ERLY CALDAS DE LIMA

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA MELHORA DO POSICIONAMENTO OBTIDO ATRAVÉS DE RECEPTORES GPS DE BAIXO CUSTO

São Paulo
2018

ERLY CALDAS DE LIMA

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA MELHORA DO POSICIONAMENTO OBTIDO ATRAVÉS DE RECEPTORES GPS DE BAIXO CUSTO

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

São Paulo
2018

ERLY CALDAS DE LIMA

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA MELHORA DO POSICIONAMENTO OBTIDO ATRAVÉS DE RECEPTORES GPS DE BAIXO CUSTO

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra

São Paulo
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

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

São Paulo, ... de .....de 2018

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catalogação-na-publicação

Lima, Erly Caldas de
PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA MELHORA DO POSICIONAMENTO OBTIDO ATRAVÉS DE RECEPTORES GPS DE BAIXO CUSTO / E. C. Lima – versão corr. -- São Paulo, 2018.
197 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.DGPS para celulares 2.GPS de baixo custo 3.A-GPS 4.HSGPS 5.Telefones Celulares I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, minha abençoada mãezinha Inis, pelo amor, carinho e dedicação, e por acreditar que um dia este objetivo fosse alcançado.

À minha amada esposa Rose e meus filhos pelo incentivo e compreensão nos dias distantes ao longo de anos, com o tempo dedicado aos estudos, sem o qual não seria possível chegar ao final deste trabalho.

Ao professor e amigo Ricardo Ernesto Schall (in memoriam) que no momento mais difícil forneceu apoio e uma direção a seguir.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra, que durante todos estes anos dedicou uma atenção, apoio e paciência que podem ser comparadas à de um pai com o seu filho, sempre com palavras de incentivo, principalmente nos momentos mais difíceis da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Jr. Pelos concelhos, explicações, assistência e diretrizes que nortearam inúmeras etapas desta pesquisa.

Ao colega Rodrigo de Sousa Pissardini pela ajuda nos experimentos e sugestões apresentadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho pelas indicações e concelhos.

Ao Prof. Dr Antonio Sandro Verri e ao técnico especialista em telecomunicações Laboratório de Microeletrônica da EPUSP Jair Pereira De Souza, pela ajuda na conexão da antena externa em um dos telefones.

Ao colega Egydio pela companhia e ajuda dos experimentos dinâmicos.

Aos servidores do INMET Marcelo Schneider e aos operadores da estação meteorológica do Mirante de Santana Nelson Miessi e Marise Basílio Amadei pelo acesso e ajuda nos rastreios para coleta de dados.

A todos os professores e funcionários do PTR pelo apoio e incentivo, em especial aos técnicos Adalberto Moreira Mariano e Arildo Fernandes de Morais pelo apoio e ajuda nos diversos experimentos.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para o êxito deste trabalho.

RESUMO

O desenvolvimento técnico da eletrônica, a contínua redução do tamanho dos receptores GNSS, associada à diminuição do consumo de energia, transformaram estes produtos em alguns circuitos integrados ou apenas pequenos *chips* do tamanho de um botão de uma camisa. Desta forma pode-se promover a sua integração com inúmeros dispositivos eletrônicos. A associação com os telefones celulares foi principalmente impulsionada pelo mandato de aprimoramento dos serviços 911 (E911) da Federal Communications Commission (FCC) nos Estados Unidos, exigindo que todas as operadoras de telefonia móvel daquele país fornecessem a localização com boa precisão das chamadas de emergência. Esta necessidade estimulou a produção dos *chips* em larga escala e, portanto, a diminuição do custo e a sua popularização. Desta maneira quase que em sua totalidade, os telefones celulares são hoje fabricados com receptores GPS, o que torna estes dispositivos uma das fontes mais baratas de se obter o Geoposicionamento. Acontece que existe uma lacuna na literatura quanto à precisão e a exatidão das coordenadas fornecidas por estes equipamentos. O presente trabalho visa, através de testes estatísticos e da comparação com outros receptores GPS e métodos, quantificar estes valores e propor uma metodologia para melhorar tal posicionamento. Para conseguir o objetivo, a estrutura do Sistema Operacional do telefone foi modificada de tal modo que fosse possível o acesso às observáveis do *chipset* do GPS embarcado e convertidos para o padrão RINEX de arquivamento de dados brutos. Os testes foram executados com o equipamento original e com o equipamento modificado com a instalação de uma antena externa e mostraram que com a utilização da medida de fase da portadora o equipamento pode fornecer o posicionamento com uma precisão média de 0,069m, com o desvio padrão de 0,047m e erro planimétrico de posicionamento máximo de 0,218m e mínimo de 0,004m.

Palavras Chave: Melhoria de posicionamento GPS; DGPS para celulares; GPS de baixo custo; A-GPS; HSGPS; Telefones Celulares.

ABSTRACT

The technical development of electronics, the continuous reduction in the size of GNSS receptors, allied with the energy consumption decrease, transformed these products into some integrated circuits or in small *Chips* as small as size of a button of a shirt. In this way one can promote its integration with countless electronic devices. The association with cell phones was mainly driven by the mandate to enhance services 911 (E911) of the Federal Communications Commission (FCC) in the United States, requiring that all mobile carriers of that country provide all the emergency calls location with good accuracy. So as to fulfill this necessity, the production of *Chips* in a large scale has been stimulated and therefore the decrease in cost and its popularity. In this way almost in its entirety, cell phones are now manufactured with GPS receivers, which makes these devices one of the cheapest sources to obtain the geopositioning. It turns out that there is a gap in the literature about how precise and accurate the coordinates provided by these equipments can be. This thesis aims through statistical tests and comparison with other GPS receivers and methods, quantify these values and propose a methodology to improve such positioning. To achieve the objective, the structure of the phone's operating system was modified in such a way that it was possible to access the embedded GPS Chipset observables and then converted into the RINEX standard raw data file. The tests were carried out with the original equipment and with the modified ones, with an external antenna installation which showed that using the phase measure of the carrier, the equipment can provide a positioning with an average accuracy of 0, 069m, with a default deviation of 0, 047m and a maximum planimetric positioning error of 0, 218m and a minimum of 0, 004m.

Keywords: GPS position improvement; Cellphone DGPS; Low cost GPS; A-GPS; HSGPS; Cell Phones.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dispositivos portáteis inteligentes em uso no Brasil -.....24
Figura 2 – Venda de smartphones por sistemas operacionais no mundo (em milhões de unidades).....26
Figura 3 – Latitudes e Longitudes obtidas através de telefone celular estático, ao longo do tempo.....29
Figura 4 – Desenho Esquemático de um Receptor GPS em um Telefone Celular. ..34
Figura 5 – Desenho esquemático da Seção de GPS do Modelo Motorola XT-1025.38
Figura 6 – Placa Mãe do Motorola XT-1025.....39
Figura 7 – Transição de dados e código pelo sistema A-GPS. 42
Figura 8 – Representação do sistema A-GPS.....43
Figura 9 – Posicionamento pela Estação Rádio Base.....45
Figura 10 – Evolução do lançamento de satélites com L5/E5.....46
Figura 11 – Espalhamento espectral e modulação do código na portadora L1.....47
Figura 12 – Taxa de modulação do código bifásico binário pseudorandomico em L1/E1/B1 e L5/E5/B5.....48
Figura 13 – Efeito do multicaminhamento em L1 e L5 49
Figura 14 – DGPS com domínio da Posição.....56
Figura 15 – DGPS com domínio das distâncias.....57
Figura 16 – Desvio padrão das diferenças e erro de posicionamento em função do tempo sem ocorrência de falhas 67
Figura 17 – Desvio padrão das diferenças e erro de posicionamento em função do tempo com ocorrência de falhas 68
Figura 18 – Desvio padrão das diferenças e erro de posicionamento em função do tempo com e sem ocorrência de falhas.....68
Figura 19 – Desvio padrão das diferenças e distância 3D do erro de posicional em função do tempo com e sem ocorrência de falhas, em escala logarítmica 69
Figura 20 – Fluxograma de implantação do RAIM-FDE.....70
Figura 21 – Componentes do *Front-end* de um receptor GPS.....74
Figura 22 – Onda com polarização circular à direita 78
Figura 23 – Centros de fase em L1 e L2 80
Figura 24 – Exemplo de sentenças GPX. 84
Figura 25 – Exemplo de sentenças NMEA.....86
Figura 26 – Arquivo de Observáveis RINEX. 88
Figura 27 – Arquivo de efemérides GPS RINEX.....90
Figura 28 – Estrutura dos quadros de mensagens do protocolo SiRF. 93
Figura 29 – Exemplo da cadeia hexadecimal da estrutura da mensagem MID 7.....94
Figura 30 – Telas do Aplicativo GPS Essential para Android.....99
Figura 31 – Telas do Aplicativo GPS NMEA Tool para Android. 100
Figura 32 – Telas do Aplicativo u-center para Android.....100
Figura 33 – Tela do Quantum GIS com a plotagem das coordenadas coletadas. ..104

Figura 34 – Tela do QGIS com o GRASS e os vetores perpendiculares de menor distância. 105
Figura 35 – Tela de painéis do VisualGPSce indicando a qualidade do sinal e da posição, azimute e elevação dos satélites e médias estatísticas. 107
Figura 36 – Telas do Estado do GPS, Mapa, coleta de dados e Navegação do TerraSync. 107
Figura 37 – Receptor Topcon GNSS HiPer + ... 108
Figura 38 – Receptor Novatel FlexPak-G2-V1-L1 109
Figura 39 – Receptor ProMark3 110
Figura 40 – Kit de avaliação evk-6t-0-001 111
Figura 41 – Receptor GlobalSat G-Star IV modelo BU-353S4. 112
Figura 42 – Telefone Celular Motorola modelo XT687 113
Figura 43 – Telefone Celular Samsung Galaxy S2 modelo GT-i9100 113
Figura 44 – Diagrama esquemático – GT-i9100. 114
Figura 45 – Diagrama da placa de circuito – GT-i9100. 115
Figura 46 – Placa mãe do GT-i9100 115
Figura 47 – Conexão sem solda do cabo RGC 58 na placa do telefone. 116
Figura 48 – Conexão com solda do cabo RG 58 na placa do telefone. 117
Figura 49 – Beas Tee. 118
Figura 50 – Tela do programa desassemblador. 119
Figura 51 – Tela do programa editor hexadecimal com a biblioteca original e modificada. 120
Figura 52 – Conjunto de antenas montado no LTG 122
Figura 53 – Estação meteorológica do Mirante de Santana. 124
Figura 54 – Diferenças de posicionamento entre diferentes programas 129
Figura 55 – Sequência das épocas em um arquivo NMEA obtido de um telefone celular. 130
Figura 56 – Tela do QGIS com a plotagem de pontos GPX, em local com edificações de baixo porte (6,00m). 132
Figura 57 – Tela do QGIS com a plotagem de pontos GPX, em local com edificações de maior porte (40,00m). 132
Figura 58 – Tela do QGIS com a plotagem de pontos GPX, em local de vias largas e com edificações de baixo porte (6,00 m). 133
Figura 59 – Tela do QGIS com a plotagem de pontos GPX, em local aberto. 134
Figura 60 – Desvio absoluto do posicionamento – Novatel. 136
Figura 61 – Desvio absoluto do posicionamento – Hiper. 136
Figura 62 – Desvio absoluto do posicionamento – ProMark 3. 136
Figura 63 – Desvio absoluto do posicionamento – U-blox. 137
Figura 64 – Dispersão dos erros para a estação móvel – Posicionamento por Ponto Simples. 139
Figura 65 – Dispersão dos erros para a estação móvel – DGPS com Domínio na Posição. 140
Figura 66 – Dispersão dos erros para a estação móvel – DGPS com Domínio na distância. 140

Figura 67 – Distribuição dos erros para o equipamento Promark3. 142
Figura 68 – Linhas de afastamento para estimativa do DGPS.....143
Figura 69 – Acurácia da correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 14/04/2016.....145
Figura 70 – Precisão da correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 14/04/2016.....145
Figura 71 – Detalhe da acurácia na correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 14/04/2016.....146
Figura 72 – Detalhe da acurácia na correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 01/01/2018.....148
Figura 73 – Erro no posicionamento da Latitude em metros para a Base (PPS) e o Móvel (NMEA) para o dia 13/09/2017 das 0:00:00 às 23:59:59 hs. 152
Figura 74 – Erro no posicionamento da Longitude em metros para a Base (PPS) e o Móvel (NMEA) para o dia 13/09/2017 das 0:00:00 às 23:59:59 hs 152
Figura 75 – Erro no posicionamento da Latitude em metros para a Base (RTKlib) e o Móvel (NMEA) para o dia 13/09/2017 das 0:00:00 às 23:59:59 hs. 153
Figura 76 – Erro no posicionamento da Longitude em metros para a Base (RTKlib) e o Móvel (NMEA) para o dia 13/09/2017 das 0:00:00 às 23:59:59 hs. 153
Figura 77 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena interna para sessões com duração de até 1:00h.....171
Figura 78 – Parte do arquivo RINEX obtido pelo telefone SGS2. 172
Figura 79 – SkyPlot dos satélites rastreados em 23/04/2017 173
Figura 80 – Parte do arquivo RINEX obtido pelo receptor Promark3 no modo de navegação.....174
Figura 81 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h.....178
Figura 82 – Trajeto do veículo no teste dinâmico.....179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa de UERE característico do GPS para o PPS 54
Tabela 2 – Limiares aproximados para ruído σ = 33,00 m e intervalo de alarme = 1/15000 65
Tabela 3 – Características dos cabos coaxiais de 50 Ohms. 82
Tabela 4 – Saídas de sentenças NMEA para GPS, GLONASS e GALILEO 86
Tabela 5 – Dados enviados de cada satélite.....91
Tabela 6 – Detalhe das camadas individuais da estrutura dos quadros da mensagem 93
Tabela 7 – Informações contidas na estrutura de dados MID 7 95
Tabela 8 – Lista de componentes do modulo GPS 114
Tabela 9 – Coordenadas das antenas montadas no LTG em SIRGAS (2000,4). ...123
Tabela 10 – Equipamentos utilizados para a avaiação do DGPS. 135
Tabela 11 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo equipamento Novatel. 138
Tabela 12 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo equipamento Hiper. 138
Tabela 13 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo equipamento ProMark 3. 138
Tabela 14 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo equipamento U-blox. 139
Tabela 15 – Correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 14/04/2016 144
Tabela 16 – Correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 01/01/2018 147
Tabela 17 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo programa dgpsNMEA utilizando a estação POLI como base. 149
Tabela 18 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo programa dgpsNMEA utilizando a própria estação como base. 150
Tabela 19 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone XT-687 utilizando-se a antena interna em 27/02/2017.....155
Tabela 20 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-L utilizando-se a antena interna em 27/02/2017. 155
Tabela 21 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-B utilizando-se a antena interna em 27/02/2017. 155
Tabela 22 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-D utilizando-se a antena interna em 27/02/2017. 156
Tabela 23 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-B utilizando-se a antena interna em 23/04/2017. 156
Tabela 24 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-L utilizando-se a antena interna em 23/04/2017. 156
Tabela 25 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-E utilizando-se a antena externa em 25/08/2017. 158
Tabela 26 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-E utilizando-se a antena externa em 28/08/2017. 158

Tabela 27 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-E utilizando-se a antena externa em 30/08/2017. 158
Tabela 28 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-E utilizando-se a antena externa em 01/09/2017. 158
Tabela 29 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-C utilizando-se a antena externa em 06/09/2017. 159
Tabela 30 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-E utilizando-se a antena externa em 06/09/2017. 159
Tabela 31 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-C utilizando-se a antena externa em 09/09/2017. 159
Tabela 32 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do Global Sat – Base POLI utilizando-se a antena interna. 161
Tabela 33 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100A – Base POLI utilizando-se a antena interna. 161
Tabela 34 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100B – Base POLI utilizando-se a antena interna. 162
Tabela 35 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100D – Base POLI utilizando-se a antena interna. 162
Tabela 36 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do Promark3 – Base POLI utilizando-se a antena interna. 162
Tabela 37 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do Global Sat – Base MIRA utilizando-se a antena interna. 163
Tabela 38 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100A – Base MIRA utilizando-se a antena interna. 163
Tabela 39 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100B – Base MIRA utilizando-se a antena interna. 163
Tabela 40 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100D – Base MIRA utilizando-se a antena interna. 164
Tabela 41 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do Promark3 – Base MIRA utilizando-se a antena interna. 164
Tabela 42 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento C – Base POLI utilizando-se a antena externa em 25/08/2017. 165
Tabela 43 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento D – Base POLI utilizando-se a antena externa 25/08/2017. 165
Tabela 44 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento A – Base POLI utilizando-se a antena externa 12/09/2017. 166
Tabela 45 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento C – Base POLI utilizando-se a antena externa 12/09/2017. 166
Tabela 46 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento C – Base PSUL utilizando-se a antena externa em 25/08/2017. 166
Tabela 47 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento C – Base PNOR utilizando-se a antena externa em 12/09/2017. 167
Tabela 48 – Resultados do posicionamento relativo estático com antena interna. .168

Tabela 49 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena interna para sessões com duração de até 1:00h. 169
Tabela 50 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h pelo telefone SGS2 – A. 175
Tabela 51 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h pelo telefone SGS2 – C. 175
Tabela 52 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h pelo telefone SGS2 – E. 176
Tabela 53 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h pelo receptor Novatel. 176
Tabela 54 – Resumo estatístico do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h em 10/04/2017. 177
Tabela 55 – Resumo estatístico dos resultados do teste dinâmico com o Promark 3 181
Tabela 56 – Resumo estatístico dos resultados do teste dinâmico com o telefone SGS2. 181
Tabela 57 - resumo dos resultados obtidos na tese 186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A-GPS	Assisted GPS (GPS assistido)
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicação
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange (Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação)
BPSK	Binary Phase Shift Keying (deslocamento de fase binária)
CDMA	Code Division Multiple Access (Acesso Múltiplo por Divisão de Código)
Cell - ID	Cell Identifier (identificação da célula)
CI	Circuitos Integrado
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (semicondutor de metal-óxido complementar)
CPU	Central Processing Unit (Unidade Central de Processamento)
DGPS	Differential Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global Diferencial)
E911	Enhanced 911 (Aprimoramento 911)
EDGE	Enhanced Date Rates For GSM Evolution (Taxas de Dados Ampliadas para a Evolução do GSM)
EGS	Electronic-Grade Silicon (Silício de classificação eletrônica)
ERB	Estação Rádio Base
EVDO	Evolution-Data Optimized (Evolução em Dados Otimizada)
FCC	Federal Communications Commission (Comissão Federal de Cominicação)
FDE	Fault Detection and Exclusion (Detecção de Falha e Exclusão)
FI	Frequência Intermediária
GIS	Geographic Information System (Sistema de Informações Geográficas)

GLONASS	Global Navigation Satellite System (Sistema de Navegação Global por Satélite)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegação por Satélite)
GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
GPX	GPS eXchange Format (Formato de Intercâmbio GPS)
GSM	Global System for Mobile Comunication (Sistema Global para Comunicação Móvel)
HPSA	High Speed Packet Access (Pacote de Acesso de Alta Velocidade)
HSGPS	High sensitivity GPS (GPS de alta sensibilidade)
IBGE	instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
KML	Keyhole Markup Language
LNA	Low-Noise Amplifier (Amplificador de Baixo Ruído)
LTG	Laboratório de Topografia e Geodésia
MID	Message ID (identificador de mensagem)
NAVSTAR	Navigation System with Time and Ranging Positioning System (Sistema de navegação com tempo e sistema de posicionamento de distância)
NBR	Norma Brasileira
NMEA	National Marine Eletronics Association
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Cadeia de Transporte de RTCM via Protocolo Internet)
OS	Operation System (Sistema Operacional)
PIFA	Planar Inverted-F Antenna (antena planar de F-invertido)
PPS	Posicionamento por Ponto Simples
QME	Quadrado Médio dos Resíduos
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring (Monitoramento da Integridade Autônoma do Receptor)
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RF	Rádio Frequência

RHCP	Right-Hand Circular Polarization (polarização circular à direita)
RINEX	Receiver Independent Exchange Format (Formato de Intercâmbio Independente de Receptor)
RSQ	Raiz quadrada da Soma dos Quadrados
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services (Comissão Técnica de Rádio para Serviços Marítimos)
RTK	Real Time Kinematic (Cinemático em Tempo Real)
SAW	Surface Acoustic Wave (Onda Acústica Superficial)
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SGR	Sistema Geográfico de Referência
SIS URE	Signal-in-Space URE (URE no Sinal no Espaço)
SoC	System-on-a-chip (Sistema-em-um-Chip)
SPS	Standard Positioning Service (Serviço de Posicionamento Padrão)
UEE	User Equipment Error (Erro no equipamento do Usuário)
UERE	User Equivalent Range Error (Extensão Equivalente do Erro do Usuário)
URE	User Range Error (Extensão do Erro do Usuário)
TCXO	Temperature Compensated Crystal Oscillators (Oscilador de Cristal com Compensação de Temperatura)
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access (Acceso múltiplo por divisão de código)
TEQC	Translation, Editing, and Quality Check (Tradução, Edição e Verificação da Qualidade)
TTFF	Time To First Fix (Tempo para o Primeiro Posicionamento)
VEMOS	Velocity Model for SIRGAS (Modelo de Velocidade para o SIRGAS)
XML	EXtensible Markup Language (Linguaguem de Marcação Extensível)
Wi-Fi	Wireless Internet (Internet sem Fio)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
1.1 Apresentação 19
1.2 Justificativa 20
1.3 Objetivos 21
1.3.1 Objetivos gerais 21
1.3.2 Objetivos específicos 22
1.4 Estrutura do trabalho 23
2 TELEFONES CELULARES E POSICIONAMENTO GPS 24
2.1 EVOLUÇÃO DOS SMARTPHONES E SEUS SISTEMAS OPERACIONAIS 25
2.1.1 Posicionamento pelo Android 27
2.1.2 O Android e os dados brutos do GPS 30
2.2 ARQUITETURA DO CELULAR 33
2.2.1 Antena de GPS no Smartphone 35
2.2.2 Filtro Passa Banda para GPS 35
2.2.3 Oscilador de Cristal (Relógio) 36
2.2.4 Bloco de Rádio Frequência (RF) 36
2.2.5 Bloco de Banda Base 36
2.2.6 Componentes Compartilhados pelo GPS e o Smartphone 37
2.3 A-GPS – GPS ASSISTIDO 40
2.4 ESTAÇÃO RADIO BASE (ERB) 44
2.5 A EVOLUÇÃO DOS *CHIPSET*S NOS CELULARES 45
3 CONCEITOS SOBRE O GPS 50
3.1 OBSERVÁVEIS GPS E O CÁLCULO DO POSICIONAMENTO 50
3.2 DGPS 51
3.2.1 O conceito do DGPS 52
3.2.2 Domínio da posição 55
3.2.3 Domínio das distâncias 57
3.3 A INTEGRIDADE DO POSICIONAMENTO GPS 59
3.4 INTENSIDADE DO SINAL 71
3.5 ANTENAS 75
3.5.1 Frequência de cobertura 77

3.5.2 Padrão de ganho 77
3.5.3 Polarização circular 78
3.5.4 Supressão do multicaminhamento 79
3.5.5 Centro de fase 80
3.5.6 Cabos e impedância do circuito 81
3.5.7 Antenas ativas e amplificadores de baixo ruído 82
3.6 FORMATAÇÃO DE ARQUIVOS 83
3.6.1 Arquivos GPX 83
3.6.2 Arquivos NMEA 85
3.6.3 Arquivos RINEX 87
3.6.4 Interface de dados em formato proprietário 91
3.6.5 High sensitivity GPS – HSGPS 95
4 MATERIAIS E MÉTODOS 98
4.1 APLICATIVOS PARA ANDROID 98
4.1.1 Aplicativo GPS Essentials 99
4.1.2 Aplicativo GPS NMEA Tool 99
4.1.3 Aplicativo u-center 100
4.2 PROGRAMA DE CARTOGRAFIA DIGITAL / GEOPROCESSAMENTO 101
4.2.1 Base Cartográfica 101
4.2.1.1 O Mapa Digital da Cidade da Cidade de São Paulo 102
4.2.1.2 Projeto Mapeia São Paulo 103
4.2.2 Programa Quantum GIS 103
4.2.2.1 O GRASS-GIS 104
4.3 PROGRAMAS E FERRAMENTAS PARA GNSS 105
4.3.1 GPS Toolkit 105
4.3.2 RTKLIB 106
4.3.3 TEQC 106
4.3.4 Topcon Tools 106
4.3.5 VisualGPSce 106
4.3.6 TerraSync 107
4.4 EQUIPAMENTOS 108
4.4.1 Receptor Topcon HiPer Plus 108
4.4.2 Receptor Novatel FlexPak-G2-V1-L1 109

4.4.3 Receptor Magellan ProMark3 110
4.4.4 Receptor U-blox evk-6t-0-001 111
4.4.5 Receptor GlobalSat G-Star IV 111
4.4.6 Telefone Celular Motorola modelo XT687 112
4.4.7 Telefone Celular Samsung Galaxy S2 113
4.5 ANTENAS 122
4.6 ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MIRANTE DE SANTANA 123
4.7 MODELO DE VELOCIDADE DAS ESTAÇÕES 124
4.8 PROGRAMAS DESENVOLVIDOS 126
4.8.1 Descrição do programa modificaRINEX. 126
4.8.2 Descrição do programa dgpsNMEA. 127
4.8.3 Descrição do programa dgpsRINEX. 128
4.8.4 Descrição do programa NMEA_x_NMEA 129
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 131
5.1 TESTE PRELIMINAR E UTILIZAÇÃO DO ARQUIVO GPX. 131
5.2 DIFERENÇA NA QUALIDADE DA CORREÇÃO ENTRE O DGPS NOS DOMÍNIOS DA POSIÇÃO E DA DISTÂNCIA 134
5.3 QUALIDADE DA CORREÇÃO DOS ARQUIVOS NMEA COM DGPS NOS DOMÍNIOS DA POSIÇÃO E DA DISTÂNCIA 148
5.4 QUALIDADE DA CORREÇÃO DOS ARQUIVOS NMEA POR OUTRO ARQUIVO NMEA. 154
5.4.1 Resultados da correção no posicionamento NMEA x NMEA com a antena interna. 154
5.4.2 Resultados da correção no posicionamento NMEA x NMEA com a antena externa. 157
5.5 QUALIDADE DA CORREÇÃO DO POSICIONAMENTO PELO DGPS NOS DOMÍNIOS NA DISTÂNCIA E NA POSIÇÃO, A PARTIR DOS DADOS BRUTOS DO TELEFONE CELULAR. 160
5.5.1 Resultados da correção do DGPS a partir dos dados brutos com a antena interna. 160
5.5.2 Resultados da correção do DGPS a partir dos dados brutos com a antena externa. 165
5.6 QUALIDADE DO POSICIONAMENTO DIFERENCIAL PELA MEDIDA DA FASE, A PARTIR DOS DADOS BRUTOS DO TELEFONE CELULAR. 167
5.6.1 Resultados da correção pela diferença de fase com a antena interna. 168

5.7 QUALIDADE DO POSICIONAMENTO DIFERENCIAL EM UM TESTE DINÂMICO. 179
6 CONCLUSÃO 184
REFERÊNCIAS 189

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O presente trabalho propõe e implementa uma metodologia para melhorar a posição fornecida pelo sistema de posicionamento global (GPS) através de receptores de baixo custo, implementando a técnica DGPS nos domínios das coordenadas e das distâncias.

O GNSS autônomo tem as vantagens de fornecer a posição em tempo real, sem a necessidade de pós-processamento, porém com imprecisões que segundo Monico (2008), podem chegar a 30,00 metros quando obtidas pelo código C/A.

Para efeito do presente trabalho, são considerados de baixo custo aqueles que se constituem de *chipsets* de GPS incorporados em outros equipamentos, como é o caso da maioria dos telefones celulares, máquinas fotográficas e filmadoras. Um *chip* será definido como um Circuito Integrado miniaturizado (em geral de silício) ou dispositivo microeletrônico capaz de desempenhar diversas funções mais ou menos complexas. Sendo *chipsets* um conjunto de *chips* (NOGUEIRA, 2011).

A adição generalizada dos receptores GPS nos telefones celulares, foi inicialmente estimulada pelos requisitos do E911 nos Estados Unidos e do E122 na Europa. Nos Estados Unidos, a Comissão Federal de Comunicações exige que as operadoras de telefonia celular forneçam a localização do telefone com a precisão de 50 centímetros em 67 por cento das chamadas de emergência e com 150 metros para 90 por cento das chamadas. Como resultado houve um crescimento dramático no número de *chipsets* de GPS embarcados nestes dispositivos, isto possibilitou o aumento da produção industrial e consequentemente a diminuição do preço do produto (BANVILLE; VAN DIGGELEN, 2016).

O desenvolvimento dos *Chips* de GNSS de baixo custo tem estimulado uma revolução nos dispositivos de posicionamento, navegação e tomada de tempo. Antes reservados para operações militares ou trabalhos geodésicos de precisão o posicionamento através do GNSS tornou-se muito útil para aplicações civis, estabelecendo sua utilização em navegação de veículos com utilização de telefones

celulares. Por outro lado, os equipamentos mais caros podem prover exatidão na casa do centímetro ou mesmo do milímetro, utilizando múltiplas frequências e antenas e componentes com alto custo de aquisição. Tais equipamentos são largamente utilizados desde o monitoramento do movimento tectônico e de estruturas, passado pelo levantamento topográfico, agricultura de precisão, exploração de gás e petróleo e controle de máquinas.

A popularização dos telefones celulares é algo inquestionável e de crescimento vertiginoso, que pode ser comprovada com os números divulgados pela ANATEL (2017): só em relação ao mês anterior, o serviço móvel pessoal apresentou aumento de 156.155 linhas (+ 0,06%). Nos últimos 12 meses, houve redução de 9.913.980 linhas (-3,93%). O que deu no mês de agosto de 2017 um montante de 242.167.504 linhas na telefonia móvel em funcionamento.

Com a incorporação de outros dispositivos, estes telefones servem cada vez mais para outras finalidades além de ligar e receber chamadas: rádio FM, televisor (analógico ou digital), medidor de vibração, bússola, acelerômetro, clinômetro, sensores de orientação, câmera, lanterna, armazenamento de dados em cartão SD e GPS, entre outros exemplos de funcionalidades implementadas, tornando-os assim verdadeiros *smartphones* ou telefones inteligentes.

Através da utilização de um receptor GPS embutido, o celular é capaz de fornecer a localização do aparelho com o rastreio de pelo menos quatro satélites, mas a precisão e a exatidão com a qual esta posição é obtida, ainda precisam ser estudadas e testadas.

Sendo assim este trabalho, entre outras coisas, visa realizar testes estatísticos para quantificar estas incertezas e sugerir maneiras de melhorar a precisão e a exatidão do posicionamento fornecido, com custos acessíveis, ou proporcionais ao tipo de equipamento utilizado.

1.2 Justificativa

Como justificativa para o presente trabalho, pode-se apontar os poucos estudos já publicados, que contenham valores e quantificações. A maioria dos artigos que trata

do tema apenas apontam possibilidades, mas ao mesmo tempo sem maiores estudos ou comprovações de sua viabilidade ou aplicabilidade, sugerindo que o assunto pode e deve ser melhor estudado.

Em função disso, foram realizados vários testes com receptores GPS, de diferentes tecnologias e comparados os resultados para uma avaliação do posicionamento obtido com telefones celulares com GPS embarcado. Assim, o presente trabalho propõe uma metodologia de melhorar tal posicionamento que, no estágio atual é pós-processada, mas tem condições de ser implementado futuramente em tempo real.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

Os objetivos deste trabalho são:

Estudar mais a fundo alguns métodos de posicionamento GPS, em particular o DGPS com correções aplicadas às coordenadas, em comparação com o DGPS com correções aplicadas às pseudodistâncias, com o intuito de mensurar e quantificar as diferenças entre os resultados obtidos pelos dois métodos.

Avaliar e quantificar a precisão e a exatidão do posicionamento obtido através de GPS embarcado em telefones celulares, comparando suas coordenadas com as de pontos reconhecidamente acurados ou com coordenadas obtidas por intermédio de equipamentos comprovadamente mais precisos, tal como receptores de dupla frequência e com dados pós-processados.

Propor uma metodologia para corrigir os erros no posicionamento, sendo no presente trabalho através de pós-processamento, mas preparando e dando condições de que seja aplicada em tempo real. Diferentemente do que ocorre nas tecnologias DGPS, RTK ou NTRIP, onde as correções são aplicadas nas pseudodistâncias, aqui as correções serão aplicadas também nas coordenadas, tendo-se em vista que as pseudodistâncias não são disponibilizadas para todos os celulares.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Testar a precisão das coordenadas obtidas com diversos modelos de telefones e ou aplicativos, no mesmo instante, em um ponto de coordenadas reconhecidamente acuradas, tal como as antenas instaladas sobre o Laboratório de Topografia e Geodésia da Escola Politécnica da USP.

2. Obter as coordenadas com diversos tipos de receptores GPS, tais como: embarcados em telefone celular, GPS de navegação (código) utilizando tanto o software do fabricante como softwares alternativos e GPS geodésico (dupla frequência e pós-processado).

3. Estudar e implantar softwares livres (baixo custo) para o cálculo e a visualização dos dados obtidos pelos diversos equipamentos.

4. Comparar as coordenadas acima tanto no modo estático como no cinemático, levando-se em consideração os erros inerentes ao sistema e ao método utilizado.

5. Propor uma metodologia para correção destas coordenadas, a partir dos dados fornecidos pelo telefone celular e de um arquivo RINEX obtido de uma estação de referência, editando o arquivo para selecionar apenas as pseudodistâncias obtidas pelo código dos satélites observados em comum com o celular. Ou seja, igualando, desta forma, o conjunto de satélites rastreados pelos dois equipamentos.

6. Obter as observáveis que compõem o arquivo RINEX, pseudodistância do código, medida de fase, Doppler e SNR do *chipset* do telefone.

7. Elaborar um algoritmo e produzir o código fonte de um programa para otimizar e automatizar o processo de correção implementado.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira:

O capitulo 1 traz a introdução, apresentação, justificativa e os objetivos.

O capitulo 2 apresenta uma breve descrição dos telefones celulares, estudando a evolução desses dispositivos, sua arquitetura interna, ou seja, disposição dos *chips*, antenas, bateria, os sistemas operacionais existentes, algumas formas de incremento da qualidade do posicionamento, com ênfase no A-GPS e Estações Rádio Base, além de tratar também estrutura, da evolução e do estado da arte destes sistemas.

O capitulo 3 trata de alguns aspectos particulares e significativos para o cálculo das coordenadas obtidas pelo sistema de posicionamento por satélites.

O capitulo 4 descreve os materiais e os métodos, ou seja, os procedimentos, instrumentos e equipamentos utilizados, assim como os programas desenvolvidos no presente trabalho, de forma que os resultados obtidos possam ser compreendidos.

O capitulo 5 apresenta o detalhamento de cada um dos experimentos realizados com seus resultados e discussões.

O capitulo 6 apresenta as conclusões e recomendações para a continuidade dos trabalhos.

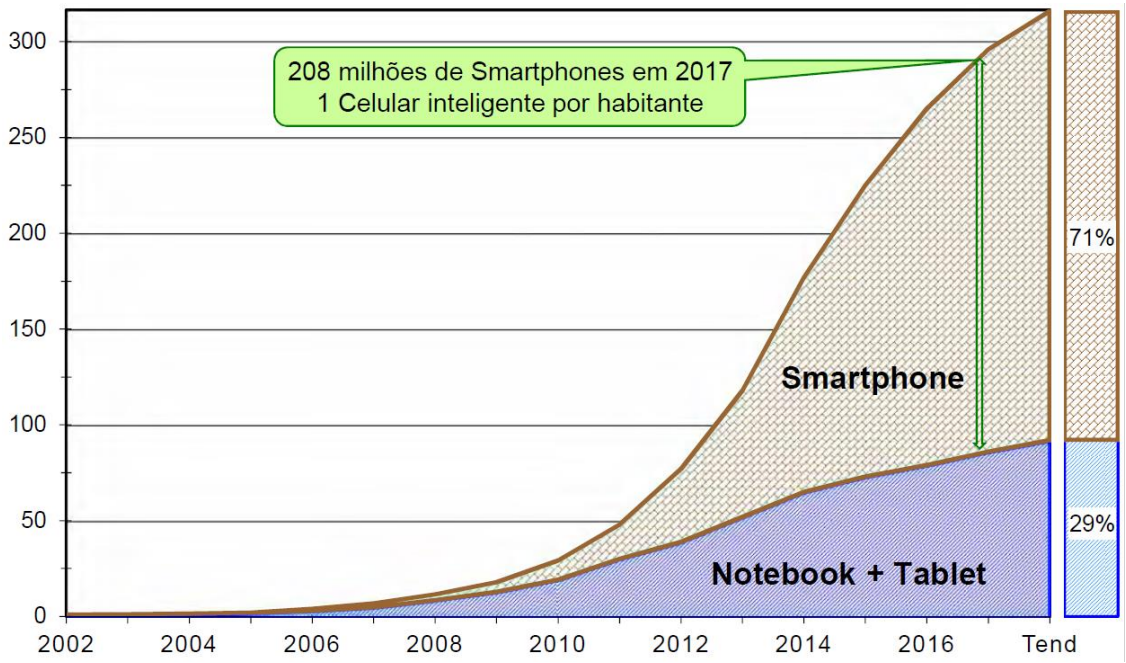
2 TELEFONES CELULARES E POSICIONAMENTO GPS

Este capítulo apresenta uma breve descrição dos telefones celulares, descrevendo a evolução desses dispositivos e sua arquitetura interna, ou seja, a disposição dos *chips*, antenas, bateria, os sistemas operacionais mais utilizados e, principalmente, algumas formas de incremento da qualidade do posicionamento, com ênfase no A-GPS *"Assisted GPS"* (GPS assistido), passando pelas Estações Rádio Base.

Nos últimos anos o geoposicionamento, mais especificamente, os baseados em posicionamento por satélites, é uma característica padrão de diversos equipamentos. É crescente o número de telefones móveis, equipamentos pessoais de navegação, notebooks, netbooks, tablets e relógios entre outros, que são equipados com *chips* de receptores GPS e softwares de navegação. Estes sistemas permitem aos seus usuários navegar de uma origem a um destino; encontrar o estacionamento, posto de gasolina ou mesmo a cafeteria mais próxima.

Meirelles (2017), mostra em uma pesquisa publicada em 19/04/2017, o crescimento dos smartphones em uso no Brasil e prevendo que em outubro do mesmo ano haveria 1 celular inteligente para cada brasileiro (Figura 1).

Figura 1 – Dispositivos portáteis inteligentes em uso no Brasil -



Fonte: Meirelles (2017).

2.1 EVOLUÇÃO DOS SMARTPHONES E SEUS SISTEMAS OPERACIONAIS

Apesar de alguns autores afirmarem que o aparecimento dos smartphones só tenha ocorrido em 2007 (OLIVEIRA, 2014) com o lançamento pela Apple Inc. de um novo aparelho com grande poder computacional, portabilidade e design inovador, denominado *"iPhone"*, o mercado de telefonia celular já possuía em alguns modelos a combinação de algumas funções, consideradas à época como de um "computador de bolso".

Um exemplo disso é o IBM Simon Personal Communicator desenvolvido em 1994 pela International Business Machines Corp. (IBM) e produzido pela Mitsubishi Electric Corp., que era controlado por uma tela sensível ao toque, capaz de enviar e receber fax e e-mails e equipado com livro de endereços, agenda, calculadora, relógio mundial, bloco de notas adequado para armazenar anotações escritas à mão e teclado virtual (SAGER, 2012).

Em 1997 Philippe Kahn, fundador da Borland, uma gigante na criação de ferramentas para desenvolvimento de software, tirou uma foto de sua filha recém-nascida com o telefone celular e a enviou a mais de 2 mil contatos, entre familiares, amigos e parceiros de negócios; surgia assim o protótipo do celular com câmera integrada, o qual tornou-se comercial em 1999 com o Sharp J-SH04, o primeiro smartphone com uma câmera de resolução de 0.1 Megapixel. Em 2001 a Blackberry entrou na disputa por uma fatia significativa do mercado com o modelo 6210 ou Quark, competitivo por ter o teclado QWERTY e entrada USB. Em 2003 surge o Palm Treo 600 que tinha multifunções como calendários, tirar fotografias e leitura de MP3.

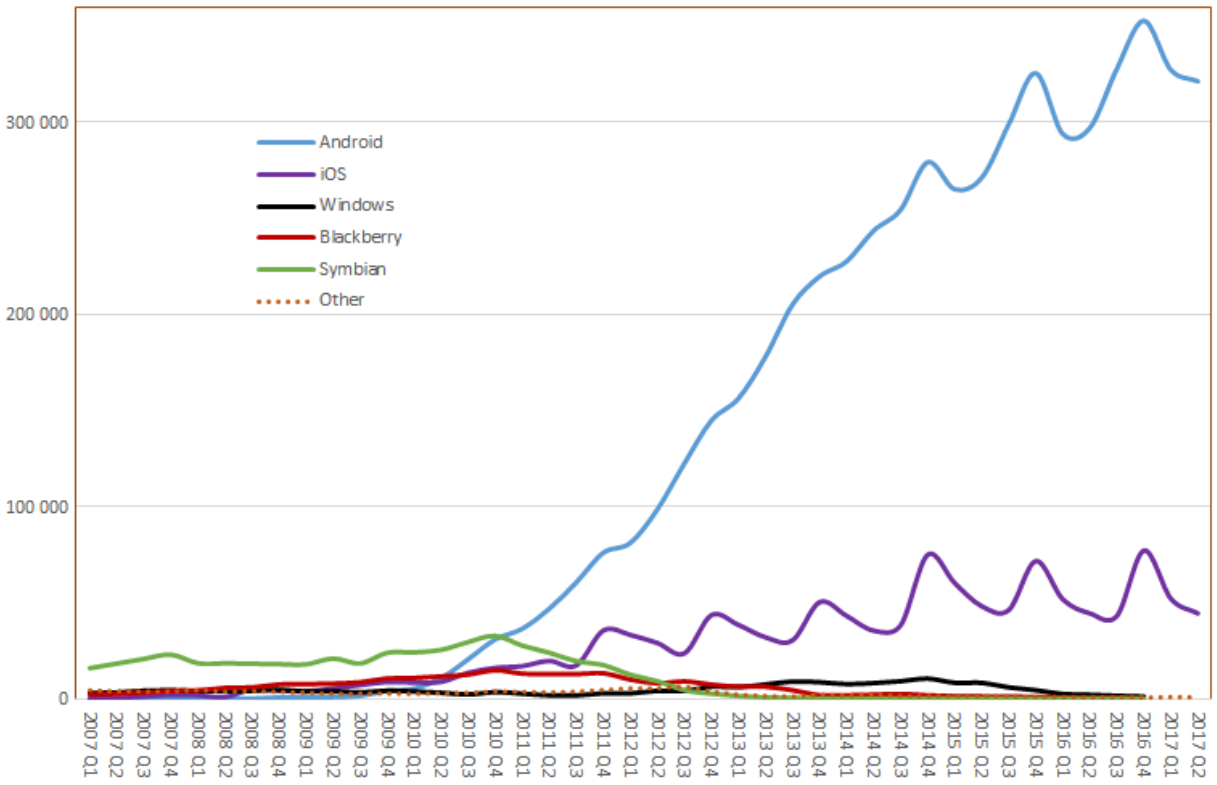
Mas certamente em termos de capacidade de processamento de informações, o iPhone em 2007 foi um marco na evolução dos aparelhos de telefonia celular. O aparelho não foi o primeiro smartphone com tela colorida, nem o primeiro capaz de acessar a internet. Muito menos o primeiro a incorporar uma câmera digital ou MP3 Player, porém foi o primeiro aparelho a integrar todos estes recursos em um único produto, fácil de usar, fácil de compreender e com apelo de massa.

O primeiro smartphone com sistema Android foi lançado em 2008, com o HTC Dream. Abaixo da tela havia 5 botões (Chamada, Home, Menu, Back e Encerrar chamada/Power) e um trackball para rolagem de tela, além de botões de volume na

lateral. Como se não bastasse, havia um teclado QWERTY completo sob a tela de 3.2”, uma necessidade já que o sistema operacional Android na época não tinha um teclado virtual.

A facilidade de uso, versatilidade e a interação com o usuário foram fatores preponderantes para o crescimento dos dois sistemas operacionais mais vendidos na atualidade (Android e iOS). A Figura 2 mostra a evolução no mercado consumidor, com destaque para os sistemas Android e o sistema operacional da Apple, o iOS, que dominam as vendas de aparelhos de telefonia móvel, praticamente não deixando espaço para seus concorrentes.

Figura 2 – Venda de smartphones por sistemas operacionais no mundo (em milhões de unidades).



Fonte: Forni; Van Der Meulen (2017).

Tendo em vista ser a plataforma Android a mais popular atualmente essa foi a escolhida para a realização dos testes neste trabalho e, portanto, será aqui mais detalhada; ainda que não se possa afirmar com base unicamente nas vendas que um sistema seja melhor que o outro, uma vez que sistemas com melhor desempenho costumam ser mais caros, o que leva a um menor número de vendas. Contudo, é de

se esperar que os mais vendidos sejam os mais utilizados, mais baratos e com mais aplicativos.

Um sistema operativo ou operacional (*Operation System – OS*) é um programa ou conjunto de programas que gerencia os recursos de *hardware* e *software* de um computador / celular, administra os recursos, processadores, armazenamento, dispositivos de entrada e saída e dados da máquina e seus periféricos, provendo serviços e criando uma plataforma comum a todos os programas utilizados. Por ser responsável pelo controle de todos os sensores instalados no dispositivo, inclusive o *chipset* do GPS, e deve ter uma atenção especial no tocante ao serviço de posicionamento.

O iPhone OS ou iOS é um sistema operacional para dispositivos móveis criado e desenvolvido pela Apple Inc. exclusivamente para o hardware desta companhia. É bastante popular devido à sua grande interação com o usuário, facilitando seu uso com uma manipulação direta através de multi toques, controles deslizantes, interruptores e botões na tela. É derivado do OS X, distribuído pela fundação Darwin (DAS, 2016).

O Android OS por sua vez possui código aberto (*open source)* sob a licença Apache e foi desenvolvido pela Open Handset Alliance, liderada pela Google Inc. É baseado no sistema operacional Linux e o software opera (roda) sobre uma estrutura de aplicativos que incluem bibliotecas compatíveis com o Java, baseados no Apache Harmony (AHMAD et al., 2013).

2.1.1 Posicionamento pelo Android

A principal característica dos telefones móveis é a sua portabilidade, ou seja, sua capacidade de ser utilizado em qualquer lugar dentro da área de cobertura, e em conjunto com a capacidade de fornecer a sua localização. Assim, não é surpresa que os aplicativos encontrem, explorem, contextualizem e utilizem o seu posicionamento.

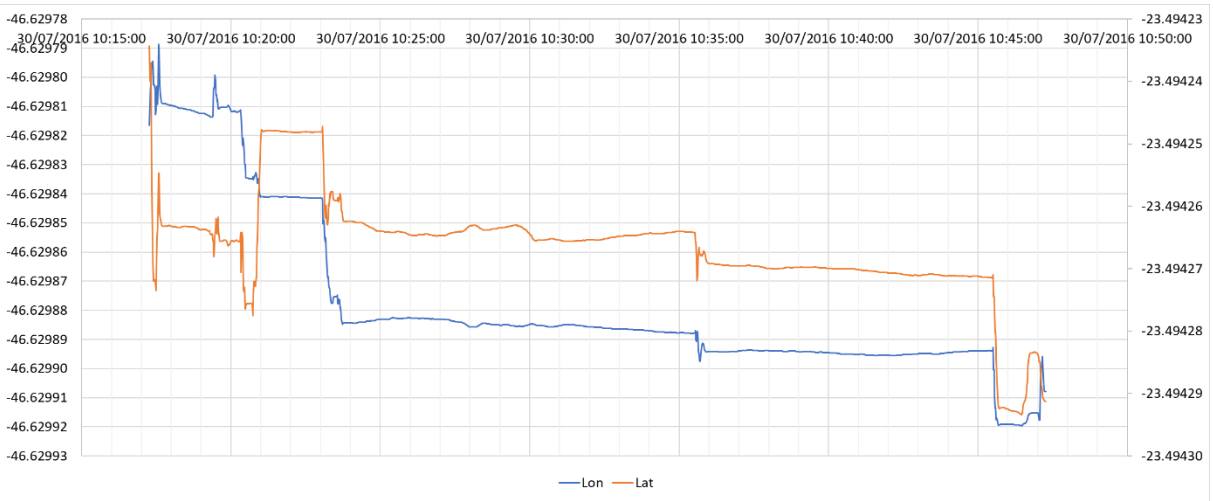
Para tanto, a plataforma utiliza seis diferentes maneiras para obter as coordenadas do telefone (GOOGLE LLC, 2018a), que são chamadas de provedores:

- Cached GPS: o sistema operacional armazena a última posição conhecida fornecida pelo *chip* GPS, em que ficam registrados o horário, latitude, longitude, altitude e precisão.
- Cached Network ou Cell-ID: a última localização conhecida determinada pelo provedor da operadora de telefonia. O provedor reúne informações da rede de células (antenas) e WiFi, que quando ligados, envia as informações para um processador remoto de cliente-servidor que trabalha as informações e devolve um local aproximado.
- Real-time GPS: são as informações brutas transmitidas pelo GPS.
- Real-time Network: são as informações brutas do provedor de localização da rede fornecida pela operadora de telefonia. Para o posicionamento, a rede pode utilizar diferentes informações tais como dados de servidores WiFi, GPS, proximidade das torres de celular, etc.
- Passiva: a aplicação atualiza a localização enquanto está minimizada, por intermédio de outros aplicativos.
- NMEA: apesar de não ser de fácil leitura ou obtenção para o usuário final, algumas sentenças NMEA também podem ser obtidas.

A escolha da fonte provedora do posicionamento a ser utilizada baseia-se no tripé: acurácia, velocidade de processamento e consumo de bateria, sendo este último de crucial importância. A acurácia do posicionamento difere quanto às fontes, uma localização obtida 10 segundos antes por uma determinada fonte apesar de defasada no tempo, pode ser mais acurada que uma nova localização, mais atual, obtida por outra ou até pela mesma fonte. Em lugares fechados o Cell-ID, que será discutido no item 2.4, é mais eficaz que o GPS e seu consumo de bateria é consideravelmente menor; mas depende da proximidade de torres de telefonia móvel (e isso limita a acurácia e abrangência dessa fonte). Ainda em ambientes internos, o receptor GPS recebe somente os sinais refletidos, o que deteriora tanto a precisão, quanto a exatidão do posicionamento, além de só ser possível com o auxílio do HS GPS, que também será melhor explanado em um item próprio. O movimento também deve ser levado em consideração, fazendo-se uma reestimativa da posição a cada intervalo de tempo pré-determinado (KUMAR .B; ASHOK, 2013; MEIER, 2012).

Outra característica importante dos telefones celulares diz respeito ao fato de os fabricantes de *chipset* de GPS incluírem no *driver* do sensor o desligamento automático do mesmo caso nenhum outro sensor detecte movimento, o que é feito para diminuir o consumo de bateria. Sendo assim caso seja necessário obter o posicionamento estático do telefone por um período prolongado, este comando deve ser desligado no arquivo controlador do *chipset*. O gráfico da Figura 3 ilustra esta situação.

Figura 3 – Latitudes e Longitudes obtidas através de telefone celular estático, ao longo do tempo.



Fonte: Gráfico de experiências feitas pelo próprio autor (2018).

O gráfico acima mostra os dados coletados de um rastreio de 30 minutos feito por um telefone celular com taxa de amostragem de 1 segundo. Em azul estão plotadas as Longitudes e em laranja as Latitudes com espaçamento de 0,00001 grau, o que significa aproximadamente 1,00m. A escala de tempo possui suas divisões principais de 5 em 5 minutos e as secundárias de 1 em 1 minuto.

Pode-se perceber pelos gráficos, um comportamento muito atípico para um receptor GPS, os pontos plotados mostram que após um determinado período algum tipo de média é calculado e um filtro no posicionamento é aplicado. De tempos em tempos, aproximadamente 10 minutos o posicionamento é reavaliado e o filtro é novamente aplicado.

Em outros modelos de telefone, após um período de aproximadamente 5 minutos o GPS é simplesmente desligado e os dados deixam de ser gravados.

Ficando disponível para o sistema operacional simplesmente a última localização conhecida.

2.1.2 O Android e os dados brutos do GPS

Como mencionado anteriormente, ao Sistema Operacional Android fica a atribuição de controlar os sensores e intermediar as informações por eles fornecidas (GOOGLE LLC, 2018a).

Sendo assim, o Android fornece para os aplicativos que trabalham nesta plataforma, o acesso aos serviços de localização suportados pelo aparelho, através de Classes de programação do pacote *"android.location"*; e portanto os aplicativos não se conectam com os sensores, apenas com o OS que por sua vez obtém a informação do *chipset*.

Desde o seu lançamento o sistema passou por vários aprimoramentos, dando origem a diversas versões, sendo que no momento da conclusão desta tese (2018), a última versão era a 8.0 intitulada de Oreo.

Em versões anteriores, desde a primeira 1.00 – Alpha até a 6.0 – Marshmallow não havia a possibilidade de se obter as observáveis brutas a partir do *chipset* do GPS pelo sistema operacional (CHEN et al., 2014). O Java/Dalvik API por si só não oferece informações suficientes para que se possa isolar as pseudodistâncias ou montar um arquivo RINEX e a análise dos códigos de programação, dentro de suas classes ou em sua estrutura, não fornece dados úteis para uma melhoria de posicionamento.

O primeiro nível abaixo do Java API é o *"android / platform / hardware / qcom / gps / release / . / loc_api / libloc_api / gps.c"* que opera apenas sobre algumas informações em um nível básico, informações estas disponibilizadas pelas sentenças NMEA.

Aprofundando-se um pouco mais na estrutura da plataforma, constata-se que existe a biblioteca libhardware_legacy/gps, produzida em C++, que analisa diretamente as sentenças NMEA e as transforma em estruturas utilizáveis pela biblioteca acima.

Abaixo deste nível encontram-se os *Drivers* do dispositivo que são arquivos estruturados e compilados em linguagem C fornecidos pelo fabricante para cada modelo de *Chipset* do GPS. A partir daí conhecendo-se o fabricante e o modelo do *chip* para um determinado dispositivo e dependendo das funcionalidades deste modelo é possível que se altere o *driver* para que este forneça tais informações, gravando-as em um arquivo.

Em maio de 2016 durante sua conferência anual a *"I/O 2016"*, a Google anunciou que os dados brutos medidos pelos dispositivos de GPS em smartphones e tablets, rodando sob o novo sistema operacional Android 7.0 Nougat, lançado em agosto de 2016 e de codinome "Android N", estariam disponíveis para os desenvolvedores de software. Esta iniciativa tem uma relevante importância, pois permitiria uma melhora significativa na acurácia das coordenadas com a utilização das pseudodistâncias e até mesmo da medida de fase. Apesar de que com as antenas e a eletrônica de qualidade compatível com um baixíssimo custo, implantadas no telefone, era difícil dizer se estes dados permitiriam chegar ao mesmo nível de precisão e exatidão dos receptores GPS profissionais. Esse foi um dos desafios do presente trabalho: chegar a uma conclusão a esse respeito.

Para poder disponibilizar estas novas informações no Android N foi criada uma nova classe, a GnssMeasurement (*public final class GnssMeasurement*) que possui entre outros os seguintes métodos, que obtêm do *hardware* diferentes tipos de observações (GOOGLE LLC, 2018b):

- getAccumulatedDeltaRangeMeters(): obtém a diferença acumulada das pseudodistâncias em metros de um determinado canal, um valor positivo significa que o satélite está se afastando;
- getCarrierCycles(): obtém o número inteiros de ciclos da portadora entre o satélite e o receptor;
- getCarrierFrequencyHz(): obtém a frequência da portadora do sinal rastreado (ex. ; para L1 = 1575.45 MHz, ou L2 = 1227.60 MHz, L5 = 1176.45 MHz);

- getCarrierPhase(): obtém a fase de Rádio Frequência (RF) detectada pelo receptor, ou seja, a parte fracionária do sinal da medida completa da fase da portadora;
- getCn0DbHz(): obtém a relação de densidade portadora-ruído para o sinal, medido na entrada da antena, em dB-Hz;
- getConstellationType(): obtém o tipo de constelação;
- getPseudorangeRateMetersPerSecond(): obtém a taxa de variação das pseudodistâncias para o horário em m/s. A correção do erro dos relógios do receptor e do satélite não estão inclusas. Um valor positivo indica que o satélite está se afastando do receptor;
- getReceivedSvTimeNanos(): obtém o horário do satélite recebido pelo receptor, no instante da medição, em nanosegundos;
- getSnrInDb(): obtém a relação sinal ruído em dB (SNR);
- getSvid(): obtém a identificação do satélite;

Este anúncio ocorreu no término do presente trabalho, gerando mudanças para sua finalização. Mesmo tendo sido lançado no meio de 2016, os primeiros telefones com este OS só começaram a surgir em 2018 sendo que até presente data a grande maioria dos telefones ainda são vendidos com a versão 6.0.

Dos modelos de telefones testados com o OS 7.0 pré-instalados de fábrica ou com esta atualização disponibilizada pelo fabricante, as informações referentes aos dados brutos não puderam ser obtidas através de simples aplicativos. Então o OS Android 7.0 foi instalado, para a presente pesquisa, nos modelos mais antigos que estavam sendo utilizados nos testes de campo e não se obteve sucesso na obtenção destas informações.

Tal fato leva a crer que apesar de as bibliotecas de classes e métodos já estarem disponíveis nas novas versões do Android, caso o *driver* responsável pela comunicação entre o sensor periférico e o *Kernel* não esteja preparado para fornecer tais informações, esta funcionalidade fica inoperante. Para que tais observáveis fossem capturadas, foi proposta uma metodologia.

2.2 ARQUITETURA DO CELULAR

Existem restrições para a integração entre os receptores GPS com os telefones celulares, entre as quais podemos citar: o espaço reduzido, interferência com rádio transmissores nas adjacências (quase sempre no mesmo *chip*), osciladores de baixo custo e antenas de baixa qualidade. Estes fatores transformam o bom desempenho do posicionamento em um desafio aos projetistas do circuito integrado do GPS e do telefone.

Soma-se a estes fatores o fato de o sinal do GPS recebido pelos telefones em ambiente externo ser em torno de -135 dBm ou menos caso a antena seja muito pequena ou mal localizada, o que torna este sinal 10^{16} vezes mais fraco que os 27 dBm tipicamente transmitido pelo aparelho para as torres de telefonia celular.

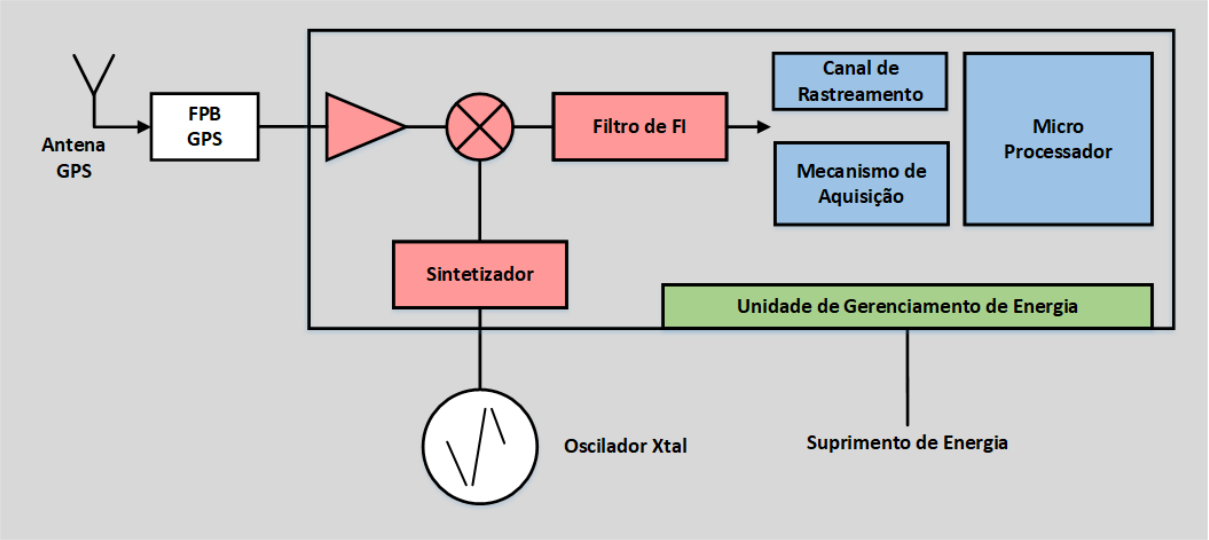
Por esta razão os receptores do GPS são frequentemente complementados e integrados com outros sensores, tais como acelerômetros, giroscópios e até mesmo pelo posicionamento da rede de antenas quando os sinais dos satélites GPS não podem ser detectados.

Usualmente confeccionados em uma pastilha de silício, os receptores GPS são projetados para que todos os circuitos, particularmente os circuitos lógicos, memórias, microprocessadores, além dos blocos analógicos tais como entrada de energia e circuitos de rádio frequência, utilizem um semicondutor de metal-óxido complementar – CMOS (*"Complementary Metal-Oxide-Semiconductor"*). Recurso que na fabricação dos Circuitos Integrados – CI oferece baixíssimo consumo de energia (o que leva à baixa dissipação de calor) e a possibilidade de alta densidade de integração, economia de espaço e boa relação sinal-ruído devido à baixa interferência dos sinais eletrônicos.

Estas pastilhas de silício, no contexto dos CIs, também são chamadas de Single Die, que é um pequeno bloco de material semicondutor, no qual um dado circuito funcional é fabricado. Tipicamente, circuitos integrados são produzidos em grandes lotes num único *"wafer"* ou bolacha (fina fatia de material semicondutor) de EGS (*Electronic-Grade Silicon*) através de processos tais como litografia. O *"wafer"* é cortado em muitos pedaços, cada um contendo uma cópia do circuito. Cada um destes pedaços é chamado de *"Die"*. O método diminui muito o custo de fabricação do CI.

O CI contido em um single Die pode ser representado por um diagrama de blocos como o da Figura 4, que apresenta o esquema completo de um receptor GPS inserido nas unidades de telefones disponíveis no mercado consumidor. Os blocos estão representados em diferentes cores de acordo com suas funcionalidades e consiste de: uma antena GPS, um filtro passa banda para GPS (FPB), um oscilador de cristal e uma fonte de energia, dispositivos externos que estão representados na cor branca.

Figura 4 – Desenho Esquemático de um Receptor GPS em um Telefone Celular.



Fonte: Adaptado de (DIGGELEN; SALAS, 2011).

Dentro do retângulo maior estão os componentes do CI do GPS que podem estar todos dentro um mesmo chip ou desmembrados em dois ou mais *chips* para interagir com outros dispositivos do celular, de acordo com suas funcionalidades, tal qual o bloco de Rádio Frequência (RF) representado em vermelho/rosa na figura, como se verá com mais detalhe no item 2.2.6. A primeira solução possui processador próprio e envia os dados de posicionamento para a CPU do celular, podendo ocupar uma área menor que 25 mm^2 da placa mãe do telefone. A segunda solução, compartilhando alguns componentes como os receptores de RF (GPS / *Bluetooth* / WiFi / FM / TV) no mesmo *"System-on-a-chip"* – SoC (Sistema-em-um-Chip), ainda menos espaço. Em azul estão as partes integrantes do bloco de banda base do GPS e em verde o bloco que recebe a energia proveniente de uma fonte externa e realiza o gerenciamento, regulando a tensão e a distribuindo para os vários componentes do CI.

