



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12331NTC/321

**MEDINDO DISTÂNCIAS ATRAVÉS DE UM ÚNICO
RECEPTOR GPS**

Bruno Moreno Stuck
Hélio Koiti Kuga

RESUMO

Neste trabalho são apresentadas análises de medidas de distância realizadas com apenas um único receptor GPS, em campanha realizada no INPE. Neste trabalho são apresentados também métodos e procedimentos para obtenção de dados de receptores GPS, pré-processamento e conversão de tipos de dados.

ABSTRACT

This work presents analyses of distance measurements carried out with a single GPS receiver, in a campaign realized in the INPE's site. This work also presents methods and procedures for downloading data from GPS receivers, pre-processing data and conversion of data's type.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	15
Objetivos	15
Fundamentos do Sistema de Posicionamento Global – GPS	15
i. Segmento Espacial	17
ii. Segmento de Controle	19
iii. Segmento Usuários	19
Determinação de posição e tempo	20
Observáveis	21
i. Pseudodistância	22
ii. Fase da Portadora	22
Fontes de Erros	23
i. Erros dos relógios dos satélites	23
iii. Erro devido à ionosfera	24
iv. Multicaminho	25
2. MATERIAIS E MÉTODOS	27
Materiais	27
i. Receptor GPS – Descrição e uso)	27
ii. Outros acessórios	27
Métodos	28
i. Campanha	28
ii. Transferência dos dados do receptor para o computador	28
iii. O Software TEQC	31
iv. O Software Ashtech Filetool	32
v. O Software Read_LST	32
3. RESULTADOS	35
Condições do Teste	35
Análise da geometria	36
Análise da Precisão em Coordenadas Retangulares	38
Análise da precisão bidimensional	43
Análise da Altitude	45
4. COMENTÁRIOS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE FIGURAS

1.1. Sistema de Coordenadas	17
1.2. Constelação de satélites.....	18
1.3. Distribuição planejada de órbitas de satélites.....	18
1.4. Localização das estações de controle e monitoramento.....	19
1.5. Posicionamento por GPS	20
1.6. Determinação de posição e tempo	21
2.1. Receptor Ashtech Z-12	27
2.2. Tela Principal	28
2.3. Tela de configuração da porta de comunicação	29
2.4. Tela principal com arquivos do receptor	29
2.5. Transferência de arquivos	30
2.6. Tela após transferência dos arquivos.....	30
2.7. Ashtech FileTool.....	32
3.1. Demonstração da trajetória	35
3.2. PDOPs e satélites (SVS) no ponto 01.....	37
3.3. PDOPs e satélites (SVS) no ponto 02.....	37
3.4. PDOPs e satélites (SVS) no ponto 03.....	37
3.5. PDOPs e satélites (SVS) no ponto 04.....	38

LISTA DE TABELAS

3.1. Coordenadas Médias do ponto 01	39
3.2. Coordenadas Médias do ponto 02	40
3.3. Coordenadas Médias do ponto 03	40
3.4. Coordenadas Médias do ponto 04	41
3.5. Cálculos da Distâncias	42
3.6. Coordenadas geodésicas do Marco e da Base	43
3.7. Comparação de distâncias dos pontos em relação à Base e ao Marco.....	44
3.8. Análise da altitude.....	45

1. INTRODUÇÃO

Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é investigar o posicionamento através de um único receptor GPS, e analisar o possível erro em medidas de distância, levando em conta que o desvio padrão típico de um receptor GPS de uso comum é da ordem de 10 a 15 metros.

Inicialmente, foi planejada e elaborada uma campanha para coleta de dados. De posse desses dados, foi realizada a transferência dos dados do receptor para um computador pessoal e posteriormente esses dados foram analisados.

Utilizou-se uma solução de navegação do próprio receptor, que foi convertida de formato, pelo software Ashtech Filetool.

A análise dos dados foi realizada utilizando o utilitário Microsoft Excel®, de forma a simplificar a visualização dos resultados.

Fundamentos do Sistema de Posicionamento Global – GPS

O Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System, GPS) é um sistema de radionavegação por satélites, desenvolvido pela Força Aérea dos Estados Unidos e também pelo Departamento de Defesa (DoD), durante as décadas de 70 e 80, e colocado em operação na década de 90. Atualmente, o sistema é operado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos e parcialmente aberto a usuários civis.

O sistema fornece aos usuários do mundo toda informações como posição, velocidade e determinação de tempo precisas. Os satélites que fazem parte desse sistema transmitem sinais de radiofrequência, contendo informações requeridas para que o equipamento do usuário compute a solução de

navegação (velocidade, tempo e posição). Para determinar a solução de navegação de forma satisfatória, o sistema receptor utiliza, pelo menos, o sinal de quatro satélites.

O princípio da navegação por satélites do sistema GPS é baseado no conceito de tempo de chegada do sinal (TOA, time of arrival) (Kaplan, 1996). O conceito de TOA consiste em transmitir um sinal em um tempo conhecido e medir o tempo de chegada deste sinal em um tempo posterior, também conhecido. Esse intervalo de tempo é então multiplicado pela velocidade de propagação do sinal para obter a distância entre o emissor e o receptor. Se o relógio do receptor estiver sincronizado com os relógios dos satélites GPS, as medidas de três diferentes satélites GPS, em posições conhecidas, permitirão ao usuário calcular sua posição.

A medida de tempo deve ser muito precisa, ou o posicionamento não será possível. Cada satélite carrega relógios atômicos de césio e rubídio, enquanto que os receptores, normalmente, utilizam osciladores de quartzo. O desvio no relógio do receptor do usuário afeta a medida de tempo de percurso de todos os satélites igualmente, logo esse desvio se torna uma incógnita a ser estimada, bem como as três posições (X, Y, Z ou Latitude, Longitude e Altitude). As medidas da distância com relógio impreciso e outros efeitos menores são chamadas pseudodistâncias.

A precisão dos erros e suas estimativas e compensações são de extrema importância, dado que no sistema GPS as medidas das pseudodistâncias são freqüentemente usadas para estimar as coordenadas de posição e desvio do relógio. O efeito combinado de erros na propagação do sinal causa uma degradação na exatidão do posicionamento de cerca de 10 m na posição horizontal e 13 m na posição vertical (Axelrad e Brown, 1996). Para se obter medidas mais precisas são necessários métodos mais complexos para realizar o posicionamento.

O sistema de posicionamento GPS utiliza como referência o sistema de coordenadas geocêntrico terrestre WGS 84, com o eixo x no sentido centro da Terra para o ponto de interseção entre o Equador e o Meridiano de Greenwich, o eixo z no sentido do centro da Terra para o Pólo Norte Verdadeiro e o eixo y completando o triedro ortogonal dextrógiro (figura 1.1.)

