

RELATÓRIO FINAL DE PESQUISA CNPq

Instituição: INPE – São José dos Campos

Análise da Mensagem de Navegação Transmitida e da Geometria dos Satélites GPS

Bolsista: Vivian Martins Gomes

Orientadores: M.Sc. Ana Paula Marins Chiaradia
Prof. Dr. Antônio Fernando Bertachini de Almeida Prado

Período: Agosto/99 – junho/00

Bolsa de Iniciação Científica suportada pelo Conselho Nacional de
Pesquisa e Desenvolvimento – CNPq, desenvolvida junto ao
Departamento de Engenharia e Tecnologia Espaciais - DMC

RESUMO

Entre as fontes de erros que podem afetar a precisão da órbita estimada a bordo de um veículo espacial utilizando um receptor GPS, podemos citar as efemérides transmitidas dos satélites GPS e a geometria dos satélites GPS. Portanto, este trabalho tem como objetivo verificar a contribuição do erro causada pelas efemérides transmitidas pela mensagem de navegação e analisar a geometria dos satélites GPS usada na determinação de órbita de satélites artificiais utilizando um receptor GPS a bordo.

Para calcular as efemérides dos satélites GPS, foi utilizado um programa, desenvolvido em linguagem Fortran, pelo Dr. Hélio Koiti Kuga do Departamento de Mecânica e Controle do INPE. Este programa calcula a posição dos satélites GPS, no sistema WGS84, utilizando a mensagem de navegação que é transmitida para o receptor GPS. A posição gerada pelo programa é comparada com as efemérides precisas (*Precise Orbit Ephemeris*) geradas pelo JPL/NASA cuja precisão está em torno de 3 cm. Verificou-se que o programa fornece boa precisão no cálculo da posição do GPS podendo ser utilizado na determinação de órbita de satélites artificiais com receptor GPS a bordo.

Para analisar a melhor geometria dos satélites GPS também foi utilizado um programa desenvolvido em linguagem Fortran, que faz uma combinação dentre os satélites visíveis e gera o conjunto de quatro satélites com o melhor valor de GDOP que forneceriam a melhor precisão de órbita.

SUMÁRIO

Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Segmento Espacial.....	1
1.2 Segmento de Controle.....	2
1.3 Segmento Usuário.....	2
1.4 Sinais dos Satélites GPS.....	3
Capítulo 2 Mensagem de Navegação.....	5
2.1 Algoritmo das Efemérides.....	8
2.2 Formato Rinex.....	11
2.3 Formato SP3.....	13
Capítulo 3 Análise da Mensagem de navegação Transmitida.....	14
3.1 Resultados.....	14
Capítulo 4 Geometria dos Satélites.....	22
4.1 Definição de Pseudo-Distância.....	22
4.2 Definição do DOP.....	25
4.3 Relação da Pseudo-Distância com DOP.....	25
4.4 Diluição Geométrica da Precisão.....	26
4.4.1 Derivação da Equação de Precisão da Diminuição Geométrica.....	27
4.5 Influência do Conceito de GDOP.....	27
4.6 Exemplos de Cálculos.....	28
Capítulo 5 Análise da Geometria dos Satélites.....	31
5.1 Resultados.....	31
Capítulo 6 Conclusão.....	44
Referências.....	46

Bibliografia Consultada.....	47
Apêndice A.....	48
Apêndice B.....	50

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O sistema GPS (*Global Positioning System*) é um sistema de navegação por satélites desenvolvido pela Força Aérea dos Estados Unidos durante as décadas de 70 e 80 e colocado em operação na década de 90.

O princípio básico de funcionamento do GPS é determinar a posição e a velocidade tridimensionais e o tempo com alta precisão. O sistema GPS permite ao receptor determinar sua posição e tempo em qualquer lugar e a qualquer hora utilizando dados de apenas quatro satélites. O sistema pode ter um número ilimitado de usuários simultaneamente em qualquer parte do mundo.

O princípio de navegação por satélites consiste na transmissão de sinais e dados das posições dos satélites GPS em relação a um sistema de coordenadas. O receptor mede o tempo de transmissão do sinal, que permite calcular a distância entre o usuário e os satélites GPS, e decifra os dados. Se o relógio do receptor estiver sincronizado com os relógios dos satélites GPS, a medida das distâncias de três diferentes satélites GPS, em posição conhecida, permitirão ao usuário calcular a sua posição. Se o relógio do receptor não estiver sincronizado com os relógios dos satélites, serão necessários quatro satélites GPS, sendo o quarto para determinar o desvio do relógio, uma quantidade desconhecida. As medidas da distância com relógio impreciso são chamadas de *pseudo-distância*.

O Sistema GPS é compreendido de três segmentos: Espacial, Controle e Usuário que são descritos a seguir.

1.1 SEGMENTO ESPACIAL

O sistema espacial tem a função de gerar e transmitir códigos, a fase da portadora e a mensagem de navegação e consiste de uma constelação de 24 satélites GPS (21 navegando e três de reserva) em seis planos orbitais com período de 11h e 58 min. O raio da órbita é 26.560 km com excentricidade de 0.0131. Cada plano da órbita contém quatro satélites igualmente espaçados, como mostra a Figura 1.1, distribuídos de tal forma que forneça uma visibilidade simultânea de pelo menos quatro satélites para um usuário localizado em qualquer parte do mundo e em qualquer instante. Entretanto, o mesmo satélite se torna visível quatro minutos mais cedo a cada dia devido a diferença de quatro minutos por dia, entre a órbita do satélite e a rotação da Terra. A meta de tempo de vida dos satélites é de 7,5 anos (Leick, 1994).

1.2 SEGMENTO DE CONTROLE

A função do segmento de controle é produzir o Tempo GPS e as efemérides dos satélites e gerenciar os veículos espaciais; isto é, atualizar periodicamente as informações que são transmitidas por todos os satélites, isto inclui as efemérides dos satélites, o *status*, os dados do relógio e o Almanaque.

O segmento de controle consiste de uma Estação Mestre de Controle (MCS), localizada na base de *Falcon Air Force* próxima a Colorado Springs no Colorado, Estados Unidos, e mais quatro estações de monitoramento no Hawaii, Kwajalein, Diego Garcia e Ascension Island.

1.3 SEGMENTO USUÁRIO

O segmento usuário consiste de receptores militares e civis especialmente designados para receber, decodificar e processar os sinais dos satélites. O usuário observa e grava as transmissões de vários satélites e aplica algoritmos de solução para obter a sua posição, velocidade e tempo.

Os receptores GPS convertem os sinais recebidos em estimativas da posição, velocidade e tempo. Quatro satélites são exigidos para calcular as quatro dimensões de X, Y, Z (posição) e tempo.

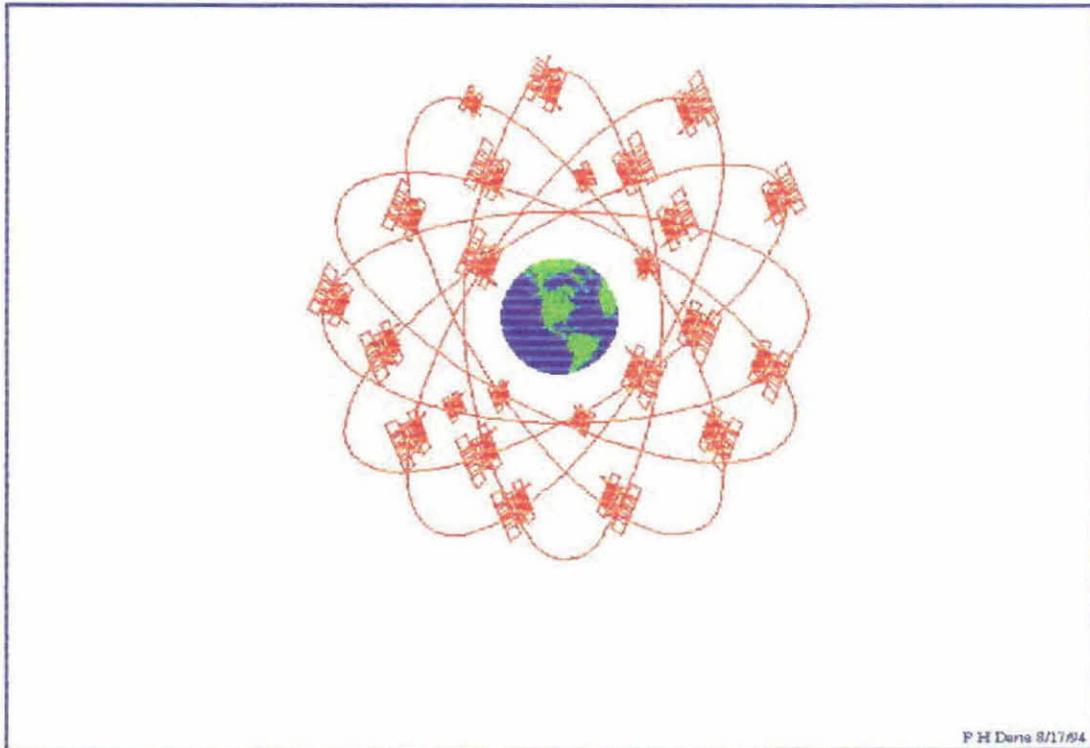


Figura 1.1: Constelação do Sistema GPS

Fonte: Dana (1998)

1.4. SINAIS DOS SATÉLITES GPS

O sinal GPS é transmitido em duas frequências: um sinal primário de 1575.42 MHz (chamado de L1) e uma transmissão secundária de 1227.6 MHz (chamado de L2). Estes sinais são gerados sincronamente de modo que o usuário que recebe os dois sinais pode diretamente calibrar o atraso ionosférico e aplicar correções apropriadas. Entretanto, muitos usuários civis somente usam a frequência L1.

A frequência L1 carrega a mensagem de navegação e os sinais do código SPS. A frequência L2 é usada para medir o atraso ionosférico através de receptores equipados PPS.

Os sinais são modulados com dois tipos de códigos. Existem duas modulações na frequência mais alta (L1), mas somente uma única modulação (protegida) em L2.

O código C/A (*Coarse/Acquisition*) é transmitido em 1.023 MHz e é modulado na frequência L1. É de uso civil e é sempre transmitido, mas está sujeito a degradações. O uso deste sinal é chamado de Serviço Padrão de Posicionamento (SPS). O código P (*Precise*) é, algumas vezes, chamado de código protegido e é transmitido em 10.23 MHz (10 vezes mais rápido que C/A), modulado em L1 e L2. Devido a sua modulação mais alta, o sinal é mais preciso. O sinal fornece o Serviço de Posicionamento Preciso (PPS). É de uso militar e para usuários autorizados. Esta característica é conhecida como *Antispoofing* (A-S). Quando criptografado, o código P torna-se código Y (ou P/Y).

Os operadores militares do sistema têm a capacidade de degradar intencionalmente a precisão do sinal C/A dessincronizando o relógio do satélite ou incorporando pequenos erros nas efemérides transmitidas que é chamada Disponibilidade Seletiva (SA).

CAPÍTULO 2

MENSAGEM DE NAVEGAÇÃO

Os receptores GPS recebem continuamente uma série de dados dos satélites GPS na forma de bits modulados em sinais. Estes dados são chamados de mensagem de navegação e são transmitidos nas frequências L1 (1575.42 MHz) e L2 (1227.6 MHz). Estas informações são computadas e controladas pelo segmento de controle e frequências são usadas para regular o atraso ionosférico. Os sinais L1 e L2 transmitem ao usuário as efemérides do satélite, as correções do relógio do satélite, parâmetros atmosféricos, parâmetros orbitais de todos os satélites e outros dados relevantes sobre o sistema em geral.

A mensagem de navegação consiste em 25 quadros, cada um contendo 1500 bits. Cada quadro é subdividido em cinco subquadros de 300 bits e cada subquadro consiste em 10 palavras de 30 bits cada uma. Em uma razão de 50 bits, levando 6 segundos para transmitir um subquadro, 30 segundos para completar um quadro e 12,5 minutos para uma transmissão completa da mensagem. As mensagens são atualizadas a cada quatro horas (Leick, 1994).

O primeiro subquadro contém parâmetros da correção do relógio do veículo espacial e parâmetros do atraso da propagação ionosférica. O segundo e terceiro subquadros contêm as efemérides do satélite. O quarto contém uma mensagem de caracteres alfanuméricos e o quinto contém um almanaque de todos os satélites contendo suas efemérides, parâmetros de correção do relógio e *status* do satélite. Veja na Figura 2.1, um exemplo da mensagem de navegação.

Cada subquadro de dados inicia com duas palavras que são *Telemetry Word* (TLM), transmitida primeiro, e imediatamente, seguida por *Handover Word* (HOW), as quais são geradas pelo veículo espacial. As oito palavras restantes são dadas pelo segmento de controle. A TLM facilita a aquisição das mensagens de dados ou contém somente

informações que são necessárias para o usuário autorizado. O HOW permite a transferência do código C/A para o P.