2.2.1 Antena de GPS no Smartphone

As antenas de GPS nos produtos comerciais são itens extremamente baratos, sendo o modelo mais corriqueiramente utilizado o da PIFA – *"Planar Inverted-F Antenna"* (antena planar de F-invertido) trabalhando com o plano de terra da própria placa mãe do telefone. Este modelo de antena é essencialmente uma tira de material condutor; por não necessitarem um plano te terra infinito e terem um custo inexpressivo passam a ser, nas condições exigidas para o telefone móvel, o modelo ideal, mesmo sendo polarizadas linearmente, enquanto as ondas dos sinais GPS o são circularmente (U-BLOX AG, 2009). Técnicas de miniaturização de antenas têm sido estudadas na última década, considerando tamanho, custo e eficiência. O desenho da PIFA apesar de reduzir significantemente seu tamanho para ¼ do comprimento de uma onda de 1575 MHz, ainda significa aproximadamente 47 mm, o que pode não ser pequeno o suficiente para alguns modelos de telefones (WU et al., 2016).

Outro fator de importância é o posicionamento da antena no telefone. Um bom lugar é um privilégio em um dispositivo com múltiplos tipos de RF e todos competindo com a melhor posição; neste sentido, o projetista deve levar em consideração que o GPS não é o equipamento mais importante no contexto de um telefone. As condições de uso dos telefones podem atenuar ainda mais os sinais, caso a antena esteja situada em alguma parte do produto que fique encoberta quando o telefone for levado perto do ouvido ou pela mão do usuário ou ainda quando posicionado em suportes dentro de veículos.

2.2.2 Filtro Passa Banda para GPS

O filtro passa faixa ou passa banda é obrigatório para qualquer receptor GPS que possa ter proximidade com rádios de RF que trabalhem em diferentes frequências de onda, principalmente porque, como mencionado anteriormente, os sinais de GPS possuem uma ordem de magnitude muito menor que a dos outros rádios presentes nos telefones móveis (DE ESCOBAR et al., 2002).

Estes filtros devem ter baixa perda e alta bloqueio para sinais fora da banda de passagem. Assim, habitualmente é utilizada a técnica de ressonância, através de um

Filtro SAW – *"Surface Acoustic Wave"* (onda acústica superficial) para extrair somente as frequências entre 1573,92 MHz à 1576,92 MHz (HASEGWA, 2001). O filtro passa banda atenua as possíveis interferências inclusive os da própria telefonia, *Bluetooth*, WLAN e rádio FM.

2.2.3 Oscilador de Cristal (Relógio)

Do mesmo modo que os receptores GPS independentes, o circuito instalado nos telefones utiliza um oscilador de cristal para determinação do tempo. Estes osciladores possuem compensadores para a variação de temperatura e são chamados de TCXO. Este elemento, assim como a maioria dos componentes compartilhados, não foi concebido para dedicação exclusiva de um receptor GPS e, portanto, não se deve esperar que possua o mesmo desempenho em termos de estabilidade, gerando consequentemente uma maior deriva e desvio.

2.2.4 Bloco de Rádio Frequência (RF)

A seção de Rádio Frequência é constituída de um LNA – *"Low-Noise Amplifier"* (Amplificador de Baixo Ruído), um misturador e um sintetizador de frequências e um filtro de Frequência Intermediária (FI). O LNA amplifica os sinais do GPS com o mínimo ruído possível, por volta de 1 a 3 dB, que são então, convertidos no misturador em frequências intermediárias. A partir daí os sinais são filtrados no FI para serem posteriormente processados digitalmente na seção de banda base.

Com o intuito de diminuir o espaço ocupado, o bloco de RF, para ser inserido na placa mãe do telefone celular, é cuidadosamente redesenhado; apresentando normalmente uma disposição de seus componentes diferente da dos receptores dedicados.

2.2.5 Bloco de Banda Base

Este conjunto é um mecanismo de aquisição, canais de rastreamento e uma unidade de processamento dos sinais. O mecanismo de aquisição é concebido para a procura de uma gama de frequências pré-estabelecidas. A partir de sua aquisição,

o sinal é transferido para um determinado canal para ser rastreado, onde a pseudodistância, o Doppler e a medida de fase são estimadas.

A unidade de microprocessamento gerencia todas as tarefas que o hardware executa, assim como fica responsável pela comunicação e a troca de informações entre o bloco e o processador do dispositivo móvel; sendo que para os modelos compartilhados o processador do telefone executa as duas tarefas.

2.2.6 Componentes Compartilhados pelo GPS e o Smartphone

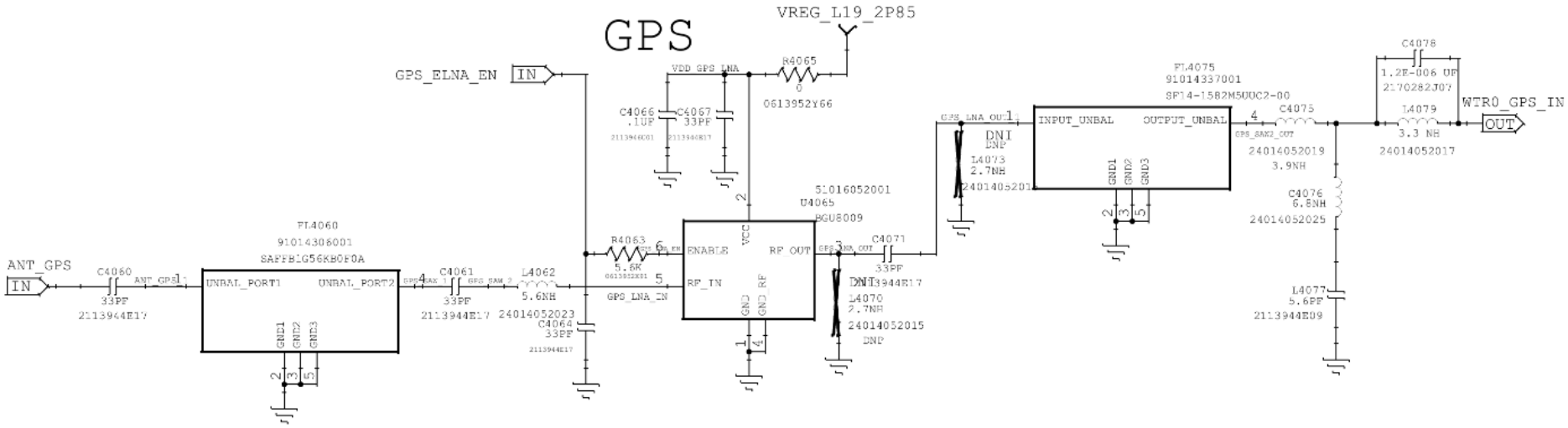
A fim de economizar no custo de fabricação e em espaço ocupado na placa mãe, a grande maioria dos smartphones compartilha alguns componentes do GPS com os de outros dispositivos e até mesmo com os do próprio telefone (SHIRAZ; WHAIDUZZAMAN; GANI, 2013), sendo que os telefones mais antigos possuíam um *chipset* de GPS dedicado.

Um exemplo desta combinação, também chamada de combo, é a seção de Rádio Frequência, responsável por receber e transmitir sinais em diferentes frequências. O RF é empregado como modo de comunicação para todas as tecnologias sem fio, tais como telefonia, WiFi, Bluetooth, GPS e transmissões de rádio e TV.

A fim de se ter uma ideia deste compartilhamento, o modelo de um telefone é apresentado na

Figura 5, que mostra o desenho esquemático da seção de GPS no modelo Motorola XT-1025. Esse esquema demonstra o caminho do sinal desde a antena até o Soc transceptor de rádio multimodal e multibanda.

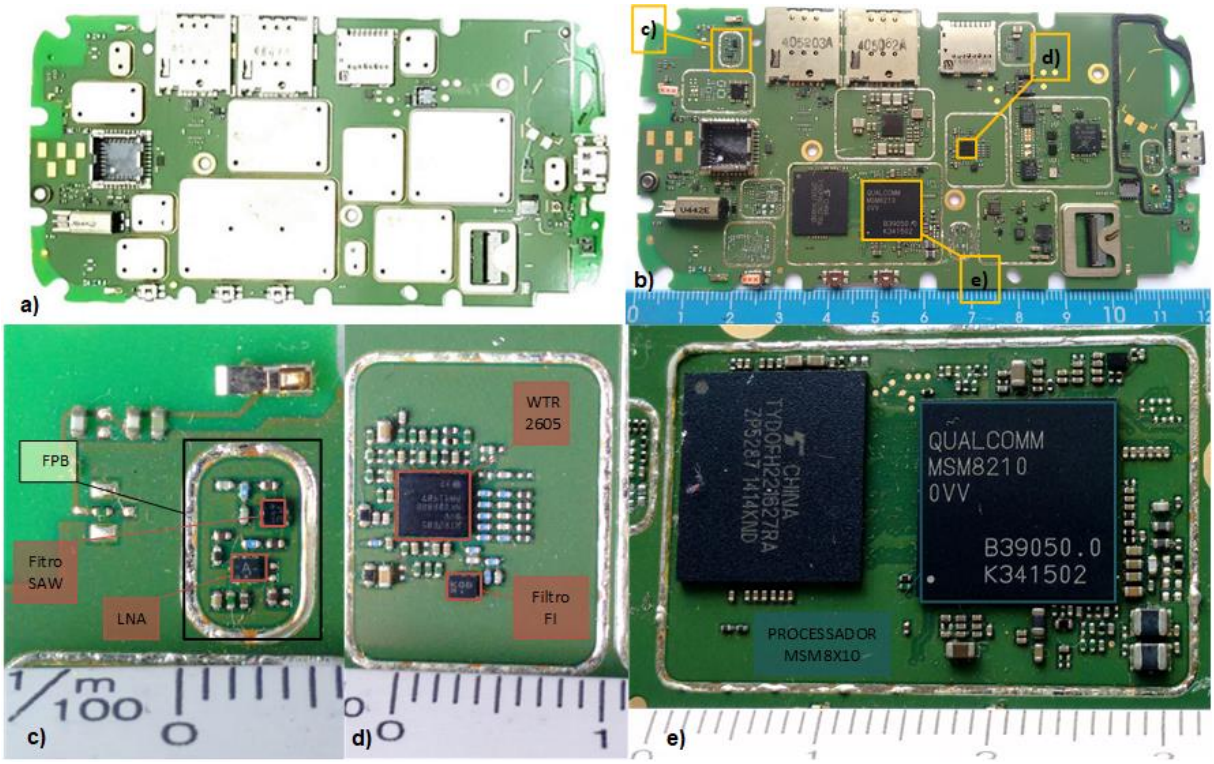
Figura 5 – Desenho esquemático da Seção de GPS do Modelo Motorola XT-1025



Fonte: MOTOROLA (2014).

Na Figura 5 pode-se ver que a partir da antena na ponta esquerda do diagrama e caminhando para a direita encontramos o FPB, o LNA, o FI e finalmente a saída para o transreceptor. Já a Figura 6 de “a”) a “e”) mostra estes componentes na placa do telefone, com detalhamento para os referidos blocos. Na parte superior esquerda, identificada como “a)” a placa ainda está com sua proteção mecânica, que é uma blindagem isolante para minimizar a interferência entre os blocos RF e outros componentes eletrônicos. Na parte superior direita “b”) a placa está sem a blindagem e com uma escala para que se possa ter uma referência de seu tamanho, ainda em “b)” pode-se ver o local dos blocos de RF do GPS com a nomenclatura dos detalhes (“c”, “d” e “e”) que estão dispostos logo abaixo.

Figura 6 – Placa Mãe do Motorola XT-1025



Fonte: Montagem a partir de fotos do autor.

Em “c)”, detalhe de "b)", podem ser vistos alguns indutores, capacitores e resistores que compõem o filtro passa faixa ou passa banda (FPB), que permite a passagem de sinais em uma determinada faixa, ou seja, ele irá atenuar sinais que estejam abaixo ou acima de determinada frequência. As delimitações são também conhecidas como frequência de corte inferior e frequência de corte superior; então, tem se uma frequência de passagem. No mesmo bloco ainda está inserido um Filtro

SAW (MURATA MANUFACTURING CO., 2017) e o LNA (NXP, 2017). Até então estes componentes são exclusivos para o GPS e estão sob a mesma blindagem.

Em “d)” está detalhado o bloco de RF, onde os sinais passam primeiramente por um filtro de Frequência Intermediária, também do tipo SAW (KYOCERA CORPORATION, 2014), e seguem para o SoC WTR2605 da Qualcon, onde começa o compartilhamento dos componentes. O WTR2605 é um transceptor de rádio multimodal e multibanda, responsável pela transmissão e recepção de sinais, em que a maioria dos circuitos internos do SoC são comum para GSM com capacidade para operar dois *chips* (dois números de telefone) simultaneamente, EDGE/HSPA+/CDMA EVDO Rev. B/TD-SCDMA, GPS/GLONASS.

Por último o sinal é enviado para o MSM8X10, que é uma CPU de dois núcleos baseado na arquitetura ARM Córtex-A7 para dispositivos móveis que realiza a integração da CPU, da unidade de processamento visual e do A-GPS a partir de uma tecnologia chamada de gpsOne. Essa tecnologia é constituída de circuitos para GPS embutidos no MSM8X10, local em que são realizados todos os cálculos e decisões do posicionamento, a partir dos dados oriundos dos outros sensores, do WTR2605, do modem para as redes GSM e CDMA, dos circuitos para câmera digital, do Wi-Fi, do *Bluetooth*, dos núcleos de processamento de áudio e vídeo e seus *codecs* (QUALCOMM, 2011 e QUALCOMM TECHNOLOGIES, 2014).

2.3 A-GPS – GPS ASSISTIDO

De acordo com van Diggelen (2009), a técnica de GPS Assistido ou A-GPS – *Assisted GPS*, tem por objetivo a melhora do desempenho dos receptores GPS comuns, pelo fornecimento das mesmas informações que a princípio seriam transmitidas pelos satélites, e que passam a ser transmitidas por um canal alternativo de comunicação. As Figuras e 7 e 8 mostram uma visão geral do sistema A-GPS, onde pode-se perceber que o receptor, apesar de receber determinadas informações de forma alternativa, não fica isento de continuar recebendo e de processar os sinais dos satélites; o método apenas facilita tal procedimento e minimiza o tempo e a quantidade de informações fundamentais advindas dos satélites. O receptor ainda deverá executar as medições necessárias a partir do código, porém de uma maneira mais rápida e passa a ser capaz de fazê-lo mesmo com sinais mais fracos.

O sistema GPS foi desenvolvido para originalmente despender um tempo de aproximadamente 1 minuto em céu aberto para inicializar e a partir daí operar continuamente. Com as necessidades atuais do sistema, de operar em condições adversas tais como em cânions urbanos ou até mesmo em ambientes internos, surgiu uma variedade de aplicações e métodos para prover ainda que apenas uma única solução, porém que seja quase instantânea; mas para ser aplicada em usos corriqueiros e compartilhados, onde a posição passa a ser apenas uma parte do processo como um todo, a técnica deve ter o menor custo e consumo de bateria possível, além de ocupar pouco espaço físico. Tais requisitos levaram ao desenvolvimento do A-GPS.

Quando um receptor é ligado, uma sequência de operações precisa ser executada antes que as informações provenientes do sinal possam ser utilizadas para a obtenção de uma solução de navegação. De acordo com Grewal, Weill e Andrews (2007) a ordem de execução desses procedimentos são:

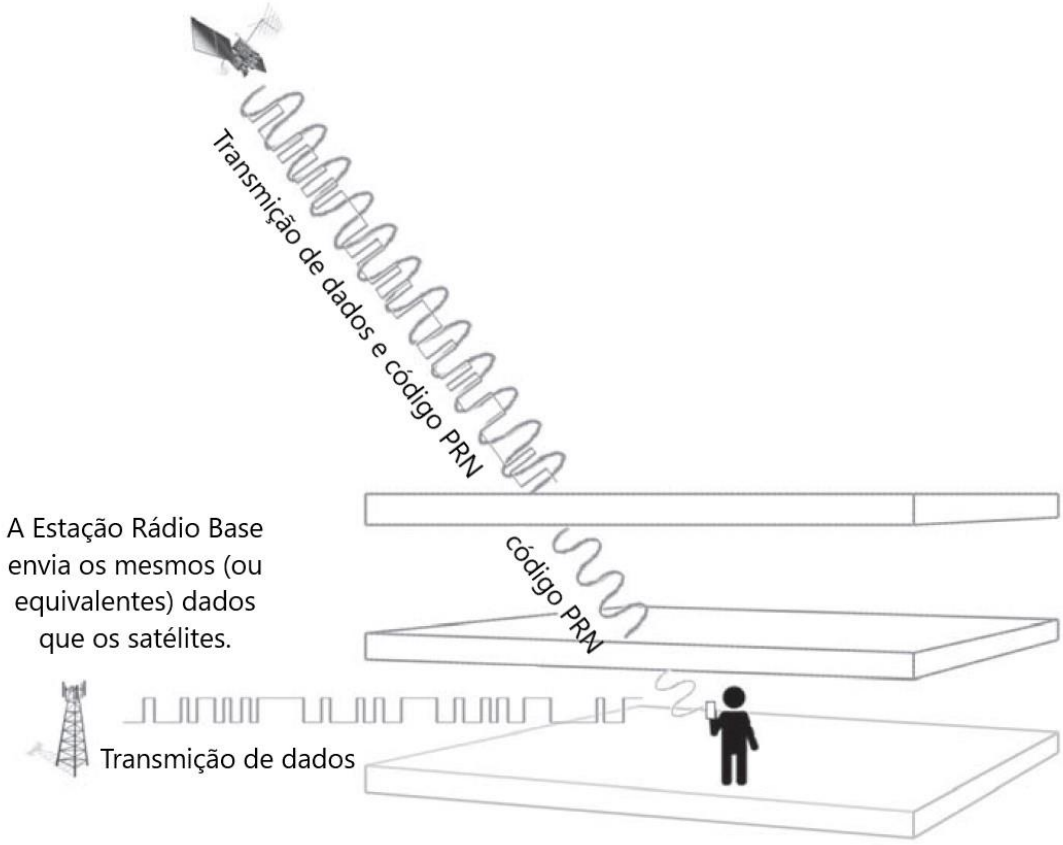
a) Determinar quais satélites são visíveis para a antena do receptor;
b) Determinar aproximadamente o Doppler de cada satélite visível;
c) Procurar o sinal em ambos, tanto na frequência como no código (C/A) da fase;
d) Detectar a presença do sinal e confirmar a detecção;
e) Travar no sinal e rastrear o código C/A;
f) Travar no sinal e rastrear a portadora;
g) Realizar a sincronização dos bits dos dados;
h) Demodular os 50-bps (bits por segundo) dos dados de navegação.

Assim, para o cálculo do primeiro posicionamento o receptor GPS precisa realizar inicialmente uma busca e sintonia do sinal de cada um dos satélites para a aquisição e então a decodificação dos dados transmitidos. Cada satélite é captado em uma diferente sintonia / canal, devido ao efeito Doppler, introduzido pela alta velocidade que os satélites desenvolvem em suas orbitas, por volta de 3 km/s. Em função da localização do observador há um diferente efeito Doppler para cada satélite, sendo assim, antes de conhecer sua posição, o GPS não consegue calcular o efeito Doppler e assim realiza uma exaustiva procura dentro de uma possível faixa de

frequência até encontrar o primeiro satélite, para então decodificar a mensagem e obter as informações e coordenadas do satélite.

Cada satélite envia um código acrescentado de um ruído pseudoaleatório assim como um fluxo de dados, na Figura 7 a transmissão do código PRN está ilustrado pelas ondas senoidais e a dos dados pelas ondas quadradas. Passando por obstruções o sinal fica mais fraco, os dados podem ficar imperceptíveis, mas o código ainda pode ser detectável. Com o sistema de A-GPS, as mesmas informações, ou equivalentes são disponibilizadas pelas Estações Rádio Base, e assim o receptor assistido recebe estes dados de forma clara, como se o sinal não estivesse sendo bloqueado, além disso, as torres podem enviar os dados muito mais rapidamente que os satélites (VAN DIGGELEN, 2009).

Figura 7 – Transição de dados e código pelo sistema A-GPS.



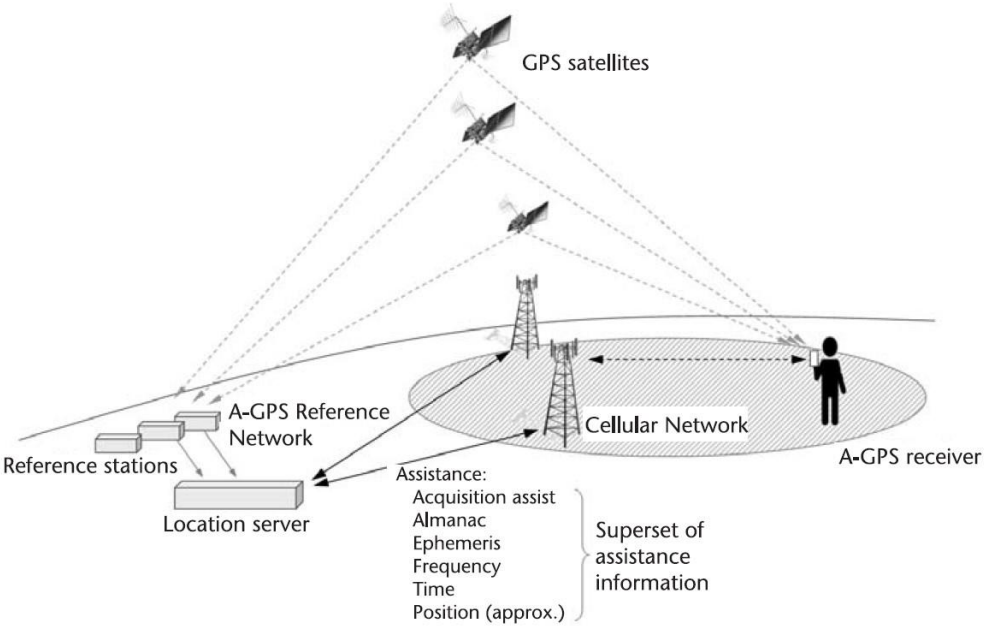
Fonte: Adaptado de van Diggelen (2009).

O A-GPS trabalha fornecendo informações de quais frequências podem estar acessíveis para o receptor, mesmo antes do início da busca, além de enviar as

coordenadas dos satélites para o cálculo do posicionamento. Tendo adquirido os sinais dos satélites, o receptor assistido precisa apenas obter as medidas de distância para solucionar o posicionamento, diminuindo o tempo total para fixar a primeira posição: de cerca 1 minuto passa a poucos segundos.

Uma visão geral do funcionamento do sistema empregado no A-GPS, pode ser visto na Figura 8. Os dados enviados pelos satélites, tais como almanaque de efemérides, tempo e coordenadas aproximadas do usuário, são coletados pela rede de referência e transferidos para o servidor local, este, por sua vez pode enviar esses dados para o receptor móvel através de Wi-Fi, ou mais comumente, por um canal na transmissão de telefonia celular. A posição aproximada do receptor do usuário é fornecida pelas informações oriundas do banco de dados das torres de transmissão e que serão utilizadas como valor inicial para o cálculo da solução.

Figura 8 – Representação do sistema A-GPS.



Fonte: Adaptado de van Diggelen (2009).

As efemérides transmitidas são válidas por até quatro horas e demoram por volta de 30 segundos para serem adquiridas e decodificadas pelos receptores convencionais; sendo fornecidas por uma fonte externa, o A-GPS prioriza a correlação do código e em conjunto com uma coordenada inicial aproximada pode acelerar o cálculo do posicionamento, resultando em um TTFF – *"Time To First Fix"* muito menor.

O conhecimento prévio da posição inicial em conjunto com o almanaque permite saber quais satélites podem estar visíveis em um determinado horário, o que ajuda na escolha da busca da frequência de um determinado satélite, contribuindo ainda mais na redução do TTFF (KARUNANAYAKE, 2004).

Além disso, pelo fato de o GPS assistido ter sido desenvolvido para saber com antecedência quais as frequências exatas o receptor deve procurar, (frequência fundamental mais ou menos o efeito Doppler), a sua arquitetura é modificada para permitir um tempo maior para o recebimento da mensagem, aumentando assim, a quantidade de energia recebida, contida em cada frequência em particular; desta forma é possível aumentar a sensibilidade do receptor A-GPS, o que permite a aquisição de sinais muito mais fracos. Este é o princípio de funcionamento do *"High Sensitivity GPS"* ou GPS de Alta Sensitividade, como será visto em tópico próprio.

2.4 ESTAÇÃO RADIO BASE (ERB)

Assim como comentado anteriormente, uma das maneiras de posicionamento utilizada pelo *"Location Based Service"* – LBS ou Serviço Baseado na Localização do Sistema Operacional é provida pela rede de telefonia celular ou localização pela Estação Rádio Base (ERB). Apesar de menos acurada pode ser utilizada na falta de outros métodos que forneçam o posicionamento com melhor precisão.

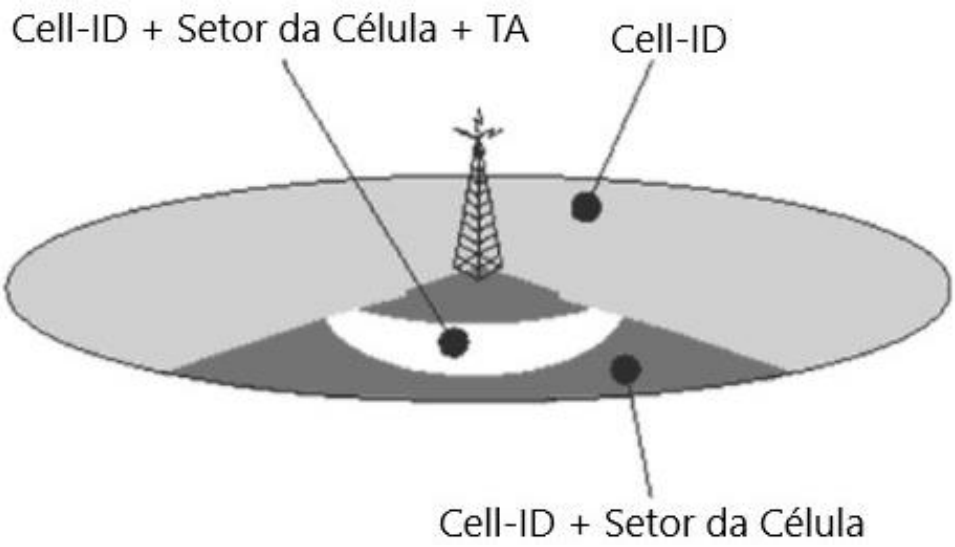
Para possibilitar o posicionamento de um aparelho celular em uma rede de telefonia móvel é preciso que a operadora adicione alguns elementos à arquitetura da rede, sem os quais não seria possível a determinação, a conversão de sistemas, a identificação do alvo (IMEI, IMSI, IP), para estimar a precisão das informações, determinar o melhor método de localização e proteger a privacidade das informações (CORDEIRO, 2009). As duas técnicas mais simples e mais utilizadas para o GSM são o Método do Cell-ID e o Método do *"Timing Advanced"* (TA).

O método do Cell-ID é um dos mais simples e, portanto, um dos primeiros a ser utilizado, onde a localização do aparelho celular é obtida a partir da identificação da ERB. Toda Estação Rádio Base transmite para os telefones a identificação do setor e a identificação da célula, assim os telefones sabem qual a sua célula e podem assumir as coordenadas da ERB (TREVISANI; VITALETTI, 2004). Através da identificação do

setor utilizado é possível restringir a área de procura, uma vez que cada setor geralmente dividido em três antenas, o que abrange 120º a partir da torre. Dependendo de fatores como local, obstáculos, relevo, quantidade de torres próximas, dentre outros, este método obtêm uma precisão que varia entre 50 m e 30 km (em áreas urbanas e rurais respectivamente).

Método do *"Timing Advance"* (TA) ou Avanço de tempo é a latência da transmissão entre o telefone e a ERB. É utilizada para melhorar a precisão do método anterior. A graduação do tempo segue uma escala de 550 m. Na Figura 9, pode-se perceber o aprimoramento do posicionamento pelos métodos anteriormente citados. Outros métodos de posicionamento por ERB podem ser vistos em KARIMI (2013).

Figura 9 – Posicionamento pela Estação Rádio Base



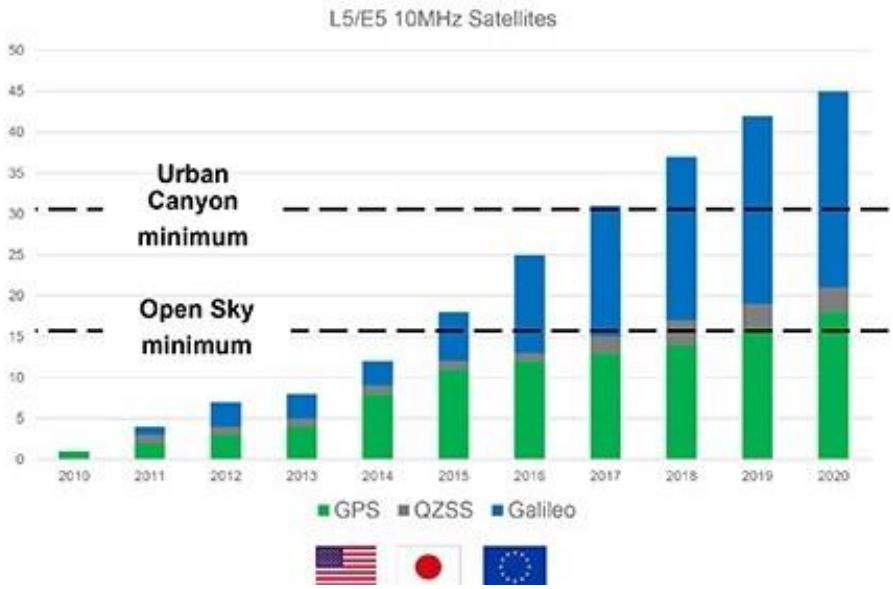
Fonte: Adaptado de (KARIMI, 2013).

2.5 A EVOLUÇÃO DOS *CHIPSET*S NOS CELULARES

No final de setembro de 2017, um grande fabricante de processadores para a telefonia celular, a Broadcom, anunciou o desenvolvimento e o lançamento para 2018 de um *chipset* de dupla frequência. O receptor GNSS utilizará as frequências L1/L5 e E1/E5 do GPS e GALILEO respectivamente. O anuncio foi feito durante o 30º Encontro Técnico Internacional da Divisão de Satélites do Instituto de Navegação, o ION GNSS+ 2017 (The 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation) ocorrido de 25 a 29 de setembro de 2017 em Portland, Oregon nos Estados Unidos da América.

Com a modernização do GPS, os novos satélites passaram a transmitir o sinal L5, em conjunto com o aumento da disponibilidade do sistema GALILEO que transmite entre outros o sinal E5, com a mesma natureza do L5, aumentaram a quantidade de satélites nesta faixa de frequência, sendo até este momento aproximadamente 30 satélites em órbita com estas características (MOORE, 2017). A Figura 10 mostra a evolução da disponibilidade do sinal L5/E5 dos sistemas de diferentes nacionalidades, desde o primeiro lançamento até a previsão para 2020; onde pode-se perceber que desde 2015 a quantidade de satélites, deixa o sistema funcional para a obtenção de posicionamento em céu aberto e que para em ambientes urbanos com o mínimo ideal de 30 satélites, também passa a estar disponível a partir de 2017.

Figura 10 – Evolução do lançamento de satélites com L5/E5

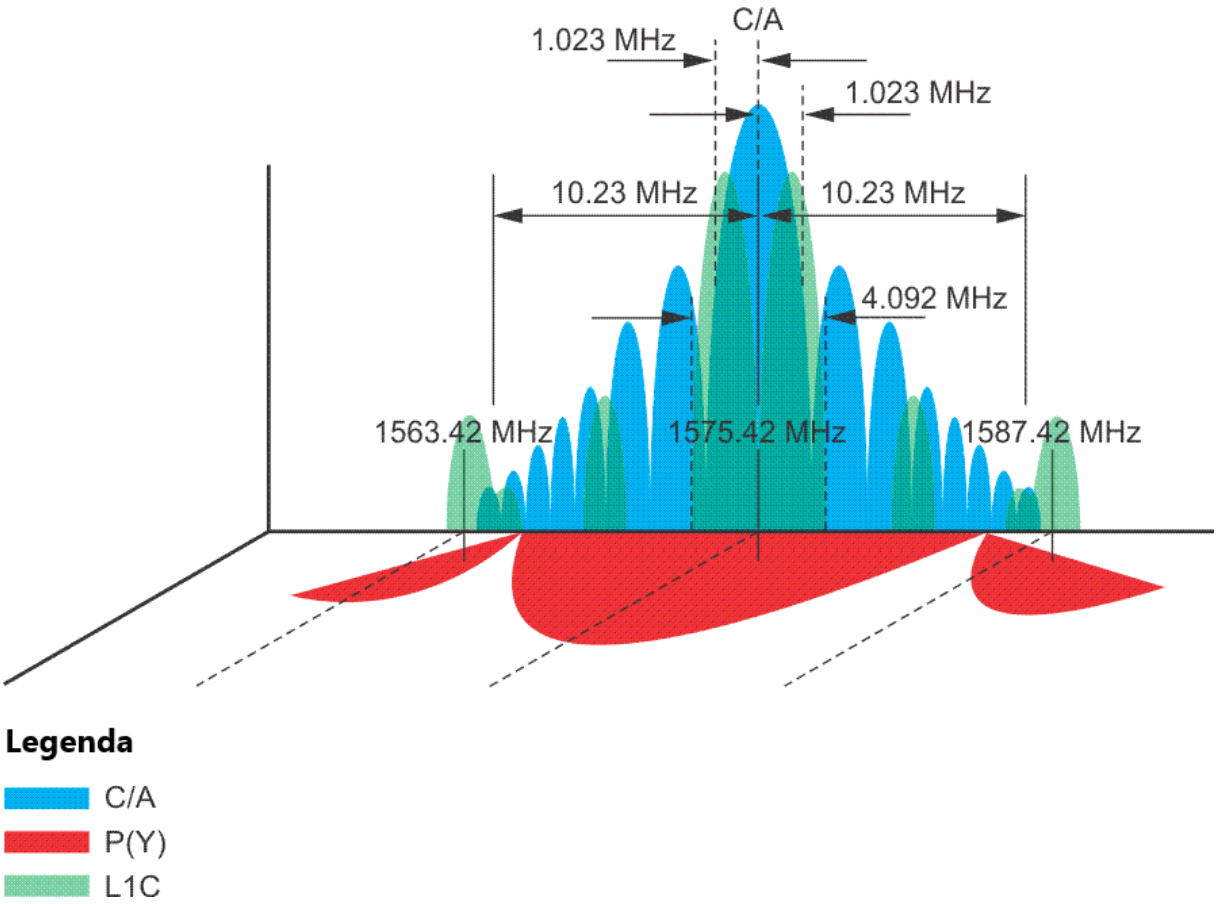


Fonte: MOORE (2017)

De acordo com os fabricantes, o posicionamento obtido através dos sinais L5 é menos afetado pelo multicaminhamento que os obtidos pelo código C/A da L1. As portadoras L1, L2 e L5 são moduladas de várias maneiras para transportar os códigos binários. A codificação não é pela alteração da amplitude ou da frequência e sim pela modulação em fase das ondas portadoras. Uma das vantagens deste método de modulação sobre os demais, é que o sinal pode ocupar uma largura de banda mais ampla, então se diz que há um espalhamento espectral porque este é intencionalmente ampliado na faixa de frequência ocupada pelo sinal, em outras palavras, a largura de banda ocupada pelo sinal GPS é mais larga que a largura de

banda da informação que está transportando. A Figura 11 mostra o espalhamento espectral e a faixa de banda ocupado pelo código C/A, na portadora L1. Percebe-se que a onda está centralizada na frequência de 1575,42 MHz e o código C/A ocupa uma faixa de frequência de 2,046 MHz, o código P(Y) tem uma largura de banda de 20,46 MHz e o L1C por 4,092 MHz (SICKLE, 2015).

Figura 11 – Espalhamento espectral e modulação do código na portadora L1



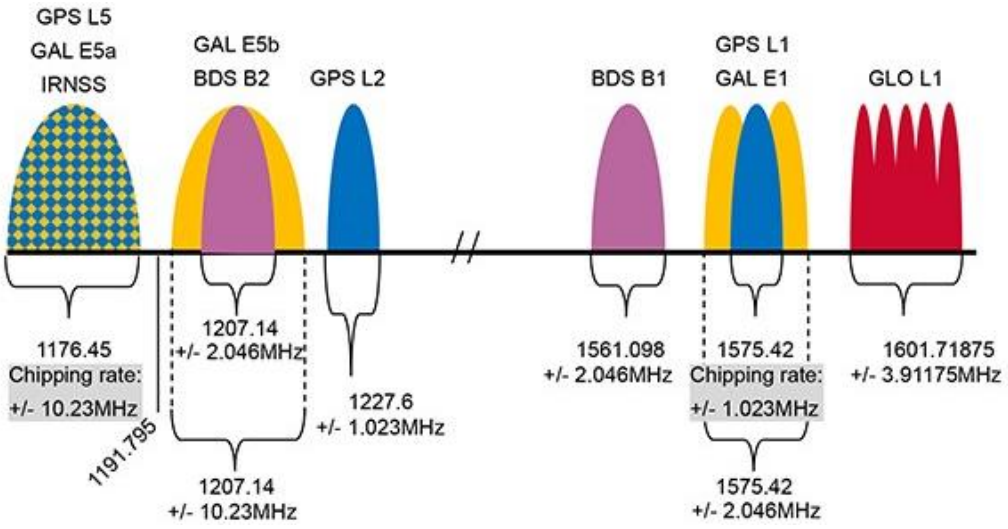
Fonte: Adaptado de Sickle (2015).

De qualquer modo, a técnica de modulação de espalhamento espectral mais utilizada é conhecida como *"binary phase shift keying"* – BPSK (deslocamento de fase binária) e é a técnica utilizada pelo GPS para modular as mensagens de navegação e os códigos P(Y) e C/A. A modulação bifásica binária é a mudança de 1 para 1 e de 1 para 0 realizadas através da mudança na fase de 180º na onda portadora. Dessa forma, no momento em que o código deve ser trocado de 0 para 1, ou vice versa, a troca é efetuada pela reversão (alteração de 180º) instantânea da fase da onda

portadora. Cada um destes 0 e 1 do código binário são conhecidos como *code chip*. O 0 representa o estado normal e o 1 representa o estado de imagem espelhada.

O código é uma sequência única de 1023 *bits*, neste contesto, chamadas de *chips* (MISRA; ENGE, 2006). As taxas de frequências de todos os componentes dos sinais de GPS são múltiplos de 10,23 MHz que é a taxa padrão dos osciladores, também conhecida como frequência fundamental (f_o); assim a portadora L1 é 154 vezes a f_o ou 1575,42 MHz, a L5, 115 vezes a f_o ou 1176,45 MHz. Os *chips* são baseados nesta frequência fundamental e assim o código C/A possui uma taxa de 1,023 x 10^6 chips por segundo com um comprimento por chip de aproximadamente 300,00 m que se repete a cada um décimo da f_o, ou a cada 1 ms (milissegundo) (LEICK; RAPOPORT; TATARNIKOV, 2015); em L5 o código possui a mesma taxa da frequência fundamental, 10,23 x 10^6 chips por segundo com um comprimento por chip de aproximadamente 30,00 m (SICKLE, 2015). A Figura 12 mostra as taxas de transmissão para diferentes códigos em diferentes portadoras.

Figura 12 – Taxa de modulação do código bifásico binário pseudorandomico em L1/E1/B1 e L5/E5/B5

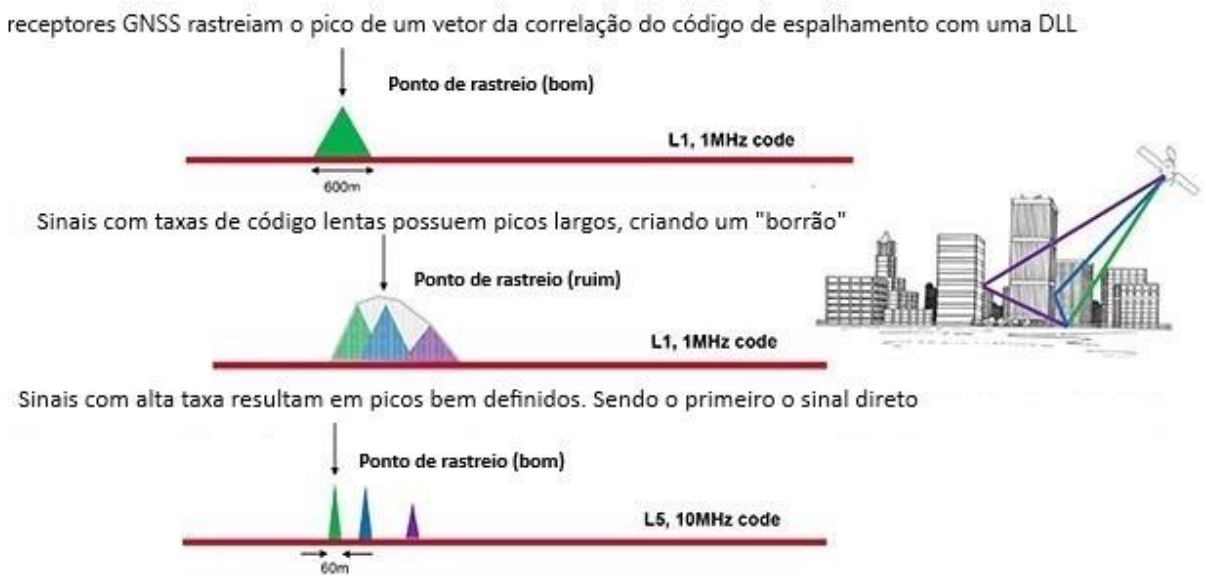


Fonte: Broadcom apud Cozzens (2017).

Com a utilização da portadora L5 é esperada uma redução no efeito do multicaminhamento causado pelos cânions urbanos. O sinal direto e o refletido chegam ao receptor em momentos distintos, e caso se sobreponham, somam se causando uma espécie de borrão no espalhamento, como pode ser visto na Figura 13. O receptor busca por um pico nos sinais pelo *"delay lock loop"* (DLL), mesmo que

sobrepostos para determinar o instante de recebimento do sinal, porém quanto mais sobrepostos estejam os códigos, mais imprecisa fica a determinação deste instante e menos acurada será, então, o cálculo do posicionamento.

Figura 13 – Efeito do multicaminhamento em L1 e L5



Fonte: Adaptado de Broadcon apud Moore (2017)

Contudo, como os códigos na portadora L5 são dez vezes menores em termos de tempo (0,0001 s) que a portadora L1 (0,001 s), repetem se a uma taxa de 10 MHz e 1 MHz respectivamente; assim com 2,046 MHz o código C/A percorre aproximadamente 600,00 m e com 20,46 MHz o código civil em L5 percorre aproximadamente 60,00 m, desta maneira fica bem menos provável que haja sobreposição entre o sinal direto e o refletido, como pode ser visto ainda na Figura 13. Assim o *chipset* do receptor pode simplesmente ignorar qualquer sinal recebido após o primeiro, que será o sinal direto.

O novo *chipset* que será lançado irá realizar um primeiro posicionamento utilizando apenas a L1 e então aprimorar o cálculo com a L5, além de empregar as informações da fase da portadora para refinar a acurácia.

Ainda segundo o fabricante apud Moore (2017), apesar de já existirem no mercado outros receptores que utilizam a L5, estes são de uso profissional, sendo então a primeira vez que será produzido em massa um *chip* que utilize das duas frequências L1 e L5. A expectativa é de uma exatidão de até 30 centímetros.

3 CONCEITOS SOBRE O GPS

O Global Positioning System – GPS (Sistema Global de Posicionamento) é parte do sistema de navegação por satélites, desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos no âmbito do programa NAVSTAR. O sistema provê para os usuários serviços de posicionamento, navegação e contagem de tempo e é composto por três segmentos: o espacial, o de controle e o do usuário, sendo os dois primeiros operados, mantidos e aprimorados pela Força Aérea Norte Americana.

Para ser considerado totalmente operacional o sistema precisa de 24 ou mais satélites ativos distribuídos em seis orbitas e separadas em 55º, cada orbita dispõe de quatro ou mais satélites equidistantes em 60º aproximadamente uns dos outros, são orbitas médias, aproximadamente circulares com raio de 26.560 km com período de 11,967 horas siderais. O sistema em 25 de agosto de 2017 contava com 31 satélites, tendo sido modernizado três vezes desde que foi declarado operacional com o lançamento dos blocos IIR com 12 satélites colocados em órbita de 1997 a 2005, IIR-M com 7 satélites de 2005 a 2009 e IIF com 12 satélites de 2010 a 2016, a futura modernização ficam por conta do bloco III, que está em produção e tinha previsão para o começo de 2018 (EUA, 2017), entretanto até a finalização deste trabalho, ainda não haviam sido lançados.

Não é o objetivo deste capítulo discorrer sobre todo o Sistema de Posicionamento Global, o que já foi exaustivamente documentado em diversos livros e trabalhos, aqui serão abordados apenas os conceitos que servem de base à investigação do trabalho proposto. Uma abordagem detalhada sobre o assunto pode ser obtida em (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008); Leick, Rapoport, Tatarnikov, (2015), Parkinson (1996) e Seeber, (2003).

3.1 OBSERVÁVEIS GPS E O CÁLCULO DO POSICIONAMENTO

Em termos de posicionamento, a pseudodistância e fase da onda portadora são as observáveis GPS mais importantes. As soluções podem empregar somente observações de código, somente observações de fase ou ambas.

A pseudodistância do código é obtida através do produto da velocidade da luz no vácuo e a medida de tempo obtida pela correlação dos códigos pseudoaleatórios,

recebidos dos satélites e gerados no receptor. É chamada de pseudodistância em vez de distância, por estar eivada de uma série de erros inerentes ao processo, tais como o não sincronismo dos relógios (satélite – receptor), erros de órbita, refração troposférica e ionosférica e multicaminhamento entre outros.

Outra maneira de se obter a pseudodistância é através da medida da fase da onda portadora. Quando o receptor entra em sintonia com um satélite, uma parte fracionária resultante da diferença de fase entre o sinal que chega do satélite e aquele que é gerado no receptor é medida, sempre menor que um ciclo inteiro; a partir daí o receptor passa a contar o número de ciclos inteiros. Para uma determinada época é somado o número de ciclos inteiros com a parte fracionada. Porém o número de ciclos inteiros no momento da primeira medida é desconhecido e precisa ser solucionado, o que requer pelo menos dois receptores rastreando os satélites visíveis da constelação; sendo o método Lambda, desenvolvido na Universidade de Delft, o método mais difundido para solucionar o vetor das ambiguidades.

Com base nas pseudodistâncias passa-se ao processo da solução do posicionamento absoluto ou relativo. A solução é obtida através do cálculo das coordenadas dos satélites, linearização das equações das pseudodistâncias e ajustamento das observações.

Os modelos matemáticos envolvidos nos processos acima estão descritos na literatura sugerida e amplamente discutidos em dissertações, teses e artigos já publicados.

3.2 DGPS

A determinação pelo método absoluto é, em geral, muito menos acurada que a obtida pelo método relativo entre duas estações. A melhora se dá pelo princípio básico de existir uma alta correlação entre os erros provocados pela ionosfera, troposfera e órbita dos satélites entre as duas estações, desde que estejam em uma determinada área de abrangência (SEEBER, 2003).

A princípio o *Differential GPS* (DGPS) foi desenvolvido objetivando a redução dos efeitos da disponibilidade seletiva imposta ao GPS no modo absoluto (MONICO,

2007). Apesar de vermos o termo DGPS sendo utilizado em vários métodos de posicionamento relativo, historicamente refere-se às correções realizadas no Posicionamento pelo Código da Portadora, também chamado de Posicionamento por Ponto Simples (PPS) e em tempo real.

Algumas técnicas de correção do posicionamento, baseadas no código foram propostas para melhorar o desempenho dos receptores GPS autônomos. Estas técnicas variam na sofisticação e complexidade, desde uma simples estação de referência que calcula os erros na sua posição, para que possam ser utilizados por receptores GPS vizinhos até redes montadas ao redor do globo, que podem fornecer dados para a estimação dos erros através de detalhados e sofisticados modelos.

Kaplan e Hegarty (1997) dividem o DGPS em dois métodos, ou dois domínios: Domínio das Posições e Domínio das Distâncias. Ambos os métodos foram concebidos para fornecer correções diferenciais em tempo real, ou quase real. Estas correções são calculadas na estação de referência e transmitidas aos usuários na forma de mensagens formatadas. A formatação mais aceita mundialmente foi padronizada pelo comitê especial de número 104 estabelecido pela *"Radio Technical Commission for Maritime Services"* (RTCM, 2001).

Cada domínio possui algoritmos próprios e fornece diferentes mensagens de correção, que apesar de terem sidos idealizadas para melhorarem a precisão e a acurácia da estação móvel em tempo real, podem ser aplicadas através de um pós processamento, de maneira análoga e com os mesmos resultados.

3.2.1 O conceito do DGPS

Caso seja necessária a determinação de uma posição em tempo real, utilizando-se somente um receptor GPS, a única maneira de fazer isso é através das pseudodistâncias obtidas pelo código, ocorrendo alguns erros inerentes ao processo, provenientes dos relógios, dos parâmetros das efemérides dos satélites, da propagação atmosférica, do multicaminhamento e dos ruídos do sinal e do receptor. O efeito combinado destas fontes de erros na medida das pseudodistâncias é denominado *"User Range Error"* – URE (Extensão do Erro do Usuário) e pode ser minimizado através do DGPS. O URE pode ser definido como a Raiz Quadrada da

Soma dos Quadrados dos erros (RSQ) das diversas fontes e é em síntese o erro teórico esperado para o posicionamento autônomo.

Também denominado como *"User Equivalent Range Error"* – UERE (Extensão Equivalente do Erro do Usuário) o URE pode ser dividido no *"Signal-in-Space"* – SIS URE (URE no Sinal no Espaço) ou SISRE e *"User Equipment Error"* – UEE (Erro no equipamento do Usuário). A razão por trás desta divisão é que o Sistema de Controle Operacional é responsável apenas pelo desempenho do SIS enquanto que o UEE depende particularmente do equipamento, dos algoritmos e modelos matemáticos utilizados pelo usuário.

O SIS URE, inclui apenas os erros dos relógios e de predição das efemérides e alguns erros menores de ruído residuais, a documentação oficial a respeito do *"Standard Positioning Service"* – SPS (Serviço de Posicionamento Padrão), é emitida pelo Departamento de Defesa Norte Americano (EUA, 2008) e declara que para condições normais de operação, em 95 % dos casos da média global, a acurácia do SIS URE para o PPS em 95% dos casos será de 6,0 à 12,8 m, dependendo da idade dos dados utilizados (cada satélite da constelação é atualizado pelo menos uma vez ao dia pelo segmento de controle); isto, considerando-se o sistema saudável, negligenciando-se o erro dos modelos de atraso ionosféricos na simples frequência e incluindo-se a correção dos erros de atraso em grupo e a influência da interrelação dos códigos (P(Y) para C/A) na L1. Baseado na média diária de amostras medidas durante 1 ano, com 3 falhas de 6 horas no serviço, a acurácia passa a ser de ≤ 30,00 m para 99,94% dos casos. Podendo chegar a ≤ 388,00 m em 95% dos casos, em casos de os satélites estarem trabalhando em operações estendidas, após 14 dias sem atualização do segmento de controle.

Considerando-se um funcionamento usual e baseando-se nos erros dos diferentes segmentos do sistema (segmento de controle, espacial e usuário) uma previsão do erro total do sistema pode ser obtida através da RSQ dos erros de cada fonte, assumindo-se uma distribuição Gausiana. A utilização do RSQ nos componentes do UERE é justificada pela assunção de que os erros podem ser tratados como variáveis randômicas independentes. A Tabela 1 mostra uma estimativa típica do UERE para o GPS no PPS, sendo a fonte de erro predominante o

atraso Ionosférico residual, mesmo após a aplicação da correção ionosférica transmitida (KAPLAN; HEGARTY, 1997).

Tabela 1 – Estimativa de UERE característico do GPS para o PPS

Segmento Fonte	Fonte do Erro	Erro (m)
Controle/Espacial	Horário transmitido	1,1
	Atraso de grupo - L1 P(Y)-L1 C/A	0,3
	Efemérides transmitidas	0,8
Usuário	Atraso Ionosférico	7,0
	Atraso Troposférico	0,2
	Ruído e resolução do receptor	0,1
	Multicaminhamento	0,2
UERE do sistema	Total (RSQ)	7,1

Fonte: Adaptado de Kaplan; Hegarty (2006).

Para o UERE o erro pode ser determinado na distância entre o satélite e a antena do receptor, na pseudodistância; contudo os erros posicionais são uma função dos erros na pseudodistância e da geometria dos satélites (DOP) utilizados na solução do posicionamento (KAPLAN; HEGARTY, 1997). Isto posto, Seeber, (2003) apresenta a acuraria posicional relacionada à condições normais de operação do sistema como:

≤ 13,00 m horizontal e
≤ 22,00 m vertical.

E em condições ruins:

≤ 36,00 m horizontal e
≤ 77,00 m vertical.

Desta maneira, para que se possa melhorar na exatidão do posicionamento é necessário que se reduza os erros inerentes ao sistema; o que requer que se mude do modo autônomo com um único receptor para o posicionamento diferencial, ou o DGPS.

A técnica de DGPS foi desenvolvida almejando a remoção ou pelo menos a diminuição dos erros do posicionamento autônomo, através da premissa de que há

uma correlação dos erros entre dois receptores GPS separados por uma distância razoável e pode ser dividida em dois métodos ou dois domínios: domínio na posição também nominado como abordagem no domínio da solução e domínio na distância ou abordagem no domínio das medidas ou ainda correção das extensões.

3.2.2 Domínio da posição

Kaplan e Hegarty (1997) denominam como Correção no Domínio das Posições, a técnica que posiciona um receptor GPS como referência em um local com coordenadas bem conhecidas, calcula o vetor das diferenças entre as coordenadas (latitude, longitude e altitude geodésica) já conhecidas e as estimadas através do rastreio do GPS conforme a equação (1) e então transmite o vetor formado por estas diferenças de latitude, longitude e altitude para usuários nas proximidades.

$$\overrightarrow{\delta x} = \vec{x}_{ERconhecidas} - \vec{x}_{ER} \tag{1}$$

$\overrightarrow{\delta x}$: vetor de correção (diferenças de latitude, longitude e altitude);

$\vec{x}_{ERconhecidas}$: coordenadas conhecidas da Estação de Referência;

$\vec{x}_{ER}$: coordenadas estimadas da Estação de Referência.

Após receber as correções emitidas pela Estação de Referência, o receptor móvel promove a mitigação dos erros em sua solução autônoma pela equação (2), e então obtêm um posicionamento melhorado.

$$\vec{x}_{DGPS(P)} = \vec{x} - \overrightarrow{\delta x} \tag{2}$$

onde,

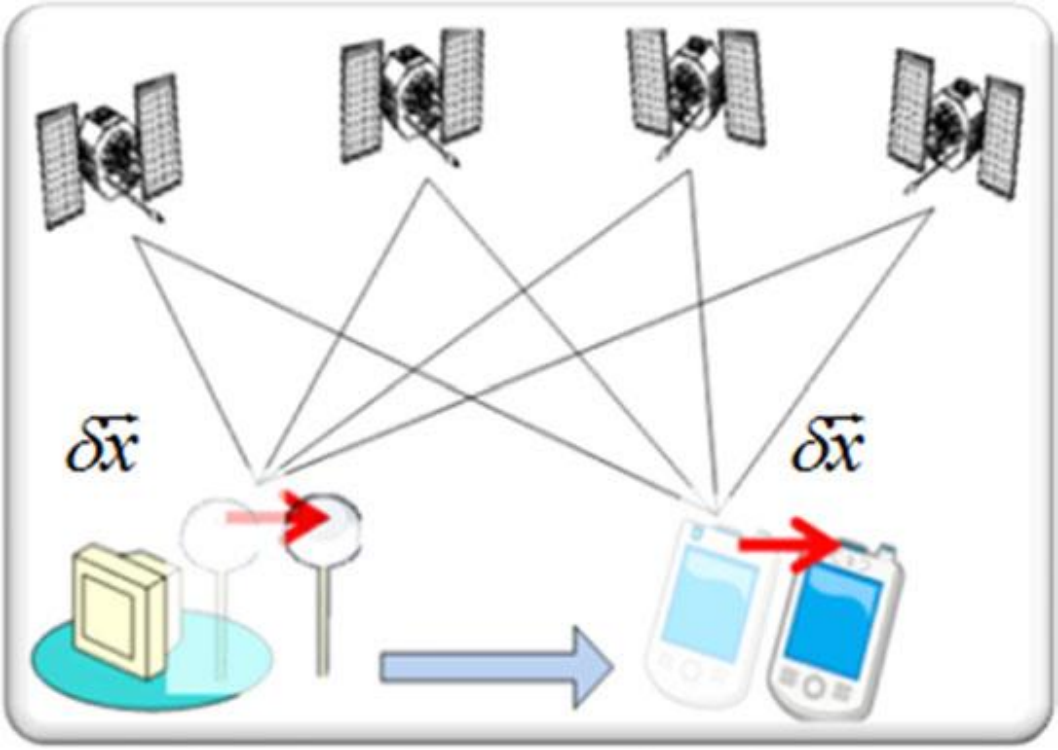
$\vec{x}_{DGPS(P)}$: coordenadas corrigidas do receptor móvel;

$\vec{x}$: coordenadas estimadas do receptor móvel;

Para a maioria das situações, a diferença de coordenadas representa os erros mais comuns na solução do posicionamento de um determinado momento, entre a estação de referência e o receptor móvel. O receptor móvel pode então, utilizar estes

diferenciais para corrigir sua posição. Na Figura 14 as coordenadas calculadas de forma autônoma na estação de referência são representadas pela antena que aparece de forma transparente do lado esquerdo da figura; as coordenadas conhecidas pela antena mais densa e o vetor das diferenças, pela seta vermelha entre as duas. Este vetor é transmitido para o receptor móvel que também calcula suas coordenadas de forma independente, representado pelo receptor transparente do lado direito da figura e aplica o vetor das correções, seta vermelha, e pode obter as coordenadas corrigidas.

Figura 14 – DGPS com domínio da Posição



Fonte: Adaptado de Park et al. (2013)

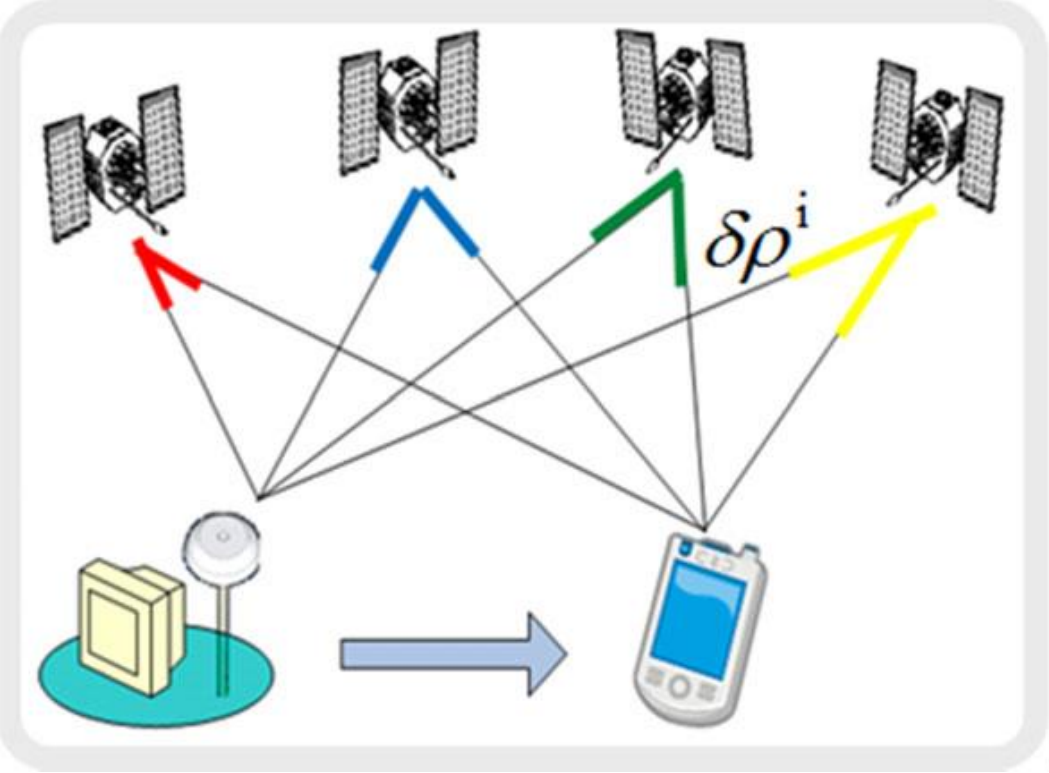
Apesar de extremamente simples, esta técnica possui deficiências significativas. Primeiro, é necessário que todos os receptores façam a medida da pseudodistância do mesmo conjunto de satélites, para que assim fique assegurado que os DOPs e os erros sejam comuns em ambos. Portanto, o receptor móvel precisa coordenar a escolha dos satélites com a estação de referência; ou a estação de referência precisa determinar e transmitir os erros de posicionamento para todas as combinações possíveis dos satélites visíveis naquele instante. Quando oito ou mais satélites estão visíveis, o número de combinações se torna impraticavelmente grande (80 ou mais combinações de quatro satélites). Um segundo problema pode também aparecer, se o receptor móvel e o da estação utilizarem diferentes técnicas de solução

para o posicionamento. A menos que, os dois receptores empreguem a mesma técnica, por exemplo, mínimos quadrados, linearização do cálculo da pseudodistância ou filtros como o de Kalman, com constantes de suavização de tempo equivalentes, filtros de sintonia e assim por diante a correção no domínio das posições pode gerar resultados errôneos.

3.2.3 Domínio das distâncias

Sendo um método de DGPS mais efetivo e, portanto, amplamente mais utilizado, o domínio das distâncias utiliza correções nas pseudodistâncias, previamente ao cálculo da solução da posição, ao invés de aplicar simplesmente um deslocamento nas coordenadas. A Fig. 15 mostra uma generalização da construção do sistema, onde os segmentos coloridos representam a diferença entre a pseudodistância medida para cada satélite utilizado no cálculo da solução e a distância geométrica entre as coordenadas dos satélites e da estação de referência. Estas correções são transmitidas para o receptor móvel e então somadas a pseudodistância medidas antes do cálculo do posicionamento.

Figura 15 – DGPS com domínio das distâncias



Fonte: Adaptado de Park et al. (2013)

Antes de descrever o cálculo das correções, é interessante que se primeiramente sejam definidos os conceitos de pseudodistâncias e distância geométrica. Leick (2015) define pseudodistância como o termo relacionado à distância entre o satélite e a antena do receptor, implícita na época da emissão e recepção dos códigos. É a estimativa de uma extensão eivada de ruídos, portanto chamada de "pseudo" distância.