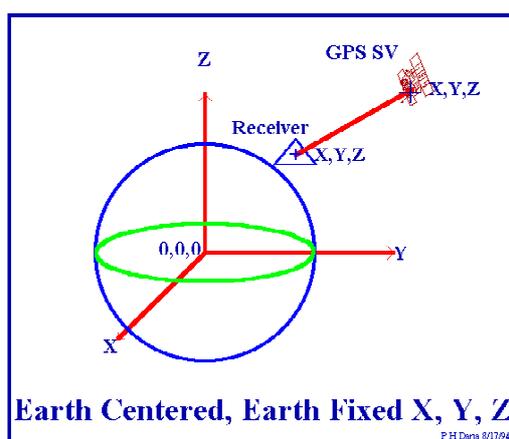
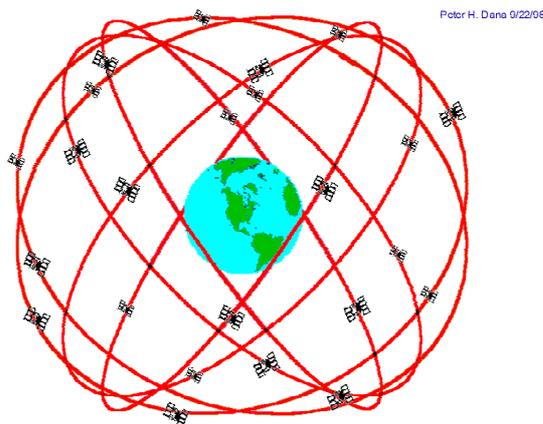


FIGURA 1.1. Sistema de Coordenadas

O sistema GPS é compreendido por três segmentos: Espacial, Controle e Usuário, que serão descritos a seguir:

i. Segmento Espacial

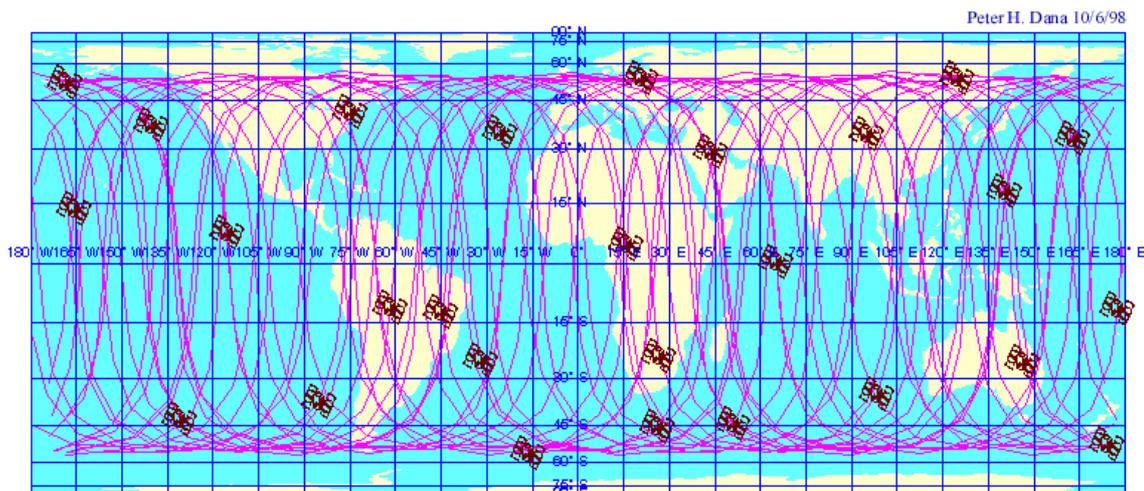
O sistema espacial tem a função de gerar e transmitir códigos, a fase da portadora e a mensagem de navegação. Para defini-lo, foram realizados estudos sobre o número de satélites, os parâmetros orbitais e a tecnologia de fabricação de satélites (figura 1.2).



GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination

FIGURA 1.2. Constelação de satélites.

A configuração padrão deste segmento consiste em 26 satélites operacionais distribuídos em seis planos orbitais (figura 1.3.)



Global Positioning System Satellites and Orbits
for 27 Operational Satellites on September 29, 1998
Satellite Positions at 00:00:00 9/29/98 with 24 hours (2 orbits) of Ground Tracks to 00:00:00 9/30/98

FIGURA 1.3. Distribuição planejada de órbitas de satélites.

ii. Segmento de Controle

O segmento de controle possui a função de gerar o tempo GPS e as efemérides dos satélites. Também é responsável pelo gerenciamento dos veículos espaciais e dos satélites, atualizando periodicamente as informações que são transmitidas de cada um como efemérides, status, dados de relógio e almanaque.

Esse segmento consiste de uma Estação Mestre de Controle (MCS), localizada na base de Schriever Air Force (antiga Falcon Air Force), Colorado, Estados Unidos. Juntamente com essa, existem mais cinco estações de monitoramento, localizadas no Colorado Springs, Havaí, Kwajalein, Diego Garcia e Ascension Island, mostradas na figura 1.4.



FIGURA 1.4. Localização das estações de controle e monitoramento.

iii. Segmento Usuários

O segmento usuário consiste de receptores militares e civis projetados especialmente para decodificar e processar os sinais que recebem do satélite. Os receptores computadorizados gravam as transmissões de vários satélites e aplica algoritmos de solução para a obtenção de posição, velocidade e tempo (figura 1.5).

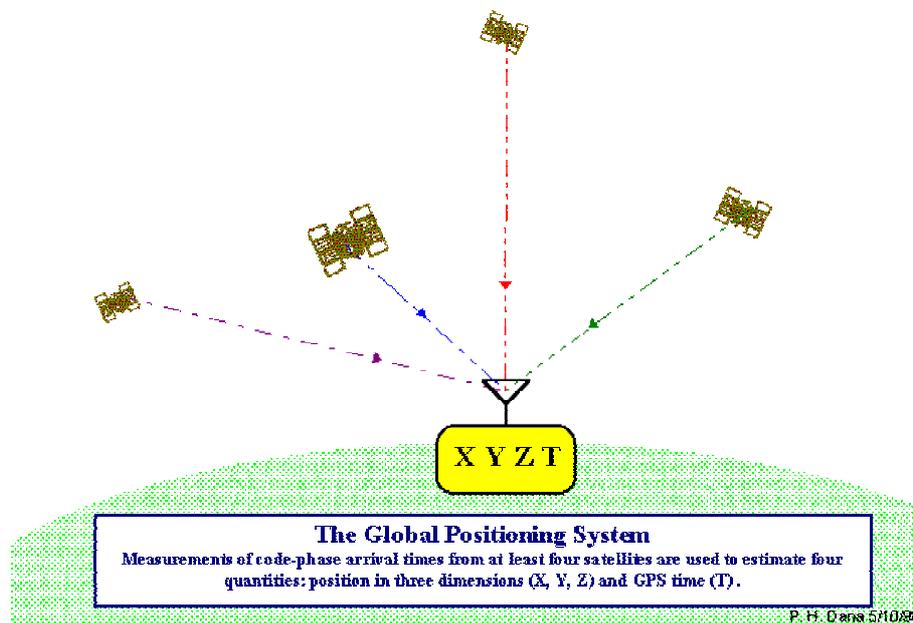


FIGURA 1.5. Posicionamento por GPS

Os receptores GPS convertem os sinais recebidos em estimativas de posição, velocidade e desvio do relógio, também chamada de solução de navegação. São exigidos, no mínimo, quatro satélites para calcular a as quatro dimensões de posição e tempo.

Determinação de posição e tempo

Um receptor GPS mede a diferença de tempo entre a transmissão do sinal pelo satélite e a recepção. Como a posição do satélite é conhecida através da mensagem de navegação, o receptor deve então estar localizado em uma esfera de raio igual a distância medida centrada no satélite.

Medindo a distância com relação a três satélites, a localização do receptor se reduz a dois pontos definidos pela interseção das esferas referentes a cada satélite. O ponto que coincide com a superfície da Terra é a posição do receptor e o outro é chamado de ponto espelho (figura 1.6).

