



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Luís Felipe Azevedo Gama Buarque


**Programa de processamento de efemérides de satélites GPS:  
aplicação em posicionamento de satélites  
e posicionamento geodésico**

Rio de Janeiro

2011

Luís Felipe Azevedo Gama Buarque

**Programa de processamento de efemérides de satélites GPS:  
aplicação em posicionamento de satélites e posicionamento geodésico**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Geomática.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Penna de Vasconcelos

Coorientador: Prof. Dr. Orlando Bernardo Filho

Rio de Janeiro

2011

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

B917 Buarque, Luís Felipe Azevedo Gama.  
Programa de processamento de efemérides de satélites GPS:  
aplicação em posicionamento de satélites e posicionamento  
geodésico / Luís Felipe Azevedo Gama Buarque. - 2011.  
281f.

Orientador: José Carlos Penna de Vasconcelos  
Coorientador: Orlando Bernardo Filho  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia de Computação. 2. Sistema de Posicionamento  
Global – Teses. 3. Satélites - Teses. I. Vasconcelos, José Carlos  
Penna de. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III.  
Título.

CDU 004.41:629.783

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Luís Felipe Azevedo Gama Buarque

**Programa de processamento de Efemérides de Satélites GPS: Aplicação em  
Posicionamento de Satélites e Posicionamento Geodésico.**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Geomática.

Aprovado em: 10 de outubro de 2011.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. José Carlos Penna de Vasconcelos (Orientador)  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. José Orlando Bernardo Filho (Coorientador)  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. Íris Pereira Escobar  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. Luiz Guimarães Barbosa  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ

Rio de Janeiro

2011

## DEDICATÓRIA

*Para a minha querida família, que pela vivência do compromisso solidário sempre me apoiou em minhas dificuldades e me suportou em minhas crises, num exemplo de amor e fé.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, sem o qual nada é possível.

À minha mãe, que me mostrou o que é ter vida. À minha madrinha, avó, padrasto, irmãos, cunhados e afilhados, meus amparos, que dividiram suas vidas comigo para que eu crescesse e me tornasse forte.

Ao Prof. Vasconcellos, orientador, amigo e exemplo, que me conduziu no desenvolvimento acadêmico, sempre iluminando e direcionando meus passos.

Ao Prof. Orlando, a quem admiro com muita estima, sempre presente em meu desenvolvimento, me apoiando numa área muito importante de meu trabalho.

Aos membros da banca pelas sugestões a serem dadas e incorporadas ao corpo do trabalho.

Aos colegas por todos os momentos agradáveis e “quebra-galhos”.

A todas as pessoas, que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização de mais essa etapa.

*“Felicidade é mais do que um sentimento, é um estado de espírito.”*

## RESUMO

Buarque, Luís F. A. G. *Programa de processamento de efemérides de satélites GPS: aplicação em posicionamento de satélites e posicionamento geodésico*. 2011. 281 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

O emprego das técnicas de posicionamento de alta-precisão e de precisão, com recurso ao Sistema de Posicionamento Global, têm se consolidado como solução definitiva para a obtenção das coordenadas de pontos sobre a superfície terrestre, nas mais diversas aplicações, em particular aquelas envolvidas na realização do cadastro em áreas urbanas e construção da base de dados associada aos Sistemas de Informação Geográfica utilizados na gestão territorial. Os receptores GPS armazenam as informações dos satélites inicialmente em formato próprio, porém a maioria dos usuários não usa esse formato para trabalho, e sim o formato RINEX. Sendo este um formato importante ao trabalhar com GPS, os softwares proprietários que geralmente acompanham os receptores e fazem a transformação de seu formato próprio para o RINEX, processam as observáveis de forma exclusiva e fechada, não permitindo alteração de seu código-fonte (o que configura uma “caixa preta”). Este trabalho visa elaborar e implementar um programa com código-fonte aberto para leitura e manipulação de arquivos de efemérides transmitidas e precisas do Sistema de Posicionamento Global – GPS e aplicá-lo ao posicionamento de satélites artificiais, e ainda realizar um estudo do comportamento do mesmo no posicionamento geodésico de pontos na superfície terrestre. Considerando-se que a posição terrestre dos satélites influencia diretamente no cálculo da posição de pontos sobre a superfície, esse estudo verifica que é possível obter coordenadas dos satélites a partir das efemérides transmitidas de forma coerente, e isto é feito utilizando-se o processamento que o programa faz ao manipular corretamente os arquivos RINEX. O programa implementado é capaz de lidar com os arquivos de formato RINEX e SP3, lendo, extraindo e utilizando informações para uma aplicação de posicionamento terrestre de satélites artificiais GPS, podendo ainda realizar outras aplicações como o posicionamento geodésico de pontos adaptando seu código-fonte para outros modelos. Esse programa poderá ser utilizado em benefício dos profissionais que atuam em diversas aplicações que envolvam o posicionamento geodésico por satélites, proporcionando flexibilidade de trabalho, pois o programa terá código-fonte aberto.