A distância geométrica é a distância verdadeira entre dois pontos, como comentado anteriormente. Caso sejam conhecidas as coordenadas do satélite e do receptor no sistema ECEF *"Earth Centered, Earth Fixed"*, a distância geométrica ρ_r^s entre estes dois pontos pode ser calculada utilizando-se a equação 3:

$$\rho_r^s = \sqrt{((X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2)} \tag{3}$$

onde:

ρ_r^s refere-se à distância geométrica entre as antenas do satélite S, no instante de transmissão, e do receptor R, no instante de recepção;

$(X^s,\ Y^s,\ Z^s)$ são as coordenadas do satélite;

$(X_r,\ Y_r,\ Z_r)$ são as coordenadas do receptor.

A partir da pseudodistância obtida pelo código C/A, a distância geométrica calculada através das coordenadas conhecidas da Estação Base e dos termos referentes aos erros dos relógios do satélite e do receptor, a correção da pseudodistância (*PRC – Pseudo Range Correction*) para cada satélite *s* em uma época de referência t_0 é dada pela equação 4 (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008):

$$PRC^S(t_0) = PD_r^s(t_0) - \rho_r^s(t_0) - c(dt_r - dt^s) \tag{4}$$

onde:

PD_r^s refere-se à pseudodistância entre as antenas do satélite S, no instante de transmissão, e do receptor R, no instante de recepção;

c é a velocidade da luz no vácuo;

dt_r é o erro do relógio do receptor no instante de recepção;

dt^s é o erro do relógio do satélite s no instante de transmissão.

Com o tempo ocorre uma variação nas correções, que se dá de maneira aproximadamente linear. Assim, a correção diferencial na pseudodistância acumula um erro de aproximadamente 1,00 m após 10 s. Nessa relação torna fundamental a apreciação de uma taxa de atualização para a correção.

Para que a variação entre as correções seja reduzida, utiliza-se não apenas as correções da pseudodistâncias, mas também uma taxa de atualização da correção no tempo (*RRC – Range Rate Corrections*), expressa na equação 5.

$$RRC(t_0) = \frac{PRC(t) - PRC(t_0)}{(t - t_0)} \tag{5}$$

onde:

t_0 é a época de geração da mensagem;

t a época da qual deseja-se obter a *PRC*;

t-t_0 o intervalo de tempo, também definido como latência.

Produzindo assim uma nova correção atualizada para uma determinada época t e expressa na equação 6:

$$PRC(t_i) = PRC(t_0) + RRC(t_0)(t_i - t_0) \tag{6}$$

Desta maneira, a correção atualizada no tempo, deve ser somada à pseudodistância obtida pelo receptor móvel.

3.3 A INTEGRIDADE DO POSICIONAMENTO GPS

O desempenho de qualquer sistema de navegação é caracterizado pela acurácia, disponibilidade, continuidade e integridade, sendo cada uma das características mais ou menos importantes sob um determinado ponto de vista. No

tocante à segurança, a integridade é de extrema relevância, pois sem a convicção da integridade do sistema, não há confiança no rigor das informações recebidas.

Devido a possibilidade de consequências desastrosas por parte de embarcações marítimas ou aeronáuticas na dependência única da navegação por GPS, uma série de propostas para o monitoramento da integridade do sistema tem sido desenvolvidas, levando-se em consideração tanto as melhoras no Sistema de Controle GPS, como no planejamento de avaliações independentes nos receptores dos usuários. Tal conceito é conhecido como *"Receiver Autonomous Integrity Monitoring"* – RAIM (Monitoramento da Integridade Autônoma do Receptor) (SEEBER, 2003).

Para uma melhor interpretação acerca dos métodos utilizados para assegurar algum nível de confiança no posicionamento torna-se necessário a definição e quantificação das características do sistema de navegação.

- **Acurácia:** dentro deste contexto, descreve o quanto um determinado valor se aproxima de um valor de referência, que por definição é o valor verdadeiro. Assim o erro passa a ser a diferença entre o valor medido e o valor de referência, para uma série de medidas a diferença entre a média e o valor de referência é chamado de *desvio* ou *erro_sistemático*. Ainda é necessário pontuar que a acurácia difere conceitualmente da precisão, a qual descreve o quanto as medidas divergem entre si e pode ser quantificada pelo desvio padrão, variância, intervalo e intervalos de confiança e probabilidade.
- **Disponibilidade:** refere-se à capacidade de prover o desempenho e a funcionalidade requerida dentro da área de cobertura especificada no planejamento das operações. Quanto à disponibilidade do sinal, pode ser expressa como a porcentagem de tempo em que os sinais transmitidos pelo sistema estão disponíveis para utilização. Além da capacidade de transmissão, fatores relacionados ao meio ambiente, tais como condições de anomalias atmosféricas ou a interferência de outros sinais, podem afetar a disponibilidade. De acordo com EUA (2008) o SPS deverá estar acessível pelo menos 99,85% do tempo, baseado na cobertura global.

- **Continuidade:** idealmente qualquer sistema de navegação deve estar continuamente disponível para os usuários, entretanto, devido a interrupções imprevistas ou mesmo a manutenções programadas ou não, um sistema em particular pode ficar total ou parcialmente indisponível por um determinado período de tempo. É, portanto, a capacidade de um determinado sistema de navegação de funcionar sem interrupções durante o período de operação pretendido e indica a probabilidade que o sistema irá manter um determinado nível de desempenho específico, presumindo-se disponibilidade no início de todos os processos.
- **Integridade:** tratando-se de um sistema de navegação, refere-se à sua veracidade e confiabilidade. No caso da incapacidade de oferecer a acurácia navegacional devido a anomalias do sistema, o mesmo deverá detectá-las e alertar os usuários. A integridade caracteriza a capacidade de um sistema de navegação de prover em tempo hábil o alerta de falha referente ao estado de sua acurácia.

Com o propósito de proteger os usuários de anomalias e falhas o *"Global Positioning System"* possui processos para garantir a integridade do sistema, através de verificações internas dos satélites e pelo monitoramento do Departamento de Defesa dos EUA realizado através Segmento de Controle.

Os satélites possuem monitoramento interno para a maioria das anomalias, porém não todas. Entre as monitoradas estão a verificação de erros nas mensagens de navegação e alguns tipos de falhas nos relógios dos satélites, no processador, na memória ou mesmo endereçamentos dos ponteiros. Caso haja a detecção de alguma anomalia, os usuários são notificados em 6 segundos, através das mensagens de navegação, que contém uma bandeira de alerta no bit 18 informando aos usuários que o intervalo de erro pode estar pior que o indicado no sub quadro 1. O sub quadro 1 possui informações que cobrem uma grande variedade de informações sobre a saúde do satélite que está sendo rastreado, os sub quadros 4 e 5 incluem dados sobre a saúde de todos os satélites (SICKLE, 2015). A partir das informações constantes nestes sub quadros, informam se todos os sinais do satélite estão confiáveis ou se o satélite não deve ser utilizado por poder estar com anomalias.

Utilizando os dados coletados pelas 5 estações de controle, a estação central localizada em Colorado Springs na Base da Força Aérea Schriever, monitora a constelação do GPS avaliando o desempenho do sistema a cada 15 minutos através da checagem das tolerâncias e validações das medidas das pseudodistâncias, utilizando um filtro de Kalman no processo de gerenciamento de erros. Em algumas circunstâncias alguns erros podem ficar indetectáveis por este processo por até 29 minutos, para minimizar este problema é realizada uma checagem via *software* a cada 6 segundos e no caso de detecção de anomalias pelo programa o PRN do satélite é modificado para PRN 37, número não operacional. Estes procedimentos estão mais bem descritos em EUA (2008).

Inicialmente introduzido por Rudy Kalafus em 1987 (BROWN, 1997) o conceito de RAIM busca a partir de no mínimo 5 satélites, pelo menos um a mais que o mínimo para a determinação do posicionamento, a verificação pelo receptor da integridade do posicionamento no caso de falhas não comunicadas pelo Segmento de Controle ou mesmo das advindas de problemas locais, tais como os DOPs ou multicaminhamento. Geralmente separadas em duas categorias (PARKINSON, 1996), as que utilizam medições anteriores e atuais, através da estimativa da movimentação do receptor com médias ou esquemas de filtros; e as que utilizam apenas as medidas atuais: abordagens instantâneas, as quais são as mais amplamente utilizadas, podendo ser baseadas na comparação das distâncias, por residuais dos mínimos quadrados ou métodos de paridade.

O método de comparação das distâncias é relativamente direto. Assumindo-se que o receptor está rastreando seis satélites, a solução do posicionamento pode ser obtida utilizando-se quaisquer quatro satélites (três componentes das coordenadas e o erro do relógio do receptor), a partir deste posicionamento o receptor pode calcular as distâncias para os outros dois satélites que estão sendo rastreados, mas não foram utilizados; então estas distâncias estimadas são comparadas com as pseudodistâncias medidas. Baseado nestas diferenças o receptor pode aplicar algum teste estatístico e compará-lo com algum limite pré-estabelecido, tal como uma elipse, no caso de duas observações redundantes. Caso o teste falhe, o alarme é ativado.

Uma extensão do RAIM foi denominada de *"Fault Detection and Exclusion"* – FDE (Detecção de Falha e Exclusão), que utilizando o mínimo de 6 satélites além de

identificar a falha, detecta o satélite causador para sua exclusão na solução do posicionamento, para que a navegação continue sem interrupções.

Segundo Kaplan e Hegarty (1997) os dados de entrada para algoritmo do RAIM advêm do desvio padrão do ruído e da geometria medidos e da máxima probabilidade admissível para um falso alerta e detecção desapercebida; um falso alerta é uma indicação de erro no posicionamento, apesar do posicionamento estar correto enquanto a detecção desapercebida é a não indicação de uma falha que realmente ocorreu. O o algoritmo fornece como saída o nível de proteção horizontal (*"Horizontal Protection Level"* – HPL) e o nível de proteção vertical (*"Vertical Protection Level"* – VPL); e é desenvolvido a partir da equação das observações linearizada:

$$y = Hx + \epsilon \tag{7}$$

Onde $\boldsymbol{x}$ é o vetor 4 x1 formado pelos valores estimados do estado nominal do local no qual foi obtida a linearização. Os três primeiros elementos são os componentes este, norte e altitude do posicionamento e o quarto elemento é o erro do relógio. O vetor $\boldsymbol{y}$ com dimensões $\boldsymbol{n}$ x 1 é formado pelas diferenças entre as pseudodistâncias medidas e as obtidas através do posicionamento nominal. O valor de $\boldsymbol{n}$ é o número de satélites visíveis (número de observações). $\boldsymbol{H}$ é a matriz $\boldsymbol{n}$ x 4 de conexão linear entre $\boldsymbol{x}$ e $\boldsymbol{y}$ e consiste em três colunas com os cossenos diretores do vetor e a quarta coluna contendo o valor 1, que corresponde ao estado do relógio do receptor. $\boldsymbol{\epsilon}$ é o vetor $\boldsymbol{n}$ x 1 com os erros das medições, e pode conter termos tanto randômicos como determinísticos.

O GPS RAIM é baseado na auto consistência das medidas, onde o número de medidas $\boldsymbol{n}$ deve ser maior ou igual a 5. Um grau de liberdade é para realizar a estimativa de $\boldsymbol{x}$ pelo método dos mínimos quadrados, o qual substituído na equação 7 seus valores são comparados com o resultado das medidas empíricas em $\boldsymbol{y}$. A diferença entre eles é chamada de vetor das distâncias residuais, $\boldsymbol{w}$. Que pode ser definida como a diferença entre as distâncias (satélite-receptor) estimadas e as diferenças medidas pelo receptor, em termos matemáticos o vetor pode ser representado pelas equações:

$$\hat{x}_{MMQ} = (H^T H)^{-1} H^T y \tag{8}$$

$$\hat{y}_{MMQ} = H\hat{x}_{MMQ} \tag{9}$$

$$w = y - \hat{y}_{MMQ} = y - H(H^T H)^{-1} H^T y = [I_n - H(H^T H)^{-1} H^T]y$$
$$= [I_n - H(H^T H)^{-1} H^T](Hx + \epsilon) = [I_n - H(H^T H)^{-1} H^T]\epsilon \tag{10}$$

Uma vez que $\boldsymbol{\epsilon}$ é desconhecido para o receptor móvel, a equação 10 é utilizada apenas em simulações, admitindo-se então a equação 11:

$$S \equiv I_n - H(H^T H)^{-1} H^T \tag{11}$$

Onde $\boldsymbol{I_n}$ é a matriz identidade $n \times n$. Então, o vetor das distâncias residuais, $\boldsymbol{w}$, é dado na utilização prática por

$$w = Sy \tag{12}$$

E para simulações, utiliza-se:

$$w = S\epsilon \tag{13}$$

O vetor das distâncias residuais, $\boldsymbol{w}$, pode ser utilizado como uma medida de consistência, contudo por conta da restrição causada pelas quatro incógnitas associadas ao vetor $\boldsymbol{x}$, dentre os $\boldsymbol{n}$ elementos de $\boldsymbol{w}$, alguns dos aspectos da inconsistência, que é o fato de interesse a ser avaliado, podem ser obscurecidos. Por conta disto, alguns autores sugerem ser mais adequado a realização de uma transformação linear que elimine estas restrições e converta as informações contidas em $\boldsymbol{w}$ para um vetor $\boldsymbol{p}$, conhecido como vetor paridade. A transformação de $\boldsymbol{w}$ em $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{Pw}$, ocorre por meio da matriz de transformação $\boldsymbol{P}$, definida como uma matriz de dimensões $(n-4) \times n$, que pode ser obtida por meio da fatoração ortogonal QR. O conceito da utilização do método da paridade para o RAIM encontra-se melhor detalhado em Brown (1992), Brown (1997), Kaplan e Hegarty (1997), Kline e van Graas (1991) e Parkinson (1996).

Haja visto que as técnicas e algoritmos utilizados nos métodos de paridade requerem uma alta capacidade computacional, não obstante da restrição causada pelas quatro incógnitas associadas ao vetor $\boldsymbol{x}$, o método dos resíduos dos mínimos quadrados também é muito utilizado (PARKINSON; AXELRAD, 1988)

Na aplicação deste método, o receptor utiliza todos os satélites para o cálculo da solução da navegação e então determina os residuais. Em uma solução de navegação precisa, os valores unitários dos resíduos serão pequenos, enquanto que para uma solução imprecisa, os valores serão grandes. Basta então definir o limiar entre pequeno e grande. Para esta comparação é calculado um valor quantitativo dado pelo quadrado médio dos resíduos (QME) do vetor $\boldsymbol{w}$ pela equação 14:

$$QME = w^T w \tag{14}$$

Esta observável básica (QME) possui três propriedades importantes (PARKINSON, 1996): a primeira diz respeito ao fato do QME ser um valor quantitativo escalar não negativo (positivo), o que facilita a regra de decisão, onde a partir de um valor limiar a reta semi-infinita se divide em duas partes, existe a falha ou não existe a falha. Na segunda propriedade, caso todos os valores de $\boldsymbol{\epsilon}$ possuam a mesma distribuição Gaussiana, independente e de média zero; então a distribuição estatística será completamente independente da geometria dos satélites, assim o cálculo do valor limiar é para qualquer valor de $\boldsymbol{n}$; ou número de satélites visíveis. Em terceiro lugar para uma média zero, a suposição Gaussiana assumida anteriormente, possui um grau de liberdade de $(\boldsymbol{n} - \mathbf{4})$.

Parkinson e Axelrad (1988) sugerem a utilização de uma variável escalar monotônica relacionada ao QME, dada por:

$$\delta = \sqrt{{w^T w}/{(n-4)}} = \sqrt{{QME}/{(n-4)}} \tag{15}$$

Utiliza-se então, a distribuição chi-quadrada para a determinação do valor limiar que será comparado com $\boldsymbol{\delta}$, para cada $\boldsymbol{n}$ de interesse. Estes valores encontram-se na Tabela 2:

Tabela 2 – Limiares aproximados para ruído σ = 33,00 m e intervalo de alarme = 1/15000

Número de satélites em vista, $\boldsymbol{n}$	**Graus de liberdade**	**Limiar (m)**
5	1	132
6	2	102
7	3	90
8	4	82
9	5	77

Fonte: Adaptado de Parkinson (1996).

Takasu e Yasuda (2013) utiliza no programa RTKLIB a validação descrita nas seguintes equações:

$$v_s = \frac{y}{\sigma_s} \tag{16}$$

$$\frac{v^T v}{n-m-1} < \chi_\alpha^2(n-m-1) \tag{17}$$

Onde n é o número de medidas m é de parâmetros estimados. $\chi_\alpha^2(n)$ é a distribuição chi-quadrada para o grau de liberdade n e $\alpha = 0{,}001$ (0,1%).

Em adição para a validação descrita acima, a partir da versão 2.4.2 do RTKLIB, foi inserida a função RAIM-FDE. Caso o teste do chi-quadrado resulte em falha, o programa recalcula a estimativa do posicionamento excluindo um a um, os satélites visíveis e após todas as tentativas a posição do receptor é estimada com a que resulta com o menor valor para o quadrado dos resíduos normalizados $(v^T v)$. Desta maneira, uma medida inválida. Causada pelo mal funcionamento de algum satélite, falha do receptor ou por um multicaminhamento muito grande é excluída como um *outlier*.

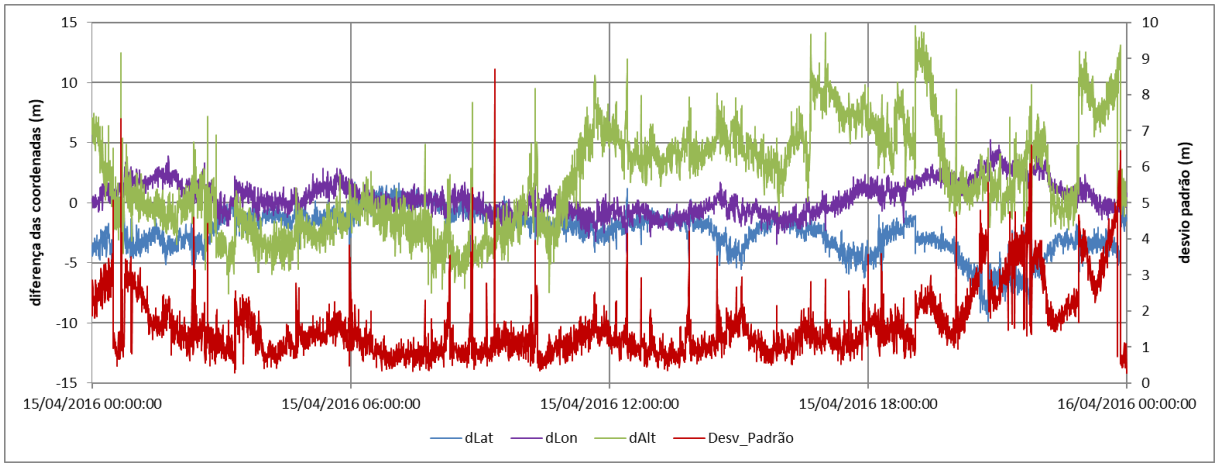
Para o presente trabalho, foi proposto um método para o RAIM baseado na quantificação do desvio padrão, assim o desvio padrão $\boldsymbol{\sigma_y}$ do vetor das diferenças $\boldsymbol{y}$, pode ser obtido por:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} . \sum_{i=1}^{n} \left(y - \mu_{\mathrm{y}}\right)^2} \tag{18}$$

Onde n e y, já foram definidos anteriormente e μ_y é média do vetor y.

Como dito anteriormente, em um posicionamento preciso, os valores unitários dos resíduos serão pequenos, o que resulta em um desvio padrão também pequeno; entretanto, o método proposto não advém dos resíduos, mas sim do vetor das diferenças, mesmo sendo o valor das diferenças, em termos de grandeza muito superiores aos dos resíduos, o desvio padrão destas diferenças continua pequeno. A Figura 16 apresenta um gráfico com 24 horas de rastreio de um receptor GPS em um ponto conhecido, sem a ocorrência de problemas anormais com a transmissão dos sinais pelos satélites.

Figura 16 – Desvio padrão das diferenças e erro de posicionamento em função do tempo sem ocorrência de falhas

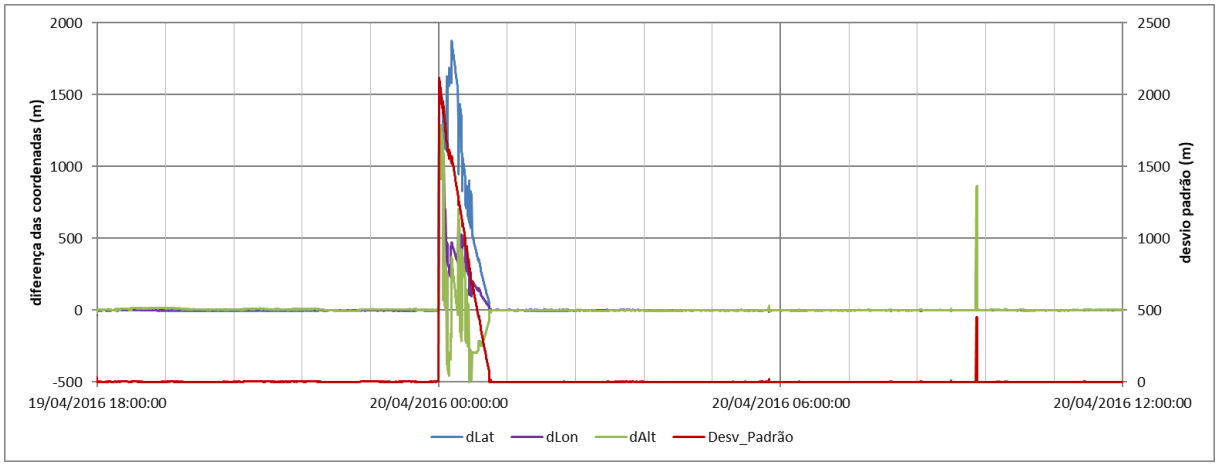


Fonte: Autor (2018).

As linhas em azul, roxo e verde representam a diferença entre a posição calculada e a posição conhecida para latitude (dLat), longitude (dLon) e altitude (dAlt) respectivamente, com seus valores em metros no eixo vertical do lado esquerdo. A linha vermelha corresponde aos valores do desvio padrão (Desv_Padrão) do vetor y para cada uma das épocas do rasteio, com os valores em metros no eixo vertical do lado direito.

Percebe-se que para este dia as diferenças nas coordenadas do posicionamento não excederam 15,00 metros (positivos ou negativos) e o desvio padrão 10,00 metros. Já para uma solução imprecisa, os valores unitários dos resíduos serão grandes, advinda de uma grande discrepância entre as diferenças e por consequência o desvio padrão também será grande. A Figura 17 apresenta o rastreio para um período de 18 horas onde houve anomalias; devido as discrepâncias entre as grandezas as pequenas variações onde não existem falhas ficam quase imperceptíveis, porém, o aumento no valor do desvio padrão fica nítido e proporcional ao erro do posicionamento.

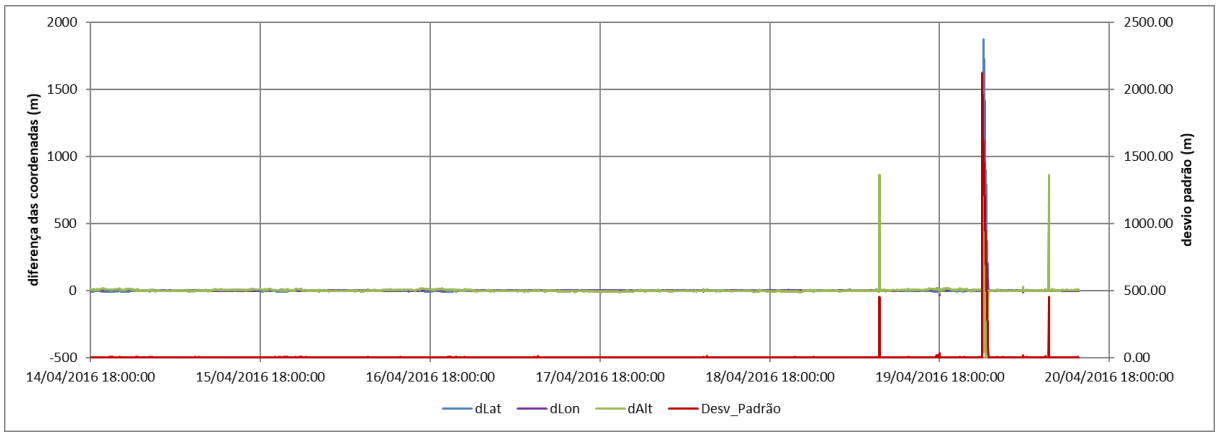
Figura 17 – Desvio padrão das diferenças e erro de posicionamento em função do tempo com ocorrência de falhas



Fonte: Autor (2018).

Uma visão geral dos dois casos pode ser observada na Figura 18, que apresenta seis dias de rastreio, onde estão inclusos os dois casos anteriormente comentados. Por conta da escala vertical os valores das diferenças das coordenadas e do desvio padrão quando pequenos, aparecem como uma linha reta; contudo quando o erro no posicionamento é muito grande o desvio padrão tem um salto quantitativo, isto ocorre quando a solução deve ser considerada como um *outlier* e descartada.

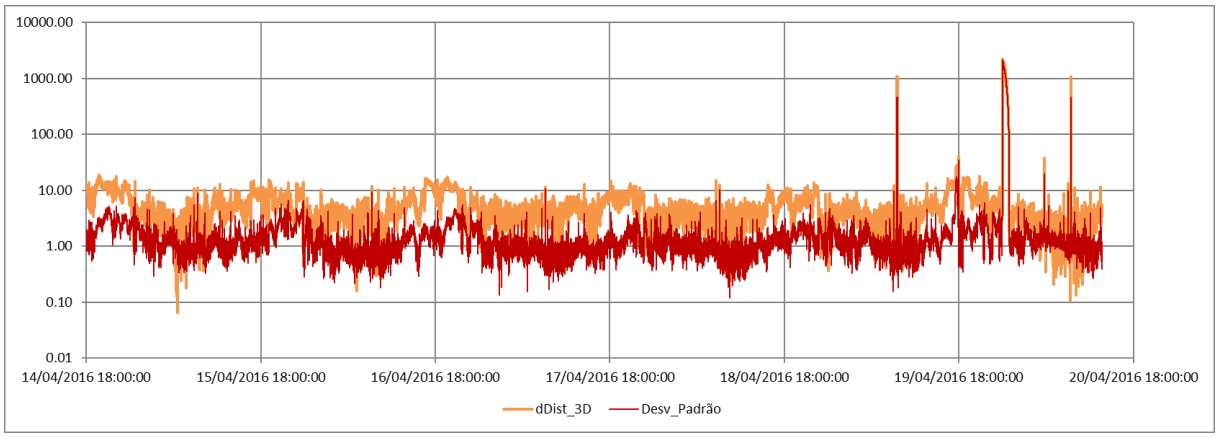
Figura 18 – Desvio padrão das diferenças e erro de posicionamento em função do tempo com e sem ocorrência de falhas



Fonte: Autor (2018).

Outra forma de se avaliar o erro posicional é através da distância euclidiana entre as coordenadas conhecidas e as obtidas pelo receptor. Esta distância pode ser plana (2D) ou tridimensional (3D), considerando-se a raiz quadrada do quadrado dos deltas na latitude, longitude e altitude. A Figura 19 apresenta o mesmo rastreio da figura anterior, porém, com a comparação entre a distância do erro posicional em 3D em laranja e o desvio padrão das diferenças em vermelho. O eixo vertical está em uma escala logarítmica em metros de forma que possa ser possível a leitura tanto dos erros pequenos, quanto dos erros maiores.

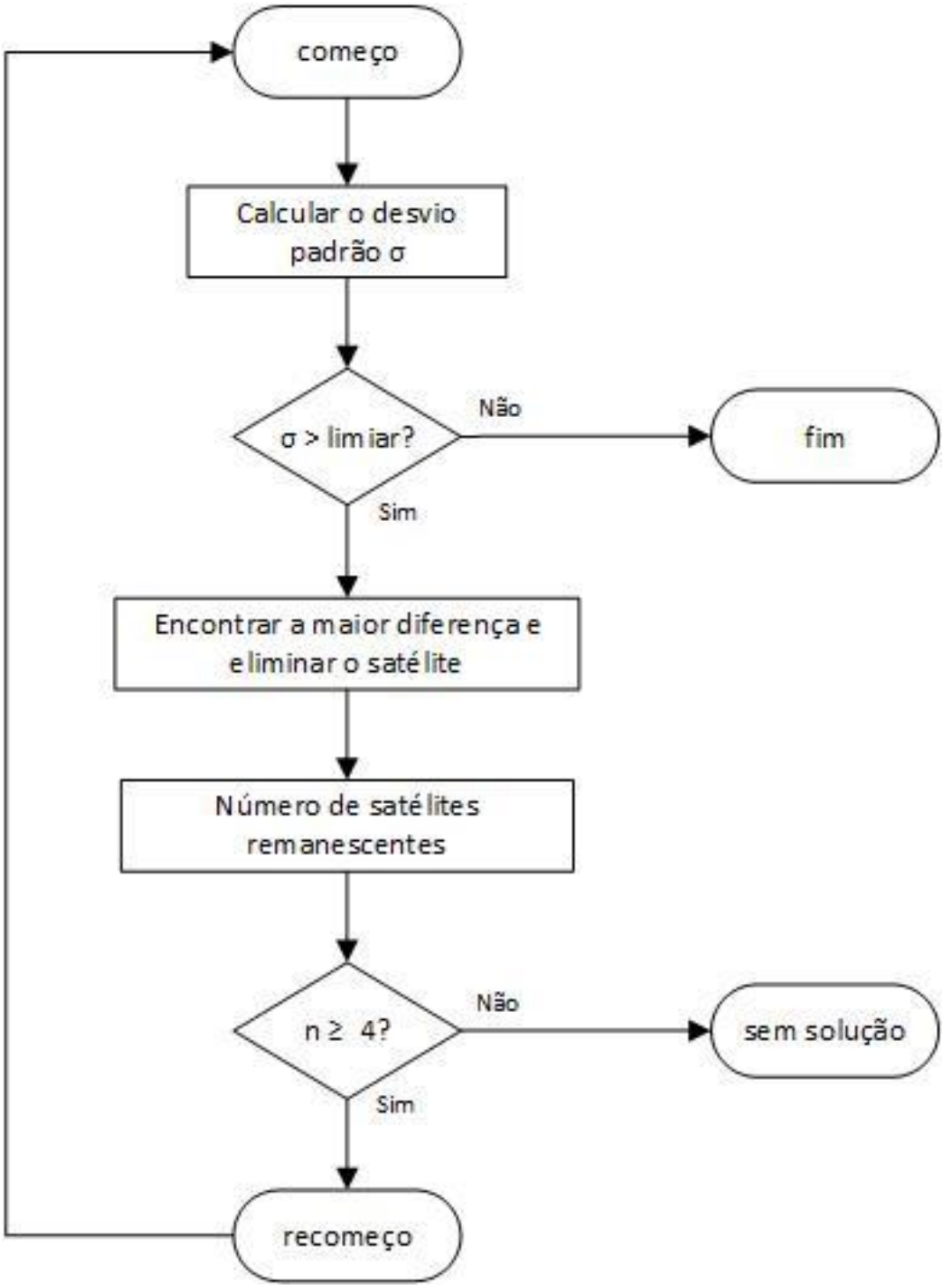
Figura 19 – Desvio padrão das diferenças e distância 3D do erro de posicional em função do tempo com e sem ocorrência de falhas, em escala logarítmica



Fonte: Autor (2018).

No caso do valor do desvio padrão exceder a um determinado limiar, fica detectada a falha, contudo o método permite a avaliação de qual satélite ocasional o erro excessivo; bastando para isso detectar no vetor y a maior grandeza de maior valor. Este satélite é então descartado, a solução é recalculada, obtém-se novo valor para o desvio padrão para a época em questão e procede-se nova comparação com o valor limiar. O fluxograma da Figura 20 demostra este processo de implantação.

Figura 20 – Fluxograma de implantação do RAIM-FDE.



Fonte: Autor (2018).

Dessa forma o método proposto atua como RAIM-FDE, de uma forma prática, rápida e com pouco consumo computacional. Mais detalhes serão apresentados no capítulo com os resultados.

3.4 INTENSIDADE DO SINAL

Nos sistemas de radiocomunicação ou de navegação, baseados em ondas eletromagnéticas a presença de ruídos oriundos de diversas fontes é algo corriqueiro; podem ser causados por efeitos naturais ou pelo ambiente, pela antena ou mesmo do próprio receptor. Neste sentido, passa a ser importante medir e conhecer o limiar de relação entre o sinal e ruído, pois com a sua quantificação pode-se prever se o receptor poderá ou não realizar a medida da fase ou mesmo a correlação do código, de acordo com a sensibilidade do receptor, como ocorreu no caso de alguns dispositivos testados e que ficará demonstrado no capítulo 5 com os resultados.

A intensidade do sinal para cada um dos satélites rastreados pode ser indicada pelo receptor de várias maneiras, por barras verticais, normalização da intensidade do sinal, limiar de relação portadora ruído – *"carrier-to-noise density"* (C/N_0) ou ralação sinal ruído – *"Signal-to-Noise Ratio"* (SNR), sendo os últimos dois os mais utilizados por receptores GNSS.

Geralmente expresso em decibéis (dB) o SNR representa a medida da relação entre a potência do sinal recebido e a potência do ruído medidos na saída do *"front-end"* do receptor para uma determinada largura de banda do receptor. Quando expressa em termos de potência pode ser dada pela equação 19 (LAU; MOK, 1999):

$$S/_N = P_S/_{P_N} \tag{19}$$

Onde $S/_N$ é o SRN, P_S a potência do sinal em watts (W) e P_N é a potência do ruído em watts (W). A mudança para base logarítmica utilizando-se decibéis é dada por:

$$SNR_{dB} = 10log\left(\frac{P_S}{P_N}\right) \tag{20}$$

Caso todos os níveis estejam expressos em decibéis, a equação 19 pode ser simplificada para (JOSEPH, 2010):

$$SNR_{dB} = S - N \tag{21}$$

Onde SNR_{dB} é a relação entre o sinal e o ruído em decibéis, S a potência do sinal, usualmente a da onda portadora expressa em unidades de decibel/miliwatt

(dBm) ou decibel/watt (dBW); N é a potência do ruído em uma dada largura de banda em dBm ou dBW.

Outro parâmetro largamente utilizado é o C/N0, usualmente expresso em termos de decibel-Hertz (dB-Hz) e se refere à relação entre a potência da onda portadora e a potência do ruído na entrada por unidade de largura de banda; pode ser definido por:

$$C/_{N_0} = P_C/_{P_N} \tag{22}$$

Onde P_C é a potência da onda portadora em watts, P_N é a potência do ruído na entrada do demodulador em watts, assim representa a potência real da relação recebida na antena do receptor. A relação entre o SNR e o C/N_0 pode ser expressa por:

$$C/_{N_0} = C - (N - BW) = C - N_0 = SNR + BW \tag{23}$$

Onde o C/N_0 será expresso em dBm-Hz, C é a potência da onda portadora em dBm ou dBW, N é a densidade de potência do ruído em dBm-Hz ou dBW-Hz, BW é a largura de banda da observação, a qual é usualmente a largura de banda equivalente de ruído no estágio do último filtro do *"front-end"* do receptor de RF.

Na física ruído branco é definido como um sinal aleatório com intensidade constante em todas as frequências (FARRELL, 2008), o que lhe dá uma densidade espectral de potência constante. A agitação térmica dos átomos num material condutor ou semicondutor libera portadores de carga aleatoriamente, produzindo ruído branco. Qualquer componente eletrônico que esteja a uma temperatura acima do zero absoluto gera estes portadores produzindo assim ruído branco (MANCINI, 2002). Outro tipo de ruído que causa influência na rádio frequência é o ruído Johnson–Nyquist ou ruído térmico, gerado pela agitação térmica de cargas no interior de um condutor eléctrico em equilíbrio é independente da corrente aplicada e aproximadamente branco. Os ruídos são gerados por fontes distintas, sendo que a potência de ruído resultante é expressa como se o ruído fosse gerado por fonte de ruído térmico que está em uma temperatura hipotética, a temperatura equivalente de ruído.

Usualmente, as fontes de ruído branco no GPS são através da temperatura do ruído da antena e do próprio receptor. A temperatura da antena modela o ruído que chega na antena decorrente da atmosfera e a do receptor modela o ruído termal devido ao movimento de cargas dentro do dispositivo, neste caso, o *front-end* do receptor GPS. A densidade de potência do ruído pode ser definida como:

$$N_0 = 10log(k \times T) \tag{24}$$

Onde N_0 é expresso em dBw/Hz, k é a constante de Boltzmann ($1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K) e T é a temperatura do ruído na escala Kelvin.

De acordo com Braasch e van Dierendonck (1999) e Grewal, Weill e Andrews (2007) a largura de banda no estágio final da FI fica na faixa de 2 MHz para receptores GPS de baixo custo à 20 MHz para os receptores de alto desempenho, sendo uma temperatura de ruído típica a de 513 K; nestas condições resulta em uma potência de ruído de aproximadamente -138,5 dBW em uma largura de banda de 2 MHz com a densidade de potência do ruído de -201,5 dBW/H; considerando-se o menor nível de um sinal emitido pelos satélites (EUA, 2008) como -157,6 dBW o SNR seria de -19,1 dB o C/N_0 de 43,9 dB-Hz; como está elucidado nas equações abaixo:

$$N_0 = 10\log(1{,}38 \times 10^{-23} \times 513) = -201{,}5\ dBW/Hz \tag{25}$$

$$2\ MHz\ \rightarrow BW = 10\log(2000000) = 63\ dB \tag{26}$$

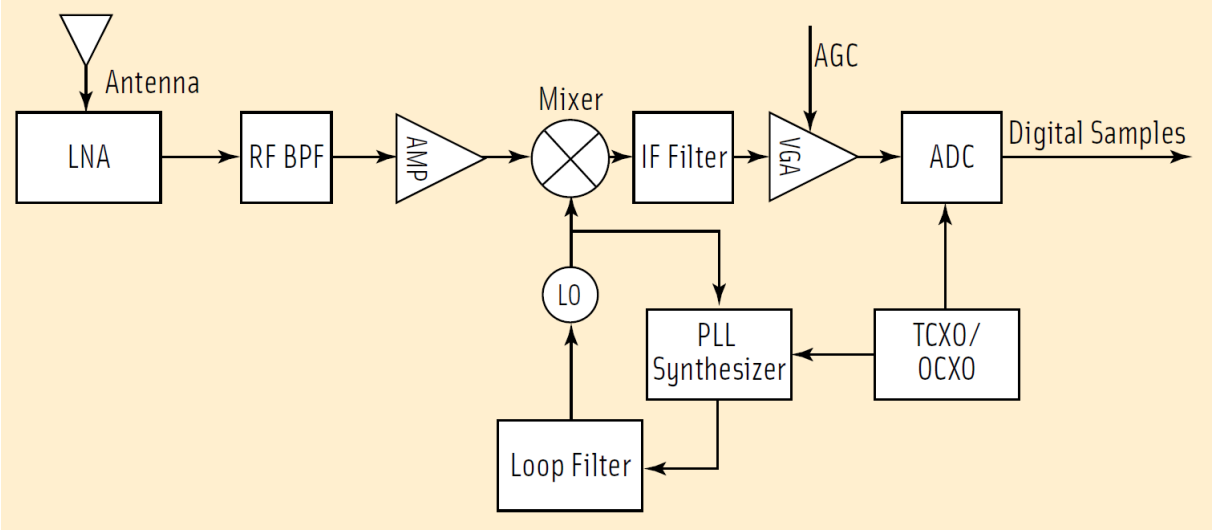
$$N = -201{,}5 + 63 = -138{,}5\ dBW \tag{27}$$

$$SNR = -157{,}6 - (-138{,}5) = -19{,}1\ dB \tag{28}$$

$$C/N_0 = -157{,}6 - (-201{,}5) = 43{,}9\ dB - Hz \tag{29}$$

Joseph (2010) ainda considera o caminho percorrido tanto pelo sinal quanto pelo ruído através dos componentes do *front-end*, a Figura 21 ilustra este percurso.

Figura 21 – Componentes do *Front-end* de um receptor GPS



Fonte: (JOSEPH, 2010):

Nesse sentido, deve ser levado em consideração a Figura de Ruido (F), que é a razão entre a relação sinal-ruído de entrada de um circuito, SNR_i, e a relação sinal-ruído na sua saída, SNR_o, esse parâmetro mede a degradação da SNR causada pelo circuito através dos componentes ativos, tal como o LNA ou mesmo pelos passivos como os filtros ou cabos; e é dada por:

$$F = \frac{SNR_i}{SNR_o} \tag{30}$$

A figura de ruído se relaciona com a temperatura de ruído por:

$$F = 10 \log\left(1 + \frac{T}{T_0}\right) \tag{31}$$

Onde T é temperatura de ruído e T_0 é a temperatura de referência, usualmente assumida como 290º K.

A equação de Friis pode então ser utilizada para a determinação da figura de ruído ou da temperatura de ruído de componentes em cascata, medindo-se a temperatura ou figura de ruído individual de cada componente do *fornt-end* do receptor. Desta maneira o valor do C/N_0 passa a ser dado por:

$$C/N_0 = C/N_0\,(nominal) - F_{RX} - F_{IMP} \tag{32}$$

Onde F_{RX} é a figura de ruído em cascata do receptor e F_{IMP} representa as perdas devido ao limitador de banda e à quantização, com valores típicos de 2 e 1, respectivamente (F é adimensional). No caso acima elucidado, o valor do C/N_0 seria de:

$$C/_{N_0} = 43{,}9 - 2 - 1 = 40{,}9\ dB - Hz \tag{33}$$

Ainda segundo Joseph (2010) outros valores de referência podem ser utilizados como usuais para a determinação típica do C/N_0 em receptores GPS. Assumindo-se a temperatura de ruído de 290º K, largura de banda do *front-end* de 4 MHz e uma variação de ±4 dB na potência nominal dos satélites de -158,5 dBW os valores correspondentes do C/N_0 estariam entre 38,5 dB-Hz e 46,5 dB-Hz.

Isto posto o valor do C/N_0, apresentado por um receptor é um indicador da potência do sinal de um determinado satélite que esteja sendo rastreado e a densidade do ruído do *front-end* deste receptor. Ao contrário do SNR, o C/N_0 não é influenciado por algoritmos internos e independe da largura de banda do *front-end* deste receptor. Já o SNR é mais útil quando se deseja considerar os blocos de processamento do sinal após a sua integração, pois depende além da largura de banda do *front-end*, dos parâmetros de aquisição e rastreamento.

3.5 ANTENAS

Do ponto de vista do operador do equipamento GPS, as antenas são o principal elo de ligação entre o Segmento Espacial e o Segmento do Usuário, tendo em vista que são responsáveis pela captura do sinal na banda L provenientes do espaço, cujas dimensões e configurações são dadas em função do comprimento de onda. Assim como exposto anteriormente no item 2.2.1, os telefones celulares possuem uma antena com capacidade prejudicada, o que torna interessante a sua substituição para um melhor aproveitamento da capacidade do *chipset* de GPS do telefone. Sendo então aqui descritos algumas características das antenas de GPS, que orientam e facilitam a escolha de um determinado tipo.

A função das antenas é a de capturar uma parte da energia proveniente das ondas eletromagnéticas recebidas e convertê-las em uma corrente elétrica que possa

ser processada pelo receptor (FREIBERGER JUNIOR, 2004). Em sinais potentes e com baixa frequência, qualquer tipo de antena realiza este procedimento, o que não se aplica no caso do GPS, que trabalha com sinais notoriamente muito fracos (por volta de -160 dB-Hz) e em alta frequência e precisam ser desenvolvidas levando-se em consideração certos aspectos, tais como: frequência central, largura de banda, polarização do sinal e ainda deve-se levar em consideração que estes sinais podem vir de qualquer direção (MOERNAUT; ORBAN, 2009). Desta forma algumas propriedades importantes das antenas de GNSS afetam diretamente a funcionalidade e o seu desempenho. Atualmente, os tipos de antenas GPS disponíveis para o emprego na recepção dos sinais GPS são (SEEBER, 2003): monopolo ou dipolo, helicoidal, helicoidal-espiral, microstrip ou patch e choke ring.

De um modo geral, as antenas podem ser monopolo ou dipolo. uma antena dipolo é uma antena retilínea sem ligação com o potencial de terra, com a extensão de um comprimento de onda, contudo, não se utilizam dipolos de onda completa por questões práticas, mas sim dipolos de meia onda, que contêm o mesmo tamanho da metade do comprimento da onda. Uma antena monopolo é a metade de uma antena dipolo, quase sempre montada sobre um plano terra, daí a denominação de antena monopolo de quarto de onda. A antena monopolo de quarto de onda deve ter obrigatoriamente um plano de terra, pois é deste que deriva a sua polarização, (Embora, este plano não precise estar necessariamente em paralelo à Terra). A monopolo deve necessariamente estar polarizada em relação ao seu plano de terra verticalmente. Atualmente, os tipos de antenas GPS disponíveis para o emprego na recepção dos sinais GPS são (SEEBER, 2003):

- Microstrip ou patch: é o modelo mais comum em virtude de sua fácil construção e de suas pequenas dimensões, consiste de uma placa condutora de circuito impresso montada sobre uma base quadrada, isolados entre si por uma camada de ar. Nas antenas mais sofisticadas o material de isolamento empregado é uma espécie de porcelana;
- Helicoidal: utiliza um elemento helicoidal para reduzir significativamente o comprimento físico da antena, entretanto o tamanho geométrico depende do dielétrico que preenche o espaço entre as partes ativas da antena. ideais para pequenos produtos onde os requisitos estéticos ou

funcionais pedem um pacote compacto e antena esteticamente agradável;

- Choke ring: são antenas de alta qualidade, consiste em um número de cilindros condutores concêntricos à antena central, devido à sua notável capacidade de rejeição de multicaminhamento dos sinais são as mais utilizadas em bases de monitoramento GNSS.

3.5.1 Frequência de cobertura

Tratando-se de GNSS devem ser levadas em consideração uma série de bandas para cobrir os vários tipos de sinais nos vários tipos de sistemas de satélites em operação ou em fase de implementação, tais como L1, L2, L3, L5/E5 e E6, que variam de 1145 MHz no caso da L5/E5 (GPS/GALILEO) à 1615 MHz da L1 (GLONASS), levando-se já em consideração a largura de banda. Quanto maior o número de bandas, maior é a faixa de frequências que uma antena é capaz de cobrir e, portanto, mais complexa fica a sua concepção.

3.5.2 Padrão de ganho

Para uma antena receptora, o ganho é a relação entre o sinal recebido pela antena em uma determinada direção, em comparação com este mesmo sinal recebido por uma antena de referência padrão (CHEN et al., 2012). As duas antenas de referência mais comuns são a antena isotrópica e a antena dipolo ressonante de meia-onda. A antena isotrópica recebe os sinais igualmente bem em todas as direções, são teóricas, não existem realmente, mas fornecem padrões teóricos simples e úteis com os quais as antenas reais podem ser comparadas. O ganho de uma antena não é o aumento de sensibilidade de recepção, pois a antena não amplifica os sinais. Pode-se definir neste caso que é o aumento de eficiência e não é uma quantidade que possa ser definida nos termos de uma quantidade física, como Watts ou Ohms, mas uma relação sem dimensões.

Ainda segundo Chen et al. (2012), os receptores GPS possuem o melhor desempenho quando a variação da potência entre os sinais recebidos dos vários satélites que estão sendo rastreados é baixa e idealmente a antena cobre todo o hemisfério sem variação de ganho, o que, no receptor está potencialmente

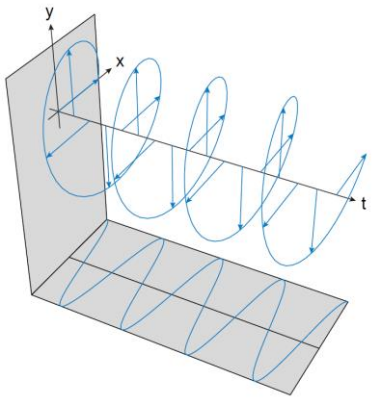
relacionado com a correlação cruzada e o simples fato de um ganho excessivo em determinada direção, pode propiciar que os sinais dos satélites em ângulos de pequena elevação fiquem abaixo da linha de ruído. Por outro lado, a optimização da rejeição do multicaminhamento e a temperatura de ruído da antena requerem algum ganho direcionado.

3.5.3 Polarização circular

O vetor que descreve campo elétrico pode ser decomposto em dois vetores ortogonais, um paralelo ao eixo X – positivo e o outro ao eixo Y- positivo. Caso os componentes x e y possuam a mesma fase (ou diferenciados por um inteiro múltiplo de π), a onda é chamada de polarizada linearmente, visto que o vetor do campo elétrico está sempre direcionado ao longo desta linha. Neste caso a polarização pode ser orientada vertical ou horizontalmente (LANGLEY, 1998).

Caso os dois componentes se difiram na fase, a sua soma descreve uma elipse sobre o eixo Z, formando uma onda polarizada elipticamente e se os dois componentes possuam a mesma amplitude, mas estejam $\pi/2$ (ou por um múltiplo ímpar de $\pi/2$) fora de fase, a elipse se torna um círculo e a onda é dita como polarizada circularmente. Em outras palavras, A combinação de duas ondas linearmente polarizadas, uma vertical e outra horizontal, de mesma amplitude e eletricamente defasadas de 90 graus, resulta em uma onda circularmente polarizada. A Figura 22 demostra que em um ponto fixo no espaço, o vetor do campo elétrico de uma onda polarizada circularmente à direita, gira no sentido horário a partir de sua origem, daí a denominação de antena monopolo de quarto

Figura 22 – Onda com polarização circular à direita



Fonte: (LANGLEY, 1998).

Os sinais polarizados circularmente, podem ser horários ou anti-horários (regra da mão direita), isso posto, os satélites GNSS utilizam ondas polarizadas circularmente à direita (*"Right-Hand Circular Polarization"* – RHCP) e, portanto, as antenas que recebem diretamente os sinais, também devem ser desenvolvidas para RHCP.

A utilização das ondas circularmente polarizadas para transmissão e recepção da Banda - L pelos sistemas espaciais é justificada pelo fato de a orientação relativa das antenas transmissoras e receptoras nos satélites em orbita da Terra não causarem o desaparecimento da polarização como ocorre com as polarizações lineares (horizontal e vertical). Além do mais, a polarização circular não é afetada pelo efeito de rotação de Faraday causados pela ionosfera (BALANIS, 2005). A rotação de Faraday resulta em uma onda eletromagnética vinda do espaço e chegando na superfície terrestre com um ângulo de polarização diferente daquele que deveria ter caso não houvesse a ionosfera; o que leva ao enfraquecimento do sinal e potencializa o enfraquecimento da recepção dos sinais polarizados linearmente.

3.5.4 Supressão do multicaminhamento

O multicaminhamento pode vir refletido de três direções básicas: do chão e chegar por baixo da antena, do chão ou de outro objeto e chegar até a antena com um ângulo de baixa elevação ou de um objeto próximo e chegar a antena com um ângulo de alta elevação. Para cada situação existe uma técnica diferente para a supressão do multicaminhamento (BRAASCH, 1996).

Desta forma, as técnicas de supressão ou atenuação do multicaminhamento podem ser divididas em técnicas externas ao receptor e técnicas internas a ele, entre as externas estão as técnicas baseadas em antenas, que leva em conta a geometria dos sinais ao redor da mesma, como exposto acima e compreendem em instalar a antena em uma localização adequada, o uso de múltiplas antenas e o uso de antenas especiais tais como as com plano-terra (*"choke-ring"*), que atenuam os sinais vindos do chão para a antena; para as duas outras direções algumas antenas possuem a capacidade de rejeitar a polarização à esquerda. Os sinais refletidos tipicamente possuem a rotação invertida da original, entretanto apenas parte destes sinais são

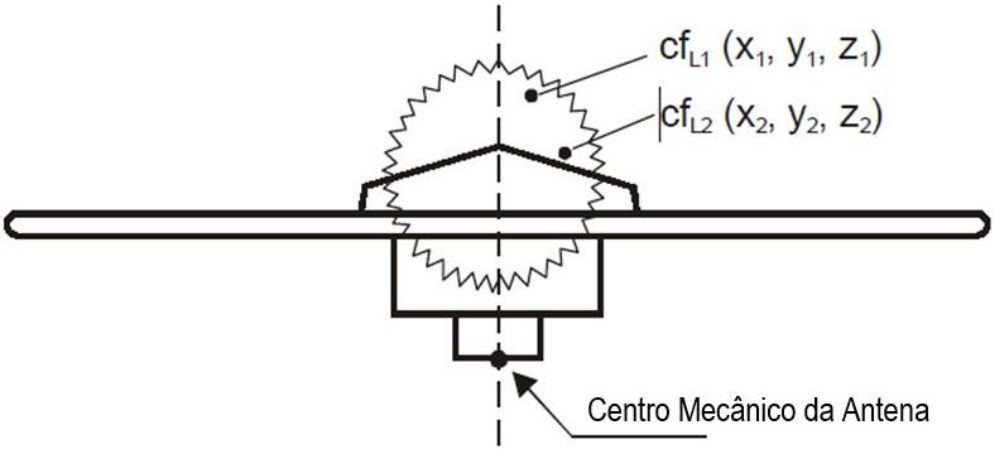
atenuados e caso a onda passe por um número par de anteparos a direção da rotação não será alterada (FARRET et al., 2007).

3.5.5 Centro de fase

Chama-se centro de fase eletrônico (ou simplesmente centro de fase) ao ponto observado em uma antena GPS onde todas as radiações parecem convergir (FREIBERGER JUNIOR, 2004). É o ponto onde os campos eletromagnéticos de todas as irradiações incidentes parecem se juntar na fase. Logo as soluções de navegação e posicionamento são calculadas neste ponto no espaço.

Nas aplicações de alta precisão, as posições do centro de fase de todas as antenas envolvidas em um projeto devem ser conhecidas e referenciadas a um ponto físico da antena. Este deslocamento é chamado de *offset* e representa a medida entre o centro de fase da antena e o seu centro mecânico e devem ser fornecidos pelo fabricante da antena. Os centros de fase entre as diferentes portadoras (L1, L2 e outras) podem ter diferentes *offsets*, conforme pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Centros de fase em L1 e L2



Fonte: Freiberger Jr. (2004).

Idealmente o centro de fase deveria ser independente da direção em que o sinal chega à antena, na pratica tal fato não é verdadeiro, ocorrendo pequenas variações em função do azimute e da elevação dos satélites. Os efeitos das variações no centro de fase podem ir de alguns milímetros a alguns centímetros, dependendo das características da antena e de seu fabricante (SEEBER, 2003).

3.5.6 Cabos e impedância do circuito

As antenas possuem uma determinada resistência para a passagem da corrente elétrica, além de possuírem também certa reatância (resistência oferecida à passagem de corrente alternada por um indutor ou capacitor) em função de sua capacitância (campo elétrico) ou indutância (campo magnético), que afetam a passagem da corrente alternada. A soma vetorial da reatância com a resistência é chamada de impedância, que pode ser expressa por um número complexo onde a parte real é a resistência e a parte imaginária a reatância. A relação entre a impedância e a tensão é dada pela corrente, tanto na antena como nos elementos do circuito onde se aplica a Lei de Ohm para correntes alternadas (LANGLEY, 1998). A impedância para a maioria das antenas GNSS é de 50 Ohms.

Dessa forma, para que não haja perda de potência do sinal é importante que todo o sistema possua a mesma impedância. A conexão entre a antena e o receptor é feita através da linha de transmissão, a qual geralmente é feita por um cabo coaxial, assim, caso a impedância característica da antena seja diferente da do cabo, é necessário a inclusão de um circuito alternativo (filtro de casamento de impedância), apropriado na linha de transmissão, para que as impedâncias da antena, cabo e conectores coincidam.

Todos os cabos e conectores possuem alguma perda de potência do sinal, o tamanho desta perda irá depender da qualidade de seus componentes e de algumas características físicas, tais como as dimensões do cabo, em termos de comprimento e área da seção. A Tabela 3 mostra as características de alguns cabos coaxiais com impedância de 50 Ohms; na primeira coluna são apresentados os nomes dos modelos comerciais utilizados no mercado; a segunda coluna apresenta a perda de sinal devido à área da seção e ao comprimento do cabo a uma dada frequência sendo neste caso para 30,00 m e 1575 MHz respectivamente; a terceira coluna mostra o fator de velocidade do cabo em porcentagem da velocidade da onda que deve ser utilizado para determinar o comprimento do cabo, os quais devem sempre estar cortados na frequência certa para garantir a Relação de Onda Estacionária. A quarta coluna, a capacitância por metro, na quinta, o diâmetro externo, incluindo a blindagem e capa de proteção, a sexta coluna apresenta o diâmetro do condutor interno e a sétima e última coluna, os raios minimos de curvatura.

Tabela 3 – Características dos cabos coaxiais de 50 Ohms.

Modelo	Atenuação 1575MHz (dB/30m)	Velocidade de propagação (%)	Capacitância (pF/m)	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro condutor interno (mm)	Raio Curvatura Mínimo (mm)
LMR 600	3,4	87	76,6	15,0	4,47	38,1
LMR 400	5,2	85	78,4	10,3	2,74	25,4
DLC 8	5,4	84	78	10,2	2,74	25,4
RGC 8	5,4	84	78	10,2	2,74	60
DLC 213	5,6	82	82	10,3	2,61	25,4
RGC 213	5,6	82	82	10,3	2,61	50
RG 213	10,5	67	101	10,3	2,25	50
RGC 58	13,5	82	81	5,0	1,06	25
RG 58	24,5	69	101	4,95	0,90	25
RF 174	38	68	100	2,7	0,48	14

Fonte: Adaptado de RF COM Sistemas LTDA (2017).

Os valores constantes na tabela podem sofrer modificações, dependendo do fabricante.

3.5.7 Antenas ativas e amplificadores de baixo ruído

Devido à estrutura dos sinais e da capacidade de recuperação da informação, por parte dos receptores, não são necessárias grandes antenas no processo de recepção. Não obstante a este fato, geralmente, as antenas são combinadas com um pré-amplificador de baixo ruído, o qual aumenta o nível de potência do sinal antes do seu recebimento pelo receptor propriamente dito. Para os sistemas onde as antenas são uma unidade separada, os pré-amplificadores ficam posicionados na base da antena e são alimentados (em termos de energia) pelo receptor através do mesmo

cabo coaxial, onde trafegam os sinais. Estas antenas são chamadas de Antenas Ativas.

O ganho necessário das antenas pré-amplificadas irá depender de alguns fatores, tais como, padrão de ganho da antena propriamente dita, a perda pelo comprimento do cabo e os requisitos do *frontend* do receptor. Os valores usuais das antenas comerciais estão entre 20 e 50 dB.

Os pré-amplificadores devem ter baixa figura de ruído e alto ganho, pelo fato da figura de ruído possuir fator predominante no nível de desempenho do SNR do sistema, em geral estão em torno 1,2 a 2,5 dB (LANGLEY, 1998). O projeto da antena para trabalhar estritamente na faixa de banda correta, auxilia o desempenho do pré-amplificador, rejeitando a interferência de outros sinais (em outras frequências) como os de telefonia celular, o uso de filtros também melhora o desempenho.

3.6 FORMATAÇÃO DE ARQUIVOS

Este item pretende estudar algumas formatações de arquivos GPS utilizados na presente pesquisa visando a extração de informações, a padronização, a leitura de arquivos e o uso de dados em programas a serem desenvolvidos no presente trabalho. Além de abordar alguns aspectos significativos para o cálculo das coordenadas obtidas pelo sistema de posicionamento por satélites.

3.6.1 Arquivos GPX

GPX, ou GPS *eXchange Format* (Formato de Intercâmbio GPS) é um formato baseado na linguagem XML (*EXtensible Markup Language*) destinado ao armazenamento de dados GPS, é leve e aberto e, como tal, propõe-se ao intercâmbio entre aplicações e ao compartilhamento entre usuários que possam utilizar programas diferentes. É utilizado para descrever pontos de passagem (*waypoints*), trilhas ou rotas (*routes*).

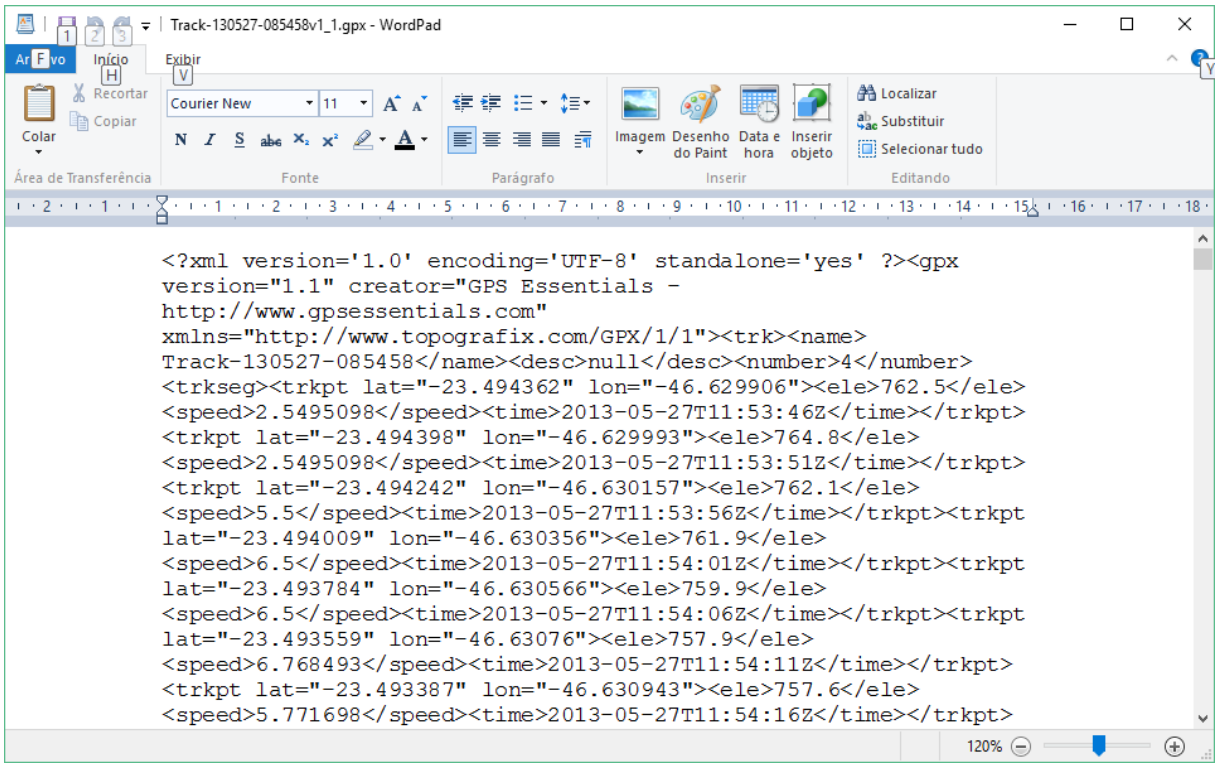
Os seus principais benefícios são:

- Facilitar a troca de informação entre aplicações e infra-estruturas tecnológicas (MS Windows, MacOS, Linux, etc) diversas;

- Fácil conversão para formatos proprietários, fato que tem contribuído para um grande suporte dos fabricantes;
- Ser baseado em formatos abertos (XML).

Internamente, os arquivos GPX são documentos XML que obedecem a estruturas específicas quanto ao conteúdo e semântica, designadas de XML *Schema Definition* públicas. A primeira versão foi desenvolvida e tornada pública em 2002. A Figura 24 mostra um trecho do arquivo obtido de um aplicativo para telefones celulares, que coleta dados do modulo GPS de um telefone.