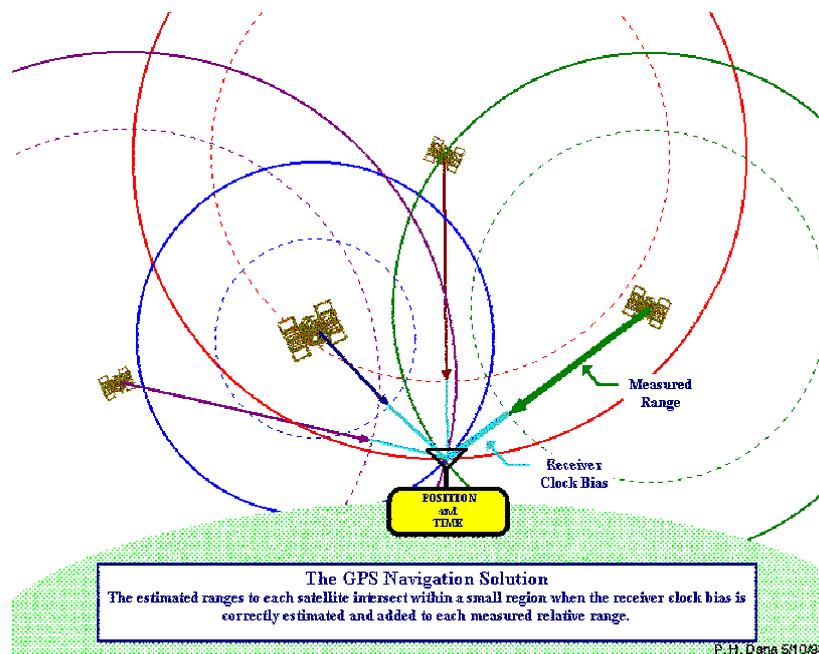


FIGURA 1.6. Determinação de posição e tempo

Como a distância é medida a partir de diferenças de tempo, a determinação precisa deste é um fator crítico. Assim, o sincronismo de todos os elementos do sistema é fundamental. Inicialmente, o relógio do receptor não está sincronizado com o tempo GPS, mas logo, sua sincronização deve ser tomada como parte da solução de navegação.

Observáveis

O sinal do GPS é composto de um código de baixa frequência (código C/A, código P) modulado em uma onda portadora de alta frequência (L1 e L2). Os dois principais tipos de observáveis do GPS são pseudodistância e fase da portadora

i. Pseudodistância

Conforme exposto anteriormente, a pseudodistância, é uma medida da distância entre o satélite, no instante de envio do sinal e a antena do receptor no instante da recepção. Ela é obtida através da medida do tempo deste percurso.

Para identificação do satélite, é emitido um código PRN. O tempo de percurso utiliza-se da correlação entre este código PRN recebido do satélite e uma réplica do código gerado internamente pelo receptor. A diferença de tempo que sincroniza a réplica com o código recebido é a medida do tempo de percurso do sinal entre o satélite e o receptor.

Os desvios ocasionados pela falta de sincronismo dos relógios do satélite, do receptor e do tempo GPS fazem a distância medida ser diferente da distância geométrica.

Assim, o modelo matemático (Leick, 1995; Parkinson, 1996b) para ρ_u^i pseudodistância entre o satélite i e o receptor u tem a forma:

$$\rho_u^i = D_u^i + c(b_u - B^i) + T_u^i + I_u^i + \varepsilon_{\rho,u}^i \quad (1.1)$$

onde $D_u^i = |\mathbf{R}^i - \mathbf{r}_u|$ é a distância geométrica, \mathbf{R}^i é a posição do satélite, \mathbf{r}_u é a posição da antena do receptor, b_u é o desvio do relógio do receptor u , B^i é o desvio do relógio do satélite i , T_u^i é o erro troposférico, I_u^i é o erro ionosférico, $\varepsilon_{\rho,u}^i$ representa os outros erros e c é a velocidade da luz, 299.792.458 m/s. Esta medida é também chamada de pseudodistância via código.

ii. Fase da Portadora

A medida da fase é a distância entre a fase da onda portadora recebida do satélite e a fase gerada internamente no receptor. Esta medida não leva em conta o número do comprimento de onda entre o receptor e o satélite.

A fase da portadora φ_u^i é escrita da seguinte maneira: (Leick, 1995; Parkinson, 1996b)

$$\varphi_u^i = \frac{1}{\lambda} [D_u^i + c(b_u - B^i) + T_u^i - I_u^i] + N_u^i + \varepsilon_{\varphi,u}^i \quad (1.2)$$

onde λ é o comprimento de onda da portadora e N_u^i denota a ambigüidade no número de comprimentos de onda. O termo I_u^i troca de sinal em relação a pseudodistância via código e $\varepsilon_{\varphi,u}^i$ representa um erro aleatório na media e é menor que o erro da pseudodistância via código.

Fontes de Erros

i. Erros dos relógios dos satélites

A geração do tempo GPS é feita realizada pelo segmento de controle através de redes de relógios atômicos em suas bases de rastreamento. Cada satélite GPS carrega a bordo dois relógios atômicos, de césio e de rubídio, que eventualmente apresentam desvios em relação ao tempo GPS e necessitam de correção. Para o relógio do receptor, a correção é parte integrante da solução de navegação.

ii. Erro devido à troposfera

O erro troposférico é causado pelo atraso no percurso do sinal devido a refração do sinal na troposfera. A maior parte desse erro é causada pelo chamado componente seco da atmosfera (gases como O₂, N₂ etc). A outra, chamada componente úmido, é causada pelo vapor de água presente na atmosfera.

O componente seco do erro é função da pressão na superfície e da temperatura. É estável e previsível, com precisão de 2% a 5%. Este componente representa cerca de 90% do total da refração.

O erro causado pelo vapor de água é, apesar de menor, muito mais instável, pois varia em função do deslocamento do receptor ou da umidade relativa.

Nas frequências de operação do GPS ($L_1 = 1575.42$ MHz e $L_2 = 1227.6$ MHz), a troposfera é não dispersiva, ou seja, o desvio não depende da frequência, podendo assim ser eliminado medindo-se duas frequências (Spilker Jr., 1996).

Este erro não é compensado por nenhum parâmetro transmitido na mensagem de navegação.

iii. Erro devido à ionosfera

A ionosfera é uma região de gases ionizados na atmosfera que afetam o sinal GPS. É uma região produzida pela radiação ionizante do sol, e possui características altamente variáveis. Dessa maneira, o erro ionosférico pode variar rapidamente, representando de alguns metros até dezenas de metros no zênite durante curtos intervalos de tempo.

A ionosfera é também um meio dispersivo, tal que o índice de refração depende da frequência da onda portadora. Desta maneira, pode-se utilizar medidas em ambas as frequências L_1 e L_2 para medir e corrigir os efeitos gerados pela propagação de sinal (Klobuchar, 1996).

Diferentemente do erro troposférico, a mensagem de navegação contém um modelo de correção ionosférico para usuários de frequência única, mas sua eficiência é bastante reduzida em condições anormais, como em picos de atividade solar (Yuan e Ou, 2001).

Os principais efeitos causados pela ionosfera no sinal GPS são atraso de grupo, avanço de fase e cintilação da amplitude (Christie *et al.*, 1998)

iv. Multicaminho

É o fenômeno no qual um sinal chega à antena do receptor através de vários caminhos atribuídos a reflexão e difração. Esse efeito acarreta na distorção das modulações dos códigos C/A e P e observações de fase.

Os sinais provenientes do multicaminho estão sempre atrasados comparados com o sinal direto, devido à maior distância percorrida causada pela reflexão. O impacto nas medidas de pseudodistância ou na fase da portadora depende de uma série de fatores, como atraso e amplitude do sinal refletido, comparado com o sinal direto, características de atenuação da antena e sofisticação do receptor (Braasch, 1996).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção aborda os materiais e os métodos utilizados para determinação do erro no posicionamento por GPS.

