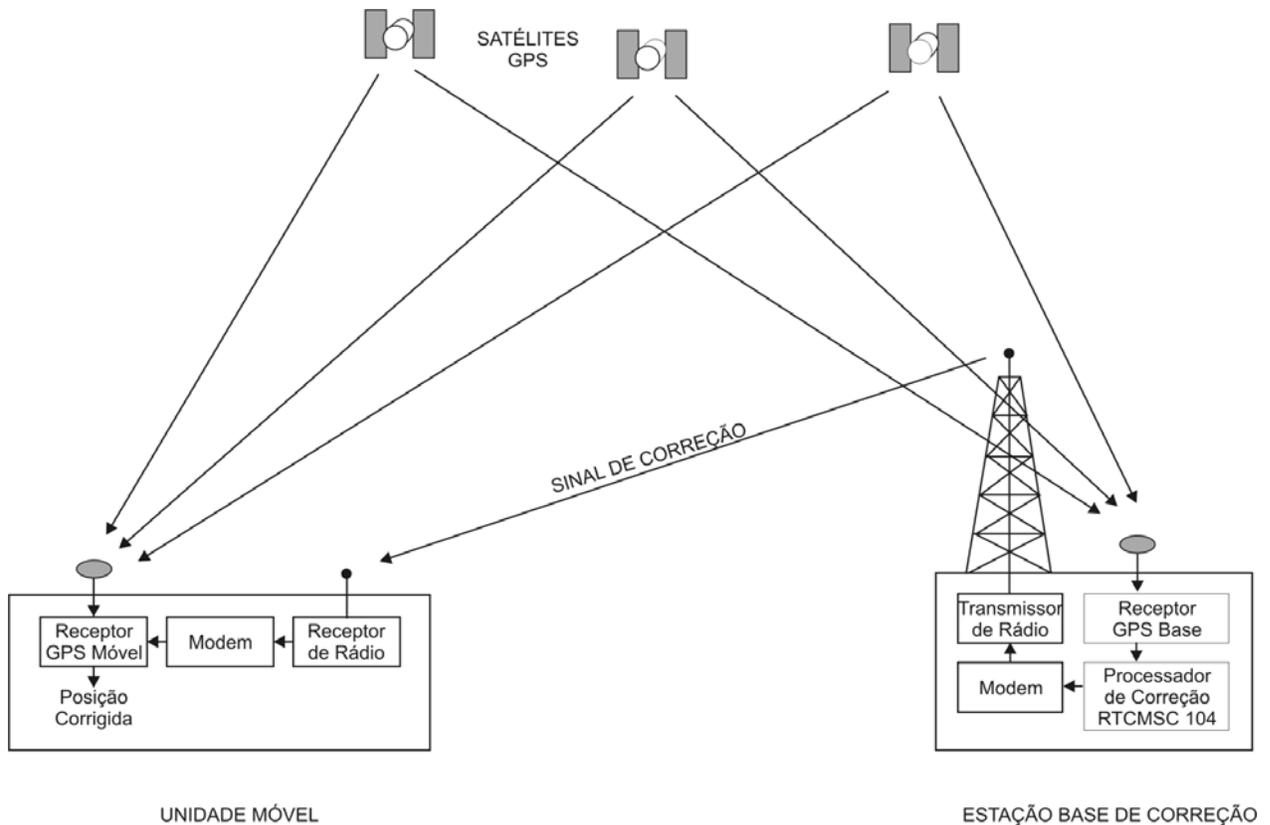


Figura 12 – Diagrama em blocos do sistema de correção e unidade móvel

Do ponto de vista físico, o equipamento de correção diferencial desenvolvido neste trabalho pode ser subdividido em duas partes: a estação base de correção – parte fixa do sistema que deve ser instalada em um local geo-referenciado, protegida e com disponibilidade de alimentação elétrica; e um módulo receptor móvel que deve estar acoplado a cada um dos receptores GPS utilizados para coleta de posições com maiores precisões.

A estação base é constituída por quatro subsistemas: 1) receptor GPS base, 2) sistema de processamento para configuração do GPS e geração da mensagem de correção RTCM SC-104, 3) conversor de taxa e modulador e 4) sistema de transmissão por rádio. A Figura 13 apresenta um diagrama de blocos simplificado, com os principais componentes da estação base.

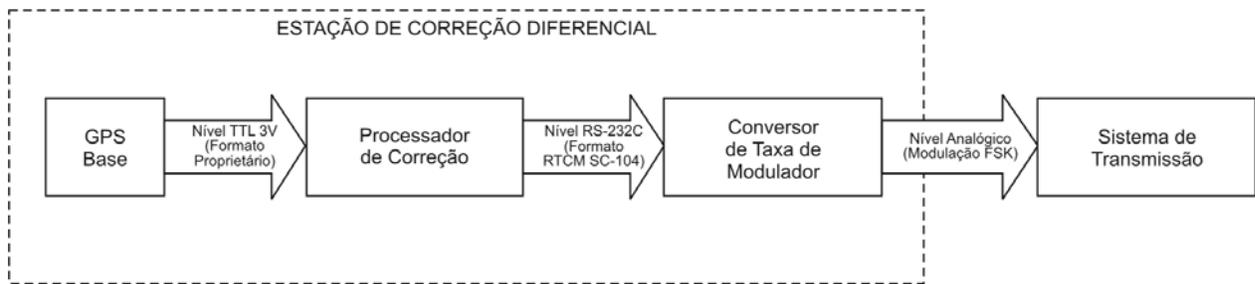


Figura 13 – Diagrama de blocos com os principais componentes da estação de correção diferencial

A parte fixa da estação de correção diferencial é constituída basicamente pelo receptor GPS base, módulo processador de correção e conversor de taxa/modulador. O sistema de transmissão, apesar de ser parte essencial no funcionamento da estação de correção diferencial, não é considerado como parte da mesma, visto que, dependendo das necessidades de cada utilização, poderá ser composto por diferentes soluções para a transmissão dos dados.

A unidade móvel do sistema de correção diferencial é composta pelos seguintes equipamentos: sistema de recepção (rádio-freqüência), módulo receptor e equipamento GPS. O módulo receptor do sistema DGPS tem a função de demodular o sinal de correção e convertê-lo a uma taxa de transmissão adequada ao receptor GPS móvel utilizado.

Para cada receptor GPS móvel usado simultaneamente é necessária a utilização de um sistema de recepção e módulo receptor. Assim como no sistema de transmissão, o sistema de recepção também não é considerado como parte integrante do sistema de correção diferencial, visto que diversas soluções poderão ser empregadas para o recebimento do sinal de correção, dependendo da aplicação. A Figura 14 apresenta um diagrama de blocos da unidade móvel.

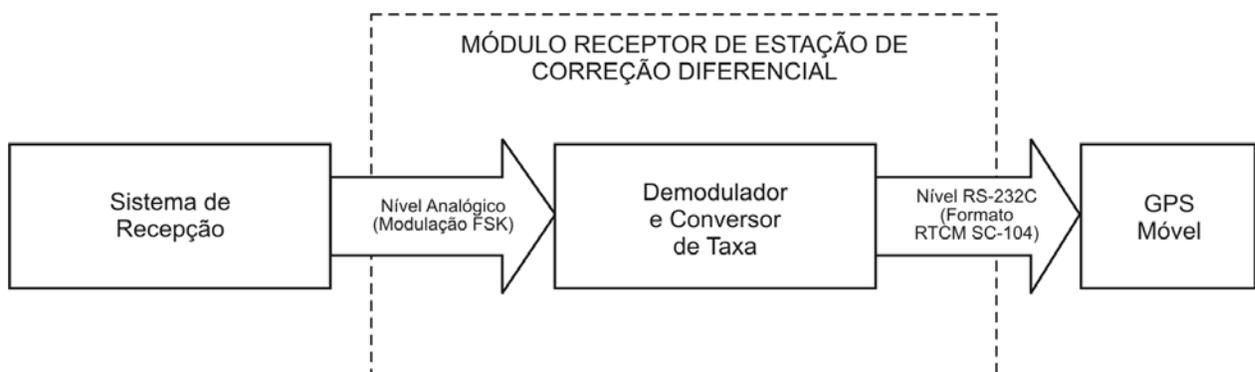


Figura 14 – Diagrama de blocos da Unidade Móvel

A metodologia adotada para o desenvolvimento do sistema de custo reduzido para geração do sinal de correção diferencial, em tempo real, para GPS pode ser definida em duas fases. A primeira fase consiste na elaboração de um protótipo com o intuito de comprovar a viabilidade técnica e econômica do sistema proposto, tendo um microcomputador atuando na função do sistema microprocessado, executando aplicativos computacionais para a configuração do receptor GPS e geração do sinal de correção no formato RTCM SC-104.

Na segunda fase, objetiva-se no desenvolvimento do equipamento microprocessado substituindo as funcionalidades do microcomputador, a partir das características do protótipo da primeira fase e o projeto dos circuitos eletrônicos do modem e conversor de taxa. O equipamento possui diversos benefícios em relação ao protótipo, atuando de forma autônoma, não havendo a necessidade de se fazer uso de um computador para efetuar configurações, pois o *software* residente no microcontrolador provê tais procedimentos.

As rotinas que compõem este *software* foram basicamente as mesmas desenvolvidas na fase inicial do projeto, pelo fato de se ter usado a mesma linguagem de programação (C/C++) . As rotinas computacionais desenvolvidas executam as seguintes funcionalidades: recebimento dos dados vindos do receptor GPS, geração da mensagem de correção no formato do protocolo RTCM SC-104, rotinas para inicialização e configuração do GPS, arquivos de armazenamento das mensagens recebidas pelo receptor GPS e processadas pelo sistema e geração de gráficos.

3.2.1 Protótipo do Sistema DGPS

Na primeira etapa do projeto, desenvolveu-se um protótipo para o sistema de geração de sinal de correção diferencial, em tempo real, para GPS. Esta fase caracterizou-se pelo desenvolvimento do aplicativo computacional que executa as rotinas de comunicação com GPS e geração da mensagem de correção no formato do protocolo RTCM SC-104, com o intuito de comprovar a viabilidade técnica e econômica para o projeto da estação DGPS. O protótipo desenvolvido possui as seguintes características técnicas:

- Receptor GPS de oito canais paralelos;
- Sentenças geradas no padrão RTCM SC-104, do tipo 1, versão 2.1;
- Tensão de alimentação de 12Vdc;

- Baixo consumo de energia;
- Operação com baterias recarregáveis do tipo selada;
- Taxa de transmissão selecionável: 1200, 2400, 4800 e 9600bps;
- Taxa de envio do sinal de correção ajustável de 1 a 30 segundos;
- Alcance máximo da estação base de correção limitada pelo transmissor utilizado no protótipo;
- Operação não autônoma exigindo um microcomputador para executar os softwares para a montagem da mensagem de correção, configuração e inicialização do receptor GPS base.

O Quadro 8 descreve os equipamentos utilizados no protótipo da estação base de correção diferencial.

Quadro 8 – Equipamentos do Protótipo da Estação DGPS

Módulo	Descrição
Receptor GPS	Motorola Oncore VP
Processador de Correção	Microcomputador PC
Modulador/Conversor de Taxa	TrimMarkII
Rádio Transmissor	

Para o desenvolvimento do protótipo utilizou-se o receptor GPS Oncore VP, do tipo estação base, para gerar o sinal de correção. A Figura 15 mostra o diagrama interno do receptor GPS Motorola Oncore VP, conforme informações do fabricante.

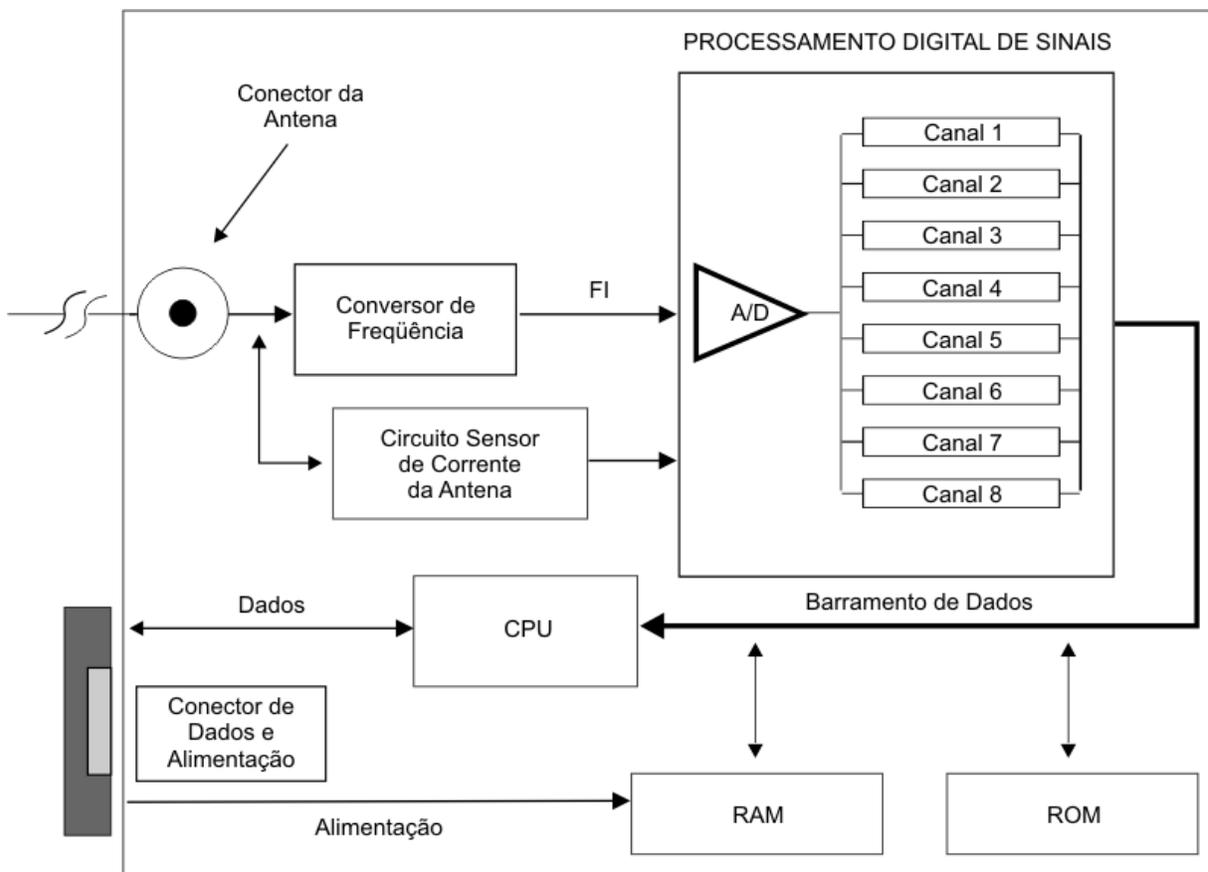


Figura 15 – Diagrama interno do receptor GPS Motorola Oncore VP (modificado do manual técnico do fabricante)

Para o desenvolvimento do projeto, montou-se a placa receptora GPS Oncore VP em uma placa padrão de circuito impresso, onde foram também incluídos circuitos reguladores de tensão de 12Vdc para 5Vdc (CI LM7805), conversor de nível utilizando um circuito integrado MAX232, responsável por compatibilizar os níveis RS-232C dos equipamentos com os níveis TTL-5V da placa receptora GPS Oncore VP.

Para facilitar a etapa de desenvolvimento do aplicativo e dos testes iniciais usou-se como plataforma computacional um microcomputador, padrão PC. Desenvolveu-se um aplicativo computacional para montar as mensagens de correção no formato do protocolo RTCM SC-104 com os campos de informação de cada satélite e cálculo dos bits de paridade. O aplicativo é constituído por cinco rotinas principais: inicialização das portas seriais, leitura das sentenças do GPS, conversão dos campos de informação do formato proprietário da Motorola para o padrão RTCM SC-104, montagem das sentenças RTCM e escrita da

mensagem de correção na porta serial. Foi desenvolvido na linguagem de programação C/C++, empregando-se a ferramenta IDE C++ Builder, versão 5.0 da Borland. A escolha desta linguagem de programação se deu em função da existência de compiladores que permitem a programação do microcontrolador MSP430 utilizado na placa processadora de correção, a partir de programas fontes gerados nessa linguagem.

O microcomputador recebe o sinal de correção do receptor de GPS base no formato proprietário da Motorola e o converte no sinal de correção diferencial no padrão RTCM SC-104. A taxa de envio do sinal de correção enviado pelo computador pode ser ajustada para: 1200, 2400, 4800 ou 9600bps. O microcomputador possui duas interfaces seriais padrão RS-232C. Uma delas atua somente como saída (unidirecional), enviando o sinal de correção diferencial para o modulador. A outra é bidirecional, sendo utilizada para o recebimento das informações do receptor GPS e para a configuração da estação base diferencial através do microcomputador. Esta saída pode ser usada também para o monitoramento do receptor GPS base. A Figura 16 mostra o diagrama de blocos da plataforma computacional para o desenvolvimento do aplicativo para geração do sinal de correção.

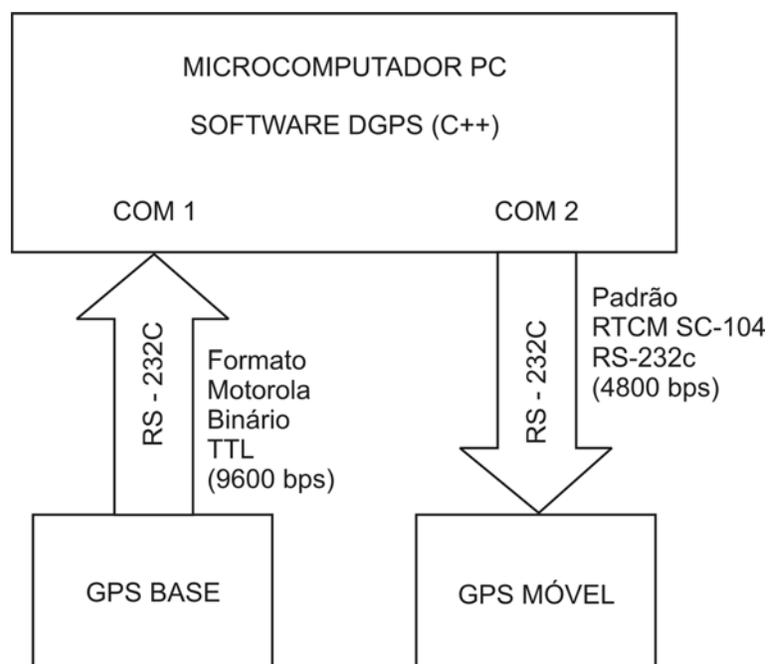


Figura 16 – Plataforma computacional para o desenvolvimento do aplicativo para geração do sinal de correção diferencial

Nesta fase, para os processos de modulação, conversão de taxa e transmissão do sinal, utilizou-se o rádio transmissor modelo TrimMark II Base/Repeater, marca Trimble. Este sistema de comunicação recebe o sinal de correção enviado pelo computador pela porta serial RS-232C, executa os processos de modulação, conversão de taxas e transmissão por radiofrequência na faixa de UHF. A Figura 17 ilustra o esquema de ligação dos equipamentos do protótipo da estação base de correção diferencial.

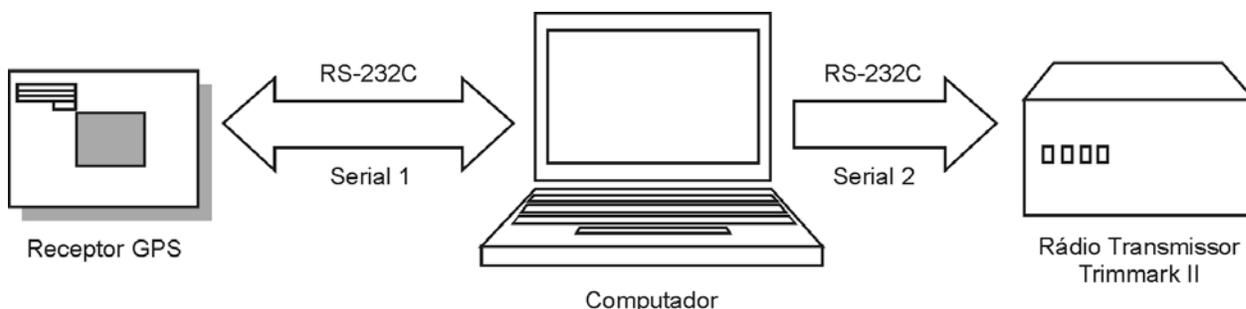


Figura 17 – Esquema de conexão dos equipamentos do protótipo

Nesta etapa inicial, utilizou-se o rádio receptor móvel Trimmark II Rover, que recebe o sinal de correção diferencial proveniente da estação fixa, enviando-o ao receptor de GPS. Este equipamento executa todas as funcionalidades do módulo receptor: recepção do sinal por rádio, demodulação e ajuste da taxa. O receptor GPS processa o sinal de correção, juntamente com a posição atual, fornecendo então, dados de posição geo-referenciados.

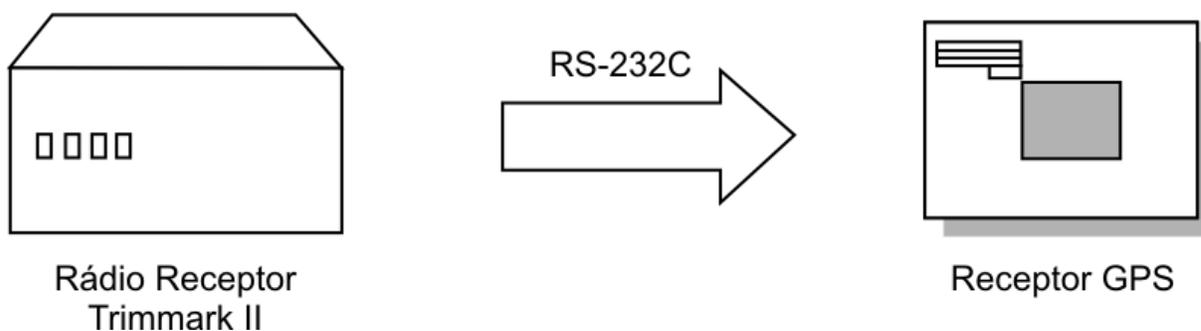


Figura 18 – Esquema do módulo receptor GPS móvel

Todos os equipamentos empregados possuíam entrada para sinal de correção diferencial em tempo real, no padrão RTCM SC-104. O Quadro 9 resume os principais equipamentos usados no módulo receptor móvel.

Quadro 9 – Equipamentos do protótipo da estação DGPS

Módulo	Descrição
Receptor GPS Móvel	Equipamentos de navegação com entrada de sinal de correção diferencial no padrão RTCM SC-104
Rádio Receptor Demodulador/Conversor de Taxa	TrimMarkII Rover

3.2.1.1 Tipos de Sentenças RTCM SC-104

O protocolo RTCM SC-104 especifica 33 tipos de mensagens de um total máximo de 64. Para o sistema DGPS utilizou-se a mensagem Tipo 1⁶⁵, que contém os parâmetros para a geração do sinal de correção diferencial. A título de informação adicional, para o sistema RTK, é utilizada a mensagem tipo 18 (RTCM, 1998). Como este trabalho tem por objetivo a geração do sinal de correção para o sistema DGPS, foi estudada somente a mensagem Tipo 1 deste protocolo. Para maiores informações sobre as outras mensagens, consultar (RTCM, 1998).

O comitê RTCM SC-104 determinou os dados de correção necessários para os vários tipos de GNSS diferencial. O padrão para correção diferencial utiliza um formato de mensagens com tamanhos variáveis e possui um código para detecção de erros nos dados. O formato geral da mensagem do protocolo RTCM SC-104 é constituído por palavras de 30 bits. A primeira e a segunda palavra de uma mensagem possuem informações específicas e inerentes a qualquer tipo de mensagem. Cada mensagem é constituída de $N+2$ palavras, onde as N palavras contêm as informações da mensagem de correção. O valor de N varia com o tipo e conteúdo da mensagem. O tamanho da palavra e o código de paridade são idênticos aos da mensagem de navegação do GPS (GPS SPS *Signal Specification*, 1995).

⁶⁵ Mensagem Tipo 1: *Differential GPS Corrections*.

As duas primeiras palavras são usadas como cabeçalho para todos os tipos de mensagens especificadas no protocolo RTCM SC-104 e contêm as informações relacionadas à estação de referência, tempo de referência e sincronização da mensagem do usuário. Os conteúdos destas palavras são apresentados na Figura 19.

Bit1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Preâmbulo								Tipo de Mensagem						ID da Estação de Referência						Bits de Paridade									

Bit1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Contador-Z modificado												Nº de seq			Tam. da msg			Saúde Est.			Bits de Paridade								

Figura 19 – Formato do cabeçalho para todas as mensagens

O Quadro 10 descreve os conteúdos dos campos que compõem o cabeçalho de todas as mensagens especificadas no protocolo RTCM SC-104.

Quadro 10 – Descrição dos campos das palavras 1 e 2

Palavra	Campo	Nº de Bits	Fator de Escala e Unidades	Faixa
Primeira	Preâmbulo	8	--	--
	Tipo de mensagem	6	1	1-64
	ID da estação de referência	10	1	0-1023
	Paridade	6	Ver documento (GPS <i>SPS Signal Specification, 1995</i>)	
Segunda	Contador-Z modificado	13	0,6 segundos	0-3599,4 segundos
	Número de seqüência	3	1	0-7
	Tamanho da mensagem - N	5	1 Palavra	0-31 Palavras
	Saúde da estação de referência	3	--	8 Estados
	Paridade	6	Ver documento (GPS <i>SPS Signal Specification, 1995</i>)	

Os primeiros oito bits da primeira palavra correspondem ao campo “preâmbulo” utilizado para sincronização. O campo “tipo da mensagem” é o número correspondente à mensagem que será usada. O campo “ID da estação” identifica a estação de referência, ou seja, o receptor base. O “contador-z modificado” (*z-count*) corresponde ao instante (t_0) da geração

da mensagem, sendo o tempo de referência para os parâmetros da mensagem. O “tamanho da mensagem” diz respeito ao número de palavras de dados de 30bits (N) mais o cabeçalho. O campo “saúde da estação de referência” é um indicador de estado da estação de referência. Os valores deste campo são apresentados no Quadro 11. Finalmente, os seis últimos bits de todas as palavras da mensagem correspondem ao código de paridade, que é o mesmo usado no próprio sistema GPS.

Quadro 11 – Indicador do estado da estação de referência

Valor	Indicação
111	A estação de referência não está em operação
110	A transmissão da estação de referência não está sendo monitorada
101	Fator de escala UDRE = 0,1
100	Fator de escala UDRE = 0,2
011	Fator de escala UDRE = 0,3
010	Fator de escala UDRE = 0,5
001	Fator de escala UDRE = 0,75
000	Fator de escala UDRE = 1

A correção aplicada à pseudodistância $PRC(t)^{66}$, medida por qualquer receptor móvel e calculada no instante t da observação, é dada pela Equação 2.

$$PRC(t) = PRC(t_0) + RRC \times (t - t_0) \quad \text{Equação 2}$$

Onde $PRC(t_0)$ corresponde aos 16 bits para a correção da pseudodistância, RRC^{67} é a taxa de alteração da correção da pseudodistância de oito bits e t_0 é o contador-z modificado de 13 bits contido na segunda palavra (cabeçalho da mensagem). Todos estes parâmetros estão associados com o satélite indicado no campo “ID Satélite” localizado na primeira palavra. Desta forma, a medida da pseudodistância do receptor móvel – $PRM(t)$ é corrigida somando-se a correção $PRC(t)$, conforme apresentado na Equação 3.

⁶⁶ PRC: *Pseudo Range Correction*.

⁶⁷ RRC: *Rate Range Correction*.

$$PR(t) = PRM(t) + PRC(t)$$

Equação 3

Onde $PR(t)$ é a medida da pseudodistância corrigida que deverá ser processada pelo receptor GPS móvel.

A mensagem tipo 1 contém informações para todos os satélites visíveis pela estação de referência (N_s). É necessário, para cada satélite, um total de 40 bits para correção do sinal. Desta forma, haverá situações onde o total de palavras da mensagem não será um número inteiro. Nestes casos, a última palavra deverá ser preenchida com oito ou dezesseis bits para se ter um número inteiro de palavras. O preenchimento será feito com 0's e 1's alternados.

Os formatos das palavras da mensagem do tipo 1 e o preenchimento dos respectivos campos são mostrados na Figura 20. Cada palavra da mensagem possui um dos 5 formatos, a não ser que seja a última palavra da mensagem. Se o número de satélites não for um múltiplo de três, a última palavra terá um dos dois formatos contendo 8 ou 16 bits para preenchimento. Cada palavra de correção de 40 bits para cada satélite rastreado pela estação base possui os seguintes campos: SF⁶⁸ (fator de escala), UDRE⁶⁹ (estimativa do UDRE na pseudodistância), ID Sat (identificador do satélite), PRC (correção para a pseudodistância no instante t_0), RRC (variação da correção da pseudodistância com o tempo) e IOD⁷⁰ – (emissão dos dados: última atualização das efemérides usadas na estação de referência).

⁶⁸ SF: *Scale Factor*.

⁶⁹ UDRE: *User Differential Range Error*.

⁷⁰ IOD: *Issue of Data*.

- Formato das palavras 3, 8, 13 ou 18:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
SF	UDRE	ID Sat						PRC															Paridade						

- Formato das palavras 4, 9, 14 ou 19:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RRC								IOD								SF	UDRE	ID Sat						Paridade					

- Formato das palavras 5, 10, 15 ou 20:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PRC																RRC						Paridade							

- Formato das palavras 6, 11, 16 ou 21:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
IOD								SF	UDRE	ID Sat						PRC (Byte Alto)						Paridade							

- Formato das palavras 7, 12, 17 ou 22:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PRC (Byte Baixo)								RRC								IOD						Paridade							

- Formato da última palavra ($N_s + 2$), $N_s = 1, 4, 7$ ou 10 :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RRC								IOD								Preenchimento						Paridade							

- Formato da última palavra ($N_s + 2$), se $N_s = 2, 5, 8$ ou 11 :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
IOD								Preenchimento															Paridade						

Figura 20 – Mensagem tipo 1 – Correção diferencial para GPS

O campo “Preenchimento” será constituído por valores binários 0’s e 1’s alternadamente. O Quadro 12 mostra a descrição dos campos da palavra de correção.

Quadro 12 – Conteúdos da mensagem Tipo 1

Campo	Nº de Bits	Fator de Escala	Faixa
SF	1	Ver Quadro 13	2 estados
UDRE	2	Ver Quadro 14	4 estados
ID Satélite	5	1	1-32
PRC(t_0)	16	0,02 ou 0,32m	$\pm 655,34$ ou $\pm 10.485,44$ m
RRC	8	0,002 ou 0,032m/s	$\pm 0,254$ ou $\pm 4,064$ m/s
IOD	8	(GPS/SPS <i>Signal Specification</i> , 1995)	
Preenchimento	8 x ($N_s \text{ mod } 3$)	Bits	0, 8 ou 16
Paridade	N x 6	(GPS/SPS <i>Signal Specification</i> , 1995)	

Onde N_s corresponde ao número de satélites contidos na mensagem e N ao número de palavras contidas na mensagem. O tamanho total da mensagem é $N + 2$ palavras, considerando as duas palavras referentes ao cabeçalho.

A partir do quadro acima, cabem algumas observações. Os valores dos parâmetros $PRC(t_0)$ e RRC são representados em complemento de 2; os valores binários “1000000000000000” e “10000000” dos parâmetros $PRC(t_0)$ e RRC , respectivamente, indicam que ocorreu um problema e o receptor móvel deve parar de utilizar os dados do satélite correspondente e o satélite de número 32 é indicado com o valor binário “00000” no campo ID Satélite.

Com o passar do tempo, o valor de correção para a pseudodistância – $PRC(t_0)$ divergirá do valor apropriado. Devido a esta característica, o valor do $PRC(t_0)$ deverá ser atualizado e transmitido tão freqüente quanto possível. O receptor móvel deve atualizar o cálculo da correção à medida que recebe novos valores do $PRC(t_0)$.

O campo RRC é projetado para compensar a taxa de mudança prevista do valor de correção da pseudodistância. É uma tentativa de estender a validade do valor de $PRC(t_0)$ a

medida que o tempo passa. O *RRC* também pode ser usado para corrigir o valor da velocidade do receptor móvel.

O campo *IOD* é incluído na mensagem para assegurar que os cálculos realizados pelo receptor GPS móvel e as correções da estação de referência façam uso do mesmo conjunto de satélites. O Quadro 13 descreve os valores do campo Fator de Escala – FS.

Quadro 13 – Fator de Escala

Valor	Descrição
0	O Fator de Escala para o PRC é 0,02m e para o RRC é 0,002m/s
1	O Fator de Escala para o PRC é de 0,32m e para o RRC é de 0,032m/s

O motivo para manter o fator de escala em dois níveis deve-se à manutenção do alto grau de precisão na maior parte do tempo e para permitir o incremento da taxa de correção nas ocasiões em que forem necessárias.

O Quadro 14 mostra os valores do campo UDRE. Este campo é uma estimativa de incerteza na correção da pseudodistância determinada pela estação de referência e combina os efeitos de multicaminhamento, taxa sinal/ruído e outros efeitos. O erro diferencial deve ser multiplicado pelo fator de escala UDRE provido no cabeçalho da mensagem (Quadro 11).