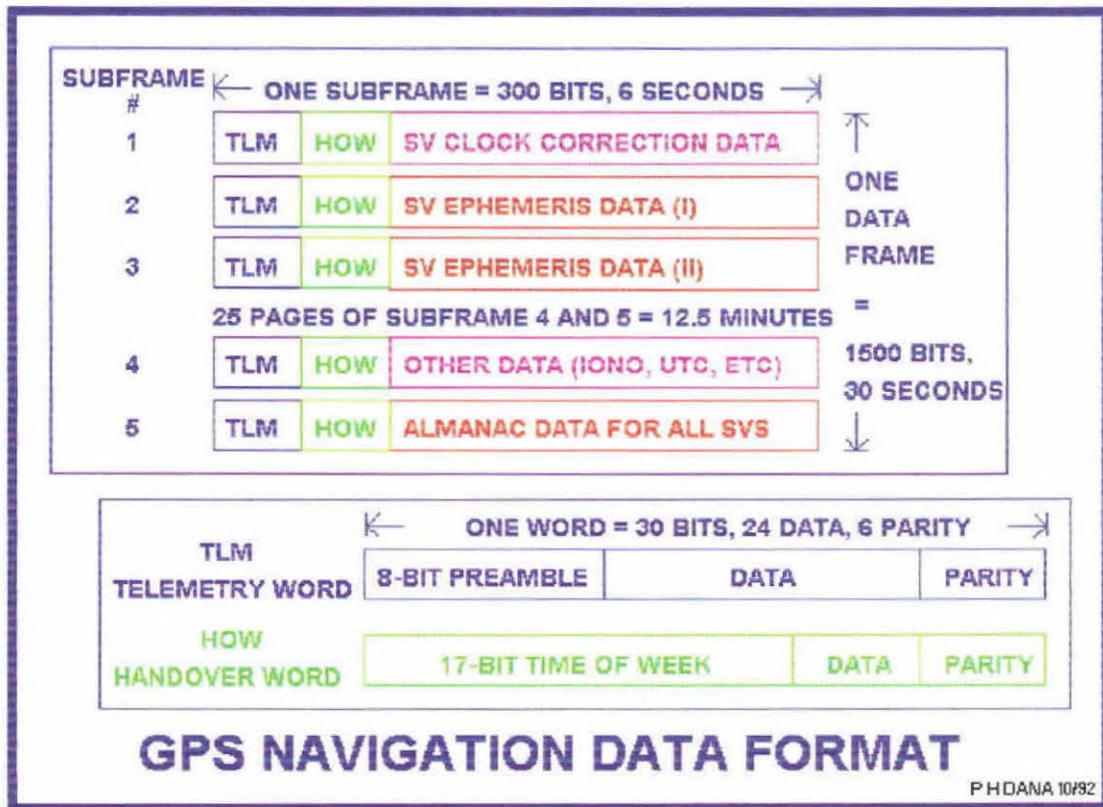


Figura 2.1: Mensagem de Navegação

Fonte: Dana (1998)

O primeiro subquadro é repetido a cada 30 segundos. É gerado pelo segmento de controle e contém o padrão de frequência das correções e os coeficientes de atraso da propagação ionosférica. O modelo de atraso ionosférico é para usuários de única frequência. A finalidade dos parâmetros de correção do relógio é fornecer ao usuário uma descrição do *offset* do tempo do veículo espacial em relação ao tempo GPS. Este *offset* não é constante porque o padrão de frequência do veículo espacial tem *drifts* característicos definidos. Estes *drifts* determinam como o atraso do tempo deve ser representado e apresentado para o usuário. Para a correção do tempo do veículo espacial é necessário um *drift* devido à relatividade em geral. Estes *drifts* aparecem pelo fato do

relógio do veículo espacial estar localizado em diferentes potenciais gravitacionais que o usuário e estar viajando a velocidades muito mais altas. Os efeitos relativísticos causam uma mudança aparente nas frequências dos relógios.

O segundo e terceiro subquadros também são repetidos a cada 30 segundos e também gerados pelo segmento de controle. O modelo de representação das efemérides do veículo espacial é caracterizado por um conjunto de parâmetros que é uma extensão do parâmetro orbital kepleriano descrevendo as efemérides do veículo espacial durante um intervalo de tempo (mínimo de uma hora) para cada parâmetro que é transmitido. Eles também descrevem as efemérides para um intervalo de tempo adicional para deixar tempo para o usuário receber os parâmetros para um novo intervalo de tempo.

O bloco de mensagens ocupa o quarto subquadro. Este bloco fornece espaço para a transmissão de caracteres. Este bloco de mensagens também é gerado pelo segmento de controle e a finalidade da mensagem é conduzir informação alfanumérica para os usuários. Ele foi incluído na mensagem de navegação GPS para aplicações operacionais futuras. Este subquadro contém mensagens especiais, termos de correção ionosférica, coeficientes para converter o tempo GPS para UTC e o almanaque para 25 satélites. Para derivar o UTC tão corretamente quanto possível do tempo GPS, a mensagem fornece um termo *offset* constante, um termo polinomial linear, um tempo de referência e um valor corrente de um segundo salto. Com esses dados uma correção pode ser computada e adicionada ao tempo GPS.

O quinto subquadro aparece a cada 30 segundos, mas não se repete a cada 30 segundos como acontecem nos outros dois blocos. Há 25 subquadros de dados no bloco três de dados, aparecendo em seqüência no quinto subquadro, um a cada 30 segundos. Cada um desses 25 subquadros repete a cada 750 segundos. O almanaque do veículo espacial contém parâmetros de representação das efemérides, de correção do relógio e do *status* do satélite. A finalidade desse almanaque é fornecer ao usuário informações sobre posição e correção do relógio do veículo espacial com menos precisão. Tanto a

representação das efemérides como da correção do relógio são versões truncadas das representações nos blocos 1 e 2.

2.1 ALGORITMO DAS EFEMÉRIDES

Para o algoritmo das efemérides é usado o sistema de coordenadas WGS 84, onde μ é o valor do parâmetro gravitacional universal da Terra que vale $3.986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ e $\dot{\Omega}_e$ é o valor da taxa de rotação da Terra que vale $7.292115167 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$.

As equações usadas no algoritmo das efemérides fornecem a fase central da antena do veículo espacial no sistema de coordenadas cartesianas. São dadas por:

$$x_k = x'_k \cos \Omega_k - y'_k \cos i_k \sin \Omega_k, \quad (2.1)$$

$$y_k = x'_k \sin \Omega_k + y'_k \cos i_k \cos \Omega_k, \quad (2.2)$$

$$z_k = y'_k \sin i_k, \quad (2.3)$$

onde

$$x'_k = r_k \cos u_k \quad (2.4)$$

e

$$y'_k = r_k \sin u_k \quad (2.5)$$

são as posições no plano orbital, e

$$\Omega_k = \Omega_0 + \left(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e \right) t_k - \dot{\Omega}_e t_{oe} \quad (2.6)$$

é a equação da longitude corrigida do nó ascendente.

Estes parâmetros de representação são os resultados de uma curva adaptada e são somente parecidos com a kepleriana. Eles só descrevem as efemérides acima de um período de aplicabilidade e não para a órbita total, mas eles descrevem a órbita kepleriana verdadeira dentro de poucos mil metros (Van Dierendonck *et. al.*, 1986).

O argumento de latitude, o raio e a inclinação corrigidos são dados respectivamente por:

$$u_k = \phi_k + \delta u_k \quad (2.7)$$

$$r_k = a(1 - e \cos E_k) + \delta r_k \quad (2.8)$$

$$i_k = i_0 + \delta i_k + (IDOT) t_k \quad (2.9)$$

onde a é o semi eixo maior dado por:

$$a = (\sqrt{a})^2. \quad (2.10)$$

As perturbações harmônicas de segunda ordem são dadas respectivamente pela correção do argumento de latitude, correção radial e correção para inclinação:

$$\delta u_k = C_{us} \text{sen} 2\phi_k + C_{uc} \text{cos} 2\phi_k, \quad (2.11)$$

$$\delta r_k = C_{rc} \text{cos} 2\phi_k + C_{rs} \text{sen} 2\phi_k, \quad (2.12)$$

$$\delta i_k = C_{ic} \text{cos} 2\phi_k + C_{is} \text{sen} 2\phi_k. \quad (2.13)$$

onde o argumento de latitude é dado por:

$$\phi_k = f_k + \omega. \quad (2.14)$$

A anomalia média, anomalia verdadeira e anomalia excêntrica são dadas por:

$$M_k = M_0 + nt_k, \quad (2.15)$$

$$\cos f_k = (\cos E_k - e) / (1 - e \cos E_k), \quad (2.16)$$

$$\sin f_k = \sqrt{1 - e^2} \sin E_k / (1 - e \cos E_k), \quad (2.17)$$

$$E_k = \cos^{-1} \left[\frac{e + \cos f_k}{1 + e \cos f_k} \right], \quad (2.18)$$

onde a equação de Kepler para anomalia excêntrica é:

$$M_k = E_k - e \sin E_k \quad (2.19)$$

e o tempo da efeméride da época referida é

$$t_k = t - t_{oe}^* \quad (2.20)$$

onde t_{oe}^* é o tempo de transmissão no sistema GPS.

A anomalia média e a inclinação são formulados como um polinômio temporal, o argumento de tempo é o tempo GPS. Os coeficientes do polinômio são uma função da época de expansão.

O movimento médio computado e o corrigido são respectivamente:

$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \quad (2.21)$$

$$n = n_0 + \Delta n \quad (2.22)$$

sendo o movimento médio computado dado em rad/s.

Há geralmente seis parâmetros keplerianos se o tempo referido for o mesmo que o tempo do perigeu. Neste caso são necessários a anomalia média, M_k , o tempo da efeméride da época referida, t_k , a excentricidade, e , o semi eixo maior, \sqrt{a} , a longitude

corrigida do nodo ascendente, Ω_k , a inclinação corrigida, i_k e o argumento do perigeu, ω .

A correção da inclinação δ_i é dada com respeito a um valor fixo, $i_0 = 0.30$ semicírculos, que corresponde a 54° .

A anomalia média, a longitude do nodo ascendente e a inclinação são formulados como um polinômio temporal, o argumento de tempo é o tempo GPS. Os coeficientes do polinômio são uma função da época de expansão. Este algoritmo pode ser encontrado em Leick (1994).

2.2 FORMATO RINEX

Para facilitar o processamento simultâneo de dados de vários satélites de tipos e fabricantes diferentes, todos os fabricantes têm que usar o mesmo formato de saída de dados ou tem que ser definido um formato de dados comum para que possa ser usado como uma interface entre todos os tipos de receptores geodésicos e os diferentes sistemas de programas de processamento. Assim, foi feita uma tentativa para definir e aceitar um formato comum para troca de dados internacionais. Foi então, proposto na Suíça, por Gurtner o RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) e recomendado para uso internacional (Strang, 1997).

Tempo, fase e distância são três quantidades fundamentais nas observações do GPS definidas pelo RINEX. O tempo de medida é o tempo de recepção do sinal recebido. É idêntico para as medidas de fase e distância e é também idêntico para todos os satélites observados naquela época. É expresso no tempo GPS e não no Tempo Universal.

A medida da *pseudo-distância* é equivalente à diferença do tempo de recepção e o tempo de transmissão de um sinal distinto do satélite que vai da antena do receptor ao satélite, incluindo os atrasos dos relógios do satélite e do receptor.

A fase é medida da fase da portadora em ciclos inteiros em uma ou ambas frequências. É a medida na frequência de batida entre a fase recebida do sinal do satélite e a frequência de referência gerada no receptor. A metade do ciclo medido por receptores tipo quadrado serão convertidos para ciclos inteiros e isso será notado pelo fator comprimento de onda no artigo de cabeçalho. A fase e a distância mudam no mesmo sentido, logo, aumento da distância = aumento da fase.

As observações não são corrigidas por efeitos externos como refração atmosférica, atrasos de relógios do satélite, etc.

O formato RINEX é constituído de quatro tipos de arquivo ASCII:

- 1 - Arquivo de dados de observação – que contém a informação do cabeçalho e os dados de fase e distância.
- 2 - Arquivo de dados meteorológicos.
- 3 - Arquivo da mensagem de navegação.
- 4 - Arquivo de mensagem de navegação do GLONASS.

Cada tipo de arquivo contém uma seção de cabeçalho e uma seção de dados. Cada arquivo de dados de observação e meteorológico contém dados de um local e uma seção. A seção de cabeçalho contém informação global para o arquivo inteiro e é colocado no início do arquivo. A seção de cabeçalho contém rótulos de cabeçalhos nas colunas 61-80 para cada linha contida nesta seção. Estes rótulos são obrigatórios e

devem aparecer exatamente como dado nesta descrição. Exemplos de arquivos de dados de navegação são encontrados no apêndice A.

2.3. FORMATO SP3

Os arquivos SP3 contêm as efemérides precisas (POE) geradas pelo JPL/NASA com uma precisão em torno de 3 cm.

Cada POE tem um período de 10 dias, correspondendo ao período repetido de rastreamento pelo solo do satélite. A precisão da órbita do POE depende da alta qualidade das medidas de rastreamento e da precisão com que várias forças são modeladas no programa de estimação da órbita.

Os arquivos da mensagem de navegação e POE, no formato SP3, dos GPS são facilmente encontrados na internet (Noll, 1998). Exemplos de arquivo no formato SP3 são encontrados no apêndice B.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DA MENSAGEM DE NAVEGAÇÃO TRANSMITIDA

Para verificar a incerteza das efemérides dos GPS transmitidas pela mensagem de navegação foi utilizado um programa em linguagem Fortran, desenvolvido pelo Dr. Hélio Koiti Kuga, do Departamento de Mecânica e Controle do INPE. Este programa lê a mensagem de navegação em formato Rinex e gera as posições x , y , e z , no sistema de referência WGS84, de cada satélite GPS na época da mensagem de navegação transmitida e para o intervalo de tempo desejado no Tempo GPS. Este programa utiliza o algoritmo citado no item 2.1.

Como entrada de dados, foram utilizadas as mensagens de navegação enviadas pelo GPS, em formato Rinex, para gerar as efemérides de todos os satélites GPS. Os dados utilizados foram escolhidos aleatoriamente e obtidos via internet (Chandler *et. al.*, 2000). Como arquivo de referência, foi utilizado o arquivo POE (*Precise Orbit Ephemeris*), no formato SP3, gerado pelo JPL/NASA (*Jet Propulsion Laboratory*), para as mesmas datas. Este arquivo é utilizado para comparar com as efemérides obtidas pelo programa.

3.1 RESULTADOS

A posição, x , y e z , de cada satélite GPS, calculada utilizando a mensagem de navegação, foi comparada com as efemérides precisas, POE, com a finalidade de verificar a precisão do programa. A seguir, serão apresentados os erros obtidos na posição de todos os satélites GPS para um dia inteiro na referida época. As posições dos GPS foram obtidas com um intervalo de 15 minutos da mesma maneira que são fornecidas no arquivo POE.

A Figura 4.1 mostra o erro entre as efemérides calculadas e as pós-processadas para o dia 18 de novembro de 1993.