Materiais

i. Receptor GPS – Descrição e uso)

Para a realização deste trabalho utilizou-se um receptor GPS Ashtech Z-12, que possui doze canais de recepção, e duas frequências de recepção. Possui capacidade de uso contínuo, mesmo na presença de sinais *anti-spoofing*.

O receptor Ashtech Z-12 (figura 2.1) foi utilizado juntamente com uma antena GPS de precisão geodética e um tripé, com altura de solo regulável.



FIGURA 2.1. Receptor Ashtech Z-12

ii. Outros acessórios

Neste trabalho foram utilizados também um microcomputador Pentium III 1,2 GHz, com 512MB de memória RAM e 20 GB de Disco Rígido, sendo as demais configurações irrelevantes. Utilizou-se também barbante de algodão, metro de precisão, cabos e bateria.

Métodos

i. Campanha

A campanha consiste no preparo e na realização do trabalho de coleta de dados em campo.

Para isso, foi realizada uma análise dos equipamentos necessários e treinamento prévio para uso desses equipamentos. Em seguida, definiu-se o local de coletas de dados e realizou-se a coleta.

O planejamento da campanha é de extrema importância, pois evita o re-trabalho e garante a coleta de dados de boa qualidade.

ii. Transferência dos dados do receptor para o computador

A transferência dos dados coletados pelo receptor Ashtech, ou seja, o *download* desses dados, foi realizada através do software RCS (*Receiver Communication Software* – www.ashtech.com) da própria Ashtech, conforme descrito e ilustrado adiante (figura 2.2).

Fisicamente conecta-se um cabo serial da saída do receptor GPS com uma porta serial do computador.

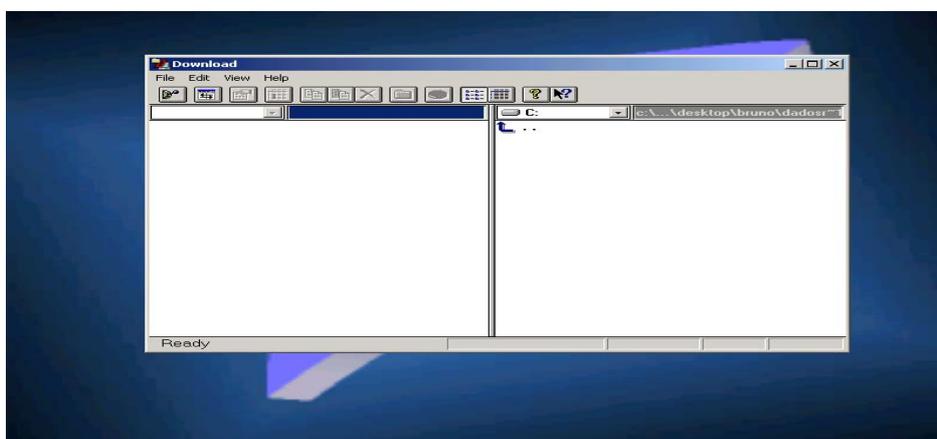


FIGURA 2.2. Tela Principal

Após iniciar o programa de *download*, clica-se *Connect to receiver*, que abrirá a seguinte caixa de diálogo (figura 2.3):

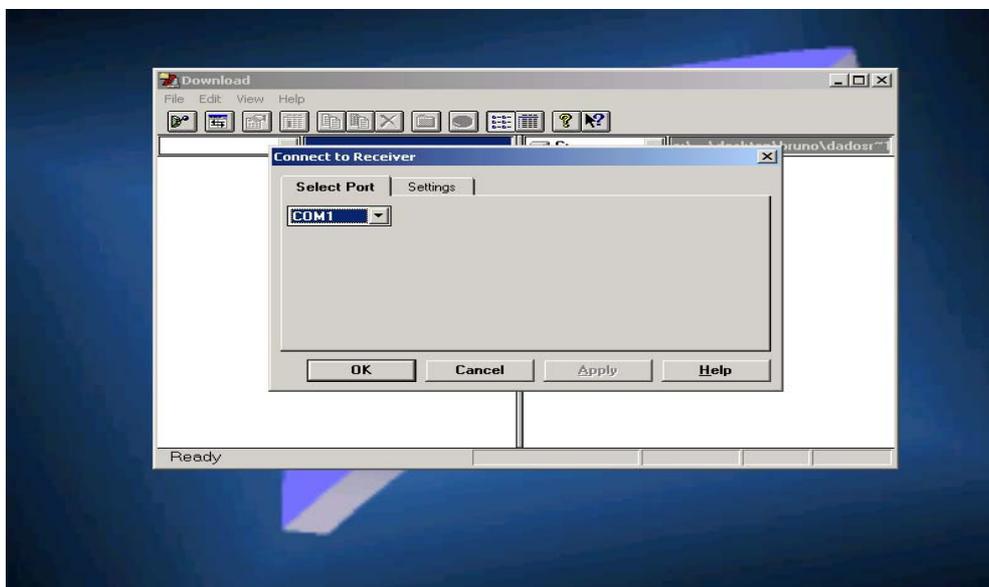


FIGURA 2.3. Tela de configuração da porta de comunicação

Nesta janela, faz-se a escolha da porta serial COM de conexão no computador que será utilizada para receber os dados do receptor.

Ao clicar em Ok, o receptor mostrará na tela do computador os arquivos disponíveis para serem transferidos, conforme figura 2.4.

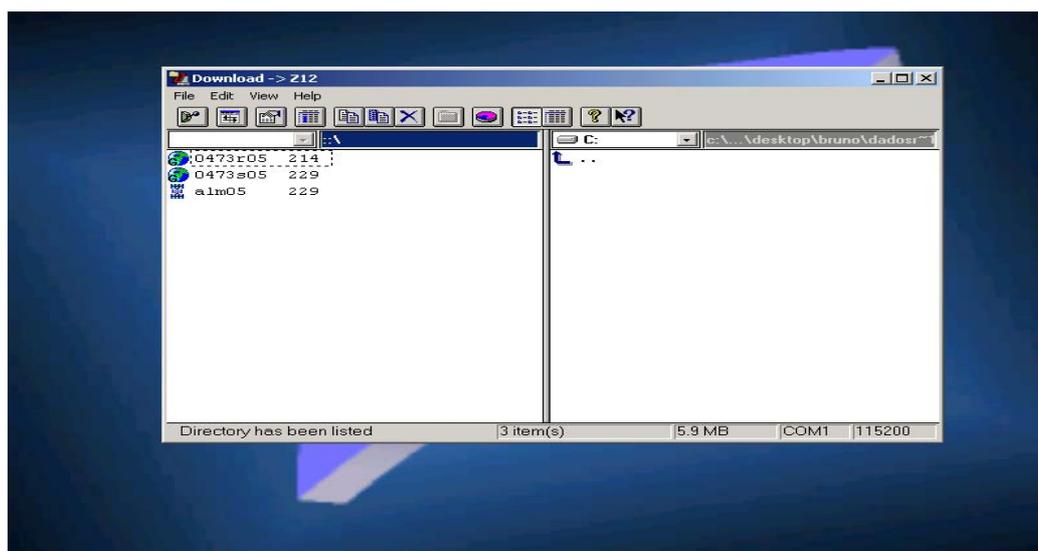


FIGURA 2.4. Tela principal com arquivos do receptor

Logo após, basta selecionar os arquivos desejados e clicar no comando *Copiar para...* e a transferência se inicia, conforme figura 2.5.