Palavras-chave: GPS. RINEX. SP3. Posicionamento de satélites.



## ABSTRACT

The use of positioning techniques for high -precision and precision, using the Global Positioning System, have been established as a permanent solution to obtain the coordinates of points on the surface, in several applications, particularly those involved in completion of the registration in urban areas and construction of the database associated with Geographic Information Systems used in land management. GPS receivers store the information of the satellites in own format initially, but most users do not use this format to work, but the RINEX format. Since this is an important format to work with GPS, the proprietary software that usually accompany the receivers and make the transformation of its own format to RINEX, the observable process in an exclusive and closed, not allowing change your source code (which sets up a "black box "). This work aims to develop and implement a program with open source code for reading and manipulating files transmitted ephemeris and precise Global Positioning System - GPS and apply it to the position of artificial satellites, and also a study of the behavior of the same in geodetic positioning of points on Earth's surface. Considering that the ground position of the satellites directly influences the calculation of the position of points on the surface, this study finds that it is possible to get coordinates from the satellite ephemeris transmitted consistently, and this is done using the processing that the program is to properly handle the RINEX files. The program implemented is capable of handling files in format RINEX and SP3: reading, extracting and using information to an application of terrestrial positioning GPS satellites, and may also perform other applications such as geodetic positioning points of adapting the source code for other models. The program may be used for the benefit of professionals working in various applications involving satellite geodetic positioning, providing flexibility to work because the program will be open source.

Keywords: GPS. RINEX. SP3. Positioning of satellite.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Princípio do efeito Doppler.....	16
Figura 2	– Geometria do efeito Doppler .....	18
Figura 3	– Rastreamento Doppler .....	19
Figura 4	– Contagem Doppler .....	21
Figura 5	– Contagem Doppler continuamente integrada.....	22
Figura 6	– Localização dos sinais GPS no espectro eletromagnético .....	24
Figura	– A dupla diferença de fase.....	25
Figura 8	– A fase da onda portadora nas estações A e B .....	27
Figura 9	– Contagem Doppler continuamente integrada.....	28
Figura 10	– Deslocamento do satélite “S” na passagem pelos pontos “A” e “B .....	31
Figura 11	– Anomalias orbitais .....	38
Figura 12	– Elementos Keplerianos .....	39
Figura 13	– Fluxograma de cálculo da anomalia excêntrica .....	43
Figura 14	– Cabeçalho da mensagem de observação .....	50
Figura 15	– Cabeçalho da mensagem de observação – tipos de dados observados .....	50
Figura 16	– Cabeçalho da mensagem de observação – tempo de observação .....	51
Figura 17	– Corpo da mensagem de observação .....	51
Figura 18	– Corpo da mensagem de observação – observações .....	52
Figura 19	– Cabeçalho da mensagem de Navegação .....	54
Figura 20	– Corpo da mensagem de navegação .....	54
Figura 21	– Diversidades de notações de um DFD .....	57
Figura 22	– Exemplo de depósito.....	58
Figura 23	– DFD com processo “Fazer Gelatina” .....	58
Figura 24	– Fluxos convergente e divergente .....	59
Figura 25	– Entidade Externa.....	59
Figura 26	– DFD da função “chechar ocorrências” .....	61
Figura 27	– DFD da função “posição interpolada” .....	63
Figura 28	– DFD da função “lê observações” .....	64
Figura 29	– DFD da função “calcular transporte de coordenadas com efemérides transmitidas” .....	66