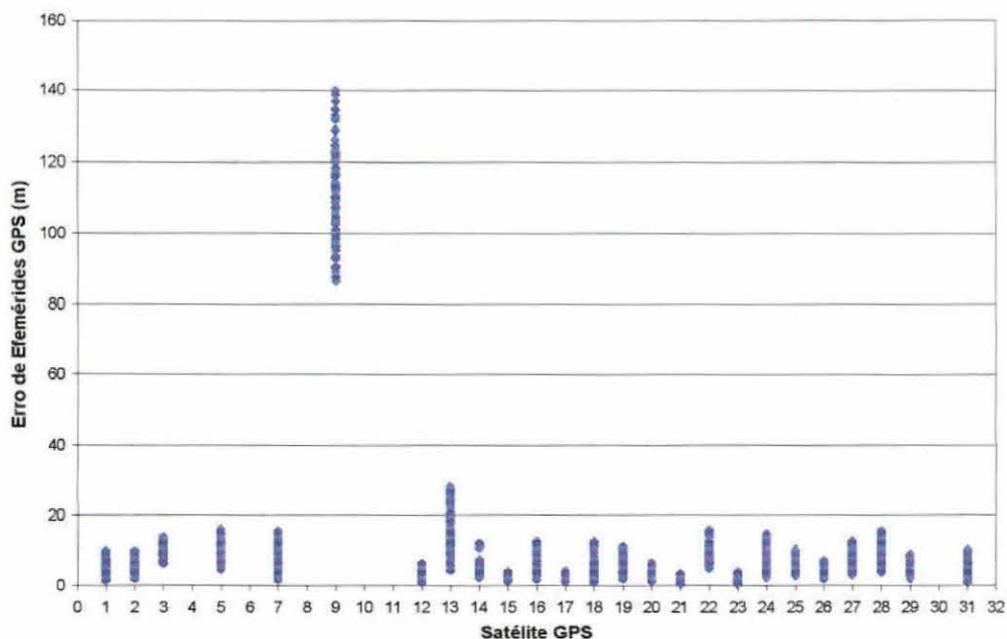


Figura 3.1: Erro das efemérides dos GPS para o dia 18/11/93

A Tabela 3.1 mostra a estatística das efemérides GPS utilizando a mensagem de navegação transmitida. Essa estatística é referente a todos os satélites para a data 18 de novembro de 1993. O erro máximo obtido foi somente para o satélite 9.

TABELA 3.1: ESTATÍSTICA DE ERRO PARA AS EFEMÉRIDES GPS PARA O DIA 18/11/93

Média do Erro	9.556515 m
Desvio Padrão	17.941821 m
Erro Máximo	140.04663 m
Erro Mínimo	0.323619 m

A Figura 3.2 mostra o erro entre as efemérides calculadas e as pós-processadas para a data 25 de abril de 1995.

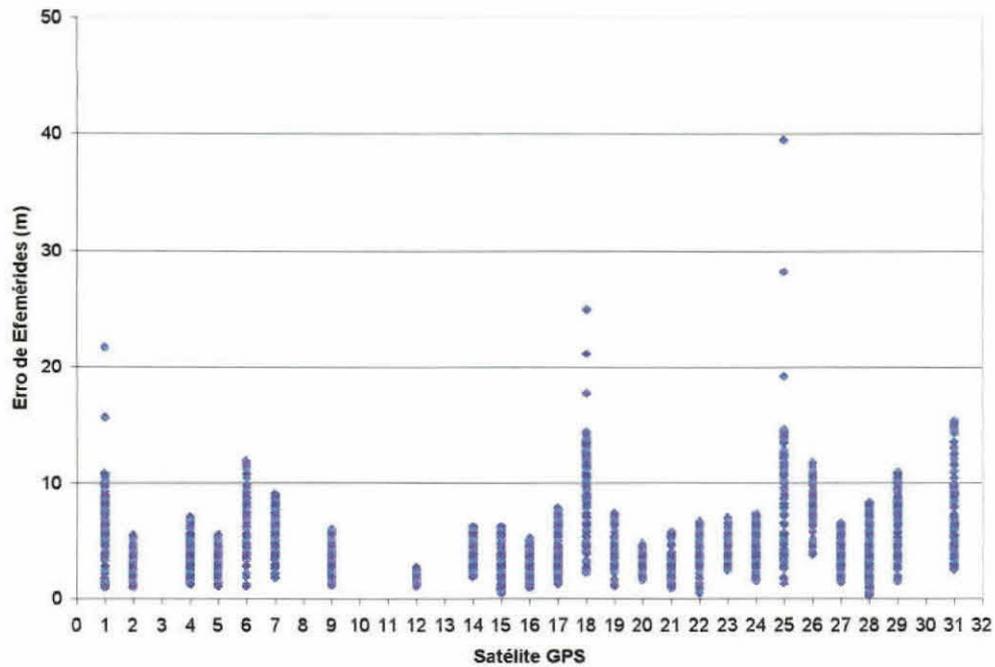


Figura 3.2: Erro das efemérides GPS para o dia 25/04/95

A Tabela 3.2 mostra a estatística das efemérides GPS calculadas utilizando a mensagem de navegação transmitida. Essa estatística é referente a todos os satélites para a data 25 de abril de 1995.

TABELA 3.2: ESTATÍSTICA DO ERRO PARA AS EFEMÉRIDES GPS PARA O DIA 25/04/95

Média do Erro	4.880107 m
Desvio Padrão	2.999822 m
Erro Máximo	39.5349055 m
Erro Mínimo	0.2911546 m

A Figura 3.3 mostra o erro entre as efemérides calculadas e as pós-processadas para a data 14 de março de 1996.

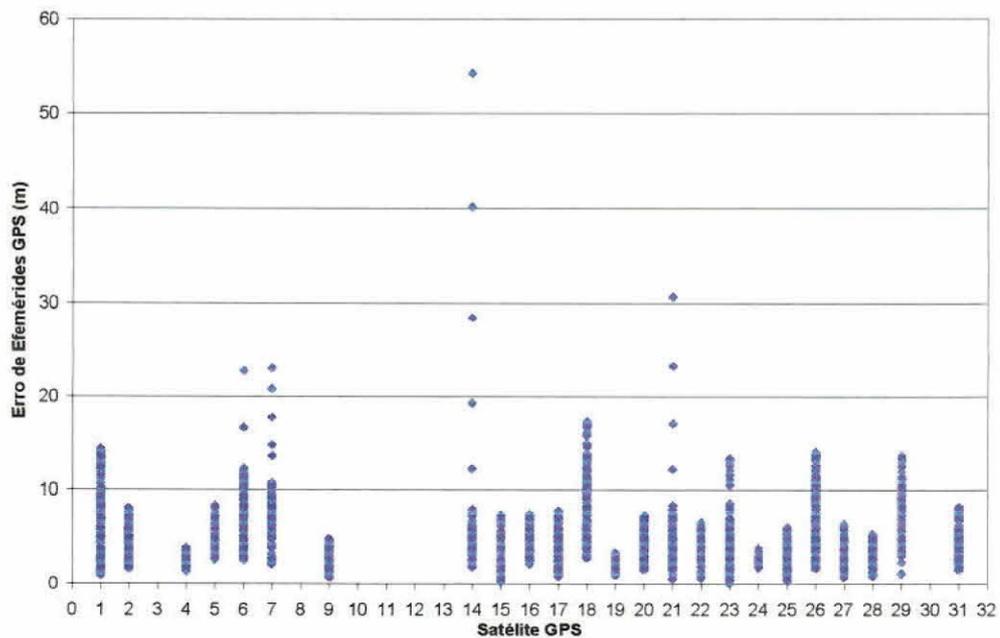


Figura 3.3: Erro das efemérides GPS para o dia 14/03/96

A Tabela 3.3 mostra a estatística das efemérides GPS. O erro máximo obtido foi para o satélite 14, porém somente em alguns intervalos de tempo, não ocorreu o dia inteiro.

TABELA 3.3: ESTATÍSTICA DO ERRO PARA AS EFEMÉRIDES GPS PARA O DIA 14/03/96

Média do Erro	4.914394 m
Desvio Padrão	3.464829 m
Erro Máximo	54.308787 m
Erro Mínimo	0.142667 m

A Figura 3.4 mostra o erro entre as efemérides calculadas e as pós-processadas para o dia 7 de janeiro de 1998.

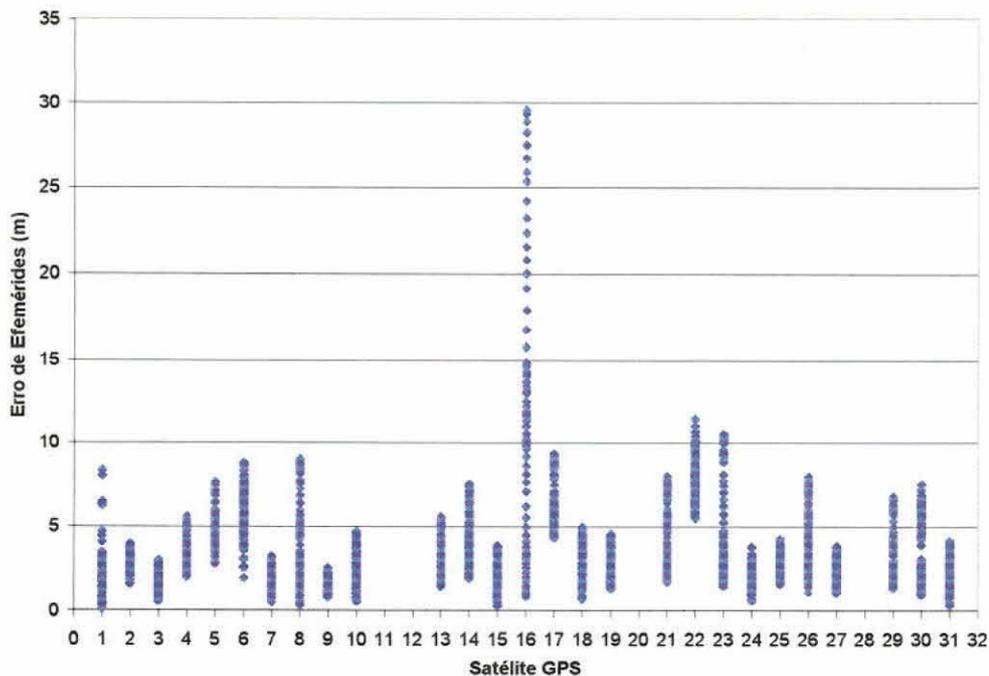


Figura 3.4: Erro das efemérides GPS para o dia 07/01/98

A Tabela 3.4 mostra a estatística das efemérides GPS utilizando a mensagem de navegação. Ela também é referente a todos os satélites no dia 07 de janeiro de 1998. O erro máximo obtido nesse dia foi para o satélite 16, porém, não ocorrendo o dia inteiro.

TABELA 3.4: ESTATÍSTICA DO ERRO PARA AS EFEMÉRIDES GPS PARA O DIA 07/01/98

Média do Erro	3.937246 m
Desvio Padrão	2.907257 m
Erro Máximo	29.553691 m
Erro Mínimo	0.085866 m

A Figura 3.5 mostra o erro entre as efemérides calculadas e as pós-processadas para o dia 08 de junho de 1998.

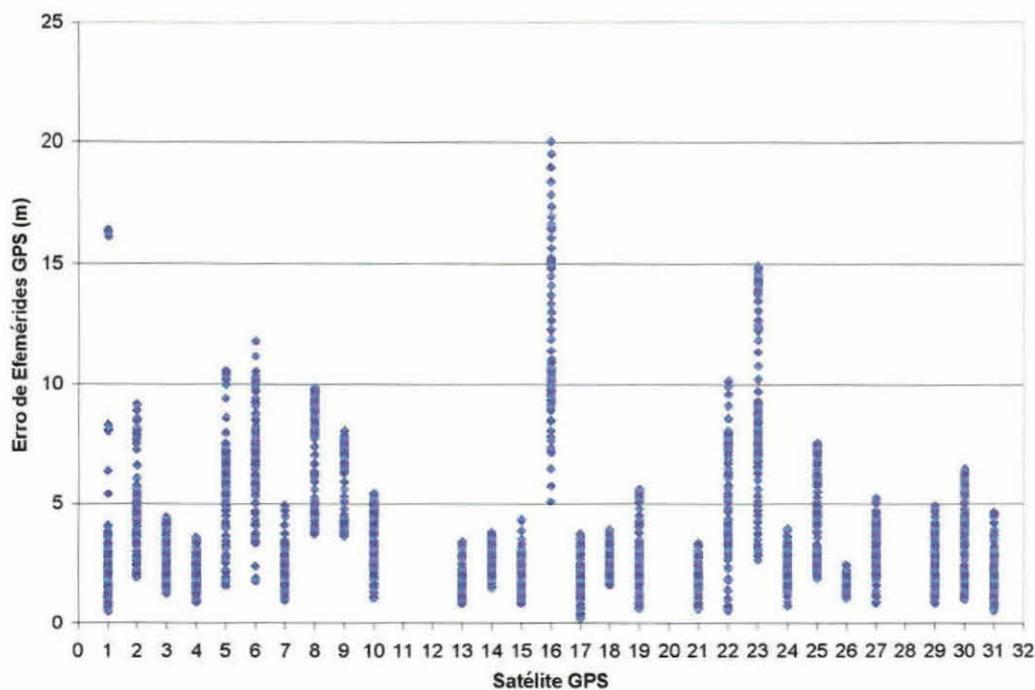


Figura 3.5: Erro das efemérides GPS para o dia 08/06/98

A Tabela 3.5 mostra o erro entre as efemérides calculadas e as pós-processadas no dia 08 de junho de 1998. O erro máximo obtido nesta data foi para o satélite 16.

TABELA 3.5: ESTATÍSTICA DO ERRO PARA AS EFEMÉRIDES GPS PARA O DIA 08/06/98

Média do Erro	4.009345 m
Desvio Padrão	2.959752 m
Erro Máximo	20.047576 m
Erro Mínimo	0.201559 m

A Figura 3.6 mostra o erro entre as efemérides calculadas e as pós-processadas para o dia 24 de janeiro de 1999.