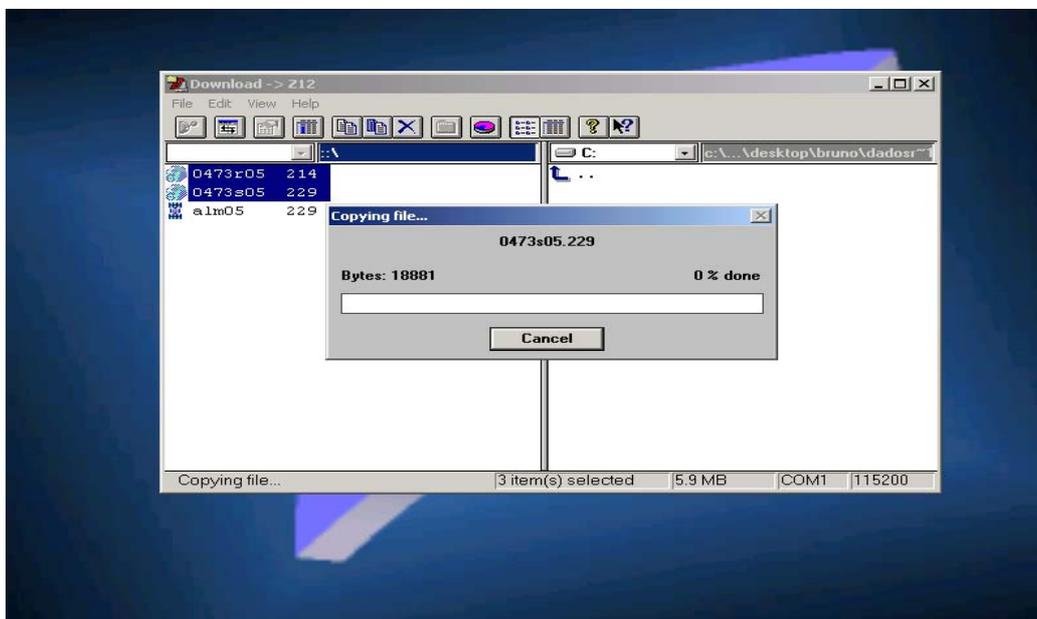


FIGURA 2.5. Transferência de arquivos

Após concluir a transferência dos arquivos, obtêm-se a tela da figura 2.6. Basta fechar e processar os dados conforme a utilização desses dados.

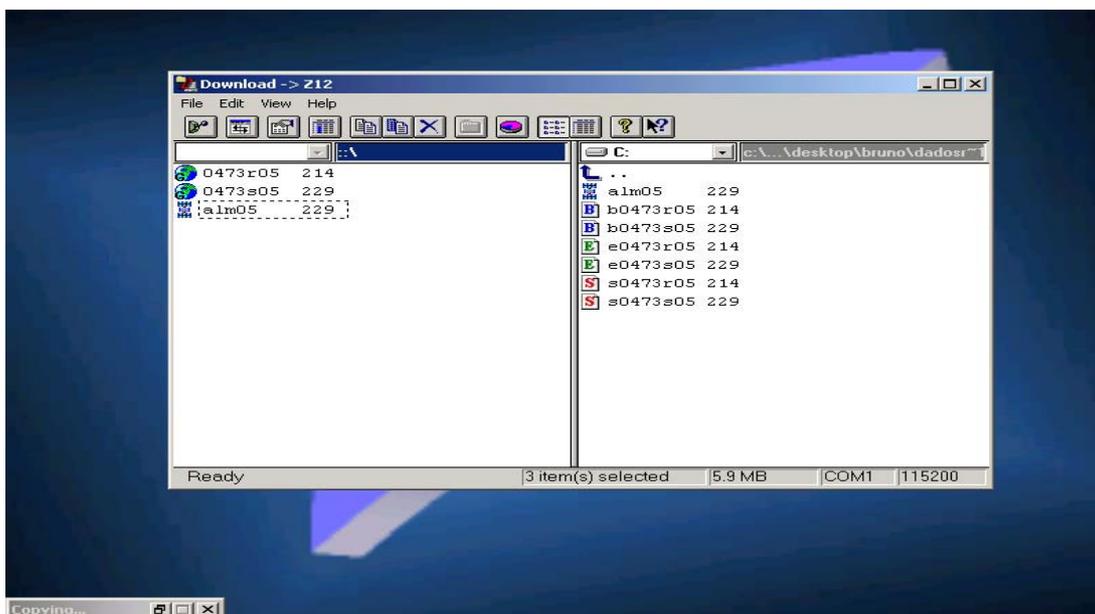


FIGURA 2.6. Tela após transferência dos arquivos

iii. O Software TEQC

O software TEQC é um programa computacional, desenvolvido pela UNVACO Facilities (<http://www.unavco.org>), que realiza o pré-processamento dos dados de vários receptores GPS, inclusive do receptor AshTech Z-12.

O pré-processamento realizado pelo TEQC consiste na conversão dos arquivos binários do receptor, que neste caso são arquivos dos tipos Ashtech B-files, Ashtech E-files, Ashtech S-files, para arquivos formato RINEX2, que é o padrão para intercâmbio dos dados.

Além de conversão de formatos, pode realizar também testes de qualidade dos dados, garantindo assim a geração confiável de arquivos RINEX.

O software TEQC não trabalha com arquivos do tipo lista (.LST), nem tão pouco com arquivos no formato SP3.

Para exemplificar a conversão formato de arquivo e teste de qualidade destes dados, segue a linha de comando redigida:

```
C:\>teqc -ash d +qc Bfile.B00 > Bfile.tmp
```

Os comandos, opções e argumentos podem ser obtidos digitando o parâmetro -h após TEQC.

O site da UNAVCO disponibiliza também tutoriais, página de perguntas freqüentes e outras informações relativas ao uso do TEQC e outros softwares para processamento de dados GPS.

iv. O Software Ashtech Filetool

O Ashtech Filetool é um software cuja função é converter arquivos Ashtech tipo B para arquivos de dados LST.

Para isso, na linha de comando abre-se o programa filetool, que apresentará a tela conforme figura 2.7:

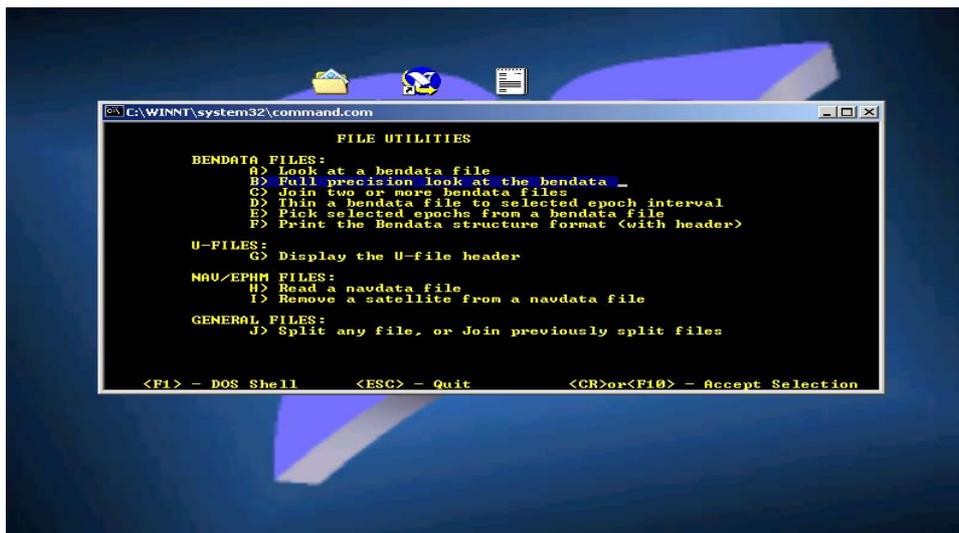


FIGURA 2.7. Ashtech FileTool

Nesta tela, o programa permite que se escolha as opções de conversão de arquivos. Optou-se pela conversão com precisão máxima, para validar os dados obtidos pelo receptor.

