

**JULIO CESAR FARRET**

**O EFEITO DO MULTICAMINHO ESTÁTICO NAS MEDIDAS DA FASE DAS  
PORTADORAS GPS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientadores:

Prof. Dr. Camil Gemaël

Prof. PhD. José Bittencourt de Andrade

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia Valéria Ramos de Arruda

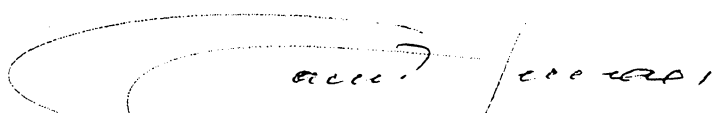
**CURITIBA  
2000**

# **“EFEITO DO MULTICAMINHO ESTÁTICO NAS MEDIDAS DA FASE DAS PORTADORAS GPS”**

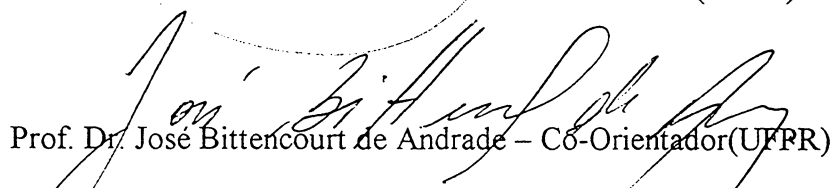
**POR**

**JÚLIO CESAR FARRET**

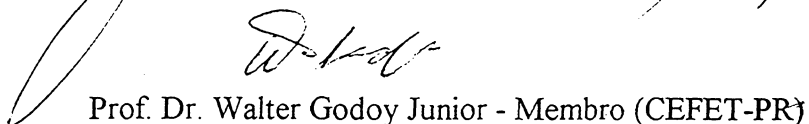
Tese nº 019 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



Prof. Dr. Camil Gemael - Orientador e Presidente (UFPR)



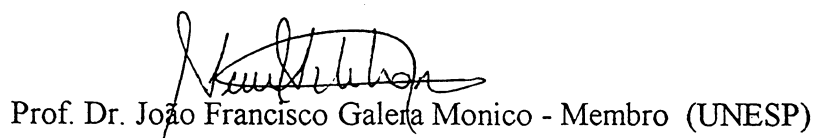
Prof. Dr. José Bittencourt de Andrade – Co-Orientador (UFPR)



Prof. Dr. Walter Godoy Junior - Membro (CEFET-PR)



Eng.ª Dr.ª Sônia Maria Alves Costa - Membro (IBGE)



Prof. Dr. João Francisco Galera Monico - Membro (UNESP)



Prof.ª Dr.ª Sílvia Helena Soares Schwab - Membro (UFPR)

Aos meus inseparáveis companheiros de viagem

Dedico

Dedico este trabalho aos meus mais íntimos amigos. Aos que ainda estão comigo nesta viagem pela existência terrena: à minha amada esposa, Andreia, que esteve comigo em todos os momentos e com quem divido essa realização, aos meus adorados filhos, Cledson, Julian, Juan e Juliane, aos meus queridos irmãos, Edson, Marilene, Isaias e Lília e a minha estimada sogra, Marilisa, e estimado sogro, Solano. Também aos que já partiram e que me aguardam no fim da linha: meus pais, Jorge e Wanda, que me deram a base para uma boa estada aqui, e meu inesquecível sobrinho e afilhado, Márcio.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e, em especial, aos que colaboraram como sujeitos na pesquisa.

A

Minha instituição, UFSM, pelo apoio;

Aos professores, colegas e amigos do CPGCG da UFPR, pela oportunidade e o desprendimento em ajudar, sempre que necessário;

Aos colegas do Setor de Topografia do DER - UFSM pelo apoio em suprir a minha ausência;

A CAPES pelo apoio financeiro;

Ao Prof. Hideo Haraki, do CPGCG, pela ajuda na codificação das rotinas da pesquisa;

Ao colega e amigo, Prof. Ênio Giotto, do DER - UFSM, pela ajuda na elaboração do programa Transf2;

Ao pesquisador Jayanta Kumar Ray, da Universidade de Calgary, Canadá, pela troca de experiências.

A empresa Novatel, fabricante de receptores GPS, de Calgary, Canadá, pelo fornecimento dos equipamentos (receptor, antenas e acessórios) e programas necessários à tomada de dados;

Ao Departamento de Geodésia e Engenharia Geomática da Universidade de New Brunswick, Canadá, pelo apoio recebido na etapa de tomada dos dados e pela cobertura financeira no seguro e transporte dos equipamentos até a cidade de Fredericton;

Ao Prof. Marcelo Carvalho dos Santos, da Universidade de New Brunswick, pelo irrestrito e incansável apoio sempre, e em especial, durante a estada no Canadá, para a tomada de dados;

Aos meus incansáveis amigos orientadores, por tudo;

Aos meus familiares, pela compreensão em todos os momentos.

## SUMÁRIO

|                                                                                |       |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>                                                    | viii  |
| <b>LISTA DE SIGLAS</b>                                                         | xvii  |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>                                                       | xviii |
| <b>RESUMO</b>                                                                  | xx    |
| <b>ABSTRACT</b>                                                                | xxi   |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                            | 1     |
| 1.1 IMPORTÂNCIA                                                                | 1     |
| 1.2 OBJETIVOS                                                                  | 4     |
| 1.3 JUSTIFICATIVA                                                              | 5     |
| 1.4 CONTEÚDO DO TRABALHO                                                       | 5     |
| <b>2 METODOLOGIA</b>                                                           | 6     |
| 2.1 O MODELO PARA O SINAL COM MULTICAMINHO                                     | 6     |
| 2.2 MODELO PARA O ERRO DEVIDO AO MULTICAMINHO NAS MEDIDAS DA FASE DA PORTADORA | 7     |
| 2.2.1 Sobre o Coeficiente de Reflexão                                          | 9     |
| 2.2.2 A Variação do Centro de Fase da Antena                                   | 9     |
| 2.2.3 Formulação Matemática do Erro                                            | 10    |
| 2.2.4 Metodologia para Estimação da Fase do Sinal Refletido                    | 10    |
| 2.3 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SINAL REFLETIDO                                | 12    |
| 2.3.1 O Filtro Estendido de Kalman                                             | 13    |
| 2.3.1.1 O vetor de medidas (observações) para o EKF                            | 14    |
| 2.3.1.1.1 Sobre o ruído térmico                                                | 38    |
| 2.3.1.2 A matriz de covariância para as observações                            | 45    |
| 2.3.1.3 Vinculação das medidas com o vetor de estado                           | 45    |
| 2.3.1.4 O modelamento do sistema-o modelo de Gauss-Markov                      | 46    |
| 2.3.1.5 A Codificação do EKF                                                   | 47    |
| 2.4 CÁLCULO DO ERRO DEVIDO AO MULTICAMINHO                                     | 47    |
| 2.5 O USO DAS FASES CORRIGIDAS DO EFEITO DO MULTICAMINHO                       | 47    |
| <b>3 RECURSOS UTILIZADOS</b>                                                   | 49    |
| 3.1 EQUIPAMENTO DE RASTREIO                                                    | 49    |
| 3.1.1 O Receptor NovAtel BeeLine                                               | 49    |

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.2 A antena modelo NovAtel 501.....                                                     | 50        |
| 3.1.3 O Receptor Ashtech Z-12.....                                                         | 51        |
| 3.2 RECURSOS COMPUTACIONAIS.....                                                           | 51        |
| 3.2.1 Computadores.....                                                                    | 51        |
| 3.2.2 “Softwares”.....                                                                     | 52        |
| 3.2.2.1 NovAtel GPS solution 3.1.....                                                      | 52        |
| 3.2.2.2 Convert32.....                                                                     | 52        |
| 3.2.2.3 Rdrnxb14.....                                                                      | 52        |
| 3.2.2.4 Matlab.....                                                                        | 53        |
| 3.2.2.5 Sp3_ef18.....                                                                      | 54        |
| 3.2.2.6 Ef18_sp1.....                                                                      | 54        |
| 3.2.2.7 Trans2.....                                                                        | 54        |
| 3.2.2.8 Trimble Geomatics Office version 1.00, 1997.....                                   | 54        |
| <b>4 O CENÁRIO DO EXPERIMENTO.....</b>                                                     | <b>55</b> |
| <b>5 RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>                                                        | <b>57</b> |
| 5.1 EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 9.....                                                          | 57        |
| 5.1.1 Demonstração Gráfica dos Resultados do EKF e do Multicaminho Calculado.....          | 57        |
| 5.1.1.1 Análise dos resultados do EKF e do multicaminho calculado.....                     | 70        |
| 5.1.2 Demonstração Gráfica dos Resultados de Verificação da Metodologia Proposta.....      | 71        |
| 5.1.2.1 Análise dos resultados de verificação da metodologia proposta.....                 | 73        |
| 5.2 EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 26.....                                                         | 73        |
| 5.2.1 Demonstração Gráfica dos Resultados do EKF e do Multicaminho Calculado.....          | 73        |
| 5.2.1.1 Análise dos resultados do EKF e do multicaminho calculado.....                     | 86        |
| 5.2.2 Demonstração Gráfica dos Resultados de Verificação da Metodologia Proposta.....      | 87        |
| 5.2.2.1 Análise dos resultados de verificação da metodologia proposta.....                 | 89        |
| 5.3 ANÁLISE GERAL DA CONSISTÊNCIA MATEMÁTICA DO EKF PELA UNIDADE DOS DADOS DE ENTRADA..... | 89        |
| <b>7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>                                                       | <b>91</b> |
| 7.1 CONCLUSÕES GERAIS SOBRE A METODOLOGIA PROPOSTA.....                                    | 91        |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 92         |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                   | <b>94</b>  |
| <b>ANEXOS.....</b>                        | <b>104</b> |

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|           |                                                                                                                                                                |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1  | – SINAIS DIRETO, REFLETIDO E COMPOSTO E O MULTICAMINHO.....                                                                                                    | 8  |
| FIGURA 2  | – RELAÇÃO ENTRE OS ERROS DEVIDOS AO MULTICAMINHO NAS DUAS ANTENAS, CORRELACIONADOS ATRAVÉS DA DIREÇÃO DO SINAL E DA GEOMETRIA (CONHECIDA) ENTRE AS MESMAS..... | 11 |
| FIGURA 3  | – ESQUEMA DO EXPERIMENTO COM DUAS ANTENAS LIGADAS A UM ÚNICO RECEPTOR.....                                                                                     | 15 |
| FIGURA 4  | – ESQUEMA DEMONSTRATIVO DA DIFERENÇA DE FASE ENTRE AMBAS AS ANTENAS DEVIDO À SEPARAÇÃO ESPACIAL ENTRE AS MESMAS.....                                           | 25 |
| FIGURA 5  | – MOVIMENTO DOS SATÉLITES E LINHA DE BASE PROJETADOS SOBRE O PLANO DO EQUADOR.....                                                                             | 29 |
| FIGURA 6  | – RECEPTOR NOVATEL BEELINE COM A VISTA DO CARTÃO INTERNO DO RECEPTOR E DUAS ANTENAS NOVATEL 501.....                                                           | 50 |
| FIGURA 7  | – PLANTA DO CENÁRIO DO EXPERIMENTO MOSTRANDO A LINHA DAS ANTENAS E AS PRINCIPAIS FONTES REFLEXIVAS.....                                                        | 56 |
| FIGURA 8  | – IMAGEM DO CENÁRIO DO EXPERIMENTO.....                                                                                                                        | 56 |
| GRÁFICO 1 | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 2 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....                 | 17 |
| GRÁFICO 2 | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 2 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....                | 17 |
| GRÁFICO 3 | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 2 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....                 | 18 |
| GRÁFICO 4 | – ELEVAÇÃO DO SATÉLITE 2 DURANTE O PERÍODO DE RASTREIO NOS TRÊS DIAS COM EIXO Y EM GRAUS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....                       | 18 |

|            |                                                                                                                                                  |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GRÁFICO 5  | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....   | 19 |
| GRÁFICO 6  | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....  | 19 |
| GRÁFICO 7  | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....   | 20 |
| GRÁFICO 8  | – ELEVÇÃO DO SATÉLITE 9 DURANTE O PERÍODO DE RASTREIO NOS TRÊS DIAS COM EIXO Y EM GRAUS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....          | 20 |
| GRÁFICO 9  | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 23 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 21 |
| GRÁFICO 10 | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 23 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 21 |
| GRÁFICO 11 | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 23 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 22 |
| GRÁFICO 12 | – ELEVÇÃO DO SATÉLITE 23 DURANTE O PERÍODO DE RASTREIO NOS TRÊS DIAS COM EIXO Y EM GRAUS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....         | 22 |
| GRÁFICO 13 | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 23 |
| GRÁFICO 14 | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 23 |
| GRÁFICO 15 | – SDF ENTRE AS ANTENAS EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 24 |

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GRÁFICO 16 – ELEVAÇÃO DO SATÉLITE 26 DURANTE O PERÍODO DE RASTREIO NOS TRÊS DIAS COM EIXO Y EM GRAUS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....                      | 24 |
| GRÁFICO 17 – $\Delta\rho$ EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 2 NAS SESSÕES DOS DIAS 31 DE MAIO E 1º E 2 DE JUNHO COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 27 |
| GRÁFICO 18 – $\Delta\rho$ EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 9 NAS SESSÕES DOS DIAS 31 DE MAIO E 1º E 2 DE JUNHO COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 27 |
| GRÁFICO 19 – $\Delta\rho$ EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 23 NAS SESSÕES DOS DIAS 19, 20 E 21 DE JUNHO COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....        | 28 |
| GRÁFICO 20 – $\Delta\rho$ EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 26 NAS SESSÕES DOS DIAS 19, 20 E 21 DE JUNHO COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....        | 28 |
| GRÁFICO 21 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 2 NO RASTREIO DO DIA 31 DE MAIO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....      | 30 |
| GRÁFICO 22 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 2 NO RASTREIO DO DIA 1º DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....     | 30 |
| GRÁFICO 23 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 2 NO RASTREIO DO DIA 2 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....      | 31 |
| GRÁFICO 24 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 9 NO RASTREIO DO DIA 31 DE MAIO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....      | 31 |
| GRÁFICO 25 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 9 NO RASTREIO DO DIA 1º DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....     | 32 |

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GRÁFICO 26 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 9 NO RASTREIO DO DIA 2 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS.....   | 32 |
| GRÁFICO 27 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 23 NO RASTREIO DO DIA 19 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 33 |
| GRÁFICO 28 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 23 NO RASTREIO DO DIA 20 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 33 |
| GRÁFICO 29 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 23 NO RASTREIO DO DIA 21 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 34 |
| GRÁFICO 30 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 26 NO RASTREIO DO DIA 19 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 34 |
| GRÁFICO 31 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 26 NO RASTREIO DO DIA 20 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 35 |
| GRÁFICO 32 – SDF CORRIGIDAS DO $\Delta\rho$ PARA O SATÉLITE 26 NO RASTREIO DO DIA 21 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS..... | 35 |
| GRÁFICO 33 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 31 DE MAIO.....                                                                                  | 39 |
| GRÁFICO 34 - SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 31 DE MAIO.....                                                                                | 39 |
| GRÁFICO 35 - SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 1º DE JUNHO.....                                                                                 | 40 |
| GRÁFICO 36 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 1º DE JUNHO.....                                                                               | 40 |
| GRÁFICO 37 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 2 DE JUNHO.....                                                                                  | 41 |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GRÁFICO 38 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 2 DE JUNHO.....                            | 41 |
| GRÁFICO 39 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 19 DE JUNHO.....                            | 42 |
| GRÁFICO 40 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 19 DE JUNHO.....                          | 42 |
| GRÁFICO 41 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 20 DE JUNHO.....                            | 43 |
| GRÁFICO 42 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 20 DE JUNHO.....                          | 43 |
| GRÁFICO 43 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 21 DE JUNHO.....                            | 44 |
| GRÁFICO 44 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 21 DE JUNHO.....                          | 44 |
| GRÁFICO 45 – COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, SEM UNIDADE.....                 | 58 |
| GRÁFICO 46 – COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, SEM UNIDADE.....                | 58 |
| GRÁFICO 47 – COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, SEM UNIDADE.....                 | 59 |
| GRÁFICO 48 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM RADIANOS.....  | 59 |
| GRÁFICO 49 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS..... | 60 |
| GRÁFICO 50 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....  | 60 |
| GRÁFICO 51 – ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM RADIANOS.....             | 61 |
| GRÁFICO 52 – ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....            | 61 |
| GRÁFICO 53 – ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....             | 62 |

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GRÁFICO 54 – AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM RADIANOS.....                                   | 62 |
| GRÁFICO 55 – AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....                                  | 63 |
| GRÁFICO 56 – AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....                                   | 63 |
| GRÁFICO 57 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM RADIANOS.....                         | 64 |
| GRÁFICO 58 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....                        | 64 |
| GRÁFICO 59 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....                         | 65 |
| GRÁFICO 60 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM METROS.....                          | 65 |
| GRÁFICO 61 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                         | 66 |
| GRÁFICO 62 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                          | 66 |
| GRÁFICO 63 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM METROS.....                            | 67 |
| GRÁFICO 64 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                           | 67 |
| GRÁFICO 65 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                            | 68 |
| GRÁFICO 66 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENA PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM METROS.....  | 68 |
| GRÁFICO 67 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENA PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM METROS..... | 69 |
| GRÁFICO 68 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENA PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....  | 69 |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GRÁFICO 69 – SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM METROS.....                           | 72 |
| GRÁFICO 70 – SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                          | 72 |
| GRÁFICO 71 – SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                           | 73 |
| GRÁFICO 72 - COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, SEM UNIDADE.....               | 74 |
| GRÁFICO 73 - COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, SEM UNIDADE.....               | 74 |
| GRÁFICO 74 - COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, SEM UNIDADE.....               | 75 |
| GRÁFICO 75 - FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.... | 75 |
| GRÁFICO 76 - FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.... | 76 |
| GRÁFICO 77 - FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.... | 76 |
| GRÁFICO 78 - ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....           | 77 |
| GRÁFICO 79 - ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....           | 77 |
| GRÁFICO 80 - ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....           | 78 |
| GRÁFICO 81 - AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....            | 78 |
| GRÁFICO 82 - AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....            | 79 |
| GRÁFICO 83 - AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....            | 79 |
| GRÁFICO 84 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....  | 80 |

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GRÁFICO 85 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....                        | 80 |
| GRÁFICO 86 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS.....                        | 81 |
| GRÁFICO 87 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                         | 81 |
| GRÁFICO 88 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                         | 82 |
| GRÁFICO 89 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                         | 82 |
| GRÁFICO 90 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                           | 83 |
| GRÁFICO 91 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                           | 83 |
| GRÁFICO 92 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                           | 84 |
| GRÁFICO 93 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENA PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM METROS..... | 84 |
| GRÁFICO 94 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENA PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM METROS..... | 85 |
| GRÁFICO 95 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENA PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM METROS..... | 85 |
| GRÁFICO 96 - SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                                               | 87 |
| GRÁFICO 97 - SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                                               | 88 |
| GRÁFICO 98 - SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM METROS.....                                               | 88 |
| TABELA 1 – REPETIBILIDADE (%) DA SDFr PARA OS SATÉLITES 9 E 26.....                                                                      | 37 |

|          |                                                                                     |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 2 | - RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA,<br>PARA OS SATÉLITES 9 E 26..... | 90 |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE SIGLAS

|             |                                                                      |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|
| ascii       | - American Standard Code for Information Interchange                 |
| CPGCG       | – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas                      |
| DER         | - Departamento de Engenharia Rural                                   |
| DGPS        | - Differential Global Positioning System                             |
| DLL         | – Delay Lock Loop                                                    |
| EKF         | – Extended Kalman Filtering                                          |
| GPS         | - Global Positioning System                                          |
| IAG         | – International Association of Geodesy                               |
| IGS         | – International GPS Geodynamics Service                              |
| INCRA       | – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária                |
| ION         | – International Technical Meeting of The Institute of Navigation     |
| LAAS        | - Local Area Augmentation System                                     |
| MEDLL       | - Multipath Estimating Delay Lock Loop                               |
| MET         | – Multipath Elimination Technique                                    |
| MRDLL       | – Multipath Rake Delay Lock Loop                                     |
| NASA        | – National Aeronautics & Space Administration                        |
| n-MRDLL     | – n-Multipath Rake Delay Lock Loop                                   |
| PLL         | – Phase Lock Loop                                                    |
| RINEX       | – Receiver-Independent Exchange Format                               |
| RTCM SC 104 | – Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee |
| SDF         | - Simples Diferença de Fase                                          |
| SDFr        | – Simples Diferença de Fase Residual                                 |
| SNR         | – Signal-to-noise ratio                                              |
| UFP         | - Universidade Federal do Paraná                                     |
| UFSM        | - Universidade Federal de Santa Maria                                |
| UTC         | - Universal Time Coordinated                                         |
| VLBI        | - Very Long Baseline Interferometry                                  |
| WAAS        | - Wide Area Augmentation System                                      |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                   |                                                                                                                                                                    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $s(t)$            | - Sinal composto (sinal direto + sinal refletido)                                                                                                                  |
| $d(t)$            | - Segmentos dos dados de navegação superimpostos no sinal                                                                                                          |
| $c(t)$            | - Código C/A                                                                                                                                                       |
| $A$               | - Amplitude do sinal da portadora                                                                                                                                  |
| $\alpha_i$        | - Coeficientes de reflexão do sinal direto e refletido correspondendo, na prática, a um sinal direto e um ou mais sinais refletidos ( $0 \leq \alpha \leq \pm 1$ ) |
| $\pi$             | - número $pi$ ( $= 3,141592654$ )                                                                                                                                  |
| $f_L$             | - Frequência da portadora (Hz)                                                                                                                                     |
| $\theta_0$        | - Fase inicial (rad), na expressão (1)                                                                                                                             |
| $d_i$             | - Atraso no caminho do sinal em relação ao sinal direto (m)                                                                                                        |
| $\lambda$         | - Comprimento de onda do sinal GPS (m)                                                                                                                             |
| $\Psi$            | - Medida da fase da portadora (rad)                                                                                                                                |
| $R$               | - Função de auto-correlação                                                                                                                                        |
| $\tau$            | - Atraso do sinal direto em relação ao código gerado no receptor (s)                                                                                               |
| $\delta_i$        | - Atraso do sinal com multicaminho (s)                                                                                                                             |
| $\psi$            | - Fase da portadora sem multicaminho (rad)                                                                                                                         |
| $\Delta\Psi$      | - Erro devido ao multicaminho (rad)                                                                                                                                |
| $\gamma$          | - Fase do sinal refletido (rad)                                                                                                                                    |
| $T$               | - Período de um segmento de código PRN (também chamado "chip")                                                                                                     |
| $\Delta\Psi_{01}$ | - Diferença de erro devido ao multicaminho entre as antenas 0 e 1 (rad)                                                                                            |
| $\Delta\Psi_0$    | - Erro devido ao multicaminho na antena 0 (rad)                                                                                                                    |
| $\Delta\Psi_1$    | - Erro devido ao multicaminho na antena 1 (rad)                                                                                                                    |
| $\alpha_0$        | - Coeficiente de reflexão modificado para ambas as antenas                                                                                                         |
| $\gamma_1$        | - Fase do sinal refletido na antena que não a de referência - antena 1 (rad)                                                                                       |
| $\gamma_0$        | - Fase do sinal refletido na antena de referência, a antena zero (rad)                                                                                             |
| $a_{01}$          | - Distância entre as antenas 0 e 1                                                                                                                                 |
| $\varphi_0$       | - Azimute do sinal refletido                                                                                                                                       |
| $\phi_{01}$       | - Azimute do vetor formado pelos centros de fase das antenas 0 e 1                                                                                                 |
| $\theta_0$        | - Elevação do sinal refletido (rad), na expressão (8)                                                                                                              |

- $K_i$  - Matriz ganho de Kalman
- $P_{i/i-1}$  - Matriz de covariância do estado
- $M_i$  - Matriz de projeção (derivadas da equação que liga parâmetros-observações)
- $\Lambda_i$  - Matriz de covariância das observações
- $\hat{S}_i$  - Vetor de estado (parâmetros) atualizado
- $\hat{S}_{i/i-1}$  - Vetor de estado (parâmetros) na etapa anterior
- $y_i$  - Vetor de medidas
- $I$  - Matriz identidade
- $P_{0/0}$  - Matriz de covariância do estado inicial
- $\Lambda_{S_0}$  - Matriz de covariância para as observações no passo inicial
- $\hat{S}_{0/0}$  - Vetor de estado (parâmetros) no estado inicial
- $E[S_0]$  - Esperança matemática dos parâmetros no passo inicial
- $\Delta\Phi$  - Medida de simples diferença de fase entre as antenas 0 e 1 (m)
- $\Delta\rho$  - Diferença de distância devido à separação espacial entre as antenas (m)
- $\Delta N$  - Diferença de ambigüidades inteiras
- $c\Delta t$  - Diferença no erro do relógio do receptor (m)
- $\Delta\varepsilon_\varphi$  - Diferença no ruído da fase da portadora (m)
- $\Delta\varepsilon_{MP}$  - Diferença no erro devido ao multicaminho na fase da portadora (m)
- $\Delta\Phi_{01}^r$  - SDF residual entre as antenas 0 e 1
- $-\beta$  - constante temporal do processo de Markov
- $\sigma^2$  - Variância do processo de Markov
- $e$  - Número neperiano (= 2,718282)

## RESUMO

O multicaminho atua de diferentes maneiras no sistema GPS. Uma delas, em nível de receptor, distorce a função de correlação prejudicando a detecção do seu pico no "delay-lock tracking loop". Isso provoca um erro na medida da distância receptor-satélite e, conseqüentemente, nas estimativas dela originadas. O multicaminho também atua na fase da portadora, levando o receptor a medir uma fase alterada em comparação à réplica internamente gerada pelo mesmo, resultando em medidas da fase da portadora eivadas de erros. Quando as mesmas forem usadas em trabalhos envolvendo técnicas diferenciais, resultará em posicionamentos imprecisos, uma vez que não são evitados nessa técnica. Talvez, por isso, o multicaminho continue sendo a maior fonte de erro nos posicionamentos de alta precisão, tanto cinemáticos como estáticos, o que o torna limitante em muitas aplicações. Melhoras em nível de receptor e no que tange à fabricação e localização de antenas, além de modelamentos usando a repetibilidade diária do multicaminho, têm proporcionado melhorias na solução desse problema. É o que ocorre principalmente para o multicaminho de alta frequência, provocados por objetos distantes da antena. Para os demais casos, entretanto, essas conquistas ainda não estão em um nível satisfatório. O presente trabalho objetiva avaliar o multicaminho usando o pressuposto da baixa variação angular dos satélites e da geometria do ambiente em medidas próximas no espaço e no tempo, usando-se apenas um receptor e duas antenas. A metodologia baseia-se no uso de medidas de simples diferença de fase da portadora L1 para alimentar um Filtro Estendido de Kalman, estimador de parâmetros do multicaminho. A partir desses parâmetros, chega-se a uma melhor estimativa e atenuação do mesmo. Acredita-se que este procedimento possa ser adotado também para análise do multicaminho nas medidas da fase da portadora L2, embora isto não tenha sido feito neste trabalho. Analisou-se o multicaminho nas antenas em relação a vários satélites com diferentes azimutes e ângulos de elevação, em dias consecutivos com a mesma geometria nos cenários em relação aos satélites. A repetibilidade diária do sinal foi usada para confirmação de tratar-se realmente de um sinal de multicaminho. Os resultados mostram pouca variação na efetividade do método para os diferentes satélites, chegando a atingir uma média de 61,45% de eficiência quando se leva em conta o percentual do multicaminho estimado em comparação com o multicaminho medido. Conclui-se que o pressuposto da baixa variação do multicaminho para intervalos curtos de tempo pode ser usado para explorar os objetivos propostos. Obtém-se boas estimativas do multicaminho na fase da portadora em ambientes estacionários, tornando-se uma alternativa especialmente para casos de escassez de recursos materiais. O método proposto é válido não somente para ser implantado em estações de referência como em caso de usuário, fornecendo medidas mais confiáveis, e trabalhos de pesquisa, análise e modelamento do multicaminho em determinados cenários.

Palavras-chave: GPS, multicaminho estático, filtro estendido de Kalman

## ABSTRACT

Multipath affects the Global Positioning System measurements in different ways. For example, in the receiver, multipath distorts the correlation function hampering its peak detection in the delay lock loop, with a consequent error in the pseudorange and its derived products. It also takes a toll in the carrier phase, causing the receiver to measure a distorted phase, with deleterious consequences in differential applications. Maybe for these reasons, multipath remains a major source of error in both static and kinematic high accuracy positioning, and a limiting factor in various applications. Improvements in receiver and antenna technologies, in addition to models based on daily repeatability, have resulted in a better handling of this problem. This is particularly true for high frequency multipath, in general the one with less intensity, provoked by objects farther away from the antenna. For other situations, these improvements are not yet at a satisfactory level. Some authors have shown that multipath is highly correlated for an array of closely spaced antennas. This thesis develops a methodology aimed at evaluating multipath by introducing a temporal factor in the measurements. The methodology makes use of the assumption that multipath parameters and satellite geometry have a slow variation space and in short periods of time. The method uses L1 single difference carrier phase measurements that have been collected by two closely spaced antennas. These observables feed a Extended Kalman Filtering that estimates multipath parameters, with consequent multipath mitigation. We believe that the same procedure may be adopted for the L2 carrier phase. Multipath was analysed for various satellites at different azimuth and elevation angles over consecutive days using the same scenario. The high daily repeatability was used to ascertain the presence of multipath. The results show a short variation in the efficiency of the method, i.e., the percentage between the estimated multipath vis-à-vis the measured one. Generally, the efficiency reached 64,9%. It is concluded that the assumption of the low variation of the multipath parameters over a short period of time can be used to explore the proposed objectives. Very good carrier phase multipath estimates were obtained. This means the method is an interesting alternative for reference stations, users and also for research, analysis, and modelling of multipath using different scenarios.

Key-words: GPS, static multipath, extended Kalman filtering

## 1 INTRODUÇÃO

O multicaminho é o fenômeno pelo qual o sinal que chega à antena do receptor GPS é resultado não só do sinal vindo diretamente do satélite, mas também de sinais secundários, provenientes da reflexão do sinal direto em objetos mais ou menos próximos da antena, ou da linha receptor-satélite. O multicaminho causa erro nas medidas de pseudo-distância e de fase das ondas portadoras, dependendo da geometria do cenário envolvendo a(s) antena(s), o(s) satélite(s) e o(s) objeto(s) refletor(es) e da natureza do material reflexivo.

### 1.1 IMPORTÂNCIA

Há um aumento na demanda por precisão, integridade, continuidade e disponibilidade nas técnicas diferenciais GPS (DGPS) e de posicionamento relativo, pois a despeito dessas técnicas cancelarem a maioria das fontes de erros do sistema GPS (respeitando-se as limitações da distância base-usuário), isso não ocorre para o multicaminho e o ruído térmico, ou ruído da fase (Dai et al., 1997).

Segundo Farrell & Givargis (2000) o multicaminho e o ruído da fase se encaixam no grupo de erros ditos não-comuns, apresentando características diversas mesmo em antenas próximas, isto é, que estejam em torno de 50 km de distância uma da outra. Ainda segundo estes autores, tanto para aplicações estacionárias como cinemáticas, as características desconhecidas no caminho dos sinais direto e refletido tornam impraticável a tarefa de modelamento e predição do multicaminho.

Segundo Moelker (1997), a propagação do multicaminho pode ser classificada em três categorias: - Reflexão especular, proveniente da reflexão em uma superfície suave, sendo que a frente de onda resultante é uma cópia atrasada do sinal direto, diferindo deste apenas em fase e amplitude; - Difração, proveniente de reflexões nas bordas ou cantos dos objetos refletores; - Multicaminho difuso, proveniente da reflexão em superfícies rugosas, semelhante a várias reflexões especulares. As duas principais características do sinal com multicaminho são o fato de ser sempre mais fraco que o sinal direto, devido à perda de energia na reflexão (mas podendo ser forte se o objeto refletor for grande ou se houver obstrução parcial

do sinal), e também o fato de ser sempre atrasado em relação ao sinal direto. Segundo Comp & Axelrad (1996), o multicaminho especular é o mais limitante na maioria das aplicações que usam a fase das portadoras e suas diferenças derivadas, sendo responsável por, pelo menos, 90% dos erros nas medidas de diferença de fase, e é dominante em aplicações de alta precisão. O multicaminho especular caracteriza-se em relação à linha direta através da razão de amplitude, atraso na propagação (em nanossegundos) e rotação da fase (em rad), podendo vários sinais secundários (que não o sinal direto) estarem presentes.

Nos últimos anos certos grupos de usuários tem preconizado a redução do multicaminho como crucial para suas aplicações, incluindo levantamentos GPS, o emergente WAAS, cuja finalidade é servir à comunidade da aviação, bem como o LAAS (Weill, 1997). O multicaminho na fase da portadora GPS é a maior fonte de erro em posicionamentos estáticos e cinemáticos de alta precisão (Ray, 1999)

Com a expansão no uso do sistema GPS, várias instituições vem se propondo a oferecer estações rastreadoras com o objetivo de fornecer arquivos que possam servir como base para trabalhos diferenciais e relativos, tanto em tempo real como em pós-processamento, para usuários os mais diversos. No Brasil, tem-se algumas universidades, o INCRA e instituições privadas, principalmente fabricantes de receptores. Essas estações nem sempre podem ficar em locais mais favoráveis do ponto de vista de não permitir a ocorrência de multicaminho, com problemas como terraços de prédios, com parapeitos altos e proximidades de outras antenas.

Os recursos de atenuação do multicaminho eram, inicialmente, limitados ao projeto e à localização das antenas, passando posteriormente para a análise espectral e repetibilidade do sinal, além da análise da SNR (Axelrad et al., 1994), uso de múltiplas estações de referência (Raquet & Lachapelle, 1996) e medidas da fase da portadora como "smoothing" para atenuação dos efeitos do multicaminho em medidas de pseudodistância (Hatch, 1982).

Segundo Moelker (1997), as técnicas que procuram atenuar o multicaminho se dividem naquelas que o fazem antes da recepção do sinal pelo receptor (como, por exemplo, as tecnologias baseadas em antenas), as que o fazem em nível de receptor (como, por exemplo, as tecnologias "narrow correlator" - NovAtel e "strobe correlator" - Ashtech) e as que processam os dados pós-recepção (como, por exemplo, as técnicas de rastreamento com múltiplas antenas de referência), e é o que

mais se enquadra no presente trabalho. Para Garin et al. (1996), alguns métodos assumem um modelo de multicaminho e procuram identificar e quantificar os parâmetros a serem compensados (SNR e MEDLL), outros assumem um modelo para o canal de transmissão e outros não fazem pressuposto algum ("narrow correlator" e MET). Alguns inconvenientes dos métodos baseados em modelos são os números de multicaminhos independentes que podem ser resolvidos, o excesso de informações a serem carregadas para processamento e a adequação do modelo ao caso real (como, por exemplo, o uso de um modelo especular para o multicaminho difuso). Segundo Comp e Axelrad (1996), métodos baseados em filtro apresentam o inconveniente de, possível e inadvertidamente, eliminar alguns elementos úteis da dinâmica do processo, especialmente quando usado em navegação veicular. Para estes mesmos autores, o único inconveniente dos métodos baseados em ambientes estáveis, isto é, não-modelados (como é o caso do presente trabalho) é que ele somente funciona bem se o ambiente realmente permanece inalterado.

Aproximadamente nos últimos seis anos, houve um aumento na demanda por pesquisas sobre o efeito do multicaminho, principalmente nas medidas de pseudodistância (código), provocado pelos substanciais investimentos das empresas fabricantes de receptores no grande filão de mercado aberto pela possibilidade de aplicação do GPS para navegação veicular em terra, ar e água. Essas pesquisas tiveram sucesso e delas resultaram algoritmos que indicam uma melhoria nos projetos dos receptores. Exemplos são "Narrow Correlator" (Fenton et al., 1991), "Strobe Correlator" e "Enhanced Strobe Correlator" (Garin & Rousseau, 1997), MEDLL (Van Nee, 1994), MRDLL (Laxton, 1996), n-MRDLL (El-Sayed et al., 1998), MET (Townsend & Fenton, 1994), "Edge Correlator" (Garin et al., 1996), "Gated Correlator" (McGraw & Braasch, 1999) e outros, atuando basicamente nas técnicas de rastreamento dos sinais, DLL e PLL (Parkinson et al. – 1996, ver anexo 1), muitos dos quais patenteados por empresas e publicados nas últimas edições do ION.

Mas o multicaminho também tem efeitos danosos nas medidas da fase da portadora, o que limita o desempenho dos receptores GPS usados especialmente em levantamentos de alta precisão, inclusive com relação à resolução das ambigüidades. Além disso, nenhum dos recursos anteriores reduz efetivamente o multicaminho de baixa frequência e, geralmente de maior intensidade, que é aquele

causado por superfícies refletoras consideradas próximas, isto é, localizadas até aproximadamente 30 metros de distância da antena (Ray, 1999).

Apesar disso, existem relativamente poucos trabalhos mostrando claramente a atenuação dos erros devidos ao multicaminho nas medidas da fase da portadora em nível de receptor, apesar de alguns fabricantes reivindicarem o contrário. Isto parece mostrar que a atenuação dos efeitos do multicaminho nas medidas da fase da portadora apresenta-se como um problema substancialmente mais difícil do que nas medidas da pseudodistância (Weill, 1997).