Figura 24 – Exemplo de sentenças GPX.



Fonte: Autor (2018).

Apesar de gerar arquivos capazes de associar uma série de atributos relacionados à localização geográfica e ainda assim ocupar pouco espaço de armazenamento em disco, os arquivos no formato GPX, não fornecem informações relativas à obtenção do cálculo da solução de navegação, tais como o número de satélites utilizados, DOPs e relação sinal ruído entre outras desejáveis.

3.6.2 Arquivos NMEA

Inicialmente proposto em 1983 como diretriz para a comunicação na navegação de embarcações, o NMEA 0183 ou simplesmente NMEA, é um padrão internacional desenvolvido pela *United States National Marine Electronics Association*, para dados de posicionamento por GPS. Vários tipos de mensagens com este padrão contêm informações sobre a posição, precisão e indicadores de qualidade, velocidade, tempo e satélites visíveis e rastreados (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008). Este formato é suportado por quase todos os receptores GNSS comerciais. É um fluxo de informações em formato de texto ou *"American Standard Code for Information Interchange"* – ASCII (Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação) e em sentido único, que parte do receptor GNSS para um determinado dispositivo (MISRA; ENGE, 2006). Sendo assim, não possui comandos de configuração do receptor, que deve ser feita de outra maneira, seguindo orientações do fabricante.

Os dados são enviados de um equipamento transmissor para outro receptor, no formato de sentenças com o cumprimento máximo de 82 caracteres. Cada sentença começa com o delimitador de início, o *"$"* (cifrão) e termina com o delimitador "<CR><LF>" (*carriage return, line feed* – quebra de linha, nova linha). A sentença contém um determinado número de campos formados pelo endereço, que identifica o tipo de transmissor e de sentença, zero ou mais campos de dados, os campos nulos também são delimitados por vírgulas (,) mas não contêm nenhuma informação e um campo opcional de verificação, através de um controle de soma ou *checksum*, para averiguar se houve erros de transmissão. Cada campo, com exceção do identificador de sentença e do código verificador, inicia-se por uma vírgula, como delimitador de campo (LANGLEY, 1995).

O campo de endereço é formado por cinco caracteres, os dois primeiros identificam o tipo de transmissor (identificador de transmição), até 2002 (NATIONAL MARINE ELECTRONICS ASSOCIATION, 2002) existiam 40 diferentes tipos de identificadores, desde AG para pilotos automáticos até o WI para instrumentos de tempo; no caso do posicionamento por satélites, os principais são: GP para GPS, GL para GLONASS, GA para GALILEO e GN para GNSS. Os três caracteres restantes são os formatadores de sentenças aprovadas, que identificam os tipos particulares de

dados que estão sendo transmitidos (91 tipos até 2002, em 2013 já eram 734), um resumo dos mais utilizados nos receptores GNSS estão compilados na Tabela 4.

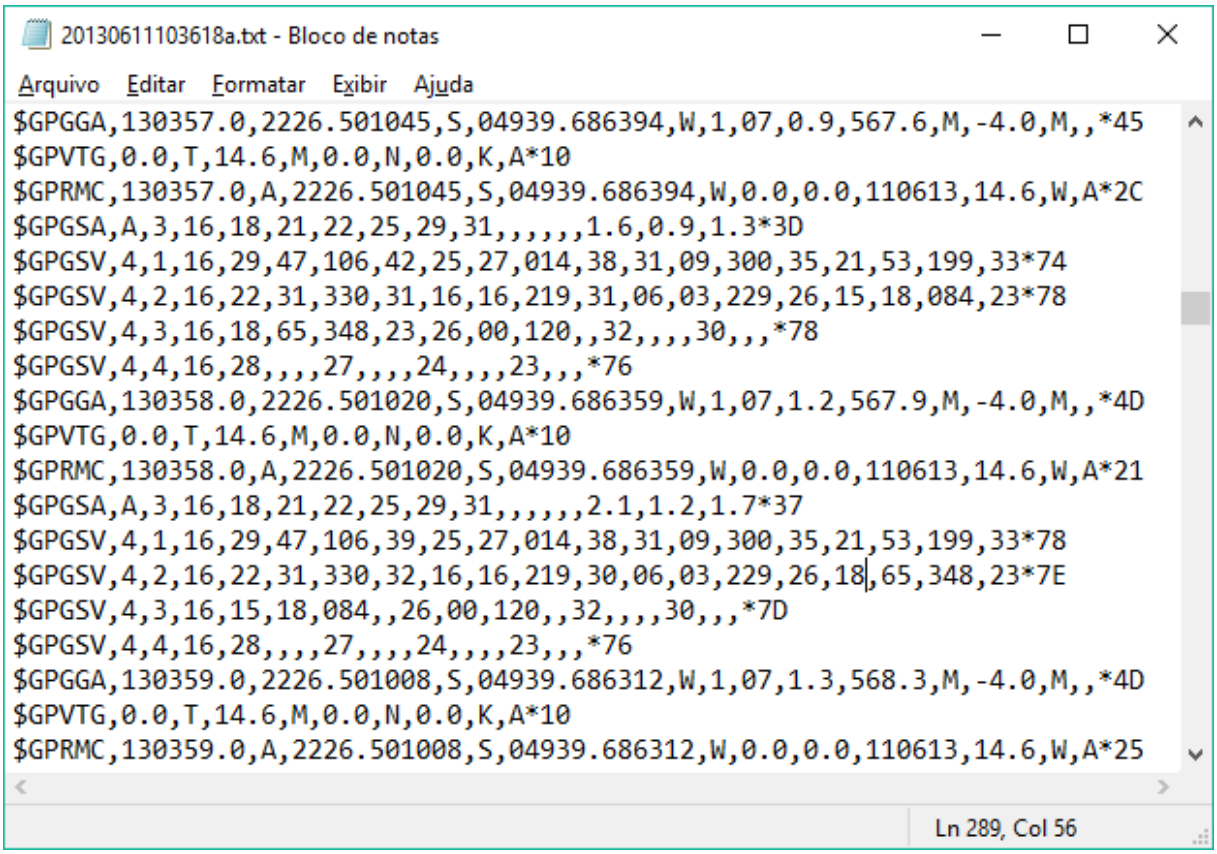
Tabela 4 – Saídas de sentenças NMEA para GPS, GLONASS e GALILEO

Sistema	GGA	GSA	GSV	RMC	VTG
GPS	$GPGGA	$GPGSA	$GPGSV	$GPRMC	$GPVTG
GPS GLONAS	$GNGGA	$GPGSA $GLGSA	$GPGSV $GLGSV	$GNRMC	$GNVTG
GPS GALILEO	$GNGGA	$GPGSA $GAGSA	$GPGSV $GAGSV	$GNRMC	$GNVTG
GPS GLONASS GALILEO	$GNGGA	$GPGSA $GLGSA $GAGSA	$GPGSV $GLGSV $GAGSV	$GNRMC	$GNVTG

Fonte: Autor (2018).

A Figura 25 mostra um exemplo das informações dispostas nas sentenças NMEA obtidas de um aplicativo para telefones celulares, que coleta dados do modulo GPS do telefone.

Figura 25 – Exemplo de sentenças NMEA.



Fonte: Autor (2018).

Das sentenças fornecidas as mais interessantes para o presente trabalho são (BETKE, 2001):

- $GPGGA (Global Positioning System Fix Data), que informa o horário, posição latitude e longitude com os respectivos hemisférios, qualidade da fixação das coordenadas, número de satélites que foram rastreados, diluição da precisão horizontal (HDOP), a altitude em metros e altura geoidal.
- $GPGSA (GPS Satellite Status), que informa a seleção de 2D ou 3D se automática ou manual, se fixa em 2D, 3D ou não fixa, quais satélites foram utilizados no processo, diluição da precisão posicional (PDOP), diluição da precisão horizontal (HDOP), diluição da precisão vertical (VDOP).

3.6.3 Arquivos RINEX

O *"Receiver Independent Exchange Format"* – RINEX (Formato de Intercâmbio Independente de Receptor) foi apresentado pela primeira vez em 1989 durante o workshop sobre formatos de intercâmbio de receptores em Las Cruces, Novo México, EUA (GURTNER; ESTEY, 2007). O principal intuito foi o de padronizar um formato universal para todos os equipamentos e fabricantes de modo a permitir que as observáveis coletadas pelo receptor de um determinado fabricante possam ser interpretadas por qualquer *software* de processamento geodésico.

Como foi apresentado em sua primeira versão, o formato definia três diferentes tipos de arquivos: arquivo de observações, de navegação e de dados meteorológicos. Cada arquivo consiste em uma seção de cabeçalho contendo o vértice, o receptor, informações referentes à antena, tempo e intervalo de rastreio e informações sobre as observáveis; seguido de um corpo principal com os dados do rastreio propriamente ditos. Possuem um comprimento máximo de 80 caracteres por linha e são gerados em ASCII, para facilitar o intercambio em diferentes sistemas computacionais.

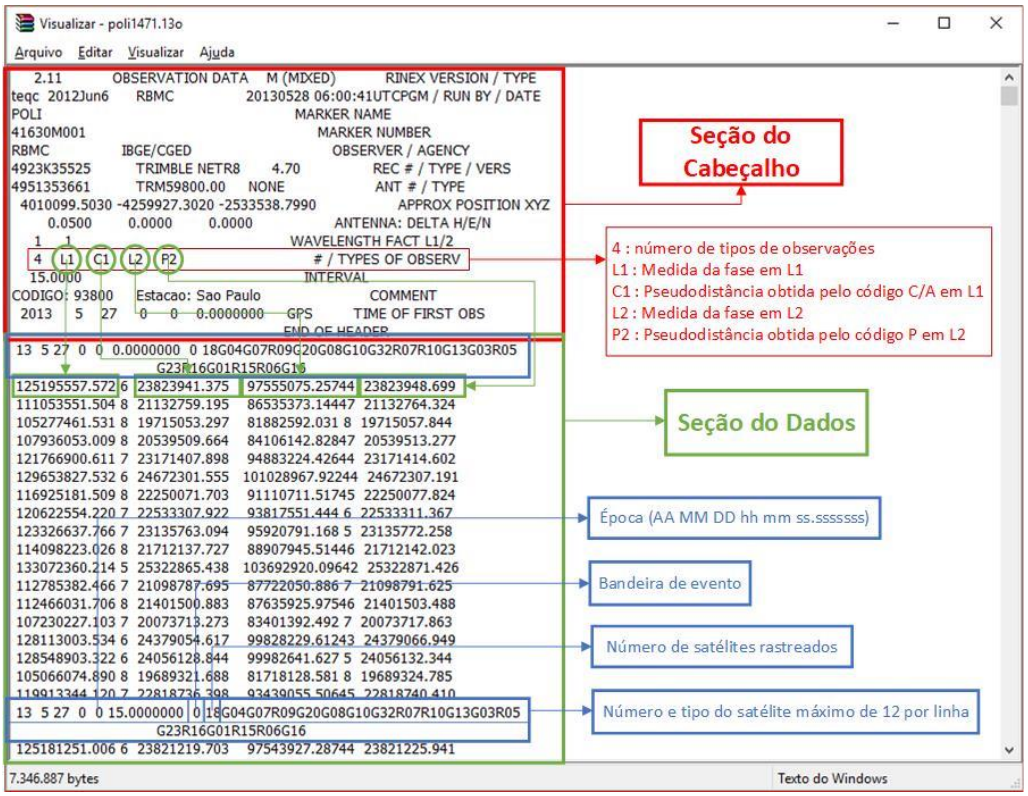
Após passar por várias versões, para a inclusão de novos sistemas de navegação por satélite e novos tipos de observáveis, tais como o europeu GALILEO, o japonês QZSS, o chinês BeiDou além do indiano IRNSS, a versão 3.03 conta hoje com 6 tipos diferentes de observáveis em 10 bandas de frequência para 7 sistemas

de satélites (IGS INFRASTRUCTURE COMMITTEE et al, 2015 e INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS) et al, 2017).

Contudo, o presente trabalho foi baseado apenas na banda L1 e nas observáveis de medida de fase e no código C/A, que serão descritos neste tópico.

Cada tipo de arquivo está dividido em duas seções: cabeçalho e seção de dados. O cabeçalho contém informações globais do conteúdo do arquivo e é posicionado no início do arquivo, as informações contidas em cada uma das linhas estão rotuladas nas colunas de 60 a 80 de cada uma das linhas. A Figura 26 mostra uma parte do arquivo RINEX de observáveis, onde pode-se ver destacado em vermelho o cabeçalho e em verde a seção de dados.

Figura 26 – Arquivo de Observáveis RINEX.



Fonte: Autor (2018).

Estes rótulos são obrigatórios, devem estar no cabeçalho, mesmo que não contenham informações e deve estar na seguinte ordem:

- RINEX VERSION / TYPE versão do RINEX e tipo de arquivo

- PGM / RUN BY / DATE programa, agencia e data de criação do arquivo
- MARKER NAME nome do marco
- MARKER NUMBER número do marco
- OBSERVER / AGENCY nome e instituição responsáveis pelas observações
- REC # / TYPE / VERS número, tipo versão do receptor
- ANT # / TYPE número e tipo da antena (códigos NGS)
- APPROX POSITION XYZ coordenadas aproximadas do marco (caso não sejam fornecidas as coordenadas oficiais, devem ser obtidas pelo receptor)
- ANTENNA: DELTA H/E/N altura da antena e excentricidades em relação ao marco, para norte e este (em metros)
- WAVELENGTH FACT L1/2 fatores de comprimento da onda para L1 e L2
- # / TYPES OF OBSERV número e tipo de observações
- INTERVAL intervalo de rastreio (entre as épocas) em segundos
- TIME OF FIRST OBS horário da gravação de primeira observação

Desde a versão 2, o cabeçalho termina com a cadeia de caracteres “END OF HEADER”, o que facilita aos programas de leitura de arquivos na demarcação do fim do cabeçalho e início da seção de dados.

A seção de dados está dividida em blocos com as observáveis para cada uma das épocas rastreadas, iniciando com o horário das medidas, é o horário do relógio do receptor (não o horário de transmissão) no momento de recepção do sinal; é idêntico para as medidas de fase e de código e para todos os satélites observados naquela época. É expresso no tempo GPS (não no tempo UTC) e no formato AA MM DD hh mm ss.ssssssss – ano, mês, dia, hora, minuto, com dois inteiros separados por um espaço e segundos com número fracionário.

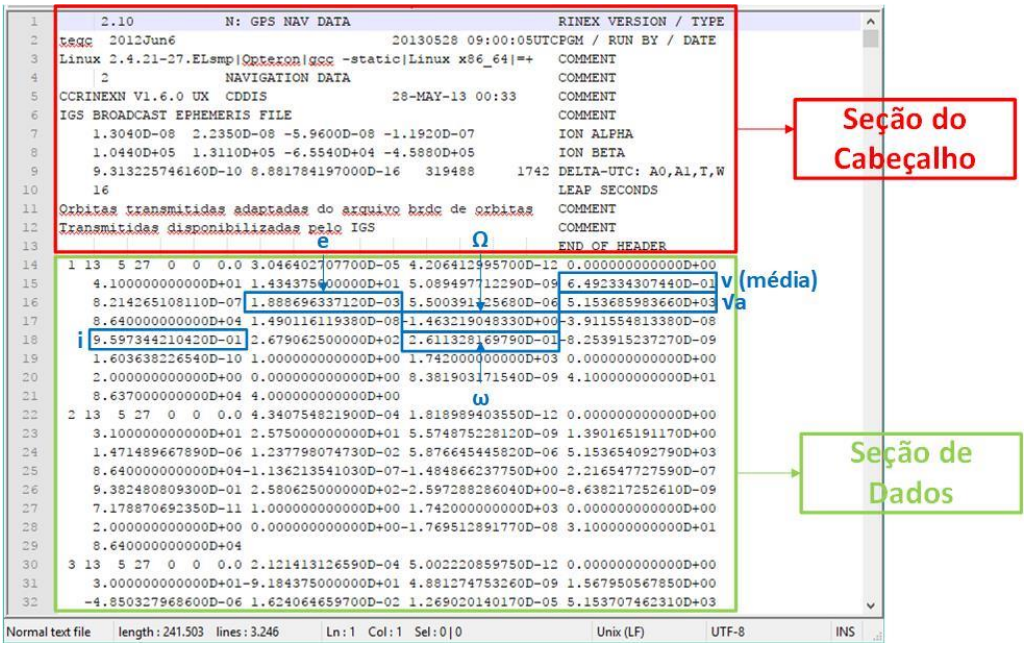
O segundo campo diz respeito à bandeira de evento, sendo o valor 0 (zero) para nenhuma anomalia, 1 para falha de energia entre a época anterior e a atual, 2 o começo de movimentação da antena, 3 para a ocupação de um ponto (o nome do ponto “MARKER NAME” é fornecido entre as épocas), 4 a indicação que existe continuação das informações do cabeçalho, 5 para eventos externos e 6 para perda de ciclo da fase. No terceiro campo é indicado o número de satélites rastreados e logo em seguida a numeração (PRN para os GPS) de cada um destes satélites, precedido

do tipo de satélite; não excedendo o máximo de 12 satélites por linha e não necessariamente em ordem crescente.

A partir daí segue o bloco das observáveis para cada um dos satélites, sendo que a ordem dos satélites é a mesma apresentada no bloco da época e a ordem do tipo de observável é a mesma apresentada no cabeçalho na linha “# / TYPES OF OBSERV”. As unidades são típicas da natureza de cada medida; ciclos da portadora para fase ou em metros para a pseudodistância obtida pelo código, no caso da relação sinal ruído pode ser tanto o SNR como o C/N_0, dependendo do receptor. Há a limitação máxima de 5 observáveis por linha (igual a 80 caracteres), caso o número de observáveis exceda esta limitação devem ser dispostas em duas ou mais linhas.

Já os arquivos de navegação (efemérides ou órbitas transmitidas) são divididos de acordo com o sistema de satélites e sua identificação na extensão do nome do arquivo. A metodologia de padronização segue a mesma divisão de seções, ou seja, cabeçalho e dados. Os dados são divididos em blocos por satélite, fornecendo informações sobre a sua movimentação descrevendo a sua órbita na forma de elementos Keplerianos. A Figura 27 mostra um exemplo de arquivo RINEX de efemérides de GPS, onde estão destacados os seis elementos que descrevem a orbita do satélite.

Figura 27 – Arquivo de efemérides GPS RINEX



Fonte: Autor (2018).

Formado por seis elementos, raiz quadrada do semi-eixo maior (√a), excentricidade da órbita (e), inclinação da órbita (i) no tempo de origem das efemérides (to_e), ascensão reta do nodo ascendente no to_e (Ω), argumento do perigeu (ω) e anomalia média no to_e (v); não são os únicos elementos necessários para o cálculo da posição dos satélites, nem as únicas informações dispostas no arquivo. São fornecidas também os parâmetros de tempos e parâmetros perturbadores, entre outros. A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** mostra a disposição dos dados contidos no bloco.

Tabela 5 – Dados enviados de cada satélite

Número do satélite e época	**a0**	**a1**	**a2**
IOD	Crs	Δn	Mo to_e
Cus	e	Cus	√a
to_e	Cic	Ω	Cis
i	Crc	ω	Ω dot
i dot	L2	Semana GPS	Código L2 P
Acurácia do satélite	Saúde do satélite	TGD	IODC
Tempo de transmisão	Livre	Livre	Livre

Fonte: Autor (2018).

Os blocos são separados por satélite em uma dada época, a sequência, ou seja, a ordem dos satélites não é necessariamente crescente, assim como os dados não estão necessariamente em ordem cronológica; isto acontece geralmente quando o arquivo de órbitas transmitidas são obtidos de alguma estação de monitoramento e não diretamente do receptor.

Para maiores informações sobre os arquivos RINEX, consultar Gurtner e Estey (2007) e Monico (2007).

3.6.4 Interface de dados em formato proprietário

Entre os vários formatos utilizados para transmissão de dados GNSS encontram-se as soluções de formato binário e de texto (ASCII), com diferentes níveis de complexidade. Para os formatos de intercambio internacionais, tais como RINEX,

NMEA e RTCM, tanto o formato binário quanto o de texto são utilizados (GURTNER; ESTEY, 2007).

Entretanto, a grande maioria de fabricantes de receptores estabelecem seus próprios protocolos de comunicação e transferência de dados; desta forma, informações tais como posição, velocidade, altitude, status, entre outras, assim como comandos podem ser enviados em uma via de mão dupla (ZOGG, 2002).

Um destes formatos binários utilizados na presente pesquisa é o protocolo desenvolvido pela SiRF Technology Inc.; neste protocolo, além do conjunto de informações básicas inerentes ao tempo e posicionamento das transmissões padrão de GPS, também foram incorporadas uma série de dados de diagnóstico implementadas nos testes dos processos do receptor. São mais de cem tipos de mensagens com os mais variados tipos de informações, que assim como o RTCM, são transferidas no formato binário, porém, esta é a única similaridade, pois foram desenvolvidos para propósitos diferenciados (OSZCZAK; SERŻYSKO, 2011). Entre as informações contidas estão:

- Pseudodistâncias, expressas em metros (sem incluir as correções do relógio, ionosfera e troposfera, por exemplo 29337863.355 m);
- Valores de correção do relógio dos satélites, expressa em segundos (exemplo: 0.000154071323924 s);
- Valor da correção do relógio do receptor, expressa em nano segundos (exemplo: 13336281 ns);
- Valor do erro na medida devido a refração ionosférica, expressa em metros (por exemplo: 3.2853796482 m – decodificado diretamente sem a utilização da regra de Bradis-Krylov);
- Posição e a velocidade dos satélites, expressos em metros e metros por segundo e no sistema de coordenadas cartesiano (XYZ);
- Relação sinal ruído, expressos em dB-Hz;
- Outros parâmetros para definição do estado corrente do receptor apresentados em valores Booleanos.

O protocolo binário da SiRF define as regras para o envio e o recebimento dos dados utilizados nos módulos GPS. Hoje existem mais de 180 tipos diferentes entre

mensagens de entrada e saída identificadas pelo sigla MID *"Message ID"* ou identificador de mensagem, as quais possibilitam o controle e configuração dos receptores e são estruturados em camadas (SIRF TECHNOLOGY, 2009 e SIRF TECHNOLOGY, 2010). As camadas podem ser estruturadas em:

- Camada de transporte – encapsula o pacote de mensagens, através da determinação do começo e do fim com caracteres de fácil identificação e improvável ocorrência nos dados (0xA0, 0xA2 para o começo e 0xB0, 0xB3 para o final);
- Camada de controle – contém informações sobre o corpo da mensagem, tais como o comprimento e a validação *checksum*;
- Carga de transmissão de dados – contém o atual bloco de dados que transporta as informações.

A estrutura do protocolo binário é transportada na forma de quadros contendo as mensagens apropriadas. Cada quadro contendo uma mensagem de entrada ou saída é estruturada da mesma maneira. A Figura 28 demonstra a estrutura dos quadros e conjunto com a Tabela 6 detalha suas camadas individuais, os valores são fornecidos no formato hexadecimal.

Figura 28 – Estrutura dos quadros de mensagens do protocolo SiRF.

Fonte: Autor (2018).

Tabela 6 – Detalhe das camadas individuais da estrutura dos quadros da mensagem

Componente do Quadro	Valor	Descrição
Começo da Sequência	0xA0, 0xA2	Parte permanente de cada estrutura, especificando o começo
Comprimento do Bloco	2 Bytes (15 bits)	Número com dois bytes especificando o número de bytes no bloco de mensagem

Componente do Quadro	Valor	Descrição
Bloco de Dados	Até 1023 bytes ($2^{10} – 1$)	Bloco de dados contendo a informação
Validação	2 Bytes (15 bits)	Soma de 16 bit dos valores de todos os bytes na seção do bloco de dados
Fim da Sequência	0xB0, 0xB3	Parte permanente de cada estrutura, especificando o final

Fonte: Autor (2018).

O sistema apresentado acima é utilizado em todas as mensagens do protocolo binário da SiRF. Os dados são fornecidos exatamente nesta ordem. Apenas o comprimento do bloco de dados possui variações em bytes para cada tipo de mensagem, o que justifica o quadro com a informação de seu comprimento. A Figura 29 demostra um exemplo de uma cadeia hexadecimal demonstrando a estrutura de uma mensagem binária completa, no caso a MID 7 – Dados do Estado do Relógio do Satélite.

Figura 29 – Exemplo da cadeia hexadecimal da estrutura da mensagem MID 7

Fonte: Autor (2018).

As mensagens contidas no bloco de dados podem ser de vários tipos, na maior parte das vezes, tratam-se de números naturais, sendo inteiros ou decimais de simples ou dupla precisão. Porém, existem também os campos alfanuméricos e os booleanos. Dentro do bloco, os dados são organizados em série com uma quantidade específica de bytes para cada parte da informação, assim uma informação é seguida da próxima sem a utilização de separadores, apenas pelo tamanho da informação. No caso do exemplo anterior, a mensagem MID 7 está detalhada na Tabela 7, e os outros tipos de mensagem podem ser vistos em Cambridge Silicon Radio Limited (2013).

Tabela 7 – Informações contidas na estrutura de dados MID 7

Nome	Bytes	Binário (HEX)		Unidade	ASCII (Decimal)	
		Escala	Exemplo		Escala	Exemplo
Identificador da mensagem	1 U		07			7
Semana GPS Extendida	2 U		03BD			957
GPS TOW	4 U	*100	02154924	s	÷100	349494,12
SVs	1 U		08			8
Deriva do relógio	4 U		00012231	Hz		74289
Erro do relógio	4 U		00004728	ns		18216
Tempo GPS estimado	4 U		14D4DAEF	ms		349493999

Fonte: Adaptado de Cambridge Silicon Radio Limited (2013).

3.6.5 High sensitivity GPS – HSGPS

Existem dois modos operacionais fundamentais para os receptores GPS, o primeiro é normalmente denominado de aquisição e o segundo de rastreamento (ZHANG et al., 2010). O segundo habilita o posicionamento em 3D caso haja pelo menos quatro satélites acessíveis; a partir daí o receptor continua a fornecer coordenadas, desde que o mínimo de quatro satélites continue a ser rastreados.

Assim como comentado no item 2.3, no modo de aquisição, caso não haja dados assistidos (A-GPS), o receptor assume que um satélite está visível e aloca um canal para este satélite. Neste momento existem duas variáveis desconhecidas para a procura: a primeira é a frequência exata da portadora para cada satélite, a qual muda pelo efeito Doppler causado pelo movimento relativo entre o receptor e o satélite, assim como pela deriva do oscilador do receptor e a segunda é o alinhamento entre o receptor e o número do pseudocódigo (PRN) (PARKINSON, 1996). Sendo o valor do Doppler desconhecido, o receptor necessita realizar uma busca em uma extensa faixa de frequências. Caso a aquisição esteja sendo feita no domínio do tempo, o receptor gera um código PRN local e tenta alinhá-lo com os transmitidos pelos satélites, o que

leva um ou mais segundos para cada uma dos 30 avanços na faixa de procura causadas pelo efeito Doppler (LI et al., 2010).

Após a aquisição do sinal do primeiro satélite, inicia-se o rastreamento e o receptor passa a decodificar os dados de navegação transmitidos, dos quais: o horário, dados das efemérides, o almanaque, entre outros; sendo o almanaque utilizado para a localização e a obtenção do efeito Doppler para os demais satélites da constelação, a extração destas informações a partir da mensagem de navegação modulada leva de 18 a 30 segundos, dependendo do ponto de início da decodificação. Entretanto, caso haja perda do sinal ou de algum bit da mensagem, o tempo para se extrair integralmente a mensagem de navegação aumenta consideravelmente. Em ambientes de difícil recepção dos sinais, a operação de decodificação fica ainda mais dificultosa ou até mesmo impossível de ser realizada por um receptor GPS convencional.

Sendo esperado que os sinais transmitidos pelos satélites cheguem enfraquecidos nas antenas dos receptores (entre -155 dBw a -160 dBW) e ainda mais atenuados pela temperatura do ruído, uma classificação da potência do sinal em três categorias pode ser feita de acordo com Zhang et al (2010):

- Sinal forte: > -172 dBW, quando a antena dos receptores possui uma clara visão do céu, operando em campo aberto ou em regiões residenciais com construções baixas.
- Sinal fraco: de -172 dBW à -180 dBW, ambientes perturbadores, causadores de ruídos, tais como embaixo de folhagens ou mata, dentro de construções, mas próximo às janelas e em cânions urbanos.
- Sinal muito fraco: de -180 dbW à -190 dBW, as antenas recebem apenas sinais muito fracos, refletidos e com multicaminhamento, típicos de ambientes internos aos edifícios longe de portas ou janelas, ou mesmo dentro de veículos e estacionamentos.

Isto posto, os receptores GPS convencionais trabalham bem em ambientes com sinais fortes, mas possuem dificuldades em rastrear satélites e podem simplesmente não conseguir achar uma solução de posicionamento em ambientes com sinais fracos ou muito fracos.

Para alguns propósitos a exatidão do posicionamento é essencial, porém, para outros é preferível possuir uma localização imprecisa do que não possuir uma localização. Assim existem algumas maneiras de melhorar a sensibilidade do receptor, uma delas é simplesmente aumentando o tempo de integração entre o receptor e o sinal recebido. Os receptores convencionais integram os sinais por 1ms, que é a duração de um ciclo completo do código C/A, o que limita a capacidade do receptor para adquirir e rastrear sinais, tornando-os eficazes a operar com nível de sinais em torno dos -160 dBW, não obstante o tempo de integração pode ser aumentado para até 20ms. A faculdade de prever um bit da transmissão na mensagem de navegação possibilita um tempo de integração coerente muito maior, de 100 ms a 1000 ms. O uso de técnicas de integração não-coerentes auxiliam na resolução deste problema (LACHAPELLE et al., 2004). Entretanto apenas aumentando o tempo da integração pode tornar a operacionalidade impraticável devido ao tempo de aquisição dos satélites, em todo caso, aumentando o número de correlatores possibilita o uso de rápidas e profundas técnicas de procura dos sinais (SCHWIEGER, 2007).

Os receptores HSGPS são geralmente utilizados com o auxílio do A-GPS, pois entre as informações fornecidas estão os satélites a serem rastreados e as alterações de frequência devido ao efeito Doppler, entretanto o alinhamento do código (PRN) entre o satélite e o receptor requer uma medida de tempo mais acurada, menor que 1ms, a qual normalmente não está acessível. A utilização conjunta do A-GPS diminui o TTFF e o recebimento dos dados das mensagens de navegação por outro meio que não a portadora, propicia uma melhora significativa da sensibilidade do receptor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 APLICATIVOS PARA ANDROID

A maioria das funcionalidades dos aparelhos de telefonia celular são inicializadas através de pequenos programas, também chamados de aplicativos.

Como o intuito é reduzir custos e efetuar cálculos, procurou-se optar por aplicativos que além de gratuitos, forneçam no visor e principalmente, gravem as coordenadas ou as informações necessárias, disponibilizadas pelo *chipset* do GPS do celular.

Estes dados deveriam ser armazenados em um formato de fácil importação por programas de geoprocessamento, e assim uma boa opção seria então o GPX (GPS eXchange Format, Formato de Intercâmbio GPS), que é um formato de dados leve (de pequeno tamanho) baseado no conceito XML para o intercâmbio de dados de GPS (pontos cadastrados, rotas e trilhas) entre aplicativos e serviços da WEB na Internet.

Entretanto este formato não fornece maiores informações acerca do cálculo do posicionamento, o que poderia ser solucionado no formato NMEA, caso o SO em conjunto com os aplicativos e *chipset* do GPS fornecessem todas as sentenças necessárias, o que até a versão 6 do Android não era possível e na versão 7 para uma quantidade muito limitada de modelos (em torno de 2 ou 3).

Rohm (2011) propõe a utilização da mensagem NMEA GRS, a qual fornece o valor dos resíduos do MMQ no cálculo da solução do posicionamento, que em conjunto com as mensagens GGA e GSV, poderiam ser utilizadas para o cálculo inverso do MMQ, e assim chegar-se às pseudodistâncias, tal procedimento passa a não ser possível, tendo em vista que a mensagem GRS não é disponibilizada pelo sistema.

Desta forma as informações disponíveis e os aplicativos utilizados são descritos a seguir.

4.1.1 Aplicativo GPS Essentials

Entre as informações obtidas e disponibilizadas por este aplicativo estão a altitude, a velocidade, o nível de inclinação (ângulo de inclinação com relação à horizontal), a data, a distância percorrida a partir da origem, a latitude, a longitude, o tempo decorrido a partir da origem, a hora do nascer e pôr do sol e outras mais sem muita relevância para este projeto.

Ele ainda conta com uma tela de visualização da bússola, desde que o aparelho no qual está instalado possua tal dispositivo; gravação de caminhos com exportação para o Google Maps ou Google Earth; sistema para gerenciar rotas e visualizá-las no mapa; câmera para mostrar pontos de referência e integração com outros serviços disponíveis via web, como o MapQuest e o OpenStreetMap. Além de gravar e exportar estas rotas nos formatos KML (Keyhole Markup Language) e GPX. A Figura 30 mostra algumas das diferentes telas e funções disponíveis no aplicativo.

Figura 30 – Telas do Aplicativo GPS Essential para Android.

Fonte: Autor (2018).

4.1.2 Aplicativo GPS NMEA Tool

Este pequeno aplicativo disponibiliza na tela e grava todas as sentenças no formato NMEA fornecidas pelo GPS do celular; sendo elas: $GPGSV, $GPGGA, $GPVTG, $GPRMC e $GPGSA; além de mostrar a posição e a força do sinal dos satélites rastreáveis. Possui, também uma interface amigável e de fácil utilização , ficando a taxa de gravação a critério do usuário. A Figura 31 mostra algumas das diferentes telas e funções disponíveis no aplicativo. A versão gratuita possui a

restrição de 9999 sentenças por seção o que pode ocorrer em menos de 20 minutos no caso de um *chipset* com GPS e GLONASS.

Figura 31 – Telas do Aplicativo GPS NMEA Tool para Android.

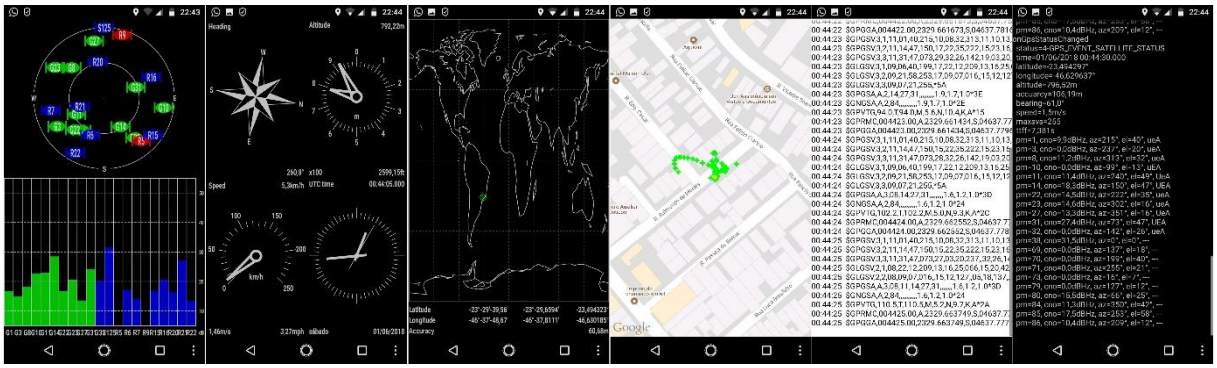
Fonte: Autor (2018).

4.1.3 Aplicativo u-center

O aplicativo é a solução da U-blox para o SO Android, que permite a integração e a avaliação das funcionalidades de dispositivos GNSS embarcados em dispositivos com este SO.

Assim como o mencionado anteriormente, o aplicativo além de exibir e gravar todas as mensagens NMEA disponibilizadas pelo SO, possui funcionalidades para o controle do A-GPS, é gratuito e sem restrições de uso (U-BLOX AG, 2015). A Figura 32 mostra algumas das diferentes telas e funções disponíveis no aplicativo.

Figura 32 – Telas do Aplicativo u-center para Android.



Fonte: Autor (2018).

4.2 PROGRAMA DE CARTOGRAFIA DIGITAL / GEOPROCESSAMENTO

Uma das maneiras de se verificar a consistência dos dados coletados é desenhar as coordenadas obtidas e dados derivados sobre uma base cartográfica. Desta maneira, pode-se obter uma estimativa visual simples e rápida do comportamento e consistência das coordenadas obtidas. Assim, neste item serão descritos o programa e os complementos a serem utilizados na presente pesquisa.

Por dados derivados entende-se, por exemplo, escrever a data ou horário de obtenção da posição, que possibilita examinar o espaçamento entre os pontos e verificar anomalias; desenhar setas com o sentido de caminhamento do veículo que carrega o receptor e fazer outras análises comparativas com dados de outros receptores, verificando discrepâncias, derivas e assinalar os pontos com problemas.

4.2.1 Base Cartográfica

Uma base cartográfica ou base de dados com informações cartográficas pode ser entendida como uma estrutura espacial, que representa os aspectos do mundo real, produzida através de métodos específicos de transformação e projeção de superfícies apoiados e consistente com um Sistema Geográfico de Referência (SGR).

A Norma Brasileira NBR 14.166 (1998), que estabelece os procedimentos para implantação da rede de referência cadastral municipal, define base cartográfica como:

> *"conjunto de cartas e plantas integrantes do Sistema Cartográfico Municipal que, apoiadas na rede de referência cadastral, apresentam, no seu conteúdo básico, as informações territoriais necessárias ao desenvolvimento de planos, de anteprojetos, de projetos, de cadastro técnico e imobiliário fiscal, de acompanhamento de obras e de outras atividades que devam ter o terreno como referência".*

É claro que essas cartas e plantas podem estar em meio digital e que sua qualidade deve ser conhecida ou controlada, para que se executem trabalhos confiáveis.

Pode ser utilizada como ferramenta para a obtenção de informações georreferenciadas, assim como facilitar a visualização e análise de dados obtidos "*in loco*".

Descreve-se a seguir algumas bases de referência e programas utilizados na presente pesquisa.

4.2.1.1 O Mapa Digital da Cidade da Cidade de São Paulo

O Mapa Digital da Cidade (MDC), base digital cartográfica digital cadastral nas escalas 1:1.000, na área urbana e 1:5.000, na área rural do Município de São Paulo, é o resultado de um levantamento aerofotogramétrico realizado no ano de 2004 com recursos do programa de Modernização da Administração Tributária (PMAT), do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) e disponibilizadas para o público em geral, via rede mundial de computadores no portal da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano (SMDU) a partir do final de 2011, começo de 2012 (ARAUJO, 2010; CORRÊA; NEVES, 2009; PMSP, 2002; PMSP, 2009).

Estão disponíveis a base planimétrica nos formatos pdf, dxf e shp e o Modelo Digital do Terreno – MDT, no formato dxf. Esse mapeamento está articulado conforme o Sistema Cartográfico Metropolitano – SCM, em 3926 folhas para que os usuários possam descarregar em seus computadores (fazer download).

Para o levantamento aerofotogramétrico foram necessários:

Faixas de Vôo:

- *Escala 1:1.000:* *91 faixas*
- *Escala 1:5.000:* *18 faixas*

Fotografias Aéreas:

- *Escala 1:5.000:* *11.920 fotos*
- *Escala 1:25.000:* *510 fotos*

Apoio Terrestre (vértices implantados):

- *Rede principal:* 15 vértices
- *Rede secundária I:* 31 vértices
- *Rede secundária II:* 31 vértices

Geocodificação fiscal (entidades geocodificadas):

- *Distritos:* 96
- *Setores:* 309
- *Lotes:* 1.800.000 (aprox.)

Em 2017 através do decreto nº 57.770 (PMSP, 2017) houve uma modernização da plataforma, além de alterar o nome e oficializar o Geosampa como a base oficial do município, dá diretrizes importantes quanto à organização dos dados municipais e sua disponibilização ao cidadão (PMSP - PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2017b).

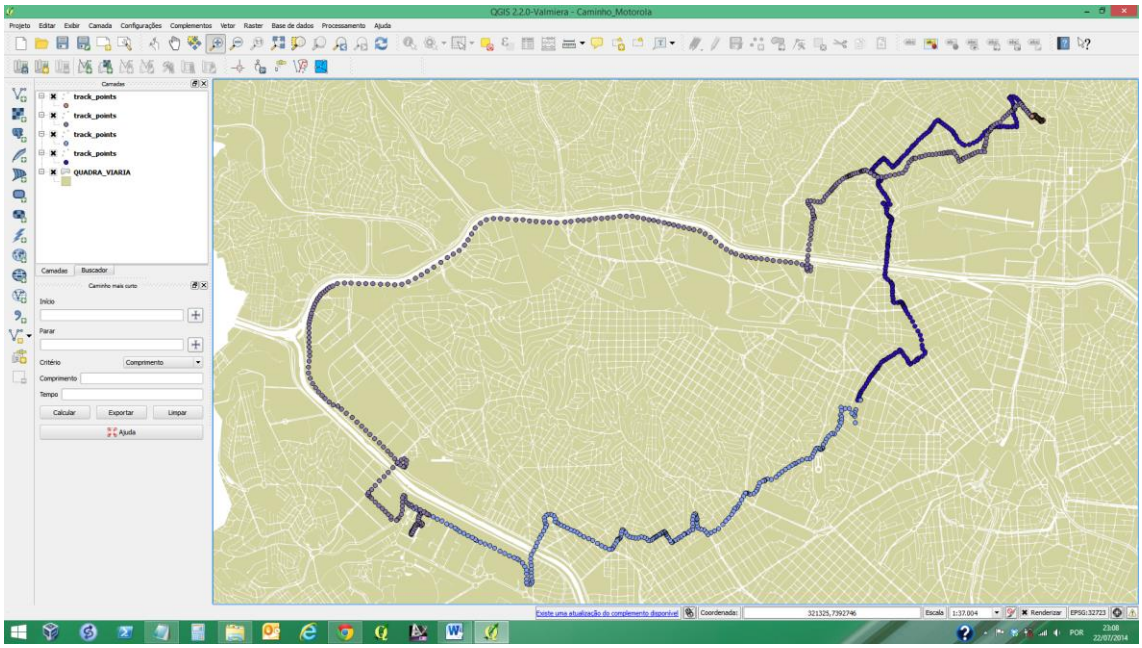
4.2.1.2 Projeto Mapeia São Paulo

O projeto Mapeia São Paulo foi desenvolvido pelo Governo do Estado de São Paulo, por meio da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Regional, da Casa Civil de Governo, da Sub-Secretaria de Desenvolvimento Metropolitano e da Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A (Emplasa), com Ortofotos e Modelos Digitais de Superfície, na escala 1: 25 000, para todo o território do Estado (EMPLASA, 2012).

4.2.2 Programa Quantum GIS

Continuando com a intenção de baixar ao máximo possível os custos do projeto, o programa SIG escolhido foi o Quantum GIS. O Quantum GIS (QGIS) é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) amigável, um Software Livre licenciado sob a “GNU General Public License”. QGIS é um projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), pode ser instalado nos SOs Linux, Unix, Mac OSX e Windows e suporta vários formatos: vetoriais, raster, de banco de dados em conjunto com outras funcionalidades. Fornece um número crescente de capacidades através de suas principais funções e complementos, desenvolvidos por usuários e disponíveis na internet, com os quais se pode visualizar, gerenciar, editar, analisar dados e compor mapas impressos (QGIS EQUIPE DE DESENVOLVIMENTO, 2015). A Figura 33 mostra uma tela do programa.

Figura 33 – Tela do Quantum GIS com a plotagem das coordenadas coletadas.



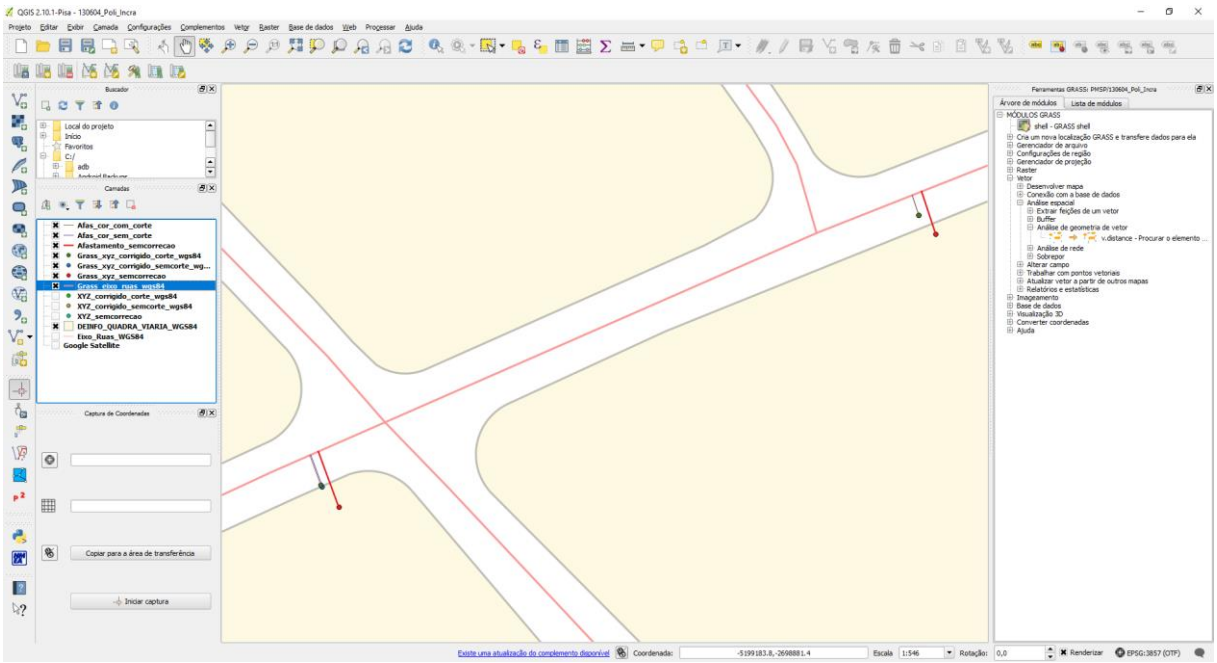
Fonte: Autor (2018).

4.2.2.1 O GRASS-GIS

O GRASS-GIS (Geographic Resources Analysis Support System) é um SIG, com módulos para processamento e georreferenciamento de imagens multiespectrais, manipulação de dados em formato raster e vetorial, com interfaces para bancos de dados PostgreSQL, MySQL, SQLite, DBF, e ODBC, além de poder ser conectado a UMN/Mapserver, R-stats, gstat, Matlab, Octave, Povray, Paraview e outros programas como o QGIS (GROHMANN, 2008).

A integração com o Quantum GIS oferece um acesso direto ao banco de dados do GRASS através de um *plugin* apropriado. No caso do presente trabalho uma ferramenta vetorial de analise espacial em particular foi a de maior interesse: v.distance. O método encontra de uma maneira muito rápida, a menor distância entre os pontos de uma camada vetorial e uma linha ou poli linha de outra camada vetorial. Esta distância é formada por um vetor perpendicular à linha de referencia e pode tanto ser plotada na tela como exportada para uma coluna da tabela de atributos para análises estatísticas posteriores. A Figura 34 mostra o trecho de uma via com coordenadas de pontos obtidos por GPS e os vetores perpendiculares ao seu eixo.

Figura 34 – Tela do QGIS com o GRASS e os vetores perpendiculares de menor distância.



Fonte: Autor (2018).

O benefício da utilização deste método está na praticidade e velocidade do processamento no cálculo do vetor perpendicular que representam a menor distância entre uma determinada posição e uma linha, dado que mais de mil pontos podem ser calculados em poucos segundos, auxiliando na determinação do deslocamento de um trajeto obtido através do GPS em comparação ao mesmo obtido por uma base cartográfica.

4.3 PROGRAMAS E FERRAMENTAS PARA GNSS

Para efeito deste estudo, foram aproveitados vários softwares gratuitos e "*open source*". A seguir, são apresentados os que foram utilizados.

4.3.1 GPS Toolkit

O programa "opensource" GPSTk – GPS Toolkit, foi desenvolvido pela ARL – Applied Research Laboratories da Universidade do Texas em Austin (ARL, 2018; TOLMAN et al., 2004), cujo principal objetivo é fornecer uma biblioteca de código aberto e um conjunto de aplicativos para a comunidade que utiliza o posicionamento

por satélites, assim como facilitar que pesquisadores possam focar em sua pesquisa e em outros aspectos que não o de desenvolver códigos de nível mais baixo.

4.3.2 RTKLIB

O RTKLIB, é um pacote de programas de código fonte aberto para processamento de posicionamentos padrão ou preciso com GNSS. Consiste em uma biblioteca d programas portáteis e vários programas aplicativos que utilizam esta biblioteca (TAKASU e YASUDA, 2013).

4.3.3 TEQC

O Teqc é um programa que apesar de simples e pequeno é conciso e eficaz na resolução de problemas de pré-processamento com dados GPS, GLONASS, GALILEO, SBAS, Beidou-2/Compass, e QZSS, especialmente no formato RINEX ou BINEX (ESTEY; WIER, 2014).

O programa também é capaz de transformar alguns arquivos binários no formato proprietário do fabricante para o formato RINEX.

4.3.4 Topcon Tools

O Software de pós processamento de dados GNSS Topcon Tools, é um programa comercial, produzido pela fabricante de equipamentos de posicionamento Topcon e fornecido na aquisição de aparelhos ou vendido separadamente. Efetua tanto a comunicação entre os dispositivos e o computador como importa e exporta dados em vários formatos.

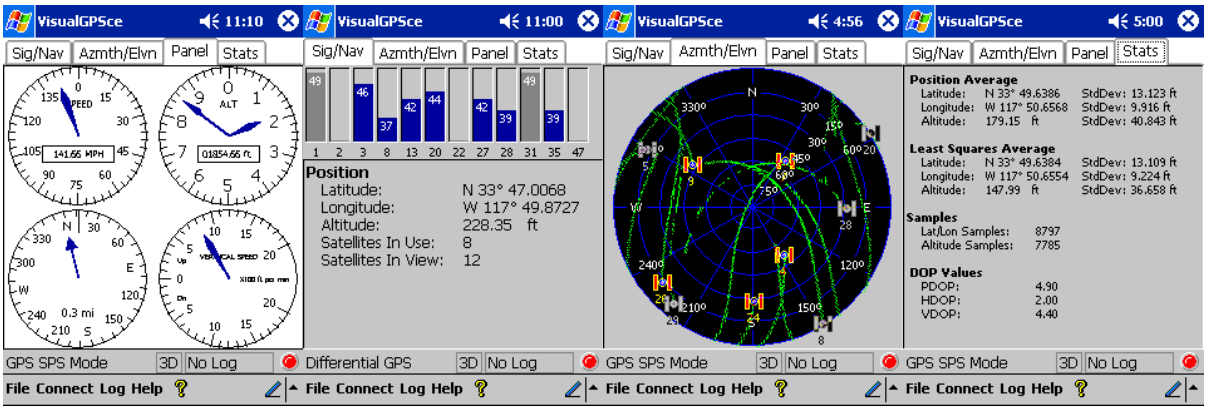
Possui uma série de rotinas de tratamento automatizadas para a solução de posicionamento, análise e ajustamento de redes, de forma intuitiva e com uma interface de operação amigável.

4.3.5 VisualGPSce

O VisualGPSce, é um aplicativo para PocketPC, que exibe graficamente os dados do GPS, tais como azimute/elevação dos satélites, qualidade do sinal,

medidores analógicos e estatísticas das médias das posições; assim como grava os dados brutos, no padrão NMEA 0813 em um arquivo disponibilizado para o usuário. A Figura 35 mostra as telas com as funcionalidades do programa (KINGSLEY-HUGHES, 2005).

Figura 35 – Tela de painéis do VisualGPSce indicando a qualidade do sinal e da posição, azimute e elevação dos satélites e médias estatísticas.



Fonte: Autor (2018).

4.3.6 TerraSync

O software TerraSync produzido e comercializado pela Trimble, é um programa que coleta e atualiza graficamente os geo-dados (GIS e dados espaciais) em um handheld (computador de campo), com o sistema operacional Windows Mobile. Figura 36 mostra as telas com as funcionalidades do programa.

Figura 36 – Telas do Estado do GPS, Mapa, coleta de dados e Navegação do TerraSync.

Fonte: Autor (2018).

4.4 EQUIPAMENTOS

Aqui serão descritos os principais dados técnicos dos equipamentos utilizados, tais como ficha técnica e precisões esperadas, de acordo com o catálogo ou informações dos fabricantes. No tocante aos telefones celulares, as referências dos fabricantes quanto à qualidade, precisão ou acurácia do posicionamento são quase nulas ou inexistentes. Entretanto existem alguns autores que discutem o assunto, entre eles podem ser citados: Chen et al. (2014); Yoon et al. (2016); Zandbergen e Barbeau (2011); Zhu, Li e Chen (2013).

4.4.1 Receptor Topcon HiPer Plus

Para a determinação das coordenadas das estações de referência foi utilizado o receptor geodésico de dupla frequência da Topcon, modelo Hiper Plus (Figura 37). É um modelo integrado: receptor, antena, bateria e carregador, todos incorporados no mesmo estojo com configurações progressivas dependendo do pacote adquirido, no caso do presente trabalho o modelo utilizado possui as seguintes características:

- Tecnologia Paradigm / Co-op tracking;
- Antena: Microstrip (*Zero-Centered*) sobre plano de terra plana;
- Canais: 40 GPS L1 + L2 (GD) e GLONASS (GG/GGD);
- Sinais rastreados: L1/L2, C/A e P código e fase e GLONASS;
- Precisão Horizontal: 3 mm + 0,5 ppm;
- Precisão Vertical: 5mm + 0,5 ppm

Figura 37 – Receptor Topcon GNSS HiPer +

Fonte: Autor (2018).

As especificações de desempenho, assumem um mínimo de 6 satélites GPS ou 7 GLONASS, com corte (mascara) a uma elevação de 15º a partir do horizonte e em lugares não sujeitos a multicaminhamento. Nas áreas com alto índice de multicaminhamento, durante períodos de PDOP alto e durante períodos de alta atividade ionosférica, pode haver queda no desempenho, assim como em áreas de densa folhagem (TOPCON, 2005).

Além de ser utilizado na determinação das bases, o modelo também foi utilizado como móvel, pois por ser de dupla frequência conta com a inicialização *on-the-fly*, ou seja, pode ser inicializado em movimento, desde que não perca a conexão com os satélites nos primeiros 5 minutos. Desta forma, a trajetória determinada pelo equipamento, em conjunto com as bases cartográficas, serviu como parâmetro para a determinação do erro cinemático dos outros equipamentos testados.

4.4.2 Receptor Novatel FlexPak-G2-V1-L1

Fabricado pela Novatel, o FlexPak-G2-V1-L1 (Figura 38) é um receptor de simples frequência que suporta a banda L e SBAS, com taxa de gravação de dados de 50Hz, entretanto neste trabalho foi empregada a taxa de 1 Hz, para coincidir com os outros equipamentos utilizados (NOVATEL INC., 2010).

Figura 38 – Receptor Novatel FlexPak-G2-V1-L1

Fonte: Autor (2018).

O receptor possui as seguintes características técnicas (NOVATEL INC., 2011):

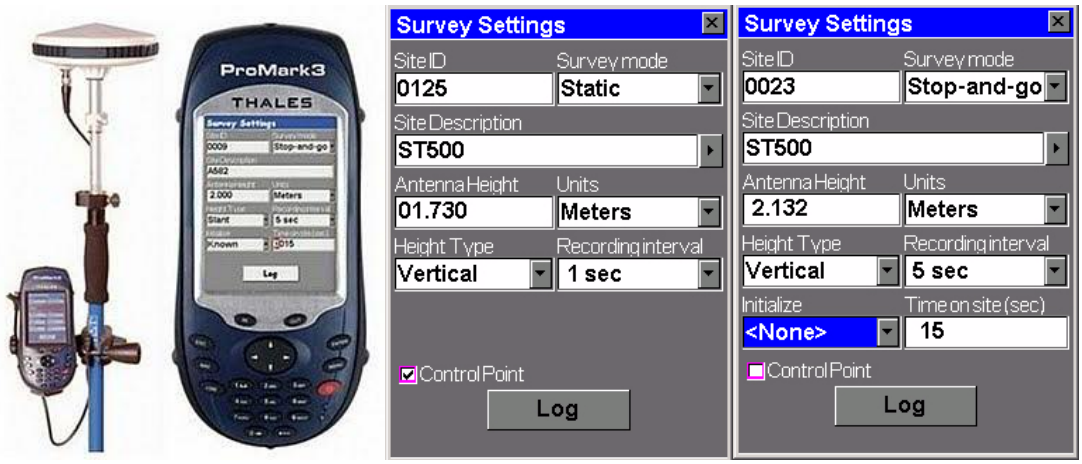
- Tecnologia NovAtel's RT-20® L1;
- Antena: externa;

- Canais: 36 GPS L1;
- Sinais rastreados: L1, C/A e P código e fase;
- Precisão Horizontal: 1,5 m (RSQ);

4.4.3 Receptor Magellan ProMark3

É um receptor de simples frequência, fabricado pela Magellan e por sua robustez e resistência à água é adequado para levantamentos topográficos nos modos estático, semicinemático (*stop-and-go*) e cinemático, assim como para projetos de mapeamento e SIG no modo autônomo (trabalhando com o código C/A) (MAGELLAN, 2006a), a Figura 39 mostra o receptor e algumas de suas telas de levantamento.

Figura 39 – Receptor ProMark3



Fonte: Adaptado de Magellan (2006a).

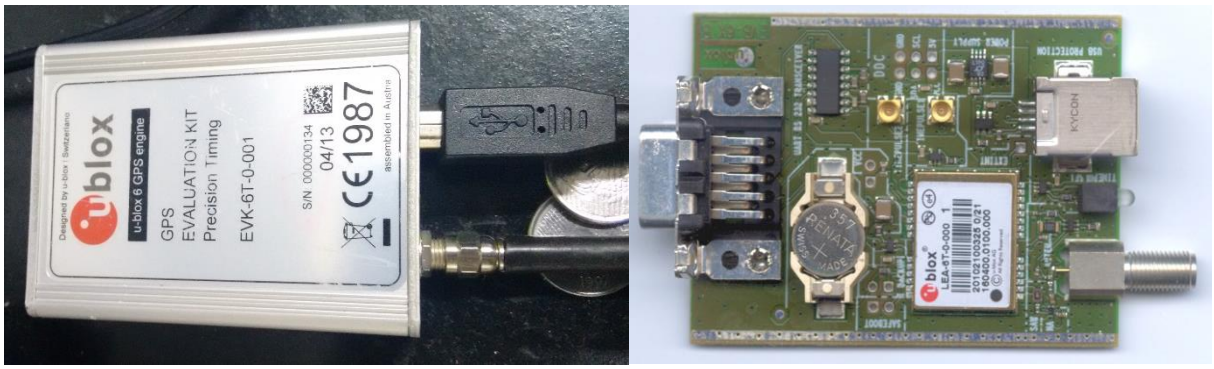
O receptor possui as seguintes características técnicas (MAGELLAN, 2006b):

- Tecnologia state-of-the-art Prism™;
- Antena: externa (NAP100);
- Canais: 14 GPS L1;
- Sinais rastreados: L1, C/A e P código e fase;
- Precisão Horizontal (estático): 5 mm + 1 ppm;
- Precisão Vertical (estático): 10 mm + 2 ppm
- Precisão Horizontal (cinemático): 12 mm + 2,5 ppm;
- Precisão Vertical (cinemático): 15 mm + 2,5 ppm

4.4.4 Receptor U-blox evk-6t-0-001

O kit de avaliação evk-6t-0-001 (Figura 40) é disponibilizado para a análise do desempenho do *chipset* U-blox LEA-6 (U-BLOX, 2012).

Figura 40 – Kit de avaliação evk-6t-0-001



Fonte: Autor (2018) e U-BLOX (2016).

O receptor possui as seguintes características técnicas (U-BLOX, 2017)

- Protocolos U-blox, NMEA-0183;
- Antena: externa (ANN-MS);
- Canais: 50 GPS L1;
- Sinais rastreados: L1, C/A e P código e fase;
- Precisão Horizontal: 2,5 m;

4.4.5 Receptor GlobalSat G-Star IV

Os receptores Globalsat USB GPS (Figura 41) são desenvolvidos para fornecerem mensagens NMEA em tempo real para um computador via cabo USB. O modelo BU-353S4(SiRF IV) utilizado neste trabalho conta com o *chipset* SiRF STAR IV GSD4e com as seguintes características (SIRF, 2009b):

- Tecnologia SiRFaware™ GPS;
- Protocolos SiRF e NMEA-0183 (GGA, GSA, GSV, RMC, VTG, GLL v2.2, VTG e GLL;
- Antena: Patch acoplada;
- Canais: 48 GPS L1;
- Sinais rastreados: L1, C/A e P código e fase;

- Precisão Horizontal: < 2,5 m;

Figura 41 – Receptor GlobalSat G-Star IV modelo BU-353S4.

Fonte: Adaptado de (GLOBALSAT, 2012).

Apesar de o *datasheet* (ficha técnica) da Sirf fabricante do *chipset* do GPS declarar que no posicionamento autônomo a acurácia horizontal é < 2,5 m, o manual do usuário aponta para uma acurácia de até 5,0 m caso os sistemas WAAS/EGNOS estejam disponíveis e de 10-15 m caso contrário.

4.4.6 Telefone Celular Motorola modelo XT687

Fabricado em 2012/2013 o Motorola modelo XT687 (Figura 42) é um smartphone com SO Android v.4.0, possui um chipset Qualcomm MSM7227A que conta com processador Snapdragon S1 de 1 GHz *single-core*, tecnologia de localização A-GPS gpsOne Gen 7 integrado ao processador; memória RAM de 512 MB e ROM de 1 GB, memória de 1,02 GB expansível até 32 GB através de cartão micro SD; estão acoplados os sensores de proximidade, acelerômetro e bússola (SOLIMAN et al., 2000; QUALCOMM CDMA TECHNOLOGIES, 2006; QUALCOMM TECHNOLOGIES, 2015; TUDOCELULAR, 2013).

Figura 42 – Telefone Celular Motorola modelo XT687

Fonte: Autor (2018).

4.4.7 Telefone Celular Samsung Galaxy S2

O smartphone Samsung S2 modelo GT-i9100 (Figura 43) começou a ser fabricado em 2011 com SO Android 2.3 com atualização para o 4.1, com *chipset* ARM Cortex-A9 e processador de 1.2 GHz Dual Core. Memória RAM de 1 GB e memória interna de 16 GB expansível para 16 GB através de cartão micro SD, estão acoplados os sensores de proximidade, acelerômetro, giroscópio e bússola.

Figura 43 – Telefone Celular Samsung Galaxy S2 modelo GT-i9100

Fonte: Autor (2018).

O sistema de A-GPS porém, não é integrado ao processador; o telefone conta com a plataforma Sirf star IV incorporada no *chipset* gsd4t com as mesmas características técnicas do *chipset* gsd4e, descritas no item 4.4.5.