Foi utilizada a opção de saída dos dados no formato lista (.LST) e não na tela, configurável pelo programa.

v. O Software Read_LST

Este programa de computador foi criado e desenvolvido no INPE pelo professor doutor Helio Koiti Kuga. A sua função é preparar os dados de arquivos lista (.LST), obtidos através do Ashtech FILETOOL, para serem transferidos para um software que possibilite realização de análises dos dados.

O software escolhido para análise dos dados foi o Microsoft Excel®. O programa Read_LST foi desenvolvido em linguagem FORTRAN.

3. RESULTADOS

Condições do Teste

A coleta de dados foi realizada nas dependências do INPE, onde foi descrita uma trajetória retilínea, tendo como base o marco 91536 do IBGE, e composta por mais três pontos sobre essa trajetória, distantes 15m, 30m e 45m, respectivamente, da base. Para a medição da distância, foi utilizado barbante de algodão, aferido com metro de precisão de centímetros (figura 3.1).

O ponto 01, Base, localiza-se no INPE atrás do prédio da Meteorologia e foi utilizado como referência para o início da trajetória. Já o Ponto 4 foi a caixa de passagem de energia localizado entre os prédios da DMC (Divisão de Mecânica Espacial e Controle) e o prédio da Meteorologia.

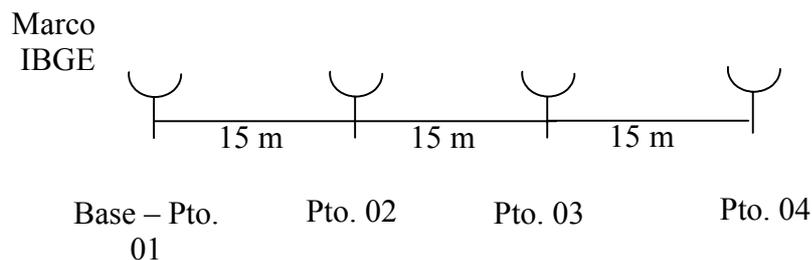


FIGURA 3.1. Demonstração da trajetória

A antena do receptor GPS foi elevada por meio de tripé, mantendo uma altura igual a do marco do IBGE em relação ao piso local, que é de 2,06m, praticamente livre de obstruções, e configurada para uma máscara de 5° de elevação.

Os dados foram coletados com uma frequência de 1 Hz, por um período de 30 minutos, totalizando cerca de 1800 medições, em cada ponto.

A antena e o receptor, ligados, foram deslocados sobre a trajetória, de forma a manter o rastreamento da constelação de satélites, sem grandes alterações.

Logo após deslocado os equipamentos, estes ficavam fixos na posição durante os 30 minutos de leitura de dados, mais tempo para estabilização, que foi considerado de aproximadamente 5 minutos.

Os dados coletados pelo receptor GPS antes do pré-processamento possuíam cerca de 7 *megabytes* de tamanho. Após o pré-processamento, para cada ponto considerado foi gerado um arquivo, com tamanho de aproximadamente 3,8 *megabytes*.

Análise da geometria

Um dos fatores primordiais para análise de geometria de observação da campanha é o PDOP (*Dilution of Precision for Position*).

O PDOP ou diluição da precisão para posicionamento é um fator freqüentemente utilizado em navegação e no planejamento de observações GPS. São obtidos a partir do conceito de posicionamento por ponto. O PDOP auxilia na indicação da precisão dos resultados que serão obtidos. Para os valores de PDOP, quanto menor esses valores, melhor será a precisão dos valores de posicionamento do sistema GPS.

Outro fator importante para ser considerado é o SVS, ou seja, o número de satélites rastreados pelo receptor GPS em um dado instante da coleta de informações de posicionamento.

Analisando os gráficos (figuras 3.2 a 3.5), construídos a partir dos PDOPs de cada ponto, pode-se perceber que quando há saltos nas curvas, podemos correlacioná-los com alterações da constelação.

Por exemplo, no gráfico 01, no instante 512 segundos, nota-se que o número de satélites aumentou de 7 para 8 e o PDOP diminuiu de 3 para 2.

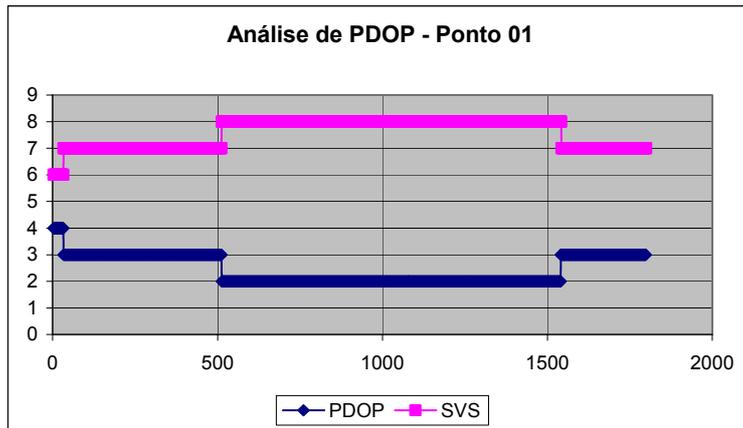


FIGURA 3.2. PDOPs e satélites (SVS) no ponto 01.

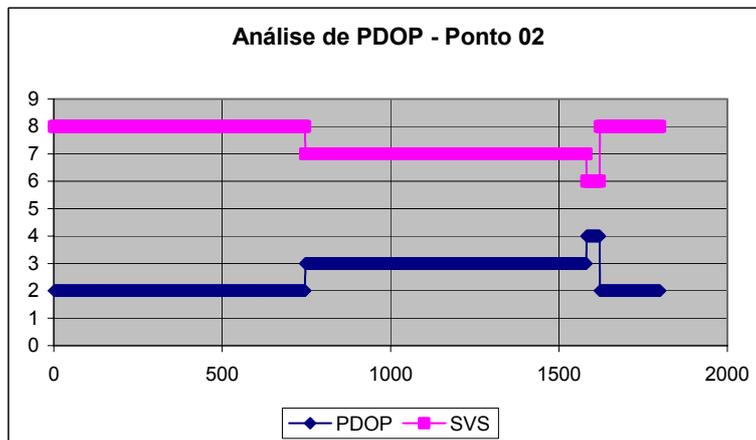


FIGURA 3.3. PDOPs e satélites (SVS) no ponto 02.

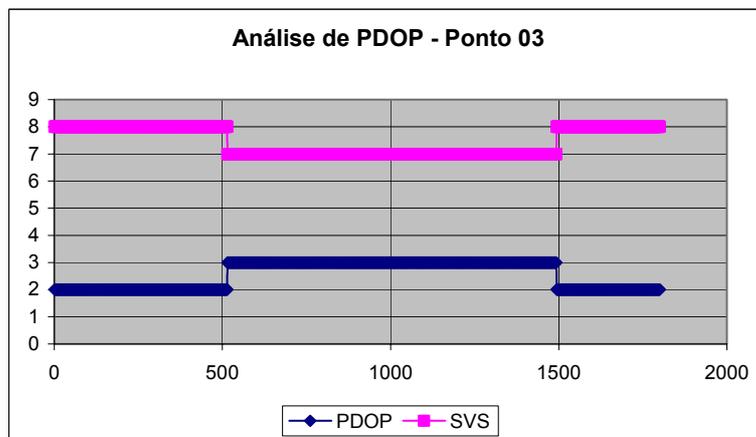


FIGURA 3.4. PDOPs e satélites (SVS) no ponto 03.