Alguns aspectos geométricos da reflexão, em combinação com uma configuração especial de antenas, foram explorados pela primeira vez por Becker et al. (1994), para detectar e rastrear o sinal com multicaminho em ambiente simulado.

Mora-Castro et al. (1998) usou aspectos diferenciais de duas antenas em ambientes simulados, um com forte multicaminho e outro supostamente livre dele, ligadas em um mesmo receptor, permitindo uma caracterização dos efeitos do multicaminho, tanto nas medidas de código como nas de fase. Esse método, entretanto, é falho nos aspectos de correção dos seus efeitos e, a exemplo dos anteriores, não faz uso da alta correlação do multicaminho em antenas próximas.

Um melhor uso deste aspecto foi feito por Ray & Cannon (1998) e Ray (1999), usando um conjunto de seis antenas (sendo que esses autores preconizam o uso de, pelo menos, cinco antenas) ligadas à três receptores originalmente projetados para determinação de atitude de satélites. Os três receptores são controlados por um oscilador externo de rubídio. Os resultados são animadores mais em termos de detecção do que de correção de efeitos. Talvez os aspectos mais negativos desta metodologia sejam as grandes limitações de material (alto custo e difícil acesso) e de operacionalidade (em nível de fabricante de receptores). Isso a limita a ambientes de pesquisa. O problema do multicaminho na fase da portadora permanece um desafio (Ray, 1999).

## 1.2 OBJETIVOS

Buscou-se gerar uma metodologia mais viável em termos prático e econômico, para identificar e atenuar os efeitos do multicaminho nas medidas da fase das portadoras GPS L1 e L2. Para isso procurou-se analisar a viabilidade de

utilização da alta correlação de sinais em antenas próximas e num intervalo curto de tempo, bem como o pressuposto da baixa variação angular do satélite neste intervalo. Trabalhou-se apenas com um receptor e duas antenas. Procurou-se gerar uma metodologia mais viável em termos práticos e econômicos, capaz de identificar e atenuar os efeitos do multicaminho nas medidas da fase das portadoras GPS L1 e L2. Dessa forma, geram-se medidas da distância receptor-satélite mais precisas, e também medidas da fase mais confiáveis, para uso por parte de usuários, tanto em pós-processamento como em tempo real. Isto pode auxiliar no modelamentos do multicaminho e em trabalhos de pesquisa do mesmo. Buscou-se, ainda, iniciar estudos de multicaminho no Brasil.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Existe a necessidade de uma metodologia alternativa para o problema do multicaminho, especialmente nas medidas da fase da portadora, que permanece ainda em aberto. Isso motivou a realização do presente trabalho, visando buscar alternativas que levem em conta os aspectos ligados à praticidade, precisão e economicidade. Do ponto de vista da agilidade no processamento, buscou-se um ganho no fato de ter-se um estimador de parâmetros do multicaminho com o mesmo número de equações e de incógnitas.

### 1.4 CONTEÚDO DO TRABALHO

Montou-se um experimento peculiar, que permitisse a separação de um sinal com multicaminho para alimentar um estimador de parâmetros do mesmo. Após calculados esses parâmetros, estimou-se separadamente o efeito do multicaminho em cada antena. A verificação da eficiência do método é realizada através da comparação entre o multicaminho medido e o estimado após a aplicação da técnica proposta.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia proposta no presente trabalho baseia-se no aproveitamento da alta correlação de sinais em antenas próximas em um curto intervalo de tempo para gerar medidas de multicaminho que alimentam um estimador de parâmetros do mesmo. Após determinados, calculou-se o efeito do multicaminho em cada antena.

### 2.1 O MODELO PARA O SINAL COM MULTICAMINHO

Segundo Braasch (1996), o sinal que é rastreado pelo receptor é uma combinação do sinal direto com aquele(s) proveniente(s) de caminho(s) secundário(s), chamado sinal composto. Não há distinção, por parte do receptor, entre um e outro e que, segundo Cannon & Ray (1998), tem a seguinte expressão:

$$s(t) = d(t)c(t)A \sum_{i=0}^n \alpha_i \cos(2\pi f_L t + \theta_0 + \frac{2\pi d_i}{\lambda}) \quad (1)$$

Na equação (1) os termos  $d_i$  e  $\alpha_i$  variam no tempo. O sinal direto tem índice zero ( $i = 0$ ), não havendo atraso em relação ao sinal direto ( $d_0 = 0$ ) e o coeficiente de reflexão terá valor máximo ( $\alpha_0 = 1$ ).

Para o rastreamento deste sinal, uma portadora local é gerada no receptor e controlada numericamente por um oscilador, sendo comparada com a fase e a frequência do sinal que chega ("inphase" e "quadraturephase", recursivamente), algumas vezes antes mas geralmente após o DLL (ver anexo 1), segundo Parkinson et al. (1996). Desprezando-se o efeito dos segmentos dos dados de navegação, esse discriminador tem a seguinte saída:

$$\Psi = \arctg \left[ \frac{\sum_{i=0}^n R(\tau - \delta_i) \alpha_i \sin(\psi + \frac{2\pi d_i}{\lambda})}{\sum_{i=0}^n R(\tau - \delta_i) \alpha_i \cos(\psi + \frac{2\pi d_i}{\lambda})} \right] \quad (2)$$

Na expressão (2), o termo  $2\pi d_i$  representa a fase do sinal refletido ( $\gamma$ ). Não havendo sinal refletido tem-se  $\alpha_0 = 1$ ,  $\alpha_1, \dots, \alpha_n = 0$  e  $\delta_0 = 0$ , logo,  $\Psi = \psi$ , fazendo com que a fase medida seja a fase verdadeira. Havendo sinal refletido, a expressão  $\Delta\Psi = \Psi - \psi$  representa o erro na medida da fase da portadora devido ao multicaminho, ou seja, a diferença entre esses dois sinais. Um melhor desenvolvimento da expressão (2) pode ser encontrado, com outra simbologia, no anexo 1.

## 2.2 MODELO PARA O ERRO DEVIDO AO MULTICAMINHO NAS MEDIDAS DA FASE DA PORTADORA

Vários pesquisadores descrevem o efeito do multicaminho na fase da portadora (Van Nee -1995, Braasch -1996, Ray -1999). É possível assumir um único refletor virtual com parâmetros (coeficiente de reflexão e posição) que variem com o tempo e que representem todos os objetos refletores nas proximidades da antena. Isso faz com que o efeito resultante possa ser considerado como devido a esse único refletor virtual. A expressão da variação desses parâmetros com o tempo representa o erro devido ao multicaminho em uma determinada antena (Ray & Cannon, 1998):

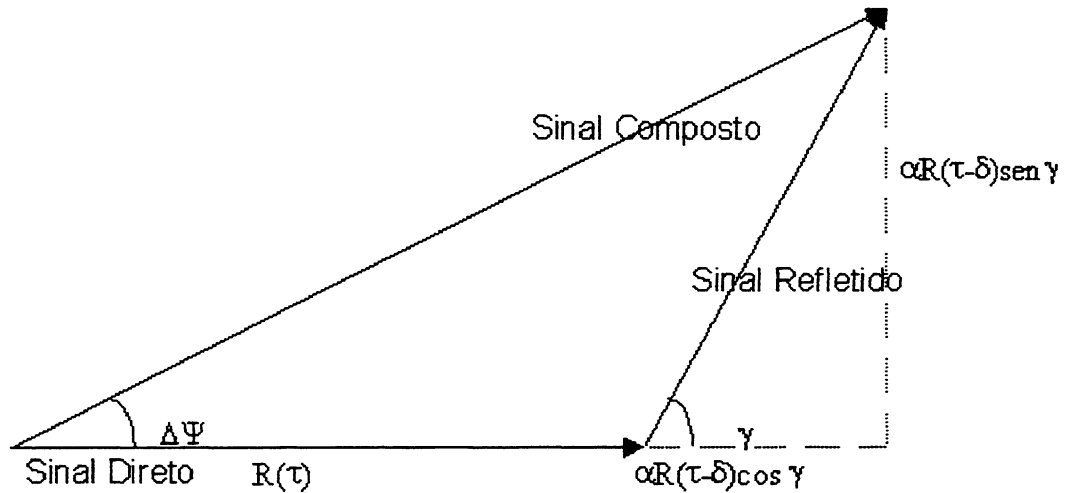
$$\begin{aligned}\Delta\Psi &= \arctg \left[ \frac{R(\tau) \sin \psi(t) + R(\tau - \delta(t))\alpha(t) \sin(\psi(t) + \gamma(t))}{R(\tau) \cos \psi(t) + R(\tau + \delta(t))\alpha(t) \cos(\psi(t) + \gamma(t))} \right] - \psi(t) = \\ &= \arctg \left[ \frac{R(\tau - \delta(t))\alpha(t) \sin \gamma(t)}{R(\tau) + R(\tau - \delta(t))\alpha(t) \cos \gamma(t)} \right]\end{aligned}\quad (3)$$

Como na equação (3) o fator tempo (t) é comum a todos os termos, pode-se reescrevê-la sem esta referência, para melhor visualização:

$$\Delta\Psi = \arctg \left[ \frac{R(\tau - \delta)\alpha \sin \gamma}{R(\tau) + R(\tau - \delta)\alpha \cos \gamma} \right]\quad (4)$$

A figura número 1 ilustra esse efeito através de um diagrama de fasores, isto é, um diagrama relacionando geometricamente as fases dos sinais envolvidos.

FIGURA 1 – SINAIS DIRETO, REFLETIDO E COMPOSTO E O MULTICAMINHO



FONTE: RAY, J. Use of Multiple Antennas to Mitigate Carrier Phase Multipath in Reference Stations. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 12., 1999, Nashville. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1999. p. 269-280.

NOTA: Trabalhado pelo autor.

Segundo Parkinson et al. (1996), e considerando-se  $T$  como o período do código, uma boa aproximação para a função de autocorrelação é:

$$\begin{aligned} R(\tau) &= 1 - |\tau|/T, & \text{se } |\tau| \leq T \\ R(\tau) &= 0, & \text{se } |\tau| > T \end{aligned} \quad (5)$$

A equação (4) mostra que são três os parâmetros do multicaminho: coeficiente de reflexão ( $\alpha$ ), fase do sinal refletido ( $\gamma$ ) e atraso do sinal composto ( $\tau - \delta$ ). Esta equação fica normalizada dividindo-se o seu numerador e o seu denominador por  $R(\tau)$ , surgindo a expressão  $\alpha R(\tau - \delta)/R(\tau)$  que, designada por  $\alpha_0$ , dá origem a:

$$\Delta\Psi = \arctg \left\{ \frac{\alpha_0 \sen \gamma}{1 + \alpha_0 \cos \gamma} \right\} \quad (6)$$

A equação (6) relaciona o erro na fase da portadora devido ao multicaminho com a potência (ou amplitude, representada pelo coeficiente de reflexão -  $\alpha$ ) e o atraso devido ao caminho ( $\tau - \delta$ ), ambos reunidos no coeficiente modificado de reflexão ( $\alpha_0$ ) e a fase do sinal refletido ( $\gamma$ ). Observa-se que esta simplificação corresponde a uma combinação de dois parâmetros do multicaminho, isto é, coeficiente de reflexão e atraso no caminho. Isso origina um novo parâmetro, chamado coeficiente modificado de reflexão,  $\alpha_0$ , reduzindo para dois o número de parâmetros do multicaminho ( $\alpha_0$  e  $\gamma$ )

O erro devido ao multicaminho tem alta dependência da localização espacial relativa entre os objetos, especialmente antena e objeto refletor. Segundo Parkinson et al. (1996), Hoffman-Wellenhof (1994) e Seeber (1993), 1/4 do comprimento de onda da portadora é o valor máximo para o erro devido ao multicaminho (ver anexo 1). Desta forma, com as duas antenas estando muito próximas, o multicaminho afeta cada uma delas de forma similar, desde que o objeto refletor seja suficientemente grande (maior que aproximadamente um comprimento de onda da portadora), para manter a integridade das características da mesma.

### 2.2.1 Sobre o Coeficiente de Reflexão

As antenas estando com a mesma orientação relativa no ambiente e muito próximas, há segurança em afirmar-se que eventual amplificação ou atenuação do sinal que chega de uma determinada direção é a mesma para ambas as antenas e, com isso, o coeficiente de reflexão também é o mesmo (Ray & Cannon, 1998) .

### 2.2.2 A Variação do Centro de Fase da Antena

Trabalhos envolvendo a fase da portadora, que muitas vezes dizem respeito a um universo de variações milimétricas, devem levar em conta a variação do centro de fase da antena. Segundo Rothacher & Mervart (1996), quando são usadas antenas do mesmo tipo, o principal efeito de erro devido à variação no centro de fase, é um fator de escala de aproximadamente 0,015 ppm em relação à linha de base. Para o presente trabalho, estando as antenas muito próximas e, além disso,

com a mesma orientação relativa no ambiente, esse efeito é removido. É por este motivo, juntamente com a necessidade de se evitar variações nos parâmetros do multicaminho por motivos de movimento entre as antenas, que as mesmas são montadas sobre uma plataforma rígida.

### 2.2.3 Formulação Matemática do Erro

Pelas considerações anteriores, e aplicando a diferença de tangentes na equação para o erro devido ao multicaminho em uma antena em particular (6), calcula-se a diferença no erro devido ao multicaminho na fase da portadora entre as duas antenas próximas. Uma dessas antenas foi usada como antena de referência em relação a outra, para cujos índices adotou-se "0" e "1", respectivamente:

$$\Delta \Psi_{01} = \Delta \Psi_0 - \Delta \Psi_1 = \arctg \left[ \frac{\alpha_0 \sin \gamma_0 - \alpha_0 \sin \gamma_1 + \alpha_0^2 \sin(\gamma_0 - \gamma_1)}{1 + \alpha_0 \cos \gamma_0 - \alpha_0 \cos \gamma_1 + \alpha_0^2 \cos(\gamma_0 - \gamma_1)} \right] \quad (7)$$

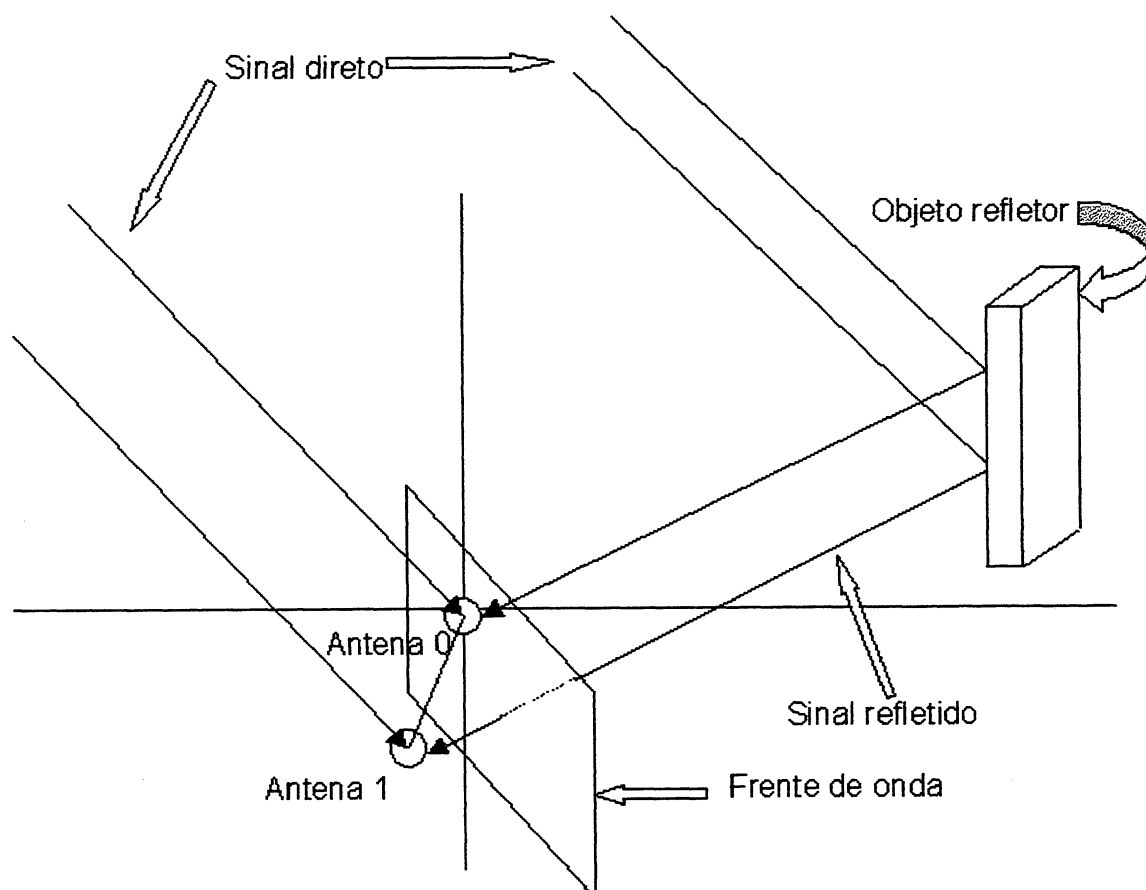
### 2.2.4 Metodologia para Estimação da Fase do Sinal Refletido

Para a fase do sinal refletido ( $\gamma$ ), que aparece na equação (7) com índices 0 e 1, as considerações feitas para o coeficiente de reflexão (mesmo valor para ambas as antenas) não são ao todo verdadeiras. Isso ocorre porque a fase deste sinal é altamente relacionada com o atraso no caminho satélite-receptor. Um atraso no caminho de 10 cm, por exemplo, causa uma variação de  $180^\circ$  na fase da portadora L1, que é o mesmo efeito de um atraso de 12 cm para a portadora L2 (Parkinson, 1996). Do ponto de vista geométrico, o sinal que sai de um satélite e chega a duas antenas próximas podem ser considerados paralelos. Isso é devido a grande distância satélite-receptor em comparação com a distância entre as antenas (20.200 km contra 10 cm, aproximadamente) e até mesmo com a distância antena-objeto refletor (Ray & Cannon, 1998). Nisso, há similaridade com o sistema VLBI.

Na figura 2 recorre-se à descrição desta perspectiva geométrica para deduzir a expressão para a fase do sinal refletido. Uma frente de onda plana e perpendicular à linha de propagação do sinal satélite-receptor é considerada com a mesma fase da

portadora para ambas as antenas. Após a reflexão no refletor os sinais permanecem paralelos, e a propagação da fase tem lugar através do avanço da frente de onda.

**FIGURA 2 – RELAÇÃO ENTRE OS ERROS DEVIDOS AO MULTICAMINHO NAS DUAS ANTENAS, CORRELACIONADOS ATRAVÉS DA DIREÇÃO DO SINAL E DA GEOMETRIA (CONHECIDA) ENTRE AS MESMAS**



**FONTE:** RAY, J. K.; CANNON, M. E. Mitigation of Static Carrier Phase Multipath Effects Using Multiple Closely-Spaced Antennas. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings...**Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 1025-1034.

**NOTA:** Trabalhado pelo autor.

Desta forma, a fase do sinal refletido nos centros de fase das duas antenas próximas é função da direção (azimute e elevação) deste sinal e da geometria entre elas. Determinou-se esta direção através de levantamento de precisão apropriado

(ver 3.1.3). Tendo isso em conta, pode-se escrever a expressão para a fase da portadora na antena 1:

$$\gamma_1 = \gamma_0 + \frac{2\pi a_{01} \cos(\varphi_0 - \phi_{01}) \cos \theta_0}{\lambda} \quad (8)$$

Uma vez que foi determinada a geometria entre as antenas ( $a_{01}$  e  $\phi_{01}$ ), conhecendo-se os valores dos parâmetros fase da portadora na antena de referência ( $\gamma_0$ ) e direção do sinal refletido (elevação e azimuth -  $\theta_0$  e  $\varphi_0$ , respectivamente), pode-se usar a expressão (8) para calcular a fase da portadora na antena 1. Isso reduz o número de incógnitas do sistema. Portanto, esses parâmetros do sinal refletido, juntamente com o coeficiente modificado de reflexão ( $\alpha_0$ ), devem ser estimados de algum modo.

### 2.3 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SINAL REFLETIDO

Para que ocorra uma efetiva estimação dos erros devidos ao multicaminho nas medidas da fase da portadora, todos os sinais com multicaminho que chegam à antena devem ser considerados. Alguns métodos para estimação dos parâmetros desses sinais baseiam-se em Axelrad et al. (1994). Esse autor faz a determinação dos componentes do sinal no domínio das frequências através da análise da SNR. Pode ser feita também a determinação dos parâmetros de todos os sinais separadamente e somando-os algebricamente. Pela metodologia proposta no presente trabalho, os parâmetros do multicaminho são resultantes de todas as fontes reflexivas, calculando-se o efeito total do multicaminho. Para estimar esses parâmetros optou-se pelo uso do EKF (Brown & Hwang, 1992; Zhang, 1996; Oki Technical Review, 1999; Deutschmann - NASA, 1999). Esta escolha se deve a não-linearidade do sistema de equações diferenciais parciais de segunda ordem (Machado, 1999) das expressões envolvidas, ao baixo conhecimento (motivo pelo qual é objeto do presente estudo) da variação temporal dos parâmetros (com maior valorização das observações, uma vez que é alta a precisão do sistema de medidas)

e pela indicação explícita deste estimador para os parâmetros de sinais com multicaminho (Dai, 1997).

### 2.3.1 O Filtro Estendido de Kalman

Segundo Brown & Hwang (1992), o EKF é similar ao Filtro de Kalman Linearizado exceto que, no EKF, a linearização é feita em uma trajetória (comportamento do processo em estudo) estimada, ao invés de uma trajetória nominal pré-estimada, como no filtro linearizado. Isto equivale a dizer que as derivadas parciais das equações que definem os modelos do processo e de medidas são avaliadas ao longo de uma trajetória que está constantemente sendo atualizada pelas estimativas do filtro, que dependem das medidas. Este fato torna a seqüência de ganho do filtro bastante dependente da seqüência de medidas amostrais realizadas nas etapas do experimento. Dessa forma, a seqüência de ganho não é pré-determinada pelos pressupostos do modelo do processo, como usualmente ocorre no Filtro de Kalman. Uma análise geral do EKF está na dependência direta da influência das medidas no modelo. Se a trajetória atualizada for pior do que a nominal, ocorrem erros nas estimativas, com conseqüentes erros na trajetória, com novos erros nas estimativas, levando à divergência do filtro. Este fato mostra a grande exigência do EKF quanto à precisão do sistema de medidas e quanto às incertezas iniciais do processo. No presente trabalho, a precisão das medidas da fase da portadora no sistema GPS, traduzida na matriz de covariância das observações, é alta, não constituindo-se em fator limitante. Com relação às incertezas iniciais do processo, há um grande desconhecimento de valores para os parâmetros do multicaminho que possam iniciar um estimador em um ambiente peculiar. Devido a isso, usou-se o pressuposto de um processo com média zero, ou seja, a sua esperança matemática (ver 2.3.1.4), permitindo a inicialização do EKF através de um vetor de estado inicial nulo (Brown & Hwang, 1992). Para a confiança no estado inicial, traduzido na matriz de covariância do mesmo, usaram-se os valores da matriz de covariância do estado. Segundo Zhang (1996), a covariância do ruído do sistema e, conseqüentemente a variação esperada no vetor de estado, é usualmente determinada com base em experiência e intuição. No presente trabalho, portanto, usaram-se valores experimentais que resultaram em menor desvio-padrão

do sinal usado para verificação (gráficos 69, 70, 71, 96, 97 e 98). Talvez, na maioria das aplicações, o EKF apresente melhor desempenho que o Filtro Linearizado, mas são mais prováveis casos de divergência em situações não-usuais, o que não foi o caso do presente trabalho. Além disso, no Filtro Linearizado as variáveis de estado são quantidades incrementais e não quantidades totais. No EKF, no entanto, é usualmente mais conveniente usar quantidades totais, como no presente trabalho. As deduções matemáticas para a passagem das variáveis de estado em quantidades incrementais para as mesmas em quantidades totais podem ser encontradas em Brown & Hwang (1992). A seguir mostram-se as expressões básicas do EKF utilizadas no presente trabalho (Zhang, 1996).

$$K_i = P_{i/i-1} M_i^T (M_i P_{i/i-1} M_i^T + \Lambda_i)^{-1} \quad (9)$$

$$\hat{S}_i = \hat{S}_{i/i-1} + K_i (y_i - M_i \hat{S}_{i/i-1}) \quad (10)$$

$$P_i = (I - K_i M_i) P_{i/i-1} \quad (11)$$

$$\text{Inicialização: } P_{0/0} = \Lambda_{S_0} \text{ e } \hat{S}_{0/0} = E[S_0] \quad (12)$$

O vetor de estado contém os parâmetros a serem estimados pelo EKF e na seguinte ordem: coeficiente de reflexão para ambas as antenas ( $\alpha_0$ ), fase do sinal refletido na antena de referência, isto é, a antena zero ( $\gamma_0$ ), azimute do sinal refletido em ambas as antenas ( $\varphi_0$ ) e elevação do sinal refletido também em ambas as antenas ( $\theta_0$ ). Os dois primeiros estão relacionados com a equação (6) e os dois últimos o estão com a equação (8).

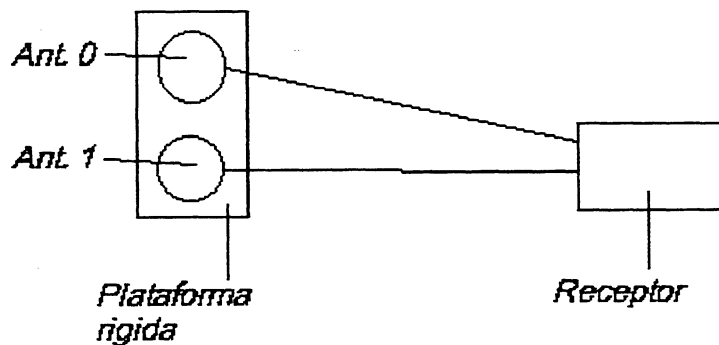
### 2.3.1.1 O vetor de medidas (observações) para o EKF

A observável utilizada para atualizar o vetor de estado é originada da simples diferença de fase entre antenas, a qual está livre de erros devido ao atraso atmosférico, erros orbitais do satélite e erros do relógio do satélite. A expressão para essa medida é a seguinte (Ray, 1999, apud Lachapelle, 1997):

$$\Delta\Phi_{01} = \Delta\rho_{01} + \Delta N_{01}\lambda + c\Delta t_{01} + \Delta\mathcal{E}_{\varphi 01} + \Delta\mathcal{E}_{MP01} \quad (13)$$

No presente trabalho, os sinais oriundos de ambas as antenas foram processados por um mesmo receptor (e, portanto, por um mesmo relógio), fazendo com que o erro devido ao não-sincronismo de tempo na tomada de observações entre uma e outra antena ( $c\Delta t_{01}$ ) pudesse ter sido eliminado da equação (13). A figura 3 mostra o esquema do experimento.

FIGURA 3 – ESQUEMA DO EXPERIMENTO COM DUAS ANTENAS LIGADAS A UM ÚNICO RECEPTOR

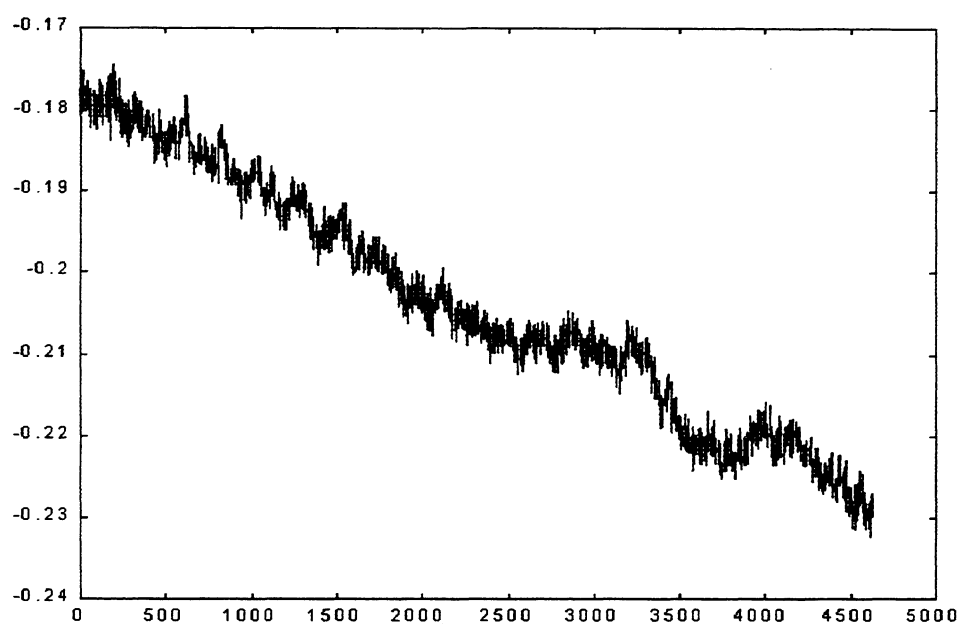


FONTE: O autor

Nos gráficos de 1 à 16 mostra-se a simples diferença de fase entre as antenas, conforme a expressão (13). Já está descontado o termo devido ao não-sincronismo de tempo nas medidas. Mostra-se esses valores em relação aos satélites 2 e 9 (rastreados nos dias 31 de maio e 1º e 2 de junho de 2000) e os satélites 23 e 26 (rastreados nos dias 19, 20 e 21 de junho de 2000). As sessões estão defasadas de 3min36seg entre um dia e outro devido à diferença entre o dia solar médio e o tempo universal, para manter a coincidência na geometria dos cenários satélite-antenas-objetos refletors. Estes sinais, portanto, representam somente os valores diferenciais da distância devido à separação espacial entre as antenas ( $\Delta\rho$ ), ambigüidades inteiras ( $\Delta N_{01}\lambda$ ), ruído térmico ( $\Delta\mathcal{E}_{\varphi 01}$ ) e multicaminho ( $\Delta\mathcal{E}_{MP01}$ ). Mostra-se também a elevação dos satélites que, devido à repetibilidade nos cenários, é praticamente a mesma para os três dias. Os

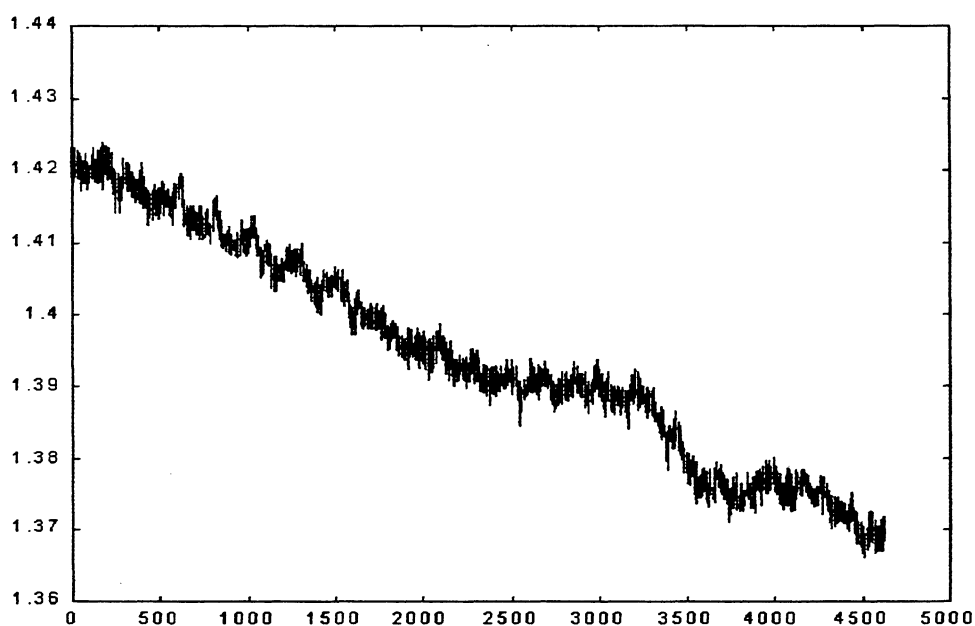
movimentos descendentes nos satélites 2 e 9 e ascendentes nos satélites 23 e 26 podem ser usados para analisar uma tendência do multicaminho em ser maior em satélites com menor elevação e menor em satélites com maior elevação. Isso traduz-se num valor de SNR menor para satélites mais baixos, e vice-versa. Cada arquivo de saída de aproximadamente uma hora e meia de rastreamento apresentou tamanho em torno de 7,5 Mb.