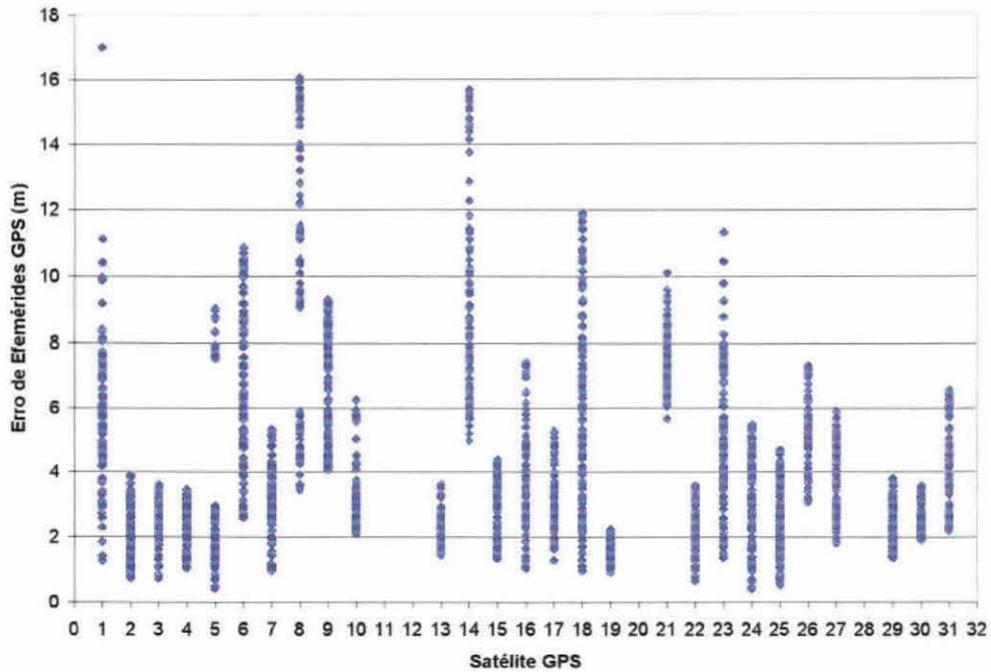


Figura 3.6: Erro das efemérides GPS para o dia 24/01/99

A Tabela 3.6 mostra a estatística das efemérides GPS. O erro máximo obtido foi para o satélite 1, porém, só em alguns intervalos de tempo, não ocorrendo o dia inteiro.

TABELA 3.6: ESTATÍSTICA DO ERRO PARA AS EFEMÉRIDES GPS PARA O DIA 24/01/99

Média do Erro	4.195418 m
Desvio Padrão	2.790215 m
Erro Máximo	17.034135 m
Erro Mínimo	0.441346 m

A Figura 3.7 mostra o erro entre as efemérides calculadas e as pós-processadas para o dia 16 de dezembro de 1999.

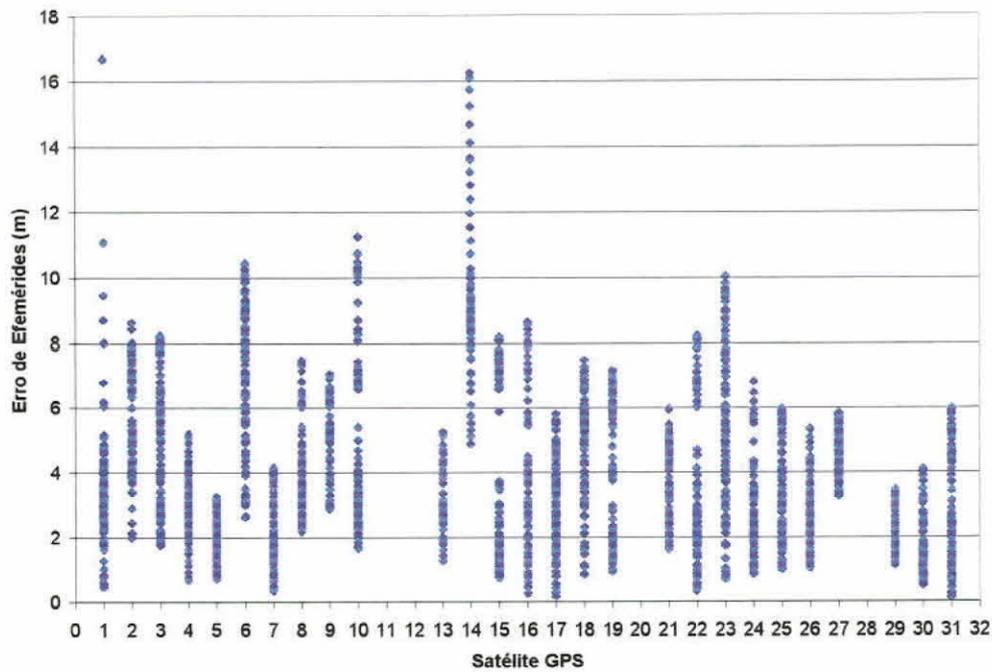


Figura 3.7: Erro das efemérides GPS para o dia 16/12/99

A Tabela 3.7 mostra a estatística das efemérides também para todos os satélites no dia 16 de dezembro de 1999. O erro máximo obtido foi referente ao satélite 1.

TABELA 3.7: ESTATÍSTICA DO ERRO PARA AS EFEMÉRIDES GPS PARA O DIA 16/12/99

Média do Erro	3.966948 m
Desvio Padrão	2.354999 m
Erro Máximo	16.715554 m
Erro Mínimo	0.134242 m

CAPÍTULO 4

GEOMETRIA DOS SATÉLITES

Como foi visto no Capítulo 1, são necessários quatro satélites para determinar a posição e o *offset* do relógio do receptor. E para conseguir uma melhor exatidão na determinação da posição do receptor é preciso analisar a geometria dos satélites GPS visíveis ao receptor. Uma melhor precisão é obtida quando existem três satélites igualmente espaçados no horizonte a um ângulo de elevação mínimo e um quarto acima deles (Parkinson, 1994).

Várias medidas podem ser usadas para selecionar estes satélites. A diminuição geométrica da precisão (GDOP) é uma das mais populares.

A seguir será visto quais os fatores que podem causar erros nas medidas enviadas pelos satélites, como a geometria dos mesmos podem influenciar na determinação de sua órbita e uma forma adequada de se escolher os satélites que apresentam a melhor geometria.

4.1 DEFINIÇÃO DE PSEUDO-DISTÂNCIA

Os satélites GPS enviam medidas de distância que são deduzidas das diferenças das medidas, da fase e do tempo, baseadas na comparação entre os sinais recebidos e os gerados pelo receptor. Essas medidas imprecisas são chamadas de pseudo-distância porque são feitas utilizando relógios não sincronizados, um no satélite e outro no receptor. Assim, a pseudo-distância é a diferença de tempo multiplicada pela velocidade da luz.

Um receptor GPS mede essa quantidade chamada pseudo-distância. Esta medida é imprecisa devido a várias fontes de erros, como:

- Dados das efemérides – erros na posição transmitida pelo satélite que foram analisados anteriormente;
- Relógio do satélite – erros no tempo transmitido, incluindo SA;
- Ionosfera – erros nas correções da pseudo-distância causada pelos efeitos ionosféricos;
- Troposfera – erros nas correções da pseudo-distância causada pelos efeitos troposféricos;
- Multicaminho – erros causados pelos sinais refletidos quando atingem a antena do receptor;
- Receptor – erros nas medidas de distância calculada pelo receptor causados pelo ruído, exatidão do *software* e indução.
- *Cycle slip*
- Disponibilidade Seletiva.–
- Variação do centro de fase da antena

A seguir, serão definidas algumas medidas necessárias para a pseudo-distância.

Medida de instante de chegada ideal: a medida tempo ideal é o instante de chegada do sinal GPS. Essa é igual para o instante de transmissão do sinal atrasado pelo tempo de viagem no vácuo e corrigido para os verdadeiros atrasos causados pela ionosfera e troposfera. É dada por:

$$t_A = t_T + D/c + T + I \quad (4.1)$$

onde t_A é o instante de chegada verdadeiro, t_T é o instante transmitido verdadeiro, D é a distância verdadeira, c é a velocidade da luz no vácuo, T é o atraso troposférico verdadeiro e I é o atraso ionosférico verdadeiro.

Medida do instante de chegada: o instante de chegada medido reflete no relógio do usuário e em outros erros (causados pelo ruído no receptor, multicaminho, etc., diferente para cada satélite). Essa medida é dada por:

$$t_{Au} = t_A + b_u + v \quad (4.2)$$

onde t_{Au} é o instante de chegada medido pelo usuário, b_u é a influência estimada no relógio do usuário e v é o ruído no receptor, multicaminho, etc.

Instante de transmissão do satélite: a correção do relógio do satélite transmitida pelo satélite pode ter também erros. (O erro dominante pode ser devido a Disponibilidade Seletiva, SA). O instante de transmissão do satélite é dado por:

$$t_{Ts} = t_T + B \quad (4.3)$$

onde t_{Ts} é instante de transmissão enviado pelo satélite e B é o erro verdadeiro no instante de transmissão do satélite.

Distância verdadeira: a distância verdadeira é o valor absoluto do vetor diferença entre a posição verdadeira do satélite e a posição verdadeira do usuário e é dada por:

$$D = |\bar{r}_s - \bar{r}_u| = \bar{I}_s [\bar{r}_s - \bar{r}_u] \quad (4.4)$$

onde \bar{r}_s é a posição verdadeira do satélite, \bar{r}_u é a posição verdadeira do usuário e \bar{I}_s é o vetor unitário verdadeiro do usuário para o satélite.

Pseudo-distância: o receptor, de fato, mede a pseudo-distância, ρ , dada por:

$$\rho = c(t_{Au} - t_{Ts}) \quad (4.5)$$

Substituindo as equações (4.3), (4.2) e (4.1) em (4.5) temos:

$$\rho = D + c(b_u - B) + c(T + I + v) \quad (4.6)$$

4.2 DEFINIÇÃO DO DOP

A exatidão da solução de posição/tempo determinada pelo GPS é expressada como o produto de um fator geométrico e um fator do erro da pseudo distância como será visto na Equação (4.7).

O fator geométrico expressa o efeito da geometria do referente satélite no erro de solução do GPS. Isso é, genericamente, chamado de Diluição da Precisão (DOP), que é associado com a geometria do satélite.

A DOP é a medida geométrica da configuração do satélite GPS. Essa diluição da precisão muda de acordo com o tempo, com o movimento do satélite ao longo de sua órbita e de lugar para lugar, desde que a configuração do satélite seja dependente da posição. (Wells, 1986)

4.3 RELAÇÃO DA PSEUDO-DISTÂNCIA COM DOP

Uma derivação formal da relação DOP no GPS começa com a linearização da Equação (4.6) da pseudo-distância em torno a condição dada. Os parâmetros DOP são definidos como fatores geométricos que dizem respeito aos parâmetros da posição do usuário e erros no relógio, assim como aos erros da pseudo-distância.

A compensação Δx na posição e no tempo do usuário relativa a linearização diz respeito a compensação nos valores de erro da pseudo-distância $\Delta \rho$ pela relação:

$$\Delta \rho = G \Delta x \quad (4.7)$$

O vetor Δx é o erro da posição e tem quatro componentes. Os três primeiros são a compensação da posição do usuário e o quarto é a compensação do tempo. $\Delta \rho$ é o vetor

de compensação dos valores dos erros da pseudo-distância correspondendo a posição atual do usuário e aos valores que correspondem a linearização. Assim, G é dada por:

$$G = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{xn} & a_{yn} & a_{zn} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

onde a_i são os vetores unitários para a posição dos satélites. Se $n = 4$, sendo n o número de satélites, e o ponto de linearização está próxima à posição do usuário, a compensação dessa posição e do tempo são obtidas resolvendo (4.7) para Δx , obtendo:

$$\Delta x = G^{-1} \Delta \rho, \text{ para } n = 4 \quad (4.9)$$

Para o caso de $n > 4$, multiplicamos ambos os lados de (4.7) pela matriz transposta de G obtendo:

$$G^T G \Delta x = G^T \Delta \rho \quad (4.10)$$

A matriz $G^T G$ é uma matriz quadrada 4×4 e pode ser resolvida para Δx multiplicando os dois lados pela sua inversa, $(G^T G)^{-1}$. Temos então:

$$\Delta x = (G^T G)^{-1} G^T \Delta \rho, \text{ para } n > 4 \quad (4.11)$$

4.4 DILUIÇÃO GEOMÉTRICA DA PRECISÃO

É óbvio que a geometria do satélite pode afetar a exatidão da posição do satélite, sendo assim, é preciso entender essa “diluição” da precisão causada pela configuração geométrica de vários satélites.

4.4.1 DERIVAÇÃO DA EQUAÇÃO DE PRECISÃO DA DIMINUIÇÃO GEOMÉTRICA

A diluição geométrica da precisão (DOP) pode ser facilmente derivada. A covariância da posição é calculada como segue (Parkinson *et. al.*, 1994):

$$E[\Delta\bar{x}\Delta\bar{x}^T] = (G^T G)^{-1} G^T E[\Delta\bar{\rho}\Delta\bar{\rho}^T] G (G^T G)^{-1}, \text{ para } n > 4 \quad (4.12)$$

$$E[\Delta\bar{x}\Delta\bar{x}^T] = G^{-1} E[\Delta\bar{\rho}\Delta\bar{\rho}^T] G^{-T}, \text{ para } n = 4 \quad (4.13)$$

onde $E[J]$ é a matriz de covariância da posição, cujos elementos desta matriz são os desvios padrões do erro da posição.

Se todos os erros de medida tiverem a mesma variação σ_m^2 e forem não correlacionados com média zero ($E[\Delta\rho_i\Delta\rho_j] = 0, i \neq j$), então a covariância da medida nas Equações (4.12) e (4.13) tornam-se $\sigma_m^2 \cdot U$, onde U é a matriz identidade 4x4. Então as Equações (4.12) e (4.13) tornam-se:

$$E[\Delta\bar{x}\Delta\bar{x}^T] = \sigma_m^2 (G^T G)^{-1} \quad (4.14)$$

Portanto, $(G^T G)^{-1}$ é matriz de multiplicadores da variância da medida para dar a variância da posição, conhecida como GDOP ou matriz de diluição geométrica da precisão.

Para satélites que têm um ângulo de elevação acima de 0° , a melhor GDOP para $n = 4$ é obtido quando um satélite está acima e os outros três estão igualmente espaçados a um ângulo de elevação mínimo do horizonte (Parkinson *et. al.*, 1994).

4.5 INFLUÊNCIA DO CONCEITO DO GDOP

GDOP é um indicador do erro da posição e do tempo por unidade de covariância do ruído da medida e depende exclusivamente da matriz geométrica G . Por essa razão, freqüentemente, é usado um critério de seleção dos satélites.

O conceito de GDOP é uma forte ferramenta para o GPS. Todos os receptores usam alguns algoritmos baseados no GDOP para selecionar o melhor conjunto de satélites entre o grupo de mais de 11 satélites visíveis. A exatidão da posição pode então ser estimada como a distância exata multiplicada por um fator de diminuição da precisão. Esse fator, o DOP depende exclusivamente da geometria do satélite (Parkinson *et. al.* 1994).