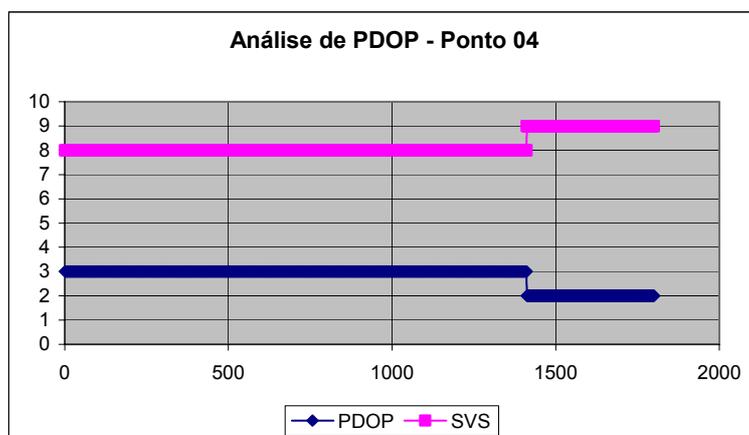


FIGURA 3.5. PDOPs e satélites (SVS) no ponto 04.

Esses saltos e alterações no PDOP ocorrem devido à entrada ou saída de um ou mais satélites na constelação ou a própria variação das posições da constelação, ocasionando aumento ou diminuição da precisão, conforme poderá ser observado nas análises posteriores.

Análise da Precisão em Coordenadas Retangulares

As tabelas 3.1 a 3.4 mostram as coordenadas retangulares médias, seus respectivos desvios padrões e as coordenadas geodésicas médias, de acordo com o PDOP correspondente.

Todas as coordenadas estão no sistema WGS84 adotado pelo sistema GPS.

Na análise global de cada tabela (terceira linha), os dados das coordenadas foram avaliados independentemente do valor de PDOP apresentado no instante da medição.

TABELA 3.1. Coordenadas Médias do ponto 01

	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	PDOP
Ponto 01 - Base				
Global				
Média	4084773,757	-4209377,129	-2498484,335	2,443826474
Desvio Padrão	0,917279858	2,164621697	0,672208463	0,529500596
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,4341"	-45°51'38,4916"	634,9389 m	
PDOP = 2				
Média	4084774,06	-4209378,785	-2498484,792	2
Desvio Padrão	0,579869628	0,6172134	0,337198197	0
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,4300"	-45°51'38,5247"	636,4086 m	
PDOP = 3				
Média	4084773,203	-4209374,752	-2498483,688	3
Desvio Padrão	0,846414739	1,11362598	0,556203452	0
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,4416"	-45°51'38,4474"	632,7562 m	
PDOP = 4				
Média	4084776,978	-4209378,746	-2498484,522	4
Desvio Padrão	0,779588751	1,129540645	0,264656576	0
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,3964"	-45°51'38,4500"	638,1465 m	

Para o ponto 01 (tabela 3.1), pode-se analisar as coordenadas médias, com um PDOP igual a 2 (linha 10, tab. 3.1), em que a coordenada X média é 4084774,06 metros, com desvio padrão de aproximadamente 0,5798, coordenada Y média é -4209378,785 metros, com desvio padrão de aproximadamente 0,6172 e por fim, coordenada Z média é -2498484,792, com desvio padrão de aproximadamente 0,3371.

TABELA 3.2. Coordenadas Médias do ponto 02

	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	PDOP
Ponto 02				
Global				
Média	4084785,579	-4209367,389	-2498485,968	2,508333333
Desvio Padrão	1,234126562	1,278374454	1,576650075	0,542714135
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,4673"	-45°51'37,9548"	636,7283 m	
PDOP = 2				
Média	4084786,428	-4209367,995	-2498487,084	2
Desvio Padrão	0,83484711	0,998917163	1,364357674	0
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,4874"	-45°51'37,9480"	638,1069 m	
PDOP = 3				
Média	4084784,828	-4209366,963	-2498484,907	3
Desvio Padrão	0,540893656	0,8016769	0,359856086	0
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,4462"	-45°51'37,9632"	635,5456 m	
PDOP = 4				
Média	4084781,6	-4209362,264	-2498482,283	4
Desvio Padrão	0,204124145	0,259437261	0,113227703	0
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,4391"	-45°51'37,9296"	629,3354 m	

TABELA 3.3. Coordenadas Médias do ponto 03

	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	PDOP
Ponto 03				
Global				
Média	4084795,616	-4209353,747	-2498489,562	2,5438889
Desvio Padrão	2,843324003	2,485757093	1,376770678	0,4982085
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,6103"	-45°51'37,3673"	635,5716 m	
PDOP = 2				
Média	4084798,106	-4209355,8	-2498490,368	2
Desvio Padrão	2,360239756	2,310632898	1,518985541	0
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,5937"	-45°51'37,3547"	638,8400 m	
PDOP = 3				
Média	4084793,528	-4209352,024	-2498488,887	3
Desvio Padrão	0,60839391	0,440765276	0,734763432	0
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,6246"	-45°51'37,3777"	632,8260 m	

TABELA 3.4. Coordenadas Médias do ponto 04

	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z	PDOP
Ponto 04				
Global				
Média	4084804,53	-4209340,482	-2498490,995	2,7838889
Desvio Padrão	0,66518271	0,503462166	0,609358186	0,4117053
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,6953"	-45°51'36,8175"	633,0831 m	
PDOP = 2				
Média	4084805,587	-4209341,017	-2498491,914	2
Desvio Padrão	0,369591583	0,546780644	0,199871092	0
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,7085"	-45°51'36,8040"	634,4817 m	
PDOP = 3				
Média	4084804,239	-4209340,335	-2498490,741	3
Desvio Padrão	0,519137309	0,40563408	0,421075961	0
Coordenadas Geodésicas	Latitude	Longitude	Altitude	
	-23°12'40,6918"	-45°51'36,8212"	632,6996 m	

Nas tabelas 3.1 a 3.4 podemos observar que os desvios padrões ficam abaixo dos desvios normalmente encontrados para este tipo de posicionamento. Pode-se notar também que quanto menor o PDOP, em geral, melhor é a precisão das medidas das coordenada, confirmando o que já havia sido dito anteriormente. Pode-se concluir que, de forma geral, quanto menor o PDOP, menor será o desvio padrão.

Finalmente, através da tabela 3.5, podemos analisar as distâncias dos pontos 2, 3 e 4 em relação à Base.

TABELA 3.5. Cálculos da Distâncias

Cáculo das Distâncias (em relação ao Ponto 01 – Base)						
	Ponto 02		Ponto 03		Ponto 04	
	Calculado	Esperado	Calculado	Esperado	Calculado	Esperado
GLOBAL						
Média	15,40	15,00	32,43	30,00	48,32	45,00
PDOP 2						
Média	16,57	15,00	33,73	30,00	49,71	45,00
PDOP 3						
Média	14,05	15,00	30,93	30,00	46,88	45,00
PDOP 4						
Média	17,26	15,00	-		-	
*Valores em metros						

Em relação ao ponto 02, nota-se uma diferença mínima de 0,40 metros e a máxima de 2,26 metros.

Em relação ao ponto 03, nota-se uma diferença mínima de 0,93 metros e a máxima de 3,73 metros.

Em relação ao ponto 04, nota-se uma diferença mínima de 1,88 metros e a máxima de 4,71 metros.

Entretanto, nota-se que nem sempre o menor PDOP resulta na melhor precisão em distância. Por exemplo, no ponto 02 a melhor precisão de distância ocorre na média global. No ponto 03 e no ponto 04, a melhor precisão de distância ocorre com PDOP 3.