**GRÁFICO 1 – SDF EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 2 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000  
COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS  
TRANSCORRIDAS**



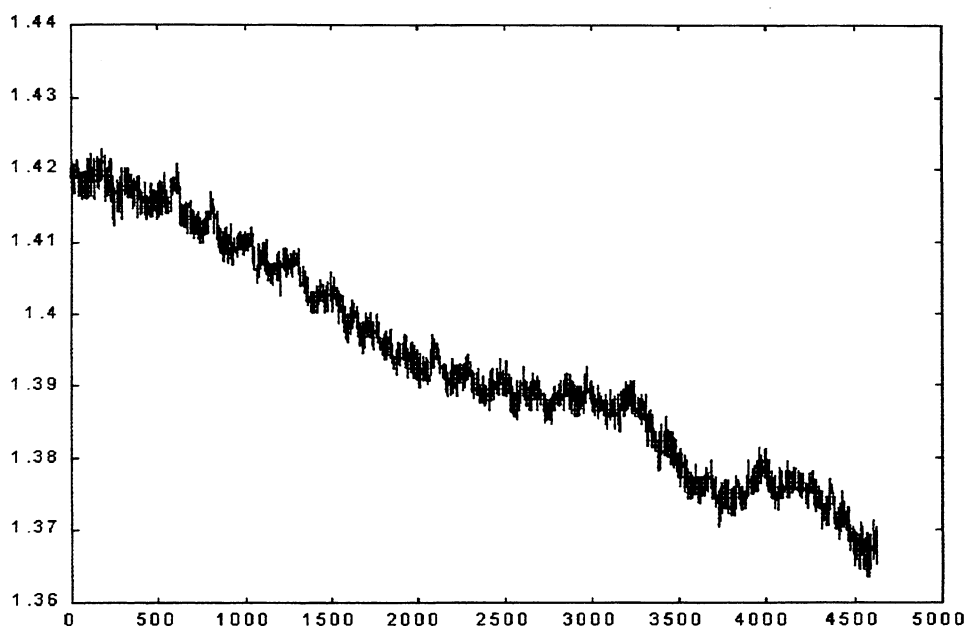
FONTE: O autor

**GRÁFICO 2 – SDF em relação ao Satélite 2 no dia 1º de junho de 2000  
COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS  
TRANSCORRIDAS**



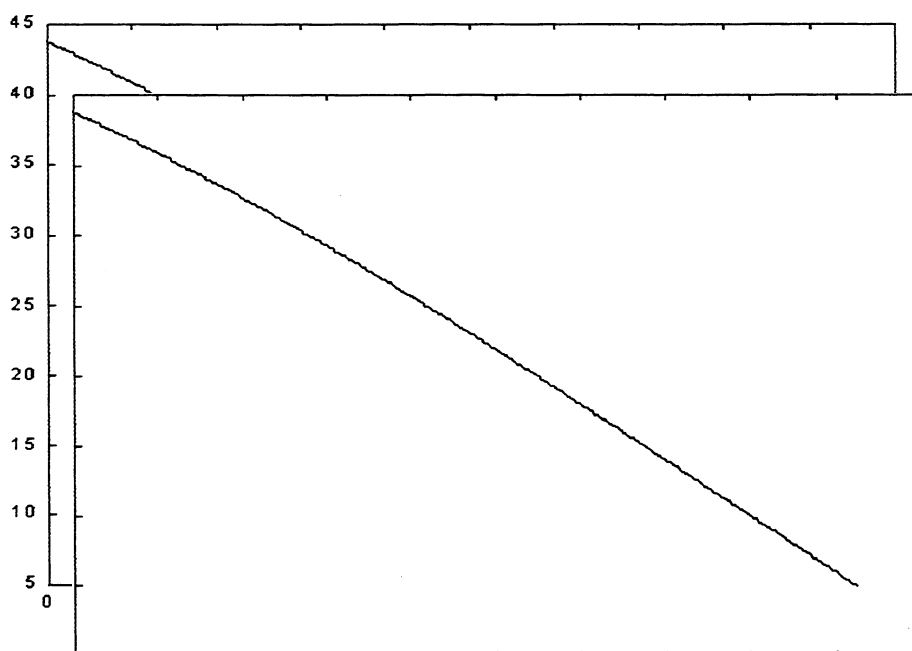
FONTE: O autor

**GRÁFICO 3 – SDF EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 2 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000  
COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS  
TRANSCORRIDAS**



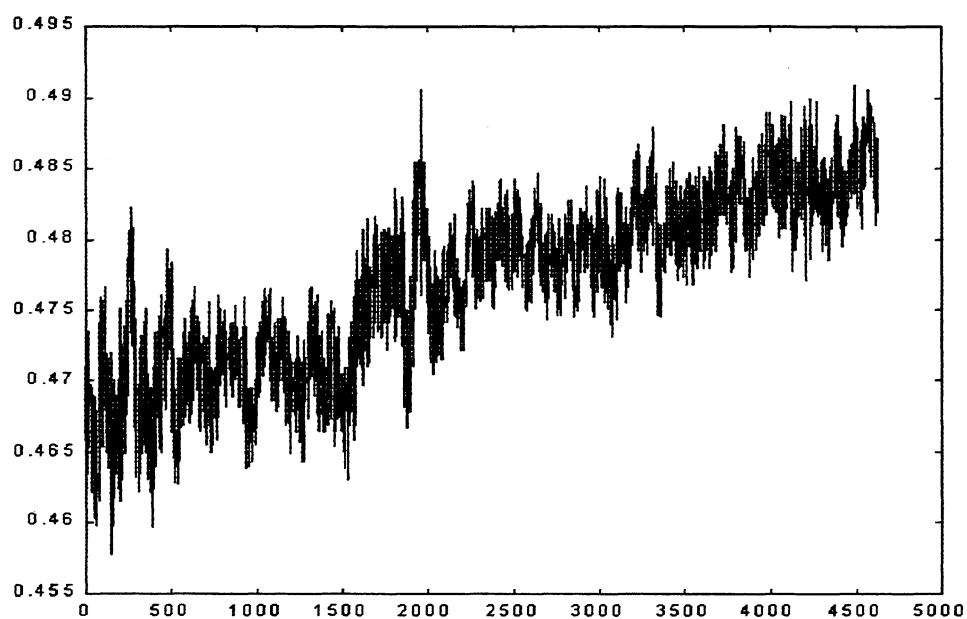
FONTE: O autor

**GRÁFICO 4 – ELEVAÇÃO DO SATÉLITE 2 DURANTE O PERÍODO DE RASTREIO  
NOS TRÊS DIAS COM EIXO Y EM GRAUS E EIXO X EM NÚMERO  
DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



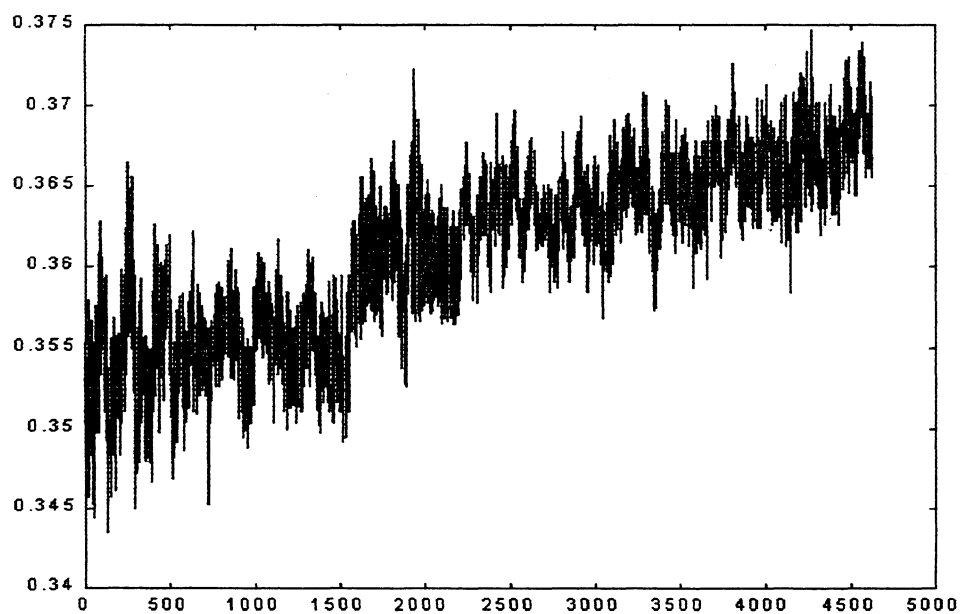
FONTE: O autor

**GRÁFICO 5 – SDF EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000  
COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS  
TRANSCORRIDAS**



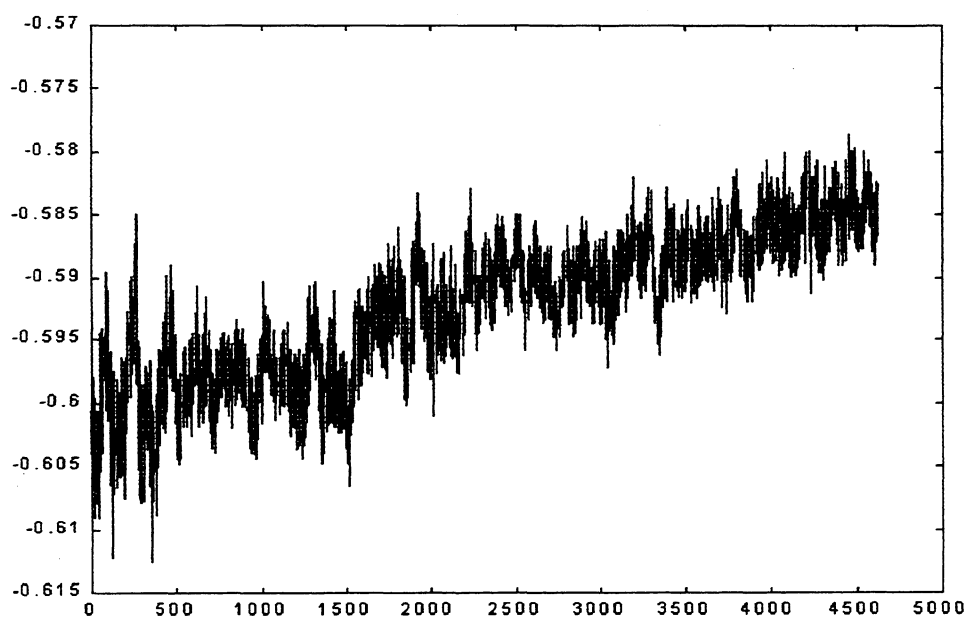
FONTE: O autor

**GRÁFICO 6 – SDF em relação ao satélite 9 no dia 1º de junho de 2000  
COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS  
TRANSCORRIDAS**



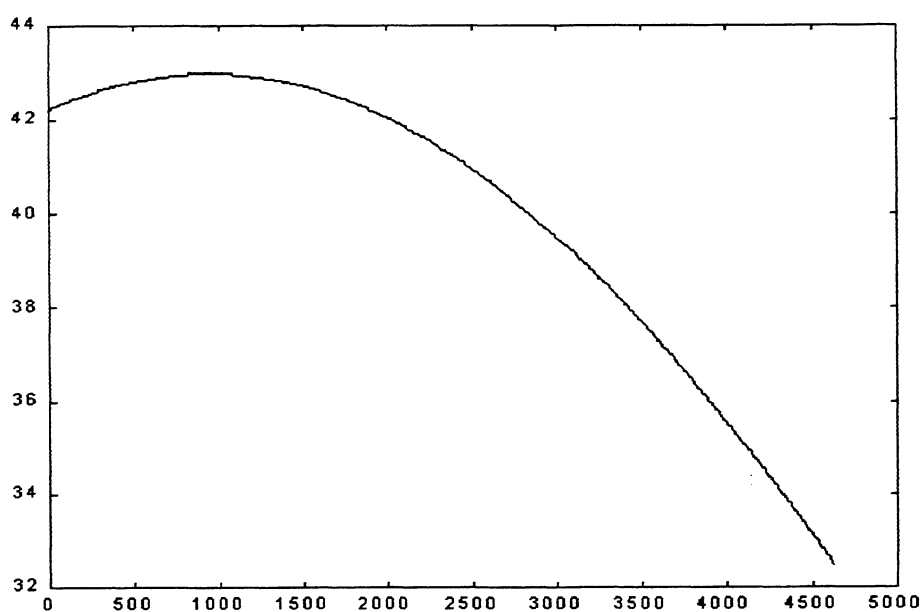
FONTE: O autor

**GRÁFICO 7 – SDF EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000  
COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS  
TRANSCORRIDAS**



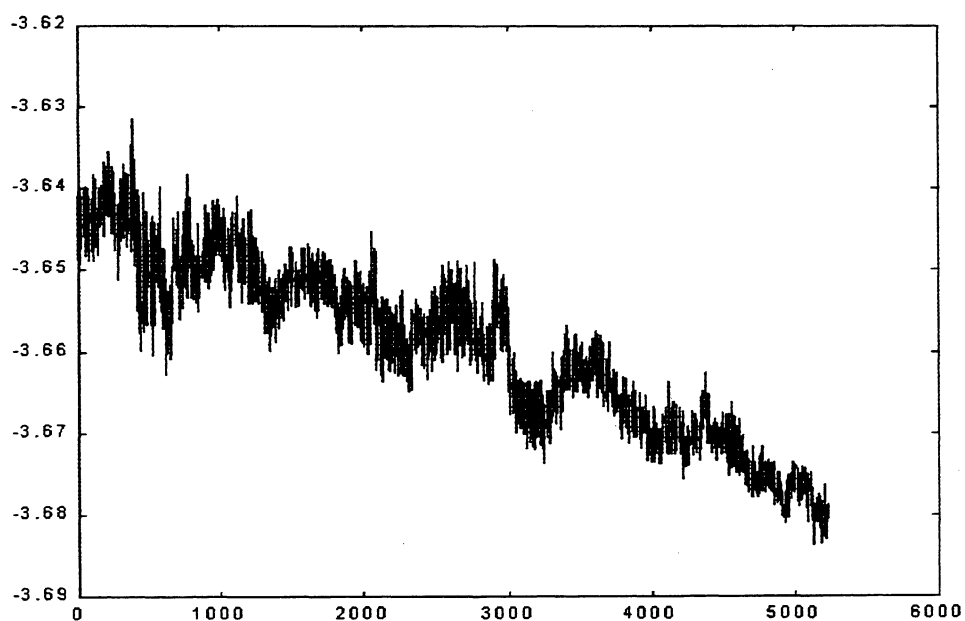
FONTE: O autor

**GRÁFICO 8 – ELEVAÇÃO DO SATÉLITE 9 DURANTE O PERÍODO DE RASTREIO  
NOS TRÊS DIAS COM EIXO Y EM GRAUS E EIXO X EM NÚMERO  
DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



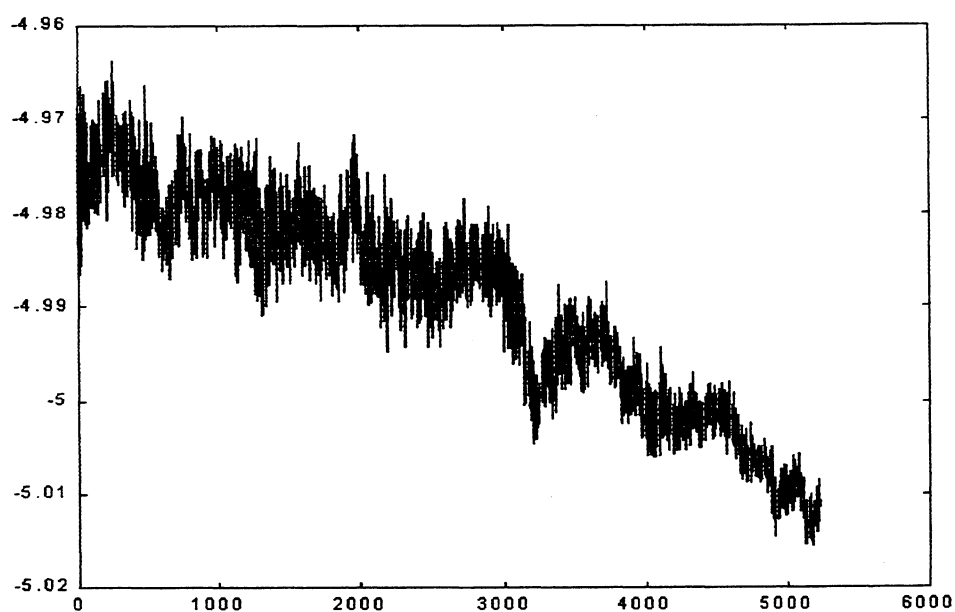
FONTE: O autor

GRÁFICO 9 – SDF EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 23 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS



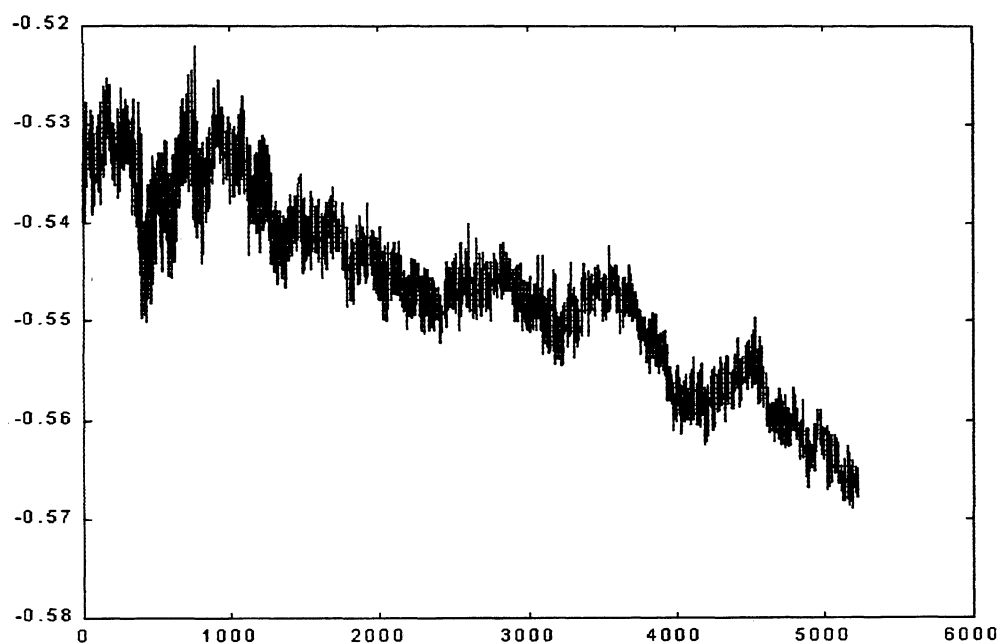
FONTE: O autor

GRÁFICO 10 – SDF em relação ao satélite 23 no dia 20 de junho de 2000 com eixo Y em metros e eixo X em número de épocas transcorridas



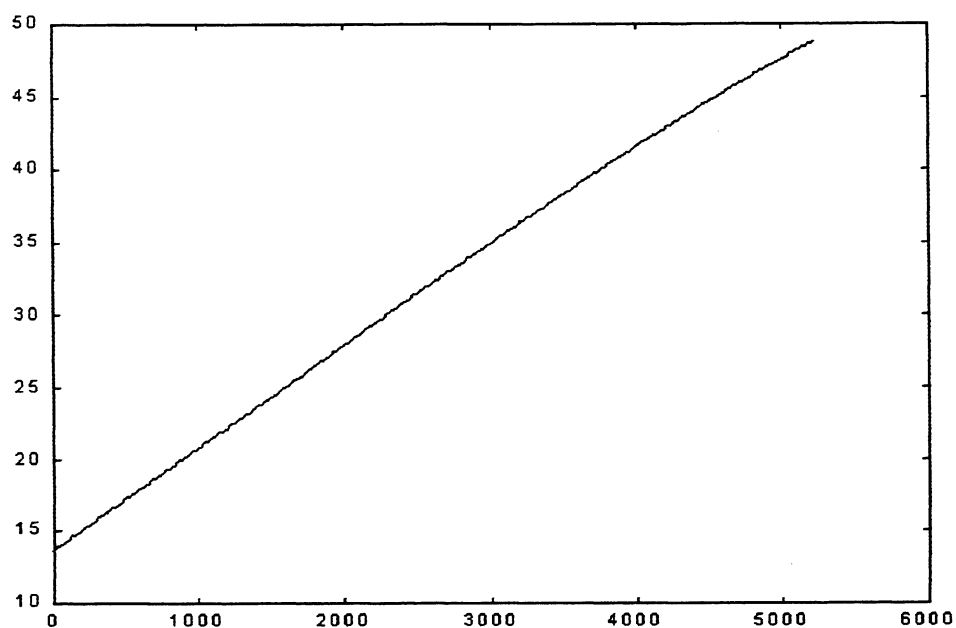
FONTE: O autor

**GRÁFICO 11 – SDF EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 23 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



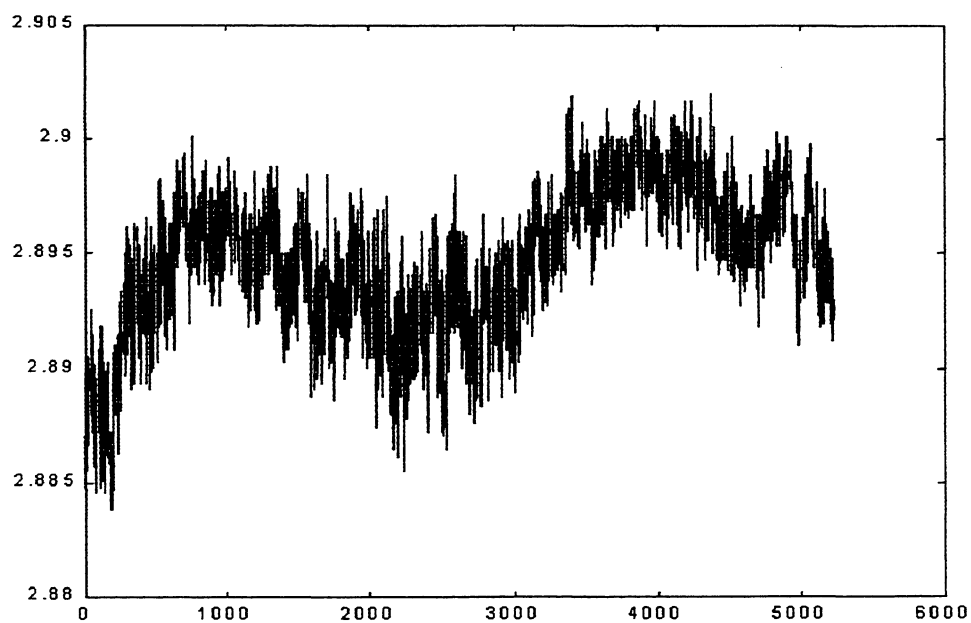
FONTE: O autor

**GRÁFICO 12 – ELEVAÇÃO DO SATÉLITE 23 DURANTE O PERÍODO DE RASTREIO NOS TRÊS DIAS COM EIXO Y EM GRAUS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



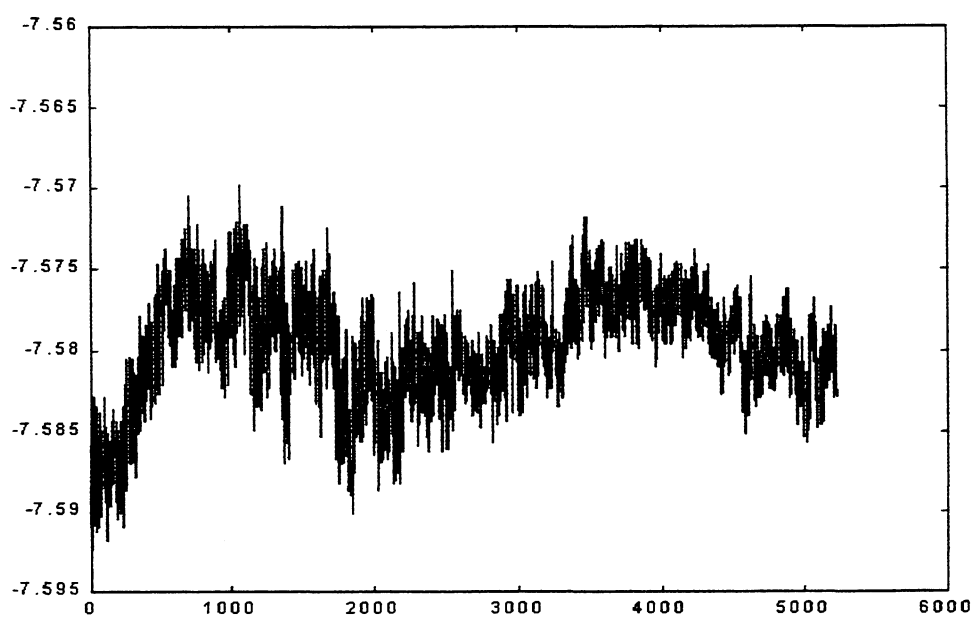
FONTE: O autor

GRÁFICO 13 – SDF EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS



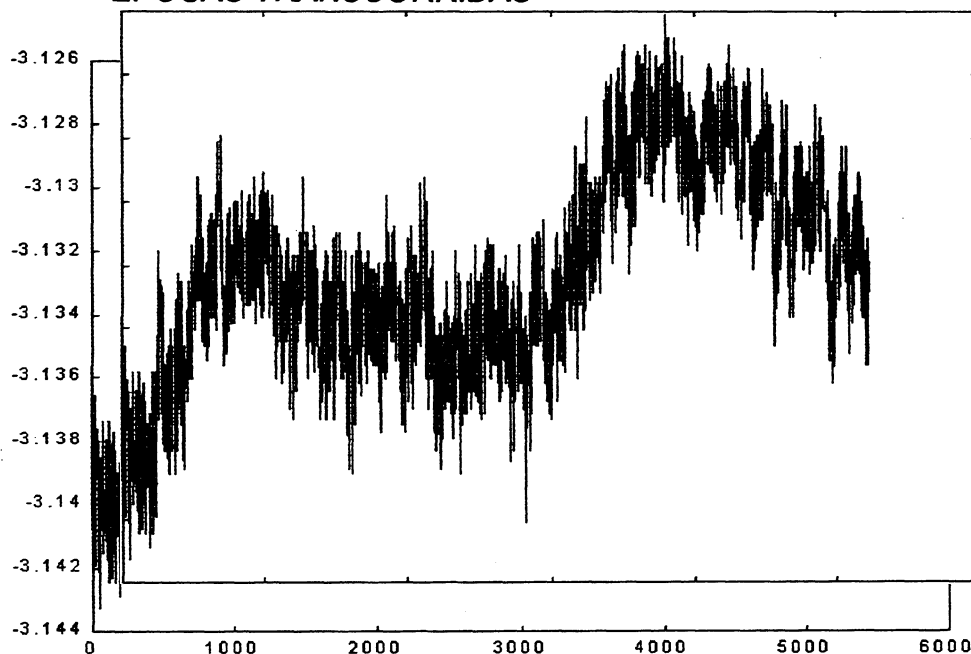
FONTE: O autor

GRÁFICO 14 – SDF EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS



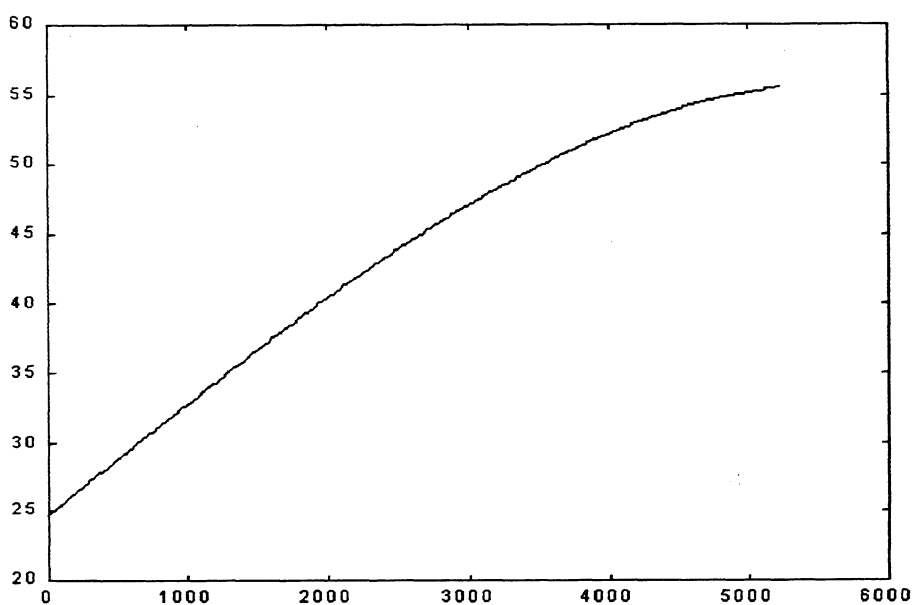
FONTE: O autor

GRÁFICO 15 – SDF EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000 COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS



FONTE: O autor

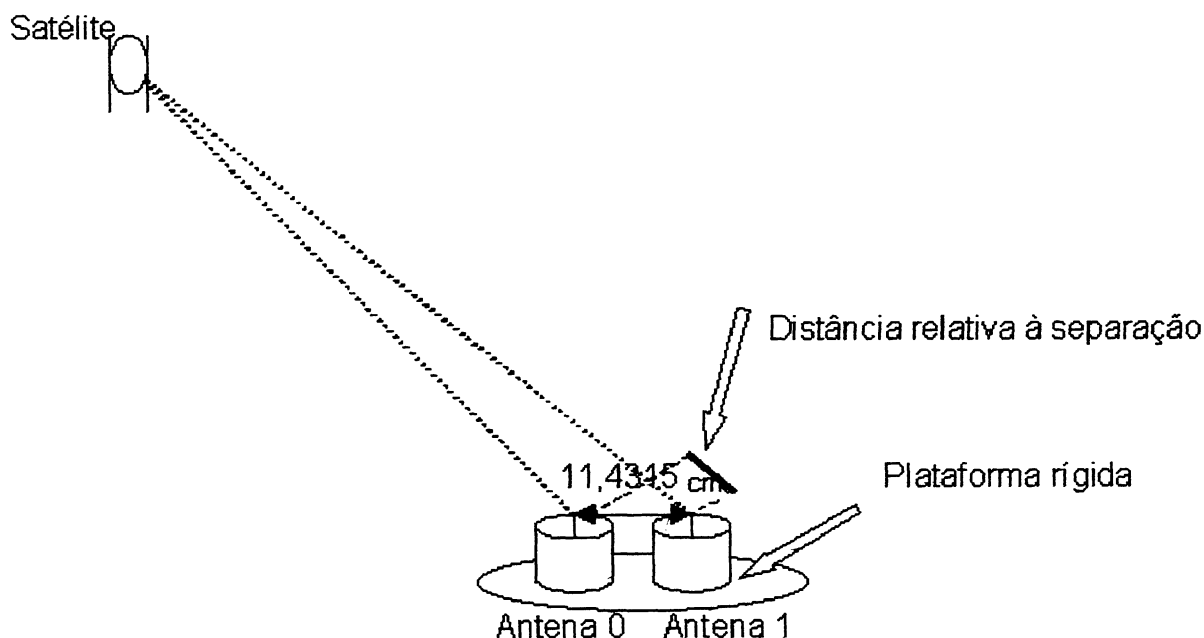
GRÁFICO 16 – ELEVAÇÃO DO SATÉLITE 26 DURANTE O PERÍODO DE RASTREIO NOS TRÊS DIAS COM EIXO Y EM GRAUS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS



FONTE: O autor

Outro fator componente da fórmula (13) é a distância devido à separação espacial entre as antenas ( $\Delta\rho$ ), que toma diferentes valores conforme a posição do satélite em relação às duas antenas. A figura 4 ilustra este fator.

**FIGURA 4 – ESQUEMA DEMONSTRATIVO DA DIFERENÇA DE FASE ENTRE AMBAS AS ANTENAS DEVIDO À SEPARAÇÃO ESPACIAL ENTRE AS MESMAS**



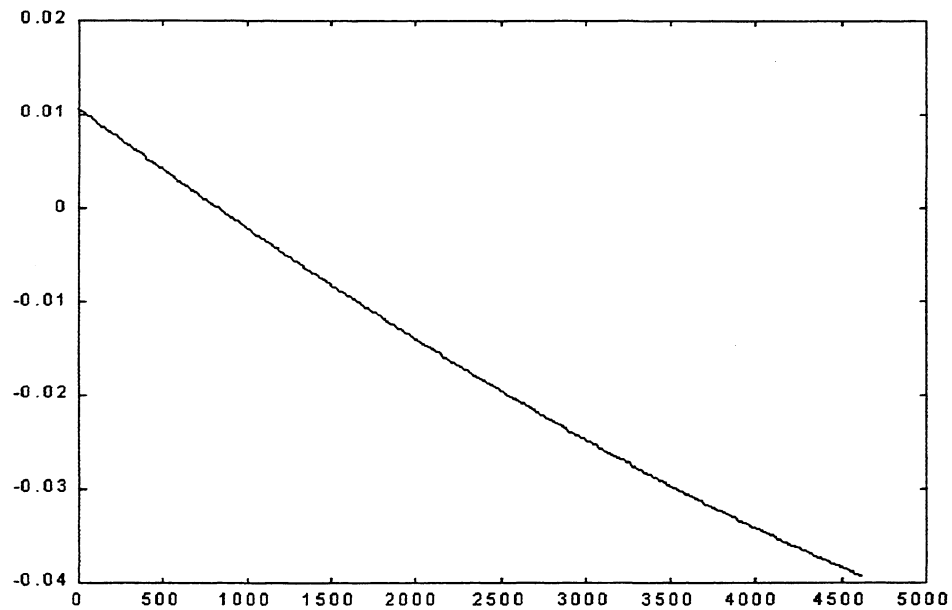
FONTE: O autor

Pela observação da figura 4 nota-se que o valor da distância devido à separação espacial entre as antenas tende a diminuir à medida que o satélite movimenta-se em direção ao ponto intermediário entre as mesmas, aumentando a seguir, independentemente da elevação do satélite. Este fato pode ser observado, por exemplo, em relação ao satélite 2 (ver gráfico 17). Embora a elevação do satélite não tenha influência direta neste valor, o que ocorre, na verdade, é uma conjugação dos movimentos horizontais, devido à rotação da Terra, e em altura, devido ao próprio movimento do satélite, fazendo com que nem sempre haja variação bem definida no sentido de aumento ou diminuição no valor da distância devido à separação espacial entre as antenas como ocorre, por exemplo, com o satélite 26 (ver gráfico 20).

Calculou-se a distância devido à separação espacial entre as antenas ( $\Delta\rho$ ) a partir das coordenadas dos satélites e das antenas, como mostrado na figura 4. Eventuais erros de coordenadas dos satélites ficam eliminados pelo aspecto diferencial, tendo-se usado órbitas precisas IGS da IAG.

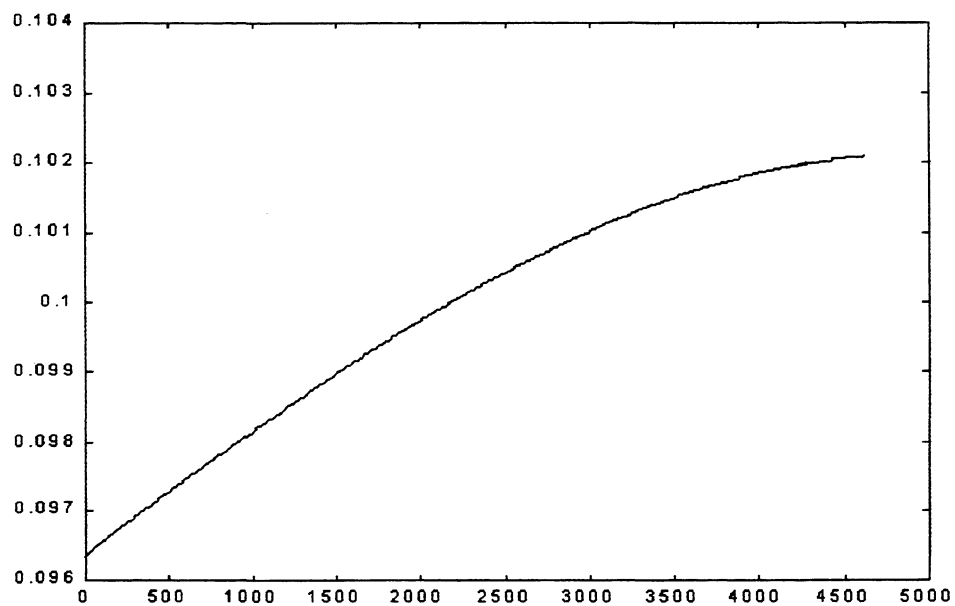
Os gráficos 17, 18, 19 e 20 mostram o valor da distância devido à separação espacial entre as antenas ( $\Delta\rho$ ) em relação aos satélites 2, 9, 23 e 26. Esses valores são os mesmos, em cada satélite, para todas as sessões de rastreamento devido à coincidência e repetição na geometria do cenário entre antenas, satélites e objetos refletivos.

**GRÁFICO 17 –  $\Delta\rho$  EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 2 NAS SESSÕES DOS DIAS 31 DE MAIO E 1º E 2 DE JUNHO COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



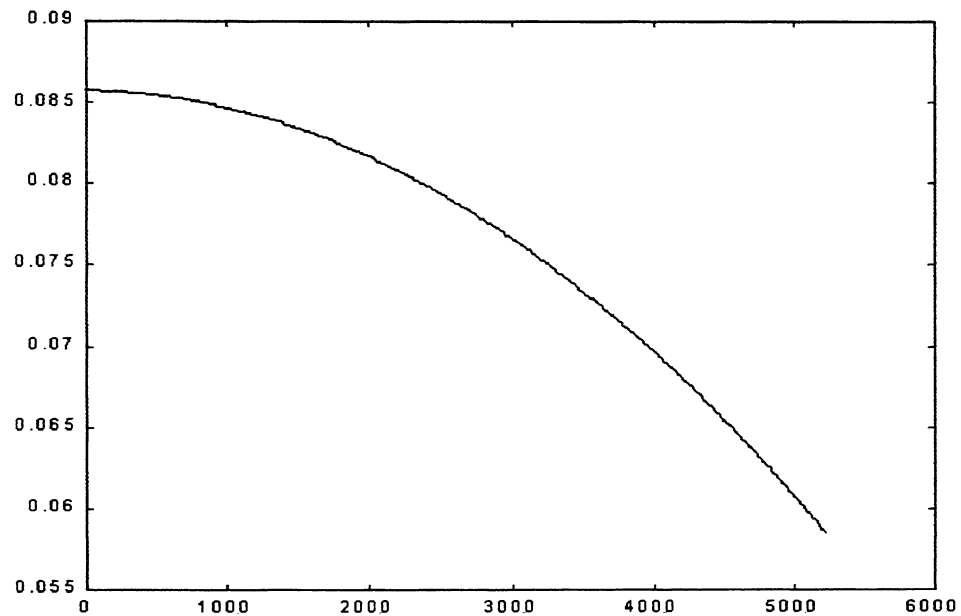
FONTE: O autor

**GRÁFICO 18 –  $\Delta\rho$  EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 9 NAS SESSÕES DOS DIAS 31 DE MAIO E 1º E 2 DE JUNHO COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



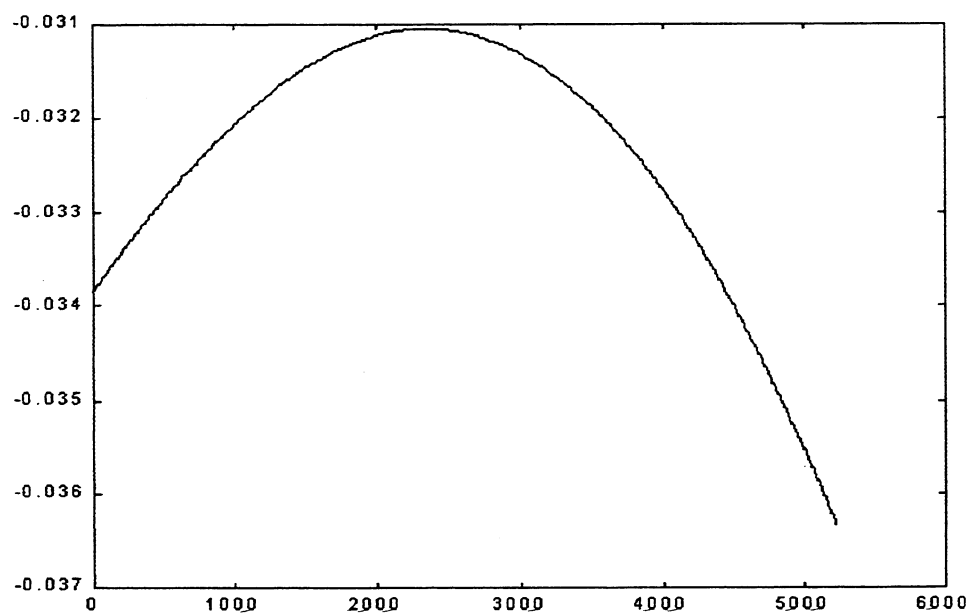
FONTE: O autor

**GRÁFICO 19 –  $\Delta\rho$  EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 23 NAS SESSÕES DOS DIAS 19, 20 E 21 DE JUNHO COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



FONTE: O autor

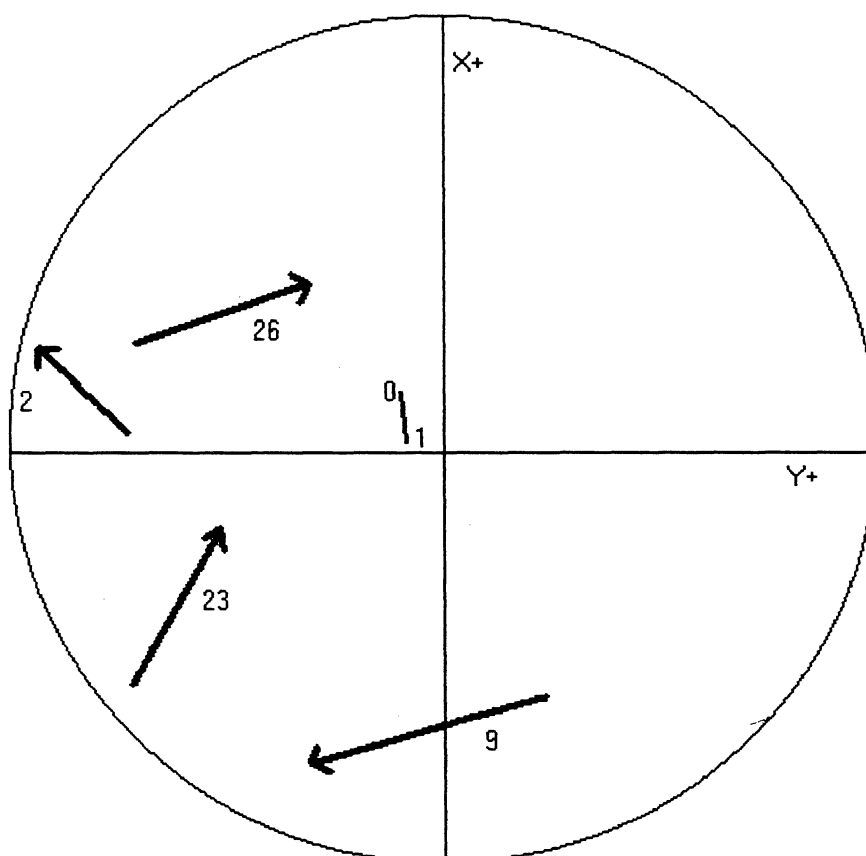
**GRÁFICO 20 –  $\Delta\rho$  EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 26 NAS SESSÕES DOS DIAS 19, 20 E 21 DE JUNHO COM EIXO Y EM METROS E EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



FONTE: O autor

Esses gráficos mostram que o valor da distância devido à separação espacial entre as antenas varia de acordo com a posição do satélite em relação à linha de base por elas formada, independentemente da altura do satélite. A partir das coordenadas X e Y dos satélites e das antenas, elaborou-se a figura 5, mostrando a posição relativa aproximada dos satélites em relação à linha de base das antenas durante os rastreios, projetadas ortogonalmente sobre o plano do equador.

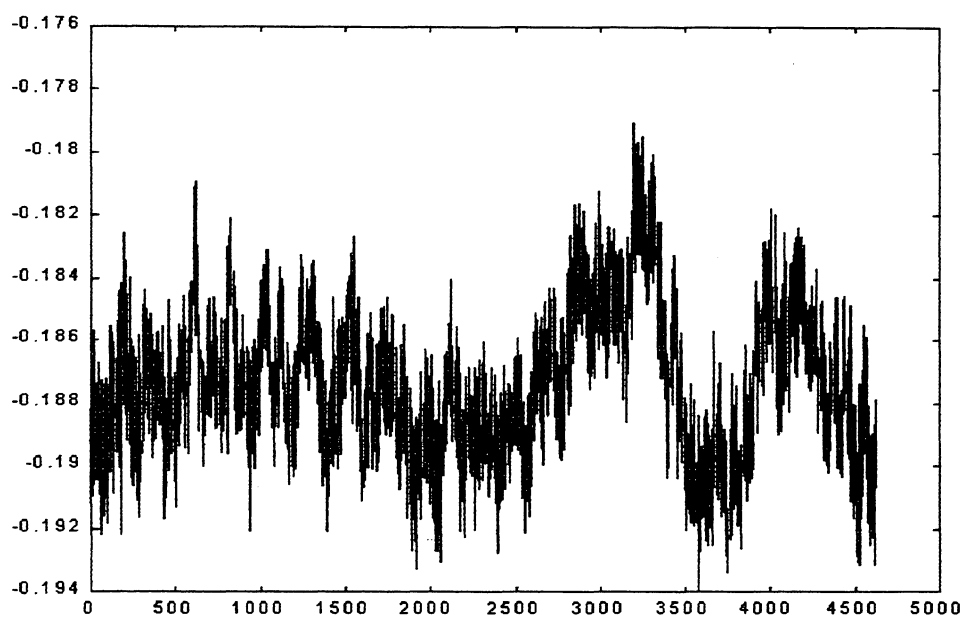
FIGURA 5 – MOVIMENTO DOS SATÉLITES E LINHA DE BASE PROJETADOS SOBRE O PLANO DO EQUADOR



FONTE: O autor

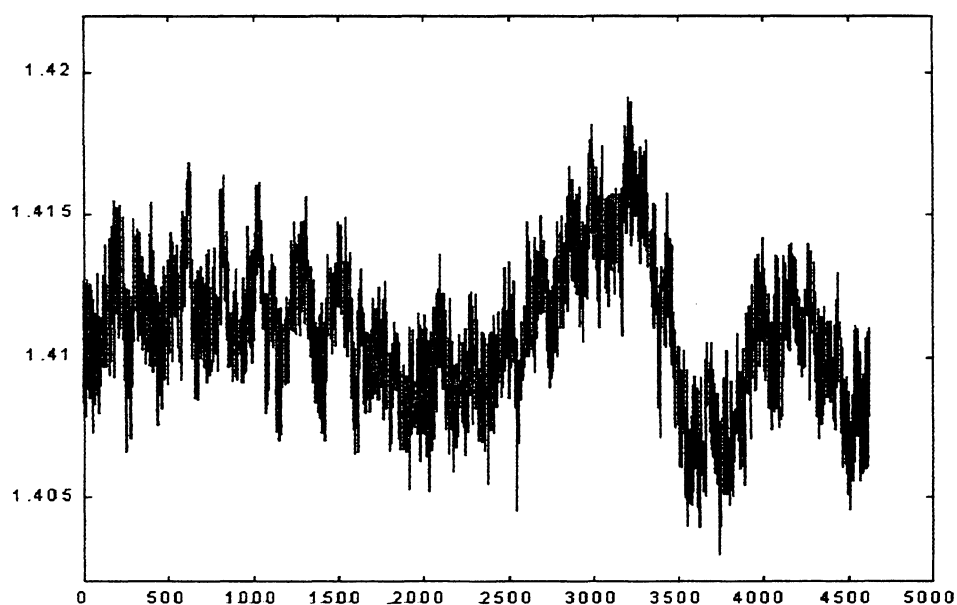
Após calculada a distância devido à separação espacial entre as antenas ( $\Delta\rho$ ) para cada satélite, eliminou-se o seu valor da equação (13) subtraindo-o da simples diferença de fase medida entre as antenas, o que é mostrado nos gráficos de 21 à 32. Observa-se a tendência de estabilização do sinal comparando-se os gráficos 1 e 21, 2 e 22, 3 e 23, 5 e 24, 6 e 25, 7 e 26, 9 e 27, 10 e 28, 11 e 29, 13 e 30, 14 e 31 e 15 e 32.

GRÁFICO 21 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta\rho$  PARA O SATÉLITE 2 NO RASTREIO DO DIA 31 DE MAIO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS



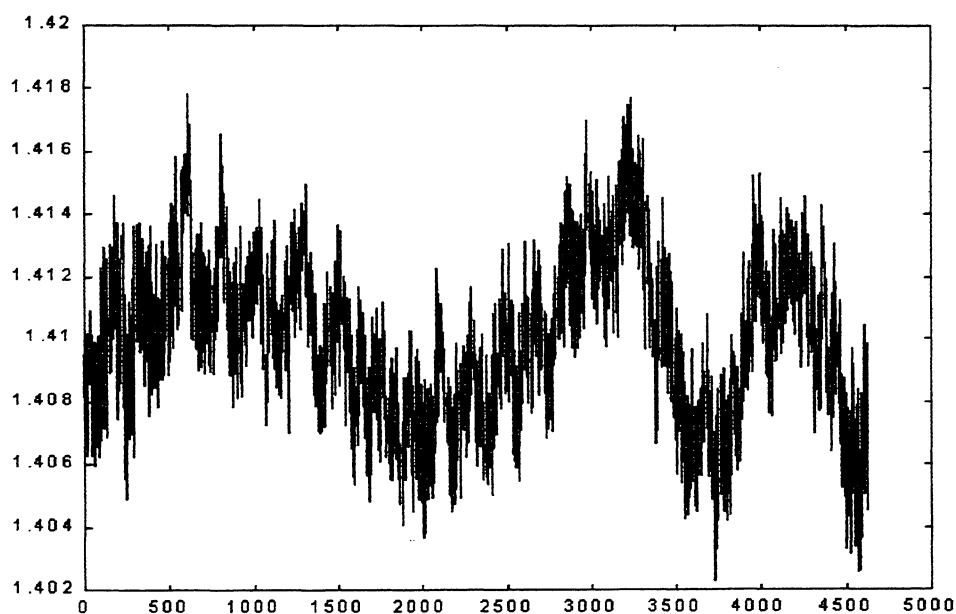
FONTE: O autor

GRÁFICO 22 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta\rho$  PARA O SATÉLITE 2 NO RASTREIO DO DIA 1º DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS



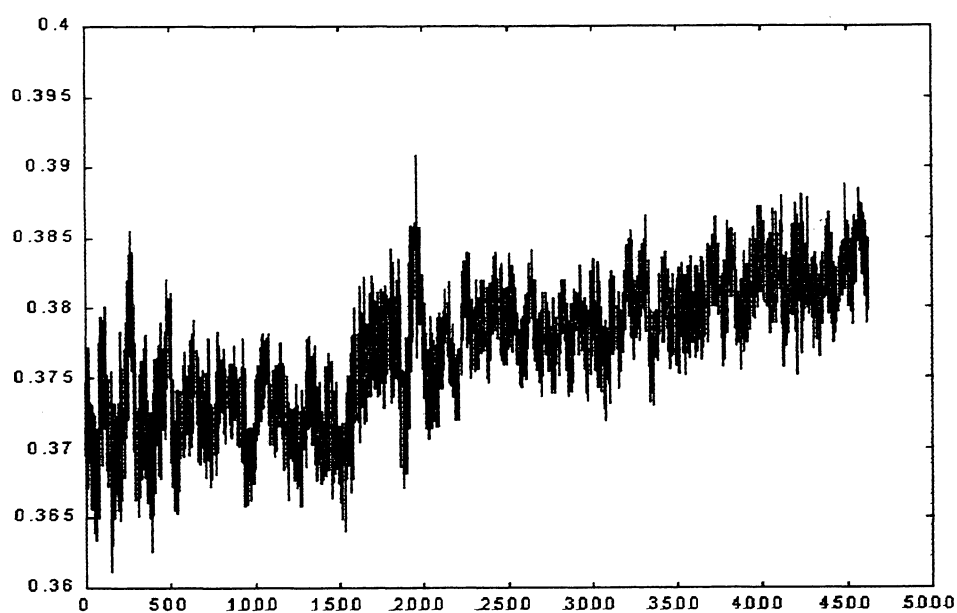
FONTE: O autor

**GRÁFICO 23 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta p$  PARA O SATÉLITE 2 NO RASTREIO DO DIA 2 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



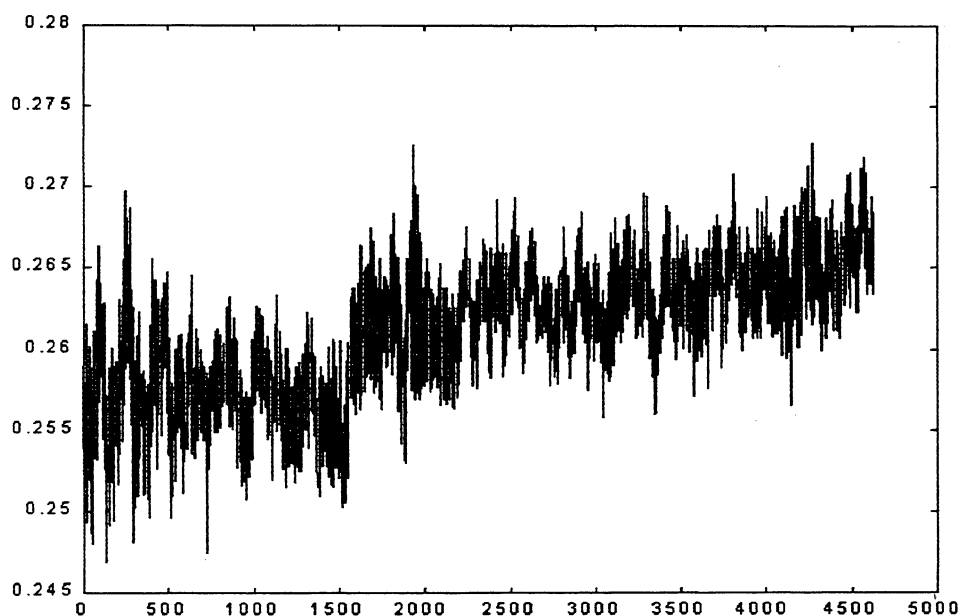
FONTE: O autor

**GRÁFICO 24 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta p$  PARA O SATÉLITE 9 NO RASTREIO DO DIA 31 DE MAIO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



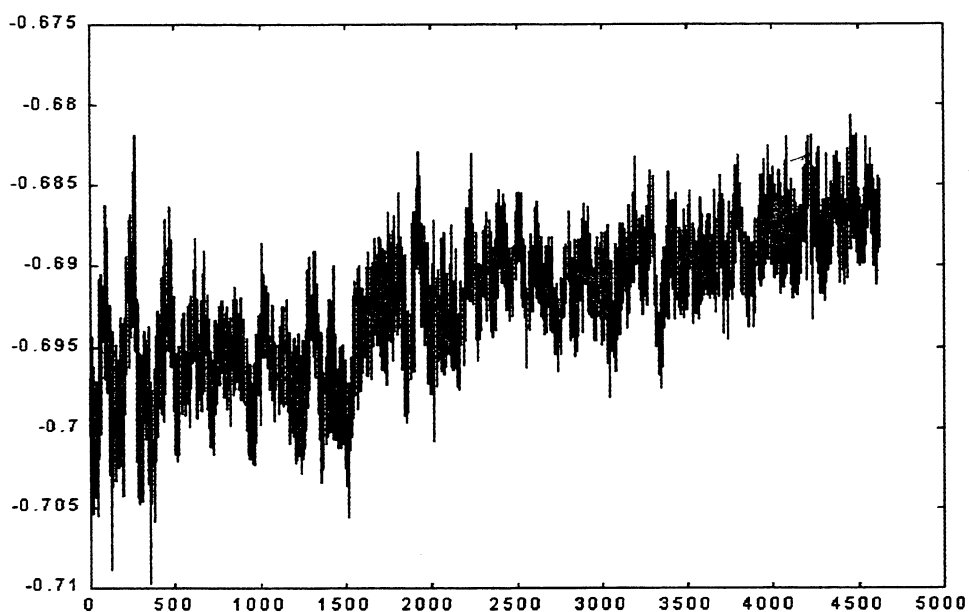
FONTE: O autor

**GRÁFICO 25 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta\rho$  PARA O SATÉLITE 9 NO RASTREIO DO DIA 1º DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



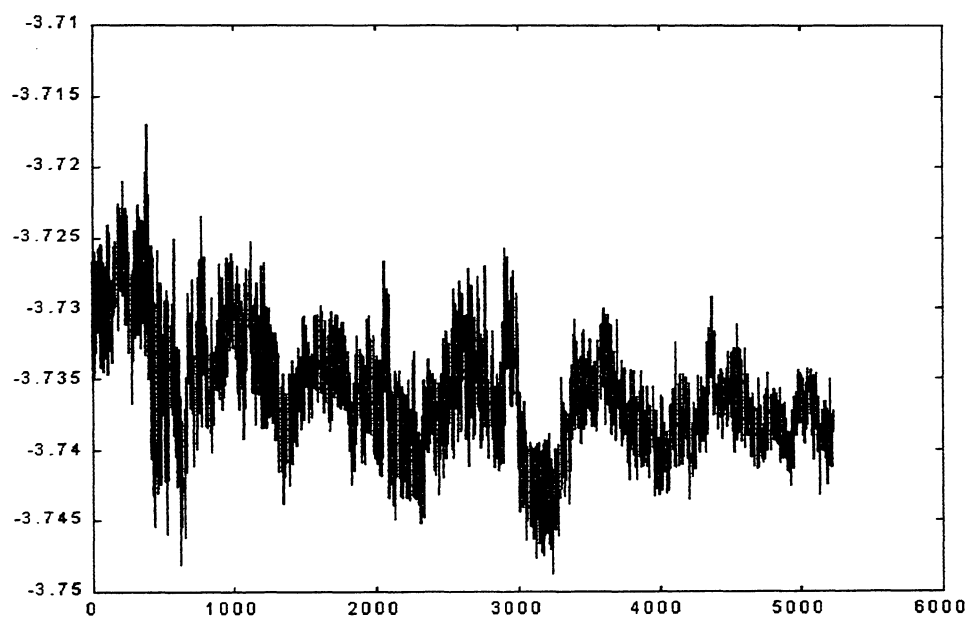
FONTE: O autor

**GRÁFICO 26 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta\rho$  PARA O SATÉLITE 9 NO RASTREIO DO DIA 2 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



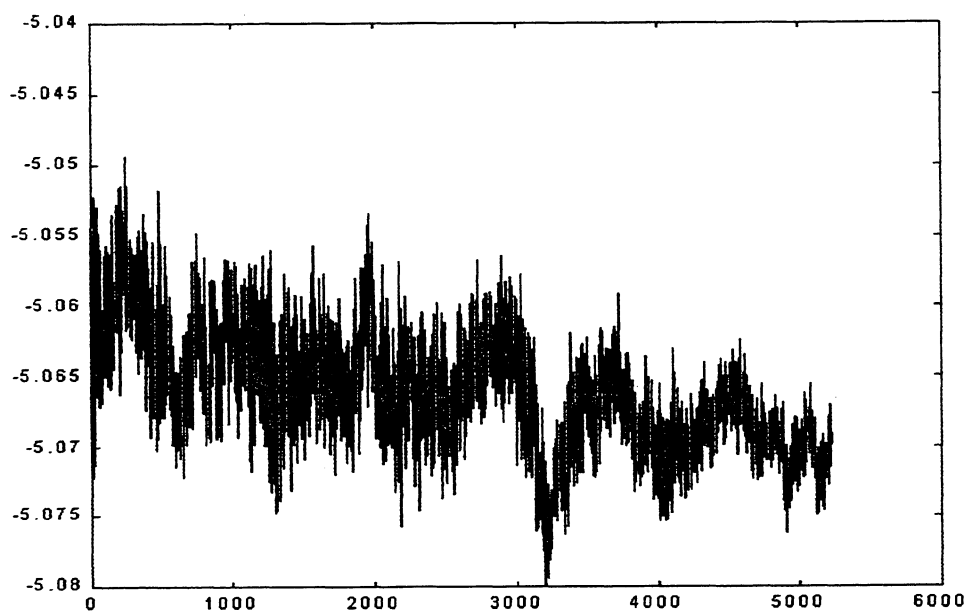
FONTE: O autor

**GRÁFICO 27 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta p$  PARA O SATÉLITE 23 NO RASTREIO DO DIA 19 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



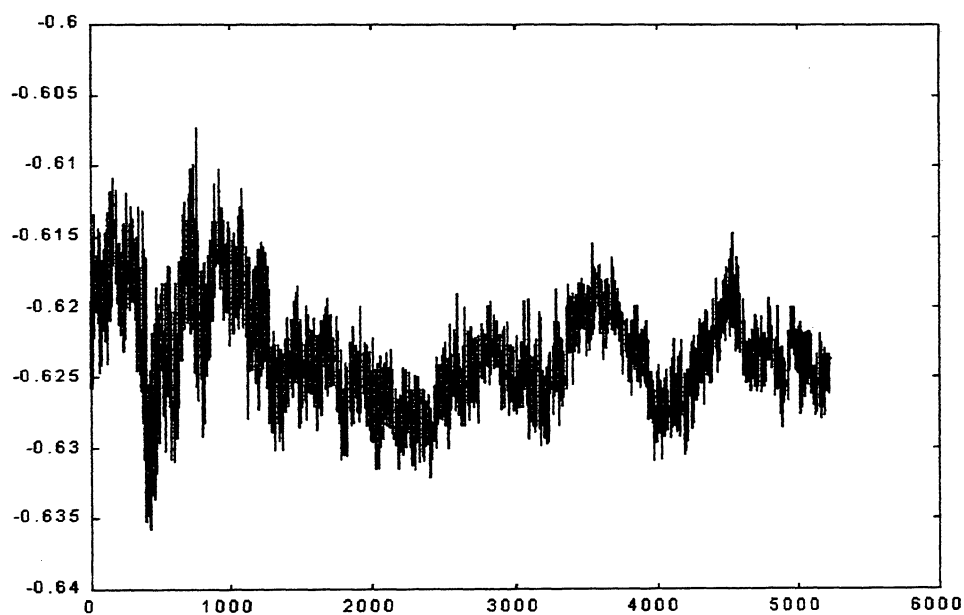
FONTE: O autor

**GRÁFICO 28 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta p$  PARA O SATÉLITE 23 NO RASTREIO DO DIA 20 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



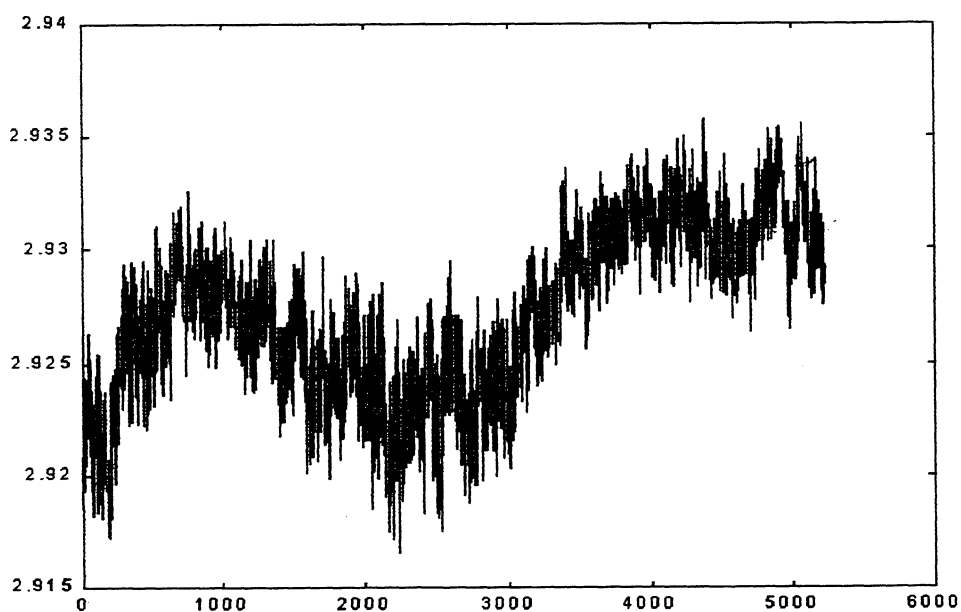
FONTE: O autor

**GRÁFICO 29 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta\rho$  PARA O SATÉLITE 23 NO RASTREIO DO DIA 21 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



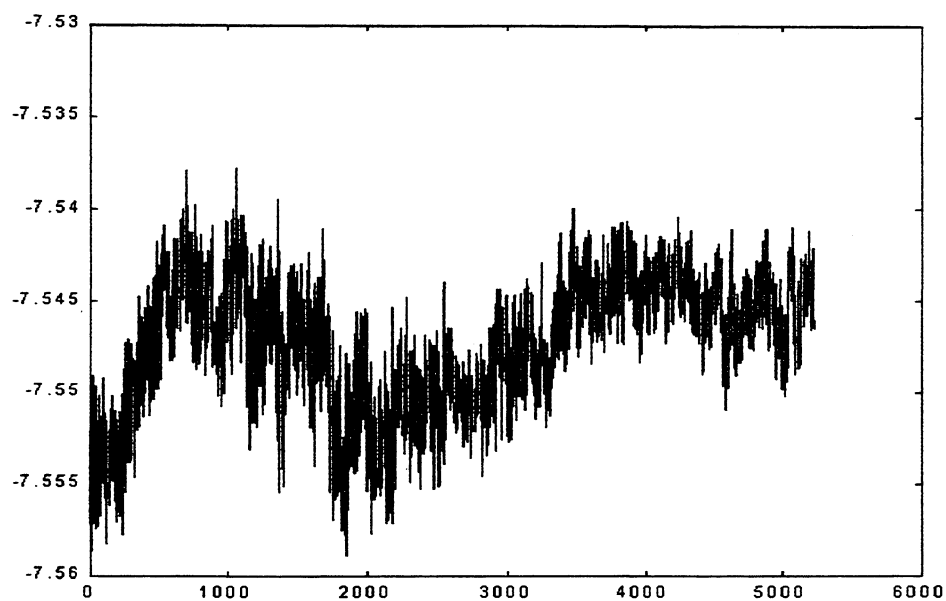
FONTE: O autor

**GRÁFICO 30 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta\rho$  PARA O SATÉLITE 26 NO RASTREIO DO DIA 19 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



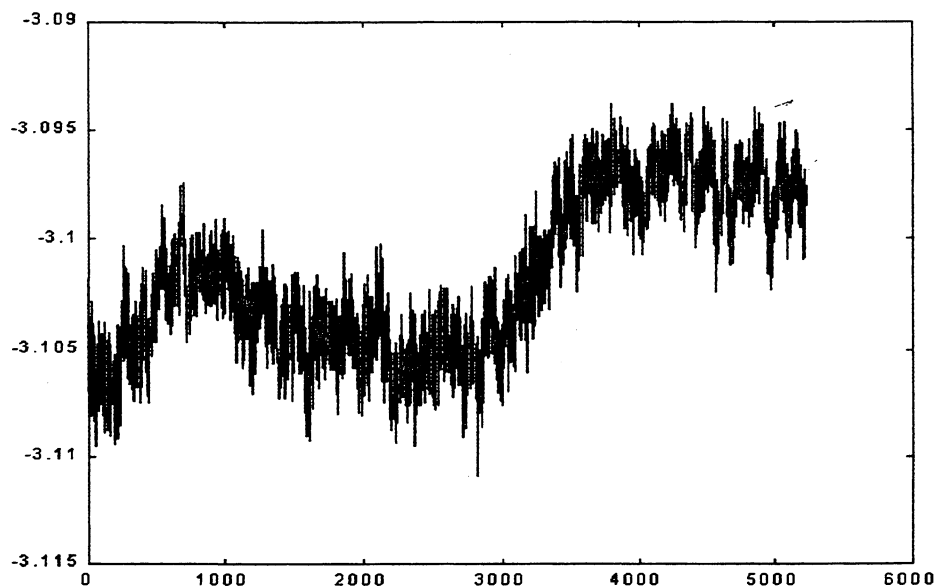
FONTE: O autor

**GRÁFICO 31 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta\rho$  PARA O SATÉLITE 26 NO RASTREIO DO DIA 20 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



FONTE: O autor

**GRÁFICO 32 – SDF CORRIGIDAS DO  $\Delta\rho$  PARA O SATÉLITE 26 NO RASTREIO DO DIA 21 DE JUNHO COM O EIXO Y EM METROS E O EIXO X EM NÚMERO DE ÉPOCAS TRANSCORRIDAS**



FONTE: O autor

Como o erro devido ao multicaminho é menor que 1/4 de ciclo, a diferença de fase devido à ambigüidade inteira relativa pode ser removida. Foram eliminados, portanto, da expressão (13) a diferença de fase devido à separação espacial entre as antenas, o erro devido ao não-sincronismo de relógio de receptores e a diferença de fase devido à ambigüidade inteira relativa. Ainda assim, observou-se a presença de um fator fracionário constante nas observações variando de um dia para o outro em cada satélite. Segundo a empresa fabricante do receptor usado no experimento, este valor é o que ela chama de “line bias” e é inerente ao receptor. O “line bias” é um desvio na diferença de fase da portadora devido, principalmente, à dimensão dos cabos (Gomez & Hwu, 1997). Este desvio é eliminado quando do uso do “software” de processamento que acompanha o receptor e por calibração prévia. A finalidade precípua deste receptor é navegação e determinação de atitude em tempo real, o que não é o caso da presente pesquisa, razão pela qual foram elaboradas as próprias rotinas necessárias para esse trabalho. Eliminou-se este desvio subtraindo o valor da primeira observação, de todo o sinal. Feitas todas as operações descritas na SDF, definida na expressão (13), o que restou foi uma nova expressão para a SDF (a chamada SDFr), e que representa somente a diferença de multicaminho e ruído da portadora (inerente ao receptor) entre as antenas, conforme a expressão (14).

$$\Delta \Phi_{01}^r = \Delta \mathcal{E}_{\varphi 01} + \Delta \mathcal{E}_{MP01} \quad (14)$$

Em consequência disso, o vetor de observações que alimenta o EKF fica formado pela SDFr em quatro instantes separados de um segundo entre si, ou seja, a cada quatro segundos tem-se um novo vetor de medidas. Designando-o por  $\mathbf{z}$ , este vetor fica:

$\mathbf{z} = [\Delta \Psi'_{01-1}, \Delta \Psi'_{01-2}, \Delta \Psi'_{01-3}, \Delta \Psi'_{01-4}]^T$ , onde os índices 1, 2, 3 e 4 indicam as quatro épocas com um segundo de intervalo em que as medidas foram feitas.

Este é um ponto crucial em relação à pesquisa com várias antenas, ou seja, o uso de quatro medidas da fase da portadora em épocas separadas de um segundo, somente é possível com o pressuposto de que a variação angular do satélite no espaço de tempo de quatro segundos (que é de 2 minutos de arco) não é

significativa, o que parece ser um pressuposto válido, até porque o desvio máximo não ocorre para todas as quatro medidas. Os gráficos de 33 à 44 mostram a SDFr, ou seja, a diferença de erro devido ao multicaminho entre as duas antenas tanto em metros como em radianos, unidade na qual este sinal dá entrada no EKF (vetor de medidas), em relação aos satélites 9 e 26. Eles são os satélites selecionados para amostragem completa de resultados, nos três dias de rastreo. O fator de conversão de metros para radianos foi dado pela expressão  $(2\pi/\lambda)$ , sendo  $\lambda = 0,1905$  m para a frequência da portadora L1, resultando em um valor de 32,9826 para o fator de conversão. Nesses gráficos o eixo X mostra, além do número de épocas transcorridas, o horário de início e fim da sessão em UTC, avançado em três horas em relação ao horário local na época dos trabalhos de tomada de dados.

Usou-se o coeficiente de correlação multiplicado por cem para analisar a repetibilidade do sinal de SDFr entre um dia e outro, pois a repetibilidade para as mesmas condições de geometria de cenário satélite-antenas-objetos refletores, é uma característica única de sinais de multicaminho. Para o satélite 9 houve uma repetibilidade de 77% entre os dias 31 de maio e 1º de junho e 1º e 2 de junho, e de 74% entre os dias 31 de maio e 2 de junho, com uma repetibilidade média para esse satélite de 76%. Para o satélite 26 esses resultados são de 70% entre os dias 19 e 20, 66% entre os dias 20 e 21 e de 84% entre os dias 19 e 21, todos no mês de junho de 2000, com uma repetibilidade média para esse satélite de 73% durante os três dias. A tabela 2 mostra esses resultados.

**TABELA 1 – REPETIBILIDADE (%) DA SDFr PARA OS SATÉLITES 9 E 26**

| Dias        | 31 e 1º | 1º e 2  | 31 e 2  | Média |
|-------------|---------|---------|---------|-------|
| Satélite 9  | 77%     | 77%     | 74%     | 76%   |
| Dias        | 19 e 20 | 20 e 21 | 19 e 21 | Média |
| Satélite 26 | 70%     | 66%     | 84%     | 73,4% |

**FONTE:** O autor

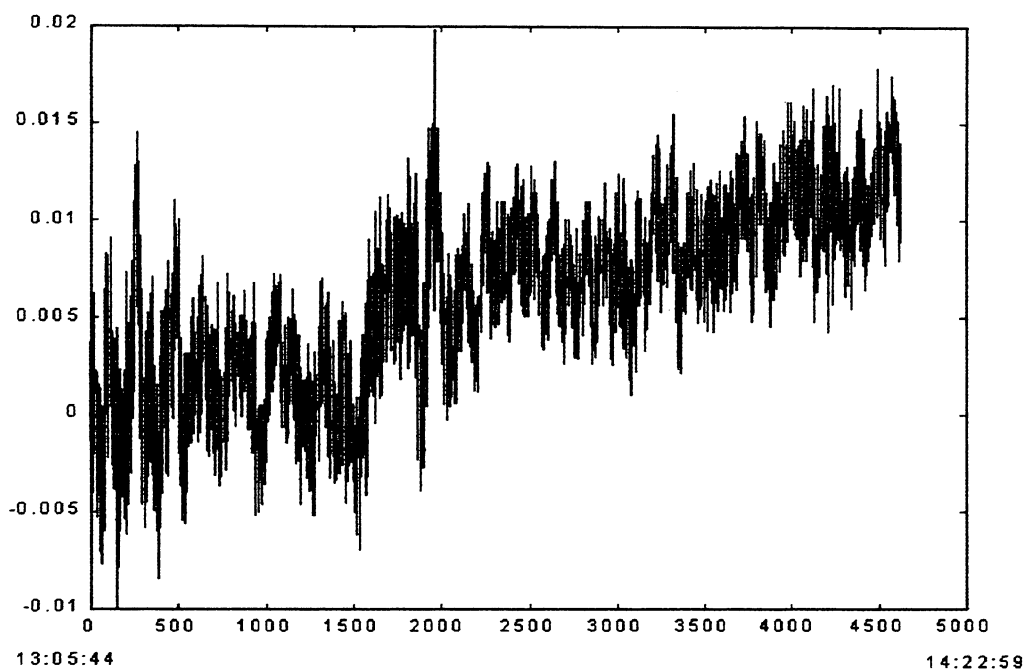
Para os demais satélites a repetibilidade média nos três dias foi de 73% para o satélite 2 e de 45% para o satélite 23, cuja baixa repetibilidade comprometeu o uso deste satélite para fins de demonstração de resultados.

Considera-se que a parte do sinal que não se repete nas sessões subseqüentes com a mesma geometria de cenário é devida ao ruído térmico.

#### 2.3.1.1.1 Sobre o ruído térmico

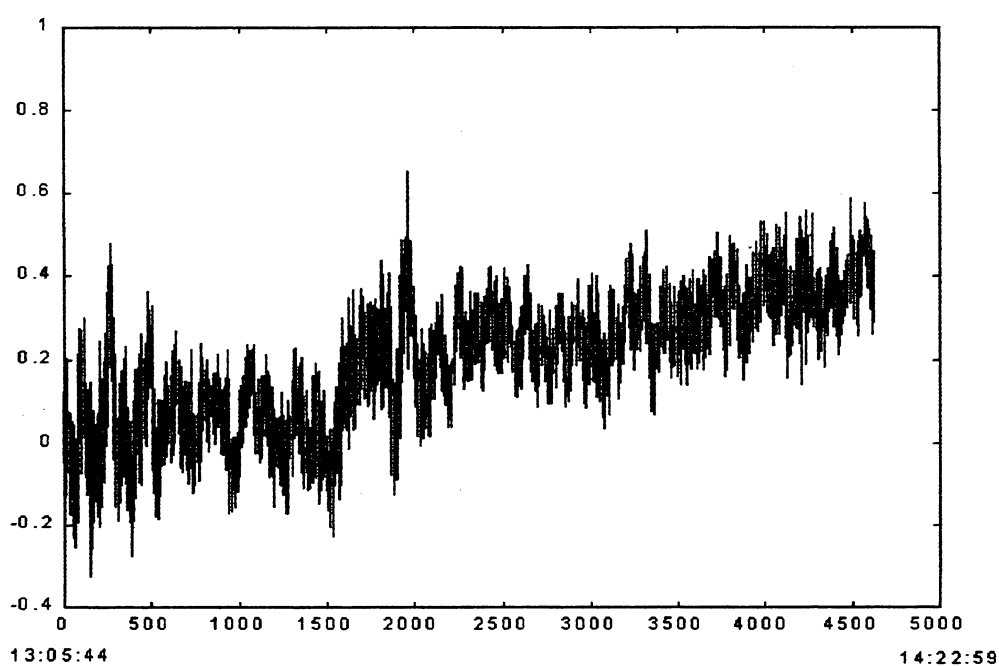
O ruído térmico é responsável por erros de pequena magnitude e de difícil detecção e remoção presentes nas medidas da fase das portadoras GPS. O ruído térmico no receptor é dependente da SNR na entrada do correlacionador. Como a SNR é função do ângulo de elevação do satélite, o desvio-padrão do ruído total pode ser caracterizado como função dessa elevação. Brenner et al. (1998), mostra dados de erro de multicaminho em código identificando a contribuição do ruído termal. Esses dados são mostrados também para diferentes locais, evidenciando a influência da temperatura nesse erro. Para o presente trabalho, não foi possível um melhor modelamento do ruído térmico, o que poderia levar a uma melhor consideração dos seus efeitos no fenômeno estudado, pela inclusão de sua matriz de covariância no EKF.

**GRÁFICO 33 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 31 DE MAIO**



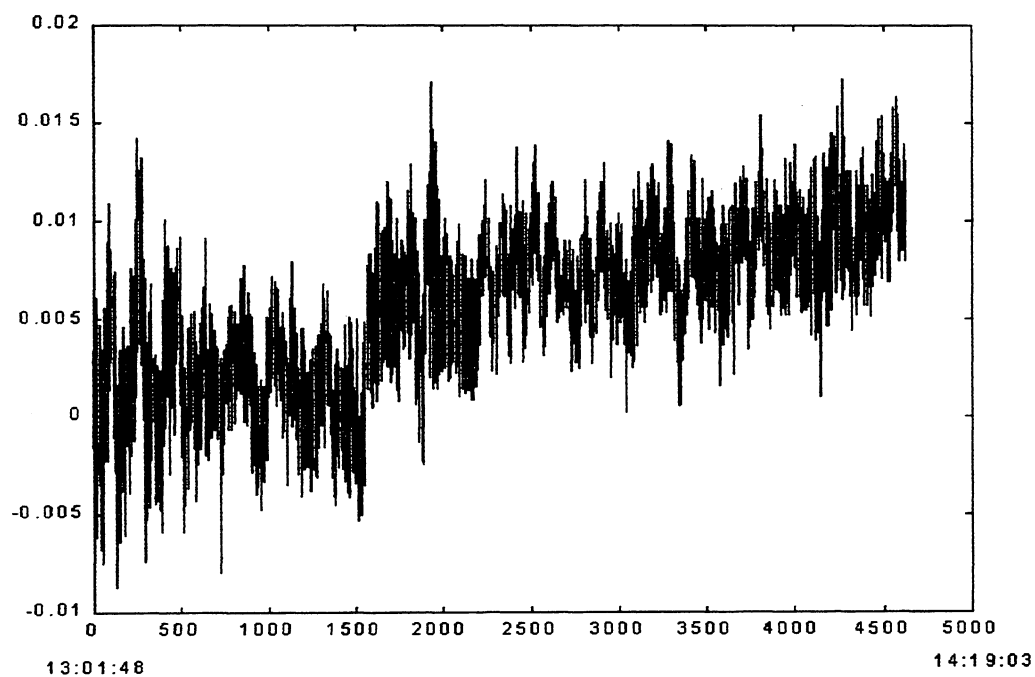
FONTE: O autor

**GRÁFICO 34 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 31 DE MAIO**



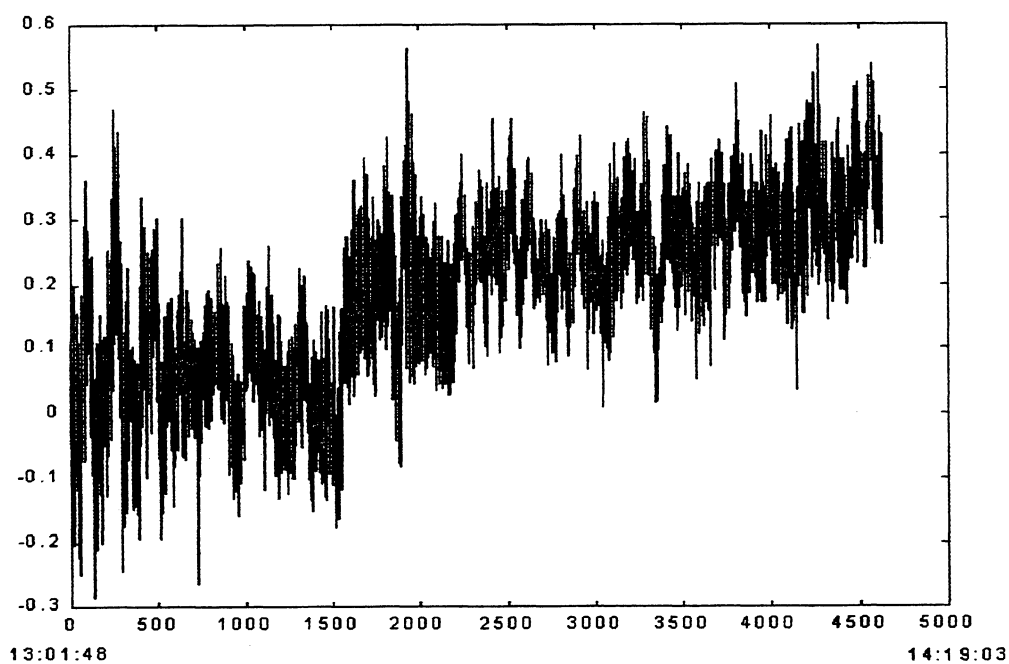
FONTE: O autor

GRÁFICO 35 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 1º DE JUNHO



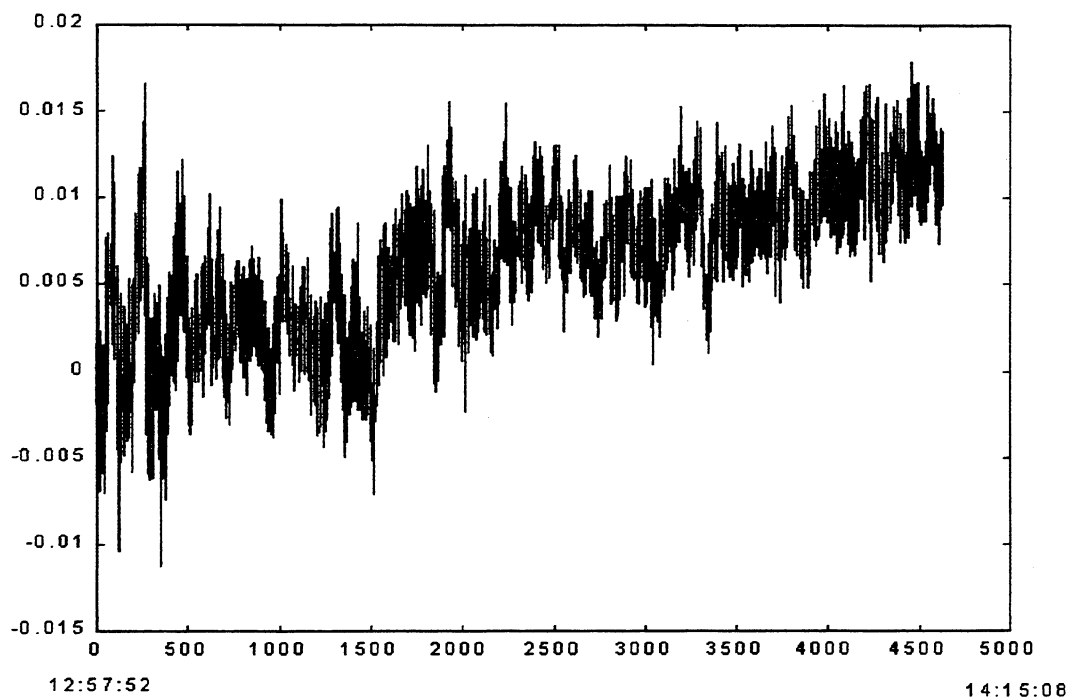
FONTE: O autor

GRÁFICO 36 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 1º DE JUNHO



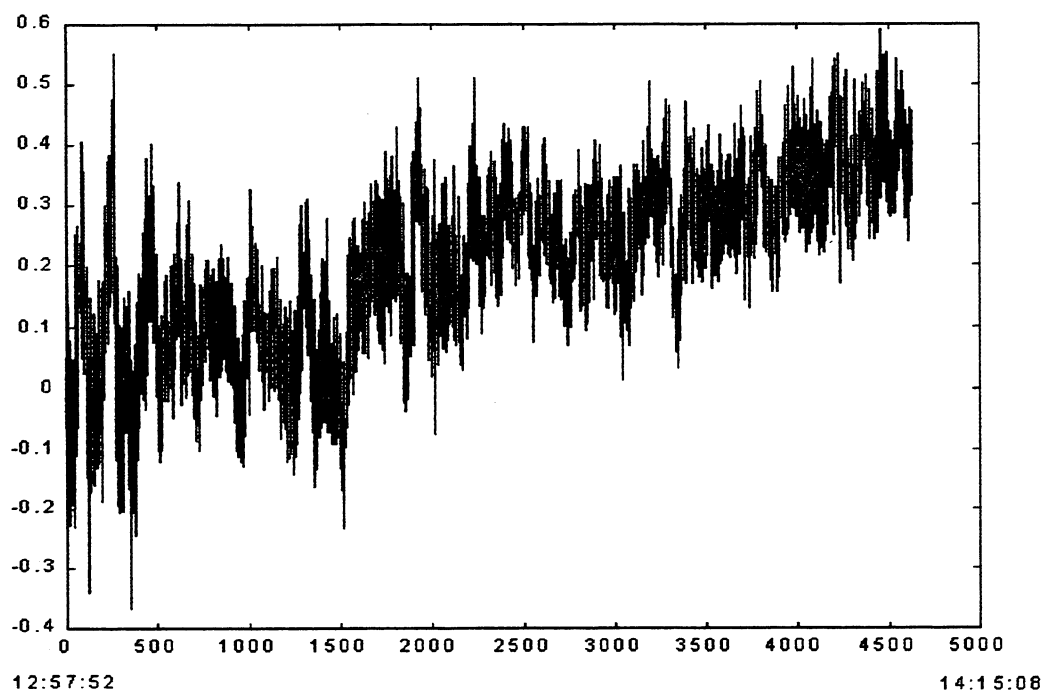
FONTE: O autor

**GRÁFICO 37 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 2 DE JUNHO**



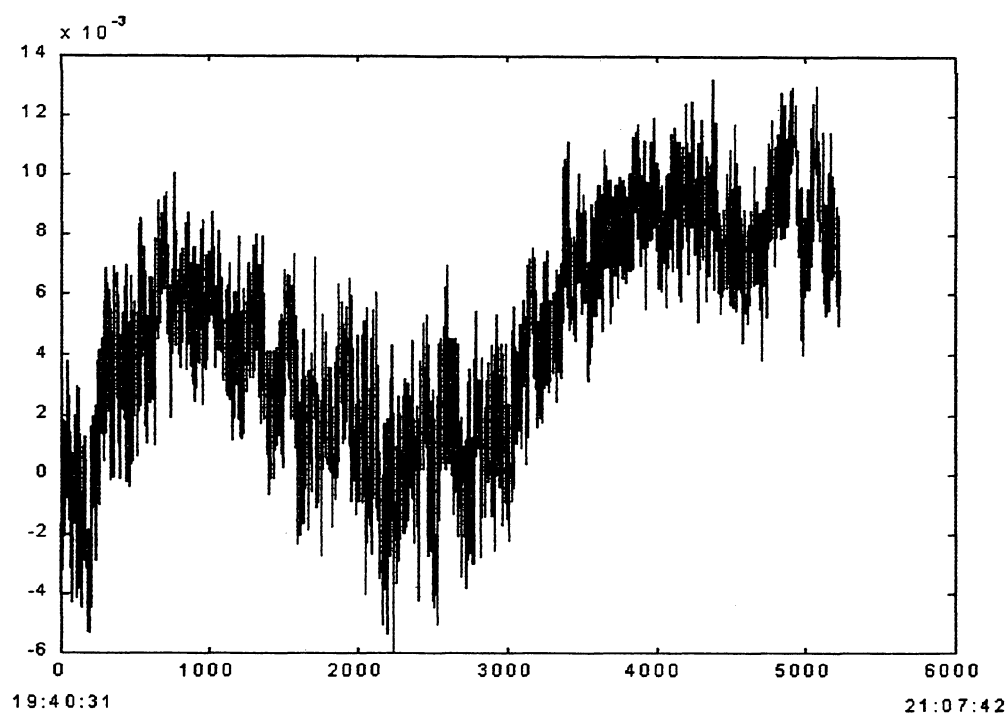
FONTE: O autor

**GRÁFICO 38 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 9 DURANTE A SESSÃO DO DIA 2 DE JUNHO**



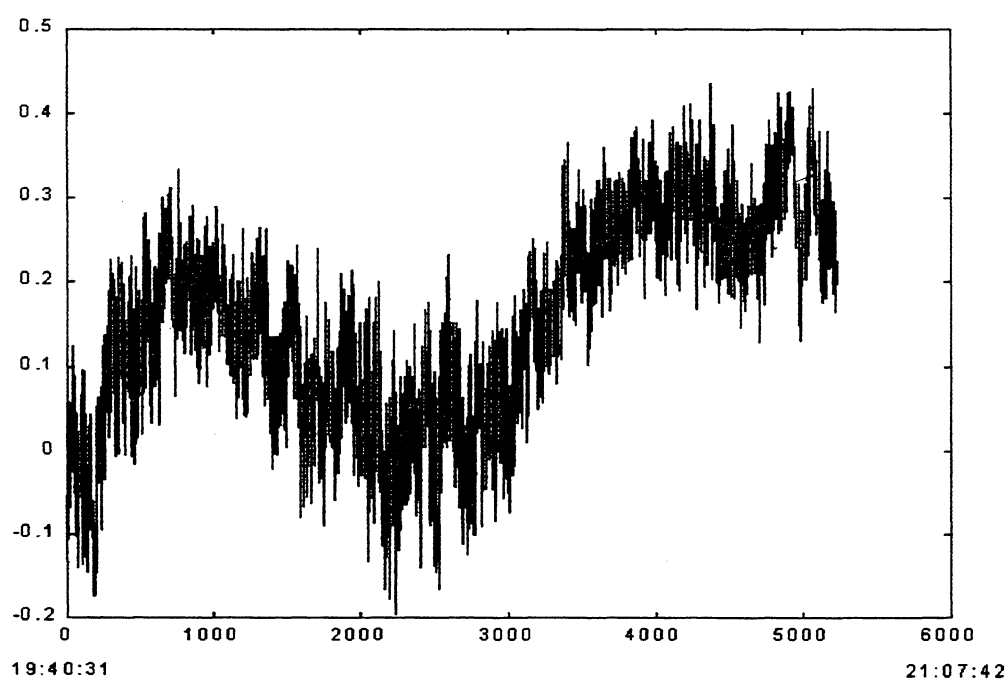
FONTE: O autor

GRÁFICO 39 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 19 DE JUNHO



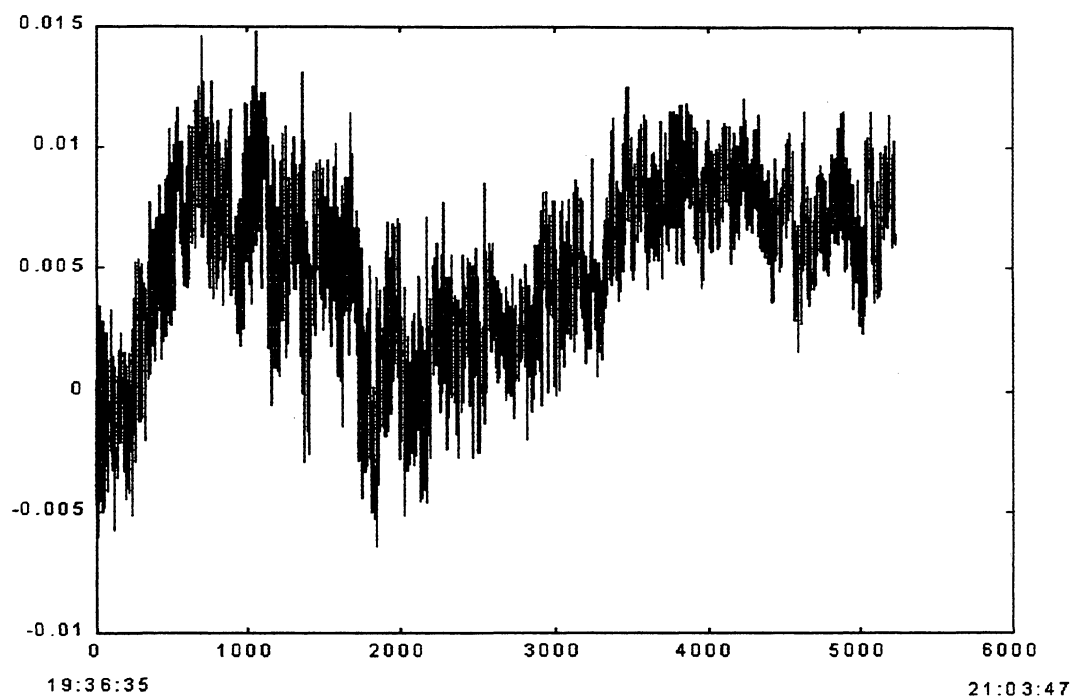
FONTE: O autor

GRÁFICO 40 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 19 DE JUNHO



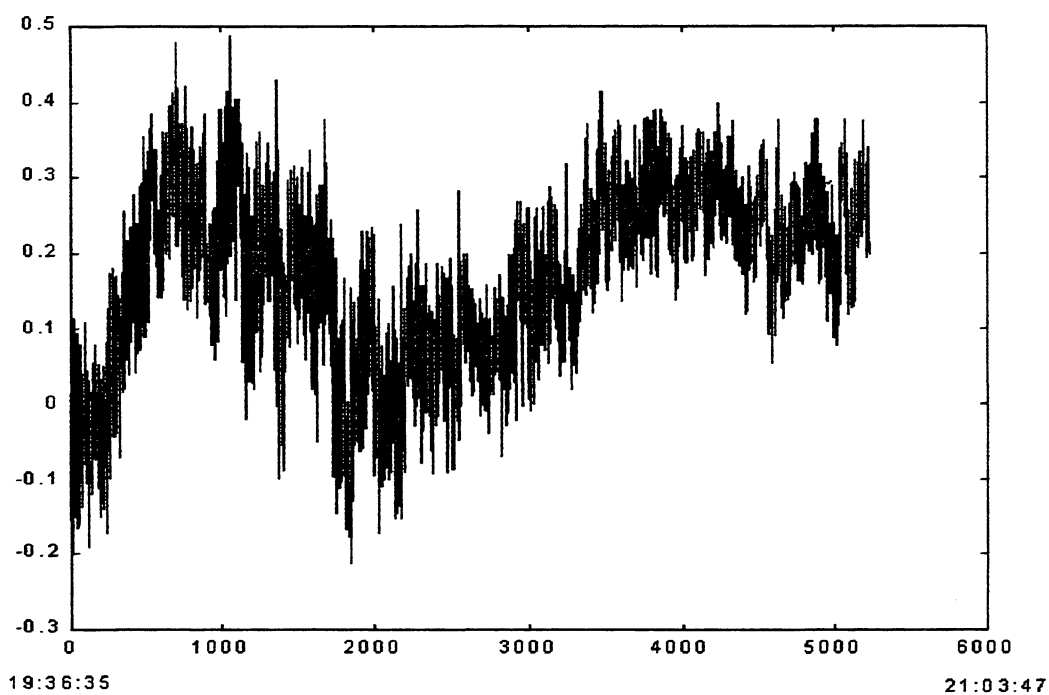
FONTE: O autor

**GRÁFICO 41 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 20 DE JUNHO**



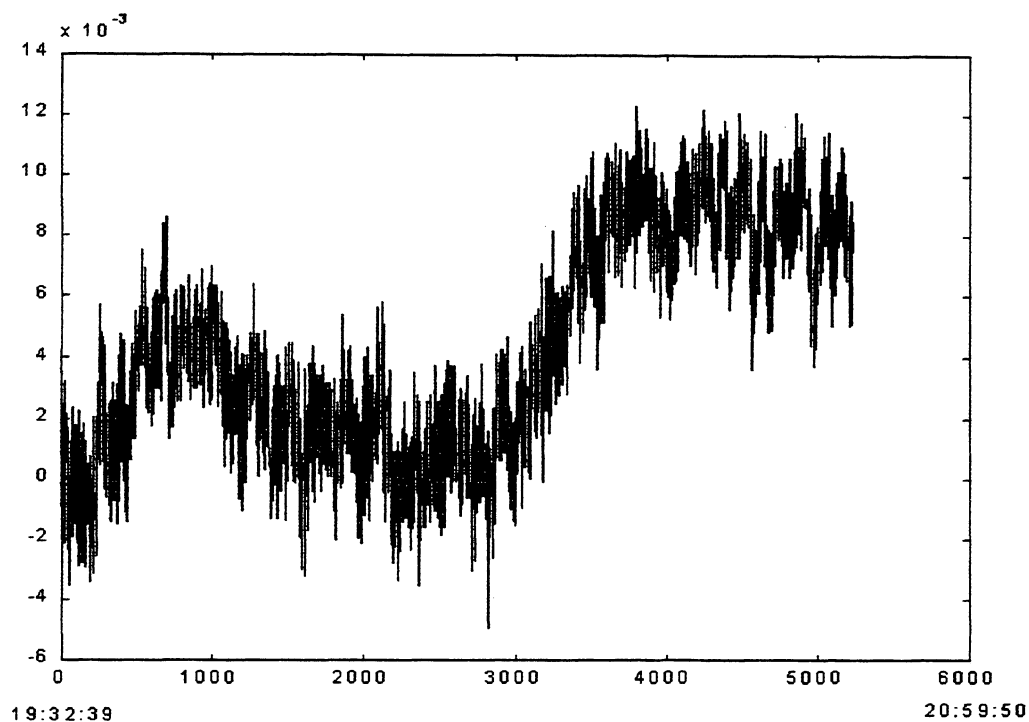
FONTE: O autor

**GRÁFICO 42 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 20 DE JUNHO**



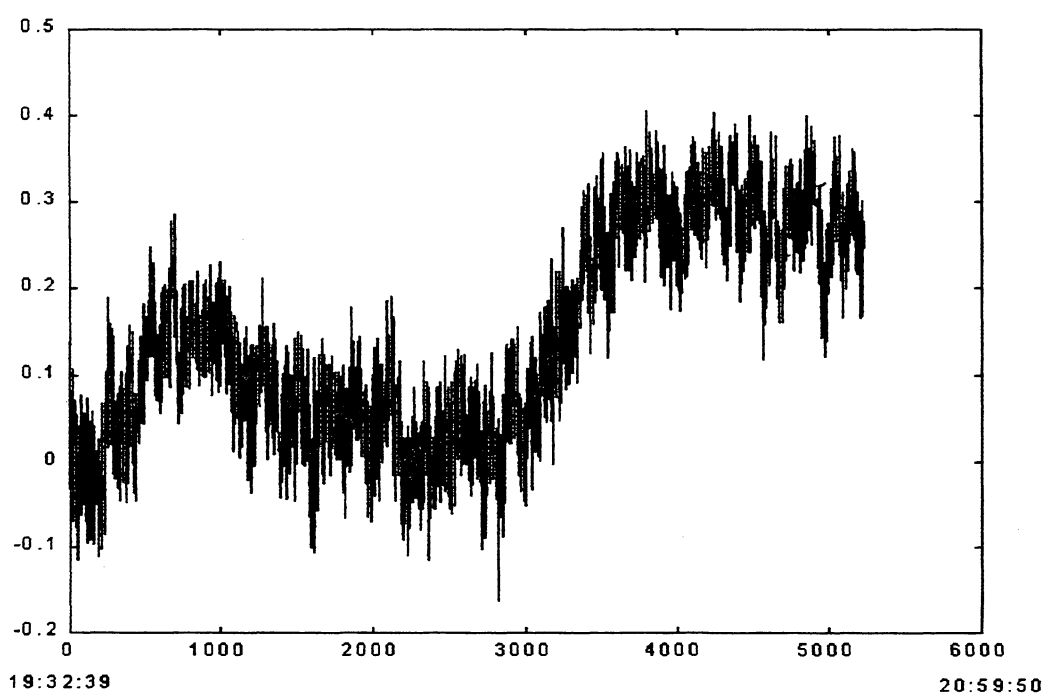
FONTE: O autor

GRÁFICO 43 – SDFr EM METROS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 21 DE JUNHO



FONTE: O autor

GRÁFICO 44 – SDFr EM RADIANOS PARA O SATÉLITE 26 DURANTE A SESSÃO DO DIA 21 DE JUNHO



FONTE: O autor

### 2.3.1.2 A matriz de covariância para as observações

Como a observável primária é a SDF entre as antenas, formou-se essa matriz através da precisão das medidas da fase da portadora preconizada por vários autores (Leick, 1990; Well, 1987; Seeber, 1993; Hoffman-Wellenhof, 1994; Parkinson et al., 1996). Segundo esses autores, esse valor gira em torno de um por cento do comprimento de onda da portadora (0,0020 m para a portadora L1 e 0,0024 m para a portadora L2). Manteve-se essa proporção quando da passagem dos valores de SDF de metros para radianos, para entrada no EKF.

### 2.3.1.3 Vinculação das medidas com o vetor de estado

Para formular uma expressão em que todas as medidas fiquem em função dos parâmetros de estado, substituiu-se a equação (8) na equação (7), originando a expressão (15):

$$\Delta \Psi_{01}' = \arctg \left\{ \frac{\alpha_0 \sin \gamma_0 - \alpha_0 \sin \left[ \gamma_0 + \frac{2\pi a_{01}}{\lambda} \cos(\varphi_0 - \phi_{01}) \cos \theta_0 \right] - \alpha_0^2 \sin \left[ \frac{2\pi a_{01}}{\lambda} \cos(\varphi_0 - \phi_{01}) \cos \theta_0 \right]}{1 + \alpha_0 \cos \left[ \gamma_0 + \frac{2\pi a_{01}}{\lambda} \cos(\varphi_0 - \phi_{01}) \cos \theta_0 \right] + \alpha_0^2 \cos \left[ \frac{2\pi a_{01}}{\lambda} \cos(\varphi_0 - \phi_{01}) \cos \theta_0 \right]} \right\} \quad (15)$$

Derivou-se a equação (15) em relação a cada um dos quatro parâmetros (ver anexo 2) para cada uma das quatro observações, formando uma matriz de derivadas quadrada, com quatro equações e quatro incógnitas. Este fato é uma vantagem em relação ao sistema com várias antenas, especialmente em termos computacionais, sempre levando em conta o pressuposto básico da não variação angular significativa no movimento do satélite, considerado no intervalo de quatro segundos. Fez-se manualmente a derivação destas equações com posterior verificação através do

aplicativo Matlab, e deste “software” em si, através da derivação por diferentes métodos.

#### 2.3.1.4 O modelamento do sistema – o modelo de Gauss-Markov

Usou-se no EKF o modelo probabilístico de Gauss-Markov, pela sua simplicidade, pela falta de um melhor conhecimento sobre a previsibilidade do comportamento do sistema e pela proximidade das observações, pois o mesmo tem boa aplicabilidade em problemas diversos de estimação de parâmetros na presença de ruído. Segundo Brown & Hwang (1992), o processo de Gauss-Markov é todo processo estacionário gaussiano que tem uma autocorrelação (ver anexo 1) exponencial. A função de autocorrelação para este processo tem a seguinte forma:

$$R_x(\tau) = \sigma^2 e^{-\beta|\tau|} \quad (16)$$

Pela teoria da dependência de Markov, o estado presente depende apenas deste e do estado assumido no estágio imediatamente anterior. O processo de Markov é não-determinístico, de forma que uma função amostral temporal deste processo, apresenta-se tipicamente como um ruído. A função de autocorrelação exponencial indica que valores amostrais do processo tornam-se gradualmente menos e menos correlacionados à medida em que o tempo entre as amostras aumenta. A função de autocorrelação aproxima-se de zero à medida em que o tempo entre as amostras tende para o infinito, e o valor médio do processo tem que ser zero. O processo de Gauss-Markov é um importante processo em trabalhos práticos, pois ele se coloca dentro de um grande número de processos físicos com razoável precisão, e tem uma descrição matemática relativamente simples (Brown & Hwang, 1992). Como em todo processo gaussiano estacionário, o mesmo fica completamente definido pela sua função de autocorrelação. Isto significa que qualquer função densidade de probabilidade de alta ordem, pode ser escrita explicitamente por essa função. No presente trabalho assumiu-se a independência dos parâmetros entre si, determinando a diagonalidade da matriz de covariância do estado. A peculiaridade do intervalo de tempo entre as tomadas de observações (de

segundo em segundo) deixou os valores dessa diagonal muito próximos da variância das mesmas. Aproveitou-se o fato da baixa variância nas observações para compará-las com o valor da unidade para a diagonal da matriz de covariância do estado. Como não houve diferença significativa entre os dois casos, por questão de simplificação no experimento, optou-se pelo uso da matriz identidade, pois a mesma pode ser usada para todos os satélites, evitando a elaboração de uma matriz para cada satélite.

#### 2.3.1.5 A codificação do EKF

Utilizando-se o aplicativo Matlab, implementou-se o EKF para fins de demonstração e verificação da viabilidade da metodologia proposta. Utilizou-se de recursos de busca automática das medidas da fase da portadora a partir dos arquivos RINEX e mecanismos de "loop" para o processamento automático do filtro a cada novo conjunto de observações.

Apesar da exigência de um EKF para cada satélite rastreado, isso é facilitado pelo fato das saídas serem identificadas para cada satélite, via código PRN, tanto para receptores tipo seqüencial como multiplex.

### 2.4 CÁLCULO DO ERRO DEVIDO AO MULTICAMINHO

Uma vez obtidos os parâmetros do sinal refletido, através do filtro, utilizou-se as equações (8), (7) e (6) para calcular a fase do sinal refletido e, por substituição, a diferença no erro devido ao multicaminho entre as antenas e o erro devido ao multicaminho, respectivamente, em cada uma delas.

### 2.5 O USO DAS FASES CORRIGIDAS DO EFEITO DO MULTICAMINHO

As estimativas do erro devido ao multicaminho em cada uma das antenas subtraídas das fases originalmente medidas, fornecem valores da fase da portadora atenuadas do efeito do multicaminho. Isso resultam em maior precisão na medida da distância receptor-satélite e, quando usadas dentro de um contexto de estação de referência, fornecem melhores resultados aos usuários. Tomando-se por base o

tempo de duração da sessão do dia 31, que é de 1h17min16s, e que a mesma foi processada em menos de 3,8min em um computador pentium 266, acredita-se ser bastante viável o cálculo e transmissão, em tempo real, de correções ou de medidas de fase já corrigidas para usuários remotos. Vale no entanto citar que a transmissão de dados não foi objeto do presente trabalho.

### 3 RECURSOS UTILIZADOS

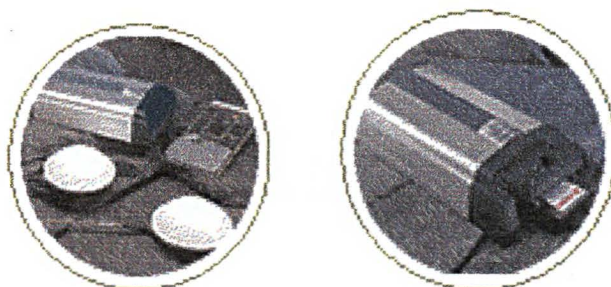
#### 3.1 EQUIPAMENTO DE RASTREIO

O conjunto utilizado na tomada de dados, ou seja, nas sessões de rastreo dos satélites utilizados na pesquisa e que forneceram as medidas de fase da portadora L1 para a formação da observável básica utilizada como entrada no EKF estimador dos parâmetros do multicaminho, constou de: um receptor BeeLine, duas antenas modelo 501, cabos e demais suprimentos essenciais ao bom funcionamento do sistema. Esses equipamentos foram gentilmente fornecidos pela fabricante, a empresa NovAtel, de Calgary, Alberta, Canadá.

##### 3.1.1 O Receptor NovAtel BeeLine

O BeeLine é um receptor cuja característica principal é possuir duas linhas de rádio-frequência da portadora L1, uma para cada antena e cada uma com oito canais, totalizando uma capacidade de dezesseis canais L1/L1. Usou-se este receptor no presente trabalho graças a esta capacidade, pois permitiu a medição da fase da portadora em ambas as antenas com um único relógio, fazendo com que não tenha havido erro de sincronismo nas medidas de tempo. Outras características importantes deste receptor são: uso do código C/A na portadora L1 medindo código e fase, taxa de medição de dados brutos de 10 Hz, saída em diferentes formatos como RTCM SC 104 versões 2.1/2.2 e RINEX versão 2.0, cartão interno com dimensões de 17,4 cm x 10,0 cm x 1,8 cm e peso de 175 g e tecnologia “Narrow Correlator” patenteada pela NovAtel (Ford et al. – 1997). Estas e outras características fazem do BeeLine um receptor bastante versátil e preciso. A figura 6 mostra a parte externa deste receptor juntamente com o cartão interno e duas antenas modelo NovAtel 501.

FIGURA 6 – RECEPTOR NOVATEL BEELINE COM VISTA DO CARTÃO INTERNO DO RECEPTOR E DUAS ANTENAS MODELO NOVATEL 501



FONTE: NOVATEL, INC. **Beeline User Manual**. Disponível em: [www.novatel.ca/productmanuals.html](http://www.novatel.ca/productmanuals.html)> Acesso: 9 maio. 2000.

### 3.1.2 A antena modelo NovAtel 501

Este é um modelo de antena de última geração projetada para atender a múltiplas aplicações GPS, tanto estáticas como cinemáticas, possuindo amplificador interno de baixo ruído e filtro interno de rejeição de interferências. Duas características básicas desta antena tiveram forte influência no presente trabalho. A primeira é com relação a uma característica física positiva, ou seja, o seu diâmetro, que é de 11,4 cm. Isto permitiu que se fizesse uma linha de base entre os centros de fase das duas antena do experimento com menos de 19,05 cm que é o comprimento de onda na frequência da portadora L1. Isso fez com que a diferença de fase devido à ambigüidade inteira relativa, juntamente com o fato de que o efeito do multicaminho nas medidas da fase das portadoras é menor do que um quarto de ciclo, pudesse ser eliminada. A outra característica é o mecanismo interno de rejeição do multicaminho que a empresa fabricante preconiza para esta antena, mas não divulgando detalhes da tecnologia empregada. Esta é uma característica negativa para o experimento pois, se ao todo ou em grande parte verdadeira, essa característica mascara o efeito buscado pela pesquisa. Devido a isto, solicitou-se à empresa fabricante um outro modelo de antena, mais especificamente o modelo NovAtel 521, que é até menor que o modelo 501 e que não apresenta o propalado mecanismo anti-multicaminho, o que foi negado sob a alegação de falta de estoque. Observou-se, porém, valores de multicaminho um tanto abaixo do esperado para um o ambiente do experimento (ver figura 7). Acreditava-se ser este ambiente portador de objetos refletores em número, distância das antenas e dimensões, suficientes

para provocar um multicaminho de, pelo menos, um terço do valor máximo, que é de 4,76 cm para a frequência da portadora L1. Somente em alguns instantes o multicaminho chegou próximo a este valor, o que pode ser um indicativo da efetividade do mecanismo anti-multicaminho reivindicado pela empresa fabricante. De qualquer forma, uma melhor análise dessa suposição ficou prejudicada pela falta de dados devido à ausência do fator comparativo entre os dois modelos de antenas, podendo ser objeto de estudos posteriores.

### 3.1.3 O Receptor Ashtech Z-12

Utilizou-se um receptor geodésico Ashtech Z-12 de dupla frequência com antena sobre um marco da rede geodésica canadense para estabelecer, de forma relativa e com uma sessão de rastreio de mais de três horas, as coordenadas de alta precisão dos centros de fase das antenas utilizadas no experimento. Com isso, ficou estabelecida a geometria relativa entre elas, principalmente distância e azimute da linha de base, utilizados no EKF. A linha de base do experimento mediu 11,4315 cm de comprimento com um azimute entre as antenas zero e um de  $301^{\circ}36'47,872''$ . A pequena distância entre a antena de referência e a linha de base do experimento (51,765 m até a antena zero e 51,653 até a antena um) possibilitou a desconsideração dos efeitos ionosféricos e troposféricos na precisão das coordenadas da linha de base.

## 3.2 RECURSOS COMPUTACIONAIS

### 3.2.1 Computadores

Durante todo o período de doutoramento utilizou-se os micro-computadores do CPGCG da UFPR, intensificando-se durante a etapa de processamento dos dados e elaboração das rotinas necessárias à automatização dos cálculos da pesquisa. Utilizaram-se micro-computadores do DER da UFSM, RS, na elaboração do programa Trans2 (ver 3.2.2.7). Nos rastreios relativos à tomada de dados e ao processamento da linha de base do experimento, utilizaram-se micro-computadores do Laboratório de Pesquisas Geodésicas do Departamento de Geodésia e

Engenharia Geomática da Universidade de New Brunswick, em Fredericton, no Canadá.

### 3.2.2 “Softwares”

#### 3.2.2.1 NovAtel GPS solution 3.1

Este programa acompanhou o receptor BeeLine e usou-se o mesmo para gerenciar os rastreios na tomada de dados, determinando as condições desejadas para os mesmos, como máscara de elevação dos satélites, horários de início e fim das sessões, intervalo entre épocas, efemérides transmitidas, rotulagem das antenas, e muitas outras. Obteve-se acesso à versão atualizada deste programa via Internet, através de senha fornecida pela empresa fabricante do equipamento.

#### 3.2.2.2 Convert32

Este programa também acompanhou o receptor BeeLine e usou-se o mesmo para transformar os arquivos de saída dos rastreios, nos formatos binário e ascii, para arquivos no formato RINEX, dos quais retiraram-se as medidas de fase da portadora L1 que alimentaram o algoritmo proposto de detecção e atenuação do multicaminho. O arquivo RINEX oriundo de um aparelho com duas antenas, como é o caso do BeeLine, apresenta algumas diferenças em relação ao arquivo RINEX oriundo de um receptor com somente uma antena. A principal delas é que o número de linhas em cada época de rastreio, correspondente às observáveis de cada satélite naquela época, em um receptor BeeLine é o dobro em relação a um receptor com apenas uma antena. Isso se deve ao fato de que, para cada satélite, são apresentadas as observáveis em uma e outra antena em seqüência. O anexo 3 mostra um exemplo de um arquivo RINEX oriundo do BeeLine.

#### 3.2.2.3 Rdmxbl4

Elaborou-se este programa em linguagem Fortran no Laboratório de Pesquisas Geodésicas do Departamento de Geodésia e Engenharia Geomática da

Universidade de New Brunswick. A finalidade dele é extrair dos arquivos RINEX de saída do BeeLine os valores das observações de fase da portadora para quatro satélites selecionados, gerando dois arquivos tipo texto. Um deles, chamado obs.00o, contém as observações de fase da portadora sequencialmente em ordem crescente para cada satélite e para cada uma das duas antenas. O outro arquivo, chamado tempo.00o, contém as informações de horário de cada época e o número PRN dos satélites rastreados em cada uma delas. Estes dois arquivos formam a base de entrada para o algoritmo proposto de detecção e atenuação do multicaminho, geradas no aplicativo Matlab.

#### 3.2.2.4 Matlab

Usou-se este sistema a partir do CPGCG para elaborar todas as rotinas necessárias à automatização dos procedimentos de cálculo da metodologia proposta no presente trabalho. A fonte primária de entrada no algoritmo são os arquivos obs.00o, tempo.00o e sat.txt. Este último arquivo contém as coordenadas IGS interpoladas utilizadas no cálculo de  $\Delta\rho$  (ver 3.2.2.7) a partir dos quais calcularam-se as SDFr para os quatro satélites selecionados, que alimentaram o algoritmo. Adotou-se o número de quatro satélites por ter-se observado ser o número médio de satélites que permaneceram visíveis durante toda a sessão de rastreo. A rotina pode facilmente ser modificada para comportar qualquer número de satélites. O EKF assim codificado gera, para cada satélite, os quatro parâmetros do multicaminho, o efeito do multicaminho em cada antena, a diferença de multicaminho entre as duas antenas, o sinal corrigido para cada antena (fase em cada antena menos o efeito do multicaminho) e o sinal de entrada suavizado, isto é, a SDFr calculada a partir das medidas de SDF originais menos a SDF calculada a partir dos parâmetros do multic. Este último sinal é a SDF já descontado o efeito do multicaminho calculado, e que serve como verificação da metodologia proposta. Usou-se também o Matlab para gerar os gráficos de todos os sinais, bem como a elevação, azimute e distância devido à separação espacial entre as antenas, para cada satélite e durante todo o período de cada sessão de rastreo. A duração média de cada sessão é de uma hora e meia, com um total de 5.400 épocas registradas para cada satélite.

#### 3.2.2.5 Sp3\_ef18

Extraiu-se este programa da página do IGS na Internet. Usou-se o mesmo para, usando como entrada arquivos de órbitas precisas calculadas de quinze em quinze minutos, também disponibilizadas pelo IGS, gerar arquivos binários prontos para serem usados pelo programa Ef18\_sp1.

#### 3.2.2.6 Ef18\_sp1

Este programa também foi extraído da página do IGS na Internet. Usou-se o mesmo em conjunto com o Sp3\_ef18 para, a partir dos arquivos de órbitas precisas binários por ele originados, gerar arquivos no formato ascii. Este arquivo contém órbitas precisas interpoladas com o intervalo entre épocas desejado (um segundo, no presente trabalho), podendo-se selecionar todos ou alguns satélites.

#### 3.2.2.7 Trans2

Elaborou-se este programa em linguagem Visual Basic nas dependências do DER - UFSM, RS. Sua finalidade é, a partir do arquivo ascii de órbitas precisas IGS oriundo do programa Ef18\_sp1, formar um arquivo texto, com o nome sat.txt, em forma matricial e com o metro como unidade, uma vez que as órbitas IGS são originalmente publicadas em quilômetros. Este arquivo serve como entrada nas rotinas de automatização dos procedimentos do algoritmo, para calcular a distância devido à separação espacial entre as antenas e, posteriormente, a SDFr.

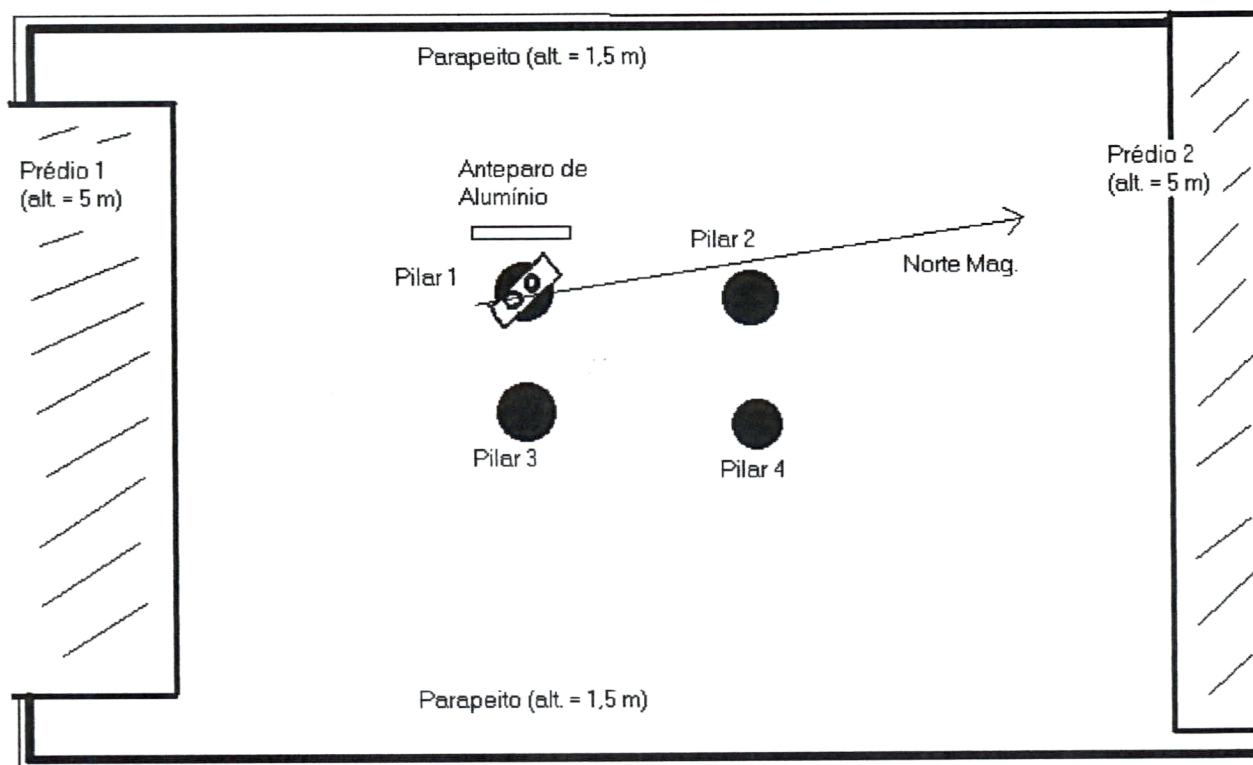
#### 3.2.2.8 Trimble Geomatics Office version 1.00, 1997

Usou-se este sistema para processar o levantamento de precisão cujo objetivo foi a determinação das coordenadas das antenas e da geometria entre elas.

#### 4 CENÁRIO E DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O cenário do experimento foi o terraço do prédio do Departamento de Geodésia e Engenharia Geomática da Universidade de New Brunswick, na cidade de Fredericton, no Canadá. Consideraram-se como principais refletores: dois prédios, mistos de madeira e alvenaria, de 5 m de altura, chamados 1 e 2, situados à 12 e 18 m das antenas, respectivamente; os parapeitos de 1,5 m de altura situados à 4 e 15 m das antenas (de um lado e outro); três pilares além do que sustenta as antenas, todos de 1,3 m de altura e situados a 3 e 6 m de distância das antenas (figura 7). Considerou-se essas fontes refletoras como responsáveis pelo multicaminho de menor frequência e maior intensidade, uma vez que estão localizados próximos das antenas. Uma referência para este valor pode ser o preconizado por Ray & Cannon (1998) e Ray (1999) que consideram objetos próximos aqueles localizados até 30 m da antena. Considerou-se ainda a existência de objetos refletores localizados em distâncias maiores, como os prédios vizinhos, creditando-se a eles o efeito de multicaminho de menor intensidade e maior frequência. Nos rastreios dos dias 19, 20 e 21 de junho colocou-se um anteparo de alumínio ao lado da linha de base, com o objetivo de forçar um aumento no efeito do multicaminho. Esse efeito pode ser observado, por exemplo, pela comparação do efeito do multicaminho na antena um para o satélite 9 (gráficos 63, 64 e 65) e o efeito do multicaminho na antena um para o satélite 26 (gráficos 90, 91 e 92). A figura 8 mostra a imagem das antenas sem o anteparo de alumínio, tendo ao fundo o prédio 2, mostrando a janela da sala onde instalou-se o micro-computador a partir do qual monitoraram-se os rastreios; além de dois pilares.

FIGURA 7 – PLANTA DO CENÁRIO DO EXPERIMENTO MOSTRANDO A LINHA DAS ANTENAS E AS PRINCIPAIS FONTES REFLEXIVAS



FONTE: O autor

FIGURA 8 – IMAGEM DO CENÁRIO DO EXPERIMENTO



FONTE: O autor

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

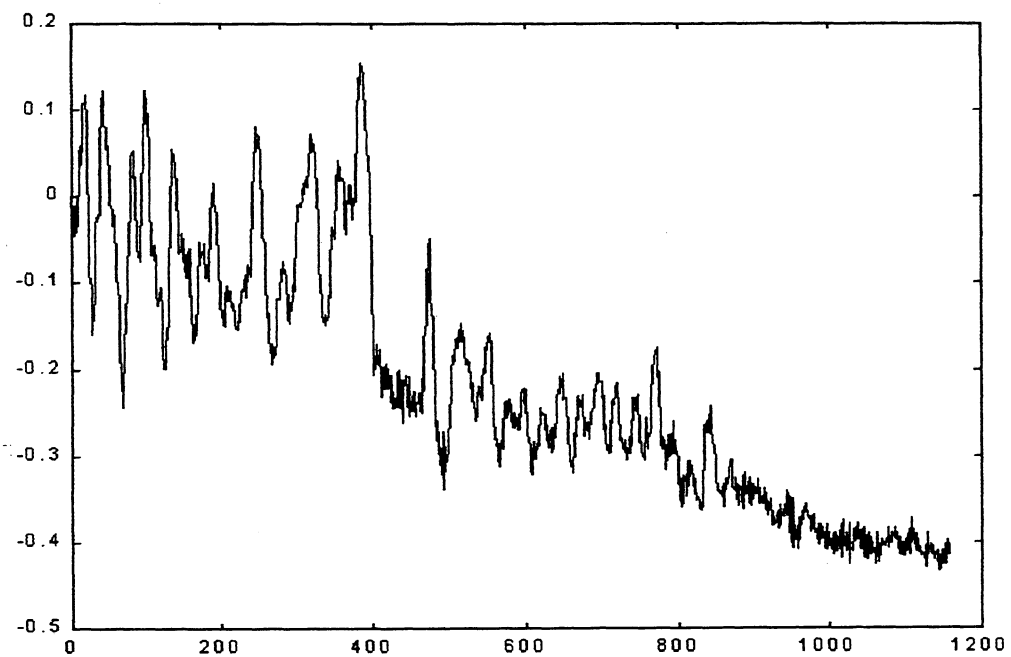
Para a visualização de resultados recorreram-se a dois satélites: o satélite 9, representando a série de rastreios dos dias 31 de maio e 01 e 02 junho de 2000 e o satélite 26, representando a série de rastreios dos dias 19, 20 e 21 de junho de 2000. Mostra-se, em relação a cada satélite, os parâmetros do multicaminho, que são: o coeficiente de reflexão ( $\alpha_0$ ); a fase do sinal refletido na antena zero, ou seja, a antena de referência ( $\gamma_0$ ); a elevação do sinal refletido que, neste caso, é válido para ambas as antenas ( $\theta_0$ ); e o azimute do sinal refletido que, neste caso, também é válido para ambas as antenas ( $\varphi_0$ ). A partir destes parâmetros, mostra-se, ainda: a fase do sinal refletido estimada para a antena um (calculada a partir da fase do sinal refletido na antena zero -  $\gamma_0$  – que é o segundo parâmetro de saída do EKF); o efeito do multicaminho calculado para cada antena (calculado a partir das fases em cada antena); e a diferença no efeito do multicaminho calculado entre ambas as antenas.

### 5.1 EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 9

#### 5.1.1 Demonstração Gráfica dos Resultados do EKF e do Multicaminho Calculado

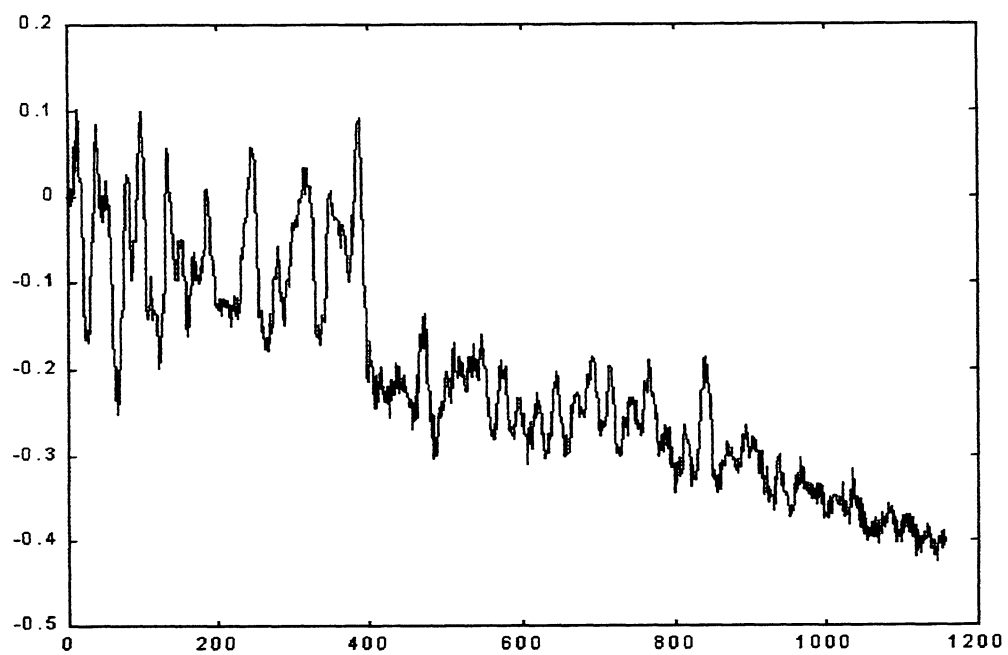
Apresenta-se a seguir, através dos gráficos 45 à 68, os valores dos quatro parâmetros estimados pelo EKF, bem como do multicaminho calculado a partir desses parâmetros, em relação ao satélite 9. Esses gráficos apresentam o número de épocas transcorridas (eixo X) em número quatro vezes menor do que nos gráficos do sinal de entrada. Isso se deve ao fato de que é gerado um valor para os parâmetros e o multicaminho a cada quatro épocas. Isso equivale a dizer que o multicaminho estimado é o mesmo dentro de cada intervalo de medidas. Isso vale para todos os satélites.

**GRÁFICO 45 – COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, SEM UNIDADE**



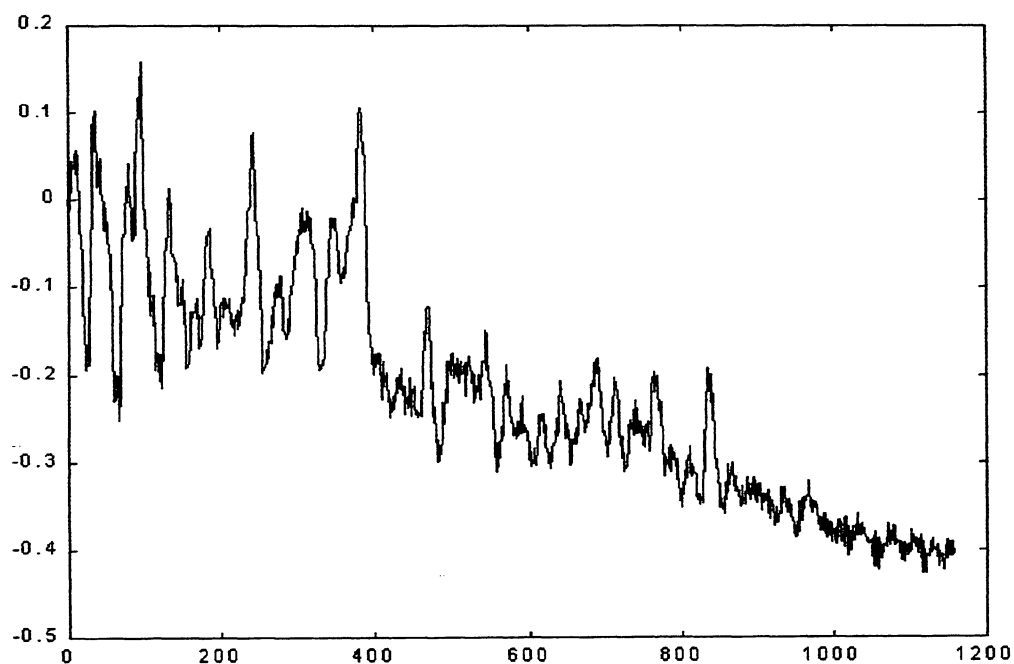
FONTE: O autor

**GRÁFICO 46 – COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, SEM UNIDADE**



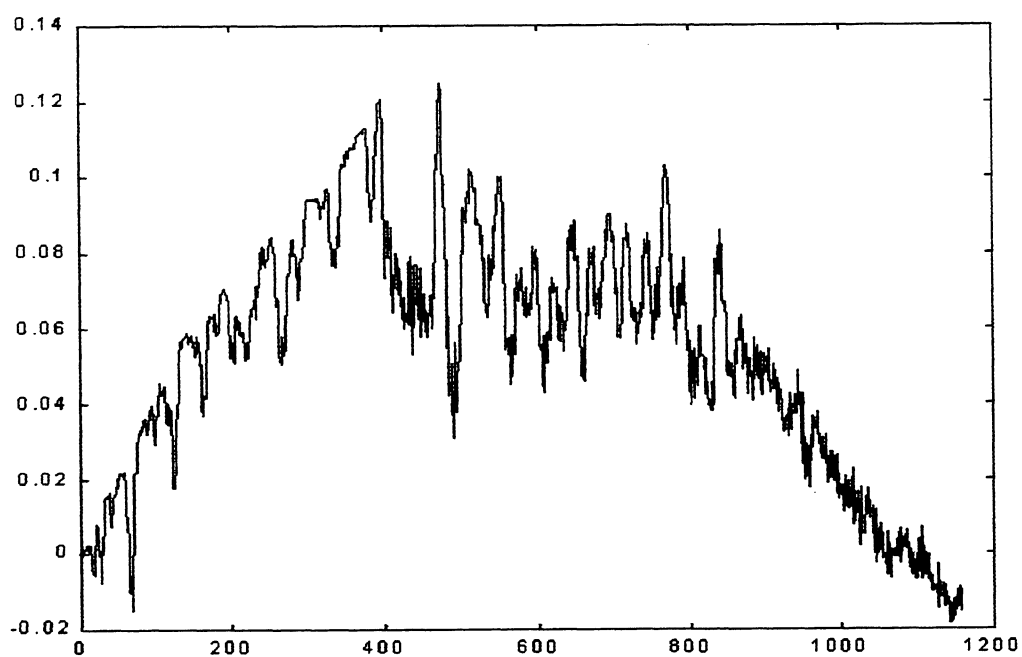
FONTE: O autor

**GRÁFICO 47 – COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, SEM UNIDADE**



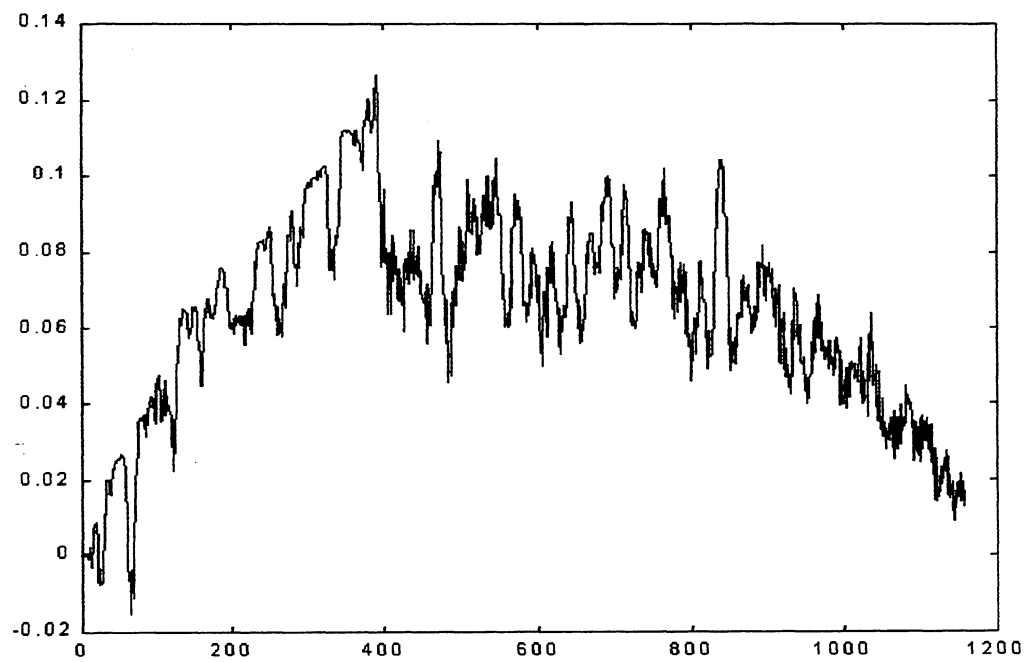
FONTE: O autor

**GRÁFICO 48 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM RADIANOS**



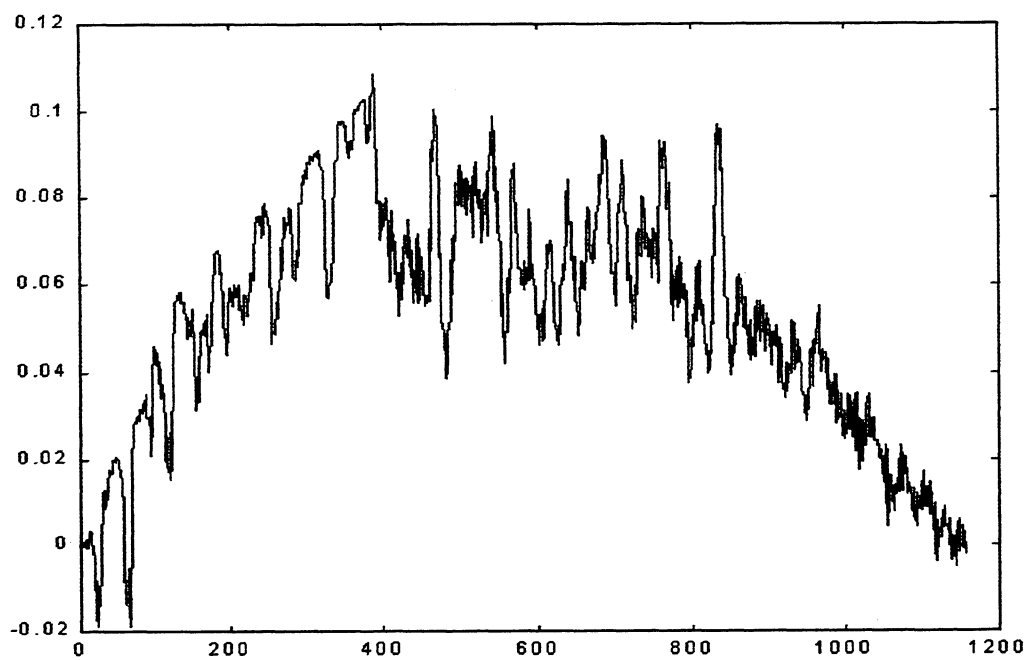
FONTE: O autor

**GRÁFICO 49 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1<sup>o</sup> DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



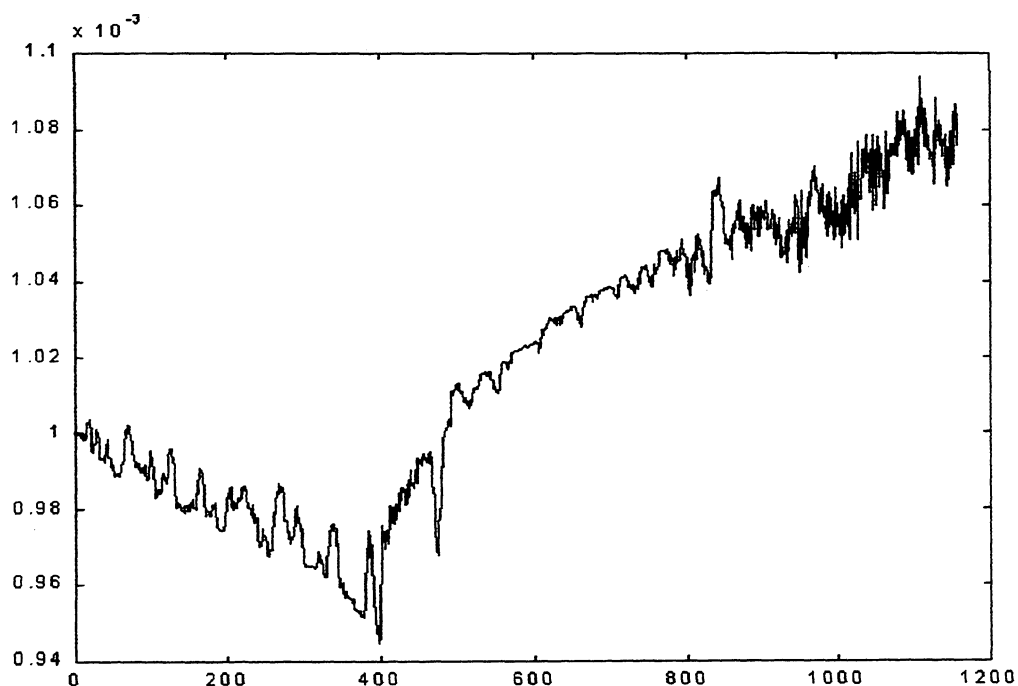
FONTE: O autor

**GRÁFICO 50 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



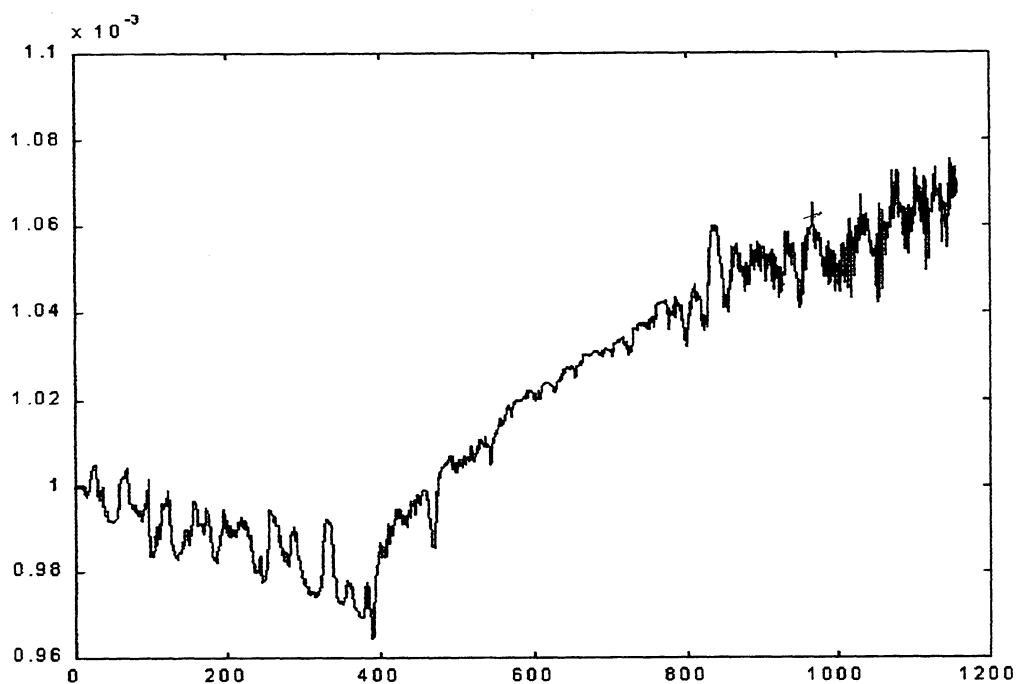
FONTE: O autor

**GRÁFICO 51 – ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM RADIANOS**



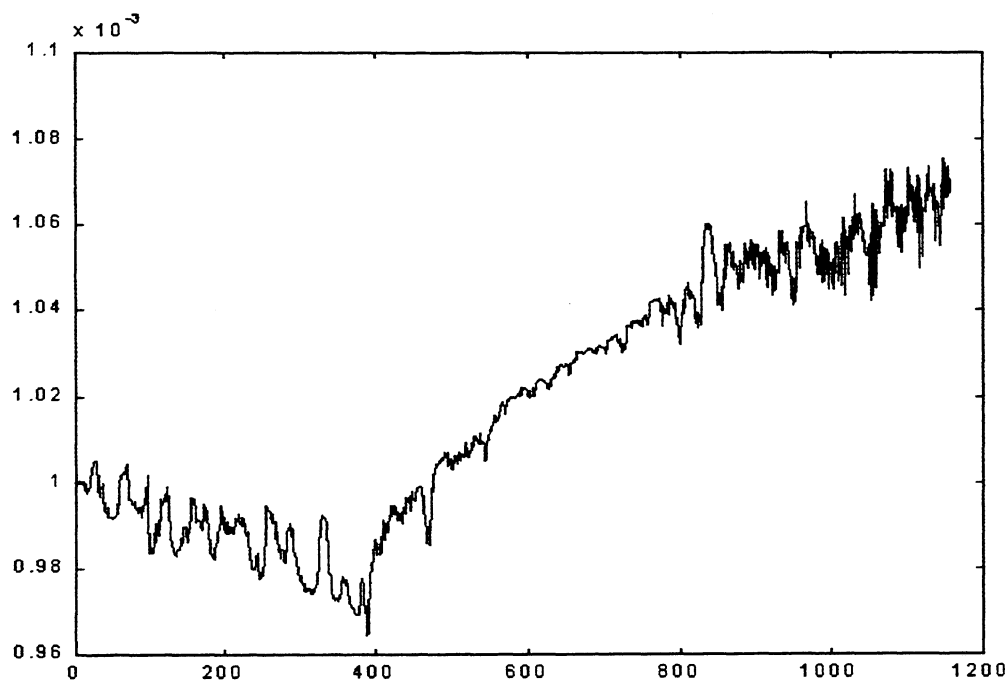
FONTE: O autor

**GRÁFICO 52 – ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



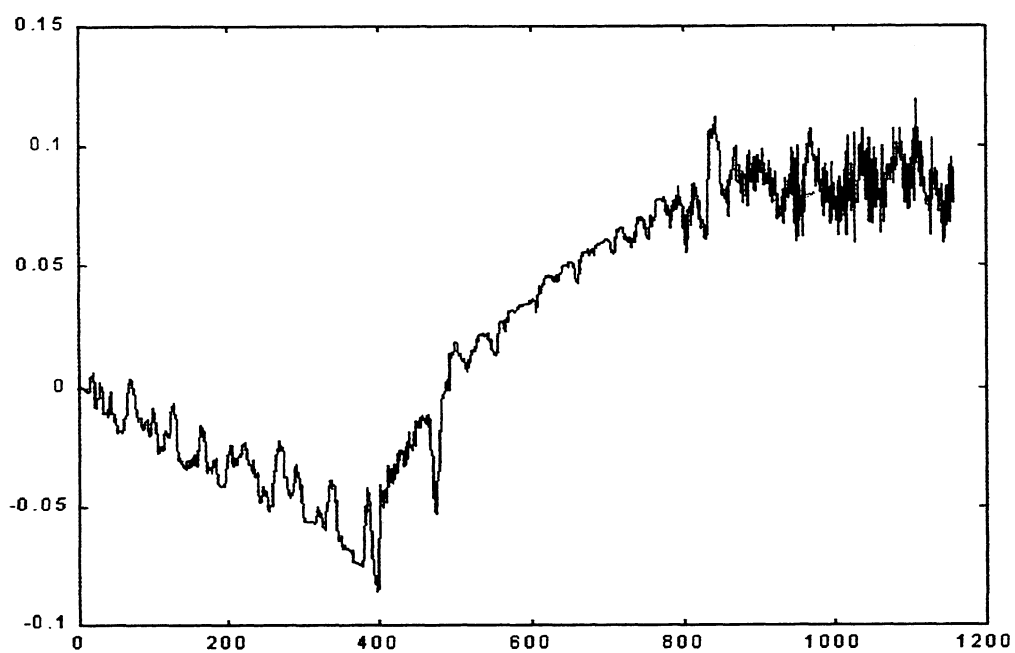
FONTE: O autor

**GRÁFICO 53 – ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



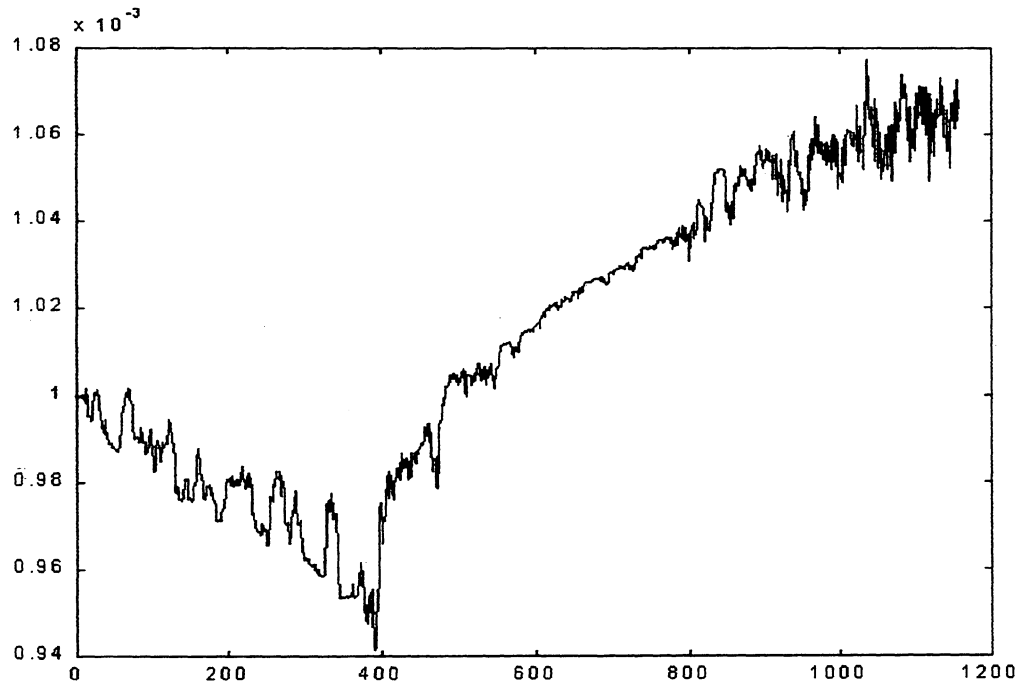
FONTE: O autor

**GRÁFICO 54 – AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM RADIANOS**



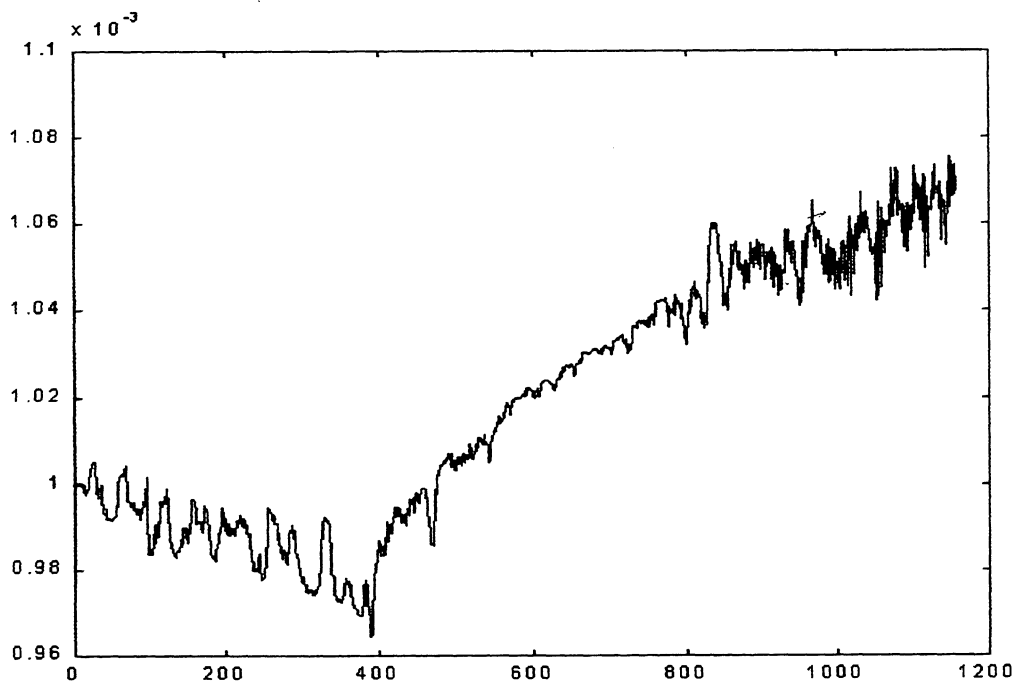
FONTE: O autor

**GRÁFICO 55 – AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



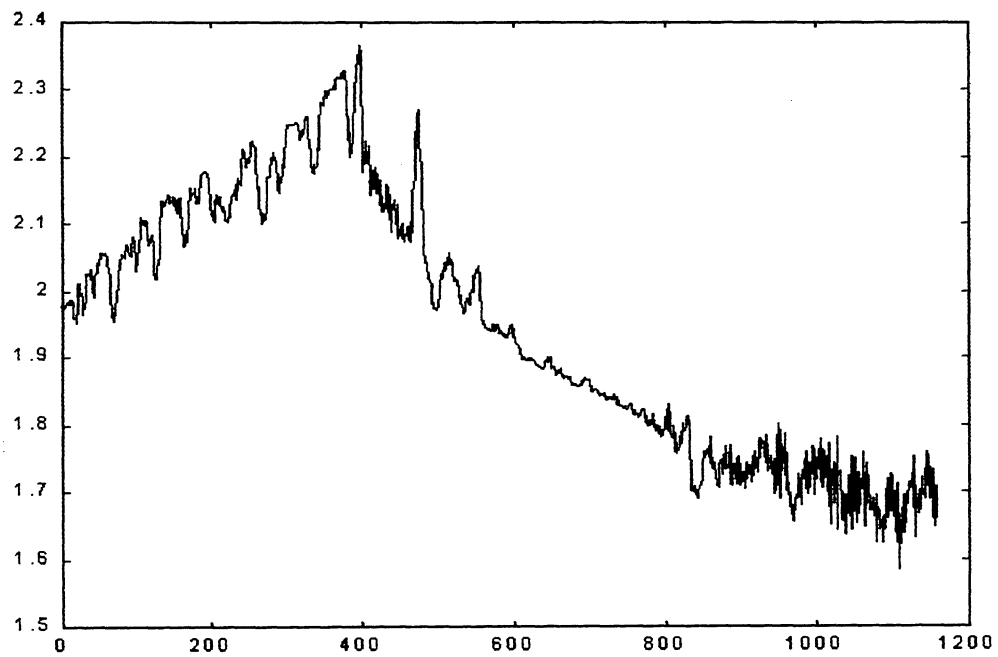
FONTE: O autor

**GRÁFICO 56 – AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



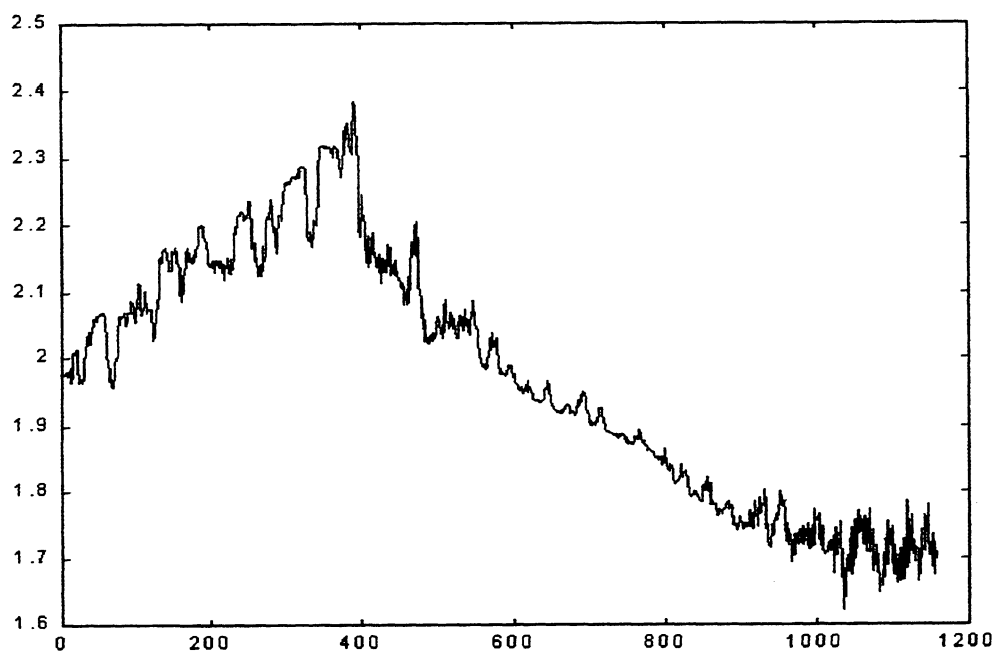
FONTE: O autor

**GRÁFICO 57 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM RADIANOS**



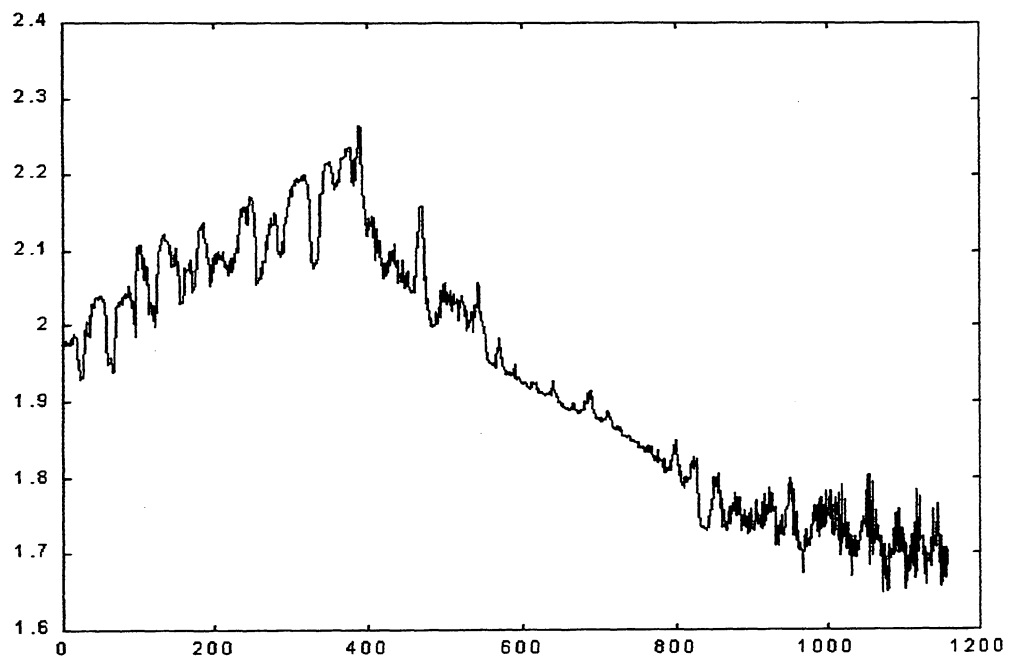
FONTE: O autor

**GRÁFICO 58 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



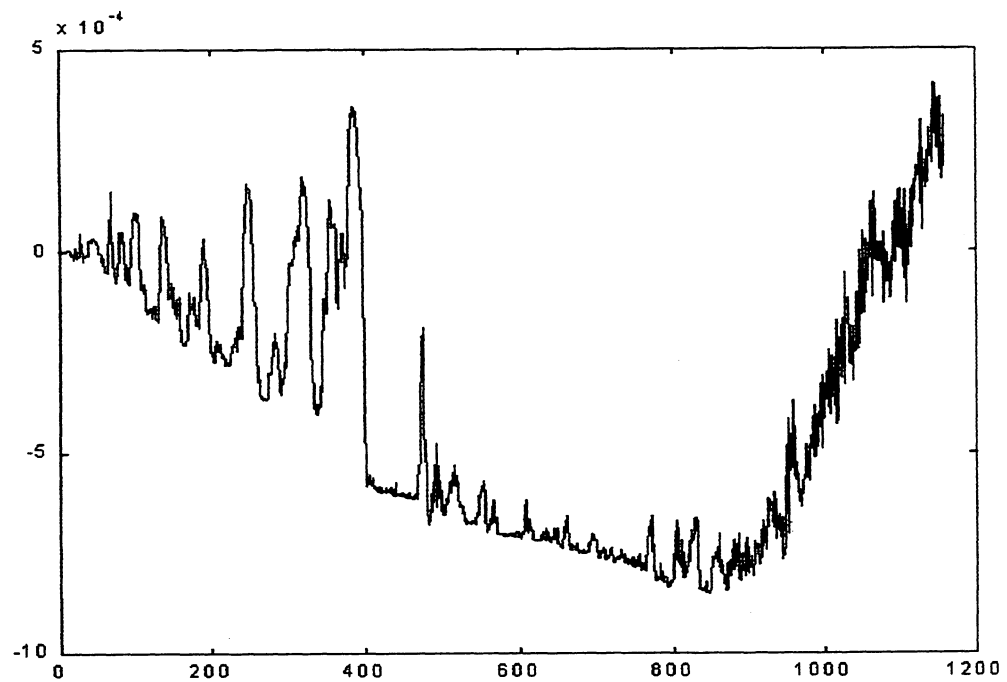
FONTE: O autor

**GRÁFICO 59 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



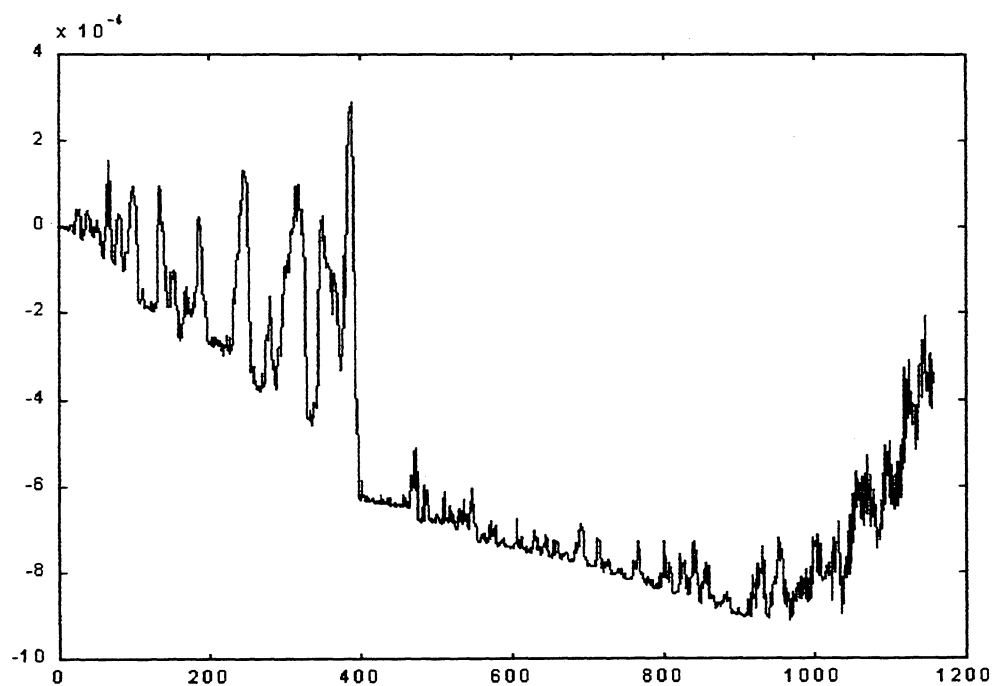
FONTE: O autor

**GRÁFICO 60 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM METROS**



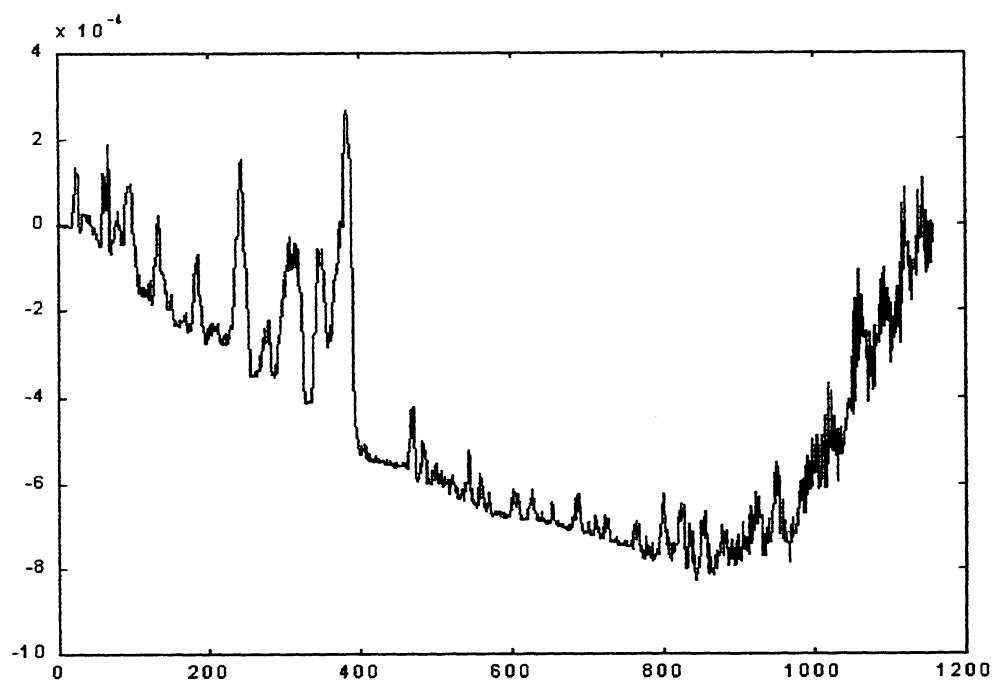
FONTE: O autor

GRÁFICO 61 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM METROS



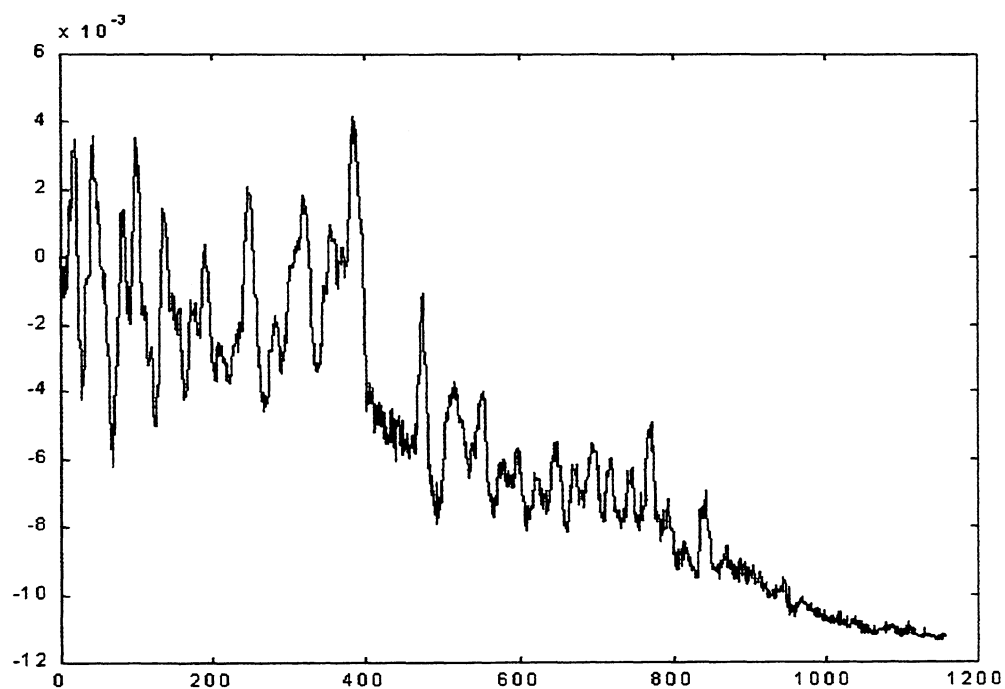
FONTE: O autor

GRÁFICO 62 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM METROS



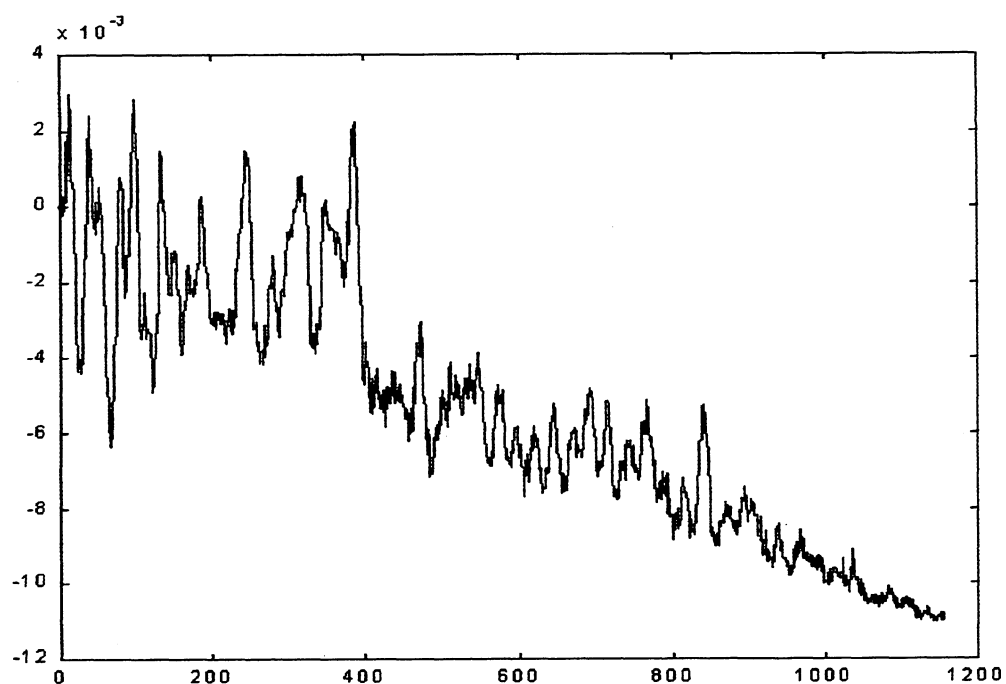
FONTE: O autor

GRÁFICO 63 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE  
9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM METROS



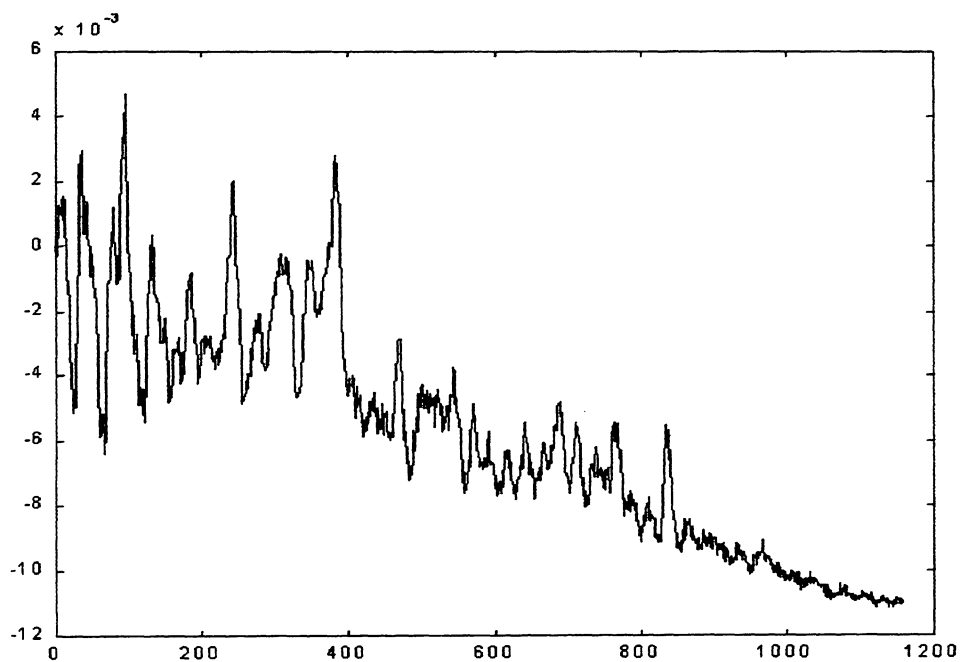
FONTE: O autor

GRÁFICO 64 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE  
9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM METROS



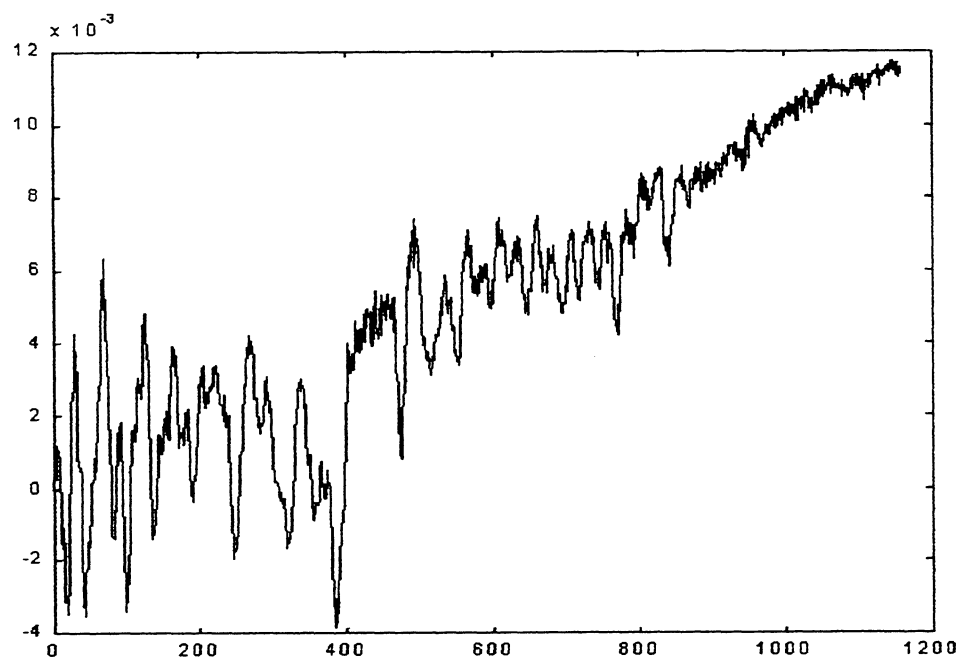
FONTE: O autor

**GRÁFICO 65 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM METROS**



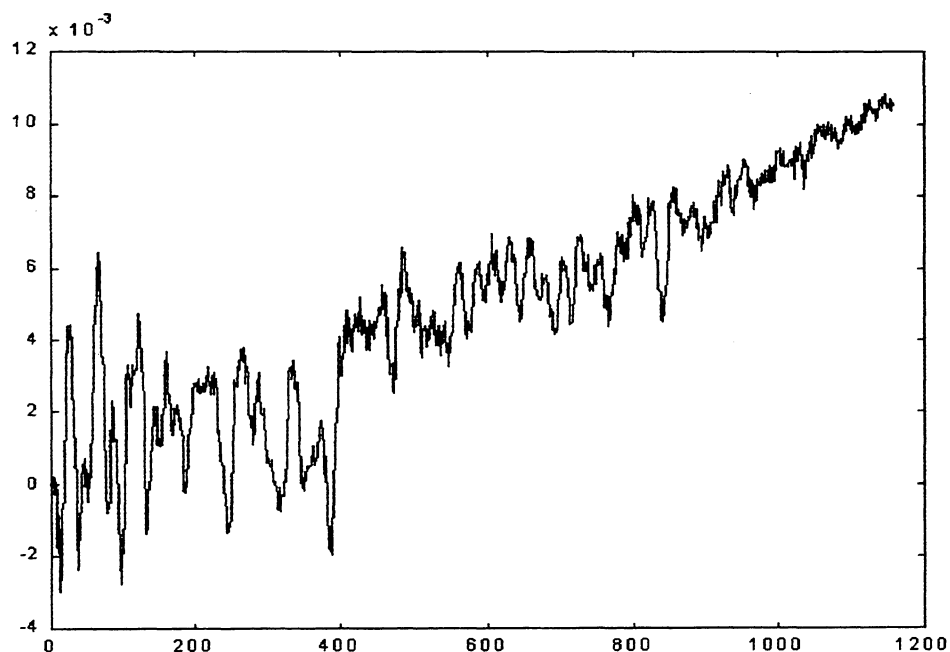
FONTE: O autor

**GRÁFICO 66 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENAS PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM METROS**



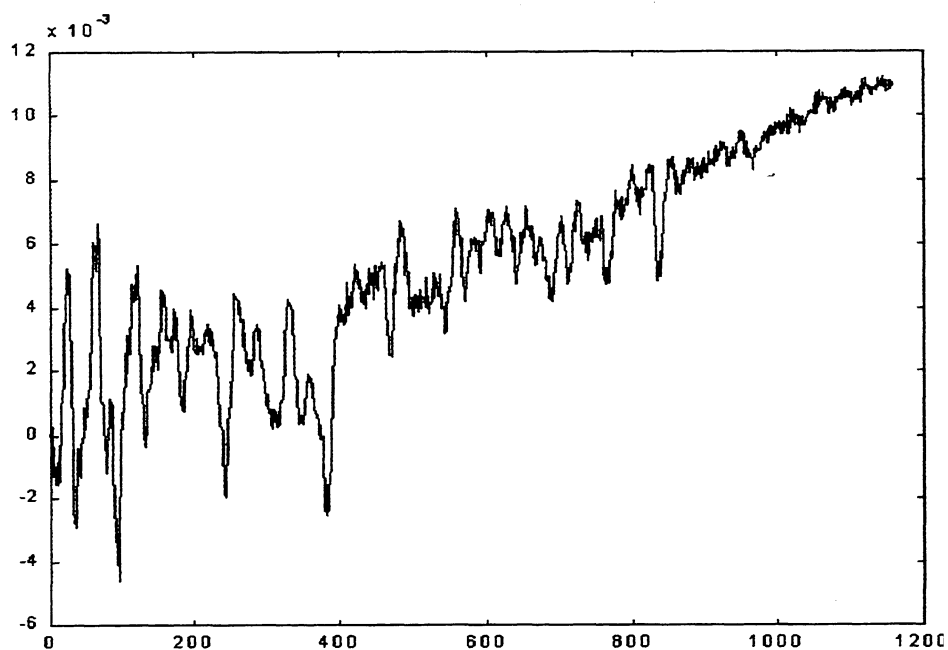
FONTE: O autor

GRÁFICO 67 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENA PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM METROS



FONTE: O autor

GRÁFICO 68 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENA PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM METROS



FONTE: O autor

#### 5.1.1.1 Análise dos resultados do EKF e do multicaminho calculado

Em primeiro lugar, e de uma forma geral, comprova-se para todos os fatores analisados, uma alta correlação entre os três dias de rastreo, acompanhando a alta correlação do vetor de medidas entre esses três dias, do qual dependem diretamente.

A análise conjunta do coeficiente de reflexão (gráficos 45, 46 e 47) com o efeito do multicaminho na antena um (gráficos 63, 64 e 65) mostra uma concordância quase perfeita entre os mesmos. Há um decréscimo no multicaminho à medida que o satélite teve um leve movimento de descida durante o período de rastreo (gráfico 8), que foi acompanhado no mesmo sentido pelo coeficiente de reflexão. Isso comprova que o coeficiente de reflexão das superfícies refletoras é um forte indicador do efeito do multicaminho e um de seus parâmetros mais importantes. Essa pequena discordância entre a descida do satélite e a diminuição do multicaminho (que deveria ser o contrário), pode ser explicada pela pequena variação da altura do satélite em relação ao horizonte (de  $42^\circ$  à  $32^\circ$ , aproximadamente), mantendo-se relativamente alto mesmo no final da sessão. Neste caso, as variações no multicaminho ficaram no nível do ruído térmico.

A análise da fase do sinal refletido na antena zero, a antena de referência (gráficos 48, 49 e 50) pode ser analisada em conjunto com a fase do sinal refletido na antena um (gráficos 57, 58 e 59). É de se esperar uma uniformidade na variação conjunta da fase nas duas antenas, o que ocorreu em grande parte. A diferença entre as mesmas manteve-se em torno de 6 cm, o que é um valor bastante coerente considerando-se um azimute para o sinal refletido (gráficos 54, 55 e 56) de valor quase nulo. O valor máximo para essa diferença (que é de 11,4315 cm) ocorre quando o azimute do sinal refletido coincide com o azimute da linha entre as antenas ( $301^\circ 36' 47,872''$  ou 5,2641 rad) e numa elevação próxima ao horizonte.

A análise da elevação do sinal refletido (gráficos 51, 52 e 53) mostra valores bastante pequenos, demonstrando a forte influência das reflexões de solo no efeito do multicaminho. Salienta-se que não foi usado aparato tipo “choke ring” nas antenas, o que poderia ter causado diminuição deste efeito (Filipov et al. – 1998). Esse fato evidencia que dificilmente um ambiente está totalmente livre do efeito do

multicaminho, mesmo quando a antena está mais alta em relação aos objetos potencialmente refletores.

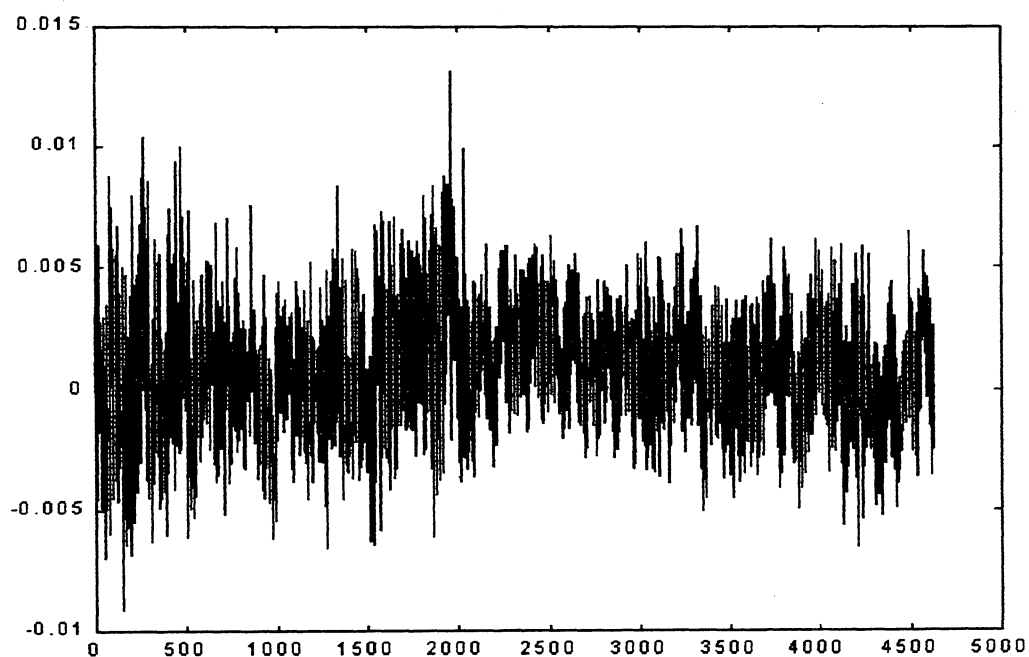
O efeito do multicaminho na antena um (gráficos 63, 64 e 65) mostra que o mesmo atingiu valores de 1,2 cm e foi maior que o mesmo para a antena zero (gráficos 60, 61 e 62), devido à diferença na geometria das mesmas.

A diferença no efeito do multicaminho calculado entre as antenas zero e um (gráficos 66, 67 e 68), mostra um efeito cumulativo entre o efeito do multicaminho em cada antena separadamente. Conforme o sinal do multicaminho, este pode ser um complicador no caso de uso da simples diferença de fase entre antenas (referência-usuário) que, suposta e separadamente, estejam em ambientes favoráveis do ponto de vista do multicaminho. Também nota-se uma coerência de aumento quando comparado com a elevação do satélite, que diminui (gráfico 8).

#### 5.1.2 Demonstração Gráfica dos Resultados de Verificação da Metodologia Proposta

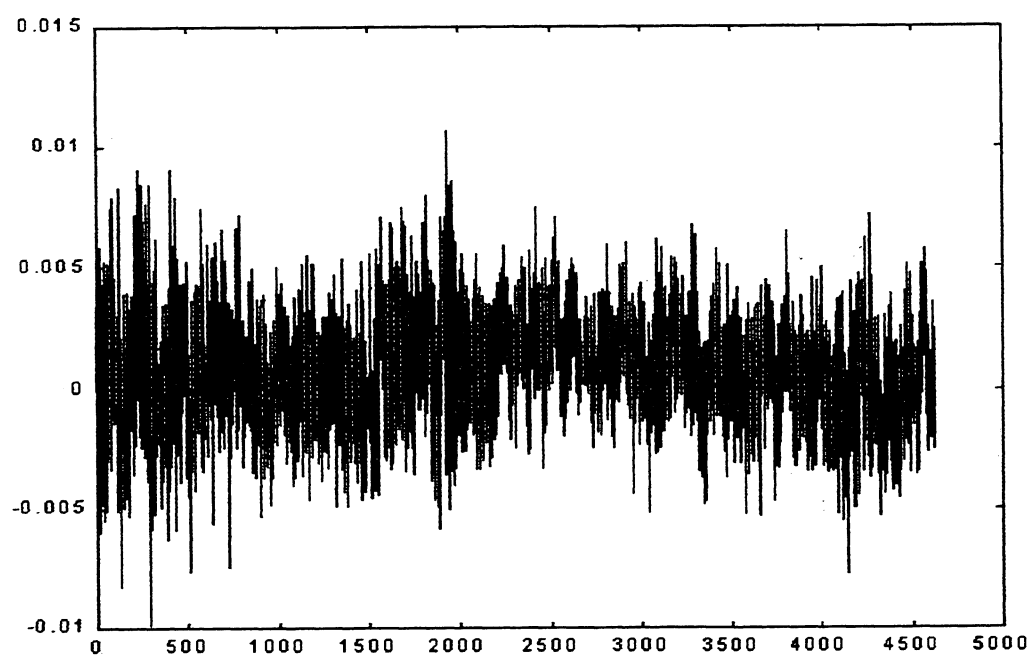
Um importante aspecto das pesquisas que se propõem a trazer melhoras nas medidas da fase das portadoras GPS, geralmente num universo de valores milimétricos, é a verificação da eficiência. No presente trabalho, ela se traduz na capacidade da metodologia proposta em efetivamente identificar e atenuar o multicaminho nessas medidas. Para isso recorreu-se ao cálculo do sinal formado pela SDFr, isto é, o vetor de medidas do EKF (o multicaminho medido), menos a diferença entre o multicaminho nas antenas zero e um (multicaminho calculado). O grau de suavização do sinal resultante indica o grau de coincidência entre os dois valores de multicaminho, mostrando o grau de eficiência do método proposto em detectar o multicaminho em cada antena a partir das medidas feitas. Os gráficos 69, 70 e 71 mostram esses resultados para o satélite 9.

GRÁFICO 69 – SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 31 DE MAIO DE 2000, EM METROS



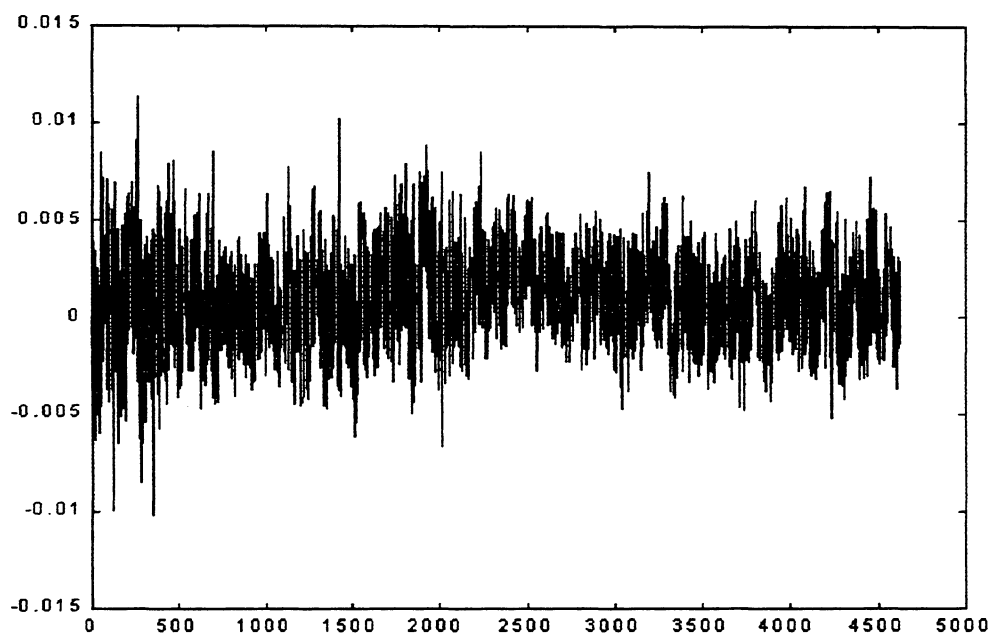
FONTE: O autor

GRÁFICO 70 – SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 1º DE JUNHO DE 2000, EM METROS



FONTE: O autor

**GRÁFICO 71 – SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 9 NO DIA 2 DE JUNHO DE 2000, EM METROS**



**FONTE:** O autor

#### 5.1.2.1 Análise dos resultados de verificação da metodologia proposta

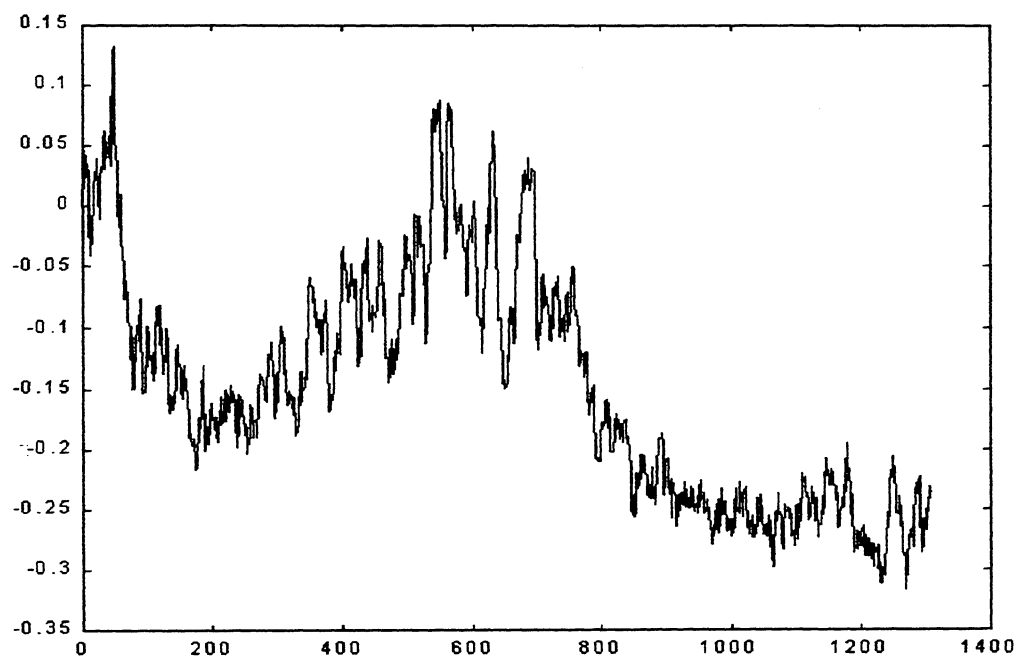
Para analisar o grau de suavização do sinal, utilizou-se a medida de dispersão representada pelo desvio-padrão do sinal medido com o desvio-padrão do sinal suavizado. A média do desvio-padrão do sinal medido para os três dias é de 0,00433 m, e para o sinal suavizado este valor é de 0,00226. Considerando-se a repetibilidade média nos três dias, para o satélite 9, de 76%, observa-se uma suavização de 60,3%, sendo essa a medida da eficiência do método neste caso.

## 5.2 EM RELAÇÃO AO SATÉLITE 26

### 5.2.1 Demonstração Gráfica dos Resultados do EKF e do Multicaminho Calculado

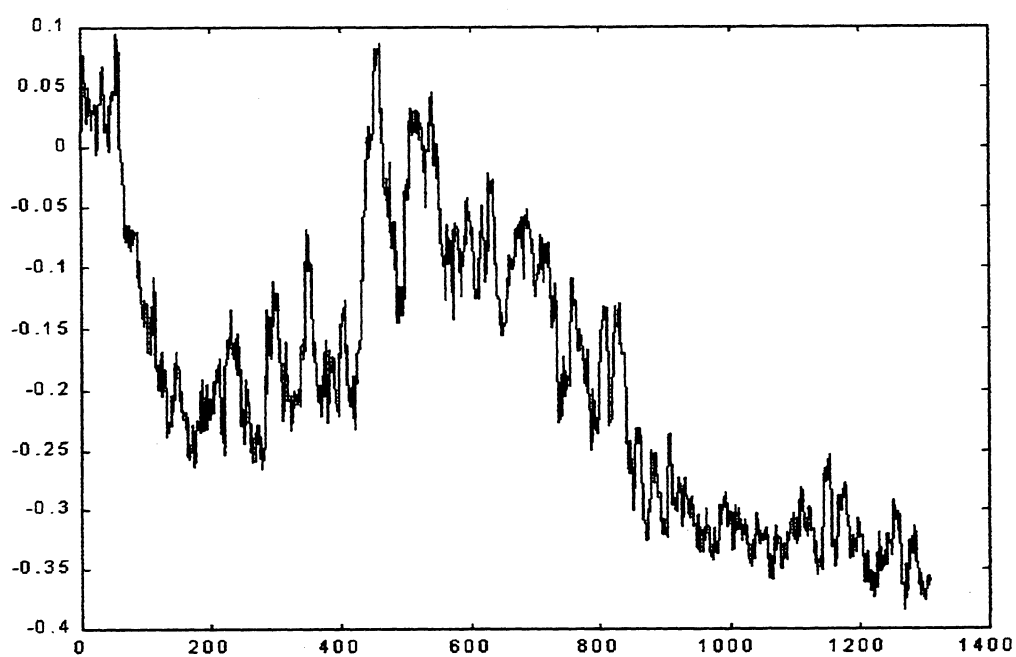
Apresenta-se a seguir, através dos gráficos 72 à 95, os valores dos quatro parâmetros estimados pelo EKF, bem como do multicaminho calculado a partir desses parâmetros

GRÁFICO 72 - COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, SEM UNIDADE



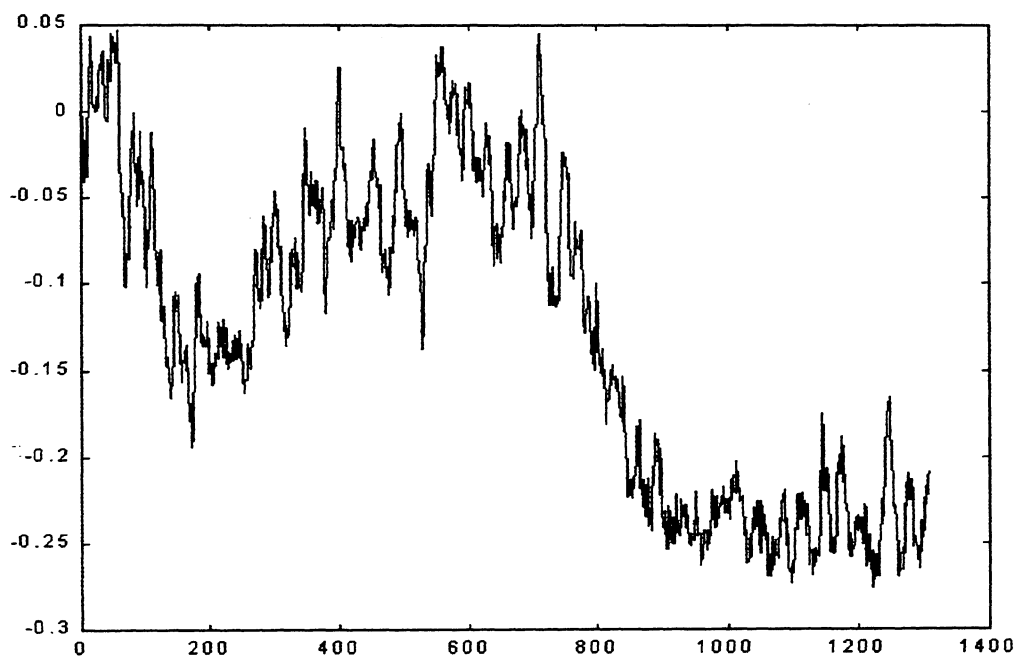
FONTE: O autor

GRÁFICO 73 - COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, SEM UNIDADE



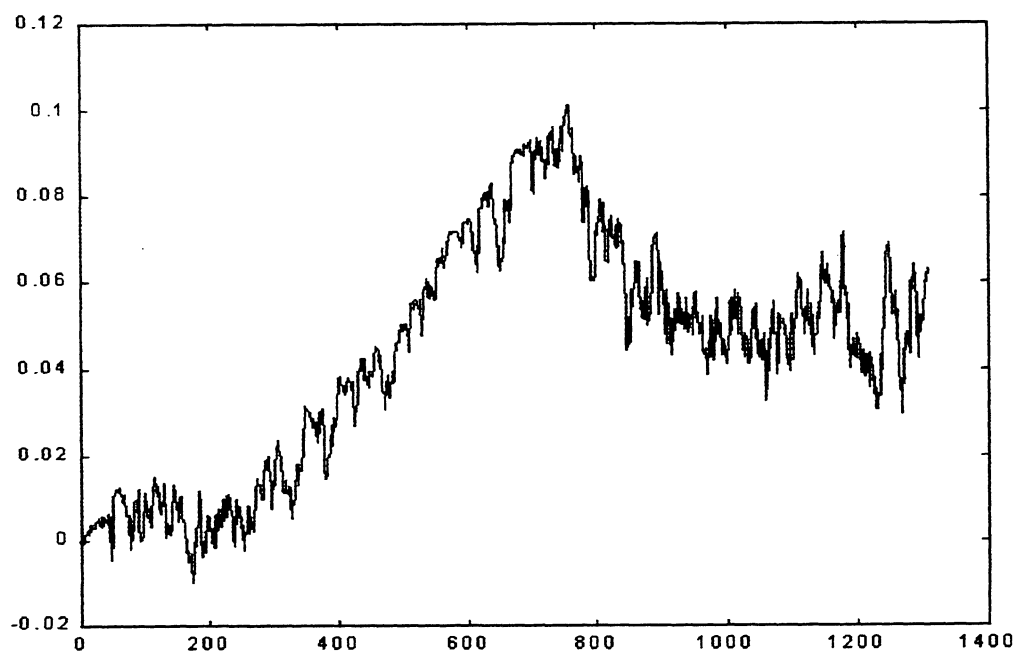
FONTE: O autor

**GRÁFICO 74 - COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, SEM UNIDADE**



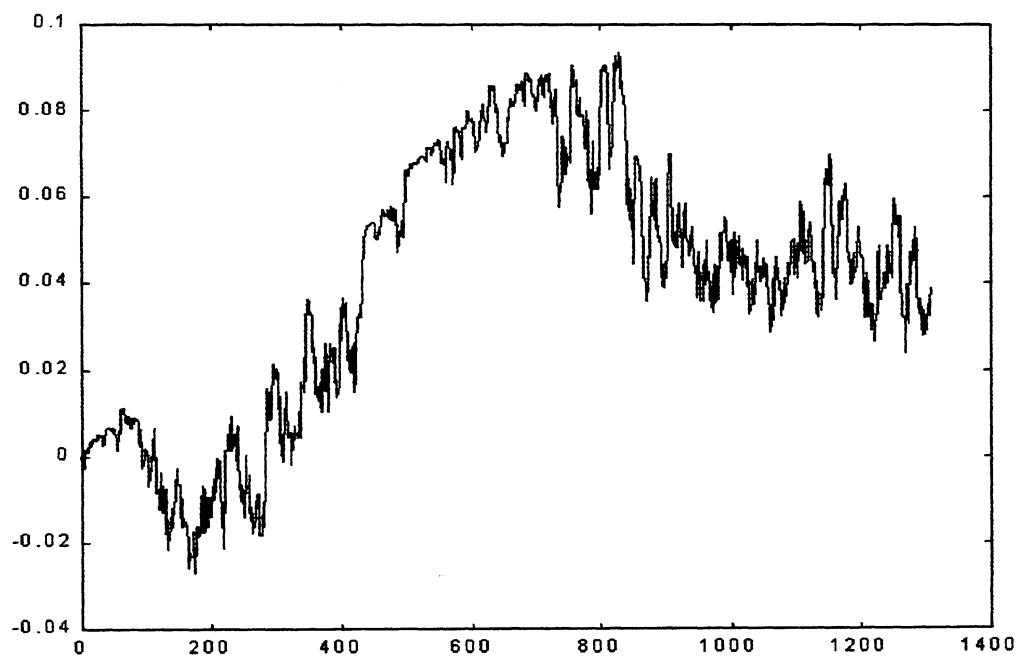
FONTE: O autor

**GRÁFICO 75 - FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



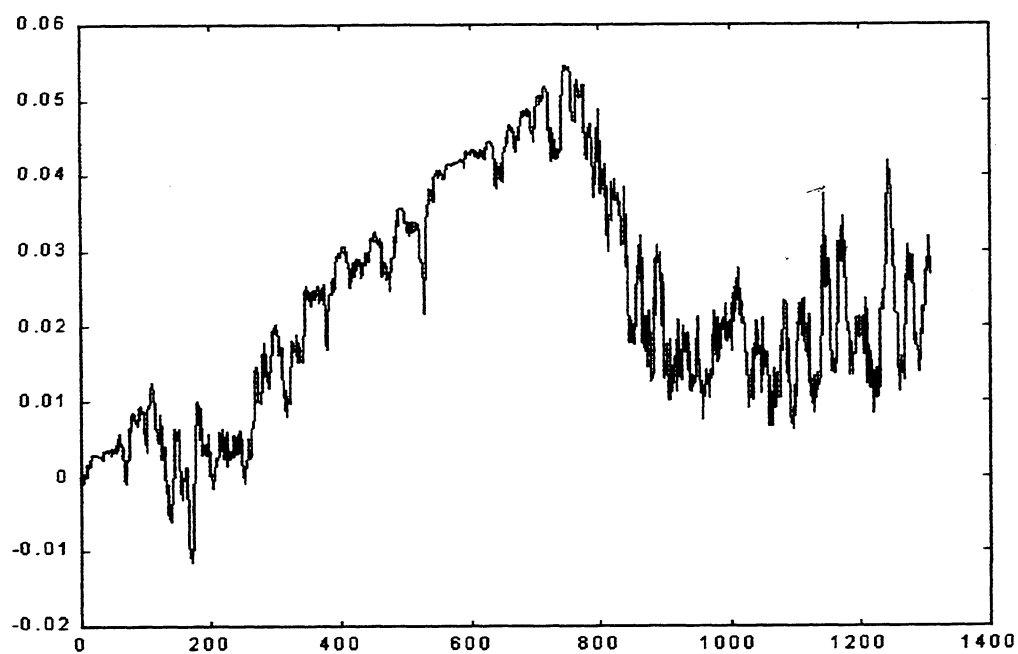
FONTE: O autor

**GRÁFICO 76 - FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



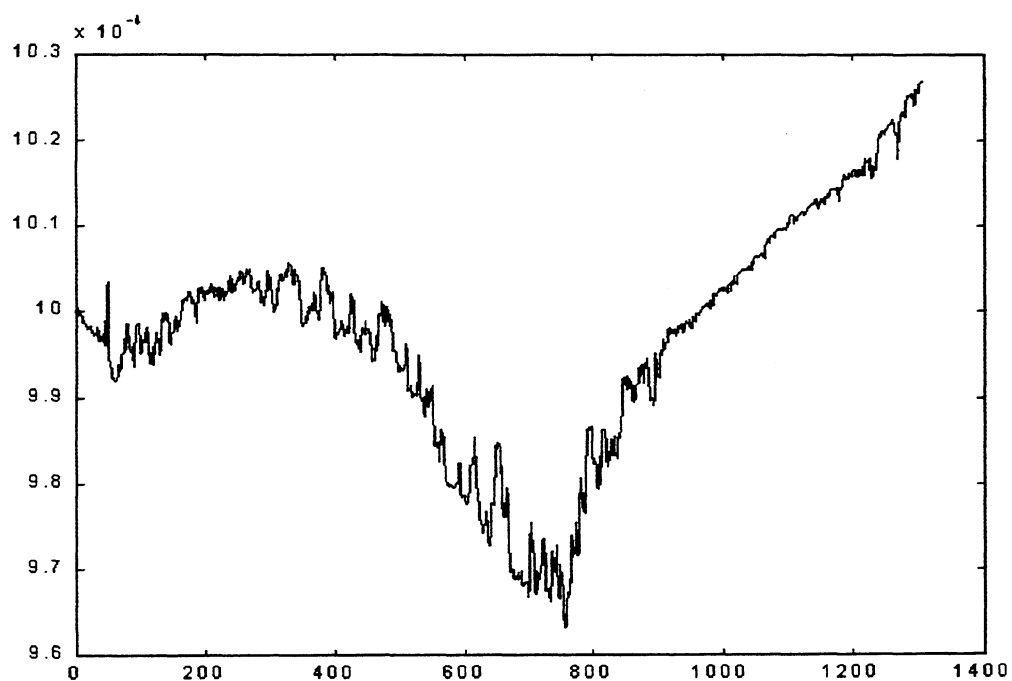
FONTE: O autor

**GRÁFICO 77 - FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



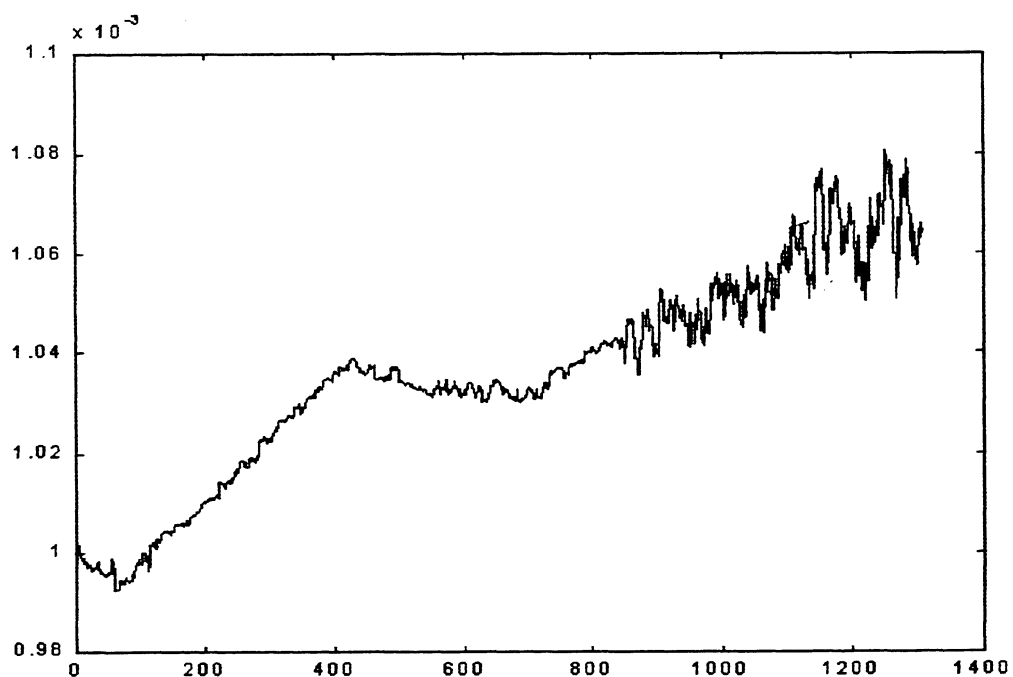
FONTE: O autor

**GRÁFICO 78 - ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



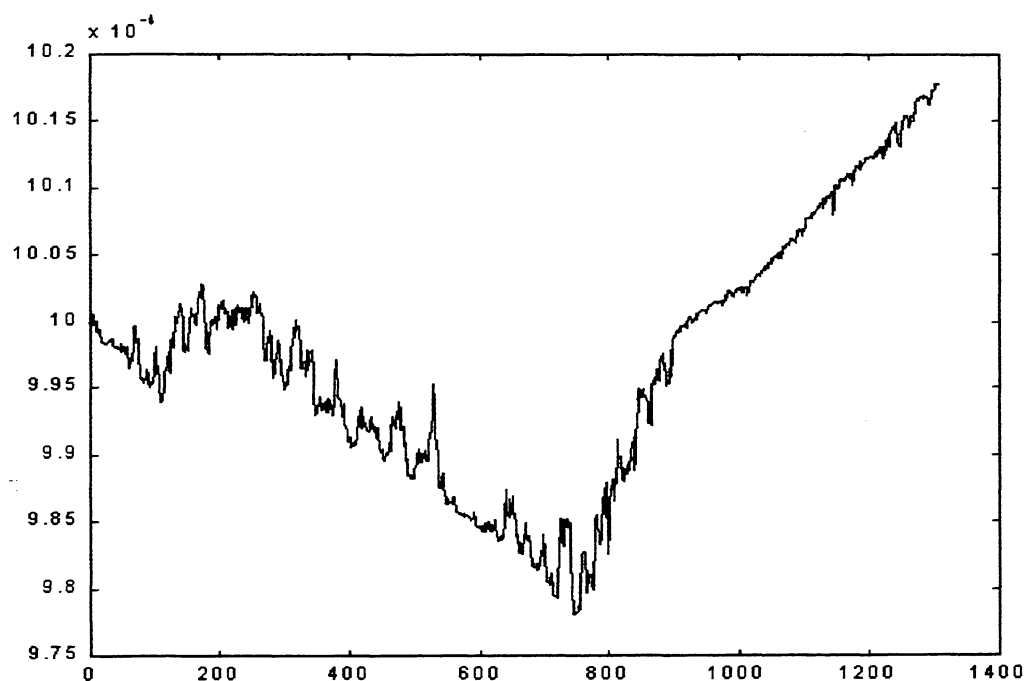
FONTE: O autor

**GRÁFICO 79 - ELEVAÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



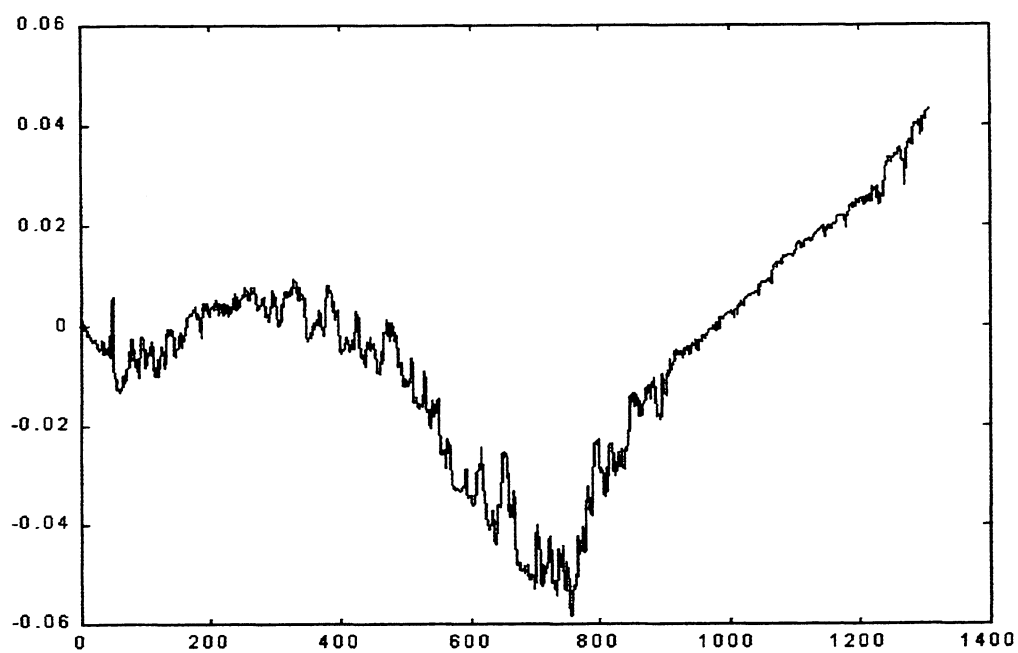
FONTE: O autor

**GRÁFICO 80 - ELEVÇÃO DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



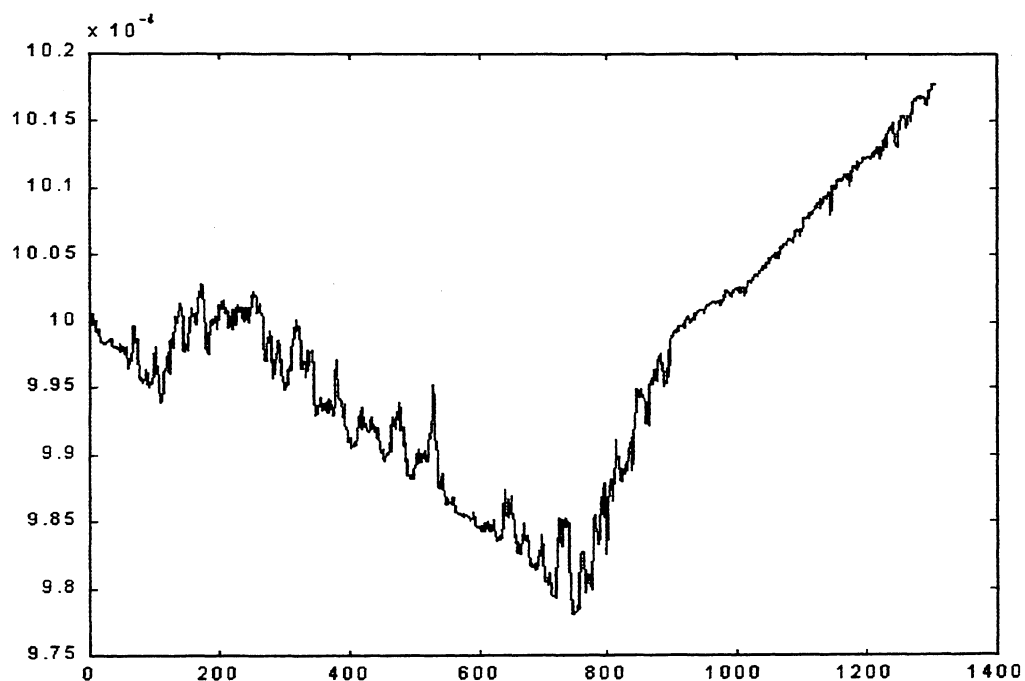
FONTE: O autor

**GRÁFICO 81 - AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



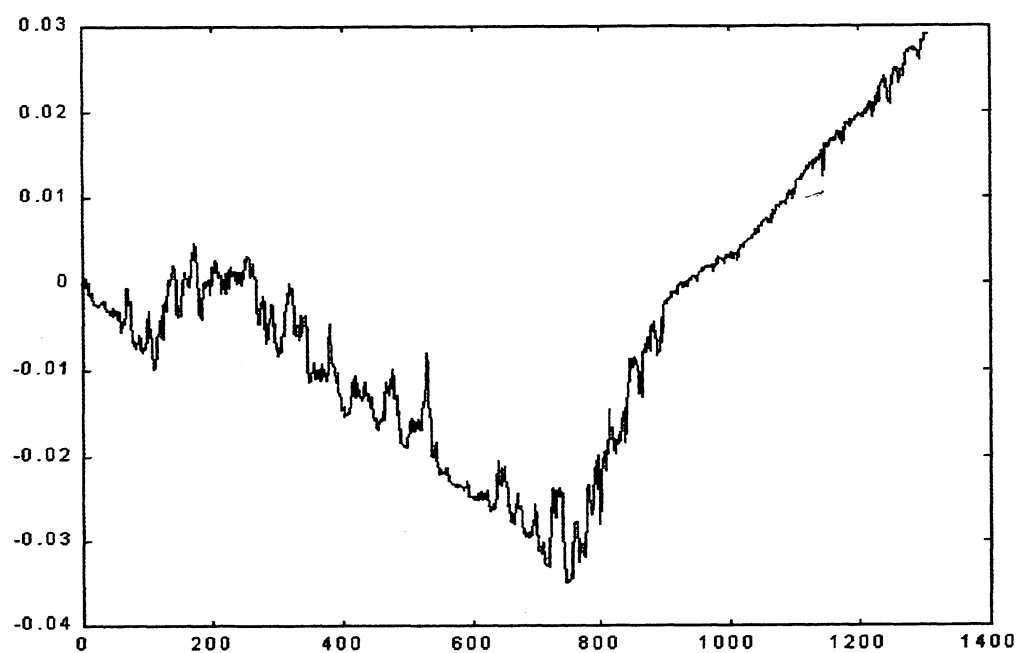
FONTE: O autor

**GRÁFICO 82 - AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



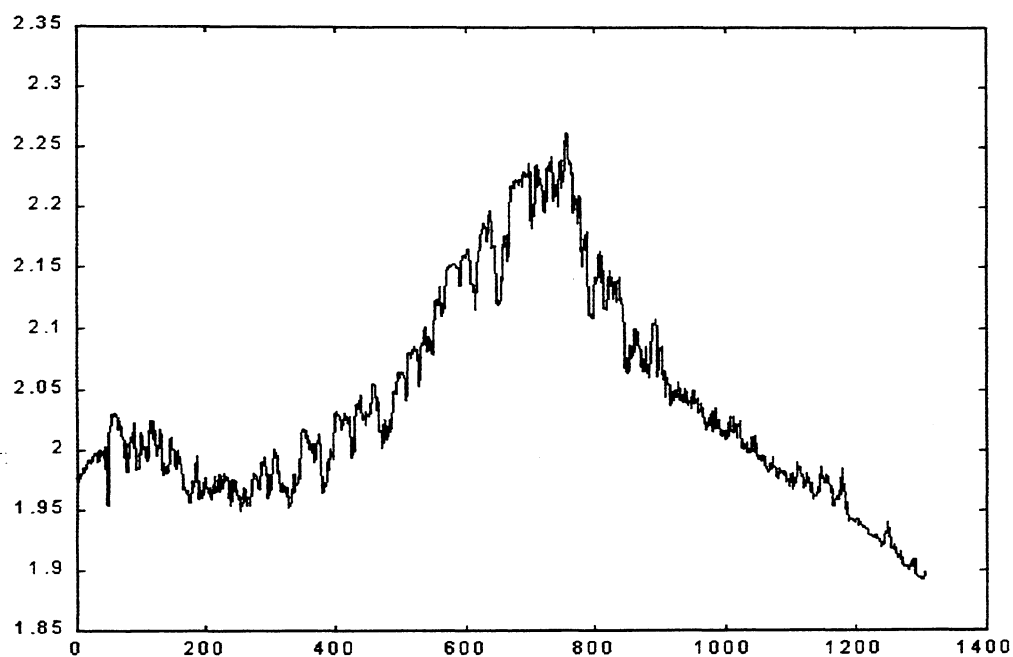
FONTE: O autor

**GRÁFICO 83 - AZIMUTE DO SINAL REFLETIDO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



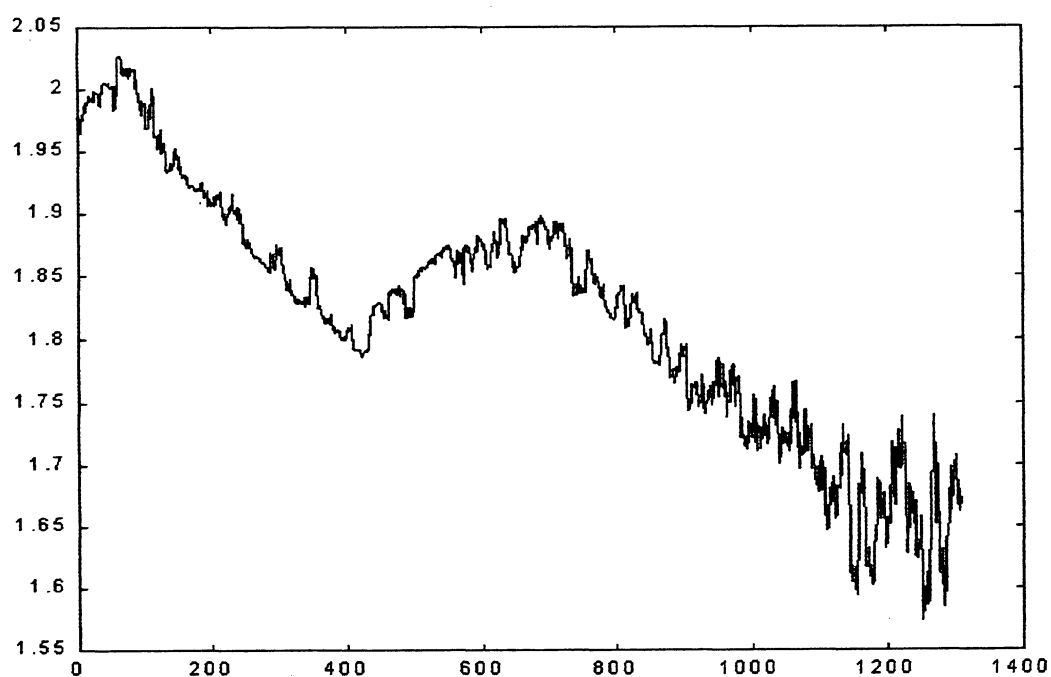
FONTE: O autor

**GRÁFICO 84 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE  
26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



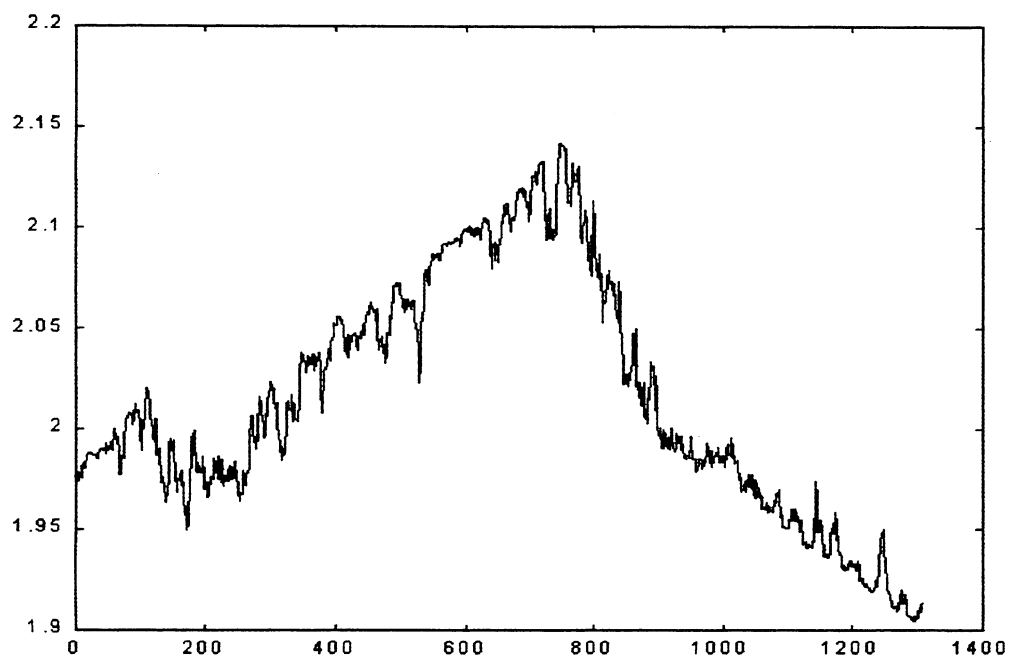
FONTE: O autor

**GRÁFICO 85 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE  
26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



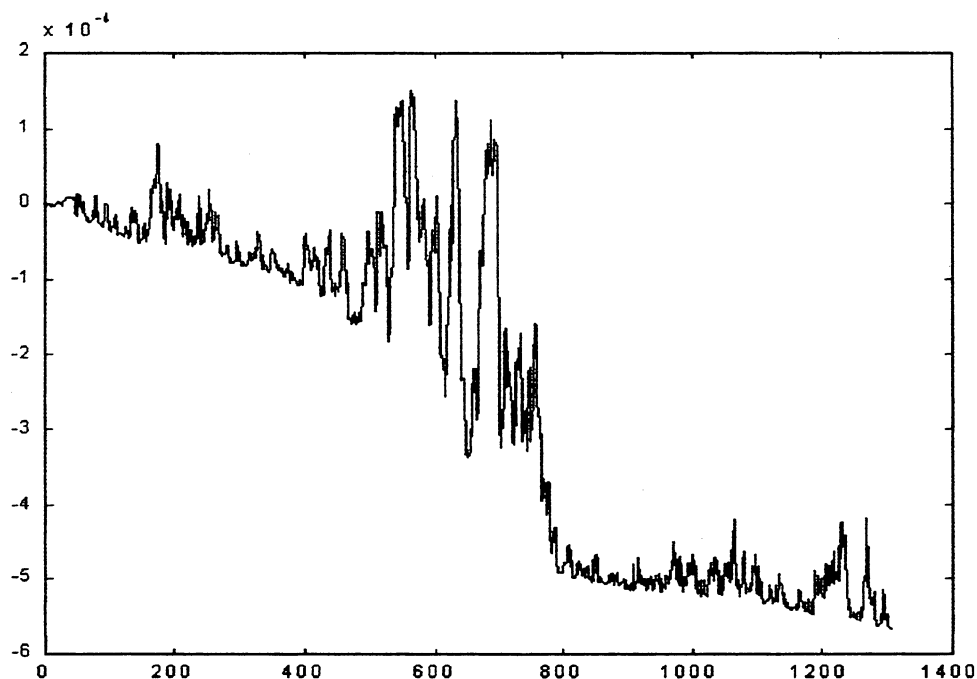
FONTE: O autor

**GRÁFICO 86 – FASE DO SINAL REFLETIDO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM RADIANOS**



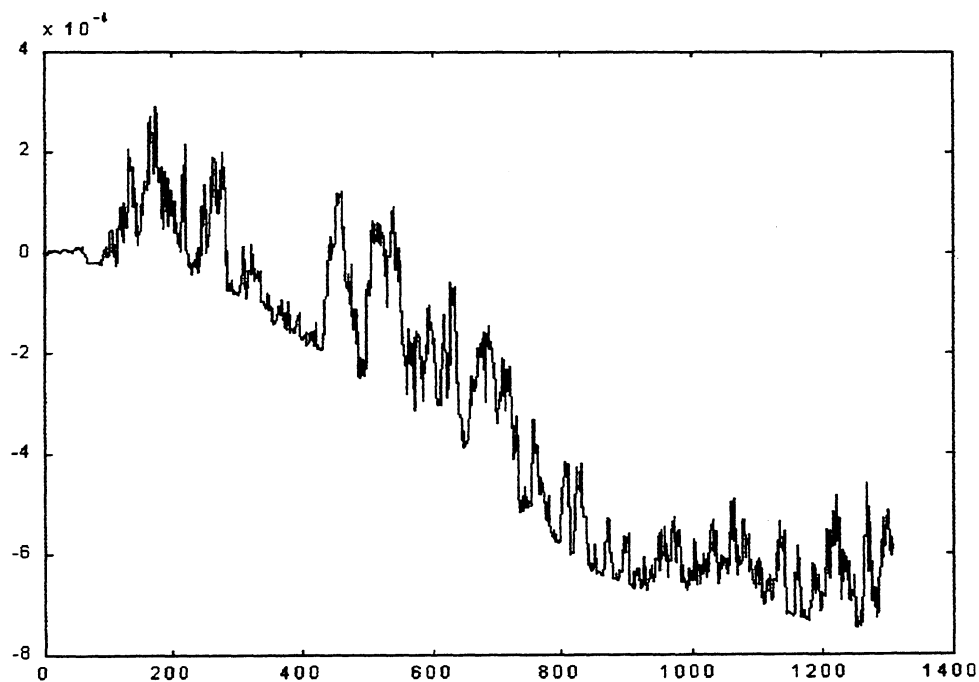
FONTE: O autor

**GRÁFICO 87 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM METROS**