4.6 EXEMPLOS DE CÁLCULOS

Definimos as direções do satélite como azimute e elevação do satélite. Assim, a matriz geométrica G torna-se:

$$G = \begin{bmatrix} \cos E_1 \text{ sen } Az_1 & \cos E_1 \cos Az_1 & \text{sen } E_1 & 1 \\ \cos E_2 \text{ sen } Az_2 & \cos E_2 \cos Az_2 & \text{sen } E_2 & 1 \\ \cos E_3 \text{ sen } Az_3 & \cos E_3 \cos Az_3 & \text{sen } E_3 & 1 \\ \cos E_4 \text{ sen } Az_4 & \cos E_4 \cos Az_4 & \text{sen } E_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

A matriz DOP é obtida calculando $(G^T G)^{-1}$ e, através dela, podemos obter HDOP (DOP horizontal), VDOP (DOP vertical), PDOP (posição), TDOP (tempo) e GDOP, que são dados por:

$$HDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22}}, \quad (4.16)$$

$$VDOP = \sqrt{D_{33}}, \quad (4.17)$$

$$PDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}}, \quad (4.18)$$

$$TDOP = \sqrt{\frac{D_{44}}{c}}, \quad (4.19)$$

$$GDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44}} \quad (4.20)$$

onde D_{ij} são os elementos da matriz DOP.

O GDOP é independente do sistema de coordenadas empregado. O valor mínimo de GDOP é significativo porque o erro do usuário é o produto do GDOP pela covariância do ruído da medida. Usando um autovalor aproximado, o valor mínimo de GDOP com quatro satélites é $\sqrt{2.5}$. Essa aproximação pode ser estendida para $n > 4$. (Park, *et. al.* 1997)

Calculando o traço da matriz ($G^T G$), obtemos:

$$\text{tr}(G^T G) = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 2k \quad (4.21)$$

onde λ_i são os autovalores da matriz $G^T G$ que é simétrica e positiva. Assim, GDOP pode ser definida pelos autovalores dessa matriz, sendo:

$$GDOP^2 = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} + \frac{1}{\lambda_4} \quad (4.22)$$

Da definição de valor máximo, temos

$$\lambda_4 \geq n$$

e

$$\lambda_1 \leq \frac{n}{3}$$

Isso nos leva a inequação da relação entre GDOP e os autovalores da matriz $G^T G$:

$$GDOP \geq \min \left\{ \sqrt{\frac{1}{\lambda_4} + \frac{9}{2k - \lambda_4}} \right\} \quad (4.23)$$

O mínimo de GDOP para n satélites ocorre quando $\lambda_n = n$ e é $\left(\frac{10}{n}\right)^{1/2}$. Podemos ver que para o caso de quatro satélites, o valor mínimo de GDOP é $\sqrt{2.5}$, com $\lambda_4 = 4$. Geometricamente, quatro satélites, que estão localizados nos vértices de um tetraedro regular, apresentam um GDOP mínimo de $\sqrt{2.5}$. Contudo o valor mínimo de GDOP nunca ocorre na realidade porque a Terra sempre encobre alguns satélites. Considerando esse ângulo de encobrimento causado pela Terra, o valor mínimo de GDOP passa a ser $3^{1/2}$. Isso ocorre quando três satélites estão localizados no horizonte formando um triângulo regular, estando o outro satélite localizado no zênite, ou seja, a melhor exatidão é encontrada com três satélites igualmente espaçados no horizonte, a um ângulo de elevação mínimo e um satélite diretamente acima deles.

RGDOP é um indicador do erro relativo da posição e é dado por:

$$RGDOP = \sqrt{2} PDOP \quad (4.24)$$

Através de (4.24) podemos observar que RGDOP e PDOP são proporcionais. O valor mínimo de RGDOP é $\left(\frac{18}{k}\right)^{1/2}$ quando GDOP é $\left(\frac{10}{k}\right)^{1/2}$. Considerando o ângulo de encobrimento causado pela Terra, o valor mínimo de RGDOP é $2\left(\frac{4}{3}\right)^{1/2}$ para quatro satélites.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DA GEOMETRIA DOS SATÉLITES

Para verificar a melhor geometria dos satélites GPS foi utilizado um programa desenvolvido em linguagem Fortran que calcula o GDOP, HDOP, TDOP, VDOP e PDOP para cada dado fornecido.

Este programa lê a época e as posições x , y e z de um satélite artificial, que neste caso será o Topex/Poseidon, a época e as posições dos satélites GPS visíveis Topex/Poseidon e faz uma combinação, dentre os satélites visíveis, dos quatro satélites que tem o melhor valor de DOP, conforme apresentado no item 4.6. O satélite Topex/Poseidon recebe, em cada instante de observação, dados de até seis satélites GPS visíveis.

Como entrada de dados, foram utilizados os arquivos POE do Topex/Poseidon, os arquivos de observação do Topex/Poseidon, em formato Rinex, e os arquivos POE do GPS, no formato SP3, gerados pelo JPL/NASA. Os dados utilizados foram escolhidos aleatoriamente e podem ser facilmente obtidos via Internet (Chandler *et. al.*, 2000).

5.1 RESULTADOS

Os dados gerados foram obtidos com a finalidade de obter os quatro satélites que apresentam o melhor valor de GDOP. Para isso, foi feita uma combinação entre os satélites visíveis para se saber, dentre eles, o conjunto que apresenta o melhor valor, conforme visto no item 4.6. Esses dados foram obtidos com um intervalo de 15 minutos e para oito dias diferentes. A seguir, serão apresentados o melhor conjunto de quatro satélites GPS visíveis a serem usados.

A Tabela 5.1 mostra o conjunto de quatro satélites que dentre os visíveis apresentam melhor geometria, o número de satélites visíveis para cada instante e o valor de GDOP para cada conjunto, no dia 17/11/93. O valor médio de GDOP para essa data é de 3.673.

TABELA 5.1: CONJUNTO DE SATÉLITES COM MELHOR DOP PARA DIA

17/11/93

Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.	Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.
15m	5	4.992	24 5 20 29	12h 15m	6	3.280	27 26 31 15
30m	5	4.305	13 5 7 18	12h 30m	6	3.641	2 28 31 15
45m	6	3.603	27 13 7 26	12h 45m	6	2.856	23 1 22 28
1h	6	2.793	31 19 2 26	13h	6	3.184	25 1 22 20
1h 15m	6	2.679	31 21 1 27	13h 15m	6	3.003	25 29 17 20
1h 30m	6	2.544	22 21 28 14	13h 30m	5	3.496	24 16 13 20
1h 45m	6	3.424	25 1 28 14	13h 45m	5	4.129	5 24 13 7
2h	6	7.554	16 22 25 24	14h	6	3.010	26 27 9 7
2h 15m	6	3.435	16 26 17 24	14h 15m	6	2.346	21 15 13 31
2h 30m	5	3.482	26 13 24 20	14h 30m	6	2.376	1 2 31 29
2h 45m	5	5.658	5 13 9 7	14h 45m	6	2.560	15 18 22 31
3h	6	3.506	13 2 1 7	15h	5	3.602	28 22 19 17
3h 15m	6	3.226	29 15 14 7	15h 15m	4	6.527	28 16 22 17
3h 30m	6	3.059	29 19 14 28	15h 30m	6	3.238	16 20 22 17
3h 45m	6	3.536	17 31 19 28	15h 45m	6	4.118	24 20 9 13
4h	6	2.603	17 23 26 19	16h	5	2.604	24 1 7 13
4h 15m	6	2.648	23 26 22 20	16h 15m	5	2.761	2 15 7 13
4h 30m	6	5.275	5 21 9 20	16h 30m	6	3.649	2 18 15 7
4h 45m	5	4.544	1 5 24 9	16h 45m	6	3.074	2 18 19 28
5h	5	4.222	7 24 29 14	17h	6	3.321	21 27 31 28
5h 15m	5	3.158	7 2 14 18	17h 15m	6	3.071	22 23 26 28
5h 30m	6	4.025	7 31 2 19	17h 30m	6	2.713	22 17 1 25
5h 45m	6	4.616	31 23 19 27	17h 45m	5	3.473	20 24 1 25
6h	6	2.455	31 17 21 22	18h	5	6.860	5 20 24 29
6h 15m	5	2.774	1 25 17 22	18h 15m	5	6.295	5 18 24 16
6h 30m	4	3.786	1 25 20 22	18h 30m	5	4.571	2 7 27 16
6h 45m	5	3.300	20 5 29 24	18h 45m	6	3.490	2 26 7 15
7h	5	3.638	20 5 18 24	19h	6	3.727	2 21 28 31
7h 15m	6	3.409	7 2 5 27	19h 15m	6	3.016	22 21 14 28
7h 30m	6	2.627	9 2 15 27	19h 30m	6	3.842	1 31 28 29
7h 45m	6	2.682	31 2 21 27	19h 45m	6	6.785	22 17 20 29
8h	6	2.909	31 28 21 14	20h	6	2.802	22 5 16 17
8h 15m	6	3.051	25 31 29 18	20h 15m	6	2.634	9 26 20 24
8h 30m	6	2.924	17 28 22 18	20h 30m	5	4.353	9 5 2 26
8h 45m	4	6.581	20 17 5 23	20h 45m	5	3.283	9 14 15 7
9h	5	7.949	20 23 9 16	21h	6	2.825	1 2 15 31

(Continua)

TABELA 5.1: CONTINUAÇÃO

9h 15m	4	2.540	20 9 7 26	21h 15m	6	3.151	29 18 15 28
9h 30m	5	6.574	2 5 9 14	21h 30m	6	5.137	29 22 18 28
9h 45m	4	4.243	2 7 15 14	21h 45m	6	4.267	17 19 31 28
10h	6	2.722	2 19 29 15	22h	6	2.773	22 26 23 20
10h 15m	6	3.539	28 22 18 27	22h 15m	4	4.679	1 9 21 20
10h 30m	6	2.723	28 19 17 21	22h 30m	6	4.494	1 5 9 24
10h 45m	6	4.067	28 23 26 21	22h 45m	5	3.274	5 29 7 24
11h	6	2.656	23 25 9 1	23h	6	3.167	2 18 7 14
11h 15m	5	2.968	20 25 9 13	23h 15m	6	4.710	31 18 7 27
11h 30m	5	3.110	20 7 29 13	23h 30m	6	2.765	2 31 15 28
11h 45m	5	2.846	2 7 29 16	23h 45m	6	2.655	17 31 22 21
12h	5	2.365	27 18 31 16				

A Tabela 5.2 mostra o conjunto de quatro satélites que dentre os visíveis apresentam melhor geometria, o número de satélites visíveis para cada instante e o valor de GDOP para cada conjunto, no dia 19/11/93. O valor médio de GDOP para essa data é de 3.531.

**TABELA 5.2: CONJUNTO DE SATÉLITES COM MELHOR DOP PARA DIA
19/11/93**

Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.	Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.
15m	6	3.139	23 22 31 28	12h 15m	5	4.201	5 13 24 29
30m	5	3.396	25 22 21 1	12h 30m	5	4.516	5 7 13 16
45m	6	2.293	25 24 1 29	12h 45m	6	3.045	7 13 19 26
1h	5	3.457	13 24 20 18	13h	6	3.080	2 27 21 26
1h 15m	5	4.535	16 24 5 26	13h 15m	6	3.410	2 28 21 31
1h 30m	6	3.262	13 9 7 27	13h 30m	6	3.255	1 29 28 31
1h 45m	6	2.608	15 7 27 21	13h 45m	6	2.183	14 17 22 18
2h	6	2.364	15 7 1 14	14h	6	4.578	25 16 22 24
2h 15m	6	2.995	15 29 31 1	14h 15m	6	3.690	5 17 16 24
2h 30m	6	3.211	18 28 22 25	14h 30m	6	2.561	9 20 26 24
2h 45m	6	3.073	18 17 22 25	14h 45m	6	3.329	5 13 26 2
3h	6	3.210	23 17 26 22	15h	5	5.127	9 13 7 15
3h 15m	6	2.893	13 5 26 21	15h 15m	6	3.609	15 14 7 31
3h 30m	5	4.428	13 5 1 20	15h 30m	6	2.979	14 28 19 29
3h 45m	5	3.262	14 5 2 7	15h 45m	6	3.722	17 31 28 19
4h	5	5.337	18 15 29 7	16h	5	4.404	17 21 28 22

(Continua)

TABELA 5.2: CONTINUAÇÃO

4h 15m	6	3.943	18 31 29 27	16h 15m	6	2.624	23 20 26 22
4h 30m	6	2.721	28 18 17 27	16h 30m	6	2.687	23 25 20 9
4h 45m	6	3.046	28 21 31 26	16h 45m	5	3.051	5 13 25 24
5h	6	3.069	28 21 17 1	17h	5	3.375	13 7 24 29
5h 15m	6	2.479	22 9 25 1	17h 15m	6	2.736	16 7 19 29
5h 30m	5	14.573	20 24 25 14	17h 30m	6	3.848	2 31 7 19
5h 45m	5	4.428	16 5 29 7	17h 45m	6	2.387	26 31 15 21
6h	5	3.426	19 16 2 7	18h	5	3.529	22 31 28 23
6h 15m	6	3.304	19 16 2 7	18h 15m	6	2.643	22 23 1 25
6h 30m	6	2.960	19 2 23 31	18h 30m	6	2.532	1 20 14 25
6h 45m	5	3.691	21 15 22 28	18h 45m	5	2.883	24 5 18 25
7h	6	3.477	25 22 28 31	19h	5	2.640	24 20 7 16
7h 15m	6	2.299	25 20 28 29	19h 15m	6	3.472	2 27 5 7
7h 30m	6	5.105	25 17 20 18	19h 30m	6	2.340	2 27 26 21
7h 45m	5	3.990	26 20 24 16	19h 45m	6	2.674	2 15 14 21
8h	5	2.599	26 9 7 16	20h	5	3.637	1 31 14 28
8h 15m	6	2.974	26 9 7 15	20h 15m	6	3.288	29 31 25 18
8h 30m	5	3.079	1 14 7 15	20h 30m	6	2.969	22 17 25 18
8h 45m	6	2.785	14 28 2 15	20h 45m	6	2.810	22 17 23 26
9h	6	5.082	22 31 18 19	21h	6	3.547	20 21 17 26
9h 15m	5	7.265	28 22 17 19	21h 15m	5	3.280	20 1 26 5
9h 30m	6	2.293	28 17 26 23	21h 30m	6	2.640	2 15 7 5
9h 45m	6	3.911	5 17 26 23	21h 45m	6	4.132	2 29 15 14
10h	5	3.827	20 5 1 24	22h	6	2.508	2 18 27 15
10h 15m	5	5.042	5 7 14 24	22h 15m	6	3.707	31 29 27 28
10h 30m	5	4.657	18 7 2 14	22h 30m	5	3.527	22 17 27 28
10h 45m	5	3.524	18 29 7 27	22h 45m	6	4.050	22 23 26 28
11h	6	2.796	18 28 19 2	23h	6	2.511	5 23 25 1
11h 15m	6	6.063	23 28 19 27	23h 15m	5	3.183	24 9 25 20
11h 30m	6	3.889	28 21 17 22	23h 30m	5	3.012	13 29 7 20
11h 45m	6	2.387	23 20 1 22	23h 45m	5	3.944	24 2 7 18
12h	5	3.447	20 1 24 25				

A Tabela 5.3 mostra o conjunto de quatro satélites que dentre os visíveis apresentam melhor geometria, o número de satélites visíveis para cada instante e o valor de GDOP para cada conjunto, no dia 20/11/93. O valor médio de GDOP para essa data é de 3.602.