Entretanto surpreendentemente, a pior precisão foi de 4,71 metros, que é bastante satisfatória, levando-se em conta que a precisão de posição absoluta por GPS, esperada, é de cerca de 10 a 30 metros.

Análise da precisão bidimensional

Tendo em vista os dados do IBGE para as coordenadas geodésicas do marco 91536, podemos compará-las com as coordenadas geodésicas calculadas através das medidas das coordenadas retangulares médias, conforme tabela 3.6:

TABELA 3.6. Coordenadas geodésicas do Marco e da Base

	Latitude	Longitude	Altitude
Marco 91536	23° 12'40,34424 S	45° 51'38,53696 W	621,6331 m
Base – Ponto 01	23° 12'40,4341 S	45° 51'38,4916 W	634,9385 m

A diferença em arco entre as soluções dos pontos em relação a alguma referência pode ser calculada por:

$$\cos \theta = \hat{r}_i \cdot \hat{r}_{ref} \quad (3.1)$$

em que \cdot (ponto) representa o produto escalar, \hat{r}_i representa o vetor versor do ponto i , \hat{r}_{ref} representa o vetor versor do ponto de referência e θ representa o arco deslocado em radianos.

A diferença de posicionamento, em metros, pode então ser aproximada por:

$$\Delta r = R \theta \quad (3.2)$$

em que Δr representa a diferença de posicionamento, em metros, R representa a média aproximada do raio da Terra, e θ representa o arco deslocado em radianos.

O valor de R foi calculado como sendo a média dos raios da Terra em cada ponto, e Δr_M representa a diferença de posicionamento considerando o Marco como referência e Δr_B representa a diferença de posicionamento considerando a Base como referência.

Pela análise da tabela 3.7, temos o erro Δr entre o Marco e a Base que foi de cerca de 3 metros (vide penúltima e última linhas).

Na medida entre as distâncias dos pontos à Base encontram-se as melhores precisões, pois a coleta de dados foi realizada em condições semelhantes (vide tabelas 3.1 a 3.4).

TABELA 3.7. Comparação de distâncias dos pontos em relação à Base e ao Marco

Análise Bidimensional					
	Marco	Base	Ponto 02	Ponto 03	Ponto 04
Latitude	-23°12'40,344245"	-23°12'40,4341"	-23°12'40,4673"	-23°12'40,6103"	-23°12'40,6953"
Longitude	-45°51'38,53696"	-45°51'38,4916"	-45°51'37,9548"	-45°51'37,3673"	-45°51'36,8175"
Altitude	621,6331 m	634,9389 m	636,7283 m	635,5716 m	633,0831 m
X	4084765,076	4084773,757	4084785,579	4084795,616	4084804,53
Y	-4209370,034	-4209377,129	-4209367,389	-4209353,747	-4209340,482
Z	-2498476,582	-2498484,335	-2498485,968	-2498489,562	-2498490,995
Em relação ao Marco					
Δr_M		3,05	16,98	34,25	50,07
Em relação à Base					
Δr_B	3,05		15,30	32,43	48,28

Pode-se concluir que os erros horizontais estão menores do que os erros normalmente encontrados, tendo em vista que o maior erro aqui encontrado é de cerca de 5 metros, que comparado com os erros comuns, citados anteriormente, eram de cerca de 10 a 30 metros.

Análise da Altitude

Pode-se observar a partir da tabela 3.8, que a medida de altitude é relativamente menos precisa, conforme citado nas referências (Axelrad e Brown, 1996).

TABELA 3.8. Análise da altitude.

Análise da Altitude					
	Marco	Base	Ponto 02	Ponto 03	Ponto 04
GLOBAL	621,6331 m	634,9389 m	636,7283 m	635,5716 m	633,0831 m
PDOP 2	-	636,4086 m	638,1069 m	638,8400 m	634,4817 m
PDOP 3	-	632,7562 m	635,5456 m	632,8260 m	632,6996 m
PDOP 4	-	638,1465 m	629,3354 m	-	-

Nota-se que o erro foi de até 17 metros em relação à altitude do Marco.

4. COMENTÁRIOS

Pode-se concluir que os objetivos deste trabalho foram atingidos, visto que a análise de erros nas medições de distância com o uso de um receptor GPS mostra que os erros encontrados foram menores do que os erros esperados (10 a 30m), normalmente considerados em literatura.

Em outras palavras, o uso de um único receptor GPS para medição de distâncias é perfeitamente executável pois conseguiu discerni-las claramente, embora a literatura cite que a ocorrência de erros de 10 a 30 metros são normais no posicionamento absoluto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARANTE, R. R.; Geo Project Software, versão 1.06 (beta). . , n. , p. , jun. 2005 Disponível em: <www.exetecnet.com.br/projectgeo_br.htm>. Acesso em Agosto 2005.
- AXELRAD, P.; BROWN, R. G. GPS navigation algorithms. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER JR, J. J. **Global Position System: Theory and Applications**. Washington: AIAA, 1996. v. 1, Cap. , p. 409-433.
- BARONI, L.; **Análise de algoritmos de navegação para um sistema GPS**. São José dos Campos. 22-41p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Mecânica Espacial e Controle) - INPE, 2004.
- BRAASCH, M. S. Multipath effects. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER JR., J. J. (Ed.). **Global Position System: theory and applications**. Washington: AIAA, 1996. v.1. 547-568p.
- CHRISTIE, J. R. I. et al.; Analytical and experimental observations of ionospheric and tropospheric decorrelation effects for differential satellite navigation during precision approach. In: **PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION ION GPS-98**, Nashville , 1998.
- DANA, P. H.; Global Positioning System. . , n. , p. , may. 2000 Disponível em: <www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html>. Acesso em Agosto 2005.
- ESTEY, L.; TEQC: The Toolkit for GPS/GLONASS/SBAS Data. . , n. , p. , fev. 2005 Disponível em: <www.unavco.org/facility/software/teqc/teqc.html>. Acesso em Agosto 2005.
- GOMES, V. M.; **Determinação de órbita de satélites artificiais em tempo real através da solução de navegação do GPS**. São José dos Campos. 20-35p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) - INPE, 2004.
- KAPLAN, E.D. (Ed.) **Understanding GPS: principles and applications**. Norwood, MA: Artech House, 1996. , p. 554.
- KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER JR., J. J. (Ed.). **Global Positioning System: Theory and Applications**. Washington: AIAA, 1996. v. 1, Cap. , p. 485-515.
- KUGA, H. K.; KONDAPALLI, R. R.; **Introdução à mecânica orbital**. São José dos Campos: INPE-5615-PUD/065, 1995.
- LEICK, A.; **GPS Satellite Surveying**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, INC, 1995. 560 p.
- MONICO, J. F. G. ; **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**. São Paulo: UNESP, 2000.

MORAES, R. V.; FITZGIBBON, K. T.; WALTER, F. Sistema GPS. , Disponível em: <www.gpsglobal.com.br/Artigos/ITA12a.html>. Acesso em Agosto 2005.

PARKINSON, B. W.; SPILKER JR, J. J. **Global Position System: theory and applications**. Washington: AIAA, 1996. p.

SPILKER JR, J. J; PARKINSON, B. W. Tropospheric effects on GPS.
In: PARKINSON, B. W.; SPILKER JR., J. J. (Ed.). **Global Position System: theory and applications**. Washington: AIAA, 1996. v.1. 517-546p.

YUAN, Y.; OU, J. An improvement to ionospheric delay correction for single frequency users - the APR-I scheme. **Journal of Geodesy**, v. 75, n. , p. 331-336, 2001.