Quadro 14 – Valores de UDRE

Valor	Erro Diferencial
00	≤ 1 metro
01	> 1 metro e ≤ 4 metros
10	> 4 metros e ≤ 8 metros
11	> 8 metros

Conclui-se que o protocolo RTCM define os formatos dos dados que serão transmitidos da estação de referência base para a estação remota. Tais dados serão utilizados para o cálculo da correção no receptor móvel. Os resultados (por exemplo, a posição da estação remota), bem como outros tipos de informação, poderão ser apresentados seguindo os formatos definidos pelo padrão NMEA.

Código de Paridade

O Código de Paridade corresponde aos seis últimos bits de cada palavra de 30 bits da mensagem de correção (GPS/SPS *Signal Specification*, 1995). Os bits de paridade possibilitam, no receptor móvel, a detecção de erros na mensagem de navegação decodificada provenientes da demodulação. O Quadro 15 descreve as equações para a geração dos bits de paridade.

Quadro 15 – Equações para geração dos bits de paridade

$$\begin{aligned} D1 &= d1 \oplus D^*30 \\ D2 &= d2 \oplus D^*30 \\ D3 &= d3 \oplus D^*30 \\ &\vdots \\ D24 &= d24 \oplus D^*30 \\ D25 &= D^*29 \oplus d1 \oplus d2 \oplus d3 \oplus d5 \oplus d6 \oplus d10 \oplus d11 \oplus d12 \oplus d13 \oplus d14 \oplus d17 \oplus \\ &d18 \oplus d20 \oplus d23 \\ D26 &= D^*30 \oplus d2 \oplus d3 \oplus d4 \oplus d6 \oplus d7 \oplus d11 \oplus d12 \oplus d13 \oplus d14 \oplus d15 \oplus d18 \oplus \\ &d19 \oplus d21 \oplus d24 \\ D27 &= D^*29 \oplus d1 \oplus d3 \oplus d4 \oplus d5 \oplus d7 \oplus d8 \oplus d12 \oplus d13 \oplus d14 \oplus d15 \oplus d16 \oplus \\ &d19 \oplus d20 \oplus d22 \\ D28 &= D^*30 \oplus d2 \oplus d4 \oplus d5 \oplus d6 \oplus d8 \oplus d9 \oplus d13 \oplus d14 \oplus d15 \oplus d16 \oplus d17 \oplus \\ &d20 \oplus d21 \oplus d23 \\ D29 &= D^*30 \oplus d1 \oplus d3 \oplus d5 \oplus d6 \oplus d7 \oplus d9 \oplus d10 \oplus d14 \oplus d15 \oplus d16 \oplus d17 \oplus \\ &d18 \oplus d21 \oplus d22 \oplus d24 \\ D30 &= D^*29 \oplus d3 \oplus d5 \oplus d6 \oplus d8 \oplus d9 \oplus d10 \oplus d11 \oplus d13 \oplus d15 \oplus d19 \oplus d22 \oplus \\ &d23 \oplus d24 \end{aligned}$$

Onde:

$d1, d2, \dots, d24$ correspondem aos bits de dados fonte;

O caracter * é usado para identificar os dois últimos bits da palavra anterior;

$D25, \dots, D30$ correspondem aos bits de paridade calculados;

$D1, D2, D3, \dots, D29, D30$ são os bits de paridade transmitidos pelo satélite e;

O símbolo \oplus corresponde à operação lógica ou-exclusivo.

Os bits de paridade do sinal de correção diferencial no padrão RTCM SC-104 devem ser gerados pelo sistema. Os 24 bits de informação mais os dois últimos bits da palavra anterior são usados para o cálculo de paridade da palavra atual. Os seis bits de paridade são colocados no final da sentença, formando a palavra de 30 bits da mensagem de correção.

3.2.1.2 Aplicativos para Configuração do Receptor GPS Base

Para a configuração dos parâmetros operacionais do protótipo da estação base de correção diferencial utilizou-se uma versão de avaliação do *software* Tac32 desenvolvido pela CNS Systems. Com o uso deste *software* puderam-se configurar parâmetros de operação tais como: taxa de transmissão do sinal de correção, máscara de elevação, escolha de satélites e de suas geometrias, posição geo-referenciada da estação de correção, entre outras. A *Figura 21* mostra a tela do *software* Tac32 para configuração do receptor de GPS.

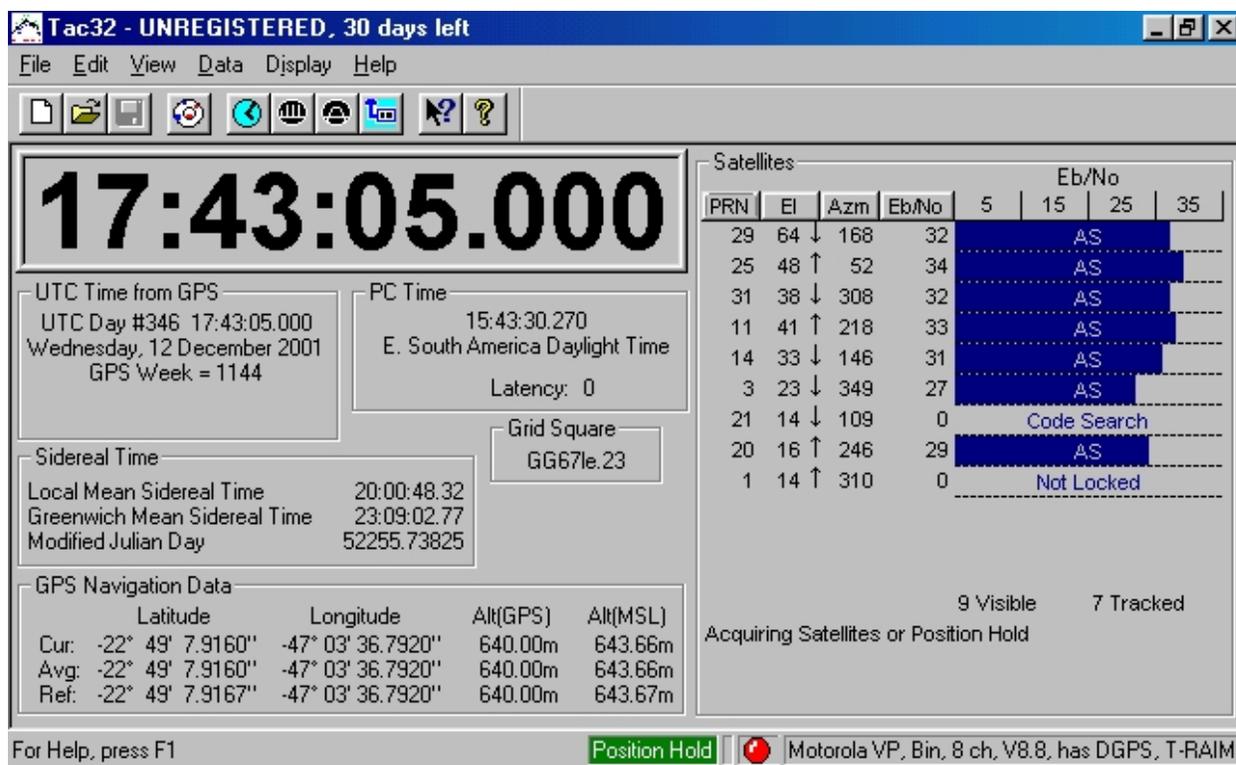


Figura 21 – Tela do software Tac32 utilizado para configuração do receptor de GPS

Posteriormente, o Tac32 foi substituído pelo *software* WinOncore 12, para a inicialização e configuração do receptor GPS. Essa mudança ocorreu em virtude deste último

ser de uso gratuito e direcionado para os receptores GPS fabricados pela Motorola utilizados neste trabalho. A *Figura 22* apresenta a tela principal do *software WinOncore 12*.

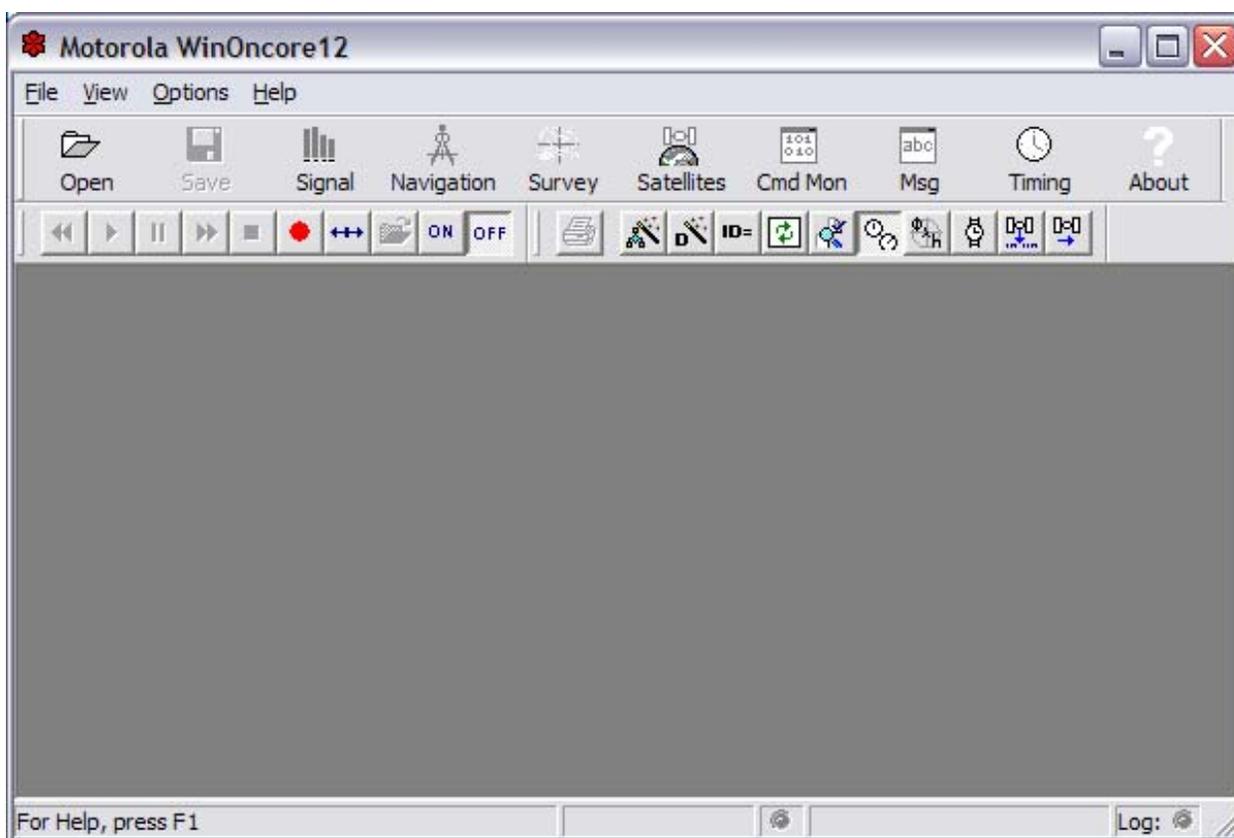


Figura 22 – Tela principal do software WinOncore 12, Motorola

Para o geo-referenciamento dos marcos utilizados como base para o sistema de correção diferencial e onde ficaram localizados os aparelhos de GPS, foi utilizado o aparelho receptor de GPS Ag132. Utilizou-se o software SA Watch para a determinação precisa da posição geo-referenciada da antena do receptor de GPS da estação base. A *Figura 23* mostra a tela principal do software SA Watch. Configurou-se este aplicativo para coletar pontos a cada 15 segundos, durante um intervalo de tempo de 24 horas para a base e também para o ponto onde foram instalados os GPS móveis. O aplicativo SA Watch é usado para analisar e monitorar os desvios do receptor GPS quando o mesmo está localizado em uma posição fixa.

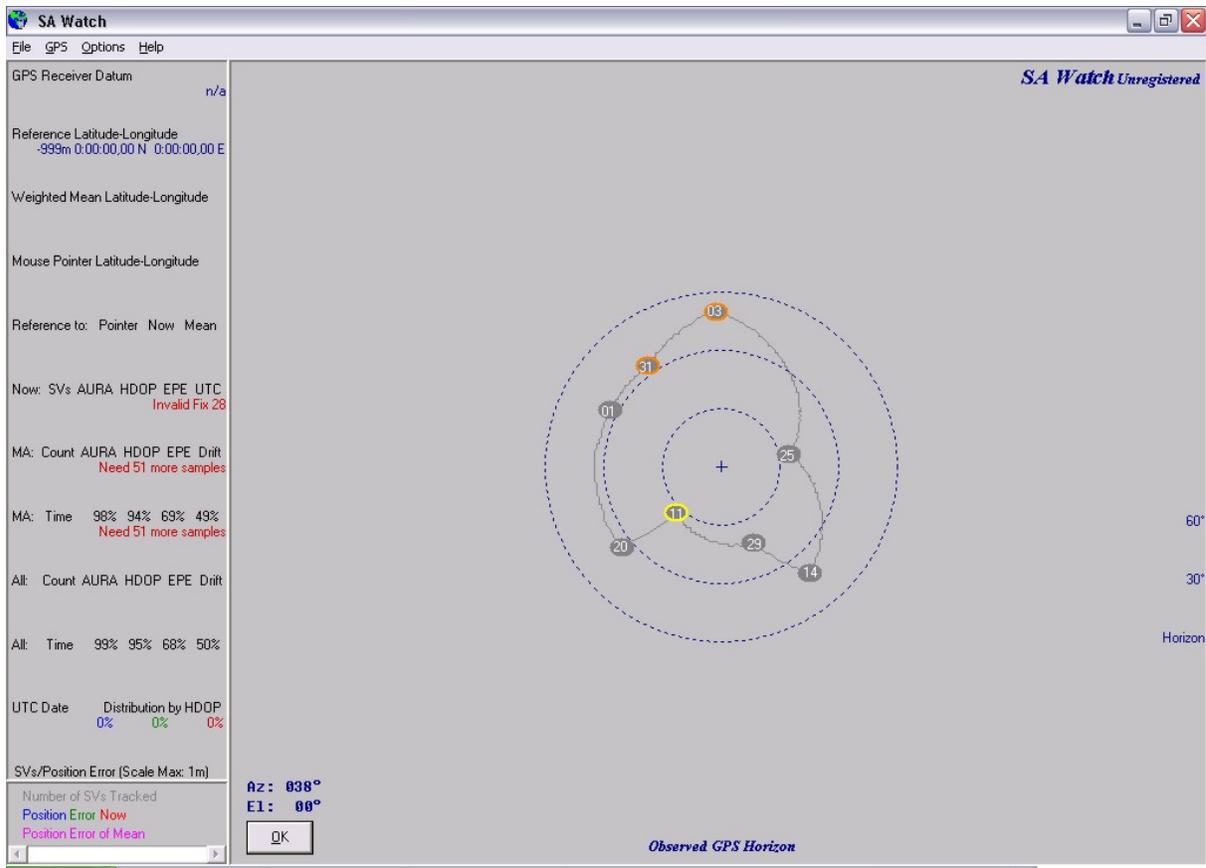


Figura 23 – Tela principal do software SA Watch

3.2.1.3 Software para Geração do Sinal de Correção Diferencial

Para o desenvolvimento das rotinas computacionais responsáveis pela geração da mensagem de correção no formato RTCM SC-104 utilizou-se o ambiente de desenvolvimento C++ Builder, compatível com os sistemas operacionais Windows 9X, 2000 e XP. O C++ Builder é uma IDE⁷¹, que possibilita facilmente o desenvolvimento de interfaces visuais e implementação de programas computacionais através da linguagem de programação C/C++, para vários tipos de aplicação e, em especial, para o desenvolvimento de softwares básicos, onde o presente trabalho se insere.

⁷¹ IDE: *Integrated Development Environment*.

O ambiente de desenvolvimento C++ Builder se caracteriza por ser orientado a eventos e a objetos. É baseado em componentes que encapsulam as funcionalidades do sistema operacional Windows, permitindo assim, o rápido desenvolvimento da interface visual (tela de interação entre o usuário com o sistema). Basicamente, é constituído de 4 janelas: a Janela Principal do aplicativo contendo os “menus” de opções; o *Object Inspector* para alteração das propriedades dos componentes; o *Form* que é a janela de interface e onde os componentes são adicionados e o *Code Editor* onde são escritas as rotinas computacionais.

A mensagem de correção no formato RTCM SC-104 é montada a partir da mensagem de correção gerada pelo receptor GPS Motorola Oncore VP, no formato proprietário, sendo identificada pelo cabeçalho @@Ce. A mensagem contém as informações necessárias para o desenvolvimento da mensagem de correção RTCM SC-104. Possui o seguinte formato geral:

@@CettipprrrdipprrrdipprrrdipprrrdipprrrdipprrrdC<CR><LF>

A mensagem tem tamanho fixo de 52 caracteres e contém informações de 6 satélites. São enviadas pelo receptor GPS Base duas sentenças consecutivas de correção neste formato. O Quadro 16 descreve os campos desta mensagem.

Quadro 16 – Descrição da mensagem de correção @@Ce

Campo	Significado	Faixa de Valores
@@Ce	Cabeçalho	
ttt	Referência de tempo GPS	0..6047999 (0.0..604799.9)
l	Identificador do Satélite. O valor 0 indica que o satélite não é usado.	0..32.
ppp	PRC – <i>pseudorange rate correction</i> . Resolução de 0,01 metros (-10.485,76..+10.485,76)	-1.048.576..+1.048.576
rr	RRC - <i>pseudorange rate correction</i> . Resolução de 0,001m/s (-4,096..+4,096)	-4096..+4096
D	<i>Issue of Data</i>	0..255
C	<i>Cheksum</i>	
CR	Caracter de retorno de linha	
LF	Caracter próxima linha	

A rotina para geração da mensagem de correção no formato RTCM SC-104 recebe a sentença de correção gerada pelo receptor GPS base como parâmetro, faz a separação dos

campos, considerando somente as informações dos satélites identificados e faz a montagem das palavras de 30 bits conforme especificação contida no protocolo RTCM.

O Quadro 17 apresenta um exemplo de informações em hexadecimal de uma mensagem de correção gerada pelo receptor GPS Motorola Oncore VP. São enviadas, consecutivamente, duas mensagens de correção para um total de 12 satélites.

Quadro 17 – Mensagem de Correção gerada pelo receptor GPS VP Oncore

Mensagem de Correção																									
40	40	43	65	2F	5F	F8	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	08	FC	48	AC	FE	C4	C0	00
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	44	0D	0A				
40	40	43	65	2F	5F	F8	00	00	00	00	00	00	04	FE	E4	DA	02	C5	72	00	00	00	00	00	00
00	00	00	00	00	00	00	18	04	BC	05	FE	A9	E6	00	00	00	00	00	00	00	00	CB	0D	0 ^A	

O receptor GPS gera diversas mensagens, para diferentes propósitos e são identificadas pelos 4 primeiros *bytes*. Os quatro primeiros bytes (40 40 43 65), representados em hexadecimal, correspondem ao código ASCII dos caracteres do cabeçalho da mensagem de correção – “@@Ce”. O programa identifica a mensagem de correção através destes *bytes*, e depois armazena os demais da mensagem de correção, a partir do número total de *bytes* que é conhecido e fixo. Após a obtenção da mensagem, é feita a separação dos campos válidos para cada satélite rastreado. Do exemplo do Quadro 17 é possível verificar que foram rastreados 3 satélites: 08, 04 e 24 (18H). O Quadro 18 apresenta as informações dos satélites.

Quadro 18 – Exemplo de Informações dos satélites capturados para a geração da mensagem de correção no formato RTCM

IDSAT	PRC	RRC	ISSUE
08	FC48AC	FEC4	C0
04	FEE4DA	02C5	72
18	04BC05	FEA9	E6

Na mensagem de correção, no formato do protocolo RTCM, os campos PRC e RRC possuem tamanhos em bits de 16 e 8, respectivamente. Os campos são armazenados na mensagem de correção, em escalas de 0,02 ou 0,32 metros para o campo PRC e 0,002 ou 0,032 metros/segundo para o campo RRC (RTCM Special Committee N. 104, 1998).

Na mensagem de correção gerada pelo receptor GPS da Motorola Oncore VP e M12+, os campos PRC e RRC são de 24 e 16 bits, respectivamente. Portanto, os valores dos campos PRC e RRC da mensagem de correção gerada pelo receptor GPS devem ser divididos por 2 ou 32, em função do fator de escala, para atribuição na mensagem RTCM. Normalmente, são utilizados os fatores de escala 0,02m e 0,002m/s em virtude da precisão dos valores. A exceção ocorre quando os valores destes campos são maiores ou menores que a faixa de valores correspondentes. Assim, é necessário dividir por 32 para que estes valores possam estar nos fatores de escala 0,32m e 0,032m/s, onde tem-se uma maior faixa de valores.

As palavras da mensagem de correção RTCM possuem tamanho fixo de 30 bits e a quantidade de palavras de uma sentença de correção é definida pelo número de satélites que foram rastreados. Cada palavra de 30 bits é configurada em 5 bytes. Para obter o número total de bytes da mensagem basta multiplicar o número de palavras por cinco e adicionar os bytes 0DH e 0AH para indicar o final da mensagem. Estes valores correspondem, respectivamente, aos caracteres *Line Feed* e *Carriage Return*. A Tabela 1 apresenta o número total de palavras e quantidade de bytes da mensagem de correção RTCM em função do número de satélites capturados.

Tabela 1 – Número total de palavras e bytes das mensagens de correção em função do número de satélites capturados

Num. Sat.	Palavras	Bytes
1	4	$4*5+2=22$
2	6	$6*5+2=32$
3	7	$7*5+2=34$
4	9	$9*5+2=47$
5	11	$11*5+2=57$
6	12	$12*5+2=62$
7	14	$14*5+2=72$
8	16	$16*5+2=82$
9	17	$17*5+2=87$
10	19	$19*5+2=97$
11	21	$21*5+2=107$
12	22	$22*5+2=112$

Após a montagem das palavras de 30 bits da mensagem de correção, incluindo os bits de paridade, cada palavra é montada em um conjunto de 5 *bytes*, onde os dois bits mais significativos de cada *byte*, sempre assumem os valores 0 e 1. Os 6 bits restantes de cada *byte* são preenchidos com os valores contidos na palavra de correção e colocados na ordem inversa a qual aparecem na palavra de correção. Se o bit 30 da palavra anterior for 1, os 6 bits de cada *byte* da próxima palavra devem ser complementados, exceto os bits correspondentes ao código de paridade.

Para a obtenção do código de paridade, desenvolveu-se uma estrutura de dados, em bits, de forma a identificar cada um dos bits individualmente da palavra de correção. Em seguida, utilizou-se as fórmulas para o cálculo dos bits de paridade especificada no Quadro 15.

O algoritmo para obtenção da mensagem de correção no formato RTCM SC-104 pode ser resumido nos seguintes passos:

- 1 – Leitura das informações enviadas pelo receptor GPS através de uma das portas seriais do microcomputador;
- 2 – Identificação das mensagens de correção através do cabeçalho “@@Ce”;
- 3 – Separação das informações da mensagem de correção para cada satélite;
- 4 – Montagem das palavras de 30 bits a partir das informações identificadas no item 3;
- 5 – Obter os bits de paridade para cada palavra;
- 6 – Inversão de todos os bits, exceto os bits de paridade, da próxima palavra se o bit 30 da palavra anterior for 1;
- 7 – Montagem da mensagem de correção no formato RTCM para a transmissão, ou seja, os 5 bytes que serão transmitidos para cada uma das palavras de 30 bits;
- 8 – Acréscimo dos bytes 0DH e 0AH para indicar o final da mensagem de correção;
- 9 – Envio da mensagem através da segunda porta serial.

O campo SF – Fator de Escala é definido com o valor 0 quando os fatores de escala forem 0,02m e 0,002m/s para os campos PRC e RRC, respectivamente, ou com o valor 1 quando os fatores de escala forem 0,32m e 0,032m/s. Estas escalas dependem da magnitude dos valores de PRC e RRC gerados e enviados pelo receptor GPS base (RTCM Special Committee N. 104, 1998). Os fatores de escala iguais a 0,02m e 0,002m/s possibilitam um intervalo de valores entre $\pm 655,34\text{m}$ para PRC e $\pm 0,254\text{m/s}$ para RRC, e os fatores de escala

0,32m e 0,032m/s permitem faixas de valores de $\pm 10485,44\text{m}$ para PRC e $\pm 4,064\text{m/s}$ para RRC.

Os receptores GPS base Oncore VP e M12+ da Motora representam os valores de PRC e RRC em 3 e 2 bytes, respectivamente. Desta forma, a faixa de valores para PRC é de $\pm 1048576\text{m}$ e para RRC é de $\pm 4096\text{m/s}$. Estes valores estão na escala de 0,01m para PRC e 0,001m/s para RRC. Vale ressaltar que os números negativos estão representados na forma de complemento de dois.

A conversão dos valores dos campos PRC e RRC contidos na mensagem de correção gerada pelo receptor GPS para o formato do protocolo RTCM SC-104 e a determinação do campo fator de escala se dá através do seguinte procedimento:

- 1 – Obtenção do número inteiro com sinal de PRC e RRC da mensagem de correção @@Ce;
- 2 – Divisão do valor de PRC por 0,01 e RRC por 0,001;
- 3 – Se estes valores estiverem compreendidos nos intervalos dos fatores de escala 0,02m e 0,002m/s, o campo FS recebe o valor 0 e os valores de PRC e RRC são divididos por 2 para ajustá-los no formato RTCM. Se qualquer um dos valores não estiver compreendido nestes intervalos, os campos PRC e RRC serão ajustados nos fatores de escala 0,32m e 0,032m/s. Neste caso, SF recebe 1 e os valores de PRC e RRC são divididos por 32 para ajustar a estes fatores de escala. Tal procedimento é feito para cada satélite rastreado e que irá compor a mensagem de correção RTCM.

O campo UDRE é definido com o valor binário “01” que especifica um erro diferencial no intervalo de 1 e 4m.

A seguir é descrito um exemplo para um melhor entendimento do formato da mensagem de correção gerada pelo receptor GPS base e da rotina de geração da mensagem no formato do protocolo RTCM. A mensagem de correção utilizada está descrita no Quadro 17. A Tabela 2 mostra os dados separados para cada satélite da mensagem de correção exemplo enviada pelo receptor GPS base, extraídos da mensagem @@Ce.

Tabela 2 – Separação dos campos da mensagem de correção

Sentença	Dados	Satélite	PRC	RRC	Issue
1	1	00	00 00 00	00 00	00
	2	00	00 00 00	00 00	00
	3	08	FC 48 AC	FE C4	C0
	4	00	00 00 00	00 00	00
	5	00	00 00 00	00 00	00
	6	00	00 00 00	00 00	00
2	7	00	00 00 00	00 00	00
	8	04	FE E4 DA	02 C5	72
	9	00	00 00 00	00 00	00
	10	00	00 00 00	00 00	00
	11	18	04 BC 05	FE A9	E6
	12	00	00 00 00	00 00	00

Em seguida são separadas somente as informações dos satélites que foram capturados. Do exemplo, os satélites capturados foram os de número 08, 04 e 24 (18H). Para 3 satélites são usadas 7 palavras de 30 bits. As duas primeiras palavras correspondem ao cabeçalho da mensagem. A partir da terceira palavra são especificadas as informações dos satélites. A Figura 24 mostra o formato das palavras de 30 bits que foram utilizadas.

FS 1	UDRE 1	IDSAT 1	PRC 1	Paridade	
RRC 1	ISSUE 1	FS 2	UDRE 2	IDSAT 2	Paridade
PRC 2		RRC 2		Paridade	
ISSUE 2	FS 3	UDRE 3	IDSAT 3	PRC (MSB) 3	Paridade
PRC (LSB) 3		RRC 3	ISSUE 3	Paridade	

Figura 24 – Formato das palavras para 3 satélites

Para o satélite de número 8, os valores de PRC e RRC são respectivamente FC48AC e FEC4 em hexadecimal, resultando nos valores -243.540 e -316 na base decimal e que são ajustados nas escalas de 0,01 e 0,001 obtendo os valores finais de -2.435,40m e -0,316m/s. Como ambos os valores não cabem nas faixas de valores dos fatores de escala 0,02m e 0,002m/s, utilizam-se os fatores de escala 0,32m e 0,032m/s. Portanto, obtêm-se os seguintes valores para os campos PRC e RRC:

- $PRC = -2.435,40 \times 0,32 = -779,328m = FCF5H$.
- $RRC = -0,316 \times 0,032 = 0,010112m/s = 00H$ (zero).

Para o satélite 4 têm-se os seguintes valores de PRC e RRC gerados pelo receptor GPS: FEE4DA e 02C5 em hexadecimal. Convertendo para o sistema de numeração decimal, obtêm-se: -72486 e 709. Dividindo estes valores por 0,01m e 0,001m/s, chega-se aos seguintes valores de PRC e RRC: -724,86m e 0,709m/s. Novamente estes valores não podem ser ajustados nos fatores de escala 0,02m e 0,002m/s, devendo serem ajustados para os fatores 0,32m e 0,032m/s. Os valores de PRC e RRC no formato RTCM são:

- $PRC = -724,86 \times 0,32 = -231,9552m = FF18H$
- $RRC = 0,709 \times 0,032 = 0,022688m/s = 00H$ (zero)

Para o satélite 24 (18 em hexadecimal) têm-se os seguintes valores de PRC e RRC: 04BC05H e FEA9H (310177 e -343 na base decimal, respectivamente), resultando nos valores de 3101,77m e -0,343m/s. Novamente foram utilizados os fatores de escala 0,32m e 0,032m/s, obtendo:

- $PRC = 3.101,77 \times 0,32 = 992,5664m = 03E1H$
- $RRC = -0,343 \times 0,032 = -0,010976m/s = 00H$

O Quadro 19 apresenta os valores de cada campo que comporá a mensagem RTCM.

Quadro 19 – Valores dos campos da mensagem RTCM

FS	UDRE	ID. Sat	PRC	RRC	Issue
1	1	08	FCF5	00	C0
1	1	04	FF18	00	72
1	1	18	03E1	00	E6

O Quadro 20 apresenta os valores em binários das palavras de 30 bits montadas conforme formato do protocolo RTCM SC-104 (Figura 24).

Quadro 20 – Valores em binário das palavras de 30 bits

FS 1	UDRE 1	IDSAT 1	PRC 1			Paridade
1	01	01000	1111	1100	1111	0101
RRC 1		ISSUE 1	FS 2	UDRE 2	IDSAT 2	Paridade
0000 0000		1100 0000	1	01	00100	
PRC 2			RRC 2		Paridade	
1111 1111 0001 1000			0000 0000			
ISSUE 2	FS 3	UDRE 3	IDSAT 3	PRC (MSB) 3	Paridade	
0111 0010	1	01	11000	0000 0011		
PRC (LSB) 3		RRC 3		ISSUE 3	Paridade	
1110 0001		0000 0000		1110 0110		

O cabeçalho de cada mensagem é constituído por duas palavras de 30 bits. A Figura 19 apresenta os campos de cada palavra do cabeçalho. A primeira palavra contém os campos “Preâmbulo”, “Tipo da Mensagem” e “ID da Estação de Referência” que são configurados com os valores 66H, 1 e 0, respectivamente. O Quadro 21 apresenta os valores desta palavra em binário.

Quadro 21 – Primeira palavra do cabeçalho da mensagem em binário

Preâmbulo	Tipo de Mens.	ID Estação Referência	Paridade
0110 0110	000001	0000000000	

A segunda palavra da mensagem de correção é constituída pelos campos: “Contador-Z modificado”, “Nº de Sequência”, “Tamanho da Mensagem” e “Saúde da Estação”. Estes campos são iniciados com os respectivos valores: 0, 0, 0 e 1.

O campo “Tamanho da Mensagem” representa a quantidade total de palavras da mensagem de correção, excetuando as duas palavras do cabeçalho; o campo “Nº de Sequência” inicia com 0 sendo incrementado a cada nova palavra de correção e o campo “Contador-Z modificado” é obtido através da Equação 4.

$$\text{Contador} - Z = \frac{GPSTime}{6} \text{ mod } 6000 \quad \text{Equação 4}$$

Onde *mod* representa o símbolo para a operação de obtenção do resto da divisão de dois números inteiros. O valor do campo *GPSTime* é obtido a partir da mensagem de correção enviada pelo receptor GPS base. O .

Quadro 22 apresenta os valores da segunda palavra do cabeçalho da mensagem de correção:.

Quadro 22 – Segunda palavra do cabeçalho da mensagem em binário

Contador-Z modificado	Nº de seq	Tam. da Msg	Saúde	Paridade
0010110110100	001	00101	001	

Os bits de paridade são obtidos conforme as equações descritas no Quadro 15, onde D*29 e D*30 são os bits 29 e 30 da palavra anterior. Na formação da primeira palavra de correção estes bits são iniciados com o valor 0. O Quadro 23 apresenta as palavras que compõem a mensagem de correção no formato RTCM com os respectivos bits de paridade.

Quadro 23 – Palavras de correção com os bits de paridade

Palavra	Mensagem em Binário	Paridade
1	011001100000010000000000	011100
2	001011011010000100101001	001010
3	101010001111110011110101	000001
4	000000001100000010100100	000110
5	111111110001100000000000	011010
6	011100101011100000000011	100101
7	111000010000000011100110	011101

Se o bit 30 da palavra anterior for igual a 1, os bits da próxima palavra, com exceção dos bits de paridade, serão invertidos. Desta forma, as palavras em binário da mensagem de correção do exemplo são apresentadas no Quadro 24.