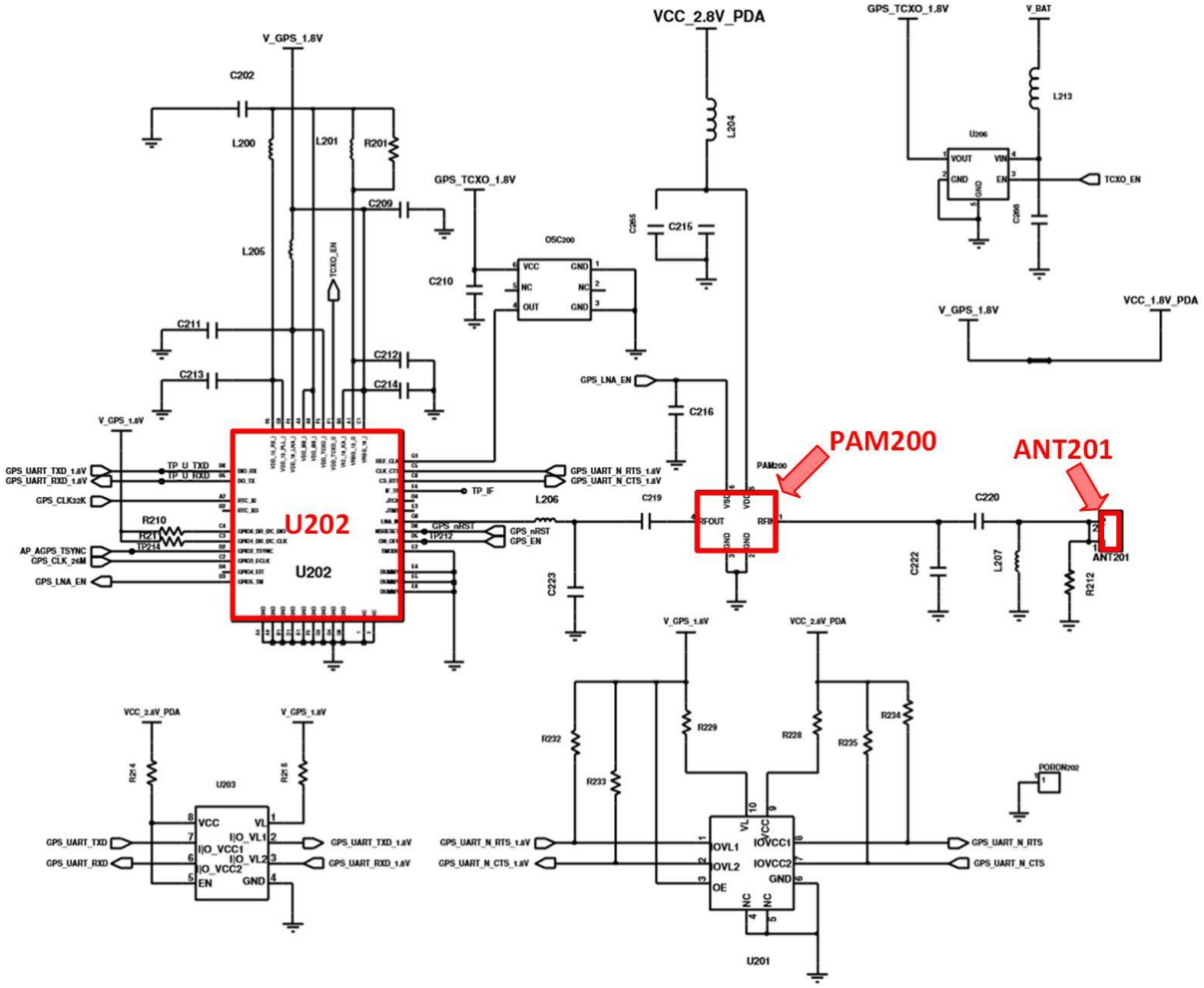
O manual de serviços (SAMSUNG, 2010) traz o diagrama esquemático (Figura 44), o diagrama da placa de circuito impresso (Figura 45) e a lista de componentes. Desta forma é possível localizar no telefone os componentes do sistema de GPS; os principais estão listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Lista de componentes do modulo GPS

Localização	Componente	Descrição
U202	IC-GPS RECEIVER; GSD4T-9600B-TR, WLCSP, 42P	SiRF
PAM200	IC-GPS AMP; ALM-2712-SG1G, 12P, 3.0x2.5x1mm	Avago / ALM 2712 / RF GPS front-end module (FEM)
ANT201	CONNECTOR-TERMINAL	

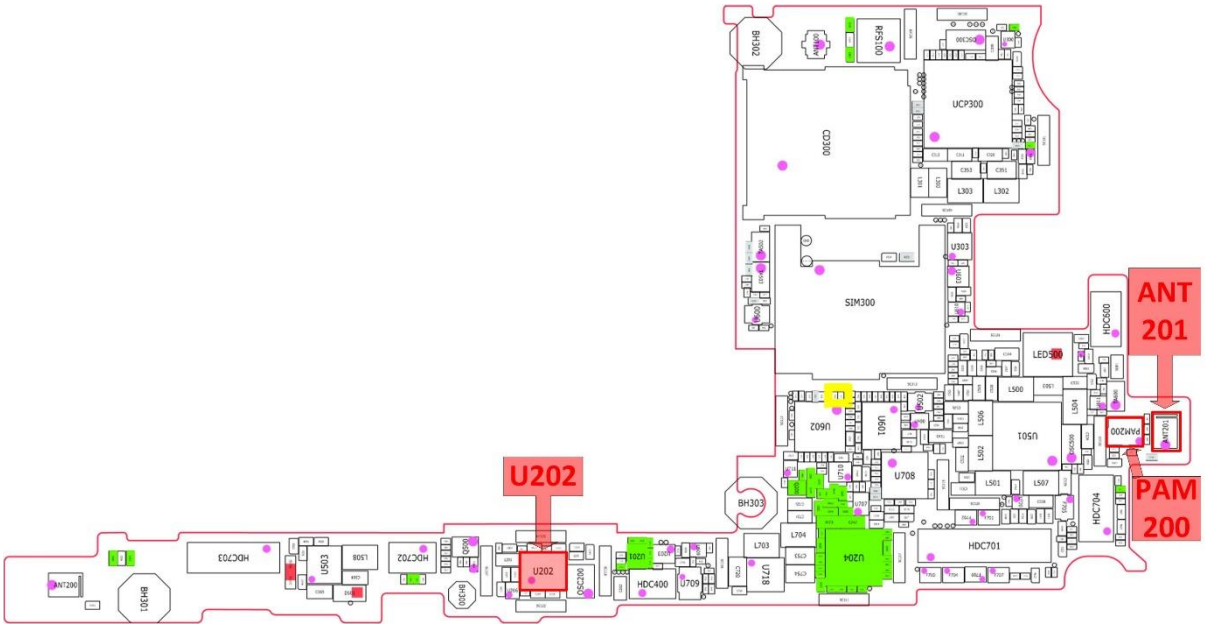
Fonte: Adaptado de Samsung (2010).

Figura 44 – Diagrama esquemático – GT-i9100



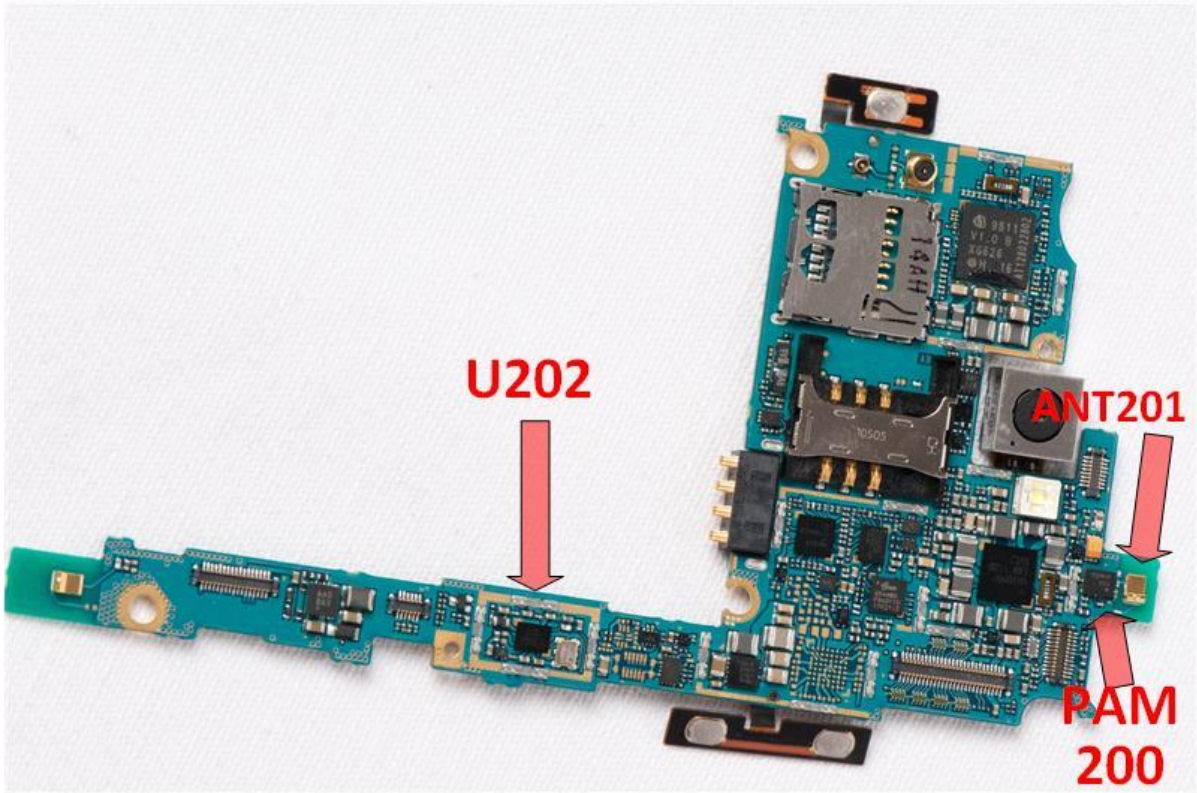
Fonte: Adaptado de Samsung (2010).

Figura 45 – Diagrama da placa de circuito – GT-i9100.



Fonte: Adaptado de Samsung (2010).

Figura 46 – Placa mãe do GT-i9100



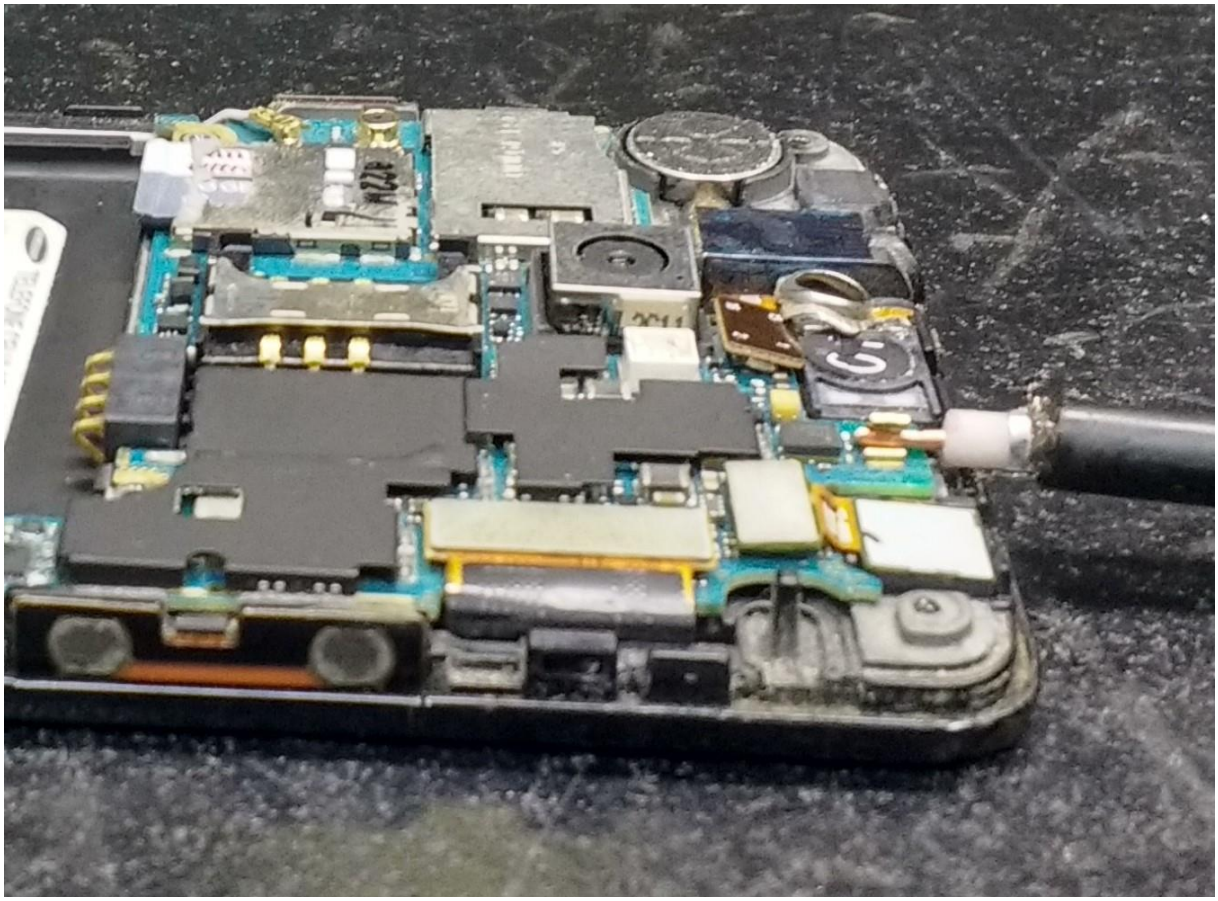
Fonte: Autor (2018).

O interesse nestes componentes se justifica para confirmação do modelo de *chipset* do GPS e do LNA e posterior obtenção da ficha técnica destes componentes,

além da identificação da entrada da antena no RF GPS *front-end* para a conexão de outra antena de melhor qualidade, isolando-se a original do telefone.

Para tanto foram conectados cabos coaxiais RGC 58 de 50 Ω ao telefone de duas maneiras, a primeira simplesmente encostando a parte condutora da ponta do cabo no conector da antena da placa do telefone, conforme pode ser visto na Figura 47.

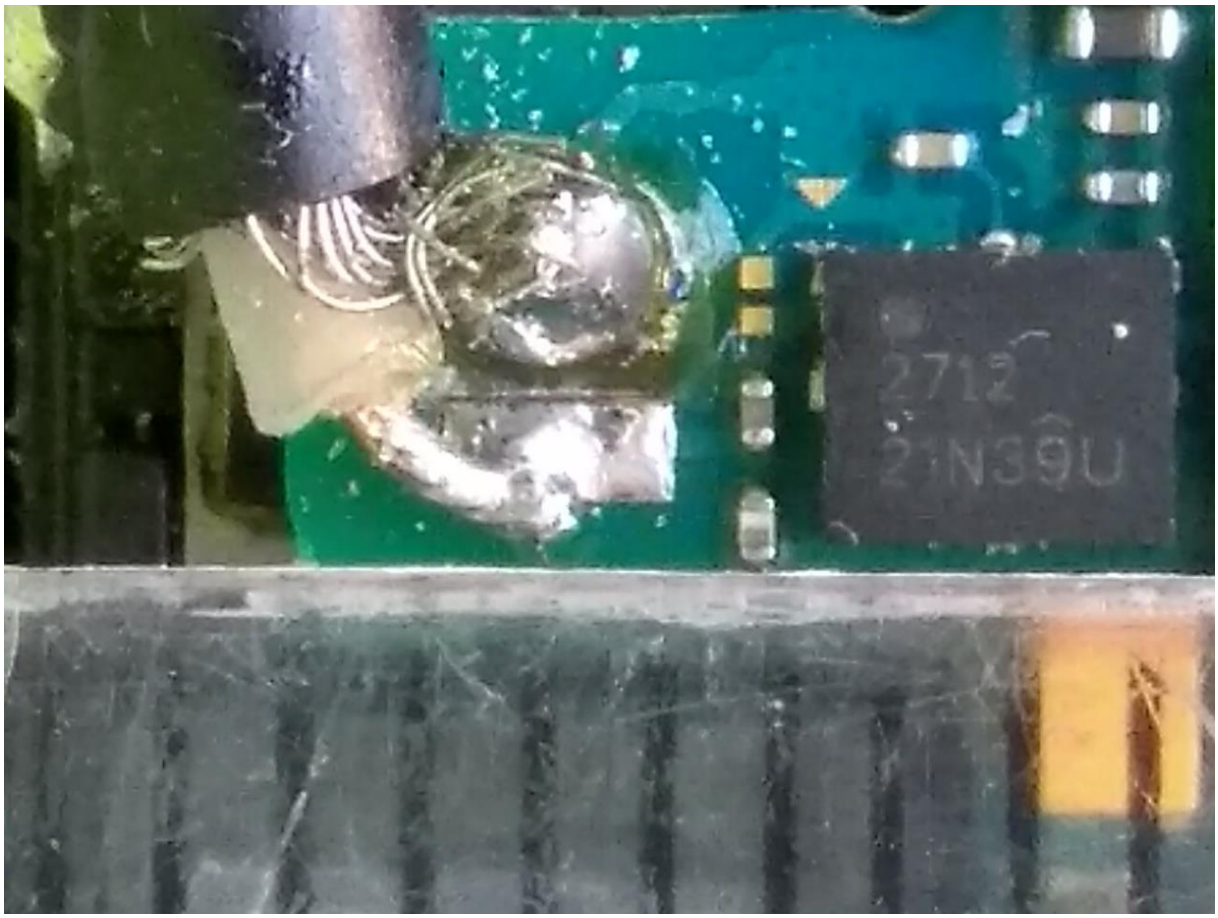
Figura 47 – Conexão sem solda do cabo RGC 58 na placa do telefone.



Fonte: Autor (2018).

A segunda maneira foi retirando-se o conector da placa mãe e conectando o cabo através der um processo de micro solda executada por um técnico capacitado com auxílio de um microscópio e de uma estação de solda com temperatura controlada, o procedimento foi realizado no Laboratório de Microeletrônica (LME) do Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da USP. O resultado pode ser visto na Figura 48 ao lado de uma escala milimetrada.

Figura 48 – Conexão com solda do cabo RG 58 na placa do telefone.



Fonte: Autor (2018).

Na outra ponta do cabo foram soldados conectores SMA ou TNC conforme a necessidade. Antenas passivas podem ser acopladas diretamente, porém, para que possam funcionar perfeitamente, as antenas ativas precisam de uma fonte de energia, que o conector do telefone não fornece. Para este fim, foi conectado um *"beas tee"* com faixa de frequência entre 10 MHz e 3 GHz, perda de 0,4 dB a 1,5 GHz, tensão máxima suportada de 50 V DC e limite de corrente de 400 mA (Figura 49). Também chamado de injetor DC ou misturador DC/RF, trata-se um dispositivo de três portas alimentado por uma fonte externa de corrente contínua, em uma de suas portas; o que neste caso foi realizado por um armazenador de energia portátil de 5 V com capacidade de armazenamento de 10400mAh. Do lado do conector que vai para a antena, o nível DC aparece no centro do pino do conector, enquanto do lado oposto, o receptor é protegido por um bloqueador de nível DC, que permite apenas a passagem do sinal de RF.

Figura 49 – Beas Tee.

Fonte: Autor (2018).

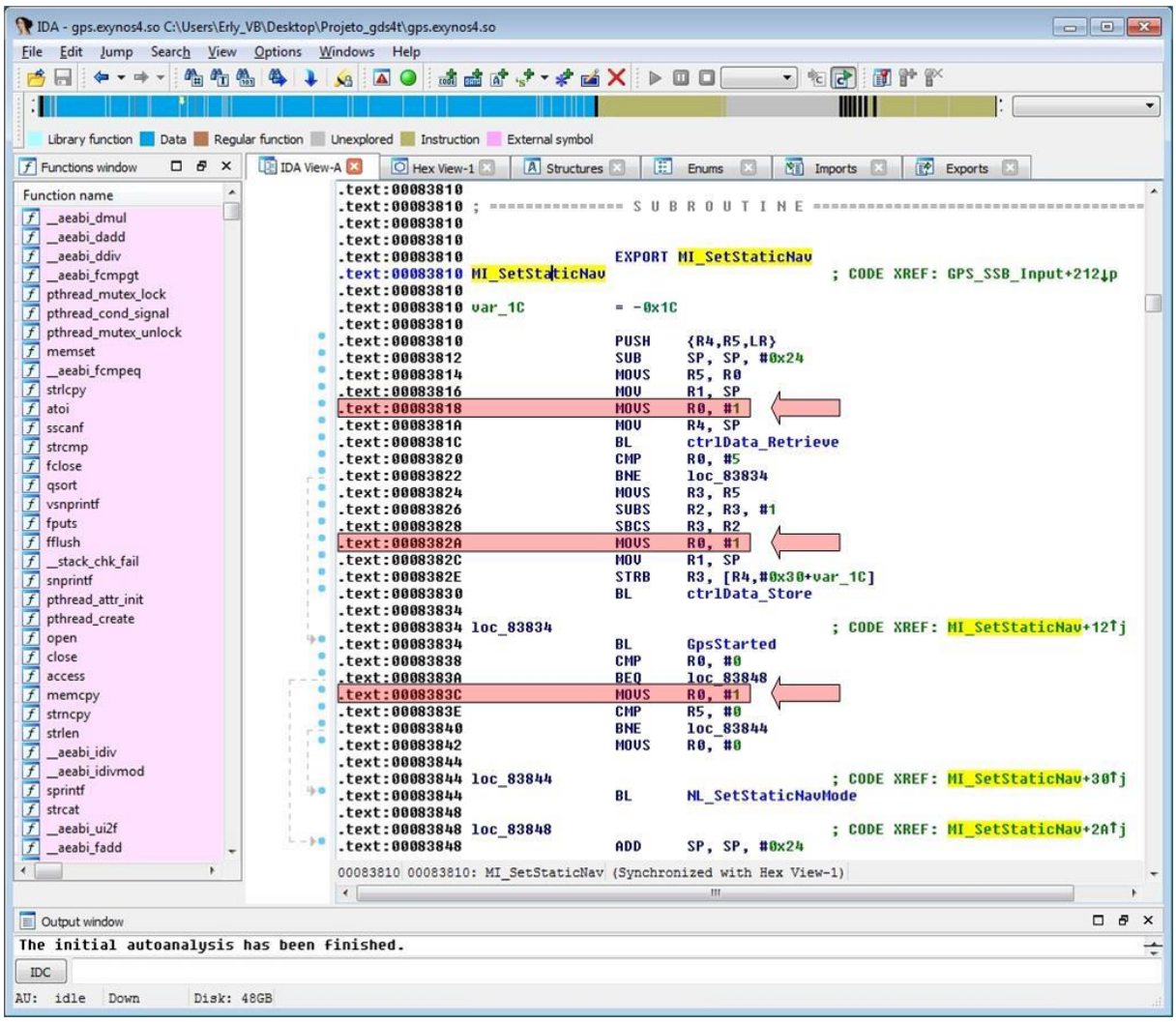
O fato de este modelo de telefone possuir um modulo de GPS dedicado, propicia a coleta e armazenamento dos dados brutos do *chipset* do GPS. Para tanto são necessárias algumas modificações no SO, no driver e alguns arquivos de controle do modulo de GPS. Entretanto, para que se possa ter acesso a estes arquivos é necessária a obtenção de privilégio de administrador do SO, o chamado Superusuário, procedimento denominado como *"Root"* no caso do Android.

Apesar de o telefone possuir 16 Gb de memória, apenas 1 Gb encontra-se disponível para o SO, como os dados brutos do receptor serão gravados neste local, foi necessário a repartição da memória através do programa Odin. No presente trabalho a memória dos telefones testados foram divididas em duas partições de 8Gb cada.

Também é preciso desligar o modo de economia de energia que atua quando o telefone fica imóvel, no caso do protocolo Sirf a função é chamada de *"Static Navigation"* e é controlada por uma chave ou *flag* sendo o valor 1 ligado e 0 desligado, em uma sub-rotina compilada na biblioteca do GPS (arquivo binário gps.exynos4.so). O arquivo foi aberto em um programa desassemblador, também chamado de desmontador ou disassembler, apenas para a obtenção dos endereços das chaves,

conforme pode ser visto na Figura 50, onde estão destacados os endereços 00083818, 0008382C e 0008383C, referentes às chaves MOV R0, com valor #1.

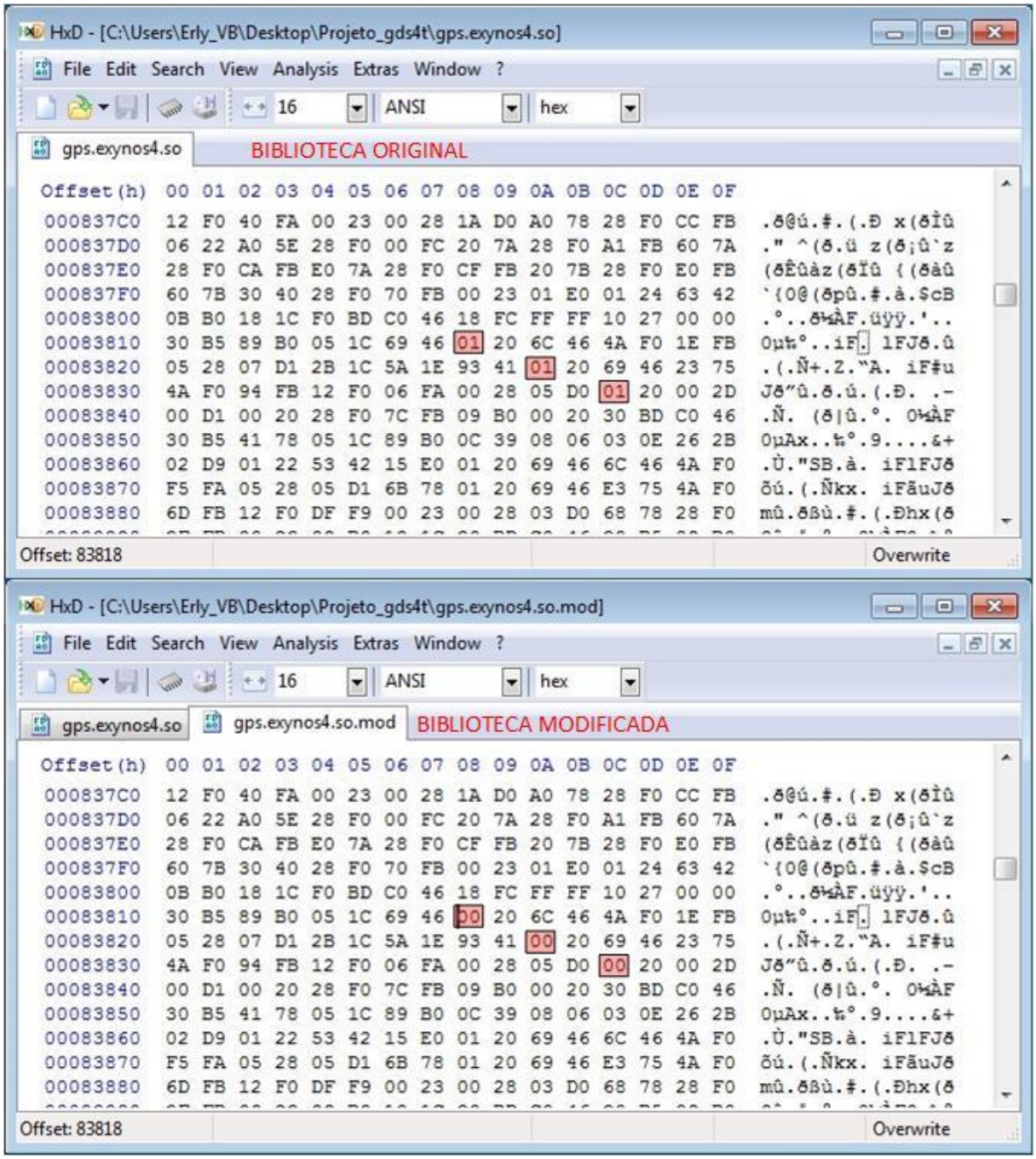
Figura 50 – Tela do programa desassemblador.



Fonte: Autor (2018).

Posteriormente o arquivo da biblioteca deve ser aberto em um editor hexadecimal onde são mudados os valores “01” para “00” nos endereços obtidos anteriormente. A Figura 51 mostra a edição da biblioteca; acima se pode ver o arquivo original com o valor “01” para as chaves de interesse e abaixo observa-se os valores já modificados para “00”. Após salvo, o arquivo original deve ser substituído pelo modificado no telefone.

Figura 51 – Tela do programa editor hexadecimal com a biblioteca original e modificada.



Fonte: Autor (2018).

De acordo com o protocolo Sirf, definido em Cambridge Silicon Radio Limited (2013) a mensagem *"Static Navigation"* é definida com o identificador (ID) 143 e descrita como um filtro de posicionamento para usuários em veículos motorizados, que quando a bandeira está ligada, valor da chave em "01", atinge um determinado limiar de velocidade, o posicionamento é congelado e a velocidade é fixada em zero. Esta condição irá se manter até que a velocidade computada ultrapasse 1,2 vezes o

limiar ou que a distância entre a posição calculada e a congelada seja maior que um valor pré-estabelecido. Com o procedimento descrito, o filtro é desligado.

A partir deste ponto, é necessário que se ligue o modo de depuração no arquivo de configuração do *chipset* do GPS no telefone (arquivo sirfgps.conf). O procedimento também é realizado através de uma chave: DEBUGGING_FILES=0 que deve ser substituída por: DEBUGGING_FILES=1. Com esta ativação alguns arquivos são gerados, entre eles o “SLCLog.gp2”, que é um arquivo binário no formato proprietário da Sirf, o qual pode ser convertido em um arquivo RINEX, o que no caso do presente trabalho, foi feito por intermédio do programa *opensource* RXtoRINEX V2.0 (CANCILLO, 2016).

Em resumo as modificações executadas no telefone celular modelo GT-i9100 para a presente pesquisa foram:

a) Atribuir privilégios de administrador do SO, também chamado de superusuário (Root do aparelho);
b) Reparticionar a memória interna do aparelho, alocando maior capacidade de armazenamento de informações;
c) Desligar o *static navagation*, abilitando a coleta de dados com o telefone imóvel;
d) Ligar o modo de depuração, através da chave DEBUGGING_FILES=1, abilitando assim o processo de registro das informações necessárioas (*Log* de dados). Com a chave ligada os dados relativos ao rastreio serão anexados ao final do arquivo de *Log* toda vex que o *chipset* do GPS for acionado;
e) Abrir algum aplicativo que lige o sensor GPS, no caso da presente pesquisa foi escolhido um aplicativo que gravasse as informações NMEA;
f) Converter o arquivo de *Logging* em arquivo RINEX, através do programa RXtoRINEX.

4.5 ANTENAS

Além das antenas internas de alguns equipamentos, também foi utilizado um conjunto de antenas (Figura 52) cuidadosamente montadas sobre o Laboratório de Topografia e Geodésia (LTG) do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP. Estas antenas foram nomeadas e possuem as seguintes características (da esquerda para a direita):

- PONO (LEIAX1202) Leica L1/L2, geodésica, SmartTrack;
- PNOR (LEIAT501) Leica L1, com elemento Aero;
- POCI (TRM29659.00) Trimble L1/L2, com chokerings e elementos Dorne e Margolin;
- PSUL (TRM16741.00) Trimble L1, compacta com Dome.

Figura 52 – Conjunto de antenas montado no LTG

Fonte: Autor (2018).

As coordenadas do centro de fase (Tabela 9) foram obtidas através de quatro seções de rastreio de oito horas em quatro dias consecutivos. Os dados foram

processados no *software* Topcon Tools, utilizando-se como referência a estação POLI, integrante da RBMC do IBGE. As coordenadas estão referenciadas ao SIRGAS 2000 com a época de referência em 2000,4. As coordenadas apresentadas no sistema UTM estão referenciadas ao Meridiano Central 45º, fuso 23. Tambem foram calculadas as coordenadas das antenas para um Plano Topográfico com origem no Pilar 1 da raia olímpica da USP. Este vértice faz parte do SGB e consta no Banco de Dados Geodésicos – BDG do IBGE sob o número 91607 de coordenadas: Latitude 23° 33' 03,04823" S, Longitude 46° 43' 53,67934" W e Altitude Geométrica 718,13 m também referidas ao SIRGAS 2000; e calculadas em 23/11/2004 ao qual foram atribuídas as coordenadas topográficas X = 150000,000 m e Y = 250000,000 m.

Tabela 9 – Coordenadas das antenas montadas no LTG em SIRGAS (2000,4).

	PONO	**PNOR**	**POCI**	**PSUL**
Latitude (S)	23°33'18.90424"	23°33'18.98196"	23°33'19.02420"	23°33'19.06570"
Longitude (W)	46°43'54.33377"	46°43'54.37780"	46°43'54.40308"	46°43'54.42639"
Alt. Geod. (m)	727.985	728.453	728.788	728.473
N (m)	7393944.187	7393941.781	7393940.473	7393939.189
E (m)	323242.415	323241.195	323240.494	323239.848
X (m)	4010002.270	4010000.999	4010000.332	4009999.303
Y (m)	-4260039.629	-4260040.102	-4260040.438	-4260040.310
Z (m)	-2533497.469	-2533499.848	-2533501.173	-2533502.218
X topog. (m)	149981.438	149980.189	149979.472	149978.810
Y topog. (m)	249512.141	249509.750	249508.450	249507.174

Fonte: Autor (2018).

4.6 ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MIRANTE DE SANTANA

Para que as observáveis não sejam contaminadas, principalmente pelo multicaminhamento, o local de coleta dos dados deve ter uma boa visão do horizonte, sem obstáculos que obstruam os sinais, ou anteparos que possam refleti-los.

Por outro lado, os telefones celulares quando com o sensor de GPS ligado, passam a ter a duração de sua bateria muito curta, geralmente menor que 2 horas.

Isto posto, para que fosse possível a coleta de dados com estes dispositivos por longos períodos, para posterior análise, foi necessário encontrar um local com

estas características e que pudesse contar-se com energia elétrica, para constante realimentação da bateria

Contatou-se, assim o INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, atualmente responsável pela estação meteorológica do Mirante de Santana (Figura 53), para que ali fosse instalada uma antena para a presente pesquisa, o que foi atendido prontamente pelos servidores daquele instituto.

Figura 53 – Estação meteorológica do Mirante de Santana.

Fonte: Autor (2018).

A antena foi instalada em um bastão com tripé e conectada a um receptor Promark 3, também apoiados no bastão, foram fixados os telefones e anotadas as respectivas alturas em relação ao ponto materializado na laje do edifício da estação.

4.7 MODELO DE VELOCIDADE DAS ESTAÇÕES

Todas as coordenadas corrigidas pelo método diferencial, por força da injunção, acabam sendo reduzidas para a mesma época em que as coordenadas da estação base estão referenciadas. Contudo as coordenadas calculadas de modo autônomo, estão referenciadas na data do levantamento e para que possam ser comparadas com a base cartográfica no caso do posicionamento dinâmico ou com as

coordenadas estações no caso de posicionamento estático; devem ser compatibilizadas em termos de Datum e época (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; LEICK; RAPOPORT; TATARNIKOV, 2015; SOUZA, 2013).

A redução das coordenadas para uma determinada época é realizada utilizando-se as denominadas velocidades. Esta translação é realizada por (SIRGAS, 2018):

$$X(t) = X(t_0) + (t - t_0) \times V_X \tag{34}$$

$$Y(t) = Y(t_0) + (t - t_0) \times V_Y \tag{35}$$

$$Z(t) = Z(t_0) + (t - t_0) \times V_Z \tag{36}$$

Onde: $X(t)$, $Y(t)$ e $Z(t)$ representam as coordenadas na época desejada, $X(t_0)$, $Y(t_0)$ e $Z(t_0)$ as coordenadas na época de referência, $(t - t_0)$ o intervalo de tempo transcorrido entre a realização do sistema de referência e o levantamento GNSS e V_X, V_Y e V_Z as velocidades da estação de referência.

Para se obter o vetor velocidade da estação de interesse, na região de abrangência do SIRGAS2000, recomenda-se a utilização do modelo de velocidade VEMOS. Porém, salienta-se que há disponível pelo menos 14 modelos de velocidade (RAMOS; DAL POZ; CARVALHO, 2016). Deve ser destacado que as versões do VEMOS representam médias anuais dos movimentos horizontais da superfície, abrangendo apenas um determinado período. Efeitos co-sísmicos (saltos) devem ser adicionalmente considerados. Os modelos VEMOS lançados até o momento (2018,0) são: VEMOS2003 (DREWES; HEIDBACH, 2005), VEMOS2009 (DREWES; HEIDBACH, 2012) e VEMOS2015 (SÁNCHEZ; DREWES, 2016). São modelos que fornecem os valores das velocidades da placa Sul-Americana e Caribe com latitude e longitude em um gride 1º X 1º, os *links* para a obtenção destes modelos estão disponibilizados no site do SIRGAS e um dos meios de se obter a velocidade pelo modelo VEMOS em um ponto qualquer é utilizando o *software* VELINTER.EXE ou AstGeoTop. Os resultados obtidos com o primeiro foram:

```
Interpolated Station Velocities From 1 Degree * 1 Degree Velocity Field Grid
-----------------------------------------------------------------------------
Geographic v(Lat), v(Long)  and geocentric v(X), v(Y), v(Z) velocities [m/a]
SIRGAS2000-95
Interpolated from VEMOS2009 in ITRF2005 (Drewes and Heidbach 2009)
Station  Latitude Longitude    v(Lat)  v(Long)    v(X)     v(Y)     v(Z)  no
-----------------------------------------------------------------------------
POLI      -23.494   -46.630    0.0117  -0.0033   0.0008  -0.0056   0.0107  4

Interpolated Station Velocities From 1 Degree * 1 Degree Velocity Field Grid
-----------------------------------------------------------------------------
Geographic v(Lat), v(Long)  and geocentric v(X), v(Y), v(Z) velocities [m/a]
Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin
America. L. Sanchez, H. Drewes
File: VMS2015.GRD
Content: Velocity model for SIRGAS 2015
Reference frame: IGb08/ITRF2008
Station  Latitude Longitude    v(Lat)  v(Long)    v(X)     v(Y)     v(Z)  no
-----------------------------------------------------------------------------
poli      -23.494   -46.630    0.0118  -0.0041   0.0003  -0.0062   0.0109  4
```

4.8 PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

Devido à grande quantidade de dados envolvidos nesta pesquisa, foi necessária a criação de alguns programas para processar e manipular estes dados. A linguagem C foi escolhida por ser uma linguagem simples que entre outras características, permite trabalhar com funções matemáticas e arquivos. Sendo necessário para tal a inclusão de bibliotecas padrão as quais já estão disponíveis nos compiladores da linguagem e a criação de outras. É fundamentada num paradigma algorítmico e procedimental, com tipos de dados simples, com definição e declaração simples de variáveis e estruturas, além de fornecer acesso direto à memória do computador, acelerando o processamento.

4.8.1 Descrição do programa modificaRINEX.

Um dos problemas conhecidos na utilização do DGPS com domínio na posição, é a não coincidência do conjunto de satélites entre a estação base e o móvel. A base

geralmente é instalada em local de céu aberto, exatamente para poder rastrear o maior número possível de satélites. O rover com as suas peculiaridades devido às necessidades na obtenção dos pontos, geralmente observa uma quantidade menor de satélites.

Para compatibilizar a situação, foi desenvolvido um programa que obtém informações das mensagens NMEA, no caso a $GPGGA, que fornece quantos satélites foram utilizados para o cálculo da solução e a $GPGSA que fornece a lista com seus respectivos PRNs para uma determinada época (horário UTC).

A partir daí o arquivo RINEX da estação de referência é aberto, procede-se a compatibilização do tempo UTC, através do *"leap seconds"* para o tempo GPS, então é separado apenas os satélites coincidentes e um novo arquivo RINEX é salvo.

4.8.2 Descrição do programa dgpsNMEA.

O arquivo NMEA não fornece as pseudodistâncias, e sem a sentença $GPGRS com os residuais, também não é possível o cálculo inverso para se reaver as pseudodistâncias medidas pelo receptor, desta forma, presume-se que a única maneira de se corrigir o posicionamento é pelo DGPS com domínio na posição.

Apesar disto, tendo em vista o protocolo fornecer quais satélites foram utilizados para o cálculo da solução, é possível a obtenção da pseudodistância calculada, a partir das coordenadas dos satélites e a posição estimada do receptor.

Isto posto, o programa dgpsNMEA foi desenvolvido para a presente pesquisa, na tentativa de validar o uso desta pseudodistância calculada através do arquivo de efemérides da base. Como dados de entrada o programa pede o arquivo com as sentenças NMEA do receptor móvel, os arquivos RINEX de navegação e observáveis e as coordenadas conhecidas da base.

Assim, com base nas informações NMEA, tais como coordenadas do ponto, horário de recepção do sinal (UTC) e satélites utilizados, o programa utiliza os arquivos RINEX para calcular o horário GPS, as coordenadas dos satélites no momento de transmissão do sinal e a pseudodistância calculada.

A partir daí pode-se obter as correções das pseudodistâncias baseadas nas coordenadas conhecidas da base, que são aplicadas nas distâncias obtidas e então a posição do móvel é recalculada.

O programa também calcula a posição da base empregando o mesmo conjunto de satélites utilizados pelo móvel e procede o DGPS com domínio na posição.

4.8.3 Descrição do programa dgpsRINEX.

O programa denominado dgpsRINEX foi elaborado para o cálculo do DGPS tanto no domínio da posição como das distâncias, a partir dos arquivos RINEX da base e do móvel, aplicando os conceitos já bem difundidos na literatura e discutidos anteriormente (Item 3.2).

Antes da aplicação das correções, o programa calcula o posicionamento por ponto simples dos receptores. Para a validação do processo de cálculo das coordenadas autônomas do receptor, os resultados obtidos por este algoritmo foram comparados aos resultados de outros programas disponíveis e apresentados na Figura 54, onde é apresentada a diferença em metros, da coordenada calculada menos a coordenada conhecida. O equipamento utilizado foi um Promark3 montado sobre um vértice no Mirante de Santana.

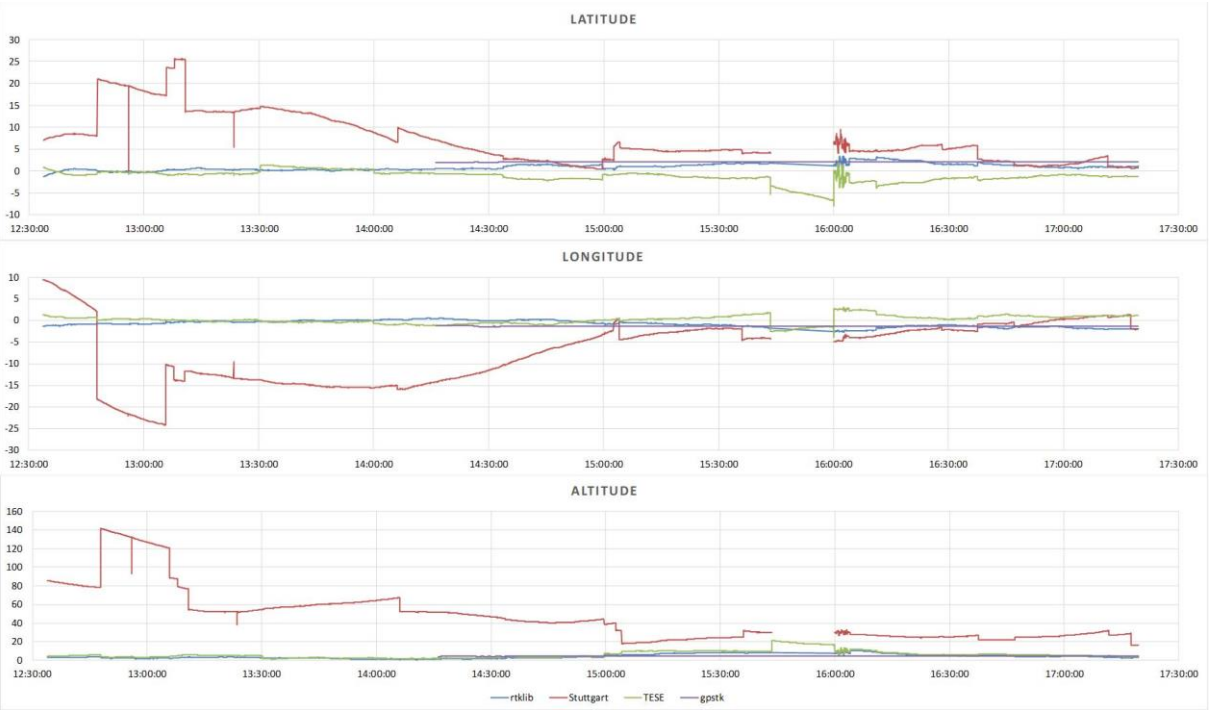
Pelos gráficos apresentados na Figura 54, pode-se observar que os programas possuem diferentes filtros para a seleção de satélites e diferentes algoritmos para o cálculo da solução. O programa rtklib se mostra consistente e confiável, com posições muito próximas das tidas como verdadeiras (ou referenciais). O programa “CA-Single” plotado em vermelho foi desenvolvido pelo *Institute of Navigation, University of Stuttgart* e parece não aplicar nenhuma forma de filtro, porem as posições entre 15:43:32 e 15:59:59 apresentaram erros lineares na ordem de 1.620,00 km. Estes valores não aparecem no gráfico por uma questão de escala. Este erro sugere falha na saúde de algum satélite, não detectada pelo programa.

Em verde aparece o programa desenvolvido nesta tese, que conta com um único filtro de seleção de satélites pela auto declaração da saúde e avaliação do

desvio padrão das diferenças entre as pseudodistâncias medidas e calculadas já descrito no item 3.3.

Por último, em roxo, aparecem as diferenças obtidas através da biblioteca de funções GPS Tool Kit, a qual por algum motivo não detectado não calculou o posicionamento no período entre 12:33:50 (início do rastreio) às 14:16:11, o mesmo período com os piores posicionamentos do CA-Single. Entretanto, com coordenadas bem-estáveis e com erro próximo de zero nas épocas restantes.

Figura 54 – Diferenças de posicionamento entre diferentes programas



Fonte: Autor (2018).

A comparação entre os diferentes programas, valida o posicionamento com o algoritmo e o código desenvolvidos na presente pesquisa, demonstrando que as coordenadas calculadas são confiáveis.

4.8.4 Descrição do programa NMEA_x_NMEA

O programa denominado NMEA_x_NMEA foi elaborado para o cálculo do DGPS no domínio da posição, utilizando-se o posicionamento obtido pelas sentenças NMEA de um determinado receptor estipulado como base e aplicando-se as correções nas coordenadas obtidas pelas sentenças NMEA do dispositivo móvel.

Apesar de ser um processo razoavelmente simples, o programa se fez necessário pela maneira em que a formatação das latitudes e as longitudes estão dispostas nas sentenças. Além da necessidade de se fazer a correlação entre as épocas de um arquivo para o outro.

Mesmo configurando o aplicativo, para gravar os dados de segundo a segundo, as informações possuem inconstâncias sendo fornecidas, mais de uma posição para a mesma época, como também posições com o tempo de valor inferior, posteriormente a um valor superior. A Figura 55 exemplifica a situação.

Figura 55 – Sequência das épocas em um arquivo NMEA obtido de um telefone celular.

```
$GPVTG,,T,,M,0.0,N,0.0,K,D*26
$GPRMC,124507,A,2329.769064,S,04637.186880,W,0.0,,270217,0.0,E,D*32
$GPGGA,124507,2329.769064,S,04637.186880,W,2,09,0.9,802.0,M,-3.0,M,,*56
$GPGGA,124506.000,2329,76906,S,04637,18688,W,1,12,,799,0,M,,M,,*6C
$GPGLL,2329,76906,S,04637,18688,W,124506.000,A,A*5F
$GPRMC,124506.000,A,2329,76906,S,04637,18688,W,0,000,,270217,,,A*45
$GPGSA,A,3,02,05,06,12,20,21,24,25,29,31,,,1.3,0.9,0.9*3B
$GPVTG,,T,,M,0.0,N,0.0,K,D*26
$GPRMC,124508,A,2329.769064,S,04637.186880,W,0.0,,270217,0.0,E,D*3D
$GPGGA,124508,2329.769064,S,04637.186880,W,2,10,0.9,802.0,M,-3.0,M,,*51
$GPGGA,124509.000,2329,76906,S,04637,18688,W,1,12,,799,0,M,,M,,*63
$GPGLL,2329,76906,S,04637,18688,W,124509.000,A,A*50
$GPRMC,124509.000,A,2329,76906,S,04637,18688,W,0,000,,270217,,,A*4A
$GPVTG,,T,,M,0,000,N,0,000,K,*62
$GPGSA,,,02,05,06,12,20,21,24,25,29,31,76,88,,,,,,,,,,,,,,*48
$GPGGA,124509.000,2329,76906,S,04637,18688,W,1,12,,799,0,M,,M,,*63
$GPGLL,2329,76906,S,04637,18688,W,124509.000,A,A*50
$GPRMC,124509.000,A,2329,76906,S,04637,18688,W,0,000,,270217,,,A*4A
$GPRMC,124509,A,2329.769065,S,04637.186881,W,0.0,,270217,0.0,E,D*3C
$GPGGA,124509,2329.769065,S,04637.186881,W,2,10,0.9,802.0,M,-3.0,M,,*50
$GPGGA,124510.000,2329,76907,S,04637,18688,W,1,12,,799,0,M,,M,,*6A
$GPGLL,2329,76907,S,04637,18688,W,124510.000,A,A*59
$GPRMC,124510.000,A,2329,76907,S,04637,18688,W,0,000,,270217,,,A*43
```

Fonte: Autor (2018).

Desta maneira existe pouca ou quase nenhuma correspondência entre as linhas de um arquivo para o outro e por tratar-se de uma grande quantidade de observações, fazer esta correlação manualmente demandaria um tempo gigantesco.

O programa lê sentença por sentença dos arquivos, analisa e retira as informações de interesse, procede a equiparação entre as épocas, calcula as correções e as aplica nas posições do receptor móvel, gerando um arquivo de saída com estas coordenadas e fazendo um resumo estatístico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos realizados nesta pesquisa, foram a discorrer alguns comentárioscometidos de maneira gradativa e progressiva, de modo a se verificar de forma prática a aplicabilidade da teoria do DGPS nos equipamentos testados. Conforme os resultados dos testes se apresentavam satisfatória ou insatisfatoriamente, outros experimentos mais ou menos elaborados iam se fazendo necessários. De tal forma que não foi possível a descrição detalhada de todos os métodos e procedimentos empregados nesta pesquisa no capítulo anterior, os quais serão completados no presente capítulo. Este capítulo pretende apresentar os resultados obtidos e fazer alguns comentários, de forma a perfazer uma análise sobre os mesmos.

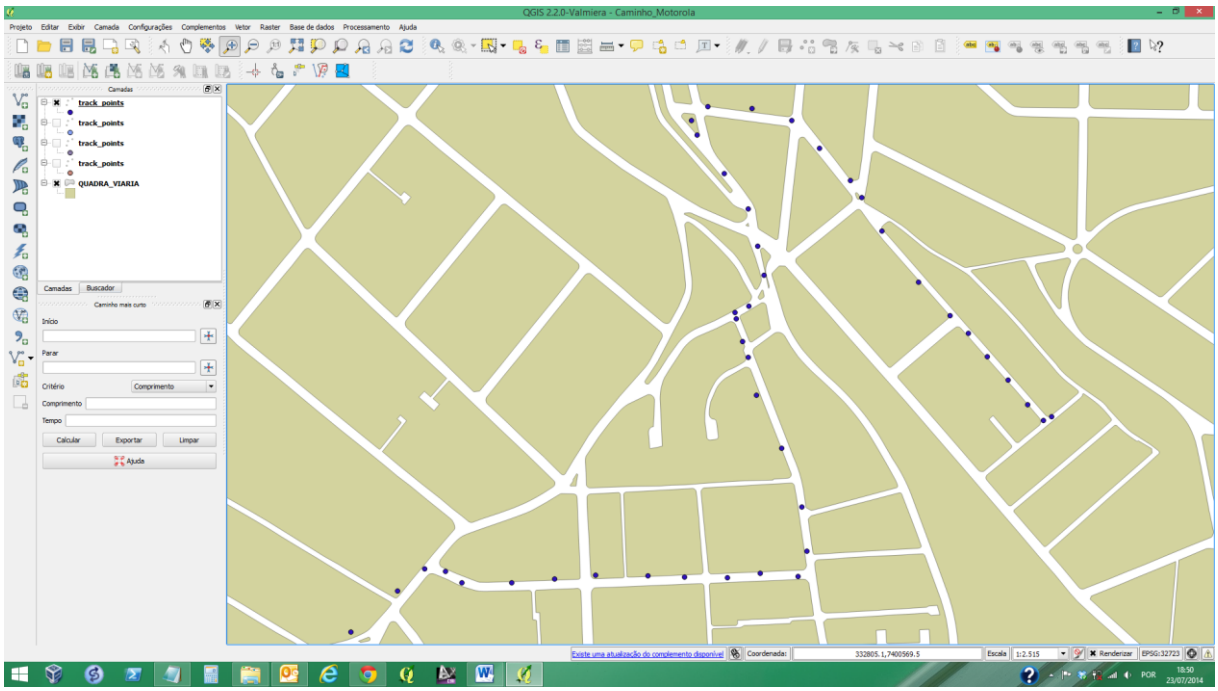
5.1 TESTE PRELIMINAR E UTILIZAÇÃO DO ARQUIVO GPX.

No intuito de fazer uma avaliação preliminar, o aplicativo GPS Essentials, que grava os dados no formato GPX foi configurado para uma taxa de gravação de 5 segundos para o registro de um trajeto, com o telefone dentro de um veículo trafegando através de ruas com diferentes características. O experimento foi idealizado para se verificar o comportamento, a precisão e a exatidão do receptor, no rastreio do percurso de um veículo automotor em área urbana.

Desta forma, se montou um cenário muito pouco recomendado para aquisição de dados de posicionamento por meio do GPS, mas comum em muitas situações: o receptor dentro de um veículo em movimento passando em locais com diversas obstruções, tais como barreiras formadas por edificações que tanto bloqueiam os sinais dos satélites como fornecem anteparo para os multicaminhamentos, além de formarem os chamados cânions urbanos (COSTA, 2011).

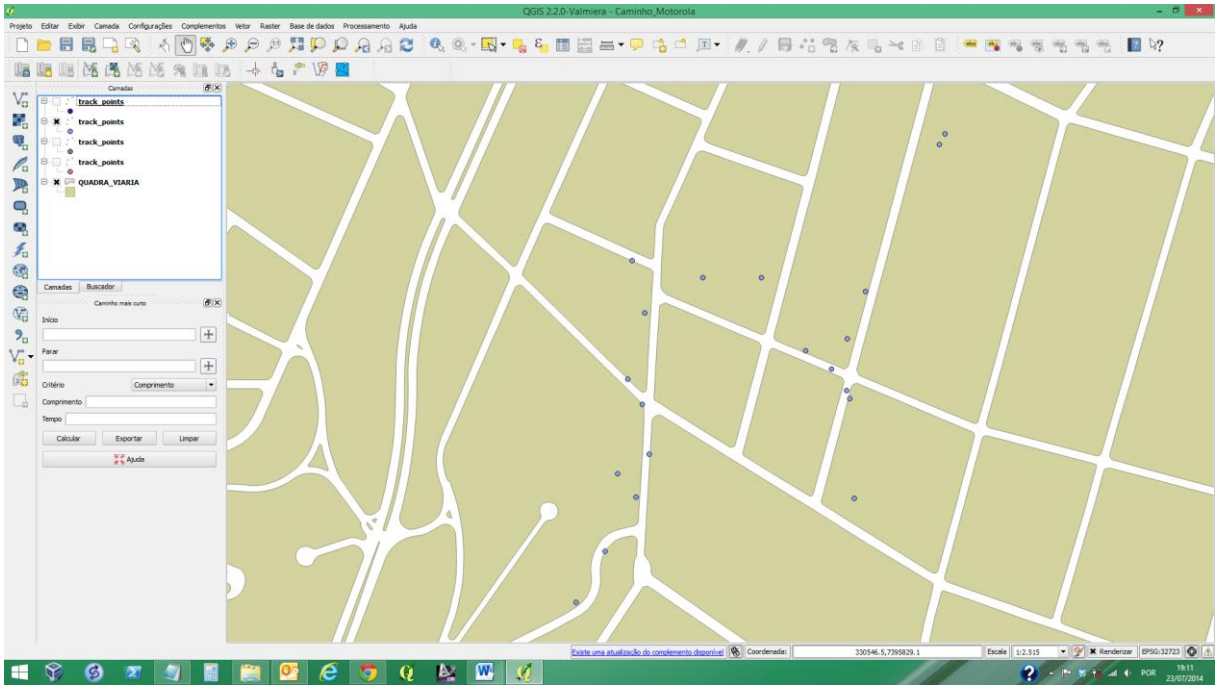
Com a plotagem dos pontos coletados na base cartográfica, pode-se visualizar que no momento da inicialização do GPS numa região com edificações de altura média de aproximadamente 6,00 metros, houve uma tendência de desvio para Norte e para Oeste (Figura 56), que permaneceu durante todo o trajeto de 30 minutos.

Figura 56 – Tela do QGIS com a plotagem de pontos GPX, em local com edificações de baixo porte (6,00m).



Fonte: Autor (2018).

Figura 57 – Tela do QGIS com a plotagem de pontos GPX, em local com edificações de maior porte (40,00m).

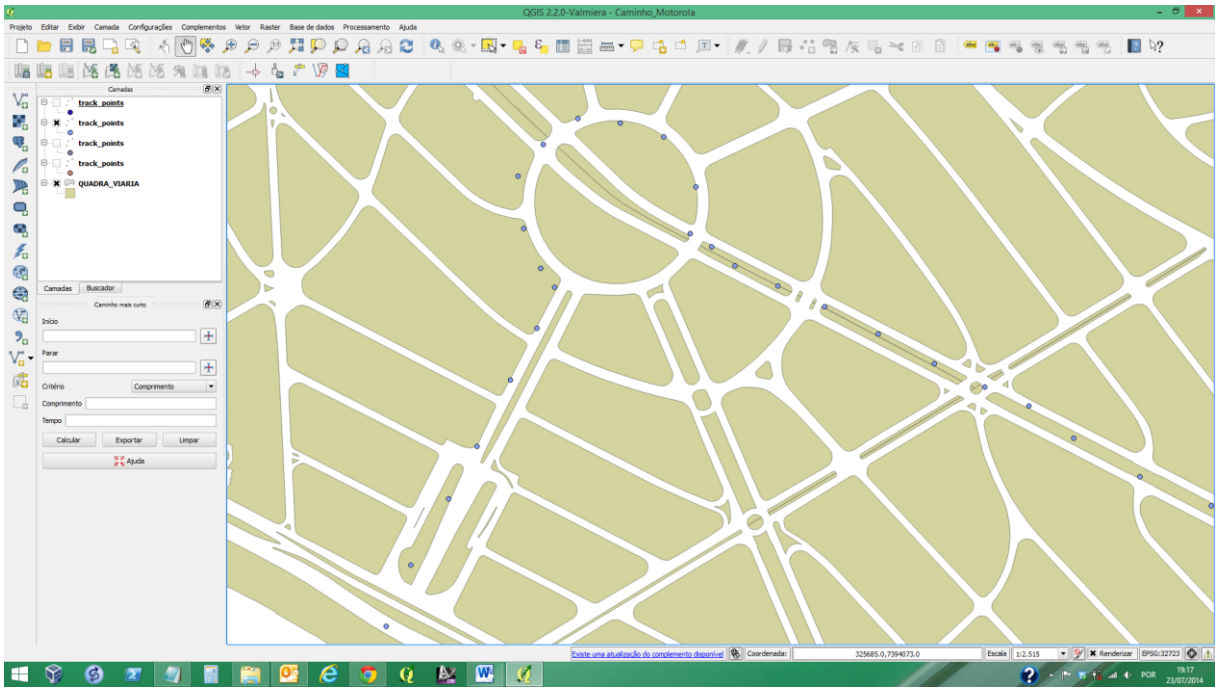


Fonte: Autor (2018).

Ligando-se novamente o GPS após um intervalo de três horas entre prédios com 40,00 m de altura média, percebe-se uma grande dispersão dos pontos (Figura

57), o que posteriormente dá lugar a uma leve tendência para sul e para oeste (Figura 58) por vias largas (aproximadamente 50,00 m entre os alinhamentos prediais) e construções baixas (6,00 m).

Figura 58 – Tela do QGIS com a plotagem de pontos GPX, em local de vias largas e com edificações de baixo porte (6,00 m).



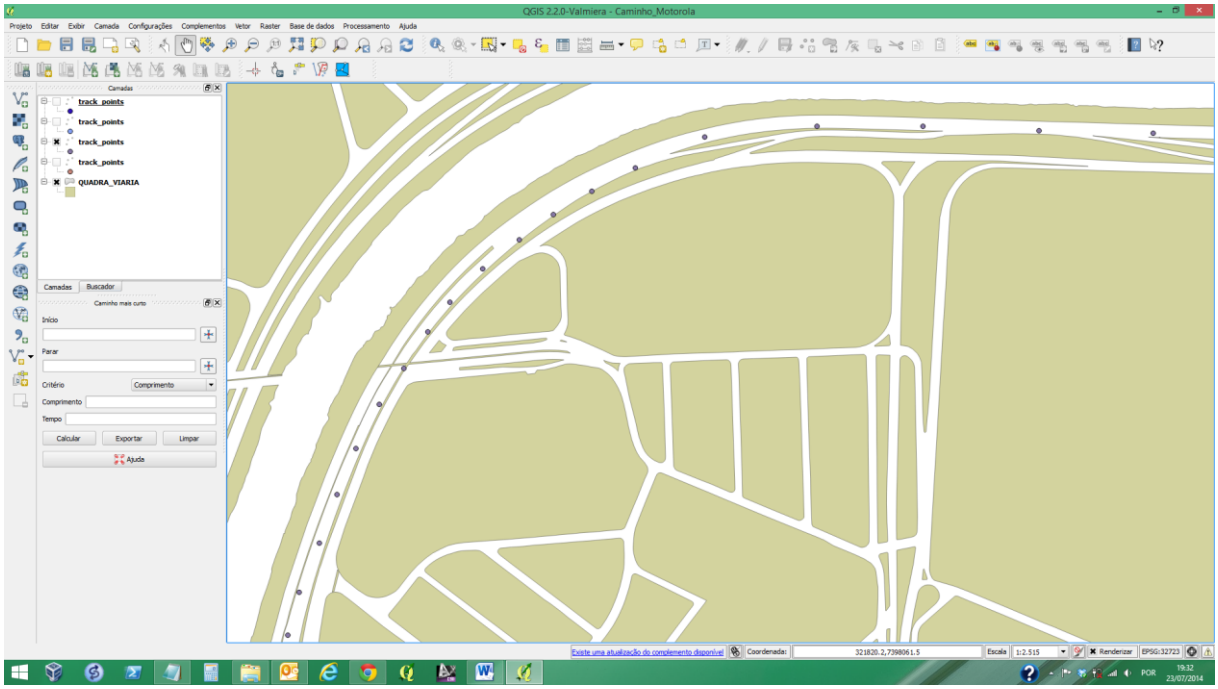
Fonte: Autor (2018).

Desligado o equipamento e religado após outras 3 horas em local de obstruções de aproximadamente 20º com relação ao horizonte a tendência de deslocamento dos pontos é quase imperceptível (Figura 59).

Este procedimento foi repetido por cinco dias consecutivos, sempre com resultados similares.

Assim como era esperado, os desvios não seguem um padrão, apresentando-se de forma ocasional / aleatória, e isso se deve ao fato de os fatores que afetam o posicionamento GPS serem desiguais em diferentes regiões, com ênfase ao multicaminhamento e qualidade do sinal, tal qual a direção, largura e a altura do cânion urbano; que influem diretamente na geometria e quantidade de satélites visíveis pelo receptor.