TABELA 5.3: CONJUNTO DE SATÉLITES COM MELHOR DOP PARA DIA

20/11/93

Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.	Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.
15m	6	3.148	2 19 23 31	12h 15m	5	2.689	14 20 1 25
30m	6	3.524	27 28 23 31	12h 30m	5	3.416	5 20 29 24
45m	6	2.797	21 14 28 25	12h 45m	5	3.550	20 16 18 24
1h	6	3.463	29 1 22 25	13h	6	5.415	7 2 16 13
1h 15m	6	3.022	5 17 20 18	13h 15m	6	2.736	27 2 15 9
1h 30m	5	3.637	24 13 20 16	13h 30m	6	2.650	27 2 21 31
1h 45m	6	2.662	26 9 7 16	13h 45m	6	3.101	28 2 14 31
2h	6	4.088	5 26 9 2	14h	6	3.025	18 29 25 31
2h 15m	6	4.505	1 14 9 2	14h 15m	6	2.819	18 28 22 17
2h 30m	5	2.831	28 14 15 2	14h 30m	5	2.844	20 16 25 17
2h 45m	6	2.658	14 19 29 22	14h 45m	6	3.522	20 26 24 5
3h	6	3.579	19 17 29 22	15h	6	3.549	26 13 23 5
3h 15m	6	2.172	28 23 26 17	15h 15m	5	3.394	2 13 7 5
3h 30m	5	4.022	21 23 26 17	15h 30m	5	3.347	2 15 13 7
3h 45m	6	3.098	13 23 1 5	15h 45m	6	2.634	2 15 29 27
4h	2	0	-----	16h	6	4.287	18 29 27 28
4h 15m	4	6.879	7 2 29 14	16h 15m	6	3.588	19 31 23 28
4h 30m	5	3.695	7 18 29 27	16h 30m	6	3.813	21 26 23 28
4h 45m	6	2.939	18 28 2 19	16h 45m	6	4.250	22 21 17 20
5h	6	2.880	22 28 23 27	17h	5	5.363	24 1 9 20
5h 15m	6	3.379	31 22 28 17	17h 15m	5	7.820	5 7 29 20
5h 30m	5	3.037	22 25 1 23	17h 30m	5	4.273	24 2 7 18
5h 45m	5	2.688	1 22 25 5	17h 45m	6	3.481	19 2 7 16
6h	5	2.675	16 29 24 20	18h	6	3.168	27 15 31 26
6h 15m	5	5.565	16 18 5 24	18h 15m	6	3.572	28 23 15 31
6h 30m	6	2.764	16 7 18 26	18h 30m	6	3.287	28 23 15 1
6h 45m	6	2.903	31 19 26 2	18h 45m	6	3.144	29 22 25 1
7h	6	2.808	21 27 31 1	19h	6	2.951	29 17 20 25
7h 15m	5	3.909	14 28 31 1	19h 15m	4	5.987	5 20 16 24
7h 30m	6	3.380	25 14 28 1	19h 30m	5	4.420	5 26 7 16
7h 45m	6	5.613	25 20 22 29	19h 45m	6	3.803	5 26 9 2
8h	5	4.589	24 20 22 16	20h	6	3.734	15 26 7 9
8h 15m	6	3.149	9 20 26 16	20h 15m	6	3.030	15 7 1 14
8h 30m	6	2.236	9 20 26 2	20h 30m	6	3.052	19 29 14 22
8h 45m	5	4.673	1 9 14 7	20h 45m	6	2.459	19 17 25 22
9h	6	3.128	29 15 14 7	21h	6	2.192	23 16 18 22

(Continua)

TABELA 5.3: CONTINUAÇÃO

9h 15m	6	2.819	29 2 18 28	21h 15m	6	2.909	17 26 16 21
9h 30m	6	4.372	29 27 18 28	21h 30m	6	4.292	23 9 1 20
9h 45m	6	2.530	23 31 22 16	21h 45m	6	2.876	7 24 5 20
10h	6	2.610	23 22 26 20	22h	4	3.528	7 2 14 5
10h 15m	6	5.330	5 23 21 20	22h 15m	6	3.763	7 2 15 29
10h 30m	4	11.601	5 1 9 20	22h 30m	6	3.877	31 18 27 16
10h 45m	4	4.254	5 7 29 24	22h 45m	5	2.938	17 22 27 28
11h	5	3.285	7 27 29 16	23h	6	3.092	23 22 26 28
11h 15m	6	4.029	2 7 19 16	23h 15m	6	2.716	17 22 1 25
11h 30m	6	3.495	21 26 31 19	23h 30m	5	2.641	5 22 1 25
11h 45m	6	2.492	21 31 17 22	23h 45m	5	7.653	5 20 29 24
12h	6	2.647	23 1 25 22				

A Tabela 5.4 mostra o conjunto de quatro satélites que dentre os visíveis apresentam melhor geometria, o número de satélites visíveis para cada instante e o valor de GDOP para cada conjunto, no dia 03/01/94. O valor médio de GDOP para essa data é de 3.448.

**TABELA 5.4: CONJUNTO DE SATÉLITES COM MELHOR DOP PARA DIA
03/01/94**

Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.	Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.
15m	6	3.517	28 17 19 31	12h 15m	6	3.268	1 25 15 5
30m	6	2.519	28 29 17 25	12h 30m	6	2.270	24 7 9 20
45m	6	2.805	1 23 25 15	12h 45m	5	2.728	24 26 2 13
1h	6	3.080	1 21 5 15	13h	6	3.239	24 26 16 19
1h 15m	6	3.570	1 13 5 24	13h 15m	5	2.733	17 2 19 31
1h 30m	5	5.778	13 5 20 24	13h 30m	5	3.858	27 22 28 31
1h 45m	6	2.940	27 16 9 26	13h 45m	6	3.023	15 21 29 31
2h	5	3.544	27 2 28 26	14h	6	3.281	15 21 25 29
2h 15m	6	2.462	15 19 28 2	14h 15m	5	3.895	1 14 5 20
2h 30m	6	2.510	22 15 18 31	14h 30m	5	4.578	1 9 24 20
2h 45m	6	2.745	22 25 18 14	14h 45m	6	2.601	9 26 16 20
3h	5	2.770	22 25 24 14	15h	6	3.297	23 26 16 2
3h 15m	6	2.872	1 24 20 17	15h 15m	6	3.311	19 23 31 2
3h 30m	6	3.175	23 9 16 20	15h 30m	5	7.218	27 19 15 31
3h 45m	6	2.955	9 5 2 17	15h 45m	6	3.191	13 19 15 29
4h	6	2.856	27 2 26 31	16h	5	3.441	24 22 29 14

Continua

TABELA 5.4: CONTINUAÇÃO

4h 15m	6	3.505	15 27 2 13	16h 15m	6	3.756	20 29 17 25
4h 30m	6	3.107	18 14 13 19	16h 30m	6	2.113	17 22 1 5
4h 45m	6	2.808	22 18 14 24	16h 45m	6	3.524	23 1 20 9
5h	6	2.681	22 18 17 28	17h	6	2.712	23 15 26 9
5h 15m	6	2.834	23 22 25 17	17h 15m	6	2.938	7 15 26 9
5h 30m	6	3.563	23 5 17 1	17h 30m	5	6.533	13 7 24 27
5h 45m	6	2.784	7 20 9 1	17h 45m	4	9.190	16 18 24 27
6h	5	3.609	5 7 13 2	18h	6	3.237	17 18 22 31
6h 15m	5	4.329	7 24 27 2	18h 15m	6	2.634	17 25 29 28
6h 30m	5	3.498	16 18 24 27	18h 30m	6	3.332	21 25 22 1
6h 45m	6	3.745	17 18 28 19	18h 45m	6	3.151	21 15 5 1
7h	6	3.377	29 19 22 31	19h	6	3.740	7 9 5 20
7h 15m	6	3.861	29 15 21 22	19h 15m	5	5.033	9 5 24 20
7h 30m	6	2.626	14 21 25 20	19h 30m	5	4.534	2 16 24 26
7h 45m	5	9.175	13 25 20 1	19h 45m	6	4.077	17 19 2 27
8h	5	3.532	13 5 9 1	20h	5	2.681	31 18 27 26
8h 15m	6	2.900	24 2 16 17	20h 15m	5	2.610	31 15 18 22
8h 30m	6	3.083	23 16 27 26	20h 30m	6	3.006	14 25 18 22
8h 45m	6	2.740	31 15 27 26	20h 45m	6	2.500	25 1 13 22
9h	6	3.272	31 18 15 19	21h	5	3.331	25 1 20 24
9h 15m	6	3.424	14 18 15 22	21h 15m	6	3.087	9 1 20 24
9h 30m	5	4.057	18 25 22 29	21h 30m	6	2.541	9 5 26 21
9h 45m	6	2.053	25 1 5 29	21h 45m	6	2.728	9 2 7 31
10h	6	2.802	17 25 5 9	22h	6	3.855	15 19 7 31
10h 15m	6	3.839	17 23 1 5	22h 15m	6	3.349	18 19 14 13
10h 30m	6	6.001	26 23 2 9	22h 30m	6	2.931	18 14 24 22
10h 45m	6	2.717	15 27 7 26	22h 45m	6	2.405	25 28 24 22
11h	5	4.626	13 24 27 18	23h	6	2.996	20 25 28 22
11h 15m	5	3.368	22 16 27 18	23h 15m	6	3.900	23 5 17 1
11h 30m	6	2.563	22 25 29 19	23h 30m	6	2.677	20 15 21 9
11h 45m	5	3.637	22 25 29 17	23h 45m	6	2.918	13 2 5 26
12h	6	3.419	1 25 23 17				

A Tabela 5.5 mostra o conjunto de quatro satélites que dentre os visíveis apresentam melhor geometria, o número de satélites visíveis para cada instante e o valor de GDOP para cada conjunto, no dia 04/01/94. O valor médio de GDOP para essa data é de 3.746.

TABELA 5.5: CONJUNTO DE SATÉLITES COM MELHOR DOP PARA DIA

04/01/94

Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.	Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.
15m	5	3.889	19 2 27 16	12h 15m	6	2.870	25 31 22 23
30m	5	4.564	18 19 28 16	12h 30m	6	3.315	1 15 21 5
45m	6	2.500	28 29 19 17	12h 45m	6	4.108	9 20 7 5
1h	6	4.275	22 29 21 25	13h	4	3.790	9 20 13 24
1h 15m	6	2.771	14 20 21 25	13h 15m	5	4.639	2 9 16 24
1h 30m	6	2.898	1 5 14 9	13h 30m	6	3.373	2 27 17 16
1h 45m	5	4.654	13 5 9 20	13h 45m	6	2.233	27 18 17 28
2h	6	2.802	16 5 9 17	14h	5	3.105	22 15 31 27
2h 15m	6	2.955	16 26 9 27	14h 15m	6	2.909	22 18 15 14
2h 30m	6	5.053	2 28 19 27	14h 30m	6	2.901	22 20 25 29
2h 45m	6	3.251	15 18 19 31	14h 45m	5	3.390	20 1 25 24
3h	6	3.502	15 22 18 14	15h	5	7.237	20 1 17 5
3h 15m	5	3.724	22 18 25 29	15h 15m	6	3.144	9 26 5 23
3h 30m	6	2.153	1 24 25 14	15h 30m	6	3.596	2 26 17 23
3h 45m	6	2.960	9 25 5 17	15h 45m	6	3.353	7 2 26 31
4h	6	2.706	1 9 26 5	16h	5	2.908	7 19 18 14
4h 15m	6	5.169	21 2 9 7	16h 15m	4	6.226	22 19 18 14
4h 30m	6	2.545	15 19 26 7	16h 30m	6	2.377	29 25 14 24
4h 45m	5	3.347	14 2 13 27	16h 45m	5	4.145	22 25 17 28
5h	5	7.025	14 29 19 27	17h	6	5.114	21 23 25 5
5h 15m	6	2.701	22 24 18 28	17h 15m	6	4.708	23 1 20 9
5h 30m	6	3.007	22 25 17 18	17h 30m	6	2.562	15 7 9 26
5h 45m	6	2.585	1 20 25 28	17h 45m	5	3.324	2 13 9 26
6h	6	5.642	1 9 23 5	18h	5	2.808	16 2 27 18
6h 15m	6	3.655	1 20 7 5	18h 15m	6	2.828	16 29 24 27
6h 30m	5	2.836	9 7 24 26	18h 30m	6	2.596	29 19 28 17
6h 45m	5	3.011	2 9 24 27	18h 45m	4	15.084	22 29 28 25
7h	6	2.486	2 18 17 27	19h	6	2.908	14 1 21 25
7h 15m	6	3.091	22 18 31 27	19h 15m	6	19.295	20 1 5 25
7h 30m	6	3.465	25 28 15 29	19h 30m	5	3.653	13 1 5 24
7h 45m	6	2.893	22 25 1 29	19h 45m	5	3.258	9 16 26 5
8h	6	4.545	20 25 1 13	20h	6	2.825	9 16 26 27
8h 15m	5	2.795	20 9 1 13	20h 15m	6	3.876	19 16 28 27
8h 30m	6	2.779	20 9 17 16	20h 30m	6	3.166	2 15 28 31
8h 45m	6	3.253	26 16 2 23	20h 45m	6	2.543	22 18 15 31
9h	6	2.510	31 7 2 23	21h	5	3.209	22 18 25 14

(Continua)

Tabela 5.5: CONTINUAÇÃO

9h 15m	6	3.772	27 31 7 2	21h 15m	6	2.363	1 29 25 24
9h 30m	6	4.473	15 27 29 19	21h 30m	6	2.939	5 20 1 24
9h 45m	5	4.088	22 14 18 19	21h 45m	6	2.562	5 1 26 9
10h	6	2.986	14 29 20 25	22h	6	2.745	5 21 2 9
10h 15m	6	2.322	22 17 1 5	22h 15m	6	2.749	27 15 2 9
10h 30m	6	3.923	23 17 1 5	22h 30m	5	3.028	14 27 15 13
10h 45m	6	3.709	2 1 5 21	22h 45m	5	5.704	14 27 19 29
11h	6	3.058	15 9 7 13	23h	5	3.675	22 27 18 29
11h 15m	5	4.904	2 13 27 19	23h 15m	6	3.050	22 17 28 18
11h 30m	5	3.991	29 24 27 18	23h 30m	5	3.034	21 25 28 20
11h 45m	6	3.650	29 22 27 18	23h 45m	6	3.166	21 25 9 20
12h	6	2.649	25 28 18 17				

A Tabela 5.6 mostra o conjunto de quatro satélites que dentre os visíveis apresentam melhor geometria, o número de satélites visíveis para cada instante e o valor de GDOP para cada conjunto, no dia 05/01/94. O valor médio de GDOP para essa data é de 3.386.