Quadro 24 – Palavras de correção invertidas de acordo com o bit 30 da palavra anterior

Palavra	Mensagem em Binário	Paridade
1	011001100000010000000000	011100
2	001011011010000100101001	001010
3	101010001111110011110101	000001
4	11111110011111101011011	000110
5	1111111000110000000000	011010
6	011100101011100000000011	100101
7	00011101111111100011001	011101

As palavras em binário são divididas em grupos de 6 bits e codificadas em um byte, onde os dois primeiros bits de cada byte são preenchidos com o valor binário 01. Os bits de cada grupo de 6 são atribuídos na ordem inversa. O Quadro 25 mostra os valores em binário de cada byte das palavras da mensagem de correção e o Quadro 26 apresenta a mensagem codificada em hexadecimal.

Quadro 25 – Representação em binário dos bytes das palavras da mensagem de correção

Palavra	Bytes				
1	011001	100000	010000	000000	011100
	01100110	01000001	01000010	01000000	01001110
2	001011	011010	000100	101001	001010
	01110100	01010110	01001000	01100101	01010100
3	101010	001111	110011	110101	000001
	01010101	01111100	01110011	01101011	01100000
4	111111	110011	111101	011011	000110
	01111111	01110011	01101111	01110110	01011000
5	111111	110001	100000	000000	011010
	0111111	01100011	01000001	01000000	01010110
6	011100	101011	100000	000011	100101
	01001110	01110101	01000001	01110000	01101001
7	000111	101111	111100	011001	011101
	01111000	01111101	01001111	01100110	01101110

Quadro 26 – Mensagem de correção codificada em hexadecimal

Palavra	Valores
1	66 41 42 40 4E
2	74 56 48 65 54
3	55 7C 73 6B 60
4	7F 63 41 40 56
5	4E 63 41 40 56
6	4E 75 41 70 69
7	78 7D 4F 66 6E

No final da mensagem são adicionados os caracteres 0D 0A para indicar o fim da mesma. Os *bytes* são transmitidos um após o outro sem espaços.

3.2.2 Sistema DGPS

Nesta fase do projeto houve a necessidade em desenvolver rotinas específicas para o monitoramento do sistema DGPS, pois o objetivo final do projeto foi a obtenção de uma estação base que pudesse operar de forma autônoma e sem a necessidade de um computador para programá-la além do que, os *softwares* usados para este propósito na primeira fase, são de uso geral e rodam somente no ambiente de microcomputadores PCs e compatíveis. Pelo fato das rotinas de monitoramento do GPS base terem sido escritas na linguagem C/C++, estas foram facilmente convertidas para a execução no microcontrolador.

As atividades iniciais realizadas nesta segunda fase objetivaram realizar alguns ajustes e aperfeiçoamentos no protótipo do equipamento, visando o desenvolvimento da versão final, microcontrolada, independente de computador para operacionalizá-la. Em função de atualizações efetuadas pelo fornecedor de receptores de GPS, adotou-se o modelo de GPS M12+, da Motorola. Foram definidos também os modos de operação e os procedimentos de configuração do equipamento de correção diferencial. Também foram realizados diversos testes em laboratório e em campo para validar o equipamento.

3.2.2.1 Receptor GPS Base

Optou-se pela utilização do modelo de GPS M12+ Oncore em substituição ao modelo Oncore VP, fabricado pela Motorola. O modelo adotado na segunda fase do projeto, denominado M12+ Oncore, também fabricado pela Motorola, possui como principal diferencial a recepção simultânea de até 12 satélites diferentes, contra apenas 8 do receptor utilizado anteriormente. A recepção de um número maior de satélites pode aumentar a precisão do equipamento em determinadas condições de operação, particularmente, no caso de uma estação base. Outros avanços do receptor GPS adotado são o menor consumo de potência, a operação com baixa tensão, e ainda, dimensões físicas bastante reduzidas. Estas características do receptor GPS se tornam interessantes para a sua utilização em equipamentos portáteis, alimentados por baterias. O M12+ Oncore é fabricado no exterior e o seu custo no mercado nacional é de aproximadamente US\$ 75,00 sem cabos e antena. A antena, do tipo ativa, tem custo de aproximadamente US\$ 15,00.

- Características técnicas principais:
- Baixa tensão de operação (2,75 a 3,2Vdc);
- 12 canais simultâneos;
- Baixo consumo de potência (185mW);
- Tamanho compacto (40 x 60 x 10mm);
- 60 segundos para o primeiro posicionamento em “*cold start*”;
- 40 segundos para o primeiro posicionamento em “*warm start*”;
- 15 segundos para o primeiro posicionamento em “*hot start*”;
- Suporte a DGPS incluindo operação como estação base.

A placa receptora GPS Motorola, modelo M12+ Oncore possui dimensões mostradas na Figura 25.

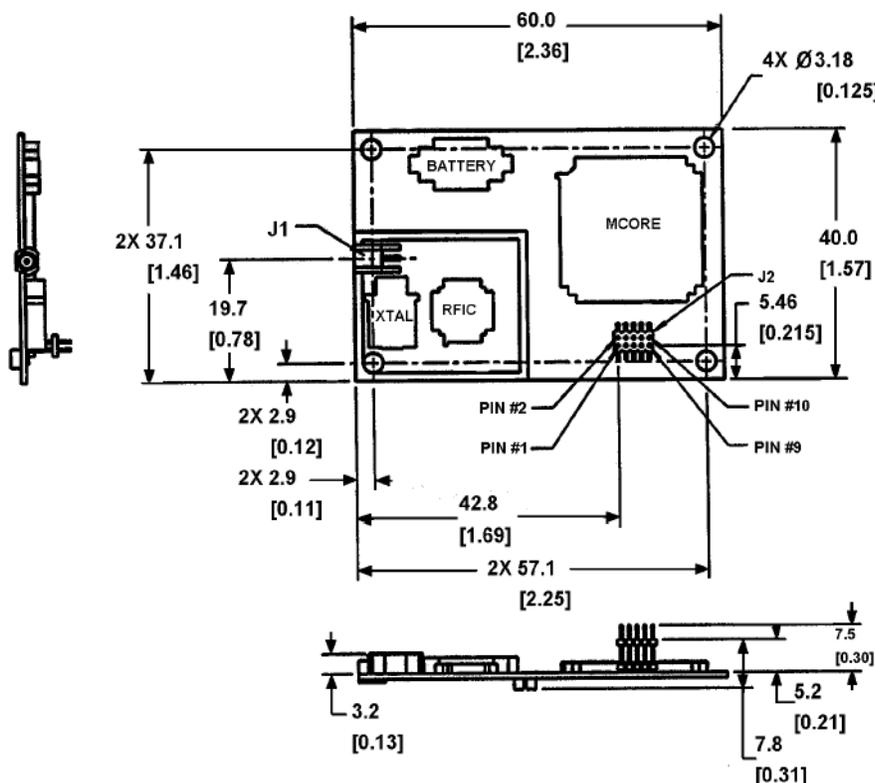


Figura 25 – Dimensões da placa receptora GPS Motorola, modelo M12+ Oncore (extraído do manual técnico do fabricante)

O conector de alimentação e de comunicação de dados do GPS Motorola, modelo M12+ Oncore, possui 10 pinos, cujas denominações e descrições estão apresentadas no Quadro 27.

Quadro 27 – Pinagem do conector de alimentação e comunicação de dados do GPS Motorola, modelo M12+ Oncore (extraído do manual técnico do fabricante)

Pino	Nome do Sinal	Descrição
1	TTL TXD1	Transmissão (lógica 3V)
2	TTL RXD1	Recepção (lógica 3V)
3	+3V PWR	Alimentação principal (regulada)
4	1 PPS	Sinal de um pulso por segundo
5	GROUND	Terra (receptor)
6	BATTERY	Alimentação externa de backup
7	Reserved	Não utilizado
8	RTCM IN	Entrada de sinal RTCM
9	Antenna Voltage	Alimentação de 3V a 5 V para antena
10	Reserved	Não utilizado

O Quadro 28 lista os tipos de protocolos aceitos pela placa receptora GPS Motorola, modelo M12+ Oncore e suas respectivas taxas de transmissão.

Quadro 28 – Protocolos de interfaceamento do GPS Motorola, modelo M12+ Oncore (extraído do manual técnico do fabricante).

Formato	Tipo	Direção	Porta	Taxa	Parida de	Nº. Bits
Motorola	Binário	Entrada/Saída	1	9600	Não	8
NMEA0183	ASCII	Entrada/Saída	1	4800	Não	8
RTCM-SC 104	1 e 9	Entrada/Saída	2	2400, 4800, 9600	Não	8

Antena ativa

O GPS Motorola, modelo M12+ Oncore, possibilita operar com uma antena de recepção ativa, modelo Oncore Hawk, com ganho de 24dB, alimentada por 3V, e com baixo consumo de corrente. A Figura 26 mostra o aspecto físico da antena Oncore Hawk e a Figura 27 mostra as dimensões da mesma.



Figura 26 – Aspecto da antena ativa Oncore Hawk

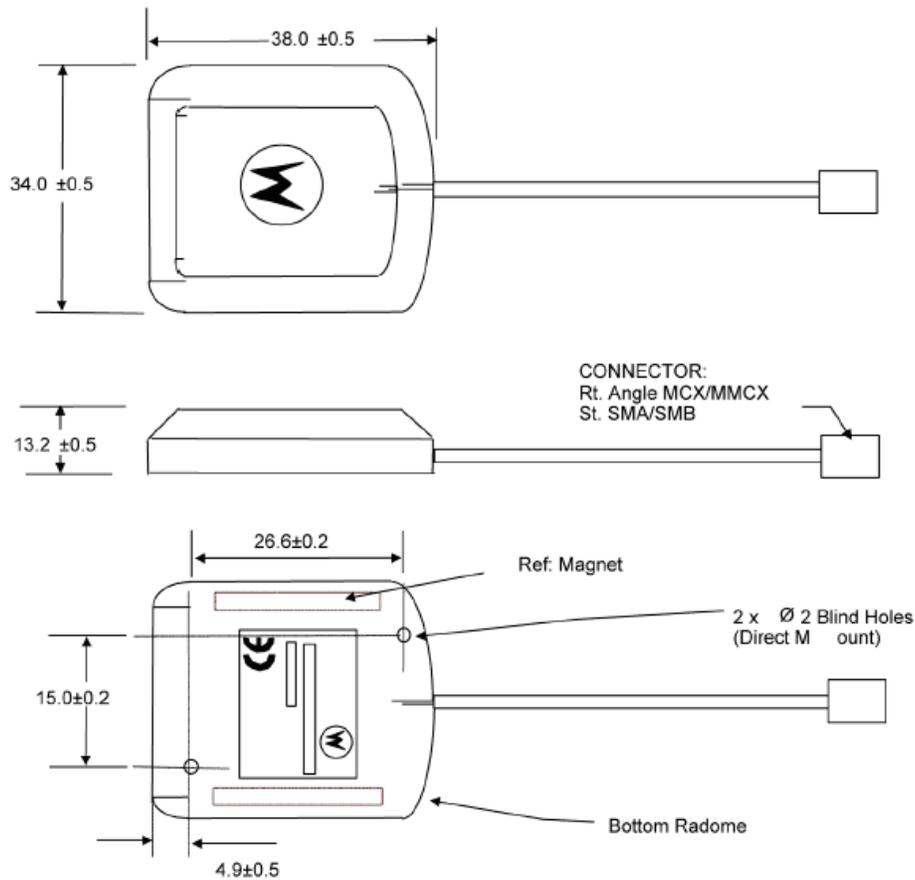


Figura 27 – Dimensões da antena ativa Oncore Hawk (extraído do manual técnico do fabricante)

A antena ativa Oncore Hawk é totalmente blindada e a prova d'água, podendo ser operada em temperaturas de -40°C à 85°C , possuindo ainda proteção contra radiação ultravioleta. A antena possui uma base magnética permitindo que a mesma seja facilmente montada sobre veículos e outras superfícies metálicas.

3.2.2.2 Placa de Desenvolvimento do GPS M12+ Oncore

Montou-se nesta etapa uma placa padrão de circuito impresso com o receptor GPS M12+ Oncore (ver Figura 28). Foram adicionados circuitos reguladores de tensão de 12Vdc para 5Vdc (CI LM7805) e de 12Vdc para 3,1Vdc (CI LM317). Nessa mesma placa, montou-se também um conversor de nível utilizando um circuito integrado MAX232, responsável pela

compatibilização dos níveis RS-232C dos equipamentos com os níveis TTL-3V da placa receptora GPS M12+ Oncore.

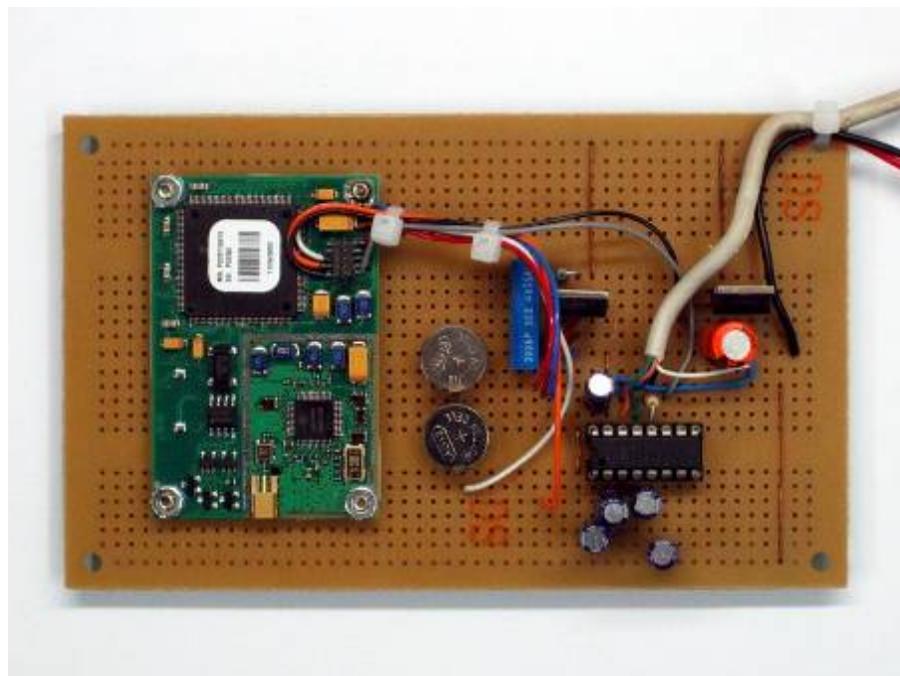


Figura 28 – Placa de desenvolvimento do GPS Motorola M12+ Oncore

3.2.2.3 Processador de Correção

O circuito eletrônico do módulo do processador de correção diferencial tem a função de receber as informações do GPS base, interpretá-las, transformando-as numa sentença no padrão RTCM SC-104. O microcontrolador do processador de correção recebe o sinal de correção do receptor de GPS base no formato proprietário da Motorola (em níveis TTL-3V) e o transforma para o padrão RTCM SC-104 (em níveis RS-232C). Um *software* residente no microcontrolador interpreta as informações de correção. O *baud rate* do sinal de correção enviado pelo processador pode ser ajustado para: 1.200, 2.400, 4.800 ou 9.600bps. A placa processadora possui duas interfaces seriais padrão RS-232C (Figura 29). Uma delas atua somente como entrada (unidirecional) recebendo as informações geradas pelo receptor GPS base, no padrão TTL-3V. A outra atua somente como saída (unidirecional), enviando o sinal de correção diferencial para o modulador, que o envia ao rádio de comunicação para transmissão, no padrão de tensão RS-232C.

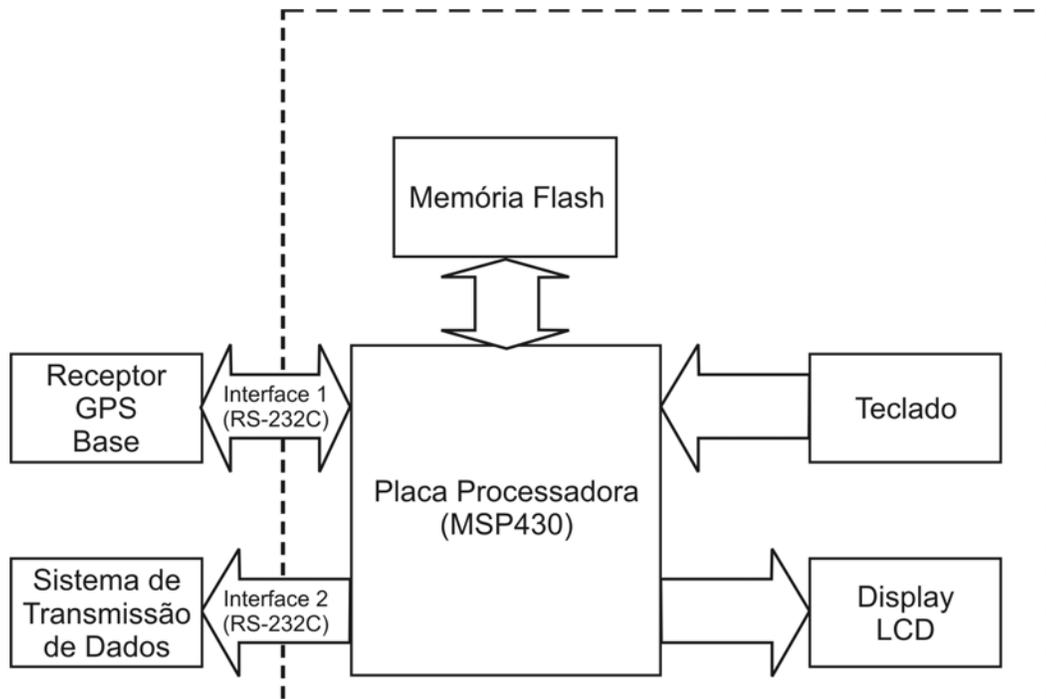


Figura 29 – Conexão das interfaces seriais com a placa processadora de correção

Microcontrolador MSP430F149

O módulo processador de correção tem como principal componente um microcontrolador modelo MSP430F149, da família MSP430, fabricado pela Texas Instruments. Caracteriza também, por possuir num mesmo encapsulamento os seguintes componentes: processador, memórias RAM e Flash, conversor Analógico/Digital, interfaces seriais, contadores e temporizadores. A *Figura 30* mostra a pinagem do microcontrolador MSP430F149 e a *Figura 31* o seu diagrama de blocos interno.

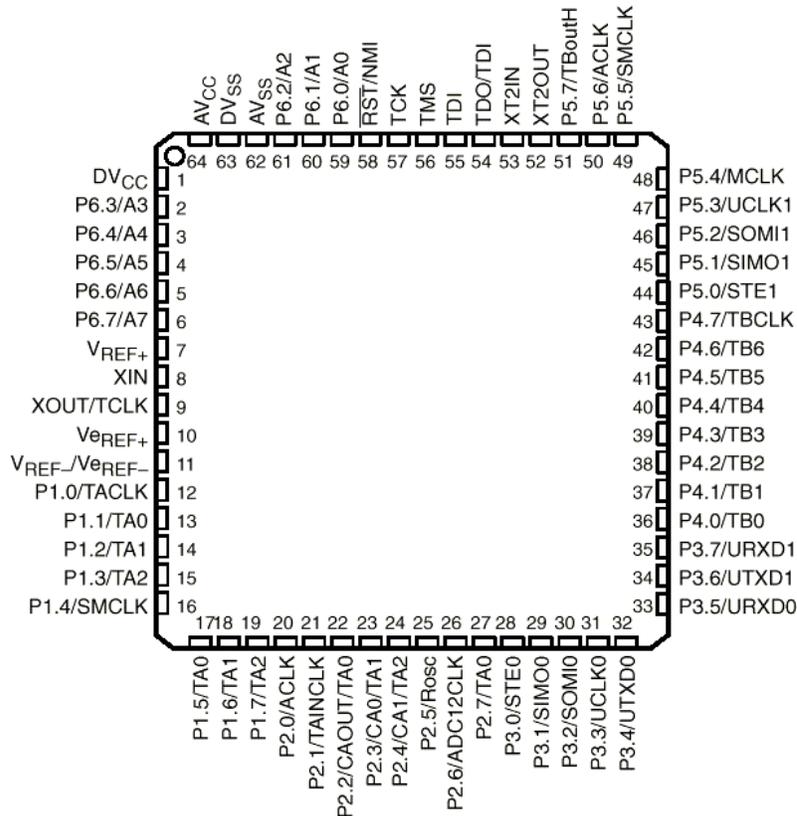


Figura 30 – Pinagem do microcontrolador MSP430F14 (extraído do manual técnico do fabricante).

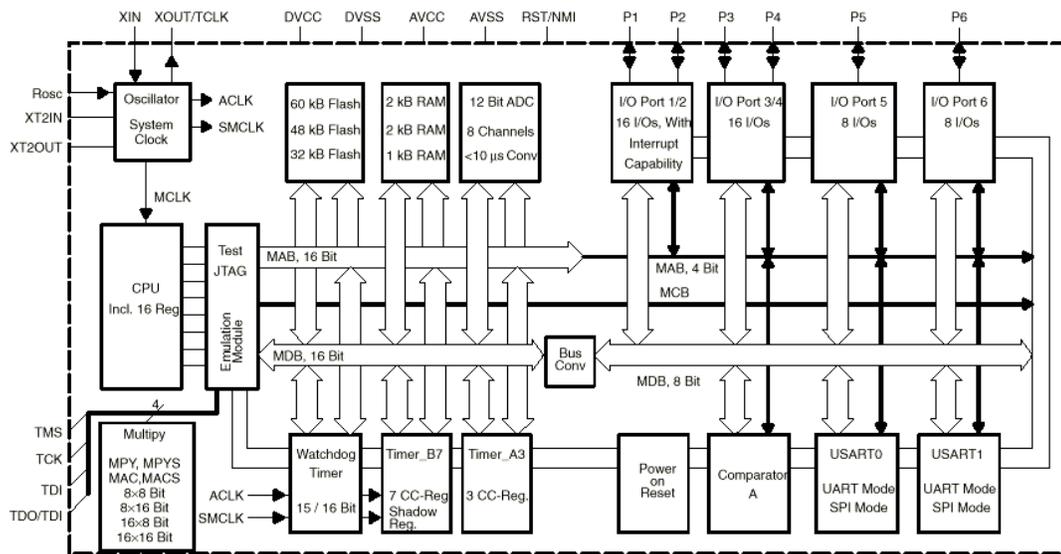


Figura 31 – Diagrama de blocos do microcontrolador MSP430F149 (extraído do manual técnico do fabricante).

A utilização de um microcontrolador de alto desempenho possibilitou a diminuição da quantidade de componentes externos e redução do tamanho da placa de circuito impresso. Outra característica do microcontrolador é a possibilidade de modificação do programa sem a necessidade de remover o componente da placa de circuito impresso para colocá-lo no dispositivo programador. Toda a programação é realizada por intermédio de uma interface proprietária presente na placa do processador de correção. Desta forma, o programa residente pode ser facilmente alterado mesmo com o equipamento montado, facilitando os ajustes que se mostrarem necessários.

***Display* alfanumérico**

Foi utilizado um *display* alfanumérico para possibilitar a configuração do processador de correção e também do receptor GPS base. Através do *display* pode-se visualizar informações referentes ao funcionamento do sistema de geração de sinal para correção diferencial. Foi utilizado um *display* de cristal líquido, microprocessado, com *backlight*, modelo PC1602-F, fabricado pela Powertip.

Teclado multifunção

Um teclado numérico multifunção foi incorporado ao equipamento com a finalidade de facilitar a configuração da estação de correção diferencial. Através do teclado pode-se selecionar e configurar diversos parâmetros operacionais tais como: identificação da base, intervalo de envio do sinal de correção, coordenadas da estação base, etc. O teclado numérico de 18 teclas foi implementado com o uso de micro-chaves soldadas diretamente na placa de circuito impresso. A justificativa pela opção por esse tipo de montagem foi principalmente devido à redução de custo. Uma outra vantagem da utilização deste teclado é a possibilidade da colocação de uma máscara em filme de policarbonato, isolando o teclado da parte externa da caixa do equipamento, aumentando assim o grau de proteção do equipamento contra poeira e umidade.

3.2.2.4 Software para o Sistema DGPS

O software para o sistema DGPS é dividido em três módulos: 1- Inicialização e configuração do receptor GPS Base, 2- Geração da mensagem de correção diferencial e 3- Geo-referenciamento do receptor GPS Base.

As rotinas computacionais para os módulos 1 e 3, assim como ocorreu com a geração do sinal de correção na primeira fase do presente trabalho, foram desenvolvidas inicialmente para o microcomputador IBM-PC em virtude das facilidades de depuração e testes. A ferramenta computacional utilizada para o desenvolvimento foi a IDE C++ Builder. Todas as rotinas de configuração e inicialização no ambiente PC foram implementadas na linguagem de programação C/C++ e as mesmas foram recompiladas para execução no microcontrolador MSP430, utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado Cross Work.

Rotinas de Inicialização e Configuração

O Quadro 29 apresenta a descrição das mensagens geradas pelo receptor GPS que foram utilizadas para a realização das operações de configuração do GPS, obtenção do estado do mesmo, geração da mensagem de correção e geo-referenciamento.

Quadro 29 – Mensagens utilizadas para inicialização e configuração do receptor GPS

Mensagem	Significado
@@Ad	Especificar o valor da latitude ou fazer a leitura do valor corrente
@@Ae	Especificar o valor da longitude ou fazer a leitura do valor corrente
@@Af	Especificar o valor da altura ou fazer a leitura do valor corrente
@@Ag	Ângulo de máscara de satélite
@@Am	Ignorar um determinado satélite
@@AP	Especifica a quantidade de pulsos por segundo (PPS) do sinal – PPS: 0 = 1 PPS; 1 = 100 PPS
@@AQ	Seleciona o filtro de posição
@@Aq	Opção de correção da ionosfera: 0 – Ionosfera/Troposfera Desabilitadas; 1 – Somente Ionosfera Habilitada; 2 – Somente Troposfera Habilitada; 3 – Ambas habilitadas
@@As	Fornecer a posição a ser mantida (<i>Hold Position</i>)
@@At	Habilitar/Desabilitar o modo de <i>Hold Position</i>
@@Au	Especificar o valor da altura manualmente
@@Aw	Opção de Correção do tempo UTC (1) ou GPS (0)
@@Bb	Mensagem contendo informações dos satélites visíveis
@@Bh	habilitar/desabilitar a mensagem de correção
@@Cj	Contém informações de identificação do receptor GPS
@@Ea	Contém informações de estado, posicionamento e dados para os receptoresGPS de 8 bits (VP Oncore)

@@Ga	Fornecer uma posição estimada da altura, latitude e longitude
@@Gb	Fornecer um tempo inicial estimado: mdaahms
@@Gd	Permite especificar o modo de posicionamento que o receptor irá operar: 0 – Desabilita <i>hold position</i> ; 1 – Habilita <i>hold position</i> ; 2 – Habilita altitude; 3 – Habilita <i>autosite survey</i>
@@Ha	Contém informações de estado, posicionamento e dados para os receptores GPS de 12 bits (M12+)

As mensagens geradas pelo receptor GPS possuem 4 campos: “Cabeçalho da Mensagem”, “Informação”, “Byte de CheckSum” e os “Caracteres CR e LF”.

Os caracteres CR e LF fazem com que o cursor vá para a o início da próxima linha. Normalmente, a mesma mensagem é utilizada tanto para leitura dos valores contidos no receptor GPS quanto para especificar um novo valor. O que difere são os bytes de informação (Motorola, 2002). O byte de *CheckSum* é obtido através da operação ou-exclusivo dos bytes correspondentes ao cabeçalho da mensagem e da informação.

Foi desenvolvida uma rotina para o processamento dos valores de PRC e RRC gerados pelo receptor GPS base. Esta rotina calcula e envia o valor médio de um conjunto de amostras. Foram utilizadas as médias dos 3, 5, 10 e 20 últimos valores. Este processamento pode ser realizado tanto pelo receptor GPS base quanto pelo módulo receptor móvel. Neste último, foi acoplado um microcomputador PC que recebia, primeiramente, o sinal de correção no formato RTCM SC-104 e fazia o processamento para então enviar para os receptores GPS móveis.

Para evitar a instabilidade de alguns satélites do sistema GPS, foi desenvolvida uma rotina que permitia o envio dos valores de PRC e RRC destes satélites após a sua estabilização. Assim, se um determinado satélite entrasse no âmbito do cálculo e saísse em menos de um tempo especificado, o mesmo não era considerado e conseqüentemente, suas informações não eram enviadas. Esse período de tempo é configurado por *software*.

Rotinas de Georeferenciamento

Para o georeferenciamento foram desenvolvidas rotinas para a determinação de alguns métodos estatísticos. Estas rotinas realizam cálculos com os dados correntes, a partir da

inicialização das mesmas ou a partir arquivos de registros. Desenvolveu-se também rotinas de armazenamento das mensagens geradas pelo receptor GPS para a análise estatística.

As funções estatísticas desenvolvidas foram:

- Média Aritmética;
- Desvio Padrão;
- Variância;
- Coeficiente de Variação;
- Método dos Mínimos Quadrados;
- Razão Áurea.

3.2.2.5 Sistema de Comunicação

Entende-se por sistema de comunicação os módulos responsáveis pela adequação e transmissão do sinal de correção a partir da estação DGPS Base e recepção do sinal e ajuste do mesmo para que possa ser recebido pelo receptor GPS móvel. É constituído pelos subsistemas de modulação, conversão de taxa e rádio transmissor na estação DGPS Base e sistemas de recepção por rádio, demodulação e conversor de taxas no módulo receptor.

Os circuitos eletrônicos dos sistemas de modulação/demodulação e conversor de taxas foram desenvolvidos com o auxílio técnico da Empresa T&S Equipamentos Eletrônicos Ltda. O presente trabalho não teve como objetivo, o projeto e desenvolvimento do sistema de transmissão, uma vez que para este módulo pode ser utilizado qualquer sistema de rádio existente, cujas funcionalidades atendem aos requisitos do sistema.

Modulador e Conversor de Taxa

O sinal de correção é enviado serialmente pelo GPS, cuja velocidade de transmissão pode ser configurada de 1.200 a 9.600bps. Entretanto, o canal de voz do rádio transmissor utilizado tem limitação de banda de 2kHz e permite operar a velocidades de, no máximo, 1200bps. É necessária ainda a inclusão de um modem FSK para efetuar a modulação sinal digital.

Para compatibilizar o sinal gerado pelo módulo processador de correção da estação base com o sistema de transmissão utilizado nos testes, desenvolveu-se um circuito eletrônico que realiza a conversão da taxa do sinal de correção, que é então modulado e enviado para o sistema de transmissão. O diagrama em blocos do circuito modulador e conversor de taxa é apresentado na Figura 32. Esse circuito recebe o sinal de correção RTCM SC-104 no nível RS-232C, ajusta a taxa de 1.200, 2.400, 4.800 ou 9.600bps para 1.000bps, convertendo-o para níveis digitais TTL-5V, e efetua a modulação FSK.

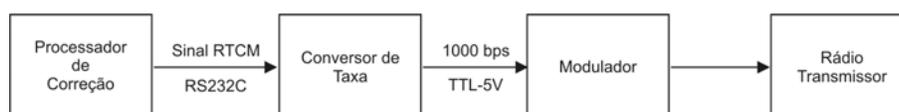


Figura 32 – Diagrama de blocos do circuito modulador e conversor de taxa

Foi usado um circuito modulador baseado no circuito integrado MX-614 da MX-COM, operando no modo *half-duplex*, com taxa de transmissão de 1000bps. As principais características técnicas do circuito integrado MX-614 são:

- Taxa de recepção de até 1800bps;
- Operação em *half-duplex*;
- Equalização de linha opcional;
- Operação com baixa tensão (3,3 a 5,0Vdc);
- Baixo consumo de corrente (1mA com alimentação de 3,3Vdc);
- Operação com cristal de 3,58MHz;
- Modulação FSK;
- Preço: US\$ 65,00.

Com o uso do componente MX-614 foi possível implementar circuitos de modulação e demodulação utilizando-se poucos componentes externos. A Figura 33 mostra os componentes externos recomendados para implementação de um circuito modulador/demodulador padrão.

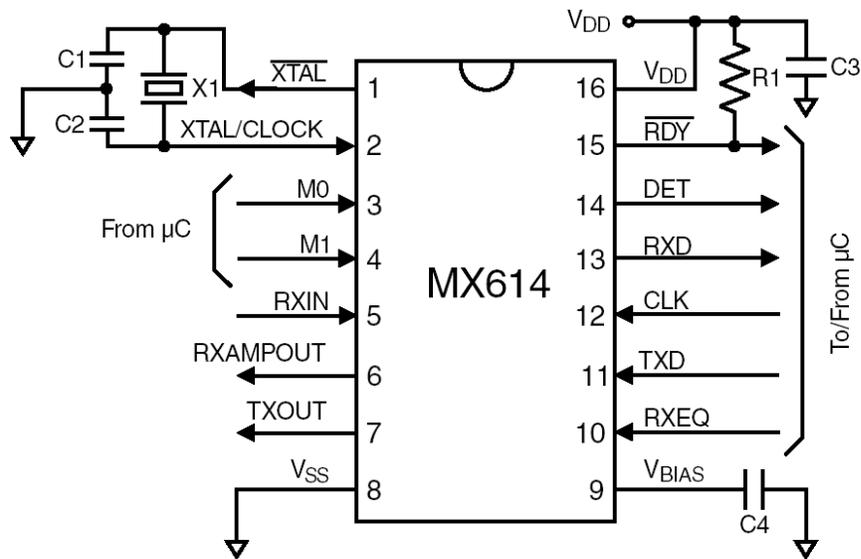


Figura 33 – Componentes externos recomendados para uma aplicação típica (extraído do manual técnico do fabricante)

Como base do circuito conversor de taxa, foi utilizado o microcontrolador Microchip, modelo PIC 16F876A, com processamento em 8 bits, arquitetura RISC, com as seguintes características técnicas principais:

- Conversor Analógico/Digital com resolução 10 bits;
- 5 canais analógicos de entrada;
- Memória E²PROM com 256 bytes de capacidade e
- Memória Flash para programas com 8 kbytes de capacidade;
- Memória RAM para dados com 368 bytes de capacidade;
- Encapsulamento PDIP de 28 pinos;
- 22 pinos de entrada e saída;
- 3 portas de comunicação serial;
- Tensão de alimentação de 2,0 a 5,5Vdc;
- Preço: US\$ 18,00.