Figura 59 – Tela do QGIS com a plotagem de pontos GPX, em local aberto.



Fonte: Autor (2018).

Aplicando-se o DGPS com domínio na posição, nas coordenadas fornecidas pelo celular, verificou-se que em certos momentos os pontos se aproximam do trajeto do veículo na rua, no terço direito da via, porém em outros a situação se inverte; levando pontos bem posicionados a se deslocarem para fora da via ou, de forma geral, piorando o posicionamento de outros pontos já mal localizados.

5.2 DIFERENÇA NA QUALIDADE DA CORREÇÃO ENTRE O DGPS NOS DOMÍNIOS DA POSIÇÃO E DA DISTÂNCIA.

No intuito de se avaliar a melhora possível de ser atingida através do DGPS, assim como de se quantificar a diferença na acurácia e na exatidão entre os domínios, foram realizados alguns experimentos com diversos equipamentos, com os dois métodos em ambiente controlado.

As observáveis obtidas pelos diversos equipamentos foram gravadas e pós-processadas. Foram utilizadas duas antenas de coordenadas bem conhecidas e bem posicionadas, ou seja, sem obstruções ou interferências até a linha do horizonte, proporcionando assim, uma boa recepção dos sinais transmitidos de praticamente todos os satélites que estavam visíveis.

Uma das antenas, a estação POLI localizada na Cidade Universitária de São Paulo e que faz parte da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e foi utilizada como Estação de Referência. Esta base conta com uma antena GNSS CHOKE RING (TRM59800.00) e um receptor TRIMBLE modelo NETR8. A segunda antena de mesmo modelo da Estação Base foi posicionada sobre o prédio da Engenharia Civil (Figura 52), também na Cidade Universitária e distantes entre si por 155,08 m.

Como as coordenadas do ponto a se determinar, aqui chamada de Estação Móvel, são conhecidas com precisão milimétrica, a avaliação da acurácia foi obtida pela comparação entre as coordenadas calculadas com as coordenadas conhecidas, tanto para o PPS, como para as obtidas pelos dois métodos de correção diferencial através do programa dgpsRINEX. Já a precisão foi medida pelo desvio padrão das diferenças.

Foram comparados três tipos de posicionamento: por Ponto Simples, através da correção diferencial pelo vetor de correção das posições e o obtido com a correção das pseudodistâncias; através de quatro campanhas, com quatro equipamentos diferentes conforme Tabela 10, que mostra o equipamento utilizado, a data e hora de início da coleta dos dados, o final da coleta e a taxa de rastreio; estas informações foram obtidas dos arquivos RINEX gerados pelos receptores.

Tabela 10 – Equipamentos utilizados para a avaiação do DGPS.

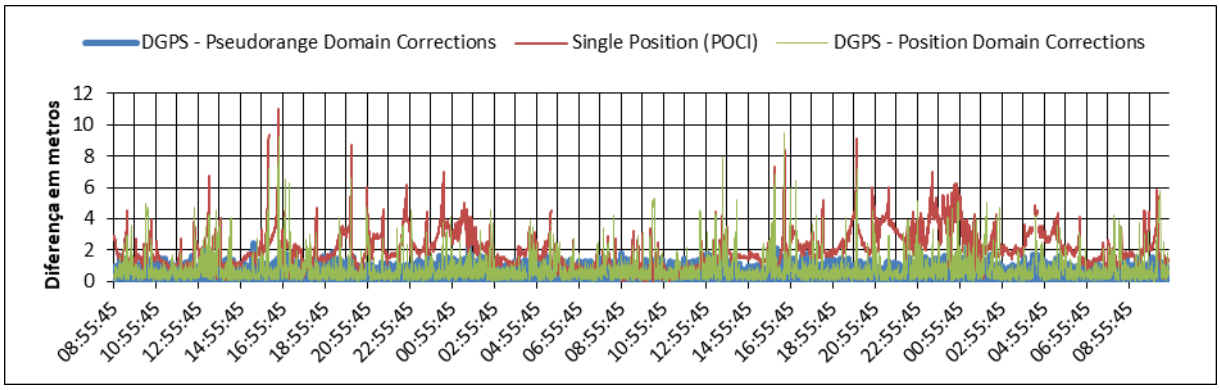
Equipamento	**Início**	**Final**	**Taxa**
Novatel FlexPak-G2-V1-L1	21/12/2015 08:55:45	23/12/2015 10:48:00	15s
Topcon Hiper (L1/L2)	14/12/2015 16:21:30	16/12/2015 16:59:00	15s
Magellan ProMark 3	14/04/2016 17:19:30	16/04/2016 10:47:45	05s
U-blox evk-6t-0-001 (L1)	14/04/2016 18:00:00 h	20/04/2016 13:41:00	05s

Fonte: Autor (2018).

O comportamento da acurácia estimada, teve seu valor obtido pela distância entre as coordenadas estimadas e a coordenada conhecida e podem ser visualizadas da Figura 60 à Figura 63. Em vermelho é apresentado o comportamento obtido pelo modo de posicionamento absoluto, o qual se mostra bastante ruidoso e sujeito a

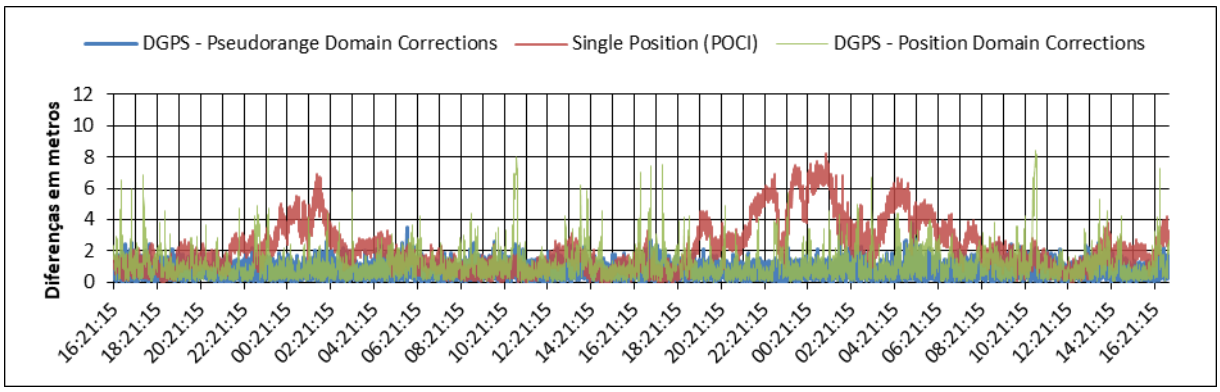
interferências atmosféricas, com maior dispersão do conteúdo total de elétrons no período noturno, devido ao fenômeno da cintilação (FONSECA JUNIOR, 2002)

Figura 60 – Desvio absoluto do posicionamento – Novatel.



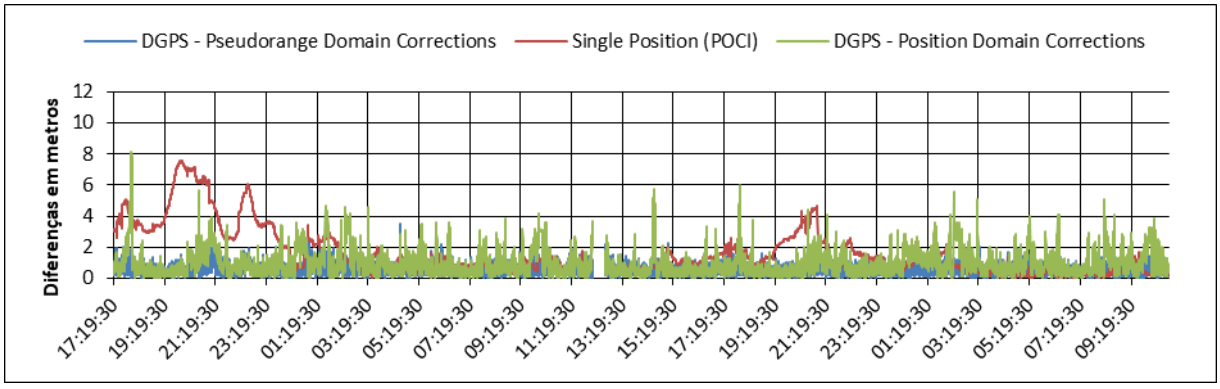
Fonte: Autor (2018).

Figura 61 – Desvio absoluto do posicionamento – Hiper.



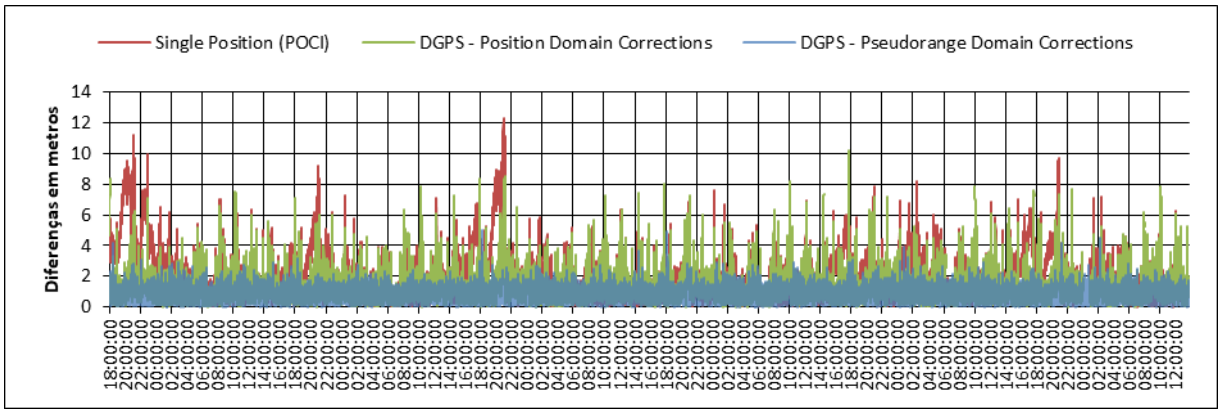
Fonte: Autor (2018).

Figura 62 – Desvio absoluto do posicionamento – ProMark 3.



Fonte: Autor (2018).

Figura 63 – Desvio absoluto do posicionamento – U-blox.



Fonte: Autor (2018).

A linha verde mostra a correção no domínio da posição, a qual de uma maneira geral apresenta melhoras, e aparentemente corrige os efeitos atmosféricos; principalmente pela distância reduzida entre a estação base e móvel. Mas ainda se mostra bastante ruidosa e em vários momentos em vez de uma melhora, percebe-se uma piora no posicionamento.

Esta situação torna-se mais frequente nos receptores mais baratos, provavelmente devido à eletrônica embarcada; tal como o relógio, que influência no correlacionador, responsável pela obtenção das pseudodistâncias. O desempenho dos resultados obtidos através da correção no domínio da distância é apresentado em azul. Onde se percebe um comportamento mais linear em comparação aos demais, independentemente do modelo do equipamento, com uma faixa de amplitude mais bem definida e com poucos pontos fora deste intervalo.

O resumo estatístico dos valores quantitativos dos resultados obtidos estão apresentados da Tabela 11 à Tabela 14, por cada uma das técnicas aplicadas, com as colunas dLat, dLong, dAlt e dDist exibindo as diferenças em metros das Latitudes, Longitudes, Altitudes e distância plana entre os valores calculados e os valores de coordenadas já conhecidos da Estação Móvel. A coluna correção na distância apresenta em porcentagem o quanto foi corrigido na distância calculada pelo PPS e a distância obtida pelo método DGPS, pela fórmula:

$$cor = (1 - \frac{dC}{dPPS}) \times 100 \qquad (37)$$

Onde cor é a correção, dC o valor corrigido, e $dPPS$ o valor obtido pelo Posicionamento por Ponto. Nas tabelas são apresentados valores com duas casas decimais, contudo para efeito dos cálculos foram consideradas 3 casas decimais. Os valores negativos coluna correção na distância demonstram uma piora no processo.

Tabela 11 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo equipamento Novatel.

NOVATEL	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	Correção na dist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	1.04	-0.63	-1.52	2.01	0.14	-0.23	0.20	0.81	59.85%	0.12	-0.03	0.14	0.53	73.50%
Desvio padrão	1.52	1.25	3.65	1.14	0.88	0.79	2.70	0.90	21.21%	0.44	0.40	0.91	0.29	74.41%
Intervalo	13.50	12.43	32.21	10.99	13.43	9.99	42.98	9.52	13.41%	4.27	3.38	8.95	2.42	77.97%
Mínimo	-4.89	-8.30	-21.2	0.00	-5.65	-6.90	-18.8	0.00	32.40%	-2.18	-1.70	-4.54	0.00	63.04%
Máximo	8.60	4.13	11.02	11.00	7.78	3.10	24.14	9.52	13.42%	2.09	1.68	4.41	2.42	77.97%
Contagem	11792				11792					11793				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 12 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo equipamento Hiper.

Hiper	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	Correção na dist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	1.25	-0.96	1.82	2.21	0.25	-0.04	1.68	1.08	51.11%	0.13	-0.06	0.13	0.74	66.64%
Desvio padrão	1.78	1.32	2.74	1.59	1.11	0.92	3.23	0.98	38.15%	0.62	0.55	1.31	0.41	74.29%
Intervalo	10.40	7.95	20.87	8.17	12.78	14.56	53.22	8.39	-2.65%	7.01	4.60	23.43	3.75	54.12%
Mínimo	-3.11	-5.86	-8.22	0.01	-5.80	-7.38	-12.6	0.01	-52.31%	-3.27	-2.38	-6.01	0.00	53.03%
Máximo	7.29	2.09	12.65	8.18	6.99	7.17	40.61	8.40	-2.70%	3.74	2.22	17.41	3.75	54.12%
Contagem	11670				11670					11671				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 13 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo equipamento ProMark 3.

ProMark3	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	Correção na dist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	1.13	-0.60	-1.30	1.61	0.16	-0.11	2.17	0.98	39.13%	0.15	-0.06	0.05	0.57	64.79%
Desvio padrão	1.51	0.99	2.60	1.52	1.03	0.77	2.81	0.85	43.98%	0.47	0.43	1.03	0.33	78.37%
Intervalo	8.17	6.16	16.30	7.58	12.20	7.41	22.35	8.09	-6.67%	4.78	5.21	14.78	3.49	53.99%
Mínimo	-1.60	-4.60	-8.10	0.01	-4.11	-3.86	-5.63	0.01	0.46%	-1.80	-2.00	-5.23	0.01	22.00%
Máximo	6.57	1.56	8.20	7.59	8.09	3.55	16.72	8.10	-6.66%	2.98	3.22	9.55	3.50	53.95%
Contagem	9839				9839					9839				

Fonte: Autor (2018).

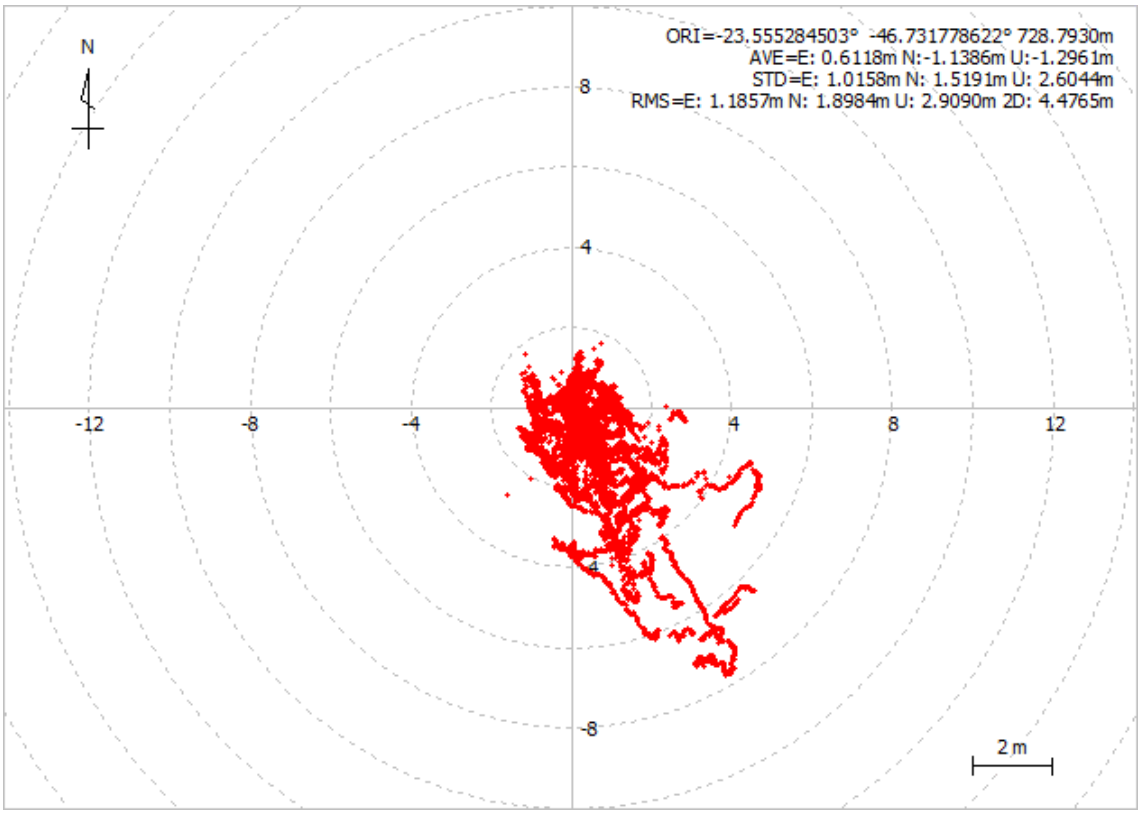
Tabela 14 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo equipamento U-blox.

U-blox	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	Correção na dist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	1.50	-0.81	-3.53	2.23	0.80	-0.33	0.48	1.35	39.42%	0.14	0.09	0.00	0.75	66.46%
Desvio padrão	1.77	1.24	3.89	1.61	1.05	0.98	3.47	0.99	38.38%	0.61	0.57	1.26	0.42	74.14%
Intervalo	18.03	10.70	40.58	12.25	15.19	10.98	52.45	10.20	16.76%	8.58	7.38	15.43	5.03	58.93%
Mínimo	-6.38	-6.97	-30.1	0.01	-5.01	-6.51	-33.0	0.01	-2.09%	-4.06	-3.78	-7.15	0.00	65.52%
Máximo	11.66	3.73	10.50	12.27	10.18	4.47	19.44	10.21	16.75%	4.51	3.61	8.28	5.04	58.93%
Contagem	32323				32323					31545				

Fonte: Autor (2018).

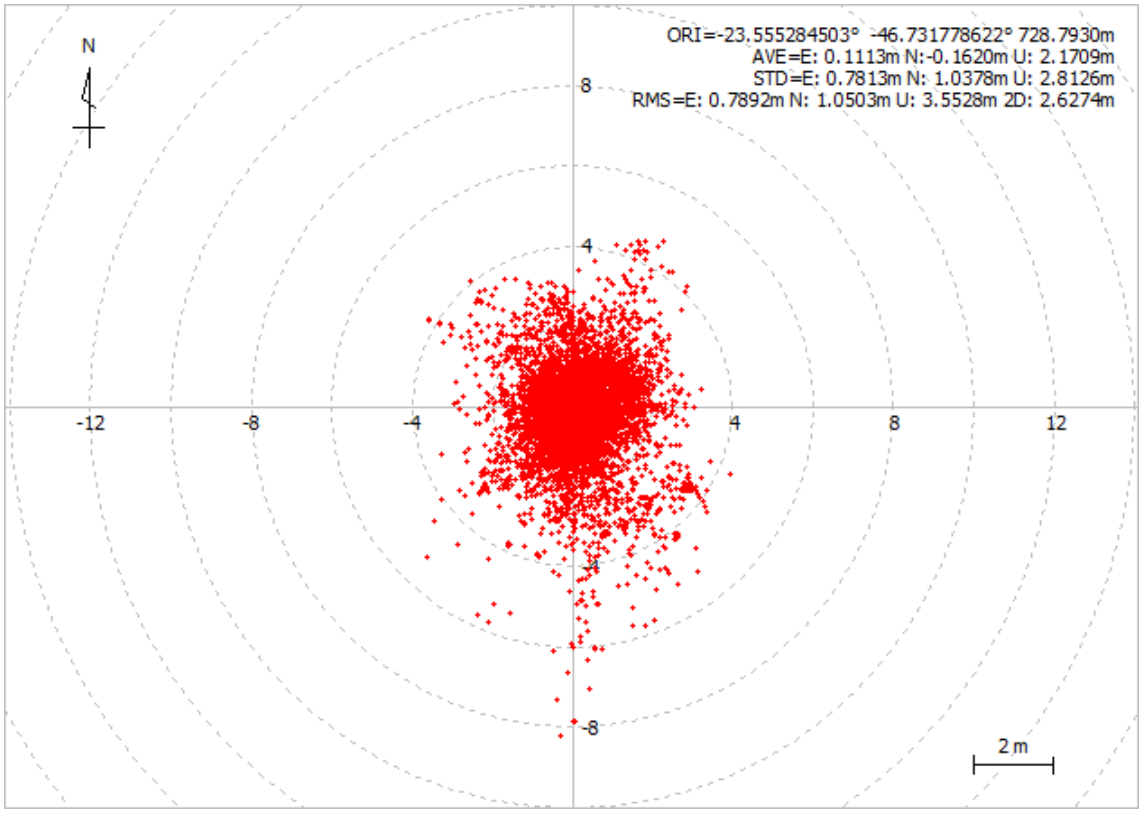
Outra maneira de se visualizar o comportamento e as tendências de um posicionamento é através do gráfico de dispersão, que oferece a plotagem de um determinado par de coordenadas, época a época, em torno de um determinado ponto fixo, que em nosso caso são as coordenadas da Estação Móvel. Da Figura 64 à Figura 66 é demonstrado o erro planimétrico em metros dos rastreios executados pelo ProMark3. Os gráficos dos outros receptores apresentam o mesmo padrão de dispersão e por esse motivo não foram aqui apresentados.

Figura 64 – Dispersão dos erros para a estação móvel – Posicionamento por Ponto Simples.



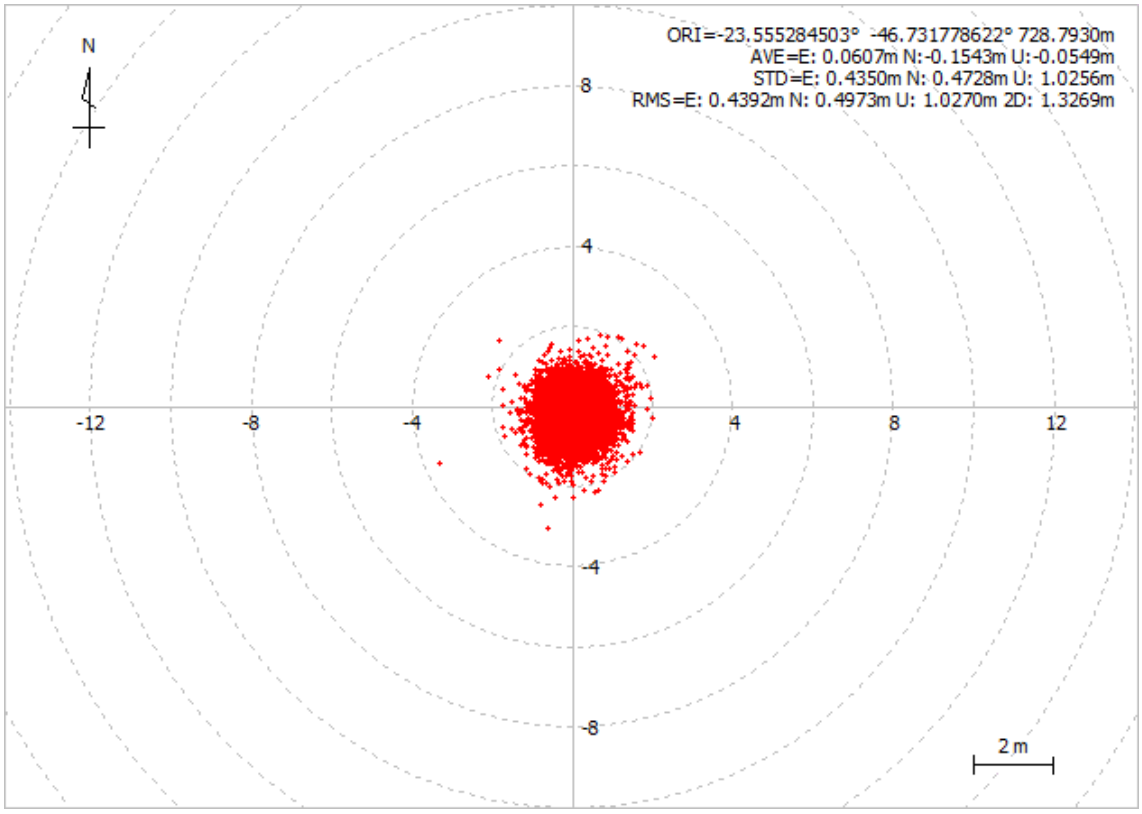
Fonte: Autor (2018).

Figura 65 – Dispersão dos erros para a estação móvel – DGPS com Domínio na Posição.



Fonte: Autor (2018).

Figura 66 – Dispersão dos erros para a estação móvel – DGPS com Domínio na distância.



Fonte: Autor (2018).

Pela análise dos gráficos pode-se perceber que o Posicionamtento po Ponto Simples se apresenta mais disperso e com uma determinada tendência, que neste caso é para a direção sudeste; a correção diferencial no domínio da posição proporciona uma nítida melhora na exatidão das coordenadas que ficam mais concentradas no centro (com 99% dos pontos com erro de até 4,00 m), o que é comprovado pelos números das tabelas, tomando como exemplo o equipamento ProMark3, onde se constata uma melhora de 39,13% no valor da distância média, que diminui de 1,61 m para 0,98 m. Há também uma melhora de 43,98%, na precisão das coordenadas, que diminui de 1,14 m para 0,85 m, também em relação à distância para a coordenada conhecida da Estação Móvel.

Verifica-se também, que apesar de uma melhora na média, pontualmente há uma degradação da qualidade em determinados momentos, afastando alguns pontos antes melhor localizados e aumentando, para este equipamento, o erro máximo na distância de 7,59 m para 8,10 m, sendo que na altitude há uma degradação na qualidade em todos os quesitos.

Os valores da tabela, também demostram que a exatidão e a precisão obtida através deste método aproximam-se mais dos valores ditos verdadeiros, além de melhorar os valores da altimetria em todos os equipamentos testados.

A Figura 67 mostra o histograma dos erros para o equipamento ProMark3 para o mesmo dia e horário dos gráficos de dispersão apresentatos anteriormente, sendo que as barras em vermelho representam a frequência para o posicionamento por ponto simples, as em verde o DGPS com Domínio na Posição e as em azul o DGPS com Domínio nas Distancias. As classes estão divididas em intervalos de 0,50 m, de 0,00 m a 8,10 m que é o erro máximo encontrado.

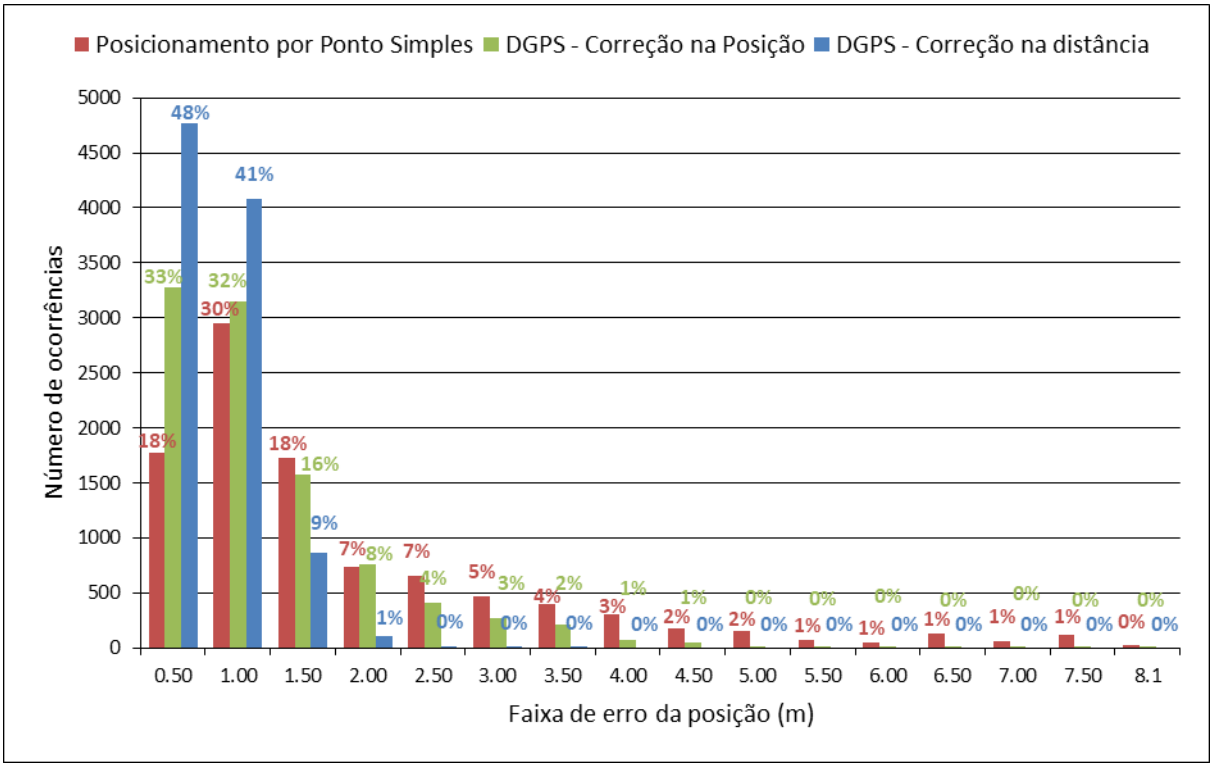
Assim como o gráfico de dispersão o histograma mostra o método sem correções com barras em todas as classes, para os com correção no domínio da posição, as barras com algum valor significativo vais até 4,50 m, ou pouco mais que a metade e no domíno das distâncias até um quarto das classes.

Para posicionamento por ponto simple apenas 18% ou 1780 de 9839 pontos encontran-se no limite 0,50 m; para o DGPS com Domínio na Posição a proporção

sobe para 33% e chegando a 48% para o DGPS com Domínio nas Distancias, com 3273 e 4764 pontos respectivamente.

Verifica-se também que no Domínio das Distancias 98% dos pontos possuem um erro inferior a 1,50 m, ao passo que par o DGPS com Domínio na Posição temos 80% e para o posicionamento por ponto simples apenas 66%.

Figura 67 – Distribuição dos erros para o equipamento Promark3.



Fonte: Autor (2018).

A grande maioria dos erros amenizados através do processo de DGPS possuem uma forte correlação com a distância entre o receptor e a base, segundo Parkinson (1996) estes erros podem ser das efemérides dos satélites, ionosféricos, troposféricos e causados pela falta de intervisibilidade dos satélites entre as estações, além das diferenças nos ângulos de elevação e azimute. Desta maneira, quanto maior a distância entre as estações menor será a eficiência do método.

Monteiro, Moore e Hill (2005) demonstram o declínio da qualidade da correção posicional com o aumento da distância entre as bases, porém, não específica em qual domínio o ensaio foi realizado. Desta maneira o mesmo teste apresentado foi refeito, utilizando-se os dados do receptor U-blox como móvel e outras estações da RBMC

como base, procedendo-se com afastamentos sucessivos, no intuído de se verificar o comportamento dos dois domínios em relação à distância.

Três sequencias formam calculadas com opção para início do afastamento onde houvessem duas ou mais estações com menos de 10 km entre si. A Figura 68 mostra as linhas calculadas sendo elas: a primeira de São Paulo, estações POCI e POLI à Barcelos, estação AMBC; a segunda do Rio de Janeiro, estações ONRJ e RIOD à Barcelos (AMBC) e de Fortaleza, estações CEFT e BRFT à São Paulo (POLI).

Figura 68 – Linhas de afastamento para estimativa do DGPS

Fonte: Autor (2018).

Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 15, onde a primeira coluna tem o nome das estações da RBMC utilizadas em cada uma das linhas; a segunda coluna, seu afastamento em quilômetros. A partir daí os dados estão separados pela acurácia e precisão, e então pelo domínio da distância e domínio da posição, sendo

que as denominações dDist e Correção na dist. já foram explanados anteriormente. Ao lado do nome das estações estão apresentados os valores das acurácias e precisões sem correção, ou seja, obtidas pelo PPS.

Tabela 15 – Correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 14/04/2016

RBMC	dist (km)	ACURÁCIA				PRECISÃO			
		Dom. da distância		Dom. da posição		Dom.da distância		Dom. da posição	
		dDist	Correção na dist	dDist	Correção na dist	dDist	Correção na dist	dDist	Correção na dist
POCI > acurácia = 2,49m ; precisão = 2,14m									
POLI	0.15	0.78	69%	0.99	60%	0.43	80%	0.96	55%
S&C	9	0.74	70%	1.16	53%	0.40	81%	1.11	48%
SPC1	89	1.14	54%	1.28	49%	0.83	61%	1.31	39%
EESC	209	1.67	33%	1.21	52%	1.37	36%	1.06	50%
SPJA	302	2.65	-6%	1.17	53%	2.23	-5%	0.94	56%
SPFR	344	3.57	-43%	1.35	46%	2.74	-28%	1.14	47%
GOGY	807	5.56	-123%	1.72	31%	3.13	-47%	1.33	38%
AMBC	3050	20.92	-739%	3.11	-25%	35.50	-1562%	2.13	0%
ONRJ> acurácia = 2,55m ; precisão = 1,12m									
RIOD	12	0.54	79%	1.21	53%	0.32	72%	0.95	16%
CHIP	182	1.20	53%	1.02	60%	0.66	41%	0.96	15%
MGV1	273	2.36	7%	0.86	66%	1.63	-45%	0.69	39%
SPFR	505	4.37	-71%	1.20	53%	2.96	-163%	0.87	23%
MGMT	643	4.05	-59%	1.24	51%	2.41	-115%	0.82	27%
GOGY	935	5.51	-116%	1.38	46%	3.04	-171%	0.96	15%
AMBC	3229	19.16	-651%	2.76	-8%	9.42	-739%	1.61	-43%
BRFT> acurácia = 1,24m ; precisão = 0,59m									
CEEU	0.011	0.43	65%	0.60	51%	0.28	53%	0.59	0%
CEFT	19	0.48	62%	1.08	13%	0.28	53%	0.86	-46%
CESB	213	1.32	-7%	1.00	19%	0.73	-24%	0.80	-35%
CRAT	387	2.80	-126%	1.30	-5%	1.21	-104%	0.87	-47%
PEPE	651	4.38	-253%	1.39	-12%	2.02	-241%	0.91	-53%
BAIR	905	5.65	-356%	1.89	-53%	2.38	-303%	1.31	-122%
MGMC	1539	8.28	-568%	2.65	-114%	4.60	-679%	2.12	-259%
MGV1	2096	12.20	-884%	2.64	-113%	10.60	-1694%	2.15	-264%
POLI	2353	13.08	-956%	2.74	-121%	11.19	-1793%	2.09	-254%
RSPE	3420	39.80	-3112%	6.23	-403%	53.61	-8971%	1.90	-221%

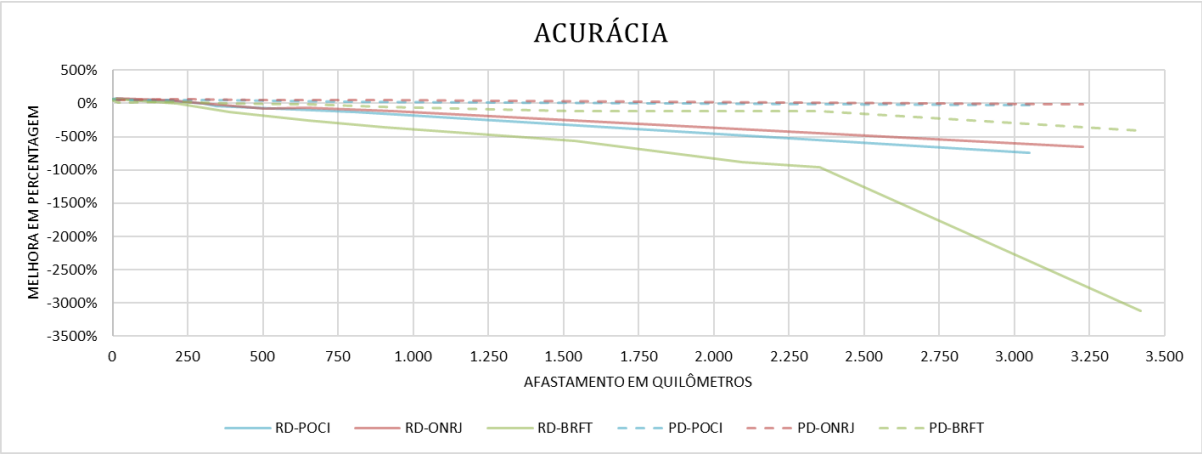
Fonte: Autor (2018).

O decréscimo da capacidade de fornecer a correção pela estação base pode ser visto na Figura 69 que mostra a queda da acurácia e na Figura 70 que mostra a redução da precisão. As linhas contínuas (cheias) representam as correções no domínio da distância (RD) e as tracejadas as correções no domínio da posição (PD).

Em azul os resultados obtidos pela estação POCI, em vermelho os da estação ONRJ e em verde os da estação BRFT. A Figura 71 irá mostrar estes resultados de uma forma mais detalhada.

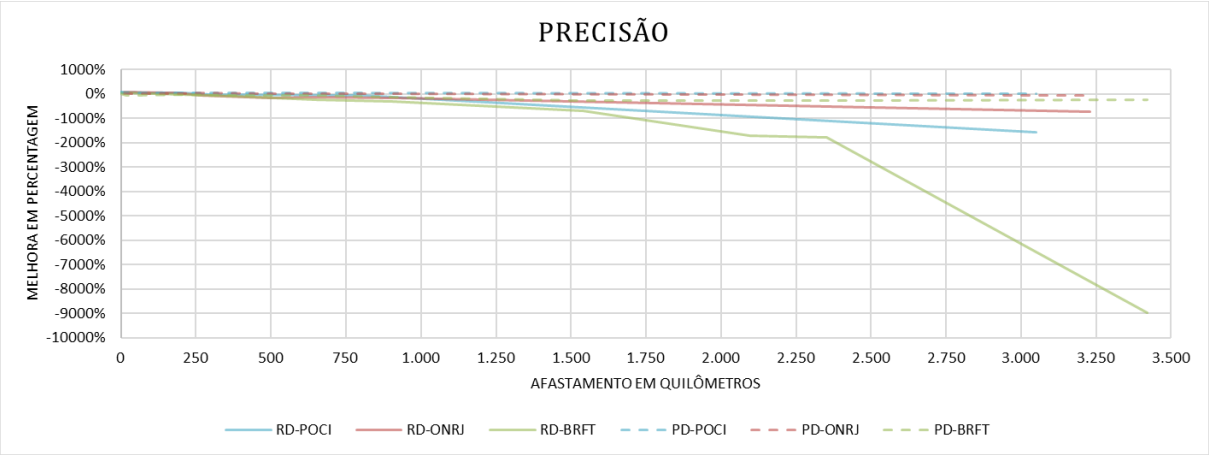
O gráfico demostra que tanto para a acurácia quanto para a precisão há uma queda mais acentuada para a correção no domínio da distância que para a correção no domínio da posição. Demonstrando que até um determinado afastamento o domínio da distância possui uma maior influência (linhas pontilhadas abaixo das linhas cheias), porém a partir de uma determinada distância, o domínio da posição, se mostra mais eficaz (linhas pontilhadas acima das linhas cheias).

Figura 69 – Acurácia da correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 14/04/2016.



Fonte: Autor (2018).

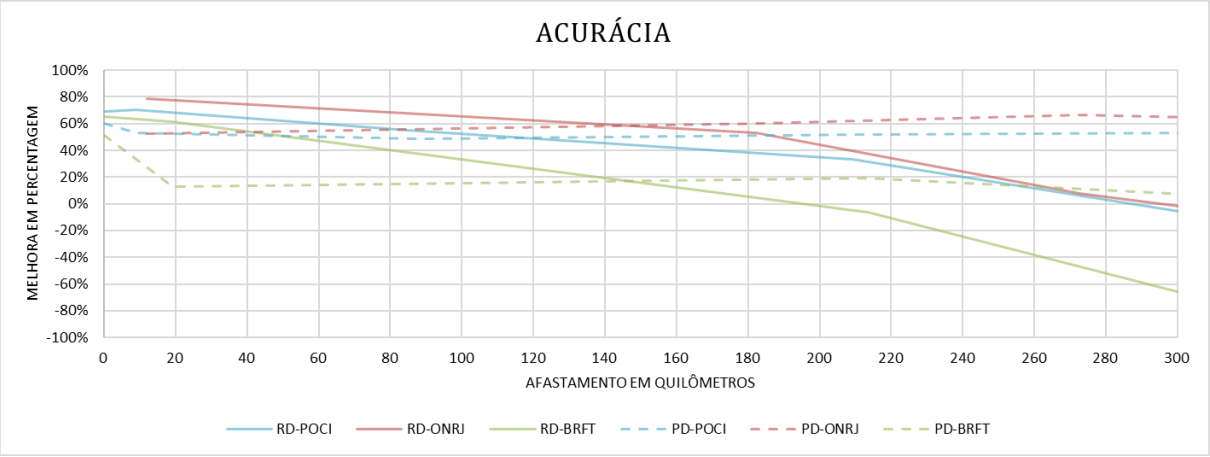
Figura 70 – Precisão da correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 14/04/2016



Fonte: Autor (2018).

Devido à escala do gráfico, não é possível precisar onde encontra-se este limiar e por isso montou-se a Figura 71 que focaliza os primeiros dados da tabela anterior, limitando-se à distância de 300 km, de modo a aumentar a escala horizontal do gráfico. Assim considerando, por exemplo, as linhas azuis que representam o afastamento da estação POCI, pode-se observar que a linha cheia e a tracejada, que constituem os domínios da distância e da posição respectivamente, cruzam-se próximo aos 120 km, as linhas vermelhas que denotam o afastamento da ONRJ e as verdes, que representam o afastamento da BRFT, em Fortaleza, se cruzam próximo ao km 140.

Figura 71 – Detalhe da acurácia na correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 14/04/2016



Fonte: Autor (2018).

Desta maneira pode-se dizer que em um primeiro momento o DGPS com domínio na distância possui um maior grau de influência na correção do posicionamento, mas que a partir de uma determinada distância é preferível a utilização da correção com domínio na posição.

Deve-se dizer, no entanto que esse limiar deve depender das condições atmosféricas, atividade solar, além de outras já comentadas no item 5.2.

Neste sentido o mesmo experimento foi realizado em outra data, de modo que seja possível a comparação da distância limite da utilização entre um ou outro método a partir de outra data em outra época do ano, o intuito desta diferença temporal é de se obter outras condições atmosféricas e ciclo solar. A Tabela 16 apresenta os dados calculados para o dia 01/01/2018 para as mesmas estações, com os mesmos afastamentos

Tabela 16 – Correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 01/01/2018

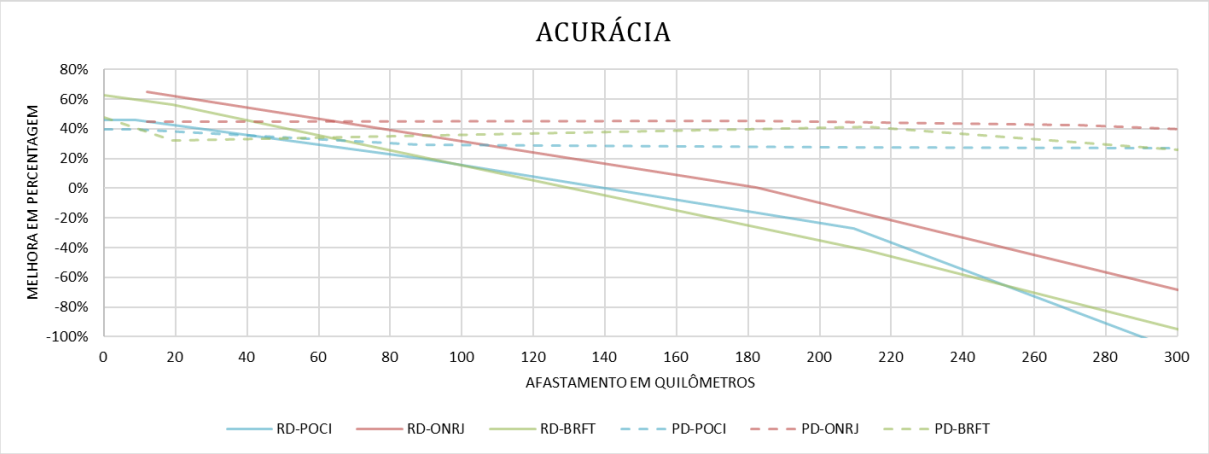
RBMC	dist (km)	ACURÁCIA				PRECISÃO			
		Range Domain		Position Domain		Range Domain		Position Domain	
		dDist	Correção na dist	dDist	Correção na dist	dDist	Correção na dist	dDist	Correção na dist
POCI > acurácia = 1,35m ; precisão = 0,83m									
POLI	0.15	0.73	46%	0.81	40%	0.42	50%	0.48	42%
S&C	9	0.73	46%	0.81	40%	0.42	50%	0.48	42%
SPC1	89	1.08	20%	0.95	30%	0.67	19%	0.89	-8%
EESC	209	1.71	-27%	0.97	28%	1.10	-32%	0.65	21%
SPJA	302	2.85	-111%	0.98	27%	2.13	-158%	0.66	20%
SPFR	344	3.41	-153%	1.08	20%	2.46	-197%	0.85	-3%
GOGY	807	5.08	-277%	1.33	1%	2.77	-234%	0.89	-8%
AMBC	3050	16.43	-1119%	2.01	-49%	8.09	-878%	1.39	-68%
ONRJ> acurácia = 1,49m ; precisão = 1,12m									
RIOD	12	0.52	65%	0.82	45%	0.30	73%	0.77	32%
CHIP	182	1.48	0%	0.81	45%	1.08	4%	0.77	32%
MGV1	273	2.27	-53%	0.86	42%	1.82	-62%	0.79	30%
SPFR	505	4.29	-188%	1.19	20%	3.06	-172%	1.04	7%
MGMT	643	5.91	-297%	1.49	0%	4.08	-263%	1.24	-10%
GOGY	935	5.89	-296%	1.46	2%	3.23	-188%	1.13	0%
AMBC	3229	17.48	-1075%	2.15	-44%	8.51	-658%	1.54	-37%
BRFT> acurácia = 1,16m ; precisão = 0,59m									
CEEU	0.011	0.43	63%	0.60	48%	0.28	53%	0.59	0%
CEFT	19	0.51	56%	0.79	32%	0.31	48%	0.77	-30%
CESB	213	1.64	-42%	0.68	41%	1.01	-71%	0.72	-22%
CRAT	387	2.87	-148%	1.04	10%	1.54	-160%	0.94	-60%
PEPE	651	4.19	-262%	1.04	10%	2.13	-261%	1.70	-187%
BAIR	905	5.25	-354%	0.97	16%	2.27	-284%	0.70	-19%
MGMC	1539	7.20	-523%	1.47	-27%	3.46	-485%	1.33	-125%
MGV1	2096	10.21	-783%	1.51	-30%	5.32	-801%	1.12	-90%
POLI	2353	10.64	-820%	1.84	-59%	5.59	-846%	1.23	-108%
RSPE	3420	13.98	-1109%	2.42	-110%	7.83	-1225%	1.55	-163%

Fonte: Autor (2018).

Pelos valores da tabela, assim como o gráfico da Figura 72 percebe-se que o comportamento ainda é o mesmo, ou seja, para menores distâncias entre o móvel e a base, o domínio da distância proporciona uma maior redução no erro do posicionamento, entretanto, da mesma forma que no experimento anterior, com o aumento da distância diminui a eficácia da correção, que a partir de certo limite passa a introduzir erros em vez de corrigir (porcentagens negativas). Para este dia o limiar

ficou em aproximadamente 50 km para a estação POLI e 65 km para as estações ONRJ e BRFT.

Figura 72 – Detalhe da acurácia na correção pelo DGPS em função do afastamento da base no dia 01/01/2018.



Fonte: Autor (2018).

Fica claro que não se pode estabelecer uma regra geral ou equação, em função das particularidades da atmosfera em cada dia. O estudo poderia ser aprofundado com bateria maior de testes, fornecendo resultados mais consistentes. No entanto, para esta pesquisa a conclusão válida em todos os experimentos é que para bases mais curtas (tipicamente até aproximadamente 50 km, nos experimentos feitos) o domínio das distâncias fornece uma melhor correção do erro do posicionamento.

5.3 QUALIDADE DA CORREÇÃO DOS ARQUIVOS NMEA COM DGPS NOS DOMÍNIOS DA POSIÇÃO E DA DISTÂNCIA.

O presente item descreve um teste que teve como objetivo avaliar e quantificar a correção do posicionamento através das pseudodistâncias calculadas pelo programa dgpsNMEA, conforme descrito no Item 4.8.2.

Foram feitas várias campanhas em ambiente controlado, para coletas de dados a partir de equipamentos que gravam ao mesmo tempo tanto o formato NMEA, quanto os dados brutos das observáveis medidas, os quais podem ser convertidos em arquivos RINEX.

Para tanto, os equipamentos empregados foram o Novatel, o U-blox e o telefone Galaxy S2, que foram ligados simultaneamente, em paralelo na mesma

antena, através de um divisor de sinal. As campanhas possuem a duração de três ou quatro dias cada e foram utilizadas as quatro antenas instaladas sobre o LTG.

Em um primeiro momento foram aplicadas as correções nos dois domínios tendo como base a estação POLI. Tendo em vista que em todas as campanhas os resultados se mostraram muito similares, a Tabela 17 apresenta os resultados de apenas uma delas, das 14:24:30 hs do dia 12/09/2017 às 14:18:00 hs do dia 15/09/2017. A descrição do conteúdo de cada coluna, assim como o significado da coluna “Correção na distância” já foi discutido no Item 5.2.

Tabela 17 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo programa dgpsNMEA utilizando a estação POLI como base.

	Posicionamento por Ponto				**DGPS posição**					**DGPS distância**				
	dLat	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
	NOVATEL													
Média	-0.95	0.44	3.10	1.59	0.20	0.12	2.80	1.16	27%	0.20	0.12	2.80	1.16	27%
Desvio padrão	1.10	1.16	2.45	1.06	0.93	1.03	2.85	0.80	24%	0.93	1.03	2.85	0.80	24%
Intervalo	10.08	7.33	22.22	7.44	10.89	21.71	34.25	16.75	-125%	10.89	21.71	34.25	16.75	-125%
Mínimo	-7.00	-2.19	-4.87	0.04	-5.30	-16.7	-17.3	0.01	89%	-5.31	-16.71	-17.35	0.00	91%
Máximo	3.08	5.14	17.35	7.48	5.58	5.00	16.90	16.75	-124%	5.58	5.00	16.90	16.76	-124%
Contagem	17253				17253					17253				
	U-blox													
Média	-0.74	0.34	3.82	1.37	0.46	-0.09	3.65	1.43	-4%	0.46	-0.09	3.65	1.43	-4%
Desvio padrão	1.09	0.93	2.92	0.90	1.09	1.19	3.45	0.88	3%	1.09	1.19	3.45	0.88	3%
Intervalo	7.22	6.10	27.00	5.03	9.35	23.66	47.84	18.85	-275%	9.35	23.66	47.84	18.85	-275%
Mínimo	-5.02	-2.14	-4.43	0.01	-3.86	-18.9	-17.1	0.02	-167%	-3.86	-18.9	-17.13	0.02	-150%
Máximo	2.20	3.96	22.57	5.03	5.49	4.80	30.71	18.86	-275%	5.48	4.80	30.71	18.86	-275%
Contagem	16108				16108					16108				
	Galaxy S2L													
Média	-0.78	0.38	1.29	1.42	0.39	0.06	0.98	1.41	0.5%	0.39	0.06	0.99	1.41	0.6%
Desvio padrão	1.64	1.04	2.22	1.58	1.52	1.16	3.08	1.34	15%	1.52	1.16	3.08	1.34	15%
Intervalo	14.41	8.12	13.90	13.75	17.79	22.89	36.98	15.31	-11%	17.79	22.89	36.98	15.32	-11%
Mínimo	-13.1	-1.66	-6.23	0.04	-12.2	-15.3	-25.7	0.02	64%	-12.20	-15.30	-25.71	0.01	73%
Máximo	1.31	6.46	7.67	13.79	5.60	7.60	11.27	15.33	-11%	5.60	7.60	11.27	15.33	-11%
Contagem	17135				17135					17135				

Fonte: Autor (2018).

Analisando a Tabela 17, percebe-se que para os equipamentos U-blox e para o telefone, não houve nenhuma melhora significativa no posicionamento, sendo que em vários valores houve uma piora na qualidade dos dados estatísticos. Apenas para

o receptor Novatel houve uma pequena melhora em algumas posições, onde o erro na distância passou de 1,59 m para 1,16 m.

Aproveitando o fato de os equipamentos também gravarem as observáveis, além de fornecerem as sentenças NMEA; foram criados arquivos RINEX, a partir destas informações e então utilizados como referência no programa dgpsNMEA, para a correção das posições contidas nos arquivos NMEA. Impondo-se o que móvel e a base sejam o mesmo equipamento, e assim, que ocuparam o mesmo ponto com a mesma antena, ao mesmo tempo, as observáveis obtidas pelo receptor foram utilizadas para corrigir as coordenadas calculadas e fornecidas pelo próprio receptor. Em outras palavras, o equipamento está sendo utilizado para corrigir a si próprio.

Tabela 18 – Resumo estatístico dos dados obtidos pelo programa dgpsNMEA utilizando a própria estação como base.

	Posicionamento por Ponto				**DGPS posição**					**DGPS distância**				
	dLat	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
	NOVATEL													
Média	-0.95	0.44	3.10	1.59	0.15	0.10	2.70	0.79	50.3%	0.14	0.10	2.70	0.79	50.3%
Desvio padrão	1.10	1.16	2.45	1.06	0.60	0.83	2.56	0.66	37.1%	0.60	0.83	2.56	0.66	37.1%
Intervalo	10.08	7.50	22.25	7.44	27.45	24.36	70.49	25.70	-245.6%	27.45	24.36	70.49	25.70	-245.6%
Mínimo	-7.00	-2.36	-4.88	0.04	-5.20	-12.88	-17.32	0.00	97.7%	-5.21	-12.88	-17.32	0.00	97.7%
Máximo	3.08	5.14	17.37	7.48	22.25	11.48	53.17	25.70	-243.6%	22.24	11.48	53.17	25.70	-243.6%
Contagem	258806				258806					258806				
	U-blox													
Média	-0.74	0.34	3.82	1.37	0.48	-0.19	3.70	1.41	-3%	0.48	-0.19	3.70	1.41	-2.7%
Desvio padrão	1.09	0.93	2.92	0.90	1.07	1.20	3.74	0.93	-2.5%	1.07	1.20	3.74	0.93	-2.4%
Intervalo	7.28	6.13	27.10	5.03	17.72	24.50	80.44	19.85	-295%	17.72	24.50	80.44	19.85	-294.9%
Mínimo	-5.02	-2.14	-4.43	0.01	-7.05	-16.74	-49.90	0.00	83%	-7.05	-16.74	-49.90	0.00	50.0%
Máximo	2.26	3.99	22.67	5.03	10.68	7.76	30.54	19.85	-295%	10.67	7.76	30.54	19.85	-294.5%
Contagem	241618				241618					241618				
	Galaxy S2L													
Média	-0.78	0.38	1.29	1.42	0.37	0.08	0.96	1.39	2%	0.37	0.08	0.96	1.39	3%
Desvio padrão	1.64	1.04	2.22	1.58	1.63	1.29	3.88	1.60	-1%	1.63	1.29	3.88	1.60	-1%
Intervalo	14.4	8.12	13.9	13.75	56.69	68.60	187.88	35.64	-159%	56.7	68.60	187.9	35.63	-159%
Mínimo	-13.1	-1.66	-6.23	0.04	-31.6	-33.00	-98.84	0.00	95%	-31.62	-33.00	-98.84	0.00	98%
Máximo	1.31	6.46	7.67	13.79	25.1	35.60	89.04	35.64	-158%	25.1	35.60	89.04	35.63	-158%
Contagem	256994				256994					256994				

Fonte: Autor (2018).

Era de se esperar que as correções se aproximassem de 100%, levando os erros a um valor muito próximo de zero, porém, se analisando os valores da tabela,

percebe-se da mesma forma que se utilizando a estação POLI como referência, para os equipamentos U-blox e para o telefone, as correções são mínimas, quase que imperceptíveis e piorando algumas variáveis de medida de tendência, tais como o desvio padrão e principalmente aumentando o intervalo.

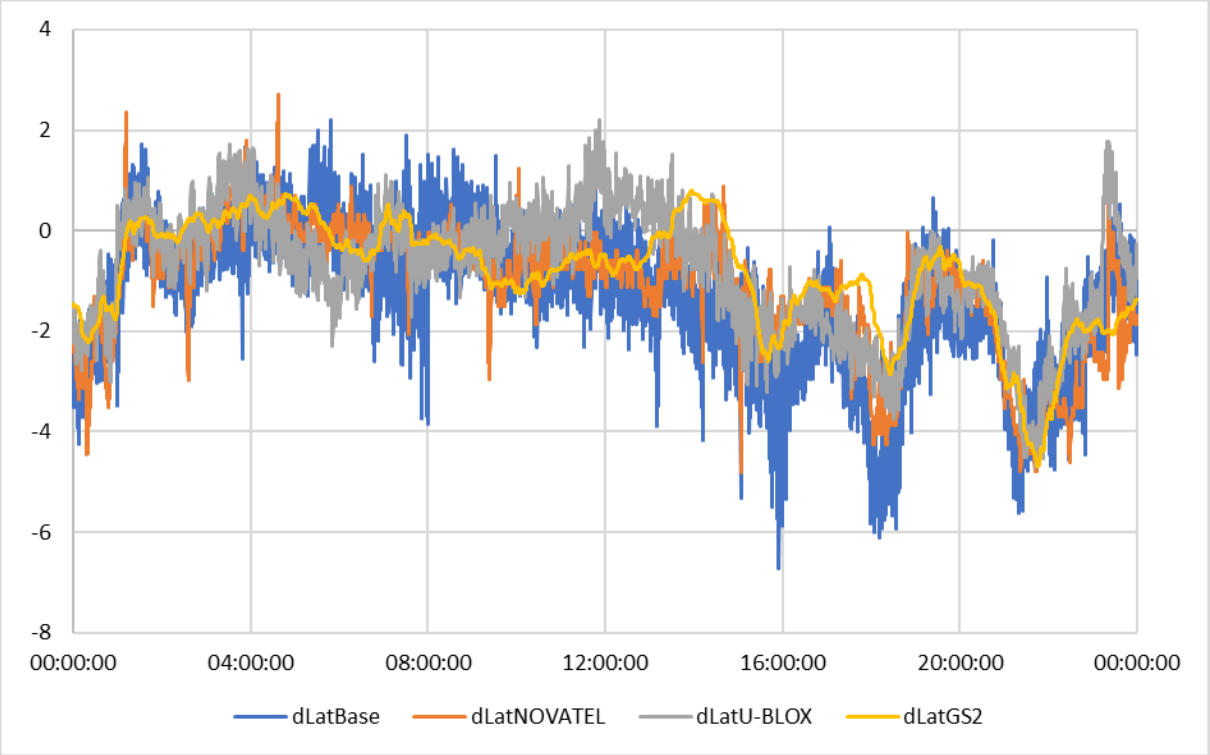
Isso se deu, muito provavelmente por dois motivos; o primeiro diz respeito à técnica de correlação para a aquisição da medida da pseudodistância, o U-blox e o Sirf IV (modulo de GPS instalado no telefone) são receptores HSGPS, diferentemente do Novatel, que é um receptor GPS convencional.

O segundo e principal provável motivo está ligado à maneira em que as coordenadas são calculadas pelo receptor. O Novatel é um receptor muito utilizado em pesquisas pela sua característica de não implementar filtros ou técnicas de correção nas observáveis (tal como suavização da pseudodistância pela fase), fornecendo os dados sem atenuação. Já o receptor U-blox, assim como o *chip* da Sirf, aplicam filtros nos algoritmos de processamento, na tentativa de melhorar o posicionamento.

Desta maneira, como as coordenadas da base são calculadas pelo PPS ou em inglês SPP (*Standard Point Positioning*) utilizando-se apenas os métodos recomendados pelas especificações de interface IS-GPS-200 (EUA, 2014), os erros que causam a inexatidão do posicionamento passam a não serem mais coincidentes, um dos métodos corrige as pseudodistâncias e calcula a solução de uma maneira e o outro método de outra maneira, o que acaba com o princípio do DGPS, que parte do pressuposto de que os erros tanto na base como no móvel são similares.

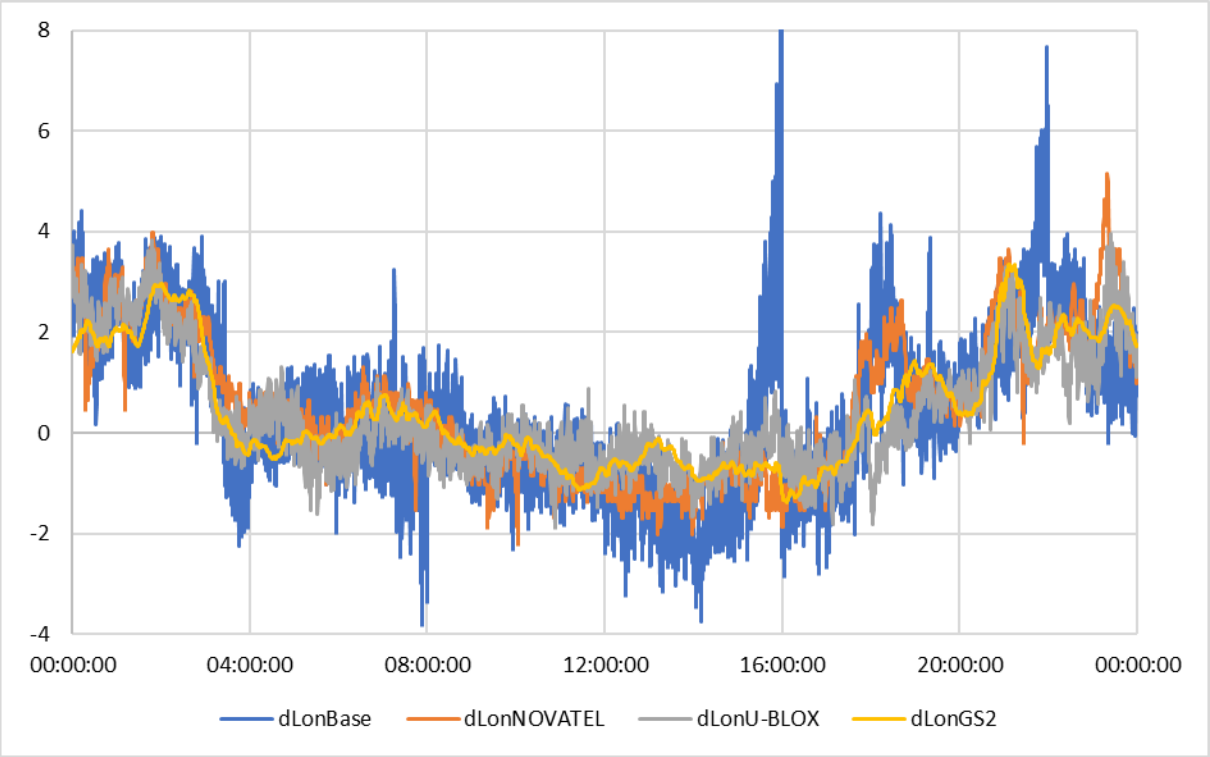
A Figura 73 e a Figura 74 mostram as diferenças de posicionamento para a latitude e para a longitude, respectivamente, para um período de 24 hs no dia 13/09/2017. A não sobreposição das linhas no gráfico, sugere que cada uma das séries plotadas foram calculadas por um algoritmo diferente, resultando também em uma faixa de ruído diferente, o que está comprovado nos valores de intervalo, máximos e mínimos da tabela. Os *outliers* que podem ser vistos na longitude próximos às 16:00 hs, são causados pela implementação do RAIM-FDE de baixo impacto e poderiam ser mitigados, diminuindo-se o valor da tolerância no próprio FDE, além da implementação de algum filtro de passa-baixa.