**TABELA 5.6: CONJUNTO DE SATÉLITES COM MELHOR DOP PARA DIA
05/01/94**

Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.	Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.
15m	5	2.773	2 24 5 13	12h 15m	6	3.635	29 19 17 22
30m	5	3.538	2 27 24 26	12h 30m	6	3.743	29 28 17 18
45m	6	2.610	2 27 18 26	12h 45m	6	2.569	25 20 15 22
1h	6	2.985	18 17 19 28	13h	6	7.362	25 1 20 13
1h 15m	6	3.437	31 29 22 19	13h 15m	5	3.553	1 24 5 13
1h 30m	6	3.190	21 15 25 14	13h 30m	5	3.351	16 5 26 9
1h 45m	6	6.235	1 20 25 14	13h 45m	6	2.863	16 27 26 9
2h	6	3.623	1 13 20 24	14h	6	3.773	28 27 16 26
2h 15m	6	2.485	16 17 20 9	14h 15m	6	2.692	2 28 15 19
2h 30m	6	3.049	2 26 9 23	14h 30m	6	2.706	29 22 31 15
2h 45m	5	2.791	16 2 26 31	14h 45m	5	2.797	14 22 25 18
3h	6	3.423	7 27 31 15	15h	5	3.003	29 24 22 25
3h 15m	6	4.184	19 7 18 14	15h 15m	6	2.802	17 24 1 20
3h 30m	5	3.672	19 18 22 14	15h 30m	6	2.394	17 16 1 23
3h 45m	6	3.246	25 29 20 14	15h 45m	6	2.937	9 5 26 21
4h	6	2.332	25 5 22 1	16h	6	2.660	2 9 15 27

(Continua)

TABELA 5.6: CONTINUAÇÃO

4h 15m	6	3.763	5 23 17 1	16h 15m	5	3.605	7 13 15 27
4h 30m	6	3.081	9 5 26 1	16h 30m	6	2.893	24 13 14 19
4h 45m	6	2.943	9 7 15 13	16h 45m	6	2.682	18 22 24 14
5h	5	4.003	13 27 24 2	17h	6	2.815	18 22 17 28
5h 15m	5	2.889	18 13 27 2	17h 15m	6	2.828	20 21 25 28
5h 30m	6	3.116	22 18 24 29	17h 30m	6	4.217	1 21 25 5
5h 45m	6	2.882	22 18 31 17	17h 45m	6	2.981	20 1 9 7
6h	5	2.943	17 31 25 21	18h	5	2.584	5 2 13 26
6h 15m	6	4.636	1 25 21 5	18h 15m	5	2.482	9 2 16 24
6h 30m	6	3.477	1 21 13 5	18h 30m	6	3.723	19 2 27 26
6h 45m	4	5.840	24 9 13 5	18h 45m	6	3.282	19 17 18 28
7h	5	3.115	2 24 13 16	19h	6	5.198	19 29 22 28
7h 15m	6	2.998	2 17 27 16	19h 15m	6	3.057	22 25 15 14
7h 30m	6	2.691	18 28 27 16	19h 30m	6	3.606	20 25 15 14
7h 45m	6	3.765	18 19 22 15	19h 45m	6	2.909	20 9 25 13
8h	6	3.241	18 14 31 15	20h	5	4.212	20 5 9 13
8h 15m	5	2.542	1 22 25 13	20h 15m	6	3.321	17 5 9 16
8h 30m	5	2.869	1 20 25 13	20h 30m	6	2.868	17 27 16 26
8h 45m	6	3.756	1 20 24 9	20h 45m	6	2.534	2 19 7 28
9h	6	2.892	23 26 5 9	21h	6	4.444	14 27 19 18
9h 15m	6	2.657	26 16 21 2	21h 15m	5	4.254	14 29 13 22
9h 30m	6	2.987	19 26 31 2	21h 30m	5	4.328	14 29 24 22
9h 45m	6	2.562	19 14 18 2	21h 45m	6	2.326	17 1 24 25
10h	5	3.451	19 14 18 24	22h	6	2.518	17 5 21 25
10h 15m	6	2.483	25 29 14 24	22h 15m	6	4.147	17 1 5 23
10h 30m	5	7.599	29 17 22 20	22h 30m	5	4.526	15 2 26 9
10h 45m	6	4.449	1 17 5 23	22h 45m	5	4.962	7 26 27 13
11h	6	3.864	9 1 23 20	23h	5	2.669	14 18 27 13
11h 15m	6	2.459	9 21 26 15	23h 15m	6	3.457	29 18 27 22
11h 30m	5	2.906	9 13 26 27	23h 30m	6	3.057	19 28 22 17
11h 45m	5	2.362	13 16 27 18	23h 45m	6	3.510	29 25 28 17
12h	5	4.079	24 16 27 18				

A Tabela 5.7 mostra o conjunto de quatro satélites que dentre os visíveis apresentam melhor geometria, o número de satélites visíveis para cada instante e o valor de GDOP para cada conjunto, no dia 21/01/94. O valor médio de GDOP para essa data é de 3.603.

TABELA 5.7: CONJUNTO DE SATÉLITES COM MELHOR DOP PARA DIA

21/01/94

Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.	Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.
15m	6	3.171	25 13 20 9	12h 15m	5	3.708	2 19 27 17
30m	6	4.438	5 24 13 1	12h 30m	6	2.92	2 19 18 28
45m	5	3.028	24 16 23 9	12h 45m	6	4.023	31 18 15 7
1h	6	3.497	27 16 26 23	13h	6	3.104	14 25 15 13
1h 15m	6	2.625	27 7 31 26	13h 15m	6	3.041	1 25 20 13
1h 30m	6	4.653	27 29 18 19	13h 30m	5	3.647	1 25 20 24
1h 45m	5	2.449	13 25 29 15	13h 45m	6	2.452	1 5 21 17
2h	5	2.97	25 29 24 22	14h	6	3.233	26 23 28 17
2h 15m	5	3.265	17 1 25 22	14h 15m	6	3.077	2 27 9 31
2h 30m	5	5.138	1 21 28 9	14h 30m	6	2.523	26 13 15 7
2h 45m	6	2.77	17 1 26 23	14h 45m	6	3.125	19 14 18 7
3h	6	4.59	7 2 21 9	15h	5	3.565	19 29 22 24
3h 15m	6	3.307	7 13 26 19	15h 15m	6	2.809	25 18 22 28
3h 30m	5	4.195	16 13 24 19	15h 30m	5	2.687	25 29 17 1
3h 45m	5	2.978	18 24 27 22	15h 45m	6	3.027	25 1 31 23
4h	6	2.64	25 19 28 22	16h	5	3.221	15 21 9 5
4h 15m	6	3.018	1 29 28 22	16h 15m	5	5.351	9 13 7 5
4h 30m	5	5.837	1 21 25 31	16h 30m	5	3.868	2 13 26 24
4h 45m	6	2.854	1 7 9 23	16h 45m	6	2.804	16 18 27 26
5h	5	4.184	7 5 13 20	17h	6	3.584	29 19 17 28
5h 15m	5	3.271	24 16 13 26	17h 15m	6	4.785	29 19 22 28
5h 30m	5	3.599	24 16 19 26	17h 30m	6	3.663	29 15 14 28
5h 45m	6	3.362	28 16 19 18	17h 45m	6	3.094	21 14 25 1
6h	6	3.691	27 28 31 29	18h	6	3.334	5 25 9 13
6h 15m	6	3.498	14 15 29 19	18h 15m	6	4.182	5 24 13 1
6h 30m	5	3.517	14 15 25 7	18h 30m	6	3.379	16 23 9 26
6h 45m	5	5.197	20 13 25 1	18h 45m	6	3.869	16 23 27 26
7h	6	3.347	24 20 9 25	19h	6	4.237	16 27 31 26
7h 15m	6	2.407	16 23 9 1	19h 15m	6	4.688	19 27 29 18
7h 30m	6	2.565	16 26 17 28	19h 30m	6	3.774	13 15 29 18
7h 45m	6	3.062	7 27 31 26	19h 45m	5	8.809	20 25 14 29
8h	6	3.541	2 19 15 18	20h	6	2.46	1 25 29 24
8h 15m	5	4.707	14 13 19 18	20h 15m	6	2.713	1 20 21 17
8h 30m	5	3.567	14 29 24 25	20h 30m	6	4.935	1 9 28 23
8h 45m	6	2.089	14 1 20 25	20h 45m	6	3.793	2 26 21 7
9h	6	3.095	28 23 17 20	21h	6	2.742	15 26 13 7

(Continua)

TABELA 5.7: CONTINUAÇÃO

9h 15m	6	2.747	21 17 9 31	21h 15m	6	3.433	18 13 7 27
9h 30m	6	2.86	21 5 2 9	21h 30m	5	2.998	18 29 16 27
9h 45m	5	5.428	13 2 9 7	21h 45m	6	2.778	25 19 22 24
10h	5	3.698	26 13 19 24	22h	6	3.07	31 17 29 28
10h 15m	5	9.431	18 27 19 16	22h 15m	6	4.887	21 1 15 28
10h 30m	5	5.426	18 22 28 19	22h 30m	6	3.059	9 1 15 23
10h 45m	6	3.072	18 28 31 25	22h 45m	6	3.272	9 7 1 20
11h	6	2.969	15 21 29 25	23h	5	2.982	5 26 16 24
11h 15m	6	2.689	7 1 20 25	23h 15m	5	4.04	19 26 16 24
11h 30m	6	3.631	5 1 21 13	23h 30m	6	2.982	27 17 18 26
11h 45m	5	3.107	9 26 20 13	23h 45m	6	4.583	27 29 18 28
12h	6	2.784	9 26 27 17				

A Tabela 5.8 mostra o conjunto de quatro satélites que dentre os visíveis apresentam melhor geometria, o número de satélites visíveis para cada instante e o valor de GDOP para cada conjunto, no dia 22/01/94. O valor médio de GDOP para essa data é de 3.894.

**TABELA 5.8: CONJUNTO DE SATÉLITES COM MELHOR DOP PARA DIA
22/01/94**

Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.	Tempo	Nº sat. visíveis	Valor de GDOP	Conjunto de Sat.
15m	6	3.13	14 15 7 1	12h 15m	6	3.341	9 16 23 26
30m	6	7.647	20 13 25 1	12h 30m	5	4.352	16 23 26 27
45m	6	3.388	9 20 24 25	12h 45m	6	4.222	31 16 26 27
1h	6	2.423	9 16 23 5	13h	6	3.574	19 18 15 2
1h 15m	6	2.866	9 23 2 26	13h 15m	6	3.773	29 13 18 15
1h 30m	6	2.905	31 16 19 2	13h 30m	4	5.772	13 18 25 14
1h 45m	6	3.764	18 19 2 15	13h 45m	6	2.337	24 1 25 14
2h	6	4.502	18 29 13 15	14h	6	2.476	20 22 1 21
2h 15m	5	3.863	18 22 29 25	14h 15m	6	4.582	17 28 9 23
2h 30m	6	3.568	20 29 25 14	14h 30m	6	3.02	2 9 17 21
2h 45m	6	3.048	20 22 1 25	14h 45m	6	2.857	2 9 15 27
3h	6	3.459	28 1 9 17	15h	4	3.019	18 19 2 13
3h 15m	6	2.827	2 21 9 5	15h 15m	5	3.535	18 19 29 13
3h 30m	6	3.51	13 2 26 5	15h 30m	6	2.926	24 18 14 22
3h 45m	5	3.717	13 7 26 24	15h 45m	6	2.994	31 28 17 29
4h	5	3.396	13 18 24 27	16h	6	2.785	25 31 21 22

(Continua)

TABELA 5.8: CONTINUAÇÃO

4h 15m	6	3.334	29 22 18 24	16h 15m	6	3.426	9 15 23 1
4h 30m	6	3.082	25 18 31 28	16h 30m	6	3.603	26 9 13 21
4h 45m	6	3.029	29 15 25 21	16h 45m	5	4.953	26 13 24 5
5h	6	2.704	1 25 14 5	17h	6	2.844	9 24 27 16
5h 15m	6	3.627	1 20 7 5	17h 15m	6	2.752	26 17 18 16
5h 30m	5	3.658	24 20 9 13	17h 30m	6	4.75	19 27 18 22
5h 45m	5	2.972	17 9 27 16	17h 45m	6	3.403	31 19 15 28
6h	6	2.909	2 17 19 16	18h	5	3.129	31 14 15 25
6h 15m	5	3.026	2 18 19 28	18h 15m	6	21.775	14 1 20 25
6h 30m	6	3.365	15 18 19 14	18h 30m	6	3.407	9 5 1 25
6h 45m	6	3.031	15 7 14 25	18h 45m	6	2.935	24 9 26 23
7h	5	6.444	29 20 13 14	19h	5	3.959	16 9 26 23
7h 15m	6	3.096	24 1 20 14	19h 15m	6	3.324	16 2 26 31
7h 30m	6	2.557	17 1 21 5	19h 30m	6	2.855	2 19 18 31
7h 45m	6	3.354	28 26 9 23	19h 45m	6	4.382	7 19 18 14
8h	6	3.103	27 31 26 9	20h	5	4.658	13 29 24 14
8h 15m	6	3.582	2 7 26 15	20h 15m	6	3.954	22 29 20 25
8h 30m	5	3.398	7 13 19 14	20h 30m	6	3.209	22 1 20 25
8h 45m	6	2.892	18 22 24 19	20h 45m	6	4.13	21 1 28 9
9h	5	20.219	18 22 24 29	21h	5	3.485	21 17 26 9
9h 15m	6	2.669	1 17 29 25	21h 15m	6	2.579	15 5 7 9
9h 30m	6	3.717	1 31 17 25	21h 30m	5	4.879	27 26 7 13
9h 45m	6	2.91	5 21 15 9	21h 45m	5	3.912	27 18 24 13
10h	6	3.453	13 5 2 9	22h	5	3.372	29 27 18 16
10h 15m	5	3.594	13 27 7 26	22h 15m	6	3.183	22 18 28 25
10h 30m	5	3.573	19 16 24 26	22h 30m	5	4.772	29 22 28 25
10h 45m	6	3.779	19 22 16 29	22h 45m	6	3.633	21 15 14 25
11h	6	5.842	22 28 29 18	23h	6	3.239	1 21 5 7
11h 15m	6	3.365	31 15 25 18	23h 15m	5	4.365	24 9 20 26
11h 30m	6	2.873	31 14 25 21	23h 30m	5	2.958	24 5 16 26
11h 45m	6	3.026	1 13 25 21	23h 45m	6	2.405	24 19 17 16
12h	5	3.921	5 1 13 24				

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho de iniciação científica foi verificar a precisão das efemérides dos satélites GPS e analisar a geometria dos satélites visíveis usados na determinação de órbita de satélites artificiais utilizando um receptor GPS a bordo.

Para analisar as efemérides transmitidas, utilizamos um programa que calcula a posição dos satélites GPS no sistema WGS84. A posição gerada pelo programa é comparada com as efemérides precisas (*Precise Orbit Ephemeris*) geradas pelo JPL/NASA, cuja precisão está em torno de 3 cm.

Verificamos que no dia 18 de novembro de 1993, o satélite GPS de PRN 9 não possui bons dados. Nos dias 7 de janeiro de 1998 e 08 de junho de 1998, o satélite de PRN 16 apresenta o maior erro, porém, isso não ocorre para o dia inteiro, apenas em alguns intervalos de tempo. O mesmo acontece com o satélite de PRN 25 no dia 25 de abril de 1995 e com o PRN 14 no dia 14 de março de 1996. Para os dias 24 de janeiro de 1999 e 16 de dezembro de 1999 o satélite que apresenta maior erro é o de PRN 1, mas também apenas em alguns intervalos de tempo.

Verificamos que a média do erro para estes dias ficou em torno de 4 m e o desvio padrão do erro em torno de 2.9 m, mostrando a confiabilidade do programa que será utilizado para determinação de órbita de satélites artificiais com receptor GPS a bordo.

Para analisar a geometria (DOP) de satélites GPS visíveis que foram utilizados na determinação de órbita, utilizamos um programa que calcula o GDOP para cada instante de observação. Utilizamos os dados reais do satélite Topex/Poseidon que possui um receptor GPS a bordo.

Com a finalidade de testar e compreender o cálculo do GDOP, utilizamos dados de oito dias para fornecer o melhor conjunto de satélites com a melhor geometria. Estes dados foram apresentados neste trabalho.

Como trabalho futuro, é necessário fazer uma análise da melhor geometria encontrada em relação a elevação e o azimute.

REFERÊNCIAS

Chandler, N. L.; Chinn, D. S.; Radway, Y. **Method of Computation and Orbit Accuracy** [online] <http://cddisa.gsfc.nasa.gov/926/podps/html/doc2.html>, 2000.

Dana, P. H. **Global Positioning System Overview** Department of Geography, University of Texas, Austin. [online] <http://www.utexas.edu/depts/gcraf/notes/gps/gps.html>, Julho, 1998.

Leick, A. **GPS Satellite Surveying**. Department of Surveying Engineering – University of Maine, Second Edition, Wiley-interscience Publication, 1994.

Noll, C. **Crustal Dynamics Data Information System** [online] <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/>, Dez., 1998.

Park, C.; Kim, I.; Jee, G.; Lee, J. G. Relationship Between Positioning Error Measures in Global Positioning System. **J.Guidance**, Vol. 20, n. 5, 1997.

Parkinson, B. W.; Spilker, J. J. Jr. **Global Positioning System: Theory and Applications**, Vol. I, Chapter 11, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994.

Strang, G.; Borre, K. **Linear Algebra, Geodesy and GPS**. Wellesle-Cambridge Press, Wellesley, EUA, 1997, 624p.

Van Dierendonck, A.J.; Russell, S.S.; Kopitzke, E.R.; Birnbaum, M. The GPS Navigation Message. **Navigation: Global Positioning System** .Vol. I, p55-73,1980.

Wells, D. **Guide to GPS Positioning**. Canadian GPS Associates, Fredericton, N.B., Canada, 1986.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Binning, P. Absolute and relative satellite to satellite navigation using GPS. **Tese de Doutorado**. University of Colorado, 1997.

Chiaradia, A. P.M.; Kuga, H. K.; Prado, A. F. B. A. **The Use of the Single Frequency GPS Measurements to Determine in Real Time Artificial Satellite Orbits**. Apresentado no IAF, Amsterdã – Holanda, Novembro, 1999.

Hofman-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J. **GPS Theory and Practice** Third revised edition, Springer-Verlag Wien New York, 1994.

Kaplan, E. D.; Leva, J. L. **Understanding GPS: Principles and Applications**, Chapter 7, p237-319, 1996

Leva, J. L.; Haag, M. U.; Dyke, K. V. **Understanding GPS: Principles and Applications**, Chapter 2, p15-55, 1996

Sturza, M. A. **Global Positioning System** Volume II, 1964.

Topex/Poseidon Project **Nasa Precision Orbit Ephemeris (Nasa POE)** Software Interface Specification, October, 1991.

APÊNDICE A

EXEMPLO DO ARQUIVO DE MENSAGEM DE NAVEGAÇÃO NO FORMATO RINEX

Tabela A.1: Arquivos de dados de navegação – descrição do cabeçalho

ARQUIVOS DE DADOS DE NAVEGAÇÃO – DESCRIÇÃO DO CABEÇALHO		
RÓTULO DO CABEÇALHO (Colunas 61-80)	DESCRIÇÃO	FORMATO
VERSÃO / TIPO	- versão do formato (2) - tipo do arquivo ('0' Dados de Observ)	I6,14X, A1,19X,
COMENTÁRIO	Linha(s) de comentário	A60
ION ALPHA	Parâm. Ionosféricos A0-A3 do Almanq. (pag 18 do subquadro 4)	2X,4D12.4
ION BETA	Parâm. Ionosféricos B0-B3 de almanaque	2X,4D12.4
DELTA-UTC: A0,A1,T,W	Para. Do Almaq. P. calcular tempo em UTC (pag 18 de subquadro 4) A0,A1: termos do polinômio T : tempo de referência para dados em UTC W : número de semana de referência em UTC	3X,2D19.12, 2I9
SALTOS S.	Tempo delta devido segundos saltados	I6
FIM DO CABEÇALHO	Última gravação na seção do cabeçalho	60X

Tabela A.2: Arquivos de dados de navegação – descrição dos dados gravados

ARQUIVOS DE DADOS DE NAVEGAÇÃO – DESCRIÇÃO DOS DADOS GRAVADOS		
RÓTULO DO CABEÇALHO (Colunas 61-80)	DESCRIÇÃO	FORMATO
PRN / ÉPOCA / SV REL	Número do PRN do Satélite - Época: TOC - Tempo do relógio ano (2 dígitos) mês dia hora minutos	I2,5I3, F5.1,3D19.12

segundos

- bias do relógio do SV (segundos)
- drift do relógio do SV (s/s)
- variação do drift do relógio do SV (s/s²)

ÓRBITA TRANSMITIDA - 1 - AODE (idade dos dados, efemérides) 3X,4D19.12

- Crs (metros)
- Delta n (radianos/s)
- Mo (radianos)

ÓRBITA TRANSMITIDA - 2 - Cuc (radianos) 3X,4D19.12

- Excentricidade
- Cuc (radianos)
- A1/2 (metros^{1/2})

ÓRBITA TRANSMITIDA - 3 - TOE Tempo das efemérides 3X,4D19.12
(segundos em semana GPS)

- Cic (radianos)
- Omega (radianos)
- Cis (radianos)

ÓRBITA TRANSMITIDA - 4 - io (radianos) 3X,4D19.12

- Crc (metros)
- omega (radianos)
- omega dot (radianos/s)

ÓRBITA TRANSMITIDA - 5 - IDOT (radianos/s) 3X,4D19.12

- Códigos em canal L2
- Semana GPS # (ir com TOE)
- bandeira de dados L2 P

ÓRBITA TRANSMITIDA - 6 - exatidão do SV 3X,4D19.12

- saúde do SV (MSB somente)
- TGD (segundos)
- AODC (segundos)

ÓRBITA TRANSMITIDA - 7 - Transmissão do tempo da mensagem 3X,4D19.12
(segundos em semana GPS, derivada por ex.
de conta-Z em Hand Over Word [HOW])

- reserva
- reserva
- reserva

APÊNDICE B

EXEMPLO DE ARQUIVO NO FORMATO SP3

@(#) sp3 1.3 03/08/95

```
#aV1993 1 29 0 0 0.00000000 96 d ITR91 FIT JPL
## 681 432000.00000000 900.00000000 49016 0.00000000000000
+ 19 1 2 3 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 23 24 25 26
+ 27 28 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
++ 10 11 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%c cc cc cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%c cc cc cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%f 0.0000000 0.000000000 0.00000000000 0.0000000000000000
%f 0.0000000 0.000000000 0.00000000000 0.0000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/*CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CCCCCC
/*CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CCCCCC
/*CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CCCCCC
/*CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CCCCCC
* 1993 1 29 0 0 0.00000000
P 1 14722.638510 6464.319150 -21020.844810 -8.059218
V 1 -1196.628800 26950.022500 7502.277100 0.000000
P 2 -24023.155300 -11843.563990 -1675.647210 -10.813964
V 2 -769.152700 -3247.508000 31255.023300 0.000000
P 3 2074.555420 19025.998840 17928.366120 -430.859048
V 3 -6873.932300 22421.664200 -23147.529600 0.000000
P 12 -6236.325580 13153.271260 -21964.100040 -108.945737
V 12 -27384.917100 6805.632800 12337.728800 0.000000
P 13 -13306.857100 4790.062110 -22360.523490 628.240251
V 13 9739.738600 -26864.612400 -11662.222500 0.000000
```

P 27 -19350.820260 -4003.111190 17582.690790 14.651464
V 27 19491.879100 -11990.042400 18156.904400 0.000000
P 28 13316.378500 -13959.644490 18317.660940 52.520005
V 28 258.246400 23316.420800 17208.928500 0.000000
EOF

SP3 LINE 1

col 1	symbol	#
col 2	version id	a
col 3	P/V mode flag	V
col 4-7	year start	1993
col 9-10	month start	_1
col 12-13	day of month start	29
col 15-16	hour start	_0
col 18-19	minute start	_0
col 21-31	second start	_0.00000000
col 33-39	number of epochs	__96
col 41-45	data used	__d
col 47-51	coordinate system	__ITR91
col 53-55	orbit type	__FIT
col 57-60	agency name	__JPL

SP3 LINE 2

col 1-2	symbols	##
col 4-7	GPS week	_681
col 9-23	seconds of week	_432000.00000000
col 25-38	epoch interval	__900.00000000
col 40-44	mod. julian day start	49016
col 46-60	fractional day	0.00000000000000

SP3 LINE 3

col 1-2	symbols	+_
col 5-6	number of satellites	_19
col 10-12	sat #1 id	__1
col 13-15	sat #2 id	__2
.		
.		
.		
col 58-60	sat #17 id	__26

SP3 LINES 4-7

col 1-2	symbols	+_
col 10-12	sat #18(35,52,69) id	__27
col 13-15	sat #19(36,53,70) id	__28

col 58-60 sat #34(51,68,85) id __0

SP3 LINES 8-12

col 1-2 symbols ++
col 10-12 sat #1(18,35,52,69) acc _10
col 13-15 sat #2(19,36,53,70) acc _10

col 58-60 sat #17(34,51,68,85) acc _10

SP3 LINES 13-14

col 1-2	symbols	%c
col 4-5	2 characters	cc
col 7-8	2 characters	cc
col 10-12	3 characters	ccc
col 14-16	3 characters	ccc
col 18-21	4 characters	cccc
col 23-26	4 characters	cccc
col 28-31	4 characters	cccc
col 33-36	4 characters	cccc
col 38-42	5 characters	ccccc
col 44-48	5 characters	ccccc
col 50-54	5 characters	ccccc
col 56-60	5 characters	ccccc

SP3 LINES 15-16

col 1-2	symbols	%f
col 4-13	10-column float	_0.0000000
col 15-26	12-column float	_0.000000000
col 28-41	14-column float	_0.00000000000
col 43-60	18-column float	_0.000000000000000

SP3 LINES 17-18

col 1-2	symbols	%i
col 4-7	4-column int	___0
col 9-12	4-column int	___0
col 14-17	4-column int	___0
col 19-22	4-column int	___0
col 24-29	6-column int	____0
col 31-36	6-column int	____0
col 38-43	6-column int	____0
col 45-50	6-column int	____0

col 52-60 9-column int _____ 0

SP3 LINES 19-22

col 1-2 symbols /*
col 4-60 comment CC...CC

SP3 LINE 23 (epoch header record)

col 1-2 symbols *
col 4-7 year start 1993
col 9-10 month start 1
col 12-13 day of month start 29
col 15-16 hour start 0
col 18-19 minute start 0
col 21-31 second start 0.00000000

SP3 LINE 24 (position and clock record)

col 1 symbol P
col 2-4 satellite id 1
col 5-18 x-coordinate (km) 14722.638510
col 19-32 y-coordinate (km) 6464.319150
col 33-46 z-coordinate (km) -21020.844810
col 47-60 clock (microsec) -8.059218

SP3 LINE 25 (velocity and clock record)

col 1 symbol V
col 2-4 satellite id 1
col 5-18 x-dot (decim/sec) -1196.628800
col 19-32 y-dot (decim/sec) 26950.022500
col 33-46 z-dot (decim/sec) 7502.277100
col 47-60 cl rate (10e-4 msec/sec) 0.000000

SP3 LINE 22+numeps*(numsats+1)+1 (last line)

col 1-3 symbols EOF