A Figura 34 mostra a pinagem do microcontrolador PIC16F876A utilizado no conversor de taxa.

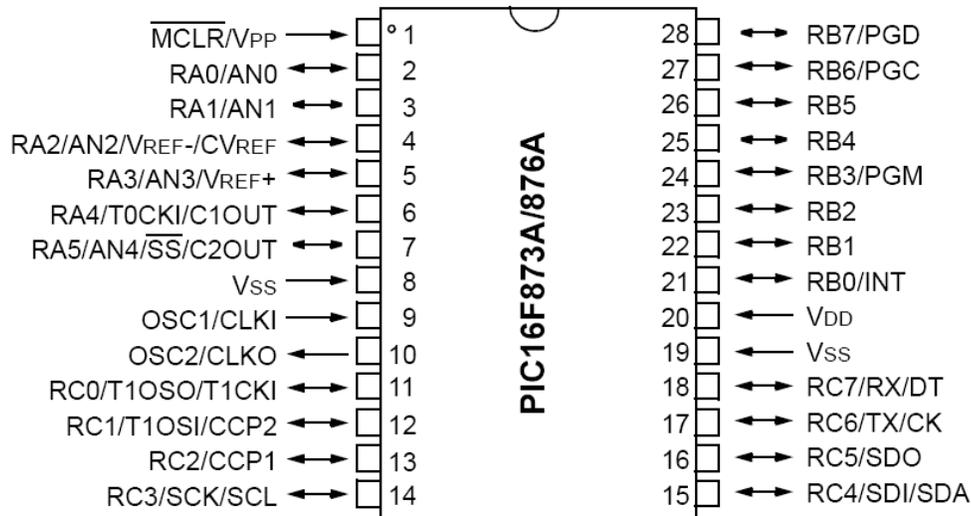


Figura 34 – Pinagem do microcontrolador PIC16F876A (extraído do manual técnico do fabricante)

O sistema microprocessado do conversor de taxa recebe a mensagem de correção do Sistema DGPS a uma determinada taxa (1.200 a 9.600bps), armazena-a em memória interna e em seguida, transmite esta mensagem ao modem na velocidade de 1.200bps. O sistema identifica automaticamente o caractere que informa o final de mensagem e inicia a transmissão da mesma para o modem.

A seleção da taxa de recepção pode ser realizada através do uso de um microcomputador do tipo PC e de um programa de comunicação serial, utilizando-se um cabo serial comum.

Demodulador e Conversor de Taxa

Com o intuito de compatibilizar a estação de correção diferencial com os receptores de GPS existentes no mercado, desenvolveu-se um circuito eletrônico que executa a demodulação do sinal analógico recebido pelo rádio receptor, realizando posteriormente uma taxa de conversão do sinal de 1.000bps para 1.200, 2.400, 4.800 ou 9.600bps, em função da compatibilidade com o receptor GPS empregado na unidade móvel.

A Figura 35 mostra o diagrama de blocos do circuito demodulador e conversor de taxa. Esse circuito recebe um sinal analógico, com modulação FSK, à taxa de 1.000bps, convertendo-o para níveis digitais TTL-5V. Esse sinal já se encontra no padrão para correção diferencial RTCM SC-104. O conversor de taxa é responsável por armazenar tal sinal,

retransmitindo-o a taxa de 1.200, 2.400, 4.800 ou 9.600bps, dependendo do tipo e da configuração do receptor GPS utilizado. O sinal de correção deve então ser transformado de nível TTL-5V para nível RS-232C, compatível com as interfaces seriais da maioria dos receptores de GPS existentes no mercado.

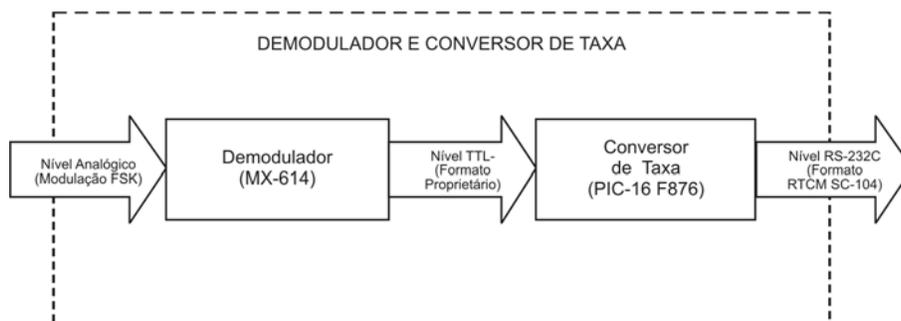


Figura 35 – Diagrama de blocos do circuito demodulador e conversor de taxa

Para a implementação do demodulador também utilizou-se o CI MX614 da MX-COM com encapsulamento plástico, tipo DIP, de 16 pinos, operando no modo *half-duplex*, com taxa de recepção de 1.000bps.

A entrada do sinal analógico modulado é realizada através de um conector do tipo P2 fêmea. A saída do sinal de correção, em níveis RS-232C é efetivada através de um conector do tipo DB9 macho.

Sistema de Transmissão

No testes de campo utilizou-se um rádio móvel de comunicação, modelo GM300, fabricado pela Motorola, conforme mostrado na Figura 36.



Figura 36 – Rádio de comunicação GM300

Para a utilização desse rádio foi necessária a confecção de um cabo especial para a entrada, através do conector de microfone (PTT), do sinal analógico modulado. O conector é do tipo RJ-45 e sua pinagem está descrita no Quadro 30.

Quadro 30 – Pinagem do conector RJ-45 do rádio de comunicação GM300

PINO	SINAL
1	PB1
2	PB2
3	HOOK
4	GND
5	MIC AUDIO
6	PTT
7	SCI+
8	HANDSET AUDIO

Para a transmissão do sinal modulado, utilizou-se o sinal MIC AUDIO (pino 5) para a entrada do sinal analógico (modulado no padrão FSK), o sinal PTT (*Push To Talk* – pino 6) e a referência geral GND (pino 4).

Como o rádio de comunicação foi constantemente operado apenas no modo de transmissão, demandando alta dissipação de potência, foi necessário o uso de ventiladores, convenientemente adaptados na parte posterior do rádio, para o fornecimento de refrigeração auxiliar.

Foi necessária também a configuração do rádio de comunicação GM300, utilizando-se um software específico, para compatibilizar as frequências de transmissão com as mesmas de recepção do rádio de comunicação utilizado na unidade móvel.

O rádio de comunicação GM300 propiciou um grande alcance do sinal de correção, permitindo que a unidade móvel pudesse se deslocar até uma distância de aproximadamente 5 quilômetros da estação base.

Para a alimentação do rádio de comunicação GM300 utilizou-se uma fonte estabilizada, marca Lune e também uma fonte de alimentação regulada e estabilizada, marca American Reliance Inc., modelo PPS-1203 para alimentação dos receptores de GPS e do sistema de conversão de taxa e modulação. A Figura 37 mostra os equipamentos empregados no sistema de transmissão da estação base.

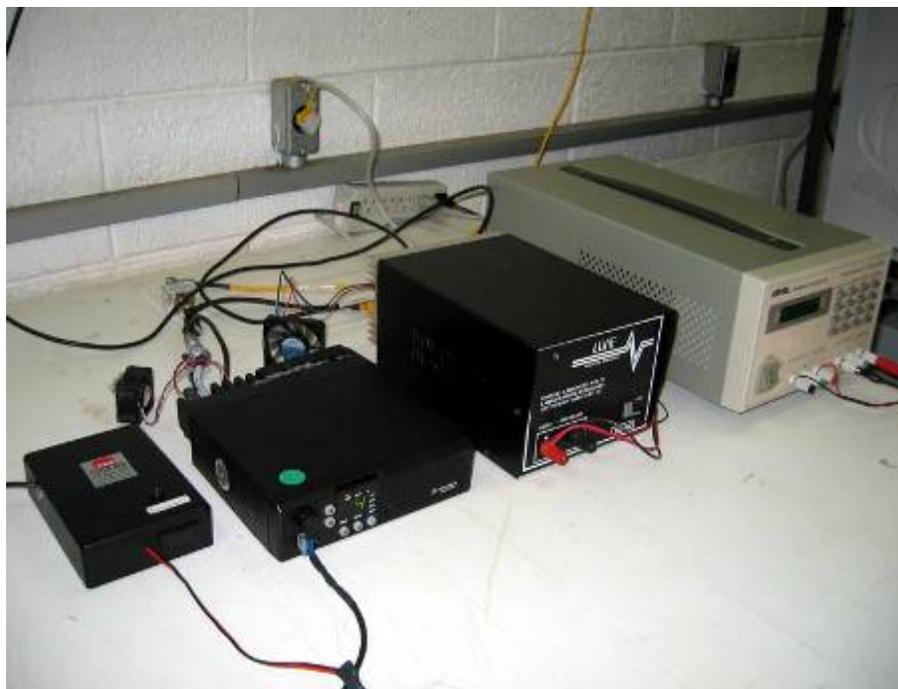


Figura 37 – Equipamentos utilizados no sistema de transmissão da estação base

Junto à estação de correção diferencial foram instalados dois receptores de GPS de navegação, marca Garmin, modelo III Plus, que permaneceram constantemente coletando dados de posição. Nos testes, um dos aparelhos operou no modo autônomo enquanto o outro operou com correção diferencial, em tempo real, permitindo um constante monitoramento das condições operacionais da estação de correção diferencial. A Figura 38 mostra a instalação dos dois receptores GPS III Plus.



Figura 38 – Receptores de GPS utilizados para monitoramento das condições operacionais da estação de correção diferencial

Foi usada uma antena da marca Trimble para os receptores de navegação GPS III Plus. A antena de GPS foi instalada nas proximidades do Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC (Figura 39).



Figura 39 – Antena utilizada para os receptores de GPS modelo III Plus

Sistema de Recepção

No sistema de recepção foi utilizado um rádio de comunicação de baixo custo (aproximadamente US\$ 25,00), fabricado pela Motorola, modelo TalkAbout T5720, mostrado na Figura 40. Esse rádio opera na faixa de frequência de UHF, com potência máxima de transmissão de 1 watt. Sua alimentação pode ser realizada através de três pilhas, formato AA, ou através de baterias recarregáveis.



Figura 40 – Rádio de comunicação Motorola TalkAbout T5720

O rádio de comunicação Motorola TalkAbout T5720 possui 22 canais de frequência. Os canais de 1 a 7 possuem potência de transmissão de 1 watt enquanto os canais de 8 a 22 possuem potência de transmissão de 0,5 watt. O Quadro 31 mostra cada um dos canais, frequência e descrição do rádio TalkAbout T5720.

Quadro 31 – Canais e respectivas frequências do rádio de comunicação T5720

Canal	Frequência (MHz)	Descrição	Canal	Frequência (MHz)	Descrição
1	462,5625	GMRS/FRS ⁷²	12	467,6625	FRS
2	462,5875	GMRS/FRS	13	467,6875	FRS
3	462,6125	GMRS/FRS	14	467,7125	FRS

⁷² GMRS: *General Mobile Radio Service* e FRS: *Family Radio Service*.

4	462,6375	GMRS/FRS	15	462,5500	GMRS
5	462,6625	GMRS/FRS	16	462,5750	GMRS
6	462,6875	GMRS/FRS	17	462,6000	GMRS
7	462,7125	GMRS/FRS	18	462,6250	GMRS
8	467,5625	GMRS/FRS	19	462,6500	GMRS
9	467,5875	FRS	20	462,6750	GMRS
10	467,6125	FRS	21	462,7000	GMRS
11	467,6375	FRS	22	462,7250	GMRS

Para a ligação do rádio de comunicação TalkAbout T5720 com o demodulador utilizou-se o conector para fone de ouvido/microfone, convenientemente adaptado para a conexão com o demodulador e conversor de taxa.

3.2.3 Testes do Sistema DGPS

Para validar os módulos desenvolvidos para o sistema DGPS neste trabalho, foram realizados diversos testes durante as fases de desenvolvimento do protótipo e do equipamento final. Nos testes realizados durante a fase de desenvolvimento do protótipo, buscaram-se a validação técnica e econômica do sistema proposto e o software para a geração das mensagens de correção no formato RTCM SC-104. Os testes realizados no equipamento final desenvolvido na segunda fase buscaram a validação do sistema de comunicação desenvolvido e o equipamento DGPS microprocessado.

3.2.3.1 Testes do Protótipo

A verificação do funcionamento, precisão e confiabilidade do protótipo da estação de correção diferencial, em tempo real, baseou-se em testes comparativos com uma estação base comercial de geração de sinal de correção, marca Trimble, modelo AgGPS 122 *Base Station*. Este equipamento é bastante utilizado por grandes empresas e instituições de pesquisa. Apresenta uma elevada precisão, mas devido ao seu alto custo, é normalmente inviável para o “usuário comum”. Nos testes, os receptores de GPS portáteis operaram com sinais de correção gerados pelo protótipo da estação desenvolvido no projeto e, também, com sinais de correção gerados pela estação base comercial.

Inicialmente, testou-se em laboratório, cada uma das partes principais do equipamento. Tais testes tiveram como objetivo uma verificação do correto funcionamento de cada uma das partes individualmente. Posteriormente, procedeu-se uma integração das partes, avaliando-se o funcionamento do sistema como um todo.

Nos testes de campo, a estação base de correção diferencial permaneceu operando em laboratório, enquanto que a unidade móvel operou em diversos locais. Primeiramente, a unidade móvel foi instalada em um outro local fixo, nas proximidades da estação base. Com este arranjo, testou-se a confiabilidade do sinal de correção, mantendo-se o conjunto em operação durante testes de no mínimo 24 horas consecutivas. Avaliou-se também a precisão do GPS base no que se refere aos erros de posicionamento. Este procedimento foi denominado teste estático. Os testes foram realizados simultaneamente com os dois equipamentos GPS *III Plus* em operação. Foram realizadas duas seqüências distintas de testes. Na primeira, um GPS *III Plus* operou sem correção diferencial e o outro com correção fornecida pelo protótipo da estação de correção diferencial. Na segunda seqüência, um GPS *III Plus* operou sem correção diferencial e o outro com correção fornecida pela estação de correção diferencial comercial. Os equipamentos da estação móvel foram instalados em uma mochila e carregados pelo operador.

Os testes no protótipo do Sistema DGPS foram realizados com a unidade móvel operando em campo aberto, visando comparar resultados de sistemas de posicionamento sem correção e com correção diferencial em tempo real. Para a realização destes testes, demarcou-se um *grid* regular de quatro por quatro pontos, espaçados de 10 metros, totalizando 16 pontos. Estes pontos foram marcados com o uso de uma estação total e, posteriormente, geo-referenciados com o uso de um sistema de GPS para aplicações topográficas. A Figura 41 mostra a distribuição espacial dos pontos geo-referenciados.

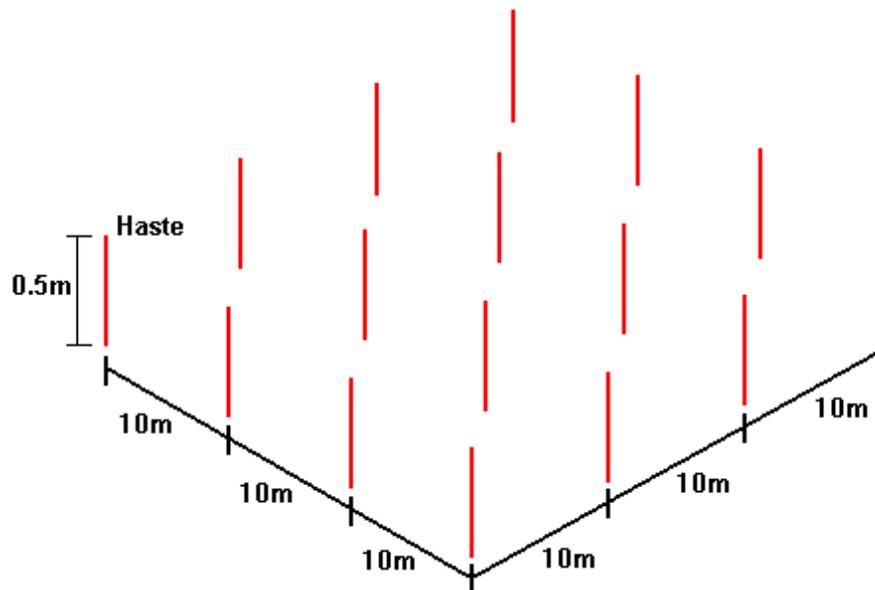


Figura 41 – Distribuição espacial dos pontos geo-referenciados

Para a realização dos testes de campo utilizou-se quatro aparelhos de GPS portáteis, de custo reduzido. Foram usados dois equipamentos de GPS marca Garmin, modelo *III Plus* e dois equipamentos de GPS marca Garmin, modelo *eTrex*, mostrados na *Figura 42*. Nos testes, um aparelho de cada modelo operou sem correção, enquanto que o outro operou com correção diferencial em tempo real. Os testes estáticos foram realizados com o *III Plus* e consistiram da observação de um ponto geo-referenciado durante um longo período, com coleta constante de dados de posicionamento. Nestes testes, cada aparelho de GPS portátil operou durante 24 horas ininterruptas, coletando dados a cada minuto, totalizando mais de 1440 registros de posição.

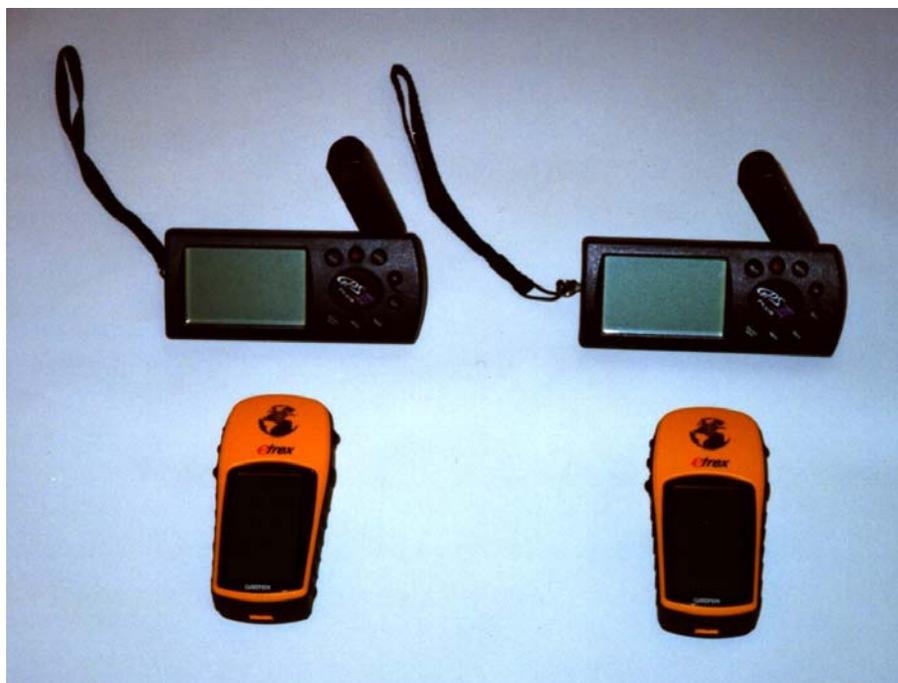


Figura 42 – Equipamentos portáteis de GPS utilizados nos testes

Os testes para a determinação da precisão de posicionamento em campo consistiram na coleta da posição de cada um dos marcos geo-referenciados, utilizando-se o GPS *e-Trex*. Os marcos foram percorridos em um sentido pré-determinado, realizando-se dez coletas em cinco dias consecutivos, no período da manhã e no período da tarde.

Os dados de posicionamento foram armazenados nos próprios aparelhos de GPS portáteis e ao final dos testes eram transferidos para um microcomputador com o uso do software MapSource, e posteriormente exportados para o software Microsoft Excel. Nas planilhas Excel, efetuou-se o tratamento dos dados de posição, calculando-se as médias de latitude e longitude dos ensaios, erros médios e erros individuais dos pontos.

No software MapSource, optou-se pela análise dos dados no sistema de coordenadas UTM⁷³, possibilitando, desta forma, a apresentação dos resultados diretamente em unidades métricas.

⁷³ UTM: *Universal Transverse Mercator*,

3.2.3.2 Testes do Sistema de Comunicação

Os testes cinemáticos do sistema DGPS objetivaram verificar o funcionamento do sistema de comunicação desenvolvido. Para tanto, montou-se um experimento de campo, utilizando-se como local de testes o estacionamento do Ginásio Multidisciplinar da Unicamp (Figura 43).



Figura 43 – Estacionamento do Ginásio Multidisciplinar da Unicamp

No pavimento asfáltico do estacionamento, demarcou-se duas trajetórias em linha reta, de cerca de 100 metros cada uma, paralelas e distantes 30 metros. As linhas foram pintadas com tinta látex branca de modo tracejado.

Como meio de transporte de equipamentos e também veículo executor do percurso demarcado, escolheu-se um utilitário Volkswagen, modelo Kombi, denominado “Laboratório Móvel de Solos – Impactos Ambientais”, adquirido pela Faculdade de Engenharia Agrícola – Unicamp, com auxílio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP.

No interior do veículo foram instalados diversos equipamentos eletrônicos, podendo-se destacar dois receptores GPS de navegação modelo GPSmap 76S da Garmin, uma placa

receptora GPS modelo M12 da Motorola , um receptor GPS de mapeamento modelo Ag132 da Trimble, além de receptores de rádio e microcomputadores portáteis (Figura 44).



Figura 44 – Equipamentos instalados no interior do veículo utilizado nos testes cinemáticos

Para a alimentação dos diversos equipamentos utilizou-se, além da alimentação 12Vdc proveniente do sistema elétrico do próprio veículo, um equipamento do tipo *no-break*, alimentado por baterias externas, responsável por gerar a tensão de 127Vac, utilizada para a alimentação dos microcomputadores portáteis (Figura 45).



Figura 45 – No-break e baterias utilizadas no veículo

Os sinais de correção gerados pelo protótipo da Estação de Correção Diferencial foram transmitidos, via *link* de rádio, de um local fixo, geo-referenciado, situado no Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC, para o local onde foram realizados os testes de campo. Um rádio de comunicação, modelo T5720, marca Motorola, foi adaptado para utilização de antena externa, possibilitando um alcance maior do *link* de rádio. Para a transmissão do sinal de correção foi utilizado o sistema de comunicação descrito no item 3.2.2.5.

No teto do veículo, foram instaladas as antenas receptoras dos aparelhos de GPS e também a antena do rádio, dispostas em uma linha central. Na Figura 44 pode-se visualizar a disposição adotada para as antenas, observando-se, em primeiro plano, a antena receptora do sinal de correção via rádio, a seguir duas antenas receptoras do GPSmap76S da Garmin, a seguir antena do receptor AgGPS 132 da Trimble e finalmente a antena do receptor GPS Motorola M12+.



Figura 46 – Antenas do receptor de rádio e receptores de GPS e do instaladas no teto do veículo

Os testes foram executados com os receptores GPS operando no modo autônomo (sem correção diferencial) e com correção diferencial fornecida pelo protótipo da estação base. Os receptores GPSmap76S (Figura 47) operaram apenas com antenas externas e foram configurados para armazenar os pontos da trajetória a cada segundo, utilizando a própria memória, em um formato denominado *tracklog*⁷⁴.

⁷⁴ *Tracklog* é o ponto que corresponde à posição no momento da gravação.



Figura 47 – Aparelhos receptores GPS map76S

Os testes de campo foram realizados duas vezes ao dia (no período da manhã e no período da tarde) durante vários dias consecutivos do mês de julho de 2004, garantindo, desta forma, uma variabilidade na constelação dos satélites. Procurou-se manter uma velocidade de deslocamento constante de cerca de 12km/h com o auxílio de um outro receptor de GPS instalado no painel do veículo. As trajetórias foram percorridas em um único sentido, manobrando-se o veículo após a execução de cada uma delas de maneira a não existir sobre passagem.

Após cada sessão de coleta de dados, efetuava-se uma transferência dos dados armazenados nos receptores GPS para um microcomputador do tipo portátil. Para a realização dessa atividade utilizou-se o aplicativo GPS Trackmaker.

Os testes para verificar e validar as mensagens de correção enviadas, através de uma operação de pós-processamento, foram feitos através de gráficos gerados pelo *software* GPS TrackMaker e também, desenvolveu-se um aplicativo computacional na linguagem C++ Builder, para o ambiente PC, capaz de receber as mensagens de correção e armazená-las em um arquivo de registro no modo texto com data e hora de recebimento. Na estação base, também executou-se uma rotina semelhante para registrar as mensagens geradas pelo sistema

DGPS. O processo seguinte foi a comparação das mensagens geradas pelo protótipo da estação base com as mensagens recebidas pelos receptores GPS móveis.

3.2.3.3 Testes da Estação de Correção Diferencial

Os testes realizados na etapa anterior objetivaram, principalmente, a validação do sistema de transmissão do sinal de correção. Nesse sentido, nos testes da estação de correção diferencial não houve a preocupação quanto ao sistema de transmissão e o objetivo foi testar e validar a estação de correção diferencial construída, tanto nos aspectos de *hardware* quanto nos de *software*.

A estação de correção diferencial e os receptores GPS para a recepção do sinal de correção diferencial foram instalados no Laboratório de Instrumentação e Controle da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP. Utilizou-se um cabo coaxial como meio de transmissão do sinal de correção entre a estação base e os módulos receptores empregados e não foi necessário adequar o sinal ao meio de transmissão. Desta forma, a mensagem de correção diferencial no padrão RS-232C era aplicada diretamente ao meio de comunicação que por sua vez estava ligada às entradas de correção do receptor GPS móvel operando com correção. Os módulos da estação base e unidade móvel foram instalados em locais diferentes do prédio.

Para a determinação do marco geo-referenciado utilizou-se a estação de correção diferencial operando no modo de geo-referenciamento. Os dados coletados ocorreram entre os dias 25 a 30 de outubro de 2004, 24 horas por dia e 1 ponto por minuto. A partir dos arquivos de registros das coordenadas, obtiveram-se, para cada arquivo, as coordenadas médias. Em seguida, definiu-se o marco geo-referenciando como o ponto médio das coordenada médias calculadas.

A mensagem de correção foi enviada continuamente durante um período de 24 horas com o intervalo de coleta de pontos de 1 minuto nas unidades móveis. Em todos os testes foram utilizados dois receptores GPS móveis idênticos, onde um deles atuava com correção diferencial, enquanto o outro processava a informação sem correção. Estes testes foram realizados no mês de novembro de 2004, nos dias 09, 10, 11, 12, 13, 16, 17 e 18.

Nos testes utilizaram-se dois receptores GPS móveis, modelo III Plus, da Garmin, operando com e sem correção. Após o término da coleta dos pontos armazenados nos receptores GPS, estes foram transferidos para um microcomputador PC. Foi utilizado o software GPS TrackMaker para a realização desta operação e também para a geração dos mapas de pontos coletados pelos receptores GPS. Estes pontos foram armazenados em arquivos no formato ASCII.

Os dados experimentais foram coletados na forma de coordenadas geodésicas (latitudes e longitudes), tomando como referência o sistema WGS-84 e transferidos para o microcomputador sem qualquer transformação de coordenadas. No aplicativo TrackMaker, fez-se a conversão das coordenadas geodésicas em coordenadas plano retangulares (N, E), no sistema de projeção denominado UTM. Nestas transformações, manteve-se o referencial WGS-84, possibilitando assim a representação gráfica dos pontos experimentais.

Os arquivos de pontos gerados pelo TrackMaker, no formato UTM, foram armazenados no formato ASCII, e depois utilizados no software MS Excel para a realização das análises estatísticas comparativas dos índices de precisão circular entre os pontos coletados pelos receptores GPS operando com e sem correção diferencial.

Utilizou-se o *software* Trimble Planning, nesta fase de testes, para um planejamento preliminar da situação do Sistema GPS quanto à disponibilidade de sinais de satélites no período de realização dos testes.

A partir do MS Excel, foram elaborados gráficos polares para ilustrar a distribuição radial dos pontos coletados pelos receptores GPS operando com e sem correção para um comparativo visual. Foram criados gráficos comparativos dos índices de erro a partir dos arquivos de pontos coletados pelos receptores GPS. Para tanto, foram executados os seguintes cálculos no MS Excel:

1- Coordenada média (\bar{X} e \bar{Y}) através das no sistema de projeção UTM (WGS/84). através da Equação 5.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad \text{Equação 5}$$

Onde n é o número total de medições.

2- Erro Absoluto de posicionamento⁷⁵ de acordo com a *Equação 6*.

$$EA = \sqrt{(X_r - \bar{X})^2 + (Y_r - \bar{Y})^2} \quad \text{Equação 6}$$

Onde X_r, Y_r corresponde à coordenada do marco geo-referenciado.

3 – Desvio padrão das coordenadas por meio da *Equação 7*.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad \text{Equação 7}$$

4 – Erro Radial de Posicionamento por meio da *Equação 10*. É obtido a partir dos erros de posicionamento referentes aos valores de latitude e longitude das coordenadas, calculados em relação ao valor da coordenada média, conforme *Equação 8* e *Equação 9*.

$$x = X_i - \bar{X} \quad \text{Equação 8}$$

Onde x é a diferença entre a i -ésima medição do valor da latitude da coordenada e a média do valor da latitude.

$$y = Y_i - \bar{Y} \quad \text{Equação 9}$$

Onde y é diferença entre a i -ésima medição do valor da longitude da coordenada e a média do valor da longitude.

$$ER = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{Equação 10}$$

5 – Erro Radial Médio (ERM): definido como a média dos erros radiais de posicionamento.

6 – Erro Circular Padrão através da *Equação 11*.

⁷⁵ O erro absoluto corresponde à distância entre o marco geo-referenciado e a média das coordenadas medidas.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad \text{Equação 11}$$

7 – Determinação dos índices de erro circular CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$ e posterior geração dos gráficos comparativos.

No índice de Erro Circular Padrão espera-se que 39,35% de todos os erros em uma distribuição circular não excedam ao erro padrão circular. Para uma distribuição circular, os erros padrões lineares são iguais e idênticos ao erro padrão circular ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_c$). Quando σ_x e σ_y não forem iguais, a distribuição de erro circular normal pode ser substituída pela distribuição elíptica. A substituição é satisfatória para análise de erros dentro de razões de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ especificadas.

Para valores de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 1,0 e 0,6, o erro padrão circular pode ser calculado pela Equação 12.

$$\sigma_c \approx (0,5222\sigma_{\min} + 0,4778\sigma_{\max}) \quad \text{Equação 12}$$

No índice Erro Circular Provável tem-se que 50% de todos os erros em uma distribuição circular não excedem ao erro circular provável. O erro circular provável em uma distribuição circular ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_c$) é calculado pela Equação 13.

$$CEP = 1,1774\sigma_c \quad \text{Equação 13}$$

Quando σ_x e σ_y não forem iguais, o valor aproximado do CEP pode ser determinado pela Equação 14 para valores de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 1,0 e 0,3.

$$CEP \approx (0,6142\sigma_{\min} + 0,5632\sigma_{\max}) \quad \text{Equação 14}$$

A Equação 15 calcula o CEP para valores de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 0,3 e 0,2.

$$CEP \approx (0,4263\sigma_{\min} + 0,6196\sigma_{\max}) \quad \text{Equação 15}$$

No intervalo de $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ entre 1,0 e 0,2 o CEP é calculado através da Equação 16.

$$CEP \approx 0,5887(\sigma_x + \sigma_y) \quad \text{Equação 16}$$

O cálculo CEP não é recomendado para $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ menor que 0,2.

O Erro de Posicionamento Médio Quadrático é definido como o raio do círculo de erro igual a $1,4142\sigma_c$. O valor de MSPE é calculado pela Equação 17 para $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ entre 1,0 e 0,8. Segundo DMA (2001), o MSPE não é recomendado quando σ_x e σ_y não forem iguais.

$$MSPE = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad \text{Equação 17}$$

A Equação 18 define o fórmula para o cálculo do índice 2drms cujo valor percentual é de 95,4%.

$$2drms = 2\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad \text{Equação 18}$$

A Acurácia Circular Padrão de Mapa é baseada no nível de porcentagem em uso pelo *National Map Accuracy Standards* (DMA, 1991). Especifica que apenas 10% dos pontos de um mapa excedem um erro estimado. O índice CMAS é obtido através da Equação 19.

$$CMAS = 2,1460\sigma_c \quad \text{Equação 19}$$

A Equação 20 define o índice CMAS em função do CEP.

$$CMAS = 1,8227 CEP \quad \text{Equação 20}$$

O índice $3,5\sigma$ Equação 21 representa a probabilidade circular de 99,78% e, portanto, aproxima-se da certeza em uma distribuição circular.

$$3,5\sigma = 3,5\sigma_c \quad \text{Equação 21}$$

Nas aplicações em GPS, as variáveis x e y são erros aleatórios definidos como, por exemplo, latitude e longitude convertidas para a unidade métrica. Dificilmente estes erros serão iguais. Portanto, referem-se a uma distribuição elíptica. Para simplificar o cálculo da probabilidade, a distribuição elíptica é convertida para uma distribuição circular equivalente

aplicando-se a Equação 22. Esta transformação é adequada para situações onde o maior erro padrão não exceda a cinco vezes o menor.

$$\sigma_c = 0,5(\sigma_x + \sigma_y)$$

Equação 22

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na realização do presente trabalho. Como o objetivo principal foi o desenvolvimento de um sistema de custo reduzido para geração de sinal de correção diferencial, em tempo real, para GPS, entende-se como resultados obtidos, não só aqueles relativos ao desempenho do equipamento, mas também, todos os procedimentos, metodologia e testes utilizados para o desenvolvimento e validação do sistema como um todo.

4.1 *Protótipo do Sistema DGPS*

Esta etapa, centralizou-se na integração dos componentes necessários e no desenvolvimento das rotinas computacionais necessárias para a construção de um protótipo do sistema DGPS. Utilizou-se como unidade de processamento de correção para a geração da mensagem de correção e configuração do receptor GPS um microcomputador da família PC, devido à disponibilidade de diversos *softwares* para controle do receptor GPS e testes do sistema. O microcomputador teve a função de gerenciar todo o funcionamento do equipamento durante a operação e também durante a realização dos testes.

Os principais componentes necessários para o funcionamento do protótipo do sistema DGPS foram: microcomputador padrão PC, receptor GPS base, aplicativos computacionais para a comunicação bidirecional, microcomputador-receptor GPS, controle e monitoramento do receptor GPS e transmissão do sinal de correção diferencial.

Após análise técnica e econômica com alguns receptores GPS base, escolheu-se os receptores modelos VP Oncore e posteriormente M12+ Oncore, ambos da Motorola, por atenderem aos requisitos de uma estação base e serem equipamentos de baixo custo, permitindo assim, uma redução no preço final do equipamento. Para a correta comunicação desse equipamento com o computador, houve a necessidade de desenvolver uma placa que dispusesse dos dispositivos eletrônicos necessários para efetuar uma conexão bidirecional através da porta serial RS-232C. A razão da escolha deste barramento deveu-se a duas razões principais: 1ª – a informação recebida e transmitida pelos GPS utilizados é serial, no padrão RS-232C e, 2ª – o *hardware* necessário para efetuar a comunicação serial é mais simples de se

projetar e conseqüentemente, apresenta um menor custo se comparado a outros barramentos seriais.

Nesta etapa, além da integração dos componentes do sistema, focou-se no desenvolvimento das rotinas computacionais responsáveis pela comunicação com o receptor GPS e geração da mensagem de correção no formato do protocolo RTCM SC-104. Escolheu-se esse protocolo, basicamente, por se tratar de um padrão aceito pela quase totalidade da indústria de fabricantes e desenvolvedores de receptores GPS diferenciais e que, a utilização de formatos proprietários de mensagens de correção diferencial restringiria o uso do sistema proposto.

O maior desafio encontrado nessa etapa e ao longo de outras do presente trabalho, diz respeito à elaboração da rotina para geração da mensagem de correção diferencial no formato RTCM, principalmente, devido à escassez de material sobre o assunto além da dificuldade para depurar os erros dos programas computacionais, pois os procedimentos de testes foram realizados em termos de bits individuais contidos na mensagem.

4.1.1 Software para Geração da Mensagem RTCM

Escolheu-se a linguagem de programação C/C++, em virtude da diversidade de compiladores no âmbito dos microprocessadores e microcontroladores. Com a utilização da linguagem C/C++, o processo de migração para outros microprocessadores e microcontroladores torna-se mais fácil, caso o modelo em uso não esteja mais disponível comercialmente ou haja a necessidade da troca por um outro com maior poder de processamento ou de menor custo.

Nessa fase foram desenvolvidas quatro rotinas principais:

- Leitura das informações através da porta serial RS-232C;
- Geração da mensagem de correção diferencial no formato RTCM SC-104;
- Visualização dos dados enviados pelo receptor GPS e a mensagem de correção RTCM;
- Transmissão da mensagem de correção pela porta serial RS-232 C.

Para este sistema foi necessário um microcomputador padrão PC com pelo menos duas portas seriais: uma para o recebimento das informações do receptor GPS e a outra para envio da mensagem de correção diferencial para o sistema de transmissão.

Utilizou-se um componente do tipo *freeware*, denominado TComPort, desenvolvido por Dejan Crnila, para configuração da porta serial. Este componente possibilitou especificar diversos parâmetros da porta serial, tais como: taxa de transmissão, quantidade de bits de dados, paridade, bits de parada, forma de controle de fluxo e a porta serial que será utilizada (COM1, COM2, COM3 ou COM4). Desta forma, pôde-se configurar facilmente o aplicativo desenvolvido em conformidade com o receptor GPS para efetuar a comunicação.

As rotinas desenvolvidas para a visualização das mensagens recebidas do GPS e da mensagem de correção diferencial foram extremamente importantes para as análises e testes dos resultados obtidos. Tais rotinas possibilitaram a visualização das informações tanto no modo texto (código ASCII) quanto no formato hexadecimal (extremamente útil para interpretação de informações binárias). Foram desenvolvidas rotinas adicionais para facilitar o processo de depuração, uma vez que, a análise era executada em termos de bits individuais. Essas rotinas faziam também o processo inverso: a partir da mensagem de correção diferencial no formato RTCM, separavam-se os campos individuais para verificar se a mesma estava em conformidade com a mensagem enviada pelo receptor GPS base.

Preocupou-se em criar um aplicativo computacional dividido em módulos (sub-rotinas) independentes, de forma que, no processo de conversão da plataforma PC para o microcontrolador, fosse possível especificar prontamente quais as rotinas seriam necessárias. Embora a ferramenta C++ Builder dispusesse de uma série de recursos para facilitar o desenvolvimento de *software*, procurou-se utilizar somente os recursos padrões da linguagem ANSI C, para facilitar o processo de conversão para outro ambiente C/C++.

A Figura 48 mostra o aspecto da tela para visualização das mensagens. Nessa tela pode-se visualizar, em hexadecimal, os conteúdos das mensagens *@@Ce* e *@@Ha* geradas pelo GPS base e também o conteúdo da mensagem de correção, no formato RTCM SC-104, gerada pelo *software*.

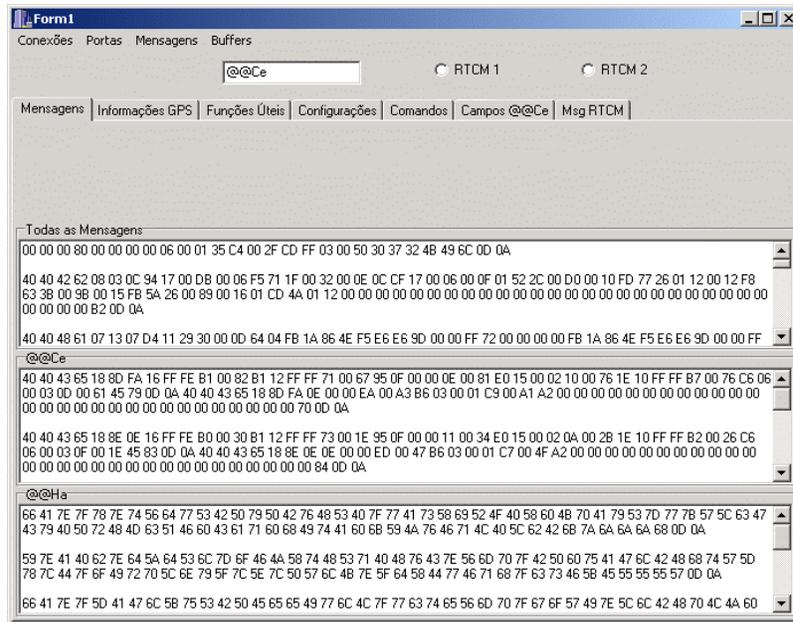


Figura 48 – Tela de visualização das mensagens

Com a tela mostrada na Figura 49 pode-se visualizar e interpretar a sentença de correção no formato proprietário (@@Ce), exibindo para cada um dos satélites visíveis as informações de PRC e RRC, além da informação IOD.

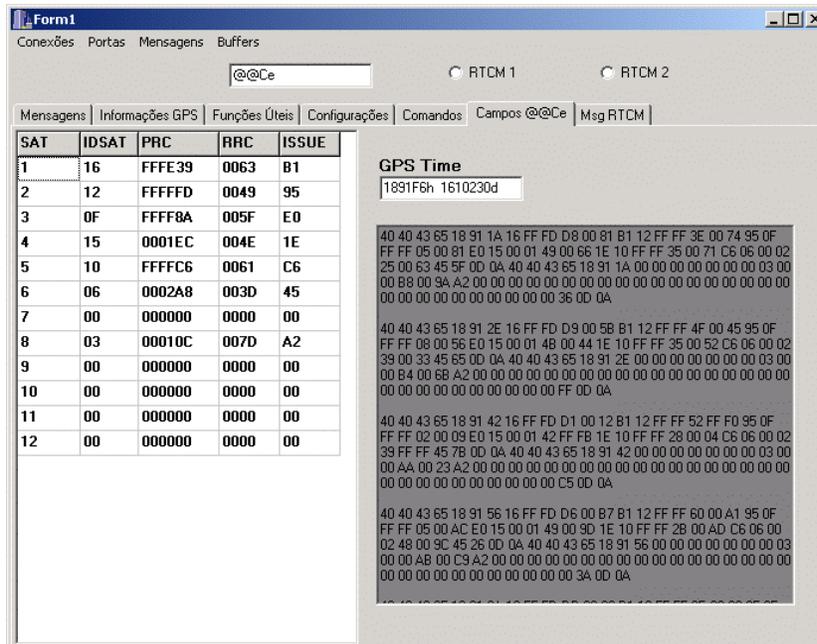


Figura 49 – Tela para a visualização e interpretação das mensagens de correção no formato proprietário Motorola

Na tela mostrada na Figura 50 visualiza-se e interpreta-se a sentença de correção no formato RTCM SC-104, exibindo para cada um dos satélites visíveis as informações de PRC, RRC, IOD, fator de escala e o UDRE.

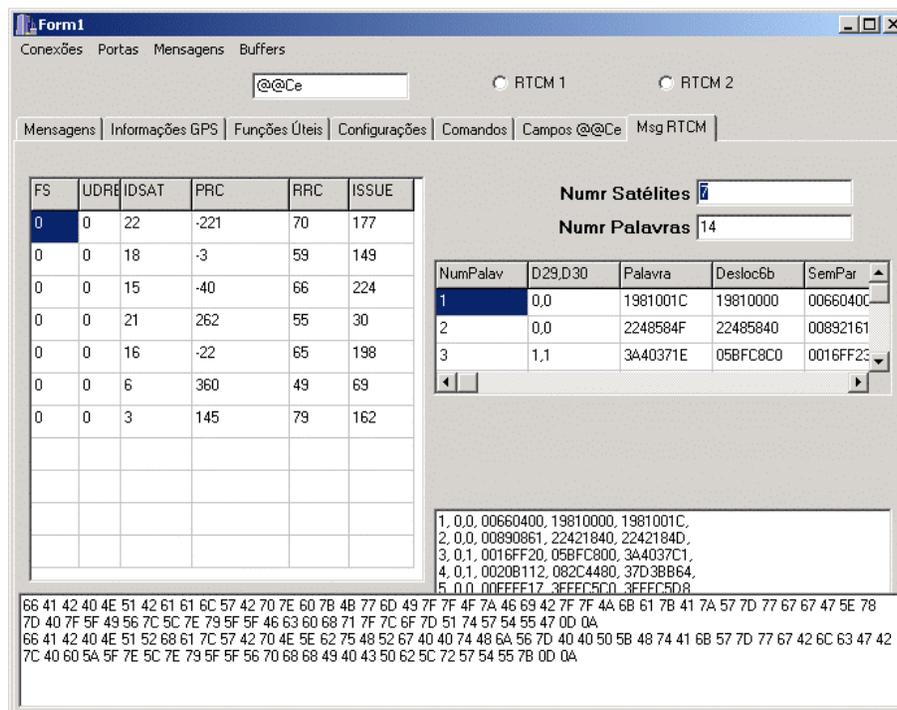


Figura 50 – Tela para a visualização e interpretação das mensagens de correção no formato RTCM SC-104

4.1.2 Testes e Avaliação do Protótipo do Sistema DGPS

O uso do sinal gerado por uma estação de correção comercial, melhorou a precisão do posicionamento em relação aos resultados do protótipo, porém, os ganhos não foram muito expressivos. Concluiu-se, pelos resultados dos testes realizados, que era técnica e economicamente viável o desenvolvimento de um sistema de custo reduzido para geração de sinal de correção diferencial, em tempo real, para GPS.

O processo de avaliação do protótipo do sistema DGPS foi realizado inicialmente em laboratório, onde o receptor GPS móvel foi fixado e o geo-referenciamento do marco foi obtido a partir do ponto médio de diversos pontos amostrados. O meio de comunicação utilizado entre a estação de correção base e os receptores móveis foi um cabo coaxial.

Em seguida, foram realizados os testes de precisão de posicionamento em campo utilizando a comunicação através de rádio-frequência. Utilizou-se nessa etapa do trabalho um sistema de comunicação comercial onde verificou-se o funcionamento do mesmo em diversas taxas e envio da mensagem de correção em diferentes intervalos de tempo. Porém, para efeitos de testes de precisão de posicionamento foi utilizado o melhor caso tendo a maior taxa (9600bps) e menor intervalo de tempo entre as mensagens de correção (1 segundo).

4.1.2.1 Testes em Laboratório

Os resultados dos testes em laboratórios foram divididos em três partes: GPS operando de maneira autônoma (sem correção diferencial), GPS operando com correção diferencial fornecida pelo protótipo da estação e GPS operando com correção fornecida por uma estação de correção comercial.

Sistema sem correção diferencial

Os resultados dos testes em laboratório para o receptor GPS *III Plus* operando sem correção diferencial podem ser observados na Figura 51. Os pontos correspondem às posições observadas e o ponto central corresponde à média das posições observadas.

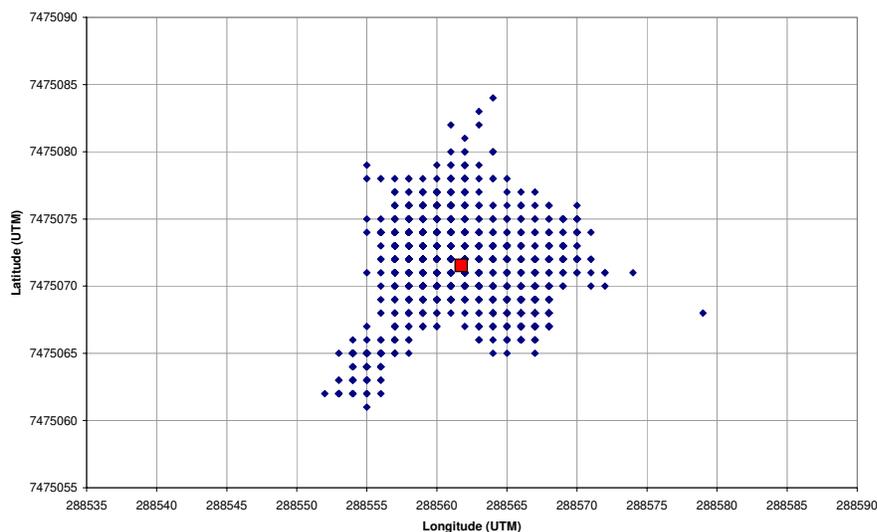


Figura 51 – Distribuição espacial dos pontos observados durante aproximadamente 24 horas consecutivas, sem correção diferencial

A variação da posição em torno do ponto médio dos registros foi de 4,15 metros em 95% do tempo de observação. O máximo desvio encontrado foi de 17,62 metros. A Figura 52 mostra o comportamento do desvio da posição instantânea em relação à posição média, em função do tempo.

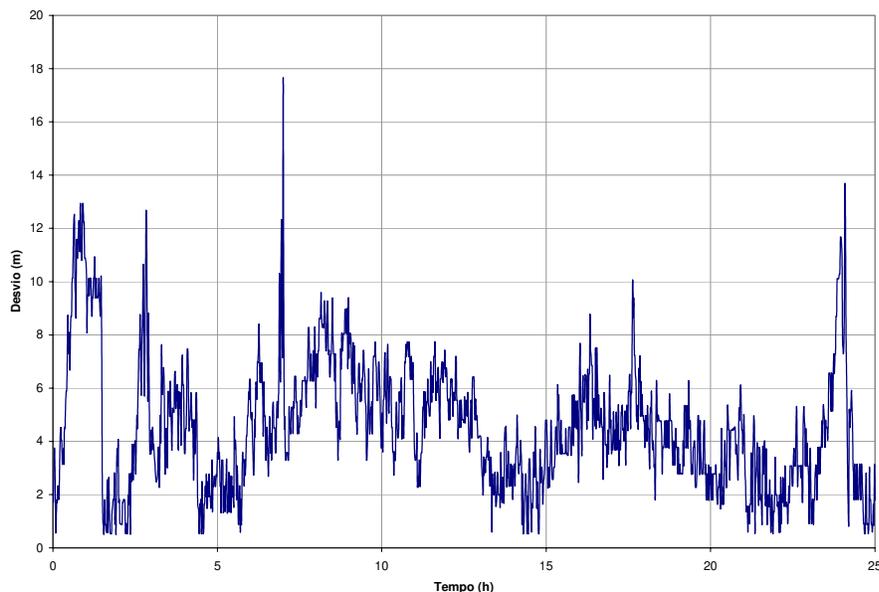


Figura 52 – Distribuição temporal dos desvios de posição em relação à posição média, sem correção diferencial

Sistema com correção diferencial de custo reduzido - Protótipo

Os resultados dos testes em laboratório para o receptor *GPS III Plus* operando com correção diferencial, fornecida pelo protótipo da estação de correção, podem ser observados na Figura 53.

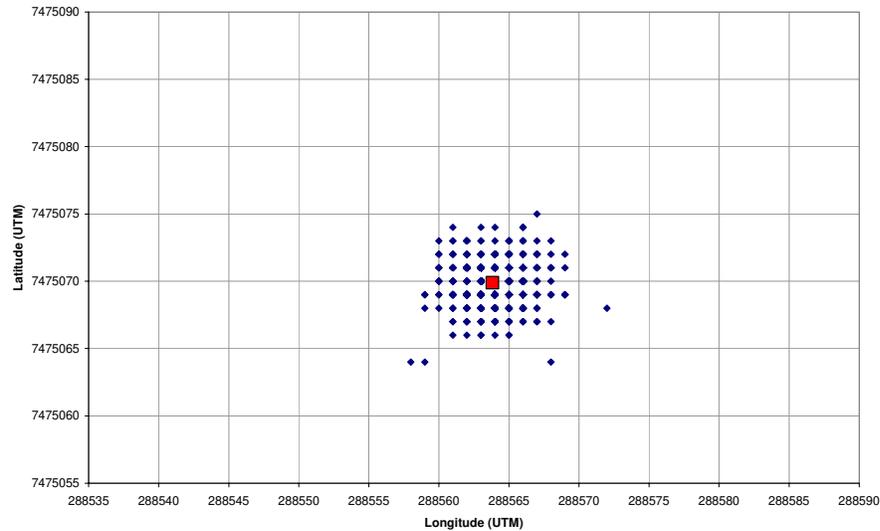


Figura 53 – Distribuição espacial dos pontos observados com correção diferencial fornecida pelo protótipo

A média da variação da posição dos pontos coletados em torno do ponto médio dos registros foi de 1,46 metros em 95% do tempo de observação. O máximo desvio encontrado foi de 8,39 metros. A Figura 54 mostra o comportamento do desvio da posição coletada em relação à posição média, em função do tempo.

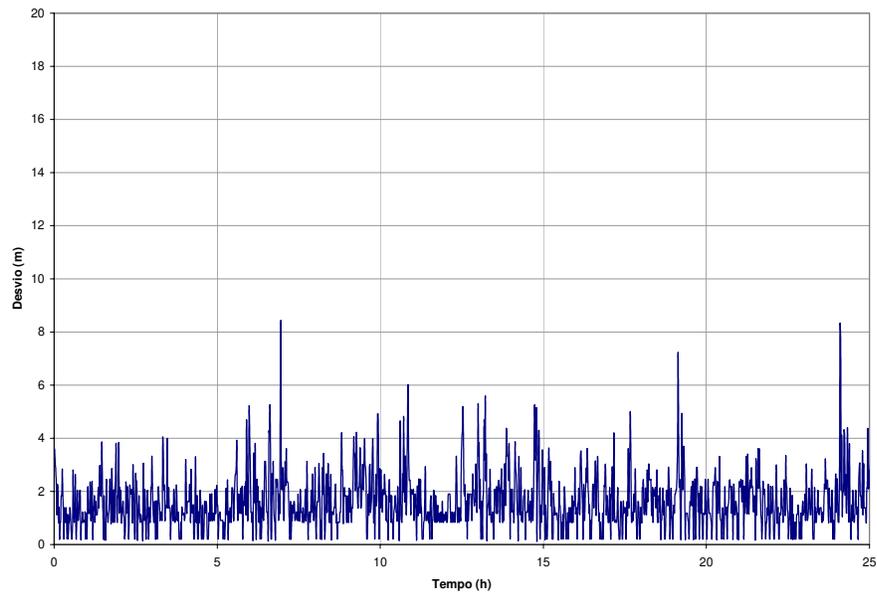


Figura 54 – Distribuição temporal dos desvios de posição em relação à posição média, com correção diferencial fornecida pelo protótipo

Sistema com correção diferencial comercial

Os resultados dos testes em laboratório para o receptor GPS *III Plus* operando com correção diferencial, fornecida pela estação de correção comercial, podem ser observados na Figura 55.

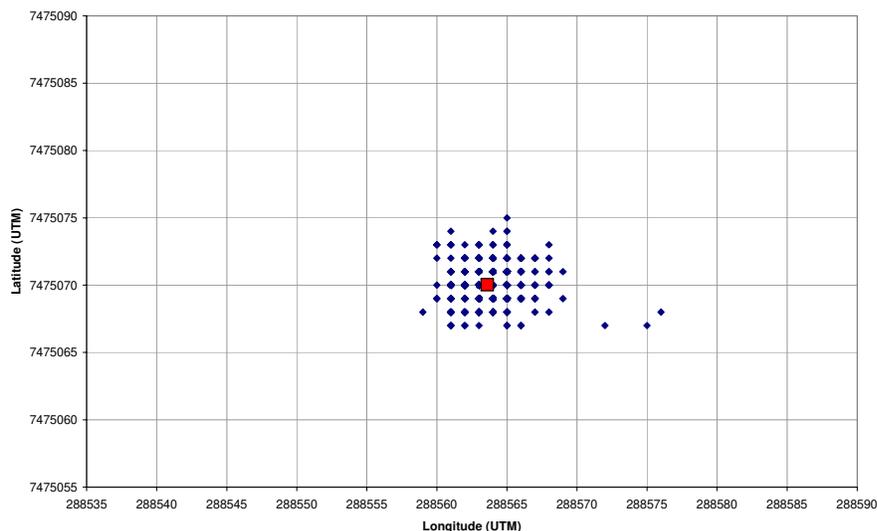


Figura 55 – Distribuição espacial dos pontos observados durante 24 horas consecutivas, com correção diferencial fornecida estação comercial

A média da variação da posição dos pontos coletados em torno do ponto médio dos registros foi de 1,48 metros em 95% do tempo de observação. O máximo desvio encontrado foi de 12,62 metros. A Figura 56 mostra o comportamento do desvio da posição instantânea em relação à posição média, em função do tempo.

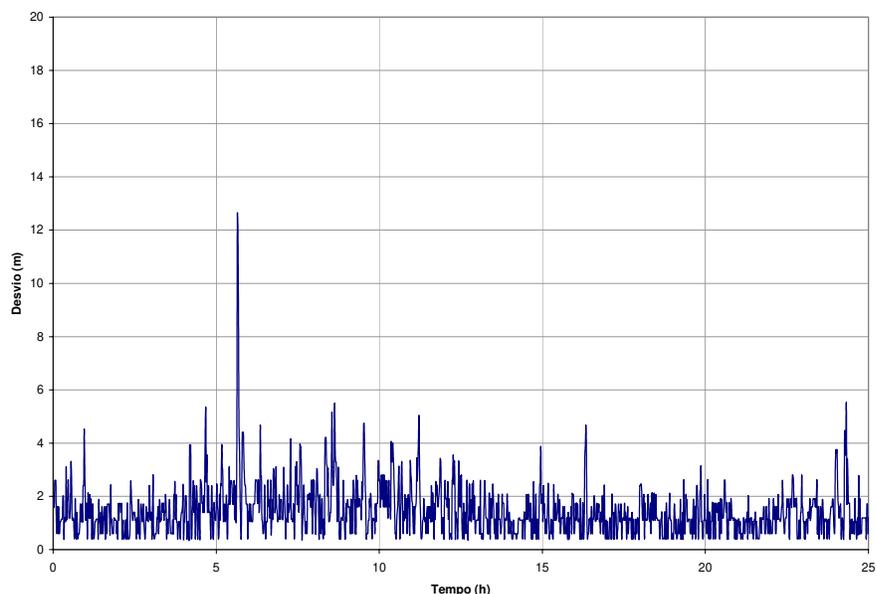


Figura 56 – Distribuição temporal dos desvios de posição em relação à posição média, com correção diferencial fornecida pela estação comercial

O Quadro 32 resume os resultados obtidos nos testes em laboratório realizados, onde foi utilizado um GPS portátil de baixo custo, marca Garmin, modelo GPS III Plus, operando sem correção diferencial e com correção fornecida pelo protótipo desenvolvido e pela estação comercial.

Quadro 32 – Resumo dos resultados dos testes em laboratório

	Tipo de Correção		
	Sem correção (Autônomo)	Com correção (Protótipo)	Com correção (Comercial)
Erro médio (m)	4,15	1,48	1,46
Erro máximo (m)	17,62	8,39	12,62
Desvio padrão latitude (m)	3,23	0,95	0,55
Desvio padrão longitude (m)	3,86	1,42	1,37

4.1.2.2 Testes de Campo

Os testes de precisão de posicionamento foram realizados em campo aberto, utilizando-se um *grid* com pontos marcados. Nesses testes, a estação móvel operou com dois equipamentos *e-Trex*. Nos testes de campo, um aparelho operou sem correção, enquanto que o outro operou com correção diferencial em tempo real. Numa primeira etapa o sinal de correção foi fornecido pelo protótipo da estação de correção desenvolvida no projeto, e numa etapa posterior, o sinal de correção foi fornecido pela estação de correção comercial. Foram coletadas duas amostras por dia, manhã e tarde, durante quatro dias consecutivos.

Sistema sem correção diferencial

Os resultados dos testes para determinação da precisão de posicionamento para o receptor *e-Trex* operando sem correção diferencial, podem ser observados na Figura 57. Os pontos menores correspondem aos pontos coletados e os pontos maiores correspondem à média das posições observadas. Adotou-se no gráfico uma diferenciação de cada um dos marcos por cores e forma geométrica dos marcadores.

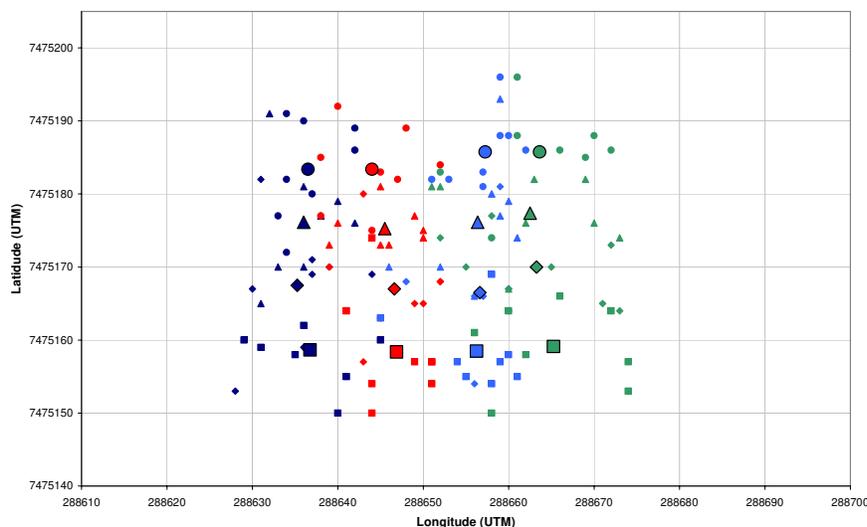


Figura 57 – Distribuição espacial dos pontos coletados nos marcos, sem correção diferencial.

Sistema com correção diferencial de custo reduzido – Protótipo

Os resultados dos testes para determinação da precisão de posicionamento para o receptor *e-Trex* operando com correção diferencial, fornecida pelo protótipo da estação de correção, podem ser observados na Figura 58. Os pontos menores correspondem aos pontos

coletados e os pontos maiores correspondem à média das posições observadas. Adotou-se no gráfico uma diferenciação de cada um dos marcos por cores e forma geométrica dos marcadores.

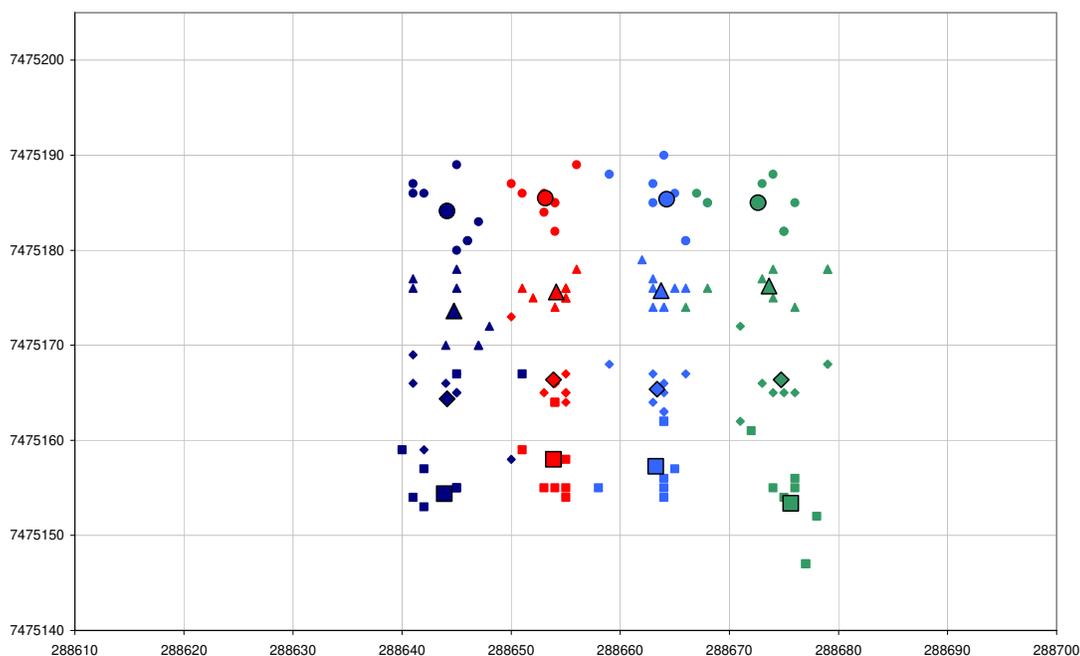


Figura 58 – Distribuição espacial dos pontos coletados nos marcos, com correção diferencial fornecida pelo protótipo

Sistema com correção diferencial comercial

Os resultados dos testes para determinação da precisão de posicionamento para o receptor e-Trex operando com correção diferencial, fornecida pela estação de correção comercial, podem ser observados na Figura 59. Os pontos menores correspondem aos pontos coletados e os pontos maiores correspondem à média das posições observadas. Adotou-se no gráfico uma diferenciação de cada um dos marcos por cores e forma geométrica dos marcadores.

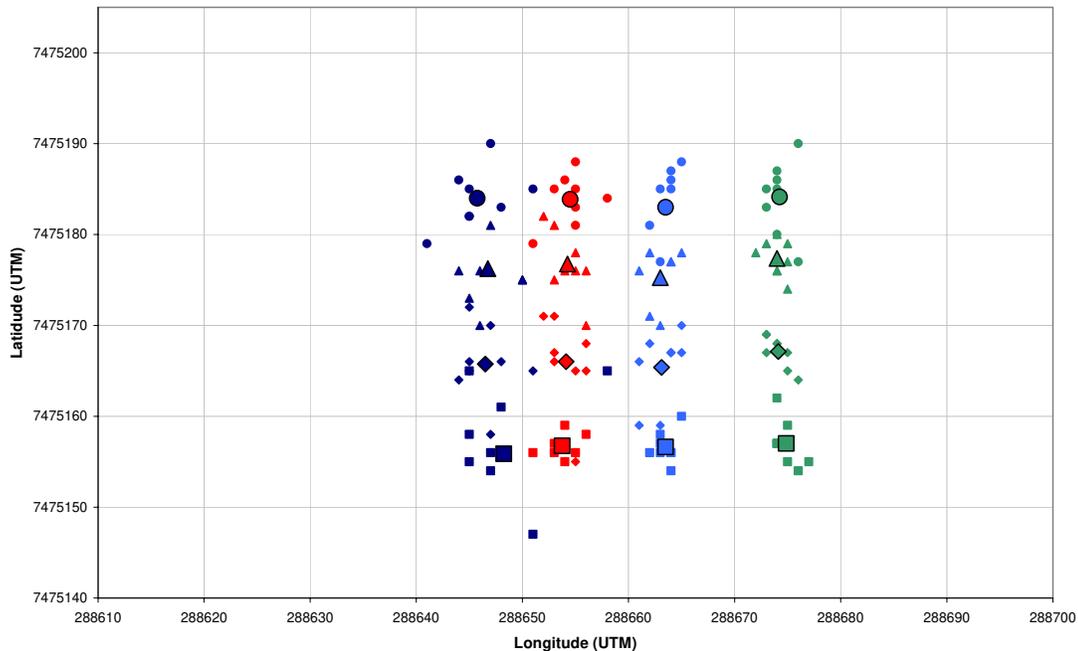


Figura 59 – Distribuição espacial dos pontos coletados nos marcos, com correção diferencial fornecida estação comercial

Observou-se, pelos resultados dos testes, que houve um expressivo ganho na precisão dos pontos locados com o uso do sinal de correção fornecido pelo protótipo em relação ao GPS em operação autônoma. O uso de um sinal gerado por uma estação de correção comercial, melhorou a precisão do posicionamento em relação aos resultados do protótipo, porém, os ganhos não foram tão expressivos.

4.2 Sistema de Comunicação

Como tratado anteriormente, o Sistema de Comunicação é constituído pelos seguintes subsistemas:

- Estação base: modulador, conversor de taxa e rádio transmissor;
- Módulo receptor móvel: rádio receptor, conversor de taxa e demodulador.

O circuito eletrônico do modulador/demodulador foi baseado no circuito integrado MX-614, fabricado pela MX-COM. Com o uso desse componente dedicado para a implementação do circuito modulador/demodulador, conseguiu-se uma significativa

simplificação do mesmo, dispensando-se do uso de circuitos osciladores discretos. O CI MX-614 operou no modo *half-duplex*, com taxa de transmissão e recepção de 1.000bps.

O circuito projetado para realizar a conversão de taxa é utilizado como interface entre o processador de correção e o modulador na estação base. Basicamente, a função desse circuito é receber o sinal de correção a uma taxa compreendida entre 1200 a 9600 bps, armazená-la e enviá-la ao modulador à taxa de 1.000bps.

O conversor de taxa e o modulador foram montados em uma placa de circuito impresso especialmente projetada para tal finalidade. É alimentado através de uma bateria de 9 volts recarregável. A entrada do sinal de correção, no formato RTCM SC-104 é realizada através de um conector do tipo DB9 macho. A saída do sinal analógico, modulado no padrão FSK é feita através de um conector do tipo P2 fêmea. O equipamento foi montado em uma caixa plástica de dimensões 55 x 97 x 147mm (P x L x A).

No módulo receptor, o conversor de taxa está incorporado entre o demodulador e o receptor GPS, sendo responsável por ajustar a taxa do sinal recebido a 1000 bps do demodulador para uma taxa entre 1.200 a 9.600bps e retransmiti-lo para o GPS.

Os circuitos eletrônicos do demodulador e conversor de taxa também foram montados em uma placa de circuito impresso, sendo alimentados através de uma bateria de 9 volts recarregável. A entrada do sinal analógico modulado é realizada através de um conector do tipo P2 fêmea. A saída do sinal de correção, em níveis RS-232C é feita através de um conector do tipo DB9 macho. O sinal de correção recebido deve ser transformado de nível TTL-5V para nível RS-232C, compatível com as interfaces seriais da maioria dos receptores de GPS existentes no mercado. O equipamento foi montado em uma caixa plástica de dimensões 55 x 97 x 147mm (P x L x A).

Para dar flexibilidade de operação a este equipamento, às taxas de transmissão e de recepção, o tamanho da mensagem e os caracteres de fim de mensagem podem ser configurados através de um programa desenvolvido para executar nos computadores da família PC e desenvolvido na linguagem de programação C/C++. Para realizar estas configurações o equipamento deve ser conectado à porta de serial padrão RS-232 do microcomputador.

O sistema DGPS foi concebido para operar de forma independente do rádio-transmissor, de modo que pudesse ser utilizado em conjunto com qualquer outro sistema de rádio. Procurou-se utilizar rádios-transmissores de baixo custo tanto na transmissão quanto na recepção com o intuito de prover uma redução no custo em todas as partes do sistema.

Os aplicativos computacionais utilizados para registrar as mensagens transmitidas e recebidas permitiram validar todo o sistema de comunicação. Analisando os arquivos de registros verificou-se que as mensagens de correção foram recebidas corretamente garantindo assim, a validação do alcance e da integridade do sinal recebido.

4.2.1 Testes e Avaliação do Sistema de Comunicação

Os testes, cuja metodologia é apresentada no item 3.2.3.2, objetivaram a validação dos equipamentos desenvolvidos para o sistema de comunicação, verificando o sinal de correção diferencial enviado e seu respectivo alcance. Conforme os testes realizados na etapa anterior, novamente compararam-se os resultados gerados pelo GPS operando sem correção diferencial e GPS operando com correção fornecida pelo protótipo.

Nessa etapa, fez-se uso de dois receptores GPS marca Garmin, modelo GPSmap76S, um operando com o sinal de correção diferencial e outro sem correção. Os dados coletados pelos receptores GPS móveis foram exportados para um microcomputador PC através da porta serial RS-232, através do software TrackMaker, que também foi utilizado para a geração dos gráficos das rotas e análises dos resultados dos testes. Nessa etapa, não se fez nenhuma análise estatística dos dados dos experimentos, pois o objetivo principal foi a validação do sistema de comunicação proposto. A Figura 60 mostra a rota obtida a partir dos dados do receptor GPS operando com correção e a Figura 61 a rota do receptor sem correção para um dos dias de testes.

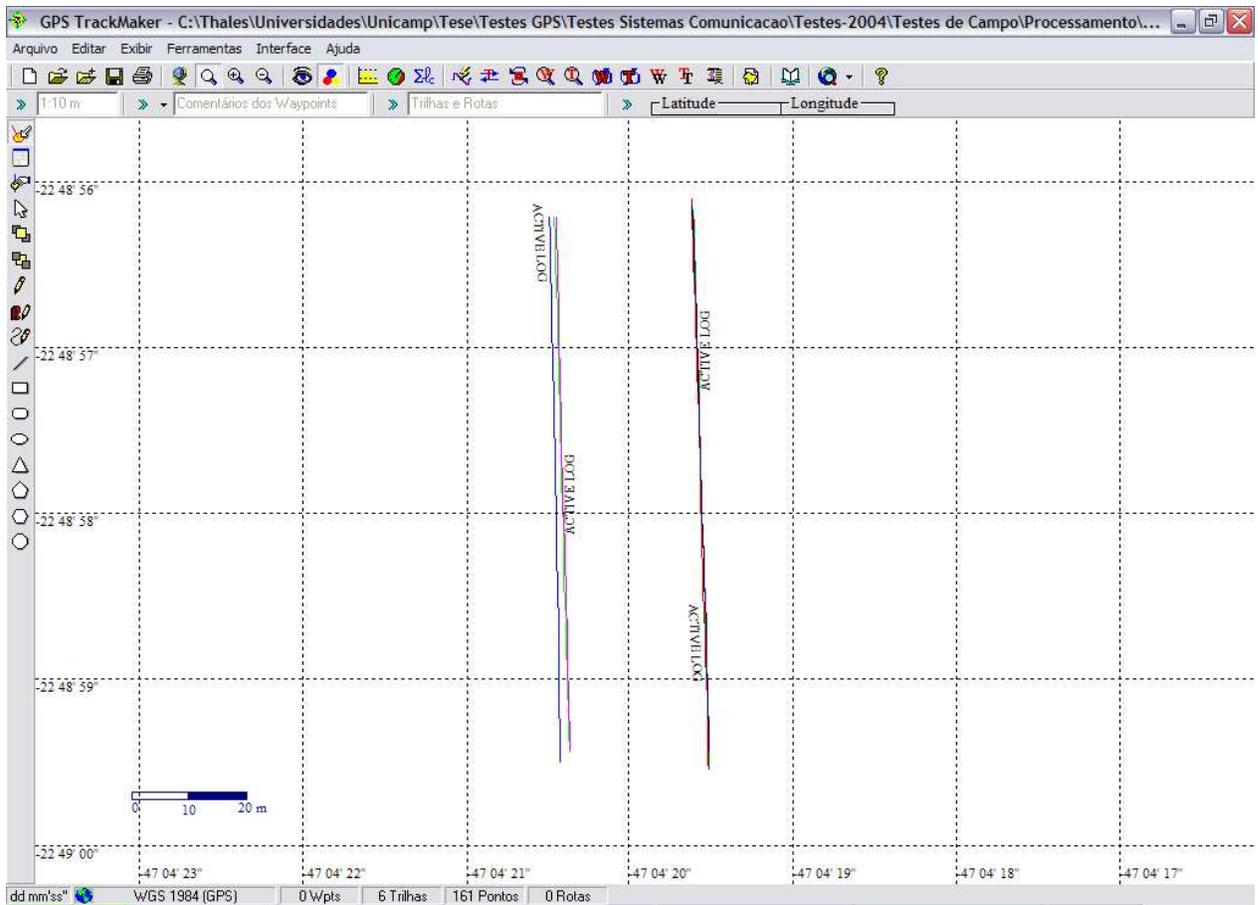


Figura 60 – Gráfico ilustrando a rota gerada pelo receptor GPS operando sem correção diferencial

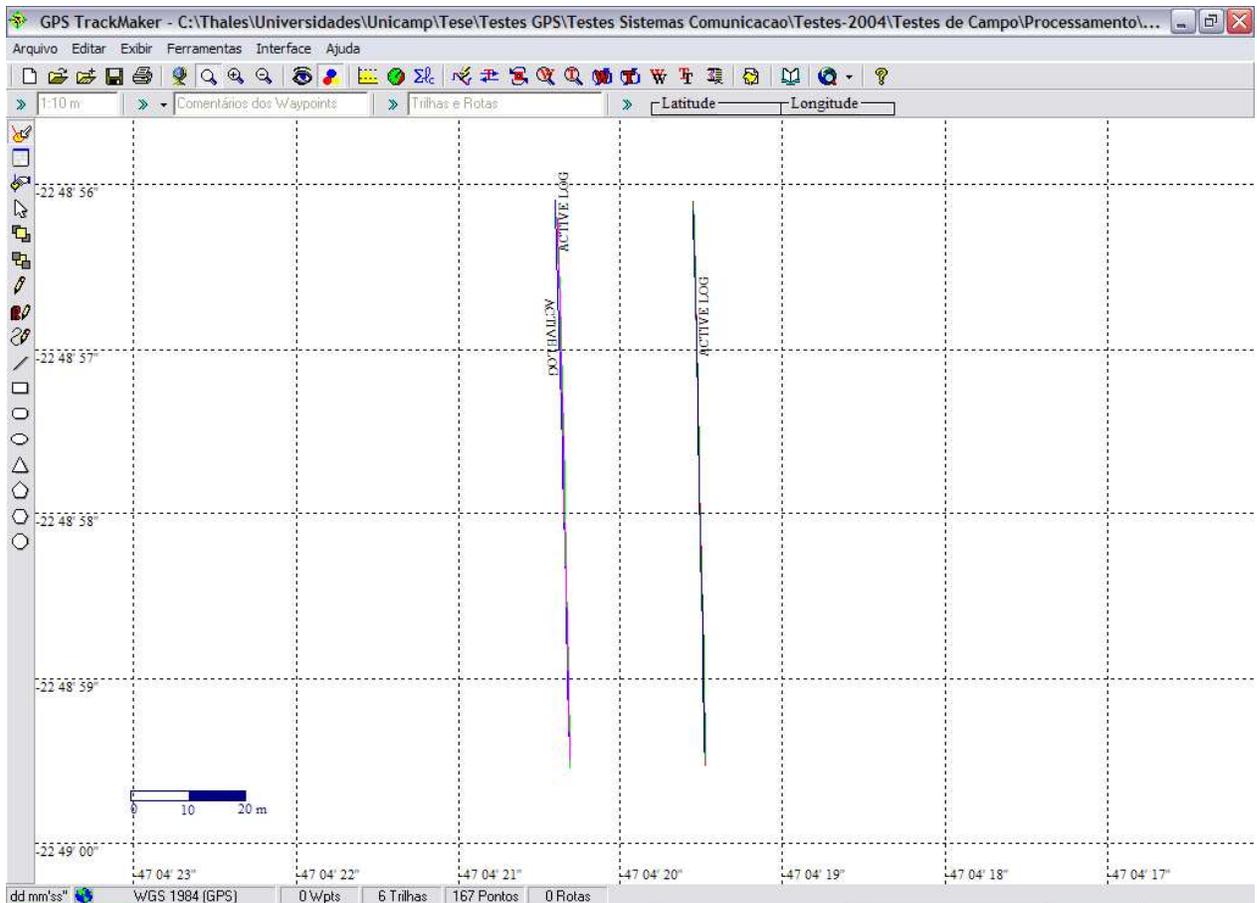


Figura 61 – Gráfico ilustrando a rota gerada pelo receptor GPS operando com correção diferencial

Pôde-se provar que o sistema de transmissão se comportou adequadamente, mantendo a continuidade, à taxa de correção de 1 (um) ponto por segundo e distância de 1,5km. Observa-se que, pelos gráficos expostos acima, que o receptor GPS operando com correção diferencial apresentou uma melhor precisão quando comparado ao receptor GPS operando sem correção.

4.3 Sistema DGPS

O Sistema DGPS foi realizado na segunda fase do presente projeto. Para que este equipamento pudesse atuar de forma autônoma, foram realizadas melhorias no *hardware* do sistema, através do uso de um microcontrolador operando em conjunto com o receptor GPS e substituindo as funcionalidades do computador. O *software* residente no microcontrolador é

responsável pela geração do sinal de correção diferencial no formato RTCM SC-104, configuração e supervisão no receptor GPS base e cálculos de fórmulas estatísticas para o georeferenciamento. Para tanto, foi preciso construir as rotinas necessárias para a execução dessas funcionalidades.

4.3.1 Hardware do Sistema DGPS

Todo o circuito eletrônico do módulo do processador de correção diferencial foi implementado em uma única placa de circuito impresso, sendo utilizado o software Tango para o projeto da mesma. As placas confeccionadas para a montagem do protótipo foram do tipo dupla face, com furos metalizados e base de fibra de vidro. Foram confeccionados fotolitos para as duas faces e máscaras de texto e de solda. A Figura 62 mostra o aspecto final do *silk screen* da placa de circuito impresso principal, vista pelo lado dos componentes.

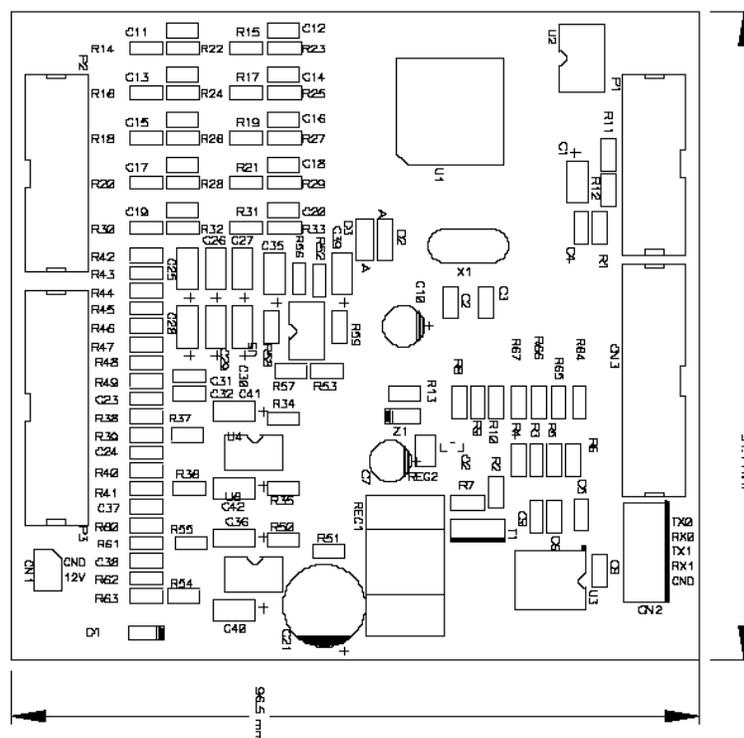


Figura 62 – Placa do processador de correção baseado no MSP430 (*silk screen*)

A Figura 63 mostra o aspecto final do *silk screen* da placa de circuito impresso do teclado do processador de correção, visto pelo lado dos componentes. Através do teclado o usuário efetua as configurações necessárias ao funcionamento do equipamento.

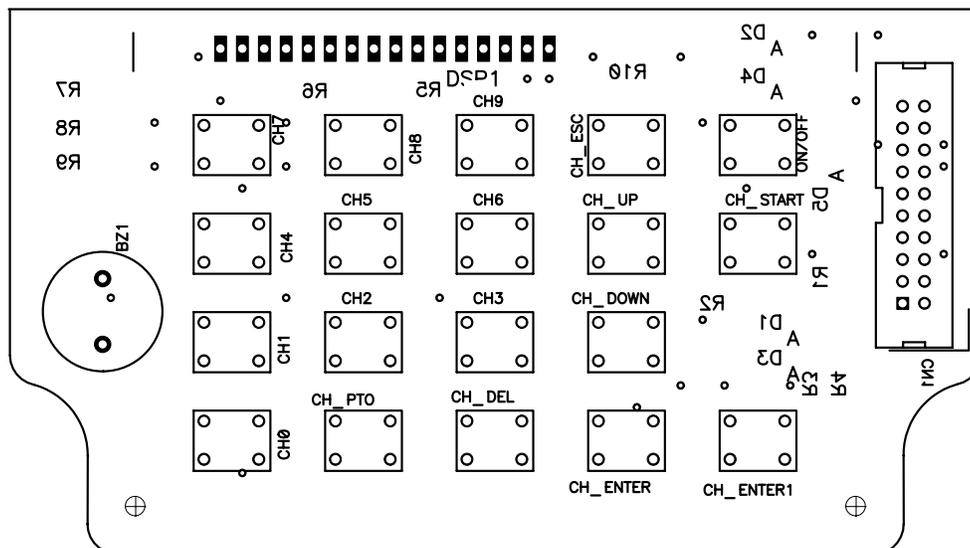


Figura 63 – Placa do teclado do processador de correção diferencial (*silk screen*)

A Figura 64 mostra o aspecto final das trilhas da placa de circuito impresso do teclado e *display*, vista pelo lado dos componentes. Nota-se que todos os componentes, excetuando-se as teclas, são de tecnologia SMD⁷⁶.

⁷⁶ SMD: *Surface Mounted Device*.

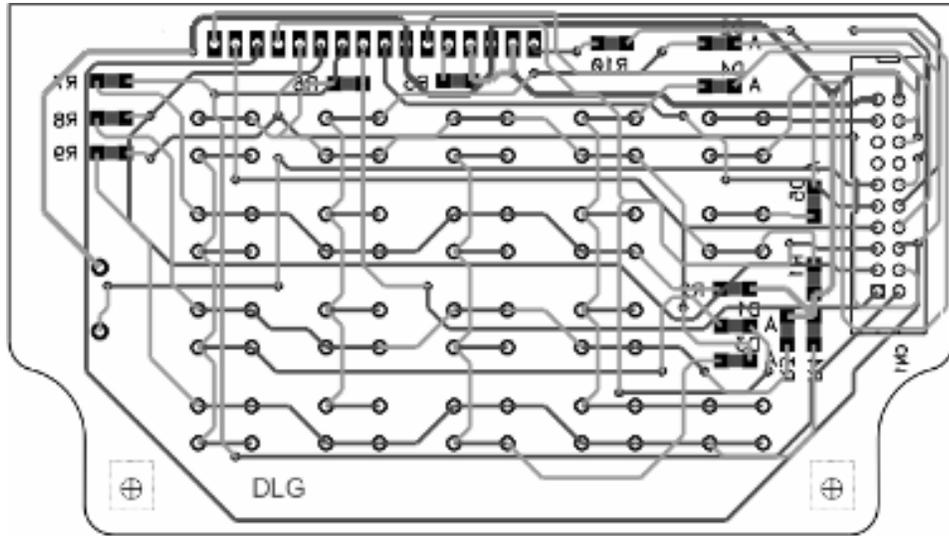


Figura 64 – Placa do teclado do processador de correção diferencial (silk screen)

O custo final do equipamento de correção diferencial desenvolvido foi de aproximadamente US\$ 1.000,00. Neste custo estimado, não se incluiu o GPS móvel, uma vez que praticamente qualquer receptor GPS capaz de receber o sinal de correção no formato do protocolo RTCM SC-104 pode ser utilizado para tal propósito.

4.3.2 Software do Sistema DGPS

Nessa etapa desenvolveu-se um aplicativo computacional que contém as rotinas computacionais necessárias para a configuração e controle do receptor GPS e operação no modo de geo-referenciamento. Inicialmente, essas rotinas foram desenvolvidas para o microcomputador IBM-PC utilizando a ferramenta C++ Builder. Após os testes e validação, tais rotinas, e também as responsáveis pela geração do sinal de correção diferencial, foram compiladas para execução no microcontrolador MSP 430. O *software* para controle da estação de correção possui três modos de operação:

Modo 1 – Configuração: Este modo possibilita a configuração do GPS base, permitindo ao usuário inserir ou modificar os dados de posição (latitude, longitude e altitude) da estação base, selecionar a taxa de envio de dados de correção (intervalo em segundos entre duas mensagens de correção), e ainda, verificar características funcionais (tensão da bateria, senha de segurança, etc.). O equipamento utiliza apenas uma interface serial RS-232C, no

modo bidirecional, para realizar a comunicação com o receptor base a uma velocidade de 9.600bps. A outra interface serial fica inoperante.

Modo 2 – Operação DGPS: Neste modo o equipamento recebe as informações de correção do GPS base, no formato proprietário, a uma taxa de 9600bps, transformando-as para o formato RTCM SC-104. São inseridas informações sobre a saúde da estação e também o fator de escala. O microcontrolador envia os dados a uma velocidade de transmissão de até 9.600bps visando uma compatibilidade com o sistema de transmissão utilizado. Ambas as interfaces seriais operam em modo unidirecional, onde uma como entrada dos dados e a outra como saída.

Modo 3 – Geo-referenciamento: Este modo é utilizado para geo-referenciamento da antena da estação base. O GPS base opera no modo de navegação, enviando informações de posicionamento para o equipamento microprocessado que uma das interfaces opera no modo unidirecional, como entrada, a uma velocidade de 9.600bps, e a outra fica inoperante.

4.3.2.1 Configuração do Receptor GPS Base

As rotinas de configuração do receptor GPS base foram inicialmente desenvolvidas para a execução nos microcomputadores da família PC. Isso ocorreu principalmente pela facilidade de depuração e também pelos testes durante a fase de prototipação.

A Figura 65 mostra a tela de visualização de informações sobre o funcionamento do GPS base. Através dessa tela pode-se observar o número de satélites visíveis, a intensidade do sinal de cada um deles, a data, hora, latitude, longitude e altitude da estação base. Estas informações são extraídas das mensagens @@Ha (GPS M12+).

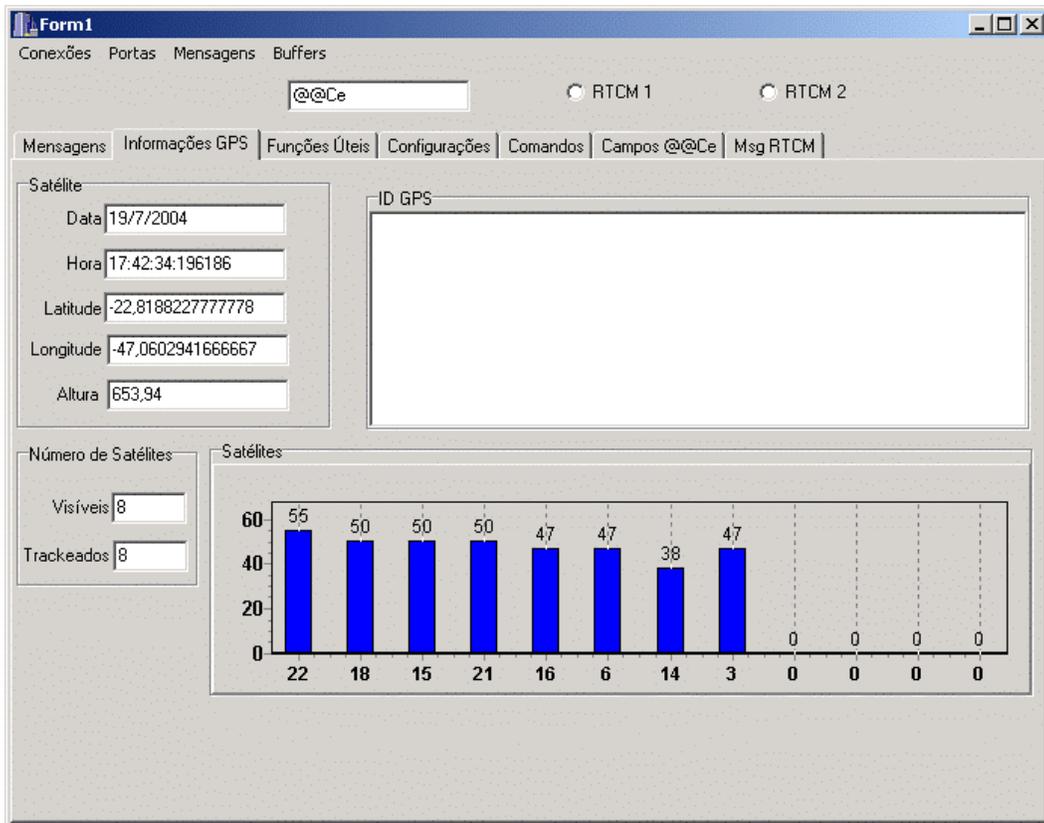


Figura 65 – Tela de visualização de informações sobre o GPS base

A Figura 66 mostra a tela referente à configuração das coordenadas (latitude e longitude) e altitude, definindo-a como sendo a posição geo-referenciada do GPS base.

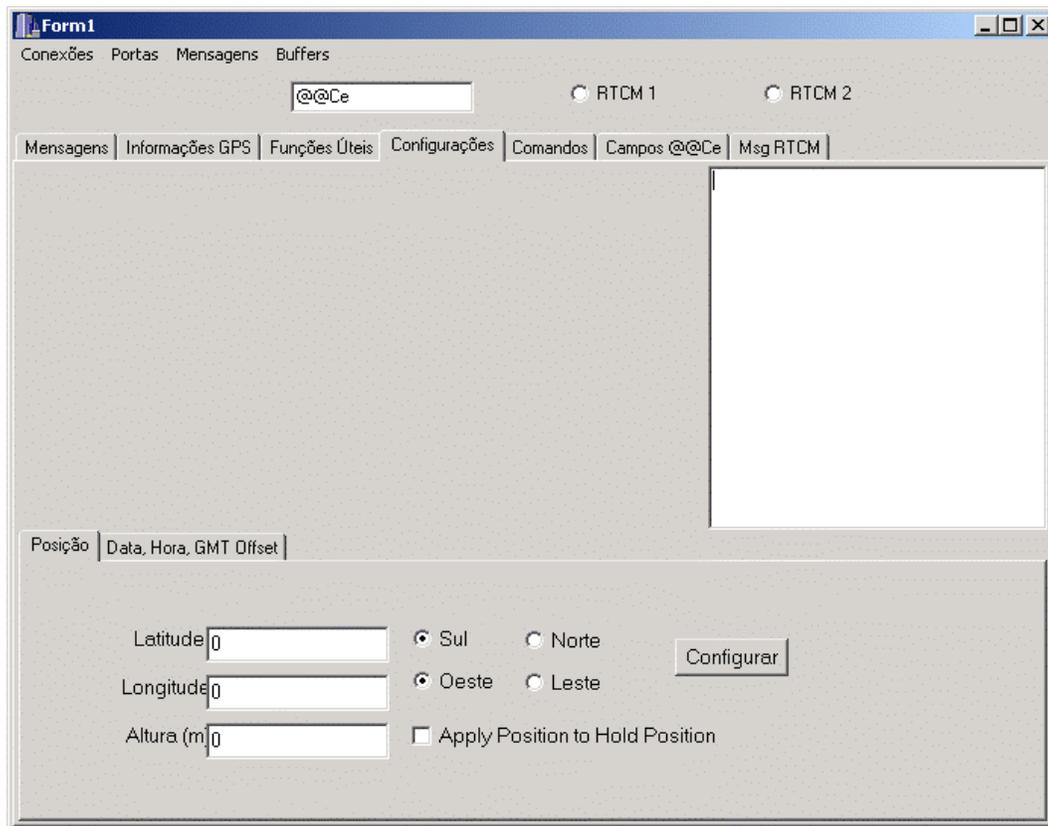


Figura 66 – Tela para configuração do GPS base

A Figura 67 mostra a tela do *software* utilizada para o envio de comandos, no formato para o GPS base. As funções deverão ser executadas através de comandos na linguagem proprietária do GPS base (Motorola M12+ Oncore).

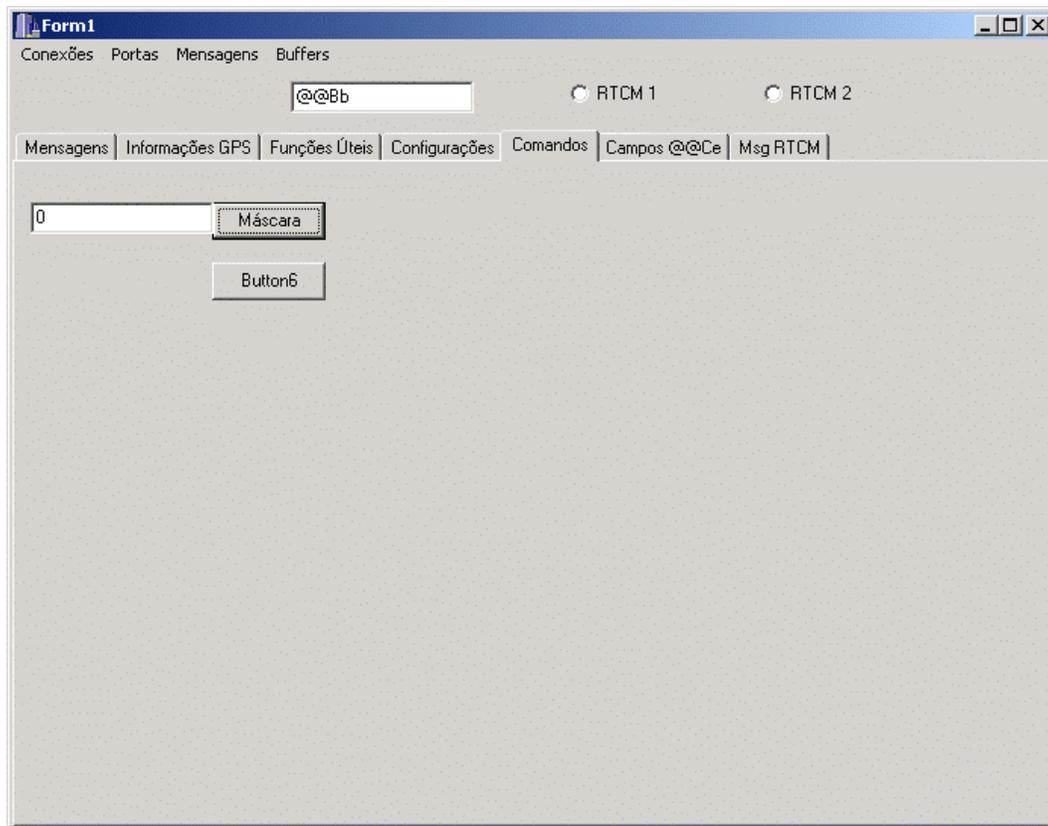


Figura 67 – Tela para envio de comandos para o GPS base

A Figura 68 mostra a tela para a execução de funções úteis durante o desenvolvimento dos aplicativos, podendo-se citar: conversão de base decimal para hexadecimal e vice-versa, conversão de caracteres para o seu código equivalente em hexadecimal e ainda conversão de números hexadecimais com sinal para números decimais.

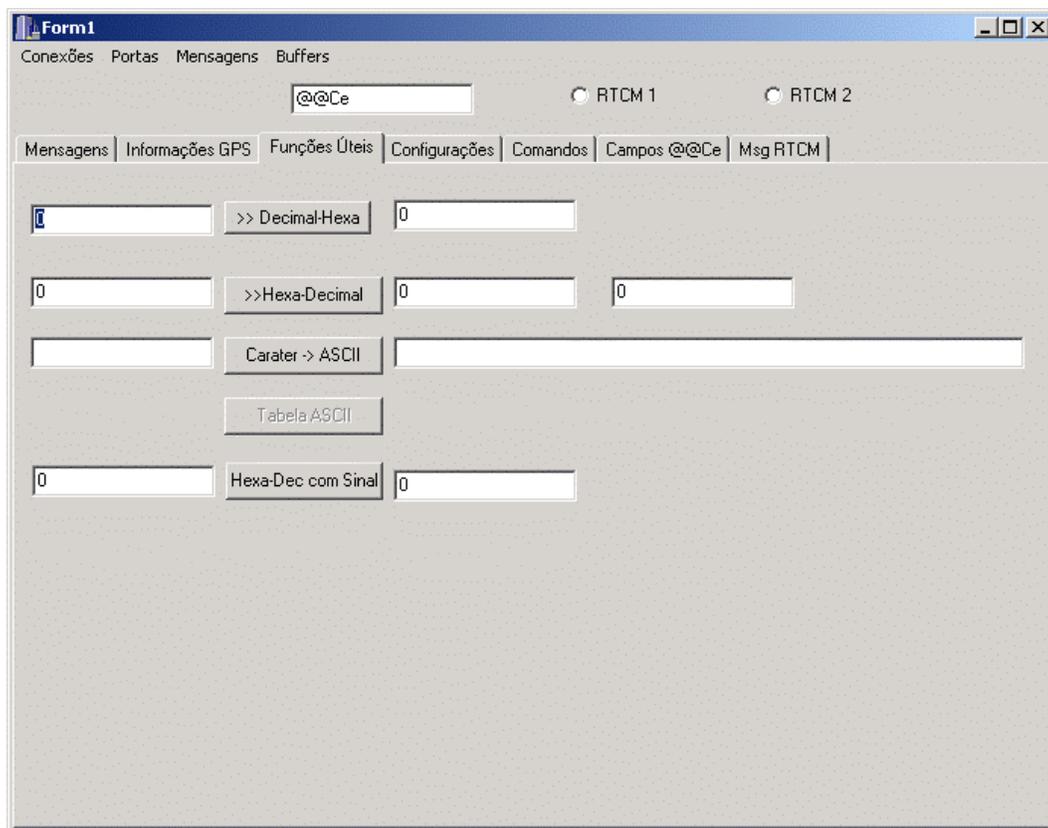


Figura 68 – Tela para execução de funções

4.3.2.2 Operação no Modo de Geo-referenciamento

Este módulo do sistema contém as rotinas utilizadas para a execução de métodos estatísticos necessários para a operação no modo de geo-referenciamento e geração de relatórios e gráficos. O sistema possibilita efetuar os seguintes cálculos estatísticos: coeficiente de variação, desvio padrão, média, método dos mínimos quadrados, razão áurea e variância. Pode-se escolher um determinado método estatístico ou selecionar todos para demonstração. Todos os cálculos são realizados através das fórmulas de cada método, onde, os dados são obtidos através da leitura e configuração das mensagens @@Ha (GPS M12+) ou @@Ea (GPS VP Oncore) e @@Bb para ambos os modelos. Estes cálculos podem ser feitos em tempo real, lendo continuamente os dados enviados pelo receptor GPS, ou pós-processados através da leitura de arquivos de registro destas mensagens. A Figura 69 apresenta a tela das rotinas estatísticas.

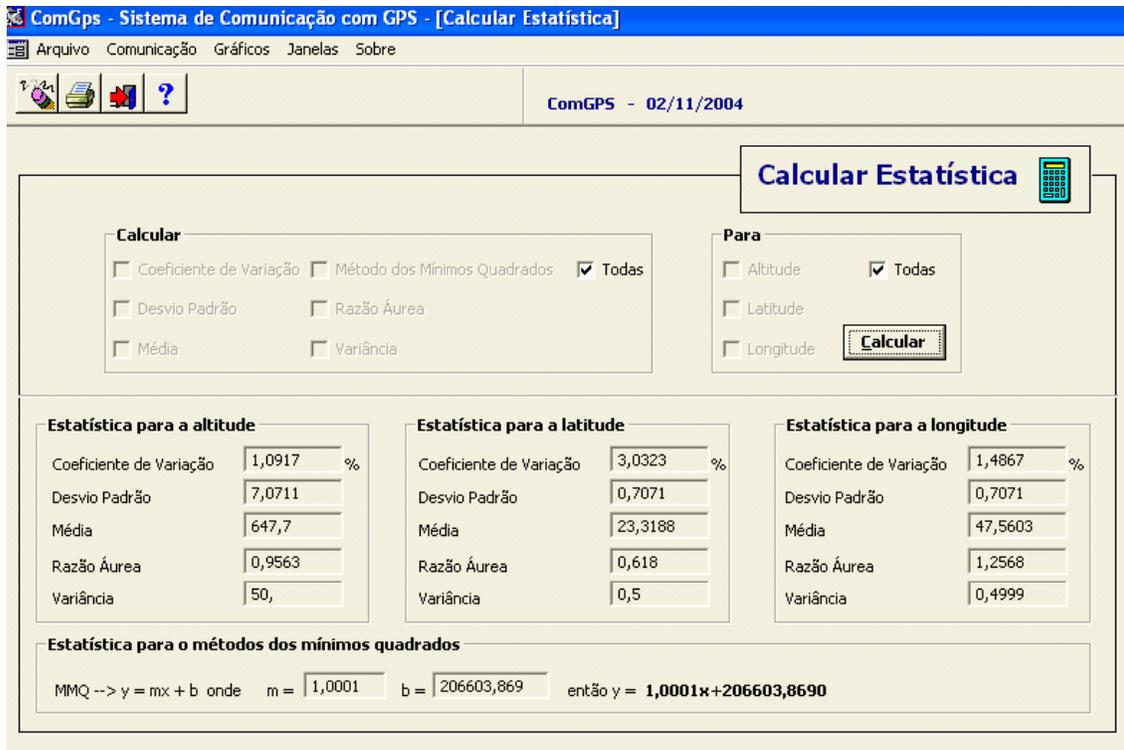


Figura 69 – Janela contendo os cálculos estatísticos

Este módulo do sistema possibilita a geração de relatórios e gráficos, tanto para os dados do GPS quanto para os cálculos estatísticos. O módulo de geração de relatório contém informações pertinentes aos indicadores e outros formatos de dados como data, posição UTC, quantidade de satélites usados e modo automático ou manual. O módulo gráfico contém os resultados obtidos nos cálculos estatísticos. As Figura 70 e Figura 71 apresentam as telas do sistema para a geração de relatórios e gráficos, respectivamente.

ComGps - Sistema de Comunicação com GPS - [Gerar Relatório]

Arquivo Comunicação Gráficos Janelas Sobre

ComGPS - 02/11/2004

Gerar Relatório

Indicadores

Indicador da qualidade do GPS:

Indicador E/W:

Indicador N/S:

Outros formatos de dados

Data:

Posição UTC:

Modo 1:

Modo 2:

Satélites usados:

Status:

Legendas

Indicador da Qualidade	
0	Reparo não disponível ou inválido
1	Modalidade SPS do GPS, reparo válido
2	GPS diferencial, modalidade SPS, reparo válido
3	Modalidade do GPS PPS, reparo válido

Modo1		Modo2	
M	Manual - forçado para operar no 2D ou 3D	1	Reparo não disponível
A	Automático - reservado para comutar automaticamente 2D/3D	2	2D
		3	3D

Status		Indicador E/W		Indicador N/S	
A	Dados válidos	E	W	N	S
V	Dados não válidos	Leste	Oeste	Norte	Sul

Figura 70 – Tela do sistema para a geração de relatórios

ComGps - Sistema de Comunicação com GPS - [Montar Gráfico]

Arquivo Comunicação Gráficos Janelas Sobre

ComGPS - 04/11/2004

Montar Gráfico

Estatística da Altitude

Estatística da Longitude

Estatística da Latitude

Método dos Mínimos Quadrados

Figura 71 – Tela do sistema para a exibição dos gráficos

Para os modos de configuração e geo-referenciamento é possível fazer uso das mensagens do protocolo de comunicação NMEA 0183. O diferencial em utilizar este protocolo é o fato de se tratar de um padrão e estar presente na maioria dos receptores GPS.

4.3.2.3 *Software no Microcontrolador*

As operações do Sistema DGPS são realizadas através do teclado e com o display é possível visualizar e acompanhar as operações realizadas. A Figura 72 mostra as opções do menu “Principal”.

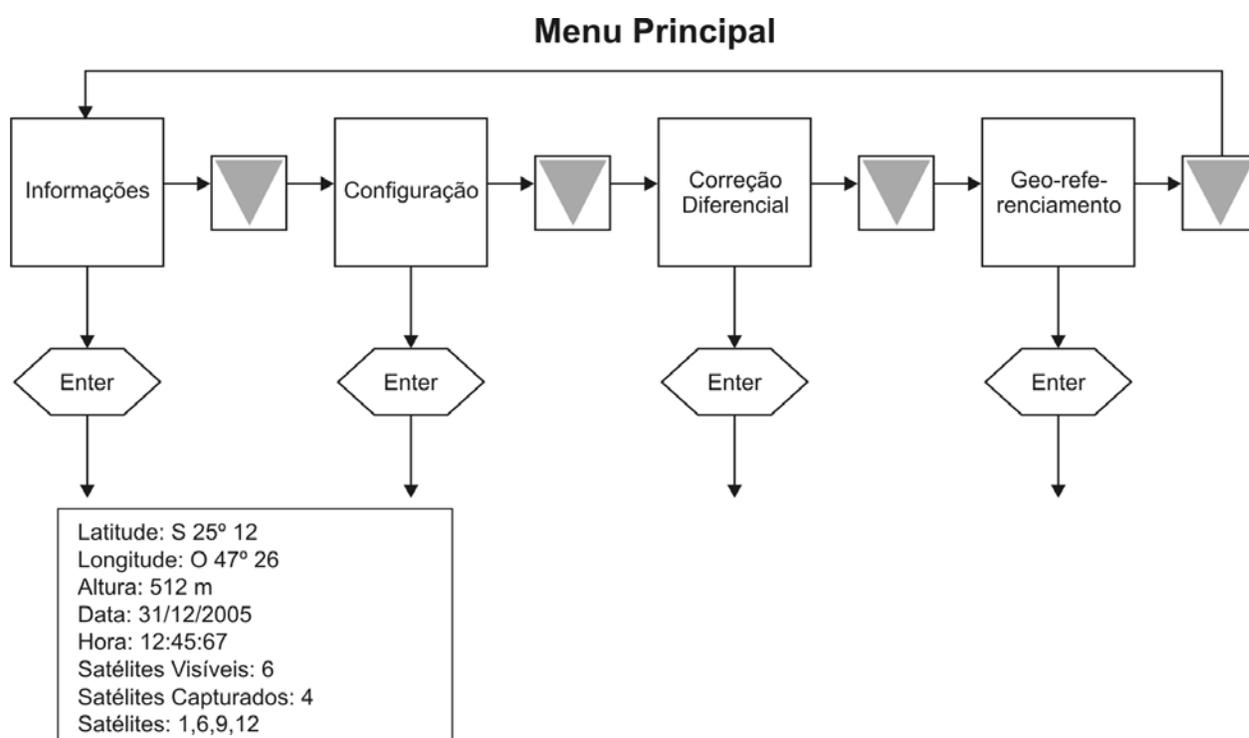


Figura 72 – Opções do menu “Principal” do sistema DGPS

As teclas “Seta Para Cima” e “Seta Para Baixo” permitem navegar pelas informações do sistema DGPS, uma vez que não é possível visualizá-las no *display*. Para retornar ao menu principal basta selecionar a tecla “ESC”.

O menu “Configuração”, apresentado na Figura 73, permite especificar as seguintes opções do receptor GPS Base: latitude, longitude, altura, habilitar/desabilitar *hold position*,

data, hora, GMT *offset*, máscara de elevação, habilitar/desabilitar correção na ionosfera e habilitar/desabilitar correção na troposfera.

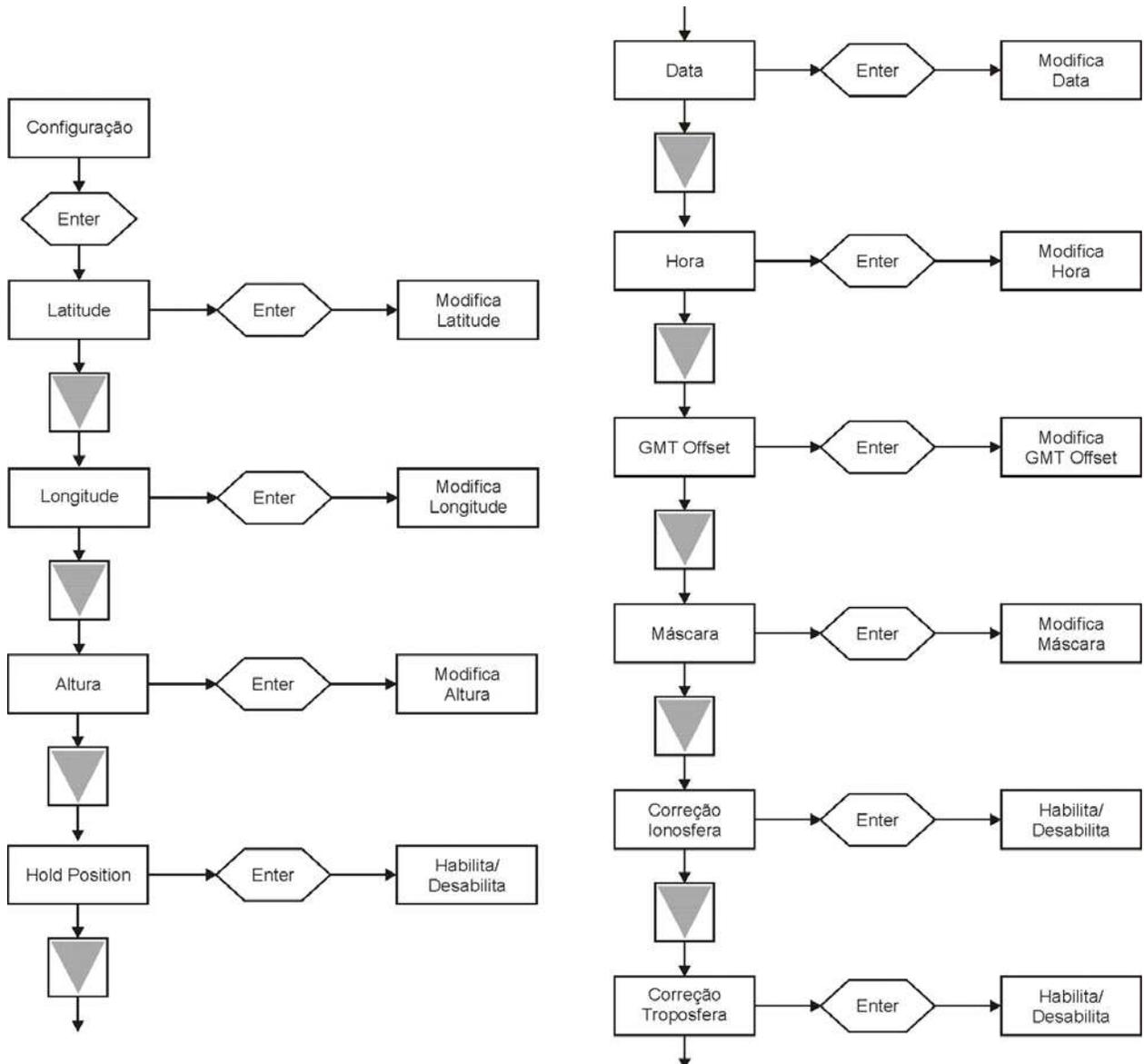


Figura 73 – Opções do menu Configuração.

O menu “Correção Diferencial” possui duas opções: Habilita/desabilita a correção diferencial e Intervalo de envio da mensagem de correção. A primeira opção habilita ou desabilita o envio da mensagem de correção diferencial e a segunda possibilita especificar, em segundos, o intervalo de tempo do envio do sinal de correção. A Figura 74 apresenta o fluxograma do menu de opções “Correção Diferencial”.

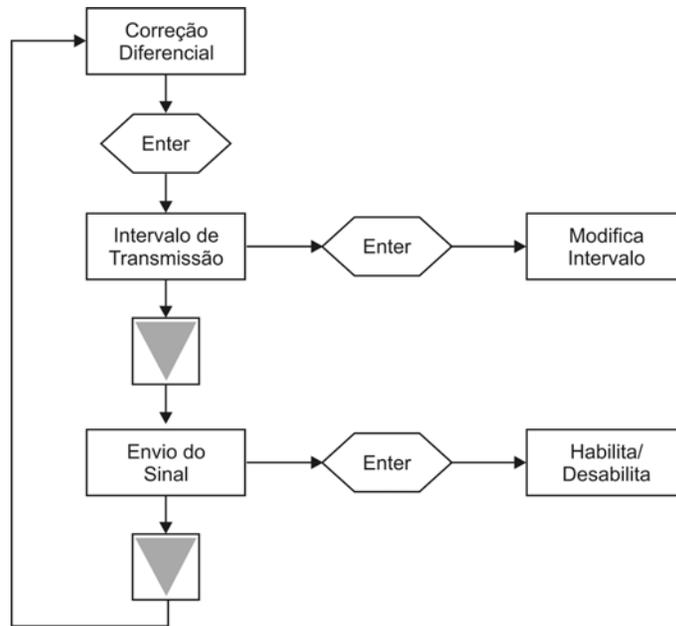


Figura 74 – Opções do menu Correção Diferencial

O menu “Geo-referenciamento” apresenta as seguintes opções: tempo de aquisição, coeficiente de variação, desvio padrão, média, variância, razão áurea e média dos mínimos quadrados. A Figura 75 apresenta o fluxograma do menu “Geo-referenciamento”.

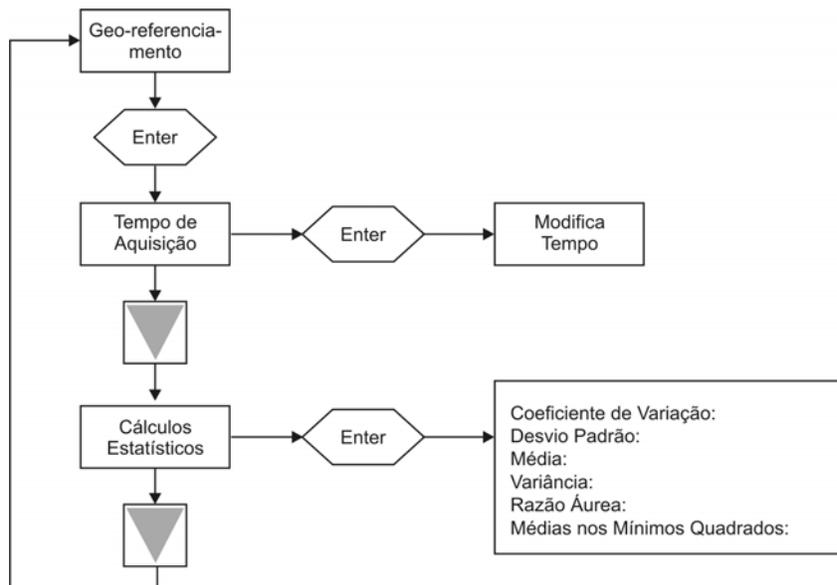


Figura 75 – Opções do menu Geo-referenciamento

4.3.3 Testes e Avaliação do Sistema DGPS

Após a validação do software de geração da mensagem de correção e do sistema de comunicação, foram realizados testes finais para avaliar e validar o sistema DGPS proposto. Nestes testes, fez-se uso dos índices de precisão utilizados na prática para avaliação de receptores GPS.

Para realizar um planejamento dos testes do Sistema DGPS, fez-se uso do software Trimble Planning, da Trimble. Este *software* possibilitou uma análise prévia da constelação de satélites GPS apresentando o número de satélites visíveis e suas geometrias no período de tempo da realização dos experimentos. O

Quadro 33 apresenta o número de satélites visíveis da constelação GPS para os dias de realização dos testes.

Quadro 33 – Número de satélites visíveis nos dias de realização dos testes

Dia	Número de Satélites Visíveis	
	Mínimo	Máximo
09/11/2004	6	10
10/11/2004	6	10
11/11/2004	5	10
12/11/2004	5	10
13/11/2004	5	10
16/11/2004	6	10
17/11/2004	5	10
18/11/2004	5	10

Utilizou-se também, gráficos nesta fase de testes, com a finalidade de visualizar a dispersão dos erros radiais de posicionamento e realizar uma comparação visual dos índices de precisão. Para uma visualização simultânea da dispersão dos pontos em torno de seu valor médio e da magnitude do erro absoluto foram elaborados gráficos polares para cada um dos

receptores GPS utilizados operando com e sem correção. Nos gráficos as escalas dos eixos foram mantidas inalteradas para possibilitar uma comparação visual.

A Figura 76 apresenta o gráfico comparativo do Erro Absoluto – EA para os receptores GPS operando com e sem correção para todos os dias de realização dos testes.

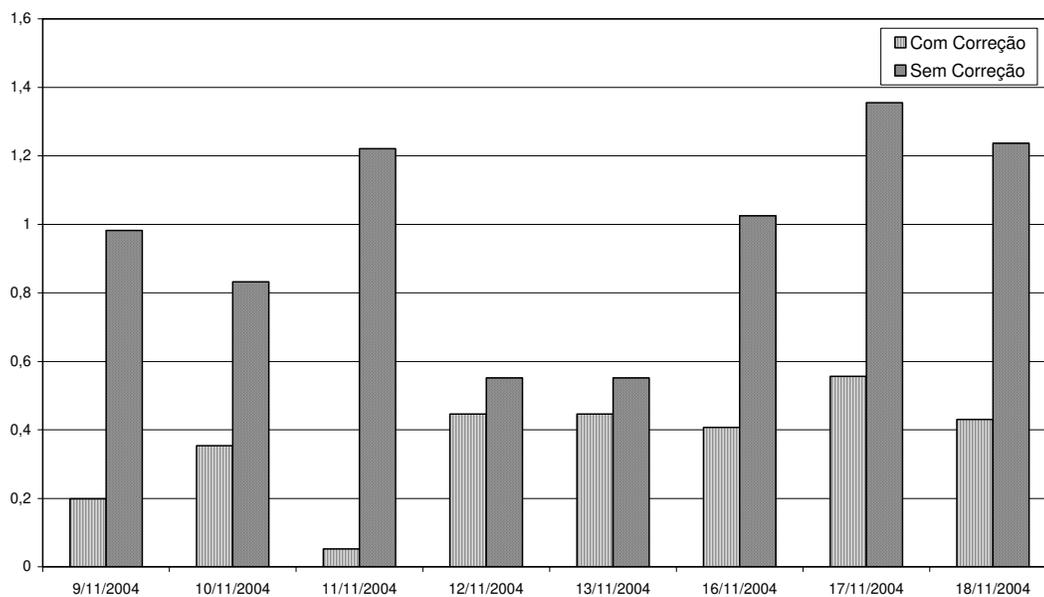


Figura 76 – Gráfico comparativo do Erro Absoluto – EA para os dias de realização dos testes

A Figura 77 apresenta o gráfico comparativo do Erro Radial Médio – ERM para os receptores GPS operando com e sem correção para todos os dias de realização dos testes.

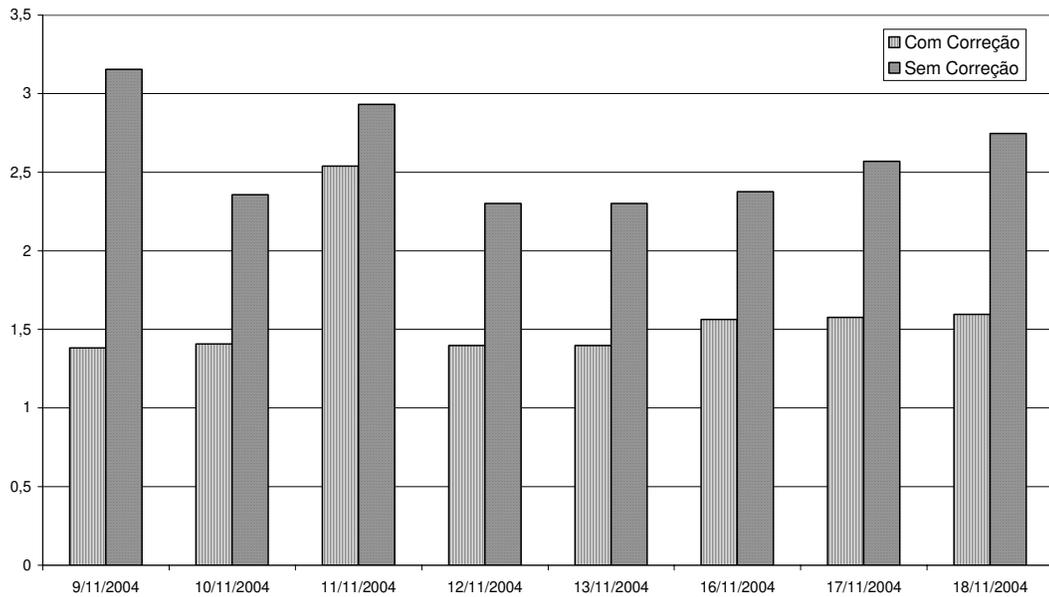


Figura 77 – Gráfico comparativo do Erro Radial Médio – ERM para os dias de realização dos testes

A Figura 78 apresenta o gráfico do Erro Circular Padrão - σ_c para os receptores GPS operando com e sem correção para todos os dias de realização dos testes.

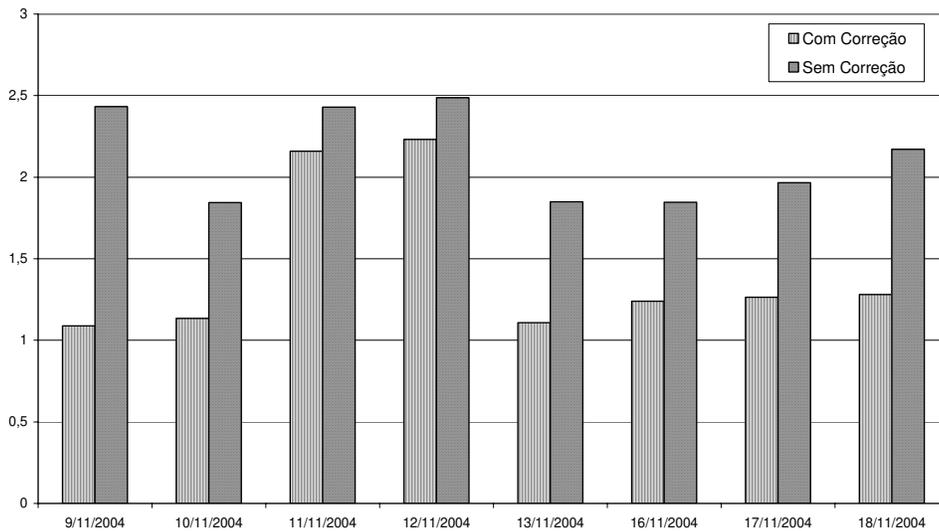


Figura 78 – Gráfico comparativo do Erro Circular Padrão – σ_c para os dias de realização dos testes

A Figura 79 apresenta o gráfico do Erro Circular Provável – CEP para os receptores GPS operando com e sem correção para todos os dias de realização dos testes.

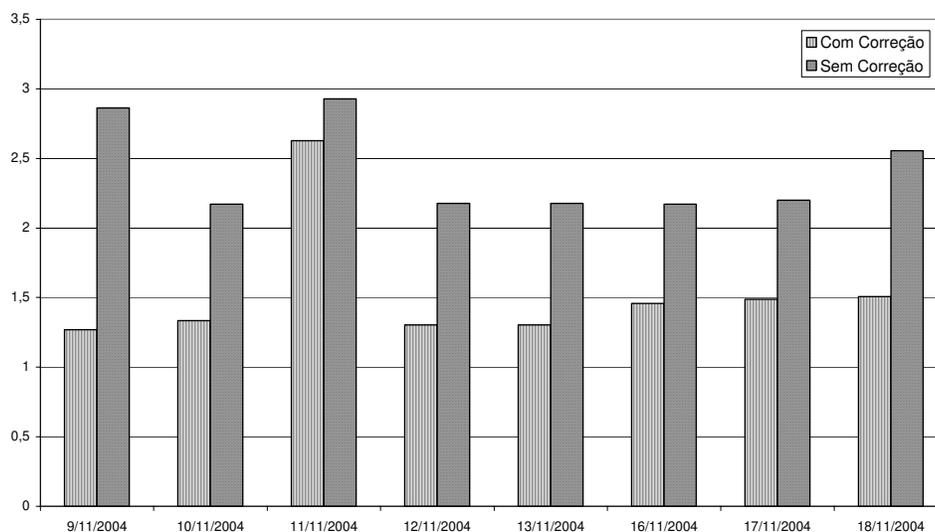


Figura 79 – Gráfico comparativo do Erro Circular Provável – CEP para os dias de realização dos testes

A Figura 80 apresenta o gráfico do índice de Acurácia Circular Padrão de Mapa - CMAS para os receptores GPS operando com e sem correção.

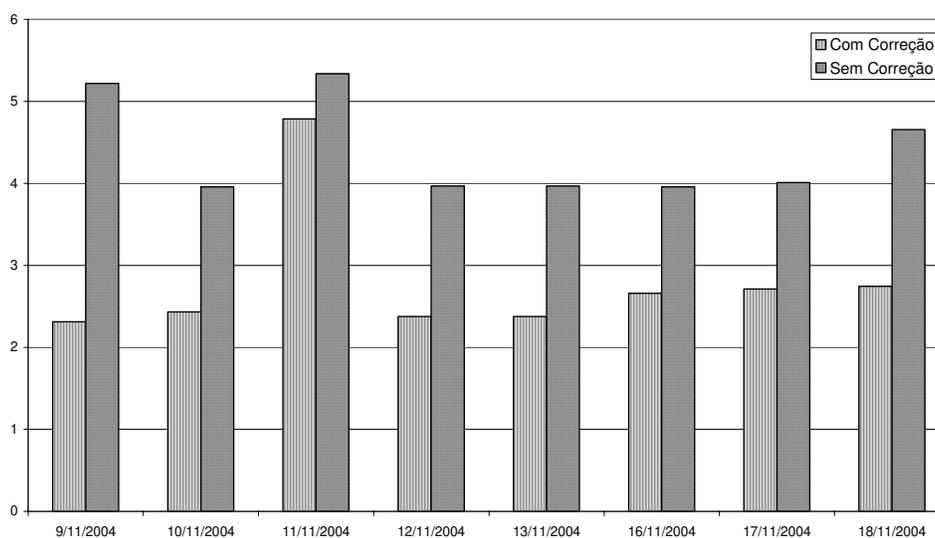


Figura 80 – Gráfico comparativo da Acurácia Circular Padrão de Mapa – CMAS para os dias de realização dos testes

A Figura 81 apresenta o gráfico do índice $3,5 \sigma_c$ para os receptores GPS operando com e sem correção para todos os dias de realização dos testes.

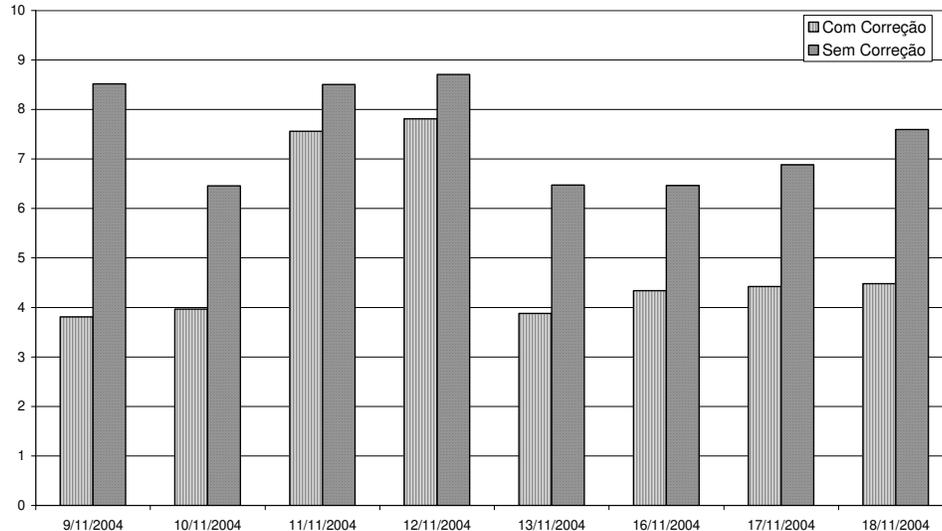


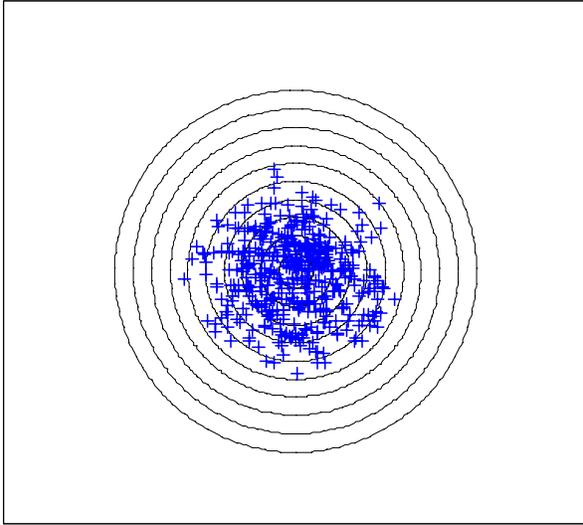
Figura 81 – Gráfico comparativo do índice $3,5 \sigma_c$ para os dias de realização dos testes

Observa-se que os valores dos índices de erros utilizados para o receptor GPS operando com correção diferencial foram menores quando comparados com o receptor GPS operando sem correção diferencial, para todos os dias de realização dos testes.

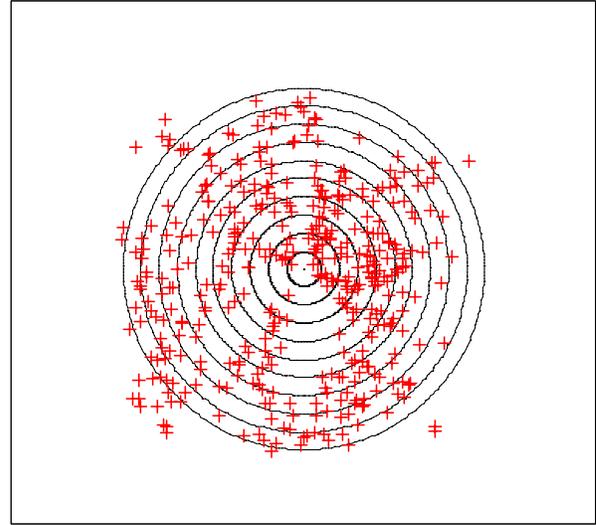
A variação da relação $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ entre os aparelhos sugere níveis de probabilidade diferentes para os índices MSPE e $2drms$. Devido a este fato, os índices mencionados não são adequados para serem utilizados como parâmetro de comparação entre o desempenho dos aparelhos e, portanto, não foram calculados.

Pôde-se observar que a correção diferencial em tempo real reduziu consideravelmente o erro absoluto. Isto se deve ao fato que a correção diferencial reduz com maior propriedade os erros sistemáticos do que os erros aleatórios do processo de medição.

Da Figura 82 à Figura 89 são apresentadas, na forma polar, a distribuição dos erros radiais de posicionamento, obtida com o aparelho GPS III Plus operando com e sem correção para cada dia dos experimentos. As escalas do eixo radial são de 1 metro do ponto central. A circunferência mais externa corresponde a um erro radial de 10 metros.

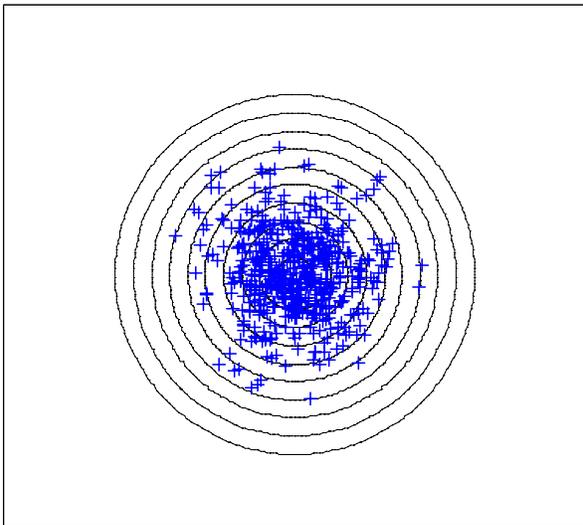


(a)

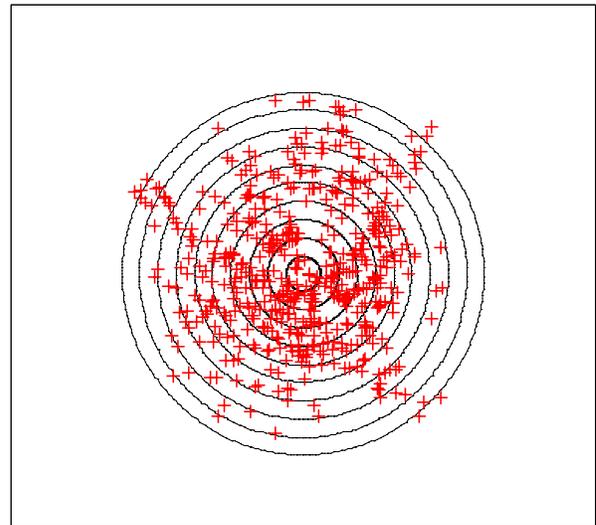


(b)

Figura 82 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 09/11/2004

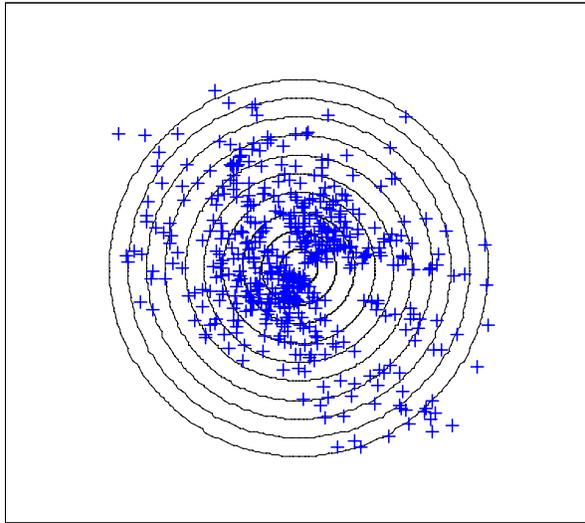


(a)

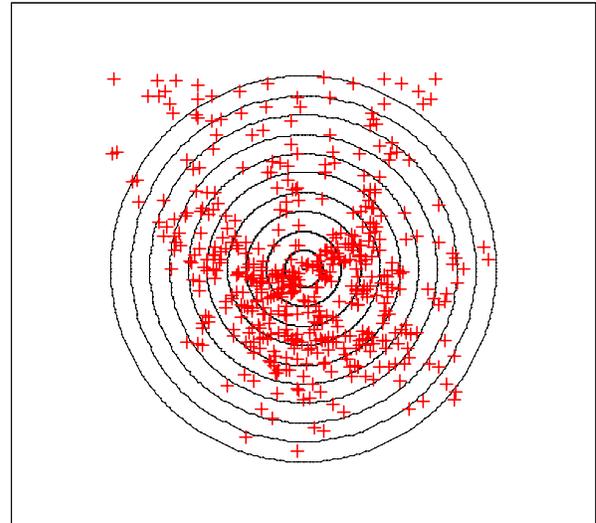


(b)

Figura 83 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 10/11/2004

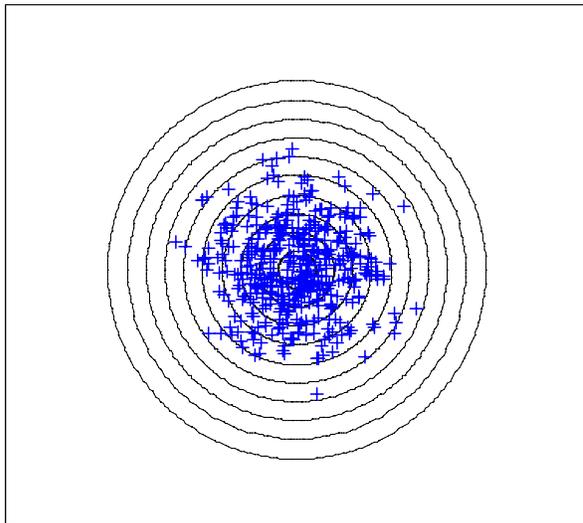


(a)

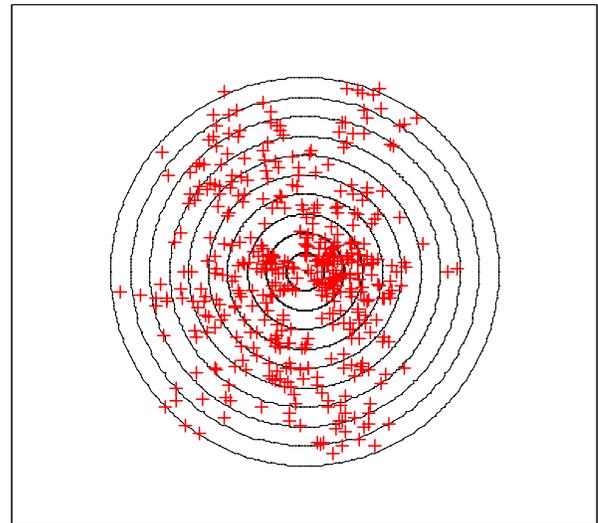


(b)

Figura 84 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 11/11/2004



(a)



(b)

Figura 85 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 12/11/2004

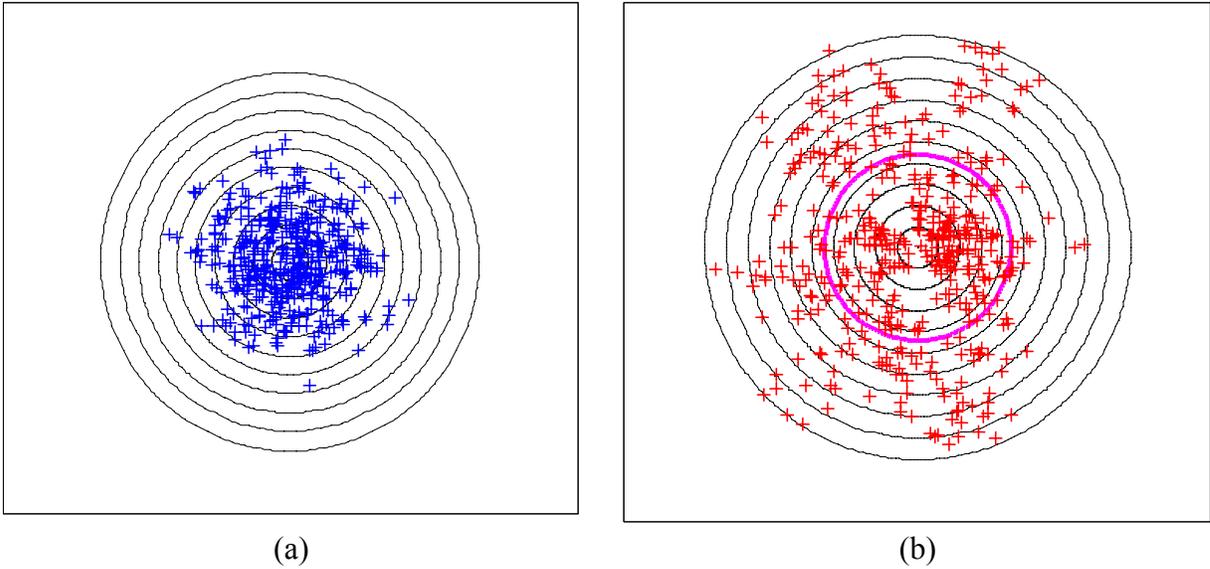


Figura 86 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 13/11/2004

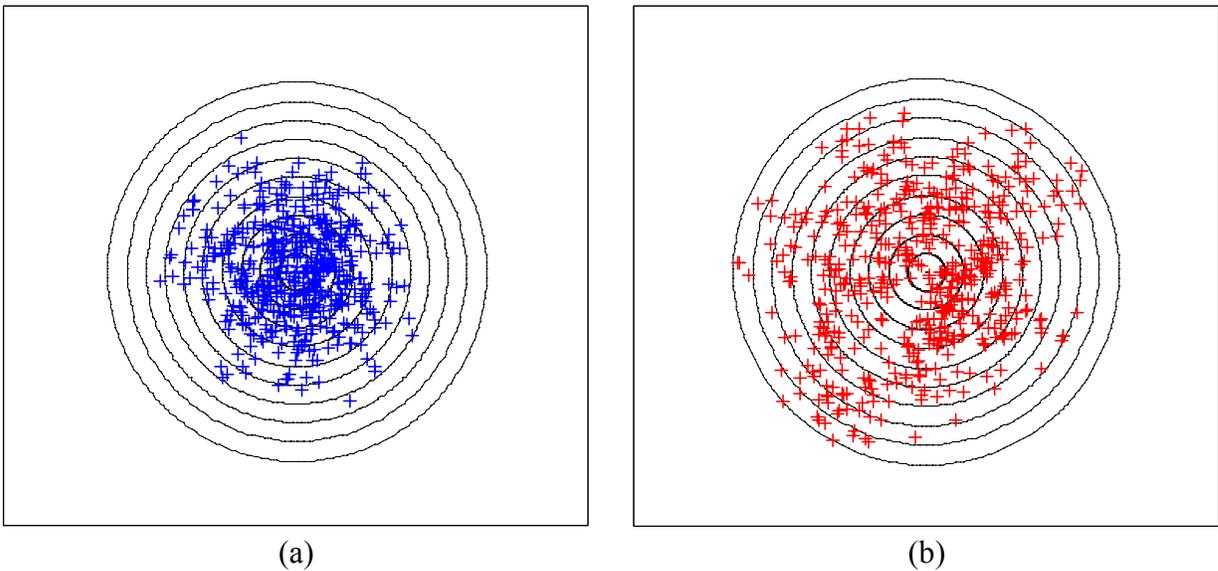


Figura 87 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 16/11/2004

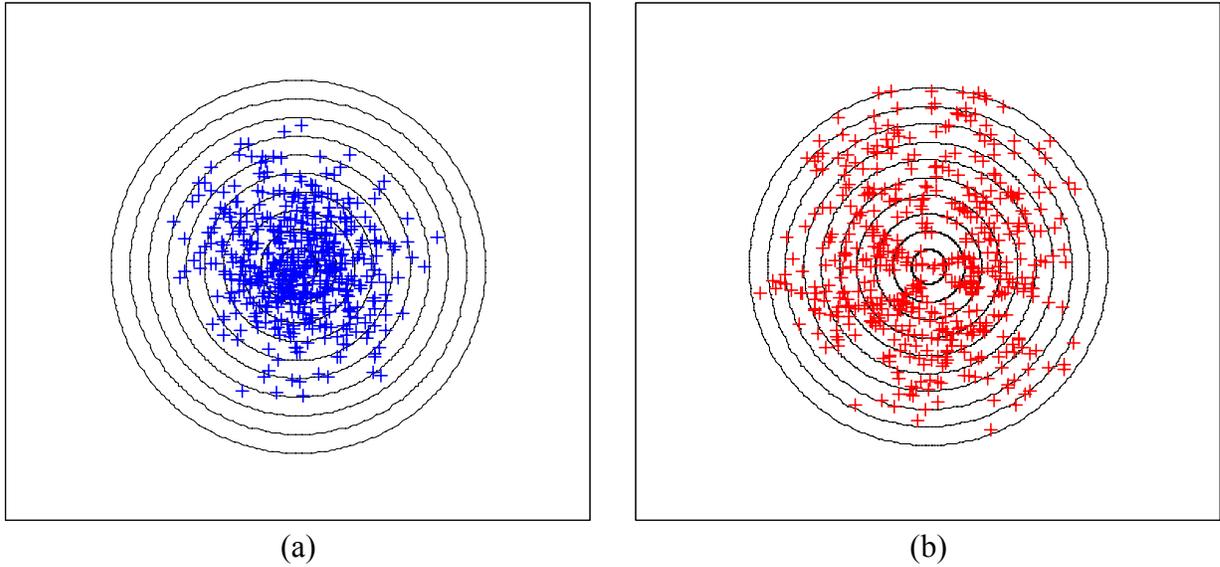


Figura 88 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 17/11/2004

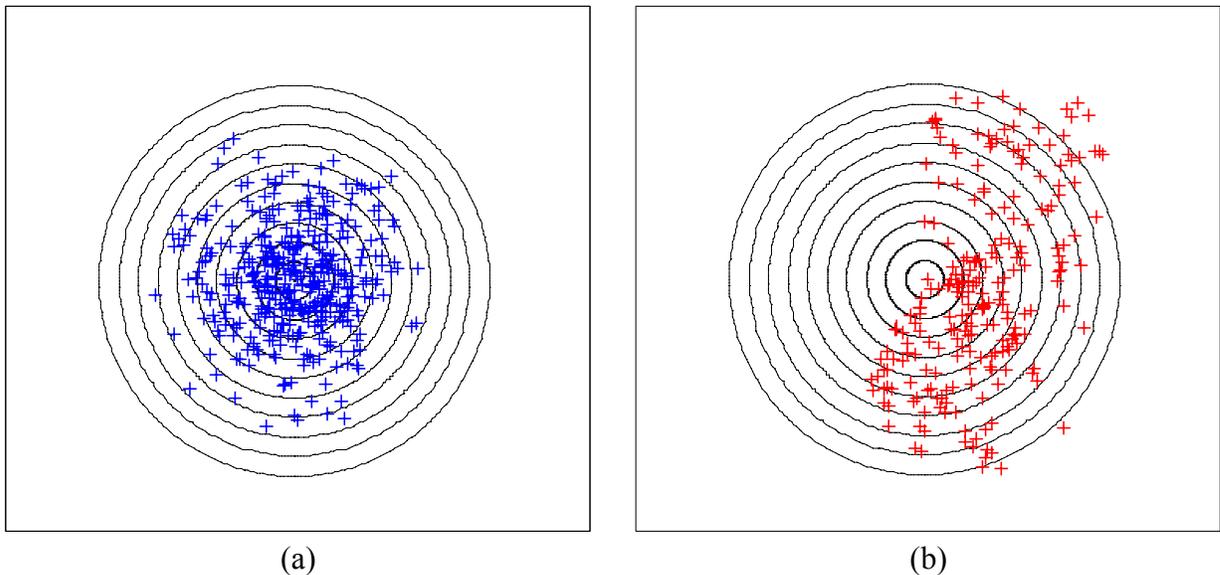


Figura 89 – Distribuição dos Erros Radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção (a) e sem correção diferencial (b) no dia 18/11/2004

Dos gráficos apresentados na Figura 82 à Figura 89 pôde-se verificar uma melhor distribuição radial dos erros para o receptor GPS operando com correção diferencial quando comparado com o GPS sem correção.

Foram feitas análises pontuais das amostras de coordenadas para os erros radiais médios mais significativos. Observou-se em algumas situações que, no momento da entrada de

um novo satélite na mensagem de correção os valores de PRC e RRC eram muito altos e que geraram erros na obtenção da coordenada computada pelo receptor GPS operando com sinal de correção diferencial. Para minimizar este problema, desenvolveu-se no aplicativo do receptor GPS base uma rotina que verificava a entrada de um novo satélite e somente enviava as informações deste, a partir do momento que os valores se estabilizavam. Em todos os casos conseguiu-se reduzir alguns erros radiais médios significativos, entretanto, não foi possível eliminá-los em sua totalidade, indicando que deve haver mais de uma causa para este tratamento. Notou-se também que o sistema com correção reduziu com maior propriedade os erros sistemáticos do que os erros aleatórios do processo de medição.

5 CONCLUSÕES

Ao final da execução deste trabalho, conclui-se que:

É técnica e economicamente viável o desenvolvimento de um sistema DGPS de custo reduzido. Os testes iniciais para validação mostraram que a estação DGPS desenvolvida neste trabalho apresentou melhores resultados quanto a precisão das medições quando comparados a um sistema sem correção diferencial.

A utilização de recursos de *hardware* e de *software* de custos reduzidos permitiu o desenvolvimento de um equipamento funcional e que pode ser utilizado para um gama de aplicações provendo melhores resultados quando comparados a um sistema GPS operando sem correção.

Os receptores GPS de baixo custo utilizados nos testes, operando com correção diferencial, apresentaram melhores resultados quando comparados aos mesmos operando sem correção diferencial.

Os aplicativos computacionais desenvolvidos se mostraram suficientes e adequados para o controle geral do equipamento. O desenvolvimento inicial do sistema computacional no ambiente IDE C++ Builder, durante a fase de prototipação, possibilitou uma redução de tempo nos testes do sistema. O uso da linguagem de programação C/C++ facilitou o processo de conversão das rotinas computacionais para o microcontrolador.

A proposta inicial do presente projeto foi alcançada: desenvolvimento de um sistema DGPS autônomo que executa as seguintes operações: geração do sinal de correção diferencial no formato RTCM SC-104; configuração e supervisão do receptor GPS base e determinação da posição geo-referenciada da estação base de correção.

Embora já existam no mercado equipamentos para a geração do sinal de correção diferencial, o desenvolvimento permitiu comprovar a hipótese inicial que tratou-se do desenvolvimento de um sistema similar de custo bem inferior quando comparado aos mesmos disponibilizados comercialmente. Além disso, não se tem conhecimento de um outro trabalho de desenvolvimento de um sistema DGPS desenvolvido no Brasil.

Finalmente, com o desenvolvimento do equipamento proposto será possível disponibilizar a usuários de diversos seguimentos que utilizam sistemas GPS, um equipamento de custo reduzido com capacidade de gerar sinais de correção diferencial em tempo real.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros podem-se citar:

- Desenvolvimento de um sistema microprocessado no módulo receptor para a realização do processamento, em tempo real, do sinal de correção diferencial recebido para uso em sistemas auto-guiados, para eliminar erros significativos das coordenadas computadas pelo receptor GPS. Como sugestão, armazenar em arquivos de registros, os valores das últimas coordenadas caso o valor da próxima coordenada seja muito discrepante em função dos valores registrados, enviar um sinal para o equipamento que faz uso do sinal do GPS.

- Estudo e implementação de outros meios de comunicação como os sistemas de comunicação de dados por telefonia celular, redes sem fio (*wireless*), rede de computadores local e Internet.

- No sistema microprocessado da estação DGPS, adicionar módulos de memória para registros de anomalias do sistema.

- Como o sinal de correção diferencial pode ser utilizado por diversos receptores GPS no raio de cobertura, pode-se trabalhar nos aspectos de segurança do sinal transmitido como mecanismos de criptografia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALASTREIRE, L. A. **Aplicação localizada de insumos – ALI: Um velho conceito novo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23. Anais Campinas: Unicamp, p.248, 1994.

BALASTREIRE, L. A., AMARAL, J.R., ESQUERDO, J.C.D.M., RODRIGUES, A. **Agricultura de Precisão: Mapeamento da produtividade de uma cultura de laranja,** 1999. Capturado em 15 de Junho de 2003. On Line. Disponível na Internet: <http://www.ciagri.usp.br/~leia/laranja.htm>

BALASTREIRE, L. A., AMARAL, J.R., LEAL, J.C.G, BAILO, F.H.R., **Agricultura de Precisão: Mapeamento da produtividade de uma cultura uma cultura de café,** 1998a. Capturado em 15 de Junho de 2003. On Line. Disponível na Internet: <http://www.ciagri.usp.br/~leia/resucafe.htm>

BALASTREIRE, L. A. A experiência com pesquisa em agricultura de precisão na ESALQ/ USP, **In GIS BRASIL,** 1998b. Curitiba.

BALASTREIRE, L. A.; BAILO, F.H.R.; AMARAL, J.R.; RODRIGUES, A.A. **Avaliação da acurácia cinemática de um DGPS utilizado na Agricultura de Precisão.** In: BALASTREIRE, L.A. *O Estado da Arte da Agricultura de Precisão no Brasil.* Piracicaba: L.A. Balastreire, 2000. 173-181.

BETKE, K. **Transmission Characteristics of Marine Differential GPS (DGPS) Stations.** Março 2001. Capturado em 15 de Março de 2003. On Line. Disponível na Internet: <http://longwave.bei.t-online.de/104.pdf>

BLITZKOW, D. **NAVSTAR/GPS - Um Desafio Tornado Realidade.** III Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, São Paulo-SP, 1995.

BRIONES, A. B., KRUEGER, C. P. **Análise do Posicionamento DGPS com Base nas ERDGPS Implantadas no Litoral Brasileiro,** XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, Recife-PE, 1999.

BUENO, R. F. **Avaliação da precisão do sistema NAVISTAR/GPS.** São Paulo, 1995. 209p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CANADIAN COAST GUARD, **DGPS Broadcast Standard for Marine Navigation**. Capturado em 20 de Junho de 2003. On line. Disponível no site: http://www.ccg-gcc.gc.ca/dgps/format_e.htm.

CAPPELLI, N. L. Agricultura de Precisão - Novas Tecnologias para o Processo Produtivo. **GIP – Agricultura de Precisão**, Campinas, 1997. Boletim Eletrônico. Capturado em 01 de agosto de 1997. On line. Disponível na internet: <http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/boletim.htm>.

DANNA, P. H. Global Positioning System Overview. **The Geographer's Craft Project**. Texas, Setembro de 1994. Capturado em 10 de janeiro de 2000. On line. Disponível na internet: <http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/gps/gps.html>.

DMA, **Error Theory as applied to mapping, charting, and geodesy**. 109p. Technical Report; VA, USA, 2001.

ELIAS, A. I. **Mapeamento da colheita mecanizada de grãos utilizando um sistema de posicionamento global**. Piracicaba, 1998. 75f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – ESALQ, USP, 1998.

FILHO, R. A., BAILO, S. M. A., **Avaliação da Exatidão de Dois Receptores GPS Operando em Condições Desfavoráveis de PDOP (Position Dilution Of Precision)**. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 19, Recife, 1999.

FRAISSE, C., FAORO, L. Agricultura de Precisão: A Tecnologia de GIS/GPS Chega às Fazendas. **Revista Fator GIS On Line**, Curitiba, março de 1998. Artigos. Capturado em 01 de maio de 1999. On line. Disponível na internet: <http://www.fatorgis.com.br>.

FRAISSE, C. W. Agricultura de Precisão – Oportunidades e Desafios, **In GIS BRASIL**, 1998. Curitiba.

GOMES, E., PESSOA, L. M. C., SILVA JÚNIOR, L. B. **GPS – Medindo Imóveis Rurais com GPS**, Editora LK, 2001, Brasília- DF.

GORGULHO, M. **Apostila de GPS – O Sistema de Posicionamento Global**, 2001, Capturado em 1 de Março de 2003. On line. Disponível na Internet: http://gpstm.com/port/apostila_port.htm.

GPS SPC Signal Specification, 2ª Edição, Junho de 1995, Capturado em 10 de Março de 2003. On Line. Disponível na Internet: <http://www.navcen.uscg.mil>.

HOFFMAN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER. H., COLLINS, J. **Global Positioning system: theory and practice**, 4th, rev. Ed. Wien, New York, Springer Verlag, 1997.

IBGE. Especificações e normas gerais para levantamentos GPS. *Fator GIS*. Curitiba, v.2, n.6, p.31-4, 1994.

ICD-GPS-200C, Outubro de 1993, Capturado em 11 de Fevereiro de 2003. On Line. Disponível na Internet: <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/icd200/default.htm>.

JUNQUEIRA, C. C. M. **Configurações e Algoritmos de Antenas Adaptativas para Sistema de Posicionamento Global**. 257p. Tese (Doutorado) – Unicamp, Campinas, 2003.

LATHI, B. P. **Modern digital and analog communication systems**. 3ª ed. New York: Oxford University, 1998. 781 p. (The Oxford series in electrical and computer engineering).

LECHNER, W., BAUMANN, S. **Global navigation satellite systems**. *Computer and Electronics in Agriculture*, v.25, 2000, p. 67-85.

LIMA, T. C. B.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. ; NUNES, E. F.. **Sistema de geração de sinais de correção diferencial para GPS**. In: IV Congresso Brasileiro da Sociedade Brasileira de Informática Aplicada à Agropecuária e à Agroindústria, 2003, Porto Seguro.

MARQUES, A. B. **Sistema DGPS Invertido**, Rio de Janeiro, 2000. Tese de Dissertação de Mestrado – Instituto Militar de Engenharia.

MARTINS, M. M. **Desenvolvimento de um dosador helicoidal visando sua utilização em equipamentos de aplicação localizada de fertilizantes sólidos**. 1999. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas. 1999.

MOLIN, J. P., **Utilização de GPS em Agricultura de Precisão**. *Eng. Agrícola*, Jaboticabal, v.17, n.3, p.121-132, 1998.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS – Descrição, fundamentos e aplicações.** Editora Unesp, 2000, São Paulo-SP.

MORAES, J. F. L., MOLIN, J.P., FREITAS, J. G. GPS - Tecnologia a serviço da Agricultura, O Agrônomo, Campinas, Volume 53 - Número 1 – 200. Capturado em 15 de Julho de 2003. On line. Disponível na Internet: http://www.iac.sp.gov.br/New/OAgronomico/531/53112-14_it_gps.pdf

MORGAN, M, ESS, D. **The precision-farming guide for agriculturists.** Illinois : John Deere Publishing, 1997. 115p.

MOTOROLA. **User's Guide – GPS Oncore Revision 5.0,** 2002. EUA.

NETO, M. K. **Utilização do Módulo “Crealink” para a Transmissão, em tempo real, de Sinais de Correção para Sistemas GPS Diferenciais (DGPS).** 101p. Tese (Mestrado) – USP, São Carlos, 2005.

NORMAS CARTOGRÁFICAS. **Especificações e Normas Gerais para Execução de Levantamentos Geodésicos.** Capturado em 5 de Julho de 2003. On line. Disponível na Internet: <http://www.concar.ibge.gov.br/CCA33B.HTM>

REICHARDT, K. Variabilidade espacial (e temporal) de solos. In: **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera.** Campinas: Fundação Cargil, 1985. P.391-416.

ROCHA, J. A. M. R. **Livro GPS – Uma abordagem prática,** Edições Bagaço, 3a Edição, 2002, Recife-PE.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento:** Tecnologia Transdisciplinar. Ed. do Autor, Juiz de Fora, 2000.

RTCM Special Committee N. 104. **RTCM Recommended Standards For Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service,** 1998.

SALABERT, F. **Status and development of Galileo.** In: UN/USA WORKSHOP ON USE AND APPLICATIONS OF GNSS. Proceedings of the UN/USA Workshop on Use and Applications of GNSS Santiago, Chile, 2000.

SANTOS, M. C. O alcance do RTK, **revista MundoGeo**, Edição n° 24 de 1/7/2002. Capturado em 20 de Maio de 2003. On Line. Disponível na Internet: <http://www.mundogeo.com.br>.

SANTOS, M. C. Padrão de formato de dados NMEA, **revista MundoGeo**, Edição n° 26. Capturado em 28 de Julho de 2003. On Line. Disponível na Internet: <http://www.mundogeo.com.br>.

SANTOS, M. C. Padrão RTCM, **revista MundoGeo**, Edição n° 28 de 9/7/2003. Capturado em 28 de Julho de 2003. On Line. Disponível na Internet: <http://www.mundogeo.com.br>.

SANTOS, M. C. O Tempo GPS na transmissão de energia, **revista MundoGeo**, Edição n° 7, 2-6-1999. Capturado em 28 de Julho de 2003. On Line. Disponível na Internet: <http://www.mundogeo.com.br>.

SARAIVA, A. M., CUGNASCA, C. E., PAZ, S. M. O problema da padronização e integração de sistemas na Agricultura de Precisão, **In GIS BRASIL**, 1998. Curitiba.

SAUNDERS, S., LARSCHEID, G. BLACKMORE, S., STAFFORD, J. **A Method for Direct Comparison of Differential Global Positioning Systems Suitable for Precision Farming**, 3rd International Conference on Precision Agriculture, 1996.

SILVA, A. B., **Sistemas de Informações Geo-referenciadas – Conceitos e Fundamentos**, Editora Unicamp, 1999.

SILVEIRA, A. C., **Avaliação de Desempenho de Aparelhos Receptores GPS**, 178p, Tese (Mestrado) – UNICAMP, 2004.

SILVEIRA, J. L., **Comunicação de Dados e Sistemas de Teleprocessamento**. Editora Makron Books, São Paulo-SP, 1991.

STAFFORD, J. V., AMBLER, B., LARK, R. M., CATT, J. Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 14, 1996, p.101-119.

STAFFORD, J. V. Spatially variable field operations. **Computers and Electronics in Agriculture**, s.l., v.14, 1996a. p.99-100.

STAFFORD, J. V. Essential technology for precision agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., Minneapolis, 1996. **Precision agriculture**: proceedings. Madison: ASA; CSSA; SSSA, p.595-604, 1996b.

SUDDUTH, K. A. **Engineering Technologies for Precision Farming**. In: International Seminar on Agricultural Mechanization Technology for Precision Farming, 1999, Suwon. **Anais...** 1999.

TANENBAUM, A. S. **Organização Estruturada de Computadores**. Editora LTC, 4ª Edição, São Paulo, 2001.

TEXAS MSP430. **MSP430x1xx Family User's Guide**, 2006, EUA.

TORRES, F.P., FILHO, A.C.R., BAILO, F.H.R.. **Comparação da Utilização da Barra de Luz na Agricultura de Precisão em Relação ao Marcador de Espuma**. II Simpósio sobre Agricultura de Precisão – ESALQ/USP, Outubro de 1999.

UMEZU, C. K.. **Sistema de Controle de um Equipamento de Formulação, Dosagem e Aplicação de Fertilizantes Sólidos a Taxas Variáveis**. 171p. Tese (Doutorado) – UNICAMP, Campinas, 2003.

UMEZU, C. K., CAPPELLI, N. L., **Sistema de Baixo Custo para Geração de Sinal de Correção Diferencial, em Tempo Real, para GPS**. XXXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2002, Salvador-BA.

UMEZU, C. K. ; LIMA, T. C. B.; CAPPELLI, N. L. ; NUNES, E. F. **Equipamento microprocessado para geração de sinal de correção diferencial, em tempo real, para GPS**. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2004, São Pedro - SP, 2004. v. 1

VAN RAIJ, BERNARDO. **Avaliação da Fertilidade do Solo**. Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, Piracicaba, 1981.