Figura 73 – Erro no posicionamento da Latitude em metros para a Base (PPS) e o Móvel (NMEA) para o dia 13/09/2017 das 0:00:00 às 23:59:59 hs.



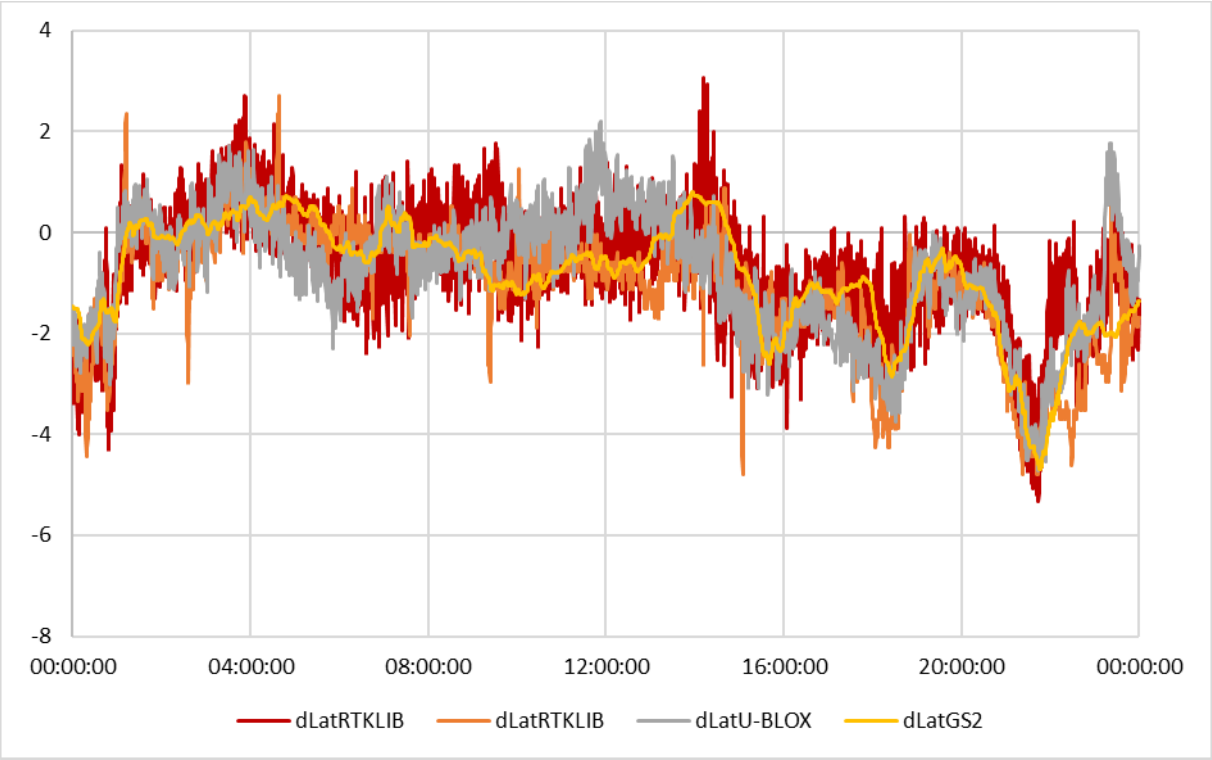
Fonte: Autor (2018).

Figura 74 – Erro no posicionamento da Longitude em metros para a Base (PPS) e o Móvel (NMEA) para o dia 13/09/2017 das 0:00:00 às 23:59:59 hs



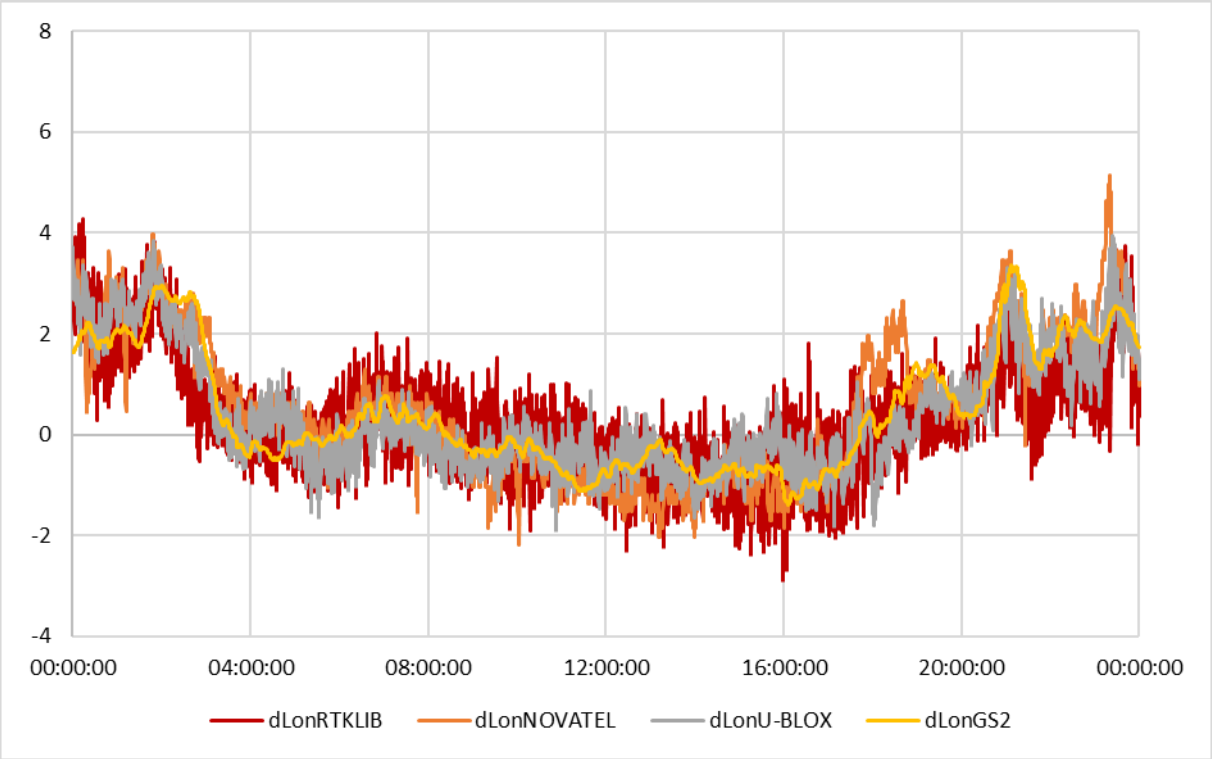
Fonte: Autor (2018).

Figura 75 – Erro no posicionamento da Latitude em metros para a Base (RTKlib) e o Móvel (NMEA) para o dia 13/09/2017 das 0:00:00 às 23:59:59 hs.



Fonte: Autor (2018).

Figura 76 – Erro no posicionamento da Longitude em metros para a Base (RTKlib) e o Móvel (NMEA) para o dia 13/09/2017 das 0:00:00 às 23:59:59 hs.



Fonte: Autor (2018).

Como uma forma de fundamentar o que foi exposto, os dados dos mesmos equipamentos foram plotados novamente na Figura 75 para a latitude e na Figura 76 para a longitude, mas com as coordenadas da estação POLI, agora em vermelho em substituição ao azul, calculadas pelo *software* RTKlib, que possui um algoritmo de seleção de satélites mais elaborado. Percebe-se que apesar dos *outliers* terem diminuído as diferenças de posicionamento continuam.

5.4 QUALIDADE DA CORREÇÃO DOS ARQUIVOS NMEA POR OUTRO ARQUIVO NMEA.

Aqui foram testadas as correções nas coordenadas obtidas de um arquivo com as sentenças NMEA, por outro arquivo com sentenças NMEA gerado por um receptor posicionado em um ponto conhecido.

Os testes foram realizados em duas etapas, a primeira utilizando-se a antena interna do telefone, e a segunda utilizando-se uma antena externa.

5.4.1 Resultados da correção no posicionamento NMEA x NMEA com a antena interna.

Os dados foram obtidos através de rastreio realizado na estação meteorológica do Mirante de Santana, São Paulo - SP, onde em um único bastão apoiado a um tripé, foram fixados diversos equipamentos, entretanto os únicos que forneciam as sentenças NMEA, de interesse para este teste foram os telefones celulares.

Os telefones utilizados foram: um modelo da Motorola XT 687, um modelo Samsung Galaxy S2 – Lite (GT-i9070) e três modelos Samsung Galaxy S2 (GT-i9100). O intuito de se utilizar vários dispositivos com o mesmo modelo, foi o de testar a repetibilidade, isto é, verificar, se o algoritmo de cálculo do posicionamento iria fornecer as mesmas coordenadas, tendo em vista utilizarem o mesmo *chipset* e possuírem a mesma arquitetura de disposição dos integrantes eletrônicos na placa mãe.

Os dados obtidos foram submetidos a um tratamento estatístico e compilados em tabelas, onde da Tabela 19 à Tabela 22 são apresentados os resultados obtidos em um rastreio de 6:00 h no dia 27/02/2017 e a Tabela 23, assim como a Tabela 24

disponibilizam resultados do dia 23/04/2017 em um rastreio de 4:00 h. Onde no primeiro conjunto de colunas estão os dados do equipamento utilizado como base, no segundo, os dados sem correção e no terceiro os dados após a correção DGPS. As demais informações de cada coluna já foram comentadas em tabelas anteriores.

Tabela 19 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone XT-687 utilizando-se a antena interna em 27/02/2017.

27/02/2017	**GT-i9100 equip. A base**				**Motorola XT-687 móvel**				**Motorola XT687 DGPS**				
	dLat	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.86	0.61	9.87	1.39	-0.04	-1.53	3.91	2.20	0.82	-2.14	-5.96	2.91	-32%
Desvio padrão	0.97	0.72	2.34	0.80	1.30	1.18	3.25	0.76	1.47	1.71	4.88	1.37	-80%
Intervalo	4.19	2.41	15.50	3.47	4.82	7.42	18.00	3.94	6.51	9.53	27.70	6.87	-74%
Mínimo	-3.36	-0.40	-1.61	0.01	-2.38	-4.52	-2.81	0.63	-2.26	-6.29	-13.90	0.13	80%
Máximo	0.83	2.01	13.89	3.48	2.45	2.89	15.19	4.57	4.26	3.23	13.80	6.99	-53%
Contagem	6193				6193				6193				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 20 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-L utilizando-se a antena interna em 27/02/2017.

27/02/2017	**GT-i9100 equip. A base**				**GT-i9070 equip. L móvel**				**GT-i9070 equipamento. L DGPS**				
	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	-0.84	-0.59	13.79	1.64	-1.43	0.92	9.87	2.28	-0.59	1.51	-3.92	2.80	-23%
Desvio padrão	0.84	1.34	3.58	0.94	1.40	1.70	3.70	1.60	1.48	2.37	4.99	1.60	0%
Intervalo	4.95	5.53	16.90	3.55	13.44	22.70	24.90	13.95	15.30	22.75	27.20	16.25	-17%
Mínimo	-3.36	-3.52	2.19	0.01	-8.72	-13.22	-1.51	0.09	-7.24	-14.13	-15.40	0.02	84%
Máximo	1.59	2.01	19.09	3.56	4.72	9.47	23.39	14.04	8.06	8.61	11.80	16.27	-16%
Contagem	14987				14987				14987				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 21 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-B utilizando-se a antena interna em 27/02/2017.

27/02/2017	**GT-i9100 equip. A base**				**GT-i9100 equip. B móvel**				**GT-i9100 equipamento B DGPS**				
	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	-0.67	0.09	15.03	1.83	-0.94	-0.11	4.90	1.36	-0.28	-0.20	-10.12	1.20	12%
Desvio padrão	0.86	1.76	3.72	0.98	0.69	1.01	3.09	0.73	0.79	1.15	2.99	0.79	-7%
Intervalo	4.95	7.20	18.10	3.67	30.11	12.32	56.90	26.12	30.13	12.62	60.00	28.22	-8%
Mínimo	-3.36	-3.52	3.19	0.01	-5.02	-9.59	-5.41	0.18	-3.37	-10.48	-14.70	0.03	83%
Máximo	1.59	3.68	21.29	3.68	25.09	2.73	51.49	26.30	26.75	2.14	45.30	28.25	-7%
Contagem	19487				19487				19487				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 22 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-D utilizando-se a antena interna em 27/02/2017.

27/02/2017	**GT-i9100 equip. A base**				**GT-i9100 equip. D móvel**				**GT-i9100 equipamento. D DGPS**				
	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	-0.84	-0.61	13.82	1.65	-1.44	-0.38	1.63	2.04	-0.60	0.22	-12.19	1.74	15%
Desvio padrão	0.84	1.35	3.47	0.95	1.31	1.37	3.00	1.28	1.28	1.44	4.11	1.03	19%
Intervalo	4.95	5.53	15.90	3.55	12.39	12.65	17.20	8.26	12.29	11.90	20.30	6.97	16%
Mínimo	-3.36	-3.52	3.19	0.01	-7.53	-6.37	-5.71	0.02	-6.31	-6.25	-23.10	0.03	-73%
Máximo	1.59	2.01	19.09	3.56	4.87	6.27	11.49	8.28	5.98	5.65	-2.80	7.00	15%
Contagem	14427				14427				14427				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 23 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-B utilizando-se a antena interna em 23/04/2017.

23/04/2017	**GT-i9100 equip. A base**				**GT-i9100 equip. B móvel**				**GT-i9100 equipamento B DGPS**				
	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	-0.42	-1.21	14.32	2.29	-1.83	-0.95	16.17	2.64	-1.40	0.26	1.85	2.01	24%
Desvio padrão	1.25	1.61	4.52	0.75	1.30	1.49	3.07	1.08	1.03	1.31	6.42	0.87	20%
Intervalo	6.24	7.91	19.90	4.47	5.38	5.97	12.70	5.03	6.64	6.03	28.20	4.59	9%
Mínimo	-2.95	-4.67	3.79	0.21	-5.01	-4.01	9.99	0.20	-4.63	-2.20	-10.30	0.42	-114%
Máximo	3.30	3.24	23.69	4.68	0.37	1.96	22.69	5.23	2.01	3.83	17.90	5.02	4%
Contagem	15199				15199				15199				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 24 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-L utilizando-se a antena interna em 23/04/2017.

23/04/2017	**GT-i9100 equip. A base**				**GT-i9100 equip. D móvel**				**GT-i9100 equipamento. D DGPS**				
	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	-0.43	-1.21	14.31	2.29	-4.03	-3.06	11.19	5.06	-3.61	-1.85	-3.13	4.40	13%
Desvio padrão	1.25	1.61	4.53	0.75	0.50	0.34	2.20	0.59	1.33	1.52	5.08	1.06	-80%
Intervalo	6.24	7.90	19.90	4.46	5.00	2.22	6.50	3.52	6.25	7.17	24.10	5.04	-43%
Mínimo	-2.95	-4.66	3.79	0.21	-5.48	-5.04	8.69	3.45	-7.01	-6.07	-15.00	2.15	38%
Máximo	3.30	3.24	23.69	4.67	-0.47	-2.82	15.19	6.97	-0.77	1.10	9.10	7.19	-3%
Contagem	15172				15172				15172				

Fonte: Autor (2018).

Percebe-se que caso os dispositivos não possuam exatamente o mesmo modelo, o método piora os resultados (correção com valor percentual negativo), como no caso da utilização de um GT-i9100 para corrigir os telefones XT-687 onde temos -32% para a média e -80% para o desvio padrão e GT-i9070 onde a média foi de 1,64m para 2,80m, uma piora de -23%. Para modelos idênticos a correção apesar de

pequena em comparação com os resultados obtidos no item 5.2, apresentando valores entre 12% e 24%, é positiva.

Percebe-se também que apesar de ter sido utilizado o mesmo equipamento como referência para todas as correções, os descritivos (valores contidos na tabela) da base apresentam uma pequena alteração de uma tabela para a outra, isso se dá devido ao número de épocas coletadas não serem as mesmas, como mostram os valores da contagem que variam de 14427 a 15199. A quantidade de épocas é decorrente da correspondência de horário na obtenção da solução do posicionamento nos dois equipamentos, que caso não sejam as mesmas, são descartadas.

5.4.2 Resultados da correção no posicionamento NMEA x NMEA com a antena externa.

Os dados foram obtidos através de rastreios realizados com auxílio de duas das antenas localizadas no LTG, ou seja, as antenas PNOR e PSUL, em seções distintas, sendo que os equipamentos foram todos ligados ao mesmo tempo na mesma antena através de um divisor de sinal. Devido ao local fornecer uma melhor infraestrutura, foi possível realizar rastreios com maior duração, em média de quatro dias, restritos a esse valor pela capacidade de armazenamento da memória disponível nos telefones, que ficou limitada em 8 Gb, mesmo após o redimensionamento da quantidade original do dispositivo.

Somente para informação, foram conectados, além dos telefones GT-i9100 os receptores U-blox e o Novatel para servirem de base de comparação, sendo que como era de se esperar, por serem de modelos diferentes, de fabricantes diferentes o posicionamento ficou degradado e, portanto, não serão aqui apresentados.

Já para os modelos idênticos, os resultados mostram uma melhora, tanto na acurácia, quanto na precisão, entretanto o quantitativo destas melhoras não segue um padrão. Todos os resultados obtidos figuram nas tabelas abaixo.

Tabela 25 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-E utilizando-se a antena externa em 25/08/2017.

25/08/2017	GT-i9100 equip. C base				GT-i9100 equip. E móvel				GT-i9100 equipamento. E DGPS				
PSUL	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-2.08	0.31	3.47	2.14	-2.46	0.44	8.83	2.54	-0.38	0.12	5.36	0.53	79%
Desvio padrão	0.42	0.42	0.97	0.45	0.74	0.50	0.97	0.79	0.48	0.22	1.36	0.40	49%
Intervalo	1.80	1.85	6.20	2.06	2.72	1.57	7.70	2.84	2.20	0.97	12.40	1.71	40%
Mínimo	-3.05	-0.49	-1.57	1.27	-3.67	-0.24	2.13	0.95	-1.54	-0.23	-2.20	0.00	100%
Máximo	-1.24	1.36	4.63	3.34	-0.95	1.34	9.83	3.80	0.66	0.74	10.20	1.71	55%
Contagem	7902				7902				7902				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 26 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-E utilizando-se a antena externa em 28/08/2017.

28/08/2017	GT-i9100 equip. C base				GT-i9100 equip. E móvel				GT-i9100 equipamento. E DGPS				
PSUL	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.28	0.37	2.47	0.99	-0.29	0.43	2.54	1.03	-0.01	0.06	0.07	0.12	88%
Desvio padrão	1.08	0.54	1.34	0.83	1.08	0.65	1.31	0.89	0.12	0.29	0.47	0.29	67%
Intervalo	4.70	2.55	9.30	3.87	5.24	7.61	9.40	8.11	1.80	6.39	8.80	6.01	26%
Mínimo	-3.83	-0.66	-3.07	0.08	-4.32	-0.66	-3.17	0.08	-0.80	-0.40	-4.30	0.00	100%
Máximo	0.87	1.89	6.23	3.95	0.92	6.95	6.23	8.19	1.00	5.99	4.50	6.01	27%
Contagem	45591				45591				45591				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 27 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-E utilizando-se a antena externa em 30/08/2017.

30/08/2017	GT-i9100 equip. C base				GT-i9100 equip. E móvel				GT-i9100 equipamento. E DGPS				
PSUL	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.39	-0.11	3.06	0.81	-0.41	-0.10	3.25	0.84	-0.02	0.01	0.19	0.11	87%
Desvio padrão	0.71	0.48	1.28	0.48	0.72	0.49	1.43	0.49	0.11	0.14	0.50	0.14	72%
Intervalo	4.18	2.58	9.30	2.86	3.72	2.74	9.90	3.01	1.97	1.76	9.50	1.37	55%
Mínimo	-2.65	-1.04	-2.67	0.02	-2.58	-1.08	-2.77	0.02	-0.99	-0.76	-4.30	0.00	100%
Máximo	1.54	1.54	6.63	2.88	1.14	1.66	7.13	3.03	0.97	0.99	5.20	1.37	55%
Contagem	93368				93368				93368				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 28 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-E utilizando-se a antena externa em 01/09/2017.

01/09/2017	GT-i9100 equip. C base				GT-i9100 equip. E móvel				GT-i9100 equipamento. E DGPS				
PSUL	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.37	-0.06	3.86	0.78	-0.35	-0.08	3.13	0.76	0.02	-0.02	-0.74	0.12	85%
Desvio padrão	0.62	0.54	2.50	0.45	0.60	0.53	2.89	0.44	0.14	0.11	1.43	0.14	68%
Intervalo	4.89	3.28	14.30	3.73	4.84	3.34	15.90	3.48	3.25	2.24	11.50	2.25	35%
Mínimo	-3.40	-1.58	-3.67	0.01	-3.41	-1.56	-4.67	0.01	-1.97	-1.12	-6.30	0.00	100%
Máximo	1.49	1.69	10.63	3.74	1.44	1.79	11.23	3.49	1.29	1.12	5.20	2.25	36%
Contagem	322537				322537				322537				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 29 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-C utilizando-se a antena externa em 06/09/2017.

06/09/2017	GT-i9100 equip. A base				GT-i9100 equip. C móvel				GT-i9100 equipamento. C DGPS				
PNOR	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.78	0.02	5.02	1.32	-0.78	0.12	5.26	1.37	0.01	0.11	0.24	0.46	67%
Desvio padrão	1.32	0.84	2.01	1.15	1.36	0.85	1.88	1.15	0.38	0.38	0.81	0.30	74%
Intervalo	7.90	5.38	14.50	6.77	8.04	5.85	17.00	6.87	4.40	3.81	12.50	2.43	65%
Mínimo	-6.12	-1.75	-2.73	0.01	-6.04	-2.18	-2.53	0.01	-2.43	-1.96	-6.50	0.00	100%
Máximo	1.78	3.63	11.77	6.79	2.00	3.67	14.47	6.89	1.97	1.85	6.00	2.43	65%
Contagem	268786				268786				268786				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 30 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-E utilizando-se a antena externa em 06/09/2017.

06/09/2017	GT-i9100 equip. A base				GT-i9100 equip. E móvel				GT-i9100 equipamento. E DGPS				
PNOR	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-1.05	-0.37	4.17	1.42	-0.98	-0.32	4.27	1.49	0.07	0.05	0.10	0.74	51%
Desvio padrão	1.01	0.52	1.89	0.72	1.13	0.65	3.17	0.72	0.70	0.55	1.86	0.51	29%
Intervalo	5.43	2.56	12.10	3.87	7.17	3.44	29.90	4.85	5.85	3.00	24.00	5.03	-4%
Mínimo	-3.85	-1.51	-2.13	0.05	-2.82	-2.42	-3.13	0.04	-1.20	-2.01	-6.00	0.04	3%
Máximo	1.59	1.05	9.97	3.92	4.35	1.02	26.77	4.89	4.65	0.99	18.00	5.07	-4%
Contagem	32053				32053				32053				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 31 – Resumo estatístico da correção DGPS NMEA x NMEA pelo telefone SGS2-C utilizando-se a antena externa em 09/09/2017.

09/09/2017	GT-i9100 equip. A base				GT-i9100 equip. C móvel				GT-i9100 equipamento. C DGPS				
PNOR	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.24	-0.08	2.45	0.71	-0.21	-0.09	3.47	0.81	0.04	-0.02	1.02	0.52	36%
Desvio padrão	0.55	0.53	1.47	0.38	0.69	0.59	2.57	0.46	0.44	0.41	1.81	0.30	36%
Intervalo	4.37	3.42	13.60	2.63	3.84	3.69	17.70	2.70	3.83	3.76	18.00	2.40	11%
Mínimo	-2.62	-1.26	-4.53	0.01	-2.69	-2.26	-5.03	0.01	-2.09	-2.39	-5.40	0.00	100%
Máximo	1.74	2.15	9.07	2.64	1.15	1.42	12.67	2.71	1.74	1.37	12.60	2.40	11%
Contagem	242067				242067				242067				

Fonte: Autor (2018).

Percebe-se que a correção em alguns momentos é muito eficiente, podendo chegar à 88% na acurácia, mas em alguns dias ficou em apenas 36%. Isso se deve provavelmente aos fatores meteorológicos que afetam a propagação das ondas eletromagnéticas. O que é mais importante realçar é que em nenhum momento houve uma piora no posicionamento.

Deduz-se, portanto, que a antena interna dos dispositivos é muito suscetível a fatores internos e externos, tendo assim um padrão muito inconstante, o que faz com que dois dispositivos, colocados no mesmo lugar ao mesmo tempo, calcularem coordenadas com diferenças de alguns decímetros, chegando ao metro.

A antena externa traz uma estabilidade nestas oscilações, o que viabiliza a utilização do DGPS no domínio da posição a partir das sentenças NMEA, desde que se utilize o mesmo modelo de equipamento como base e como móvel.

Desta maneira, existindo a possibilidade, o uso de uma antena externa é fortemente recomendável, principalmente no caso de haver a intenção de se aplicar algum método diferencial de correção nas coordenadas.

5.5 QUALIDADE DA CORREÇÃO DO POSICIONAMENTO PELO DGPS NOS DOMÍNIOS NA DISTÂNCIA E NA POSIÇÃO, A PARTIR DOS DADOS BRUTOS DO TELEFONE CELULAR.

Tendo em vista a possibilidade da gravação dos dados bruto dos dispositivos que contam com o *chipset* de GPS da fabricante Sirf, procedeu-se a verificação e quantificação da correção possível no posicionamento destes telefones.

Estes testes também foram realizados em duas etapas, a primeira se utilizando a antena interna do telefone, e a segunda utilizando uma antena externa.

5.5.1 Resultados da correção do DGPS a partir dos dados brutos com a antena interna.

Os dados foram obtidos através de rastreio realizado na estação meteorológica do Mirante de Santana, onde em um único bastão apoiado a um tripé, foram fixados diversos equipamentos, para assim, ser possível a comparação da qualidade entre o mais caro e o mais barato.

Foram utilizados um telefone Samsung Galaxy S2 – Lite (GT-i9070) e três telefones Samsung Galaxy S2 (GT-i9100) e do receptor da Global Sat (que possui o mesmo *chipset* dos telefones), além de um Promark 3 no modo de navegação; todos com suas respectivas antenas internas. Junto a estes, foi instalado também um

segundo receptor Promark 3 com antena externa, que apesar de estar no modo topográfico (L1), também grava as pseudodistâncias (C/A).

Para as correções foram utilizadas como base tanto a estação POLI que se encontra a 13.070,00 metros do local, assim como, o receptor Promark 3, posicionado no mesmo ponto que os demais receptores. Os dados obtidos foram submetidos a um tratamento estatístico e compilados em tabelas, onde da Tabela 32 à Tabela 36 são apresentados os dados obtidos em um rastreio de 6:00 h no dia 23/04/2017 utilizando-se como base a estação POLI; da Tabela 37 à Tabela 41 é apresentado o mesmo rastreio, porém, utilizando-se o receptor Promark 3 instalado no mesmo ponto como base e aqui chamado de MIRA. As informações de cada coluna já foram comentadas em tabelas anteriores.

Tabela 32 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do Global Sat – Base POLI utilizando-se a antena interna.

23/04/17	**Posicionamento por Ponto**				**DGPS posição**					**DGPS distância**				
GlobalSat	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.7	0.17	6.10	5.40	1.12	-0.22	1.13	5.33	1%	1.13	-0.16	1.15	5.34	1%
Desvio padrão	5.80	3.91	14.85	4.50	5.72	3.95	14.8	4.60	-2%	5.73	3.95	14.85	4.60	-2%
Intervalo	66.5	51.9	233.5	42.5	65.7	53.4	230	44.8	-5%	65.65	53.44	230.36	44.81	-6%
Mínimo	-30	-24.8	-115	0.04	-27	-24.7	-118	0.03	17%	-27.43	-24.7	-118.20	0.01	71%
Máximo	36.1	27.1	119	42.5	38.2	28.6	112	44.8	-5%	38.23	28.74	112.16	44.82	-5%
Contagem	11377				11377					11377				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 33 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100A – Base POLI utilizando-se a antena interna.

23/04/17	**Posicionamento por Ponto**				**DGPS posição**					**DGPS distância**				
GT-i9100A	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	2.59	-2.96	8.27	6.78	3.91	-3.44	4.65	7.38	-9%	4.13	-3.35	5.08	7.48	-10%
Desvio padrão	6.43	5.11	11.6	6.07	6.47	5.09	11.08	6.36	-5%	6.48	5.15	11.25	6.38	-5%
Intervalo	85.6	81.4	115	55.4	86.1	81.62	110.5	57.12	-3%	86.05	81.70	139.55	57.17	-3%
Mínimo	-30	-51.1	-41	0.06	-29	-51.4	-41.5	0.02	73%	-29.10	-51.4	-54.37	0.04	41%
Máximo	55.2	30.3	75.0	55.5	56.9	30.2	69.03	57.13	-3%	56.94	30.30	85.18	57.20	-3%
Contagem	15282				15282					15282				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 34 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100B – Base POLI utilizando-se a antena interna.

c	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
GT-i9100 B	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.38	-1.94	8.10	5.22	1.06	-2.22	3.99	5.06	0.03	1.08	-2.17	4.02	5.05	3%
Desvio padrão	4.39	5.48	9.73	5.09	4.35	5.40	9.90	5.35	-0.05	4.34	5.41	9.94	5.34	-5%
Intervalo	71.8	93.3	150	58.76	73.2	92.8	153.7	59.30	-0.01	73.20	92.76	153.69	59.26	-1%
Mínimo	-42	-58.6	-67	0.06	-412	-58.9	-75.6	0.01	0.81	-41.7	-58.8	-75.60	0.02	63%
Máximo	30.2	34.7	82.3	58.82	31.5	33.9	78.10	59.31	-0.01	31.54	33.94	78.09	59.28	-1%
Contagem	16632				16632					16632				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 35 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100D – Base POLI utilizando-se a antena interna.

23/04/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
GT-i9100 D	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-1.4	-2.68	5.3	5.07	0.04	-2.96	1.21	4.89	0.04	0.05	-2.91	1.24	4.87	4%
Desvio padrão	3.09	5.70	10.3	5.04	3.12	5.66	9.60	5.16	-0.02	3.1	5.66	9.61	5.16	-2%
Intervalo	45.8	76.5	155	47.9	47.1	76.5	155.1	48.31	-0.01	47.1	75.77	154.61	48.25	-1%
Mínimo	-24	-48	-74	0.02	-23	-48.2	-77.8	0.00	0.81	-23.8	-48.1	-77.8	0.02	14%
Máximo	21.3	28.6	81.3	47.9	23.3	28.3	77.35	48.31	-0.01	23.3	27.62	76.82	48.27	-1%
Contagem	16838				16838					16838				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 36 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do Promark3 – Base POLI utilizando-se a antena interna.

23/04/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
Promark 3	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-1.95	0.01	4.78	2.51	-0.41	-0.28	0.59	1.49	0.41	-0.52	-0.19	0.99	1.59	37%
Desvio padrão	2.04	1.22	3.72	1.77	1.86	0.99	3.29	1.58	0.11	1.94	1.02	3.50	1.62	9%
Intervalo	48.42	23.14	89.46	40.25	49.90	23.52	92.1	40.1	0.00	51.77	23.35	91.61	41.96	-4%
Mínimo	-38.1	-13.3	-53.7	0.11	-37.6	-14	-63	0.01	0.95	-39.66	-13.7	-62.84	0.01	93%
Máximo	10.32	9.82	35.78	40.36	12.3	9.56	29.5	40.1	0.01	12.11	9.64	28.77	41.97	-4%
Contagem	15590				15590					15590				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 37 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do Global Sat – Base MIRA utilizando-se a antena interna.

23/04/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
GlobalSat	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.7	0.2	6.1	5.4	1.0	-0.2	-0.9	5.2	3%	0.96	-0.18	-0.99	5.35	1%
Desvio padrão	5.8	3.9	14.9	4.5	5.7	3.9	15.1	4.6	-3%	6.03	3.96	19.49	4.93	-10%
Intervalo	66.5	51.9	234	42.5	64.7	52.4	233.8	44.6	-5%	91.09	55.50	342.30	49.82	-17%
Mínimo	-30	-24.8	-115	0.0	-27	-24.5	-122	0.0	0%	-49.5	-25.7	-230.6	0.04	0%
Máximo	36.1	27.1	119	42.5	37.9	27.9	112	44.6	-5%	41.57	29.8	111.71	49.86	-17%
Contagem	11377				11377					11377				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 38 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100A – Base MIRA utilizando-se a antena interna.

23/04/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
GT-i9100 A	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	2.52	-4.03	10.6	7.20	4.05	-4.27	4.40	7.79	-8%	4.05	-4.22	4.70	7.67	-7%
Desvio padrão	5.66	5.96	12.7	6.19	5.77	6.04	12.26	6.60	-7%	5.64	6.00	12.68	6.57	-6%
Intervalo	55.2	90.0	140	53.9	55.04	90.4	140.0	53.8	0%	55.54	86.95	189.29	53.94	0%
Mínimo	-21	-53.5	-54	0.03	-18.4	-53.3	-56.5	0.01	71%	-18.9	-51.7	-83.29	0.01	71%
Máximo	34.7	36.5	86.2	54	36.7	37.1	83.54	53.85	0%	36.68	35.26	106.00	53.95	0%
Contagem	15282				15282					15282				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 39 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100B – Base MIRA utilizando-se a antena interna.

23/04/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
GT-i9100 B	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.4	-1.94	8.10	5.22	1.05	-2.18	2.03	5.01	4%	0.97	-2.21	2.16	5.15	1%
Desvio padrão	4.39	5.48	9.73	5.09	4.33	5.40	9.93	5.35	-5%	4.61	5.35	10.90	5.41	-6%
Intervalo	71.8	93.3	149	58.8	72.9	91.9	153.2	58.6	0%	72.9	86.55	211.2	59.3	-1%
Mínimo	-42	-58.6	-67	0.06	-41.4	-58.3	-75.9	0.02	61%	-41.4	-53	-75.87	0.02	61%
Máximo	30.2	34.7	82.3	58.82	31.49	33.58	77.38	58.65	0%	31.49	33.58	135.31	59.29	-1%
Contagem	16632				16632					16632				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 40 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do GT-i9100D – Base MIRA utilizando-se a antena interna.

23/04/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
GT-i9100 D	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-1.4	-2.68	5.30	5.07	0.03	-2.92	-0.75	4.86	4%	0.08	-2.92	-0.60	4.93	3%
Desvio padrão	3.09	5.70	10.3	5.04	3.11	5.66	9.54	5.15	-2%	3.28	5.67	9.72	5.20	-3%
Intervalo	45.8	76.5	155	47.9	46.7	76.1	154	47.8	0%	56.8	74.9	153	47.8	0%
Mínimo	-24	-47.9	-74	0.02	-23.7	-47.7	-77.8	0.02	10%	-33.8	-47.7	-77.8	0.02	10%
Máximo	21.5	28.6	81.3	47.92	22.99	28.38	76.29	47.85	0%	22.99	27.22	74.91	47.85	0%
Contagem	16838				16838					16838				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 41 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do Promark3 – Base MIRA utilizando-se a antena interna.

23/04/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
Promark 3	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-1.95	0.01	4.78	2.51	-0.44	-0.24	-1.39	1.40	44%	-0.61	-0.18	-0.98	1.47	42%
Desvio padrão	2.04	1.22	3.72	1.77	1.80	0.94	3.26	1.55	12%	1.92	0.92	3.33	1.66	6%
Intervalo	48.4	23.1	89.5	40.2	49.5	22.6	90	39.0	3%	51	22.3	89.8	40.4	0%
Mínimo	-38	-13.3	-53.7	0.11	-36.9	-12.7	-63.3	0.01	94%	-38.4	-12.6	-63.1	0.01	93%
Máximo	10.3	9.82	35.78	40.36	12.60	9.83	26.68	39.04	3%	12.58	9.83	26.59	40.40	0%
Contagem	15590				15590					15590				

Fonte: Autor (2018).

Os dados compilados da Tabela 32 à Tabela 41 demostram que mesmo sendo possível o acesso aos dados brutos das observáveis, tanto dos celulares quanto do receptor Global Sat que também utiliza a técnica de HSGPS, quando utilizando a antena interna do dispositivo, a correção pelo DGPS pode ser considerada desprezível, apenas o receptor topográfico, apesar de estar no modo de navegação e também utilizar a antena interna, teve alguma melhora considerável no seu posicionamento.

5.5.2 Resultados da correção do DGPS a partir dos dados brutos com a antena externa.

Para este experimento foram utilizados receptores que possuem a característica de gravarem tanto as mensagens NMEA, quanto as observáveis, deste modo as seções de rastreios aqui utilizadas são as mesmas já avaliadas no Item 5.4.2, de tal modo que se possa comparar os dois métodos.

Os dados compilados da Tabela 42 à Tabela 45 foram processados utilizando-se a estação POLI como base resultando em um comprimento de 150,00 m de linha base. A Tabela 46 e a Tabela 47 apresentam dados processados, utilizando-se a mesma antena compartilhada, o que resulta em uma linha base de 0,00 m.

Tabela 42 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento C – Base POLI utilizando-se a antena externa em 25/08/2017.

25/08/17	**Posicionamento por Ponto**				**DGPS posição**					**DGPS distância**				
GT-i9100 Ct	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.5	0.46	-2.12	1.07	-0.1	-0.01	-0.29	0.76	30%	-0.1	-0.01	-0.29	0.76	30%
Desvio padrão	1.15	0.67	2.23	1.03	0.62	0.63	1.58	0.47	55%	0.62	0.63	1.58	0.47	55%
Intervalo	6.85	5.54	24.17	5.13	9.32	8.53	21.57	5.49	-7%	9.32	8.53	22.47	5.49	-7%
Mínimo	-5	-2.68	-8.63	0.00	-4.8	-3.53	-7.96	0.00	67%	-4.83	-3.53	-7.82	0.00	67%
Máximo	1.89	2.86	15.53	5.14	4.49	5.00	13.60	5.49	-7%	4.49	5.00	14.65	5.49	-7%
Contagem	45665				45665					45665				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 43 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento D – Base POLI utilizando-se a antena externa 25/08/2017.

25/08/17	**Posicionamento por Ponto**				**DGPS posição**					**DGPS distância**				
GT-i9100 Et	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**dLat**	**dLon**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**	**dLat**	**dLong**	**dAlt**	**dDist**	**Correção na dist**
Média	-0.8	0.77	-2.19	1.62	-0.12	-0.07	-0.13	1.03	36%	-0.12	-0.06	-0.22	0.84	48%
Desvio padrão	1.92	1.18	4.08	1.90	1.47	1.09	3.55	1.52	20%	1.20	0.73	2.22	1.13	40%
Intervalo	69.7	54	126	43.7	74.1	52.7	124	45	-3%	59.2	24.38	88.6	45	-3%
Mínimo	-43.	-21.2	-41.7	0.00	-44.5	-22.5	-37.3	0.00	-200%	-44.5	-17.5	-23.5	0.00	100%
Máximo	26.4	32.8	84.83	43.73	29.66	30.12	86.38	44.99	-3%	14.77	6.89	65.07	44.99	-3%
Contagem	45603				45603					45603				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 44 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento A – Base POLI utilizando-se a antena externa 12/09/2017.

12/09/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
GT-i9100 Ct	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	Correção na dist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	-0.8	0.10	0.17	1.44	-0.0	-0.10	-0.58	0.84	42%	-0.1	-0.10	-0.58	0.84	42%
Desvio padrão	1.11	1.08	3.11	0.98	0.69	0.68	1.77	0.51	48%	0.69	0.68	1.77	0.51	48%
Intervalo	9.06	10.90	24.01	8.30	8.15	9.76	19.57	6.53	21%	8.15	9.76	19.57	6.53	21%
Mínimo	-6.1	-4.13	-8.71	0.01	-3.7	-4.09	-10.2	0.00	71%	-3.70	-4.09	-10.20	0.00	71%
Máximo	2.93	6.77	15.30	8.31	4.45	5.67	9.37	6.53	21%	4.45	5.67	9.37	6.53	21%
Contagem	51595				51595					51595				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 45 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento C – Base POLI utilizando-se a antena externa 12/09/2017.

12/09/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
GT-i9100 Ct	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	Correção na dist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	-0.9	0.09	0.61	1.78	-0.10	-0.15	-0.32	1.25	30%	-0.10	-0.15	-0.32	1.25	30%
Desvio padrão	1.44	1.30	3.74	1.20	1.08	1.05	2.67	0.85	29%	1.08	1.05	2.67	0.85	29%
Intervalo	23.9	21.9	40.8	16.1	27.4	23.4	45.3	18.7	-16%	27.4	23.43	56	18.7	-16%
Mínimo	-7.9	-12.9	-22.8	0.00	-8.72	-14.0	-30.2	0.01	-300%	-8.72	-14.0	-30.2	0.01	-350%
Máximo	16.0	8.98	17.94	16.09	18.64	9.40	15.10	18.72	-16%	18.64	9.40	25.78	18.72	-16%
Contagem	40589				40589					40589				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 46 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento C – Base PSUL utilizando-se a antena externa em 25/08/2017.

25/08/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
GT-i9100 Ct	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	Correção na dist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	-0.5	0.46	-2.12	1.07	-0.01	0.00	-0.03	0.12	89%	-0.01	0.00	-0.03	0.12	89%
Desvio padrão	1.15	0.67	2.23	1.03	0.13	0.12	0.36	0.13	87%	0.13	0.12	0.36	0.12	88%
Intervalo	6.85	5.54	24.17	5.13	12.10	8.85	21.29	10.02	-95%	11.58	7.46	21.29	10.02	-95%
Mínimo	-5.0	-2.68	-8.63	0.00	-7.93	-6.13	-8.26	0.00	67%	-7.93	-6.13	-8.25	0.00	67%
Máximo	1.89	2.86	15.53	5.14	4.17	2.72	13.03	10.02	-95%	3.65	1.33	13.03	10.02	-95%
Contagem	45592				45592					45592				

Fonte: Autor (2018).

Tabela 47 – Resumo estatístico do DGPS a partir das observáveis do SGS2 equipamento C – Base PNOR utilizando-se a antena externa em 12/09/2017.

12/09/17	Posicionamento por Ponto				DGPS posição					DGPS distância				
GT-i9100 Ct	dLat	dLon	dAlt	dDist	dLat	dLon	dAlt	dDist	Correção na dist	dLat	dLong	dAlt	dDist	Correção na dist
Média	-1.19	0.28	1.17	2.06	-0.01	-0.05	0.29	0.84	59%	-0.01	-0.05	0.29	0.84	59%
Desvio padrão	1.99	1.41	4.43	1.79	0.81	0.74	2.15	0.70	61%	0.80	0.74	2.14	0.69	61%
Intervalo	43.1	24.3	71.5	29.4	34.9	22.3	72.0	19.5	34%	27.2	20.86	72.0	17.8	39%
Mínimo	-27	-13	-38	0.00	-17	-13.1	-44	0.00	50%	-9.4	-13.1	-44.2	0.0	50%
Máximo	16.0	11.4	33.3	29.4	17.8	9.37	27.7	19.5	34%	17.8	7.76	27.73	17.84	39%
Contagem	40463				40463					40463				

Fonte: Autor (2018).

Os dados dos rastreios nos dias 28/08/20017, 30/08/20017, 01/09/2017, 06/09/2017 e 09/09/2017 não foram apresentados por possuírem o mesmo comportamento dos demais.

Percebe-se que não obstante a estação Base estar a aproximadamente 150,00 metros do equipamento móvel e ainda se utilize dois equipamentos de mesmo modelo, a correção pelo DGPS partir dos dados brutos (pseudodistâncias) apesar de apresentar alguma melhora, fica aquém daquela procedida utilizando-se as coordenadas calculadas pelo próprio equipamento para corrigir outro equipamento de mesmo modelo, desde que acoplada uma antena externa.

5.6 QUALIDADE DO POSICIONAMENTO DIFERENCIAL PELA MEDIDA DA FASE, A PARTIR DOS DADOS BRUTOS DO TELEFONE CELULAR.

O método descrito no item 4.4.7 que viabiliza a obtenção dos dados brutos, possibilita o armazenamento da medida de fase, além das pseudodistâncias, o que permite a correção diferencial pela dupla ou tripla diferença de fase.Para este cálculo foi utilizado o software comercial GNSS Solutions, o qual pode ser baixado pela internet e utilizado para processamentos de simples frequência livremente.

Da mesma forma que os demais, estes testes também foram realizados a partir dos dados coletados pelos mesmos rastreios, nas mesmas datas e horários e em duas etapas, a primeira se utilizando a antena interna do telefone, e a segunda se utilizando uma antena externa.

5.6.1 Resultados da correção pela diferença de fase com a antena interna.

Os dados foram obtidos através do rastreio realizado na estação meteorológica do Mirante de Santana, onde em um único bastão apoiado a um tripé, foram fixados diversos equipamentos, para assim, ser possível a comparação da qualidade entre o mais caro e o mais barato.

As coordenadas ajustadas do ponto e utilizadas como referência são ESTE = 334601,487 m, NORTE = 7400620,379 m e ALTITUDE GEODÉSICA = 797,806 m no sistema UTM, fuso 23 e associadas ao Referncial SIRGAS 2000,4 as quais foram obtidas previamente por GPS de dupla frequência e referenciadas à estação POLI da RBMC; que transportadas para o plano topográfico, resultam em X = 161422,0354 m, Y = 256051,8172 m e h = 797,806m.

O arquivo RINEX gerado originalmente em 23/04/2017 possui pouco mais de 4:00h dados ininterruptos dos quais os resultados obtidos pelo processamento no modo relativo estático, tendo a estação POLI como referência estão compilados na Tabela 48, sendo que na primeira coluna estão os receptores utilizados, onde SGS2 são os telefones Samsung Galaxy S2 (GT-i9100) A, B, D e Lite (GT-i9070), GSAT o receptor Global Sat, PM3M o receptor Promark3 no modo de navegação (mobile) e PM3T o Promark3 com antena externa no modo topográfico.

Nas colunas 2, 3 e 4 estão indicados respectivamente as coordenadas Este, Norte e as Altitudes Geodésicas, as colunas 5, 6 e 7 são as diferenças entre as coordenadas obtidas e as de referência; na coluna 8 estão as distâncias planas calculadas através das colunas 5 e 6 e na última coluna o tempo total de rastreio da seção.

Tabela 48 – Resultados do posicionamento relativo estático com antena interna.

Recep.	X	Y	Altitude	ΔX	ΔY	Δh	dist2D	Tempo
SGS2-A	161421.6017	256051.9365	797.833	-0.435	0.114	0.027	0.450	04:39:33
SGS2-B	161422.0444	256051.9022	797.825	0.008	0.085	0.019	0.085	04:37:33
SGS2-D	161421.8508	256051.8545	797.821	-0.185	0.035	0.015	0.188	04:40:44
SGS2-L	161421.9437	256051.8514	797.811	-0.092	0.033	0.005	0.098	04:06:48
GSAT	161421.8225	256051.8368	797.819	-0.213	0.017	0.013	0.214	04:06:39
PM3M	161421.9469	256051.7773	797.861	-0.088	-0.041	0.055	0.097	04:19:49
PM3T	161422.0302	256051.8083	797.868	-0.005	-0.009	0.062	0.010	04:45:41

Fonte: Autor (2018).

Verifica-se que para do equipamento de referência, o Promark3 no modo de navegação e utilizando a antena interna, o erro a partir das coordenadas topográficas planas (X e Y) fica em 0,097 m e para os telefones menor que 0,50 m.

Entretanto, não é comum o rasteio de 4:00h para vetores curtos, mesmo que com receptores de simples frequência. A estação base está a aproximadamente 13 km e, portanto, um rastreio de 1:00h seria mais que suficiente para se alcançar precisões milimétricas utilizando-se receptores GPS comerciais.

Neste sentido, cada um dos arquivos foi dividido em vários arquivos de 60 minutos no padrão RINEX, com início em horas inteiras; portanto os minutos do começo e do final do rastreio, que não formavam horas inteiras, geraram arquivos com duração menores. A Tabela 49 mostra os resultados do processamento destes arquivos.

Tabela 49 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena interna para sessões com duração de até 1:00h.

Sessão	X	Y	Altitude	ΔX	ΔY	Δh	dist2D	Tempo
Samsung Galaxy S2 telefone A								
SIIA-m	161420.412	256051.993	796.113	-1.623	0.176	-1.693	1.633	00:08:28
SIIA-n	161421.385	256051.839	797.810	-0.651	0.022	0.004	0.651	00:56:47
SIIA-o	161424.332	256052.411	797.886	2.297	0.594	0.080	2.372	00:59:59
SIIA-p	161426.051	256050.183	795.419	4.015	-1.634	-2.387	4.335	00:59:59
SIIA-q	161421.405	256051.985	798.012	-0.630	0.168	0.206	0.652	00:59:59
SIIA-r	161421.067	256051.830	797.787	-0.968	0.013	-0.019	0.968	00:16:11
Samsung Galaxy S2 telefone B								
SIIB-m	161421.546	256051.822	797.549	-0.489	0.005	-0.257	0.489	00:20:11
SIIB-n	161421.352	256051.834	797.880	-0.683	0.016	0.074	0.683	00:59:59
SIIB-o	161421.160	256051.685	797.367	-0.876	-0.132	-0.439	0.886	00:59:59
SIIB-p	161422.078	256051.869	797.807	0.043	0.052	0.001	0.067	00:59:59
SIIB-q	161421.611	256051.844	797.964	-0.425	0.027	0.158	0.426	00:59:59
SIIB-r	161421.303	256052.145	797.250	-0.732	0.328	-0.556	0.802	00:17:21
Samsung Galaxy S2 telefone D								
SIID-m	161420.519	256051.111	796.914	-1.516	-0.706	-0.892	1.672	00:22:39
SIID-n	161421.687	256051.943	797.777	-0.349	0.125	-0.029	0.370	00:59:59
SIID-o	161421.588	256051.872	797.885	-0.447	0.054	0.079	0.451	00:59:59
SIID-p	161421.387	256051.861	797.715	-0.649	0.044	-0.091	0.650	00:59:59
SIID-q	161421.928	256051.888	797.744	-0.107	0.070	-0.062	0.128	00:59:59
SIID-r	161421.438	256051.867	797.572	-0.598	0.049	-0.234	0.600	00:18:04
Samsung Galaxy S2 telefone Lite								
SIIL-n	161421.904	256051.958	797.861	-0.131	0.141	0.055	0.193	00:54:11
SIIL-o	161421.685	256051.788	797.726	-0.351	-0.030	-0.080	0.352	00:59:59

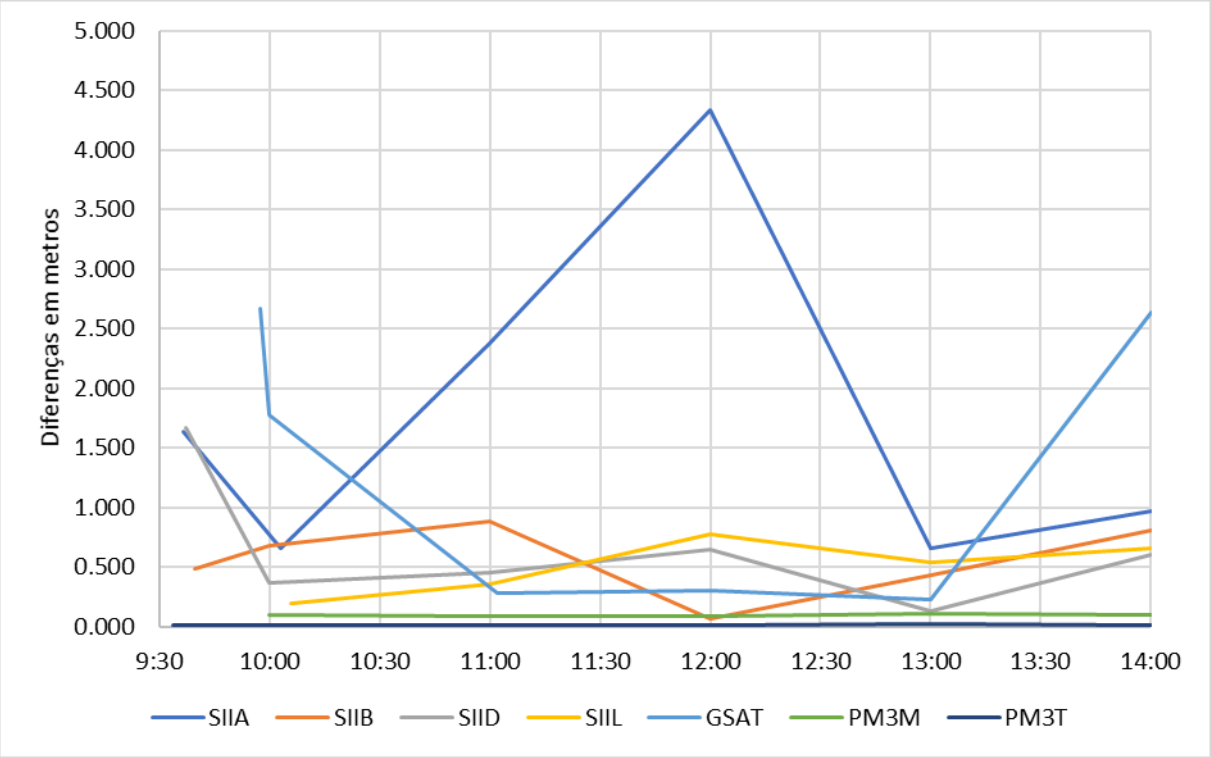
Sessão	X	Y	Altitude	ΔX	ΔY	Δh	dist2D	Tempo
SIIL-p	161421.265	256051.705	797.552	-0.771	-0.113	-0.254	0.779	00:59:59
SIIL-q	161421.494	256051.783	797.713	-0.542	-0.034	-0.093	0.543	00:59:59
SIIL-o	161421.384	256051.750	797.835	-0.651	-0.067	0.029	0.654	00:16:41
Global Sat								
GSAT-m	161419.728	256050.479	796.574	-2.308	-1.338	-1.232	2.668	00:02:25
GSAT-n	161421.851	256050.049	811.393	-0.184	-1.768	13.587	1.778	00:36:30
GSAT-o	161421.759	256051.762	797.844	-0.277	-0.056	0.038	0.282	00:57:50
GSAT-p	161421.771	256051.960	797.764	-0.264	0.142	-0.042	0.300	01:00:00
GSAT-q	161421.807	256051.835	797.783	-0.229	0.018	-0.023	0.230	00:59:58
GSAT-r	161419.951	256053.429	798.442	-2.084	1.612	0.636	2.635	00:04:12
Promark3 modo de navegação								
PM3Mn	161421.949	256051.778	797.856	-0.087	-0.039	0.050	0.095	00:59:59
PM3Mo	161421.955	256051.782	797.862	-0.080	-0.035	0.056	0.088	00:59:59
PM3Mp	161421.950	256051.784	797.874	-0.085	-0.033	0.068	0.092	00:59:59
PM3Mq	161421.940	256051.766	797.865	-0.096	-0.051	0.059	0.108	00:59:59
PM3Mr	161421.945	256051.774	797.877	-0.091	-0.043	0.071	0.100	00:18:53
Promark3 modo topográfico								
PM3Tm	161422.036	256051.809	797.871	0.001	-0.008	0.065	0.008	00:26:09
PM3Tn	161422.033	256051.810	797.866	-0.002	-0.007	0.060	0.007	00:59:59
PM3To	161422.033	256051.807	797.856	-0.002	-0.010	0.050	0.010	00:59:59
PM3Tp	161422.031	256051.812	797.874	-0.004	-0.005	0.068	0.006	00:59:59
PM3Tq	161422.023	256051.799	797.876	-0.012	-0.018	0.070	0.022	00:59:58
PM3Tr	161422.030	256051.808	797.874	-0.005	-0.009	0.068	0.010	00:19:31

Fonte: Autor (2018).

A Figura 77 mostra um gráfico com os valores da Tabela 49, onde na parte de baixo em azul escuro (PM3T), quase imperceptível, está o comportamento do Promark3 no modo topográfico, em verde o mesmo equipamento no modo de navegação (PM3M), GSAT é o receptor Global Sat e os demais são os telefones.

Os primeiros pontos entre 9:30 e 10:00 hs e os últimos pontos às 14:00h, são de se esperar que possuam menor acurácia pelo menor tempo de duração da seção. Dos demais com duração de 1:00h deveriam estar com erro menor que 0,050m, de acordo com a Tabela 48; e também deveriam possuir um comportamento mais estável.

Figura 77 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena interna para sessões com duração de até 1:00h

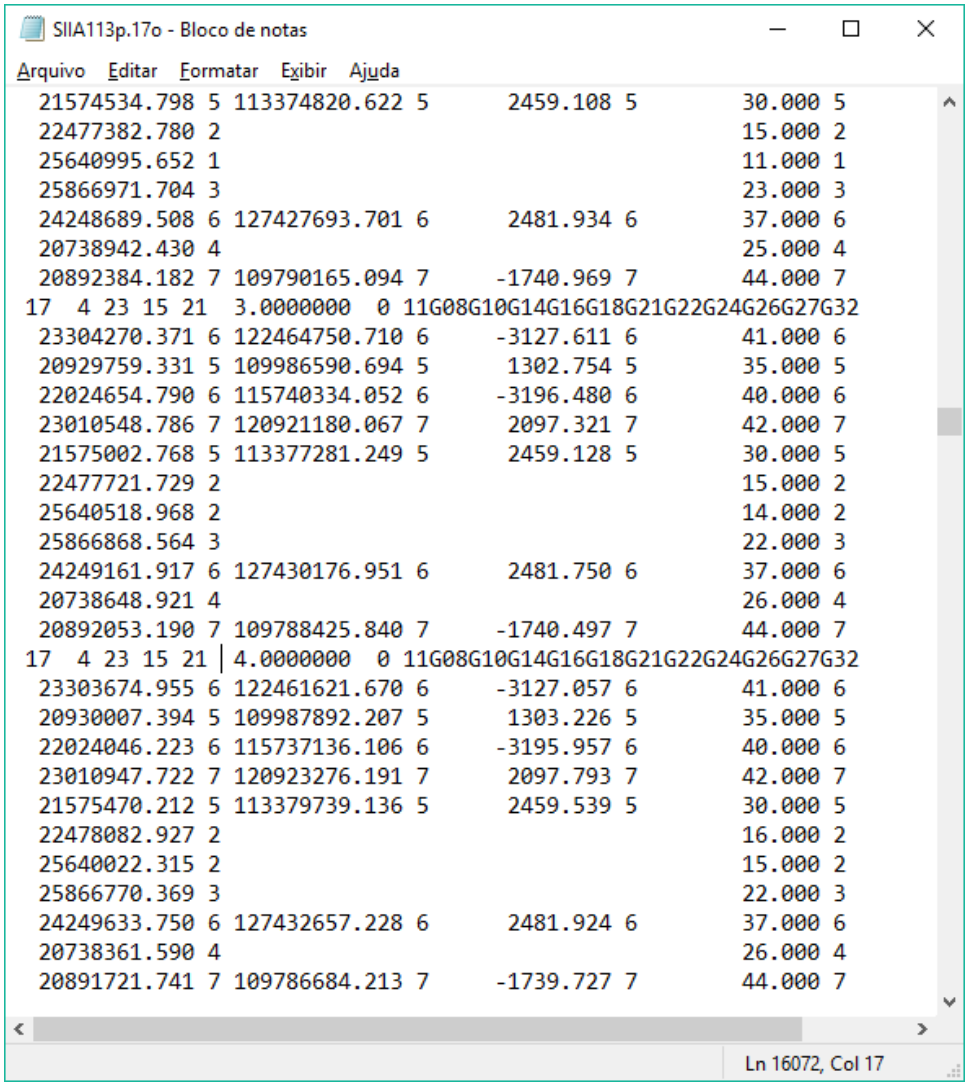


Fonte: Autor (2018).

Este comportamento é típico quando o sinal sofre interferências com seguidas perdas de ciclo, o que não deveria acontecer, considerando que o local tem excelente vista do céu em todas as direções e sem obstáculos refletidores de sinal nas proximidades.

Em uma análise do arquivo RINEX (Figura 78), pode notar que mesmo sem nenhum motivo aparente, realmente existem vários momentos em que o equipamento não registrou nem a medida de fase nem a medida do Doppler. Observando-se mais atentamente as informações disponíveis no arquivo, se verifica que a medida de fase é interrompida, toda vez que o SNR (quarta observável no arquivo) fica abaixo de 28dB-Hz. Tal fato se confirmou pelos demais arquivos e ouros obtidos em outros dias e em outras condições.

Figura 78 – Parte do arquivo RINEX obtido pelo telefone SGS2.

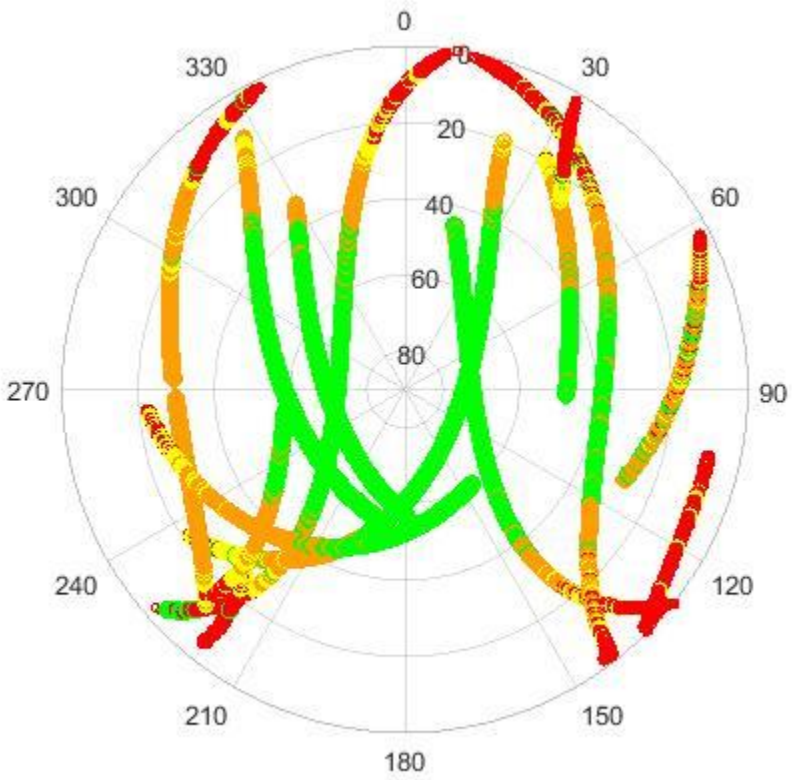


```
SIIA113p.17o - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
 21574534.798 5 113374820.622 5      2459.108 5        30.000 5
 22477382.780 2                                        15.000 2
 25640995.652 1                                        11.000 1
 25866971.704 3                                        23.000 3
 24248689.508 6 127427693.701 6      2481.934 6        37.000 6
 20738942.430 4                                        25.000 4
 20892384.182 7 109790165.094 7     -1740.969 7        44.000 7
17  4 23 15 21  3.0000000  0 11G08G10G14G16G18G21G22G24G26G27G32
 23304270.371 6 122464750.710 6     -3127.611 6        41.000 6
 20929759.331 5 109986590.694 5      1302.754 5        35.000 5
 22024654.790 6 115740334.052 6     -3196.480 6        40.000 6
 23010548.786 7 120921180.067 7      2097.321 7        42.000 7
 21575002.768 5 113377281.249 5      2459.128 5        30.000 5
 22477721.729 2                                        15.000 2
 25640518.968 2                                        14.000 2
 25866868.564 3                                        22.000 3
 24249161.917 6 127430176.951 6      2481.750 6        37.000 6
 20738648.921 4                                        26.000 4
 20892053.190 7 109788425.840 7     -1740.497 7        44.000 7
17  4 23 15 21 4.0000000  0 11G08G10G14G16G18G21G22G24G26G27G32
 23303674.955 6 122461621.670 6     -3127.057 6        41.000 6
 20930007.394 5 109987892.207 5      1303.226 5        35.000 5
 22024046.223 6 115737136.106 6     -3195.957 6        40.000 6
 23010947.722 7 120923276.191 7      2097.793 7        42.000 7
 21575470.212 5 113379739.136 5      2459.539 5        30.000 5
 22478082.927 2                                        16.000 2
 25640022.315 2                                        15.000 2
 25866770.369 3                                        22.000 3
 24249633.750 6 127432657.228 6      2481.924 6        37.000 6
 20738361.590 4                                        26.000 4
 20891721.741 7 109786684.213 7     -1739.727 7        44.000 7
Ln 16072, Col 17
```

Fonte: Autor (2018).

Pelo arquivo RINEX é possível identificar em quais satélites houve a perda de ciclo, mas ainda fica difícil apontar qual foi a causa. Na tentativa de entender a causa foi necessário realizar modificações no programa que calcula a solução do posicionamento, para que o mesmo criasse um arquivo com os azimutes, as elevações e o valor do SNR para cada época. Estes dados foram inseridos em um gráfico circular, na forma de SkyPlot (Figura 79), com os valores do SNR separados em cores na forma de um mapa de calor, sendo o vermelho para valores menores que 28 dB-Hz, amarelo menores que 30 dB-Hz, o laranja para menores que 35 dB-Hz e o verde para os demais valores.

Figura 79 – SkyPlot dos satélites rastreados em 23/04/2017

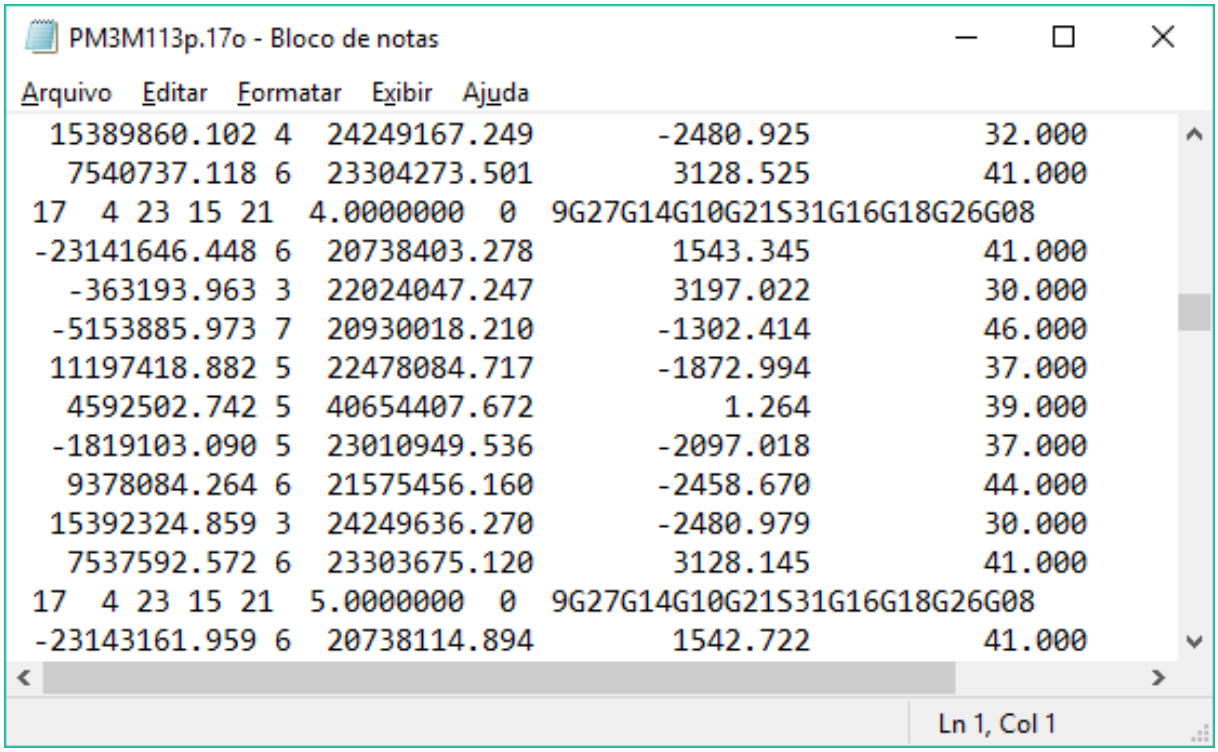


Fonte: Autor (2018).

Os satélites com SNR abaixo de 28dB-Hz estão todos abaixo de 20º de elevação. Os acima de 35 dB-Hz que significa boa recepção estão acima de 40º de elevação. Desta forma fica nítido que o problema está relacionado com a força do sinal transmitido pelos satélites que precisam atravessar a atmosfera, dado que quanto menor a elevação mais espessa fica a camada a ser percorrida pelo sinal.

O receptor Promark3 mesmo utilizando a antena interna estava nas mesmas condições ambientais e mesmos assim, captou os mesmos sinais com o SNR sempre superior a 30 dB-Hz, como pode ser visto na Figura 80, que mostra um trecho do arquivo RINEX obtido daquele equipamento. O que demostra que a antena interna dos telefones celulares utilizados nestes testes, possuem elevada restrição e baixa capacidade de recepção, em comparação a equipamentos dedicados somente ao posicionamento.

Figura 80 – Parte do arquivo RINEX obtido pelo receptor Promark3 no modo de navegação.



Fonte: Autor (2018).

Já com a antena externa acoplada o cenário se mostrou mais promissor. Os rastreios a partir das antenas sobre o LTG possuem em média duração de quatro dias, portando foram particionados em arquivos diários e depois em arquivos horários.

A estão POLI foi descartada com estação de referência, pois desta vez a proximidade poderia mascarar os resultados. Na falta de outra estação da RBMC a menos de 30 km, optou-se pela base da empresa Santiago & Cintra com coordenadas homologadas pelo IBGE e distante aproximadamente a 9 km, a empresa fornece os dados da estação pela internet para usuários cadastrados.

Os testes foram repetidos mais de 20 vezes, sempre com resultados muito próximos, portanto aqui só serão apresentados os do dia 10/09/2017.

Ao divisor de sinal foram ligados 3 telefones SGS2, compilados da Tabela 50 à Tabela 52 e um receptor Novatel (Tabela 53), que será o equipamento de referência. Assim como no teste anterior os dados particionados em rastreios de 1:00 h foram processados com o programa GNSS Solutions separadamente com máscara de corte à uma elevação de 15º.

Tabela 50 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h pelo telefone SGS2 – A.

Sessão	X	Y	Altitude	ΔX	ΔY	Δh	dist2D	Tempo
SIIAa	149980.247	249509.770	728.498	0.058	0.020	0.045	0.062	59:59.0
SIIAb	149980.280	249509.752	728.451	0.091	0.003	-0.002	0.091	59:59.0
SIIAc	149980.224	249509.767	728.479	0.035	0.018	0.026	0.039	59:59.0
SIIAd	149980.364	249509.739	728.421	0.176	-0.010	-0.032	0.176	59:59.0
SIIAe	149980.214	249509.768	728.495	0.025	0.019	0.042	0.031	59:59.0
SIIAf	149980.148	249509.770	728.470	-0.041	0.020	0.017	0.046	59:59.0
SIIAg	149980.187	249509.742	728.472	-0.001	-0.008	0.019	0.008	59:59.0
SIIAh	149980.222	249509.780	728.479	0.033	0.031	0.026	0.045	59:59.0
SIIAi	149980.230	249509.783	728.495	0.041	0.033	0.042	0.053	59:59.0
SIIAj	149980.250	249509.779	728.503	0.061	0.029	0.050	0.068	59:59.0
SIIAk	149980.295	249509.763	728.446	0.106	0.014	-0.007	0.107	59:59.0
SIIAl	149980.240	249509.772	728.510	0.051	0.022	0.057	0.056	59:59.0
SIIAm	149980.245	249509.753	728.495	0.056	0.003	0.042	0.056	59:59.0
SIIAn	149980.279	249509.757	728.469	0.090	0.008	0.016	0.090	59:59.0
SIIAo	149980.181	249509.746	728.458	-0.007	-0.004	0.005	0.008	59:59.0
SIIAp	149980.236	249509.797	728.558	0.048	0.047	0.105	0.067	59:59.0
SIIAq	149980.246	249509.764	728.425	0.057	0.014	-0.028	0.059	59:59.0
SIIAr	149980.222	249509.756	728.468	0.033	0.007	0.015	0.034	59:59.0
SIIAs	149980.200	249509.769	728.516	0.011	0.020	0.063	0.023	59:59.0
SIIAt	149980.149	249509.771	728.498	-0.040	0.022	0.045	0.045	59:59.0
SIIAu	149980.158	249509.780	728.483	-0.031	0.030	0.030	0.043	59:59.0
SIIAv	149980.225	249509.776	728.514	0.036	0.027	0.061	0.045	59:59.0
SIIAw	149980.380	249509.770	728.405	0.191	0.021	-0.048	0.192	59:59.0
SIIAx	149980.171	249509.790	728.523	-0.017	0.040	0.070	0.044	59:59.0

Fonte: Autor (2018).

Tabela 51 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h pelo telefone SGS2 – C.

Sessão	X	Y	Altitude	ΔX	ΔY	Δh	dist2D	Tempo
SIICa	149980.082	249509.703	728.418	-0.107	-0.047	-0.035	0.116	59:59.0
SIICb	149980.254	249509.762	728.475	0.065	0.012	0.022	0.066	59:59.0
SIICc	149980.216	249509.767	728.480	0.027	0.018	0.027	0.032	59:59.0
SIICd	149980.258	249509.765	728.467	0.069	0.015	0.014	0.071	59:59.0
SIICe	149980.218	249509.764	728.496	0.029	0.015	0.043	0.033	59:59.0
SIICf	149980.145	249509.769	728.469	-0.044	0.019	0.016	0.048	59:59.0
SIICg	149980.197	249509.754	728.481	0.008	0.005	0.028	0.009	59:59.0
SIICh	149980.229	249509.780	728.473	0.040	0.030	0.020	0.051	59:59.0
SIICi	149980.211	249509.783	728.492	0.022	0.034	0.039	0.040	59:59.0
SIICj	149980.251	249509.775	728.503	0.062	0.025	0.050	0.067	59:59.0
SIICk	149980.295	249509.758	728.452	0.106	0.009	-0.001	0.106	59:59.0
SIICl	149980.281	249509.754	728.483	0.092	0.005	0.030	0.092	59:59.0
SIICm	149980.240	249509.745	728.475	0.052	-0.005	0.022	0.052	59:59.0

Sessão	X	Y	Altitude	ΔX	ΔY	Δh	dist2D	Tempo
SIICn	149980.276	249509.755	728.472	0.087	0.006	0.019	0.087	59:59.0
SIICo	149980.219	249509.760	728.441	0.030	0.011	-0.012	0.032	59:59.0
SIICp	149980.235	249509.776	728.518	0.046	0.026	0.065	0.053	59:59.0
SIICq	149980.375	249509.760	728.356	0.186	0.011	-0.097	0.186	59:59.0
SIICr	149980.220	249509.761	728.476	0.031	0.012	0.023	0.033	59:59.0
SIICs	149980.220	249509.777	728.545	0.031	0.028	0.092	0.042	59:59.0
SIICt	149980.090	249509.761	728.333	-0.099	0.011	-0.120	0.100	59:59.0
SIICu	149980.159	249509.779	728.492	-0.030	0.029	0.039	0.042	59:59.0
SIICv	149980.250	249509.784	728.462	0.061	0.034	0.009	0.070	59:59.0
SIICw	149980.395	249509.764	728.378	0.206	0.014	-0.075	0.207	59:59.0
SIICx	149980.220	249509.782	728.504	0.031	0.033	0.051	0.045	59:59.0

Fonte: Autor (2018).

Tabela 52 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h pelo telefone SGS2 – E.

Sessão	X	Y	Altitude	ΔX	ΔY	Δh	dist2D	Tempo
SIIEa	149980.254	249509.768	728.502	0.065	0.018	0.049	0.068	59:59.0
SIIEb	149980.258	249509.761	728.473	0.069	0.011	0.020	0.070	59:59.0
SIIEc	149980.212	249509.767	728.480	0.023	0.018	0.027	0.029	59:59.0
SIIEd	149980.248	249509.764	728.468	0.059	0.014	0.015	0.061	59:59.0
SIIEe	149980.223	249509.765	728.495	0.034	0.016	0.042	0.038	59:59.0
SIIEf	149980.122	249509.767	728.460	-0.067	0.018	0.007	0.069	59:59.0
SIIEg	149980.186	249509.753	728.475	-0.003	0.003	0.022	0.004	59:59.0
SIIEh	149980.250	249509.782	728.476	0.061	0.032	0.023	0.069	59:59.0
SIIEi	149980.197	249509.781	728.491	0.008	0.032	0.038	0.033	59:59.0
SIIEj	149980.246	249509.775	728.506	0.057	0.025	0.053	0.063	59:59.0
SIIEk	149980.286	249509.758	728.455	0.097	0.009	0.002	0.097	59:59.0
SIIEl	149980.292	249509.752	728.478	0.103	0.003	0.025	0.103	59:59.0
SIIEm	149980.238	249509.747	728.478	0.050	-0.003	0.025	0.050	59:59.0
SIIEn	149980.265	249509.757	728.475	0.076	0.007	0.022	0.076	59:59.0
SIIEo	149980.369	249509.696	728.538	0.180	-0.053	0.085	0.188	59:59.0
SIIEp	149980.226	249509.783	728.531	0.037	0.033	0.078	0.050	59:59.0
SIIEq	149980.272	249509.865	728.277	0.083	0.115	-0.176	0.142	59:59.0
SIIEr	149980.218	249509.759	728.475	0.029	0.010	0.022	0.031	59:59.0
SIIEs	149980.261	249509.764	728.627	0.072	0.014	0.174	0.074	59:59.0
SIIEt	149980.318	249509.805	728.445	0.130	0.055	-0.008	0.141	59:59.0
SIIEu	149980.170	249509.781	728.495	-0.019	0.031	0.042	0.036	59:58.0
SIIEv	149980.247	249509.785	728.464	0.058	0.035	0.011	0.068	59:59.0
SIIEw	149980.406	249509.763	728.373	0.217	0.013	-0.080	0.218	59:59.0
SIIEx	149980.217	249509.784	728.502	0.028	0.035	0.049	0.045	59:59.0

Fonte: Autor (2018).

Tabela 53 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h pelo receptor Novatel.

Sessão	X	Y	Altitude	ΔX	ΔY	Δh	dist2D	Tempo
NOVAa	149980.226	249509.771	728.511	0.037	0.022	0.058	0.043	59:59.0
NOVAb	149980.232	249509.772	728.507	0.043	0.022	0.054	0.049	59:59.0
NOVAc	149980.231	249509.771	728.497	0.042	0.022	0.044	0.047	59:59.0
NOVAd	149980.232	249509.779	728.491	0.043	0.030	0.038	0.052	59:59.0
NOVAe	149980.232	249509.773	728.506	0.043	0.023	0.053	0.049	59:59.0
NOVAf	149980.228	249509.769	728.493	0.039	0.019	0.040	0.044	59:59.0
NOVAg	149980.230	249509.770	728.504	0.041	0.020	0.051	0.046	59:59.0
NOVAh	149980.231	249509.767	728.496	0.042	0.017	0.043	0.046	59:59.0
NOVAi	149980.231	249509.772	728.485	0.042	0.022	0.032	0.048	59:59.0
NOVAj	149980.232	249509.772	728.489	0.043	0.022	0.036	0.049	59:59.0
NOVAk	149980.236	249509.769	728.503	0.047	0.019	0.050	0.051	59:59.0
NOVAl	149980.240	249509.770	728.503	0.051	0.020	0.050	0.055	59:59.0
NOVAm	149980.238	249509.766	728.497	0.049	0.016	0.044	0.052	59:59.0
NOVAn	149980.239	249509.766	728.504	0.050	0.016	0.051	0.053	59:59.0
NOVAo	149980.237	249509.782	728.497	0.048	0.032	0.044	0.058	59:59.0
NOVAp	149980.227	249509.775	728.490	0.038	0.025	0.037	0.046	59:59.0
NOVAq	149980.226	249509.774	728.496	0.037	0.024	0.043	0.045	59:59.0
NOVAr	149980.242	249509.764	728.485	0.053	0.014	0.032	0.055	59:59.0
NOVAs	149980.228	249509.780	728.498	0.039	0.030	0.045	0.050	59:59.0
NOVAt	149980.221	249509.777	728.492	0.032	0.028	0.039	0.042	59:59.0
NOVAu	149980.226	249509.774	728.491	0.037	0.024	0.038	0.045	59:59.0
NOVAv	149980.222	249509.779	728.497	0.033	0.030	0.044	0.045	59:59.0
NOVAw	149980.227	249509.774	728.499	0.038	0.024	0.046	0.045	59:59.0
NOVAx	149980.232	249509.777	728.506	0.043	0.027	0.053	0.051	59:59.0

Fonte: Autor (2018).

Os valores contidos da Tabela 50 à Tabela 53 foram plotados no gráfico da Figura 81 e o resumo estatístico na Tabela 54. Estes dados apesar de ainda se apresentarem um pouco ruidosos, possuem uma amplitude muito menor, em termos quantitativos, dos apresentados nos resultados com a antena interna.

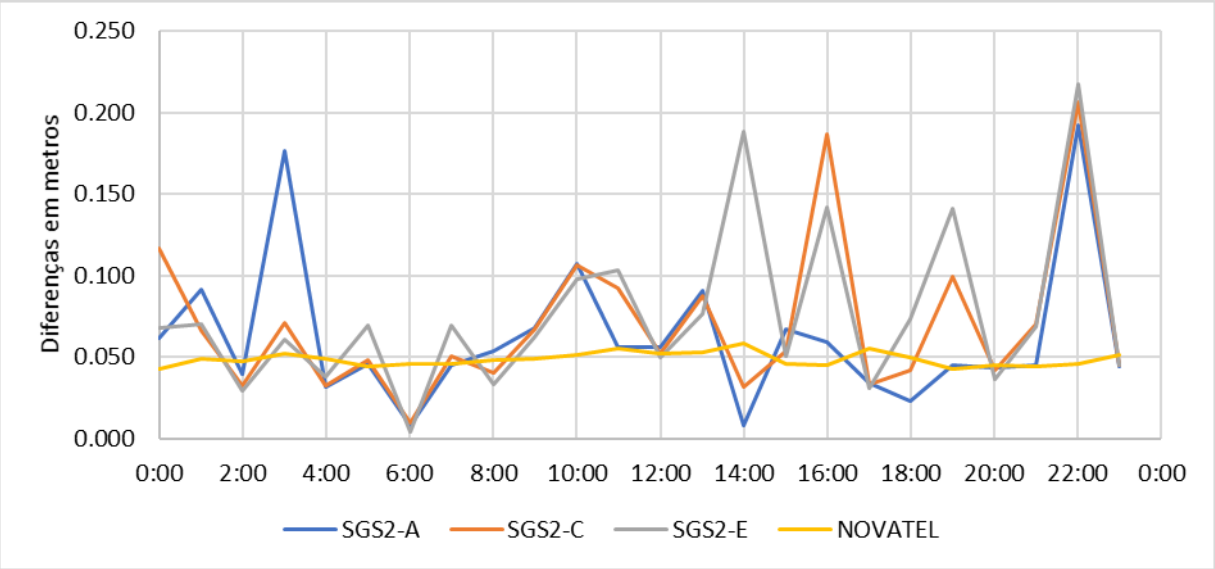
Tabela 54 – Resumo estatístico do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h em 10/04/2017.

10/04/17	Samsung Galaxy S2				Novatel			
	ΔX	ΔY	Δh	dist2D	ΔX	ΔY	Δh	dist2D
Média	0.049	0.018	0.021	0.069	0.042	0.023	0.044	0.049
Desvio padrão	0.063	0.021	0.049	0.047	0.005	0.005	0.007	0.004
Intervalo	0.324	0.168	0.350	0.213	0.021	0.018	0.026	0.016
Mínimo	-0.107	-0.053	-0.176	0.004	0.032	0.014	0.032	0.042
Máximo	0.217	0.115	0.174	0.218	0.053	0.032	0.058	0.058
Contagem	72				24			

Fonte: Autor (2018).

Os desvios máximos na distância plana ficam por volta de 0,218m com uma média de 0,069m e desvio padrão de 0,047m.

Figura 81 – Resultado do posicionamento relativo estático com antena externa para sessões com duração de até 1:00h.



Fonte: Autor (2018).

Utilizando-se a estação POLI como referência, o valor máximo fica em torno de 0,15 m, com média de 0,03 m e desvio padrão de 0, 03 m.

Assim como era de se esperar as antenas ativas utilizadas nos testes apresentam maior ganho, polarizadas filtram de maneira mais eficiente os sinais na faixa de frequência desejada, resultando em um SNR com valores muito superiores aos comparados com os da PIFA interna do celular. Isto resulta em menor perda de ciclos e medidas de melhor qualidade. As antenas internas de um quarto de onda, em conjunto com o *front-end*, atendem o propósito para o qual foram idealizadas, qual seja, a prioridade em fornecer um posicionamento mesmo que com o preço da baixa precisão, em oposição a não fornecer posicionamento algum.

Dessa forma desde que conectadas corretamente, utilizando-se cabo de tamanho e impedância apropriado, além de uma fonte de energia o conjunto muda suas prioridades, passando a receber os sinais de uma maneira mais seletiva, o que se reflete em posições mais precisas e acuradas.

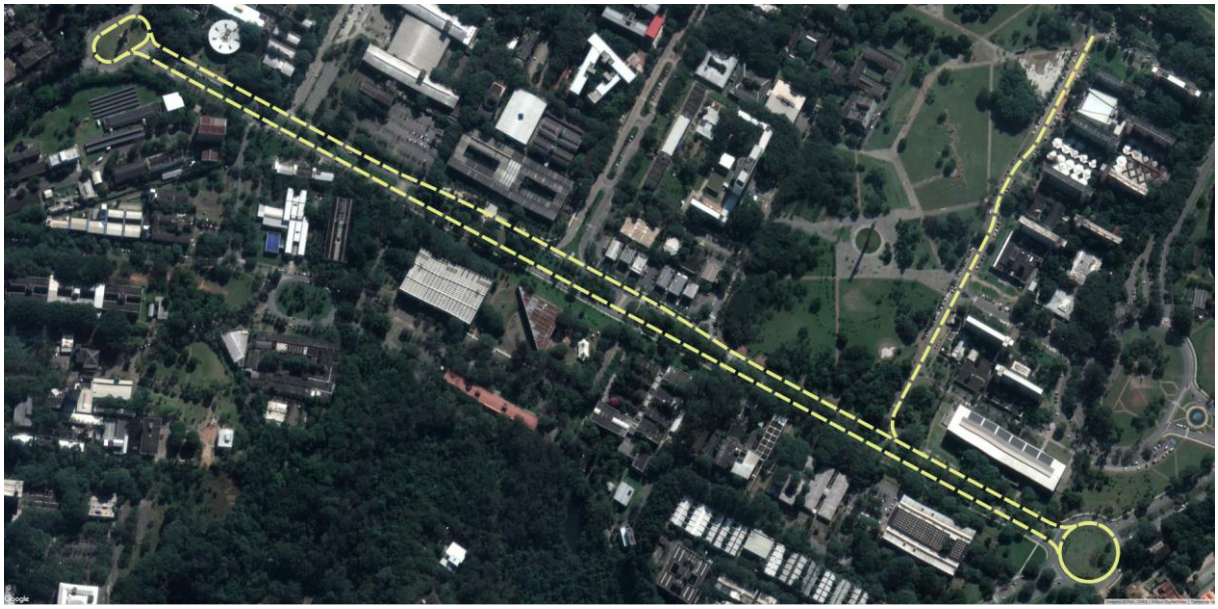
5.7 QUALIDADE DO POSICIONAMENTO DIFERENCIAL EM UM TESTE DINÂMICO.

Este experimento foi realizado nas dependências da Cidade Universitária na Av. Prof.º Luciano Gualberto entre as rotatórias da Praça Ramos de Azevedo e Praça Prof.º Jorge Americano, além da Rua do Anfiteatro que foi escolhida por não apresentar vegetação densa, a qual poderia causar interferência na conexão entre o receptor e os satélites e consequentemente a perda de ciclos.

Para o teste foi fixada sobre o teto de um veículo, com o auxílio de uma base imantada, uma antena NAP100 a qual foi conectada por um divisor de sinais a um telefone SGS2 e a um receptor Promark3, uma antena U-blox alimentada por um armazenador de energia através de um *Beas Tee* conectada a um segundo telefone SGS2 e um terceiro telefone SGS2 foi preso ao teto do veículo utilizando apenas a antena interna. Por último para servir de Estação de Referência foi conectada à antena PNOR através de um divisor de sinais um receptor Novatel e um último telefone SGS2.

A Figura 82 apresenta o caminho percorrido pelo veículo durante os testes. O traçado deste caminho foi obtido por um GPS geodésico através de levantamento no modo Stop-and-Go pós processado, com inicialização de 5 minutos e mais 2 minutos de tempo de parada em cada ponto.

Figura 82 – Trajeto do veículo no teste dinâmico.



Fonte: Autor (2018).

Para o posicionamento relativo no modo dinâmico, a medida de fase nem sempre é o método mais aconselhável, pois para um bom desempenho utilizando-se um receptor de simples frequência, é necessário que o receptor seja iniciado, de modo que permaneça estático por 15 minutos até que resolva as ambiguidades e em seu trajeto não pode haver perdas de ciclos, pois caso o receptor fique por algum momento conectado a menos de quatro satélites, o mesmo deve ser reiniciado estaticamente por outros 15 minutos.

O teste foi dividido em quatro etapas, na primeira o veículo permaneceu estacionado na Praça Ramos de Azevedo por 15 minutos para resolução das ambiguidades e então foram realizadas 10 voltas em torno da praça que não possui obstruções, evitando deste modo a perda de ciclos. A partir daí o veículo foi deslocado para a Praça Prof.º Jorge Americano, passando sobre várias árvores ocasionando a perda de sinal, então os receptores foram reiniciados por mais 15 minutos e então foram realizadas 10 voltas em torno da praça que também não possui obstruções.

Em seguida, o trajeto entre as duas praças foi executado por 5 vezes (ida e volta) passando por baixo das árvores propositalmente, mas sempre no mesmo local mantendo como guia a faixa que separa as pistas, a qual havia sido previamente levantada.

Por último o veículo foi deslocado para a Rua do Anfiteatro, permanecendo estático por 15 minutos para reinicialização dos receptores então percorrida em toda a sua extensão por 10 vezes (ida e volta) também utilizando a faixa que separa as pistas como guia.

As coordenadas dos pontos obtidas pelos diversos equipamentos com e sem correção diferencial, foram comparadas ao eixo pré-definido por uma linha perpendicular para que fosse determinado o seu afastamento; o procedimento foi efetuado através do programa Grass conforme discutido no item 4.2.2.1.

As inicializações do receptor GPS se tornam relevantes, no intuito de se utilizar o Promark3 como parâmetro da acurácia e da precisão a qual se poderia chegar com os outros equipamentos. O resumo estatístico dos resultados está compilado na Tabela 55, onde a denominação PM3T se refere ao receptor Promark 3 no modo

topográfico, R1 diz respeito à primeira rotatória e R2 à segunda rotatória, E1 refere-se ao trajeto da Av. Prof.º Luciano Gualberto e E2 ao da Rua do Anfiteatro. O posicionamento foi processado no software GNSS Solutions utilizando-se a estação POLI como referência e os valores relativos ao afastamento estão em metros. A Tabela 56 apresenta os dados obtidos pelos telefones.

Tabela 55 – Resumo estatístico dos resultados do teste dinâmico com o Promark 3

PM3T	R1	R2	E1	E2
Média	0.690	0.738	0.896	0.999
Desvio padrão	0.469	0.495	0.778	0.996
Intervalo	1.707	1.934	12.611	4.253
Mínimo	0.001	0.000	0.000	0.000
Máximo	1.707	1.934	12.611	4.253
Contagem	578	596	1992	963

Fonte: Autor (2018).

Da mesma forma que na tabela anterior os termos R1, R2, E1 e E2 se referem aos trechos percorridos, na coluna denominada Aut. estão os afastamentos resultantes das coordenadas obtidas pelo telefone de modo autônomo, através das sentenças NMEA; na coluna PD os afastamentos após a correção no domínio da posição obtidos após processamento no programa NMEA_x_NMEA utilizando-se como referência as coordenadas obtidas pelo telefone de mesmo modelo conectado à antena PNOR; e na coluna Cor. as correções em porcentagem conforme as tabelas anteriores.

Tabela 56 – Resumo estatístico dos resultados do teste dinâmico com o telefone SGS2.

28/01/2018	R1			R2			E1			E2		
	Aut.	PD	Cor.	Aut.	PD	Cor.	Aut.	PD	Cor.	Aut.	PD	Cor.
	Telefono SGS2 – A antena U-blox.											
Média	1.13	1.09	4%	1.41	1.41	0%	1.00	1.15	-15%	1.27	0.88	31%
Desvio padrão	0.64	0.46	29%	0.77	0.31	59%	0.72	0.85	-18%	0.69	0.94	-37%
Intervalo	2.68	2.36	12%	3.93	1.65	58%	4.70	4.42	6%	4.43	4.03	9%
Mínimo	0.00	0.02	-	0.03	0.49	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
Máximo	2.68	2.38	11%	3.96	2.15	46%	4.70	4.42	6%	4.43	4.03	9%
Contagem		570			598			2081		3	950	

28/01/2018	R1			R2			E1			E2		
	Aut.	PD	Cor.	Aut.	PD	Cor.	Aut.	PD	Cor.	Aut.	PD	Cor.
	Telefono SGS2 – C antena NAP100.											
Média	1.47	1.35	8%	1.85	1.87	-1%	1.27	1.26	0%	0.89	1.28	-44%
Desvio padrão	0.90	0.67	26%	0.78	0.40	48%	1.03	1.02	1%	0.63	0.94	-50%
Intervalo	3.46	3.44	0%	3.58	2.60	28%	6.94	6.01	13%	3.59	4.89	-36%
Mínimo	0.00	0.00	-	0.09	0.96	-	0.00	0.00	-	0.03	0.00	-
Máximo	3.46	3.45	0%	3.68	3.55	3%	6.94	6.01	13%	3.62	4.89	-35%
Contagem		570			598			2083			958	
	Telefono SGS2 – L antena interna.											
Média	0.90	1.13	-25%	1.86	1.89	-2%	1.33	1.89	-43%	1.24	1.28	-4%
Desvio padrão	0.63	0.73	-15%	0.81	0.45	44%	1.11	1.31	-17%	0.75	0.94	-26%
Intervalo	2.83	2.98	-5%	3.53	4.22	-20%	6.96	7.15	-3%	5.45	4.89	10%
Mínimo	0.01	0.01	-	0.10	0.13	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
Máximo	2.84	2.99	-5%	3.62	4.35	-20%	6.96	7.15	-3%	5.45	4.89	10%
Contagem		570			590			2083			1030	

Fonte: Autor (2018).

Os valores se apresentam de uma forma inconstante hora com alguma melhora, hora piorando o cenário, mas de uma maneira geral sempre com valores superiores aos valores de referência, disponibilizados na Tabela 55, com exceção ao erro máximo no trecho E1, o qual possui vegetação densa e não se espera um bom desempenho do receptor de referência trabalhando com medida de fase. Neste trecho o erro máximo do Promark 3 chega a 12,61m e nos telefones que utilizam o código C/A o erro máximo foi de 6,96m no modo autônomo.

Apesar de nos experimentos em laboratório demonstrarem que a correção diferencial pelas coordenadas calculadas por dois dispositivos de mesmo modelo utilizando antenas externas ser favorável, quando aplicada a um receptor efetivamente em movimento, não oferece de uma maneira constante o mesmo grau de correção.

Para os telefones com antena externa, percebe-se que nos trechos em curva apesar de quase não se notar alterações na média, ficando entre -1% e 8%, ocorre uma melhora no desvio padrão, o que significa que os dados ficaram menos ruidosos,

diminuindo a amplitude dos erros. Já para os trechos em reta o mesmo não pode ser dito.

Para o telefone com antena interna, a correção quase sempre causa uma degradação do posicionamento, quando comparados aos valores obtidos pelo modo autônomo.

De uma maneira geral os testes não foram conclusivos, o que indica que uma bateria maior de testes deve ser efetuada para que se possa ter resultados mais confiáveis.

6 CONCLUSÃO

O principal empecilho dos receptores GPS de baixo custo para a obtenção de um posicionamento com boa precisão e acurácia, está na qualidade dos componentes eletrônicos de RF e o fato de, quando compartilhados com outros sensores no mesmo dispositivo, sofrer influências externas e também internas. Tal fato pode ser mitigado com blindagens e como foi demonstrado com experimentos neste trabalho, com a conexão de uma antena externa. Outro fator que interfere na qualidade do posicionamento é a sensibilidade do receptor; dando prioridade para a aquisição do sinal mesmo que refletido. Assim, os receptores GPS de alta sensibilidade (High Sensitive GPS) como são os de celulares, ficam mais suscetíveis ao multicaminhamento, o que por sua vez, causa grande degradação na qualidade do posicionamento.

Por ser um dispositivo muito difundido na sociedade, o telefone celular provavelmente é o dispositivo que mais ajudou a disseminar os receptores GPS de baixo custo. No entanto, por conta de suas restrições, a precisão não é tão boa e assim, a obtenção de coordenadas precisas por meio deste dispositivo foi o desafio da presente pesquisa, levado a bom termo, conseguiu-se melhorar tanto a precisão quanto a acurácia do posicionamento.

Com este propósito, esta pesquisa sugeriu procedimentos para melhorar tanto a precisão quanto a acurácia do posicionamento obtidos por estes dispositivos. Alguns experimentos deram resultados satisfatórios e outros nem tanto, mas ambos foram apresentados com as suas respectivas considerações pois podem ser úteis para outros pesquisadores.

Para atingir esta meta, foi necessário estudar em maior profundidade uma série de pontos sobre a arquitetura dos componentes eletrônicos que constituem o sistema de navegação dos telefones celulares e são responsáveis pela aquisição e processamento dos sinais eletromagnéticos do GPS: antenas de um modo geral e a possibilidade da conexão de antenas externas (o que foi feito de fato), LNA, *front-end*, *chipsets* e como são feitas suas interações com o SO, para a disponibilização dos serviços de localização para os aplicativos.

Do ponto de vista conceitual foram estudados mais a fundo os métodos DGPS nos domínios da posição e da distância, que apesar de constarem na literatura, só se apresentam comparações genéricas e qualitativas, não sendo abordados os aspectos quantitativos que permitem a mensuração de quanto um é melhor que o outro em termos posicionais.

Para o processamento dos dados, não havendo programas prontos que aceitassem a entrada dos dados da maneira que estavam disponibilizados, foi necessário o desenvolvimento de alguns programas tanto para o cálculo do Posicionamento por Ponto Simples como para o DGPS, conjuntamente com a concepção de um algoritmo para validar a integridade do posicionamento GPS.

Na criação desses programas foram desenvolvidas mais de 10 000 linhas de códigos na linguagem de programação “C”. As principais rotinas foram criadas para a leitura das sentenças NMEA, leitura e alteração dos arquivos RINEX de observação, escolha seletiva de satélites, leitura dos arquivos RINEX de navegação, cálculo das soluções de posicionamento a partir das pseudodistâncias (PPS), cálculo das correções nas pseudodistâncias e do DGPS nos domínios da posição e da distância e para o RAIM-FDE. Ao final, conta-se com uma biblioteca de funções e programas, aqui desenvolvidos, para realizar uma grande gama de operações.

Antes de quantificar e avaliar a precisão e a acurácia que poderia ser alcançada pelos equipamentos de baixo custo, os algoritmos de correção diferencial foram testados contra erros de programação

Apesar de o sistema operacional Android viabilizar a aquisição dos dados brutos do GPS embarcado em telefones móveis desde 2017, ainda é necessário que o hardware tenha esta disponibilidade, o que até o momento da finalização deste trabalho era bastante raro e apenas para dispositivos de ponta, tornando a solução de custo elevado. Desta forma foi sugerida uma maneira de obter estas informações de alguns modelos de telefones, viabilizando os procedimentos de correção diferencial do posicionamento, a partir das observáveis.

Contando-se, portanto, com estes dados e ferramentas, imprescindíveis para os testes, foram planejados e realizados diversos experimentos para medir a precisão

e acurácia dos resultados que iam sendo obtidos nas diversas implementações para melhoria da qualidade do posicionamento. Ou seja, também foi necessário obter ou contar com coordenadas que fossem parâmetros de comparação e validação das implementações.

Os objetivos foram todos atingidos e foi feita uma avaliação da melhoria do posicionamento conseguida, que vem resumida na tabela abaixo, para distâncias de até 10 km, segundo a recomendação da literatura. Como se pode ver, foram obtidos resultados diferentes com o uso da antena interna e externa. A Tabela 57 pode servir de guia para os usuários quanto à acurácia e precisão de cada método, guiando escolhas em função da precisão / acurácia necessária em cada aplicação concreta.

Tabela 57 - resumo dos resultados obtidos na tese

	Equipamento referência		**Equipamento baixo custo antena interna**		**Equipamento baixo custo antena externa**	
Método	**PPS**	**DGPS**	**PPS**	**DGPS**	**PPS**	**DGPS**
Programa	**dgpsRINEX**					
Erro médio posicional 2D	1,61	0,57	5,07	4,87	1,44	0,84
Desvio padrão	1,52	0,33	5,04	5,16	0,98	0,51
Erro máximo posicional 2D	7,59	3,50	47,90	48,27	8,31	6,53
Programa	**dgpsNMEA**					
Erro médio posicional 2D	1,59	0,79			1,42	1,39
Desvio padrão	1,06	0,66			1,58	1,60
Erro máximo posicional 2D	7,48	25,70			13,79	35,63
Programa	**NMEA x NMEA**					
Erro médio posicional 2D			1,36	1,20	1,37	0,46
Desvio padrão			0,73	0,79	1,15	0,30
Erro máximo posicional 2D			26,30	28,25	6,89	2,43
Programa	**GNSS Solutions (diferença de fase)**					
Erro médio posicional 2D		0,05		0,85		0,07
Desvio padrão		0,01		1,07		0,05
Erro máximo posicional 2D		0,06		4,33		0,22

Fonte: Autor (2018).

A partir do conhecimento prévio do grau de correção que se pode obter pelo processo de DGPS (como se vê na primeira coluna dupla dessa tabela), foram realizadas várias baterias de testes com a finalidade de avaliar e quantificar a correção do posicionamento nos dispositivos de baixo custo, com ênfase nos telefones celulares por serem os mais difundidos. Nos experimentos foram testados diversos métodos, utilizando-se tanto a antena interna, original do equipamento, como acoplando-se uma antena externa para melhorar a recepção dos sinais GPS (os diferentes dados figuram nas duas outras colunas duplas).

Os resultados foram processados através de 4 programas, como se vê nessa tabela: dgpsRINEX, dgpsNMEA, NMEA x NMEA e GNSS Solutions (diferença de fase).

O programa dgpsRINEX após o cálculo da solução do PPS, aplica a correção DGPS nos domínios da posição e da distância e se mostrou que as melhorias são significativas quando se usa uma antena externa acoplada ao dispositivo de baixo custo.

O programa dgpsNMEA aplica a correção DGPS diretamente nas posições calculadas pelo telefone a partir de uma estação de referência e não se mostrou muito promissor, pelos resultados: a segunda coluna das colunas duplas mostra resultados só 3mm e 2mm melhores que a primeira coluna. Não se efetuou o teste com a antena interna (coluna em branco).

O programa NMEA x NMEA aplica a correção DGPS diretamente nas posições calculadas pelo telefone a partir das posições calculadas por outro telefone de mesmo modelo. Os resultados mostraram-se promissores para o caso de antena externa, com melhorias no posicionamento (erro médio) de 1,37 para 0,46m e de 1,15 para 0,30m, na acurácia e no desvio-padrão, respectivamente. Não deu bons resultados para o caso da antena interna, como se pode ver pela tabela. Esses testes foram feitos no modo estático e assim, foi tentada a aplicação para o caso dinâmico. Isso é possível, teoricamente, tendo em conta que essa correção é aplicada, nos dois casos, a um posicionamento obtido através do código C/A e realizada época a época. Entretanto essa aplicação a uma antena em movimento, nos testes realizados, não deu bons resultados e a pesquisa deve continuar para identificar as causas e solucionar os

problemas. Talvez isso pode ser devido ao HSGPS ser mais suscetível ao multicaminhamento, que é um tipo de erro que o método, tal como aplicado, não é capaz de corrigir.

No programa GNSS Solutions foi utilizado o método relativo estático com correção diferencial por tripla diferença de fase. Os dados do telefone foram transformados em arquivo RINEX e processados por um *software* comercial. Os resultados, como esperados foram muito bons, levando a acurácia a 7 cm e o desvio-padrão a 5 cm.

De todos os testes feitos, ficou demonstrado que caso se queira melhorar o posicionamento com dispositivos de baixo custo, mais especificamente de telefones celulares com GPS embarcados, o uso de uma antena externa ao equipamento é altamente recomendado, senão essencial.

Como avaliação final, pode-se dizer que houve um bom avanço no estudo do chamado DGPS, com uma melhor compreensão das questões e das variáveis envolvidas e, principalmente, com o desenvolvimento de uma metodologia que permitiu a quantificação dos resultados.

Como resultado futuro almejado, para próximas pesquisas, está a aplicação do melhor método (NMEAxNMEA) a receptores em movimento, para assim, em tempo real, melhorar sua posição para a casa do 0,5m, o que significa um ganho destacado com relação ao GPS de navegação, que se situa na casa dos 10m. E isso a um baixo custo, pensando na produção em massa de antenas externas conectáveis aos celulares e o desenvolvimento de aplicativos para esses equipamentos, baseados nos programas desenvolvidos na presente tese.

REFERÊNCIAS

AHMAD, M. S. et al. Comparison between android and iOS Operating System in terms of security. **8th International Conference on Information Technology in Asia - Smart Devices Trend: Technologising Future Lifestyle, Proceedings of CITA 2013**, p. 2–5, 2013.

ANATEL. **Portal Institucional - DADOS ANATEL.** Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/institucional/ultimas-noticiass/1769-telefonia-movel-registra-aumento-de-156-155-linhas-em-agosto>. Acesso em: 16 fev. 2018.

ARAUJO, J. M. P. DE. **Sistema de Informações Geográficas do Município de São Paulo**. São Paulo: 2010.

ARL – APPLIED RESEARCH LABORATORIES. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN. **What is GPSTk**. Disponível em: <http://www.gpstk.org/bin/view/Documentation/WebHome>. Acesso em: 10 jan. 2018.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3th. Ed. Hoboken. John Wiley & Sons, Inc. 2005, 1073 p.

BANVILLE, S.; VAN DIGGELEN, F. Precision GNSS for everyone precise positioning using raw GPS measurements from android smart phones. **GPS World**, v. 27, n. 11, p. 43–48, 2016.

BETKE, K. The NMEA 0183 protocol. **Standard for Interfacing Marine Electronics Devices, …**, n. January 2000, p. 1–28, 2001.

BRAASCH, M. S. Multipath Effects. In: **Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I**. Progress in Astronautics and Aeronautics. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. p. 547–568.

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

BROWN, R. G. A Baseline GPS RAIM Scheme and a Note on the Equivalence of Three RAIM Methods. **Navigation**, v. 39, n. 3, p. 301–316, set. 1992.

BROWN, R. G. Solution of the Two-Failure GPS RAIM Problem Under Worst-Case Bias Conditions: Parity Space Approach. **Navigation**, v. 44, n. 4, p. 425–431, 1997.

CAMBRIDGE SILICON RADIO LIMITED. **SiRFstar One Socket Protocol Interface Control Document**, 2013.

CANCILLO, F. **RXtoRINEX: Main Page**. 2016. Disponível em: <https://cdn.rawgit.com/fcancillo/RXtoRINEX-V2.0/master/doc/html/index.html>. Acesso em: 14 jan. 2018.

CHEN, R. et al. DGNSS-C: A Differential Solution for Enhancing Smartphone GNSS

Performance. **Proceedings of the 27Th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (Ion Gnss 2014)**, n. September 2016, p. 490–497, 2014.

CHEN, X. et al. **Antennas for Global Navigation Satellite Systems**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2012.

CORDEIRO, A. R. **Localização geográfica através de aparelho celular**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009, 9 p.

CORRÊA, F. J. D.; NEVES, R. **Mapa Digital**. São Paulo: 2007. 22 p. PMSP - Prefeitura do Município de São Paulo - SECRETARIA DE FINANÇAS MUNICÍPIO DE SÃO PAULO.

COSTA, E. Simulation of the Effects of Different Urban Environments on GPS Performance Using Digital Elevation Models and Building Databases. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 3, p. 819–829, set. 2011.

COZZENS, T. **Broadcom launches dual-frequency GNSS receiver for mass market : GPS World**. Disponível em: <http://gpsworld.com/broadcom-launches-dual-frequency-gnss-receiver-for-mass-market/>. Acesso em: 15 out. 2017.

DAS, S. K. (2016). **Mobile Terminal Receiver Design:** LTE and LTE-Advanced. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. 368 p.

DE ESCOBAR, A. L. et al. **SAW filters for Global Positioning Satellite (GPS) receivers**. 2002 IEEE Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No.02CH37284). **Anais**...2002

DIGGELEN, F. VAN. **A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS**. Boston: Artech House, 2009, 398 p.

DIGGELEN, F. VAN; SALAS, J. DE. GNSS inside mobile phones. **Inside GNSS**, v. 6, n. 2, p. 50–60, 2011.

DREWES, H.; HEIDBACH, O. Deformation of the South American Crust Estimated from Finite Element and Collocation Methods. In: **A Window on the Future of Geodesy**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. p. 544–549.

DREWES, H.; HEIDBACH, O. The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean. In: KENYON S., PACINO M., M. U. (Ed.). **Geodesy for Planet Earth**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. v. 136p. 657–664.

EMPLASA - EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A. **Projeto Mapeia SP**. 2012. Disponível em: <https://www.emplasa.sp.gov.br/ProjetoMapeia/Apresentacao>. Acesso em: 7 jan. 2018.

ESTEY, L.; WIER, S. Teqc Tutorial: basics of Teqc use and Teqc products. n. June, p. 59, 2014.

EUA, D. O. D. **Global Positioning System Standard Positioning Service,** Washington, DC, 2008. Disponível em: <http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>

EUA, Interface Control Contractor. **Interface Spacification - IS-GPS-200H**. Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration, DC, 2014. Disponível em: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200H.pdf>

EUA, NATIONAL EXECUTIVE COMMITTEE SPACE-BASED POSITIONING, NAVIGATION, AND T. **GPS: The Global Positioning System - A global public service brought to you by the U.S. government.** Disponível em: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/#orbits>. Acesso em: 17 out. 2017.

FARRELL, J. A. **AIDED NAVIGATION GPS with High Rate Sensors**. New York: The McGraw-Hill Companies, 2008. 553 p.

FARRET, J. C. et al. A precisão possível com GPS L1/CA em georreferenciamento: O desafio do multicaminho - Análise de um receptor. **Boletim de Ciencias Geodesicas**, v. 13, n. 1, p. 211–229, 2007.

FONSECA JUNIOR, E. S. DA. **O Sistema GPS como ferramenta para à avaliação da refração ionosférica no Brasil**. 2002. 200 p. Tese (Douorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2002.

FORNI, A. A.; VAN DER MEULEN, R. **Gartner Says Worldwide Sales of Smartphones Grew 9 Percent in First Quarter of 2017**. Disponível em: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3725117>. Acesso em: 21 set. 2017.

FREIBERGER JUNIOR, J. **ANTENAS DE RECEPTORES GPS: CARACTERÍSTICAS GERAIS.** Curitiba: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2004. Material teórico de apoio ao Curso de Extensão – Setor de Ciências da Terra – Departamento de Geomática.

GLOBALSAT TECHNOLOGY CORPORATION. **GPS Receiver User' s Guide V1 . 1**, 2012.

GOOGLE LLC. **android.location | Android Developers**. Disponível em: <https://developer.android.com/reference/android/location/package-summary.html>. Acesso em: 14 fev. 2018a.

GOOGLE LLC. **GnssMeasurement | Android Developers**. Disponível em: <https://developer.android.com/reference/android/location/GnssMeasurement.html>. Acesso em: 14 fev. 2018b.

GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 525 p.

GROHMANN, C. H. **Introdução à Análise Digital de Terreno com GRASS-GIS**. São Paulo: Instituto de Geociências - USP, 2008.

GURTNER, W.; ESTEY, L. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. v. 8, n. December, 2007.

HASEGWA, M. SAW Filters in GPS Application. **Wireless Design & Development**, p. 27–28, jan. 2001.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS — Global Navigation Satellite Systems:** GPS, GLONASS, Galileo, and more. Vienna. Springer-Verlag Wien, 2008. 518 p.

IGS INFRASTRUCTURE COMMITTEE, RINEX WORKING GROUP, MULTI-GNSS EXPERIMENT. **IGS RINEX 3 Transition Plan v3.0**. [s.l.]: 2015, 17 p.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS), RINEX WORKING GROUP AND RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR MARITIME SERVICES SPECIAL COMMITTEE 104 (RTCM-SC104). **RINEX: The Receiver Independent Exchange Format**. [s.l.]: 2017, 95 p.

JOSEPH, A. Measuring GNSS Signal Strength. **InsideGNSS**, v. 5, p. 20--25, 2010.

KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. **Understanding GPS. Principles and applications**. 2. ed. Norwood: Artech House, 1997. 599 p.

KARIMI, H. A. **Advanced location-based technologies and services**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 310 p.

KARUNANAYAKE, M. Evaluation of assisted GPS (AGPS) in weak signal environments using a hardware simulator. 2004, Long Beach. **ION GNSS 2004 Conference**, p. 1–11.

KINGSLEY-HUGHES, K. **Hacking GPS**. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc., 2005. 351 p.

KLINE, P. A.; VAN GRAAS, F. **Fault Detection and Isolation for Multisensor Navigation Systems**. (Ohio University, Ed.), Joint University Program for Air Transportation Research. **Anais**...Athens: NASA. Langley Research Center, 1991. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19920008750.pdf>

KUMAR, B. P.; ASHOK, M. S. A Survey of Positioning Algorithms on Mobile Devices in Location Based Services. **International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering**, v. 3, n. 6, p. 1779–1784, 2013.

KYOCERA CORPORATION. **KYOCERA SAW Filter for Connectivity Application Line-up of SAW Filter for GNSS / WLAN**, 2014.

LACHAPELLE, G. et al. HSGPS signal analysis and performance under various indoor conditions. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, v. 51, n. 1, p. 29–43, 2004.

LANGLEY, R. B. NMEA 0183: A GPS Receiver Interface Standard. **GPS World**, v. 6, n. 7, p. 54–57, 1995.

LANGLEY, R. B. A primer on GPS antennas. **GPS World**, v. 9, n. 7, p. 50–54, 1998.

LAU, L.; MOK, E. Improvement of GPS Relative Positioning Accuracy by Using SNR. **Journal of Surveying Engineering**, v. 125, n. 4, p. 185–202, nov. 1999.

LEICK, A.; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D. **GPS Satellite Surveying**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2015. 836 p.

LI, B. et al. Secure User Plane Location: concept and performance. **GPS Solutions**, v. 14, n. 2, p. 153–163, 19 mar. 2010.

MAGELLAN NAVIGATION, I. **ProMark TM 3 Reference Manual**. San Dimas: 2006a.

MAGELLAN NAVIGATION, I. **ProMark TM 3 Breaking New GPS Survey Ground**San Dimas, CA E.U.A., 2006b.

MANCINI, R. **Op Amps for Everyone**. Dallas: 2002. Texas Instrumensts Design Reference - Advanced Analog Products. 464 p.

MEIER, R. **Professional Android Application Development**. 3o ed. Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 868 p.

MEIRELLES, F. DE S. **Pesquisa Anual do Uso de TI nas Empresas**. 28a ed. São Paulo: Centro de Tecnologia de Informação Aplicada da EAESP - GVCIA. Fundação Getúlio Vargas. Escola de Administração de Empresas – EAESP, 2017. Pesquisa anual.

MISRA, P.; ENGE, P. **Global positioning system: signals, measurements, and performance**. 2. ed. Lincoln: Ganga-Jamuna Press, 2006. 569 p.

MOERNAUT, G. J. K.; ORBAN, D. GNSS Antennas: An Introduction to Bandwidth, Gain Pattern, Polarization and All That. **GPS World**, v. 20, n. 2, p. 42–48, 2009.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação**. 2. ed. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2007.

MONTEIRO, L. S.; MOORE, T.; HILL, C. What is the accuracy of DGPS? **Journal of Navigation**, v. 58, n. 2, p. 207–225, maio 2005. 476 p.

MOORE, S. K. Super-Accurate GPS Chips Coming to Smartphones in 2018 - IEEE Spectrum. **IEEE Spectrum**, v. 54, n. 10, p. 2, 2017.

MOTOROLA, M. D. **Block Diagram & Schematics XT1025 V1.0**, 2014.

MURATA MANUFACTURING CO., L. **Datasheet of SAW Device**, 2017.

NATIONAL MARINE ELECTRONICS ASSOCIATION. **NMEA 0183 - Standard For Interfacing Marine Electronic Devices**. Severna Park: Marine Electronics Journal, Inc., 2002. 88 p.

NBR 14.166. **Rede de referência cadastral municipal - ProcedimentoNo Title**Rio de JaneiroAssociaçãobrasileira De Normas Técnicas (ABNT), 1998.

NOGUEIRA, J. S. **Eletrônica digital básica**. Salvador: EDUFBA, 2011.

NOVATEL INC. **Novatel OEMV ® Family Installation and Operation User Manual rev13**. Canadá:2010.

NOVATEL INC. **FlexPak-G2TM Product Sheet**Canadá, 2011.

NXP, B. V. **SiGe:C low-noise amplifier MMIC for GPS, GLONASS, Galileo and COMPASS and LTE B32**, 2017.

OLIVEIRA, G. D. DE. **Posicionamento Relativo em Tempo Real e Pós-Processado Utilizando Microrreceptor GNSS Usado em Smarthphones**. 2014. 124 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2014.

OSZCZAK, B.; SERŻYSKO, K. Decoding of SiRF Binary Protocol. **Artificial Satellites**, v. 46, n. 4, 1 jan. 2011.

PARK, B. et al. DGPS Enhancement to GPS NMEA Output Data: DGPS by Correction Projection to Position-Domain. **Journal of Navigation**, v. 66, n. 2, p. 249–264, 23 mar. 2013.

PARKINSON, B. W. **Global Positioning System: Theory and Applications - Volume II**. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v. 2

PARKINSON, B. W.; AXELRAD, P. Autonomous GPS Integrity Monitoring Using the Pseudorange Residual. **Navigation**, v. 35, n. 2, p. 255–274, jun. 1988.

PMSP - PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **MAPEAMENTO DIGITAL DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO - ANEXO I - TERMO DE REFERÊNCIA**São PauloSECRETARIA DE FINANÇAS E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, 2002.

PMSP - PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **DECRETO No 50.736**, 2009.

PMSP - PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **DECRETO No 57.770**São Paulo, 2017.

PMSP - PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Gestão Urbana SP**. 2017. Disponível em: <http://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/noticias/prefeitura-de-sao-

paulo-publica-decreto-que-oficializa-o-geosampa-como-a-base-oficial-da-cidade/>. Acesso em: 7 jan. 2018.

QGIS EQUIPE DE DESENVOLVIMENTO. **QGIS User Guide**. Open Source Geospatial Foundation. 2015. 347 p.

QUALCOMM, Inc. **Snapdragon S4 Processors: System on Chip Solutions for a New Mobile Age**USAQualcomm Inc., 2011. 8 p.

QUALCOMM CDMA TECHNOLOGIES. **gpsOne Position-Location Technology Build new revenue streams with the world' s most widely deployed precise positioning technology**. [s.l.] QUALCOMM Incorporated, 2006. 4 p.

QUALCOMM TECHNOLOGIES, Inc. **QUALCOMM Snapdragon 200 processor.** [s.l.]: 2014. 2 p.

QUALCOMM TECHNOLOGIES, I. **Qualcomm Snapdragon Processor**. [s.l.]: 2015. 49 p.

RAMOS, M. D. P.; DAL POZ, W. R.; CARVALHO, A. S. ANÁLISE DAS POSSIBILIDADES DE TRANSFORMAÇÃO DE REFERENCIAL E ATUALIZAÇÃO DE COORDENADAS ESTIMADAS PELO PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 3, p. 389–404, set. 2016.

RF COM SISTEMAS LTDA. **Componentes de RF: Cabos Coaxiais**. São José dos Campos: 2017.

ROHM, W. Dgps in Mobile Phones – Perspectives, Technology, Limitations. **JUNIORSTAV**, Grunwaldzka: 2011, p. 4–7. Wroclaw University of Environmental and Life Sciences, Faculty Of Environmental Engineering And Geodesy, Institute of Geodesy and Geionformatics.

RTCM (2001) RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR MARINE SERVICES. **RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Version. 2.3.** Alexandria, 2001.

SAGER, I. Before IPhone and Android Came Simon, the First Smartphone. **BusinessWeek**, p. 1–19, 2012.

SAMSUNG ELECTRONICS CO. LTD. **Gsm telephone GT-i9100**, 2010.

SÁNCHEZ, L.; DREWES, H. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, v. 102, p. 1–23, 2016.

SCHWIEGER, V. **High-Sensitivity GPS—the Low Cost Future of GNSS**. International Federation of Surveyors Working Week. **Anais**...Copenhagen, Denmark: 2007

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2nd. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. v. 2

SHIRAZ, M.; WHAIDUZZAMAN, M.; GANI, A. A study on anatomy of smartphone. **Journal Computer Communication & Collaboration**, v. 2013, n. 1, p. 24–31, 2013.

SICKLE, J. VAN. **GPS for Land Surveyors**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. 350 p.

SIRF TECHNOLOGY, I. **One Socket Protocol Interface Control Document Including SiRF Binary Protocol Reference Manual**San Jose, CA, 2009a.

SIRF TECHNOLOGY, I. **SiRFstarIV GSD4t**E.U.A.Cambridge Silicon Radio Limited, , 2009b.

SIRF TECHNOLOGY, I. SiRFstarIV TM One Socket Protocol Interface Control Document. n. 8, 2010.

SIRGAS. **Uso de velocidades no GNSS**. Disponível em: <http://www.sirgas.org/pt/velocity-model/using-velocities-gnss/>. Acesso em: 15 jan. 2018.

SOLIMAN, S.; AGASHE, P.; FERNANDEZ, I. et al. **gpsOne: A hybrid position location system**. 2000 IEEE Sixth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. ISSTA 2000. Proceedings (Cat. No.00TH8536). **Anais**...San Diego: IEEE, 2000. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/878139/>. Acesso em: 10 jan. 2018

SOUZA, W. DE O. **MODELAGEM DO MOVIMENTO DA PLACA TECTÔNICA SUL-AMERICANA POR MEIO DE DADOS VLBI E GNSS.** 2013, 179 p. Dissertação (Mestrado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE, CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA – DECart. Recife: 2013.

TAKASU, T.; YASUDA, A. **RTKLIB ver. 2.4.2 Manual**Tokyo, 2013. Disponível em: <http://www.rtklib.com/rtklib.htm> Acesso em: 10 jan. 2015

TOLMAN, B. et al. The GPS toolkit: open source GPS software. **Proceedings of ION GNSS 2004**, p. 2044–2053, 2004.

TOPCON POSITIONING SYSTEMS, I. **HIPER GNSS Receptor e Antena Integrados.** [S.I.]. Topcon America Corporation, 2005.

TREVISANI, E.; VITALETTI, A. Cell-ID location technique, limits and benefits: An experimental study. **Proceedings - IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, WMCSA**, n. Wmcsa, p. 51–60, 2004.

TUDOCELULAR. **Motorola Atrix TV - Ficha Técnica - Tudocelular.com**. 2013. Disponível em: <https://www.tudocelular.com/Motorola/fichas-tecnicas/n2337/Motorola-Atrix-TV.html>. Acesso em: 10 jan. 2018.

U-BLOX AG. **GPS Antennas RF Design Considerations for u-blox GPS Receivers**Malmöu-blox Malmö AB, 2009. Disponível em: <http://www.u-

blox.ch/images/downloads/Product_Docs/GPS_Antennas_ApplicationNote(GPS-X-08014).pdf>

U-BLOX AG. **Evk-6 u-blox 6 evaluation kits**Thalwil, Suiça, 2012.

U-BLOX AG. **u-center Android GNSS Evaluation Application**Thalwil, Suiça, 2015.

U-BLOX AG. **u-blox 6 Evaluation Kits EVK-6 User Guide**. Thalwil, Suiça: 2012.

U-BLOX AG. **LEA-6 u-blox 6 GPS Modules**Thalwil, Suiça, 2017.

WU, Z. et al. **A compact GPS/WLAN antenna design for mobile device with full metal housing**. 2016 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). **Anais**...IEEE, fev. 2016Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7434790/>

YOON, D. et al. Position accuracy improvement by implementing the DGNSS-CP algorithm in smartphones. **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 6, 2016.

ZANDBERGEN, P. A.; BARBEAU, S. J. Positional Accuracy of Assisted GPS Data from High-Sensitivity GPS-enabled Mobile Phones. **Journal of Navigation**, v. 64, n. 3, p. 381–399, 2011.

ZHANG, J. et al. **Evaluation of high sensitivity GPS receivers**. 2010 International Symposium on GPS/GNSS. **Anais**...Taipei, Taiwan.: 2010. Disponível em: <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/zhangj_etal2010a.pdf>

ZHU, X.; LI, Q.; CHEN, G. APT: Accurate outdoor pedestrian tracking with smartphones. **Proceedings - IEEE INFOCOM**, n. Section VII, p. 2508–2516, 2013.

ZOGG, J.-M. **GPS Basics: Introduction to the system Application overview**. Thalwil: u-blox_ag, 2002.