Figura 30 – Hierarquia com chamada incondicional de módulos .....	67
Figura 31 – Hierarquia com chamada condicional de módulos .....	68
Figura 32 – Hierarquia com chamada repetitiva entre módulos .....	68
Figura 33 – Tipos de parâmetro de chamada .....	69
Figura 34 – Tipos de módulos .....	69
Figura 35 – Representação para conector para uma mesma página e conector de página .....	70
Figura 36 – Estratégia para identificar a coesão de um módulo .....	72
Figura 37 – Diagrama de Estrutura Modular.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Uso do sinal negativo em $v = v_1 + v_2$ .....	17
Tabela 2	–	Parâmetros básicos do sistema GPS .....	24
Tabela 3	–	Sub-quadros, notações, significados e unidades .....	37
Tabela 4	–	Descrição dos módulos do sistema .....	75
Tabela 5	–	Posições interpoladas dos satélites 2, 26 e 29 .....	81
Tabela 6	–	Resultado do posicionamento do ponto IME pelos satélites 26 e 29.....	82
Tabela A1	–	Método de Aitken .....	90

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1	<b>POSICIONAMENTO DE SATÉLITES E DE PONTOS</b> .....	16
1.1	<b>Sistema de medição Doppler</b> .....	16
1.1.1	<u>O efeito Doppler</u> .....	16
1.1.2	<u>Geometria do efeito Doppler</u> .....	17
1.1.3	<u>Taxa de mudança da frequência Doppler</u> .....	18
1.2	<b>A medição Doppler</b> .....	20
1.3	<b>Contagem Doppler continuamente integrada</b> .....	21
1.4	<b>Posicionamento terrestre por satélites GPS</b> .....	22
1.5	<b>O modelo matemático estudado</b> .....	26
1.5.1	<u>Fase da onda portadora</u> .....	26
1.5.2	<u>Modelo de pura fase</u> .....	27
1.5.3	<u>Dupla diferença de fase</u> .....	27
1.5.4	<u>Medição Doppler continuamente integrada</u> .....	28
1.6	<b>O ajustamento das observações</b> .....	32
1.7	<b>Sistema orbital de coordenadas</b> .....	37
2	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	45
2.1	<b>Materiais</b> .....	45
2.2	<b>Métodos</b> .....	46
3	<b>O PROGRAMA DESENVOLVIDO</b> .....	48
3.1	<b>O formato RINEX: descrição dos dados e elaboração de sua leitura pelo Programa</b> .....	49
3.2	<b>Apresentação do programa e seus recursos</b> .....	56
3.3	<b>Diagrama de Fluxo de Dados</b> .....	56
3.4	<b>Diagrama de Estrutura Modular</b> .....	67
3.5	<b>Descrição dos algoritmos e formatos</b> .....	77
3.5.1	<u>Descrição do algoritmo de interpolação para a posição dos satélites</u> .....	77
4	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....	81
5	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	85
5.1	<b>Considerações finais</b> .....	85

5.2	<b>Conclusões</b> .....	86
5.3	<b>Recomendações</b> .....	87
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	88
	<b>APÊNDICE A</b> – Teorema de Aitken.....	90
	<b>APÊNDICE B</b> – Efemérides precisas do IGS .....	92
	<b>APÊNDICE C</b> – Trecho do arquivo de observação do ponto B – IME .....	93
	<b>APÊNDICE D</b> – Trecho do arquivo de navegação do ponto B – IME .....	94
	<b>APÊNDICE E</b> – Trecho do código do programa em C++ .....	95
	<b>APÊNDICE F</b> – Trecho do código do programa no MathCad.....	97
	<b>APÊNDICE G</b> – Telas do programa PontoB .....	102
	<b>ANEXOS</b> – Conteúdo do CD que acompanha o texto.....	103
	<b>ANEXO 1</b> – Arquivo de observação do ponto A (RIOD) .....	104
	<b>ANEXO 2</b> – Arquivo de navegação do ponto A (RIOD) .....	118
	<b>ANEXO 3</b> – Arquivo de navegação do ponto B (IME) .....	132
	<b>ANEXO 4</b> – Arquivo de navegação do ponto B (IME) .....	221
	<b>ANEXO 5</b> – Arquivo de efemérides precisas do IGS (SP3).....	223
	<b>ANEXO 6</b> – Relatório de Informação da Estação RIOD.....	240
	<b>ANEXO 7</b> – Relatório da Estação Geodésica 91752 (IME) .....	245
	<b>ANEXO 8</b> – Descrição do formato RINEX .....	246
	<b>ANEXO 9</b> – Descrição do formato SP3 de efemérides precisas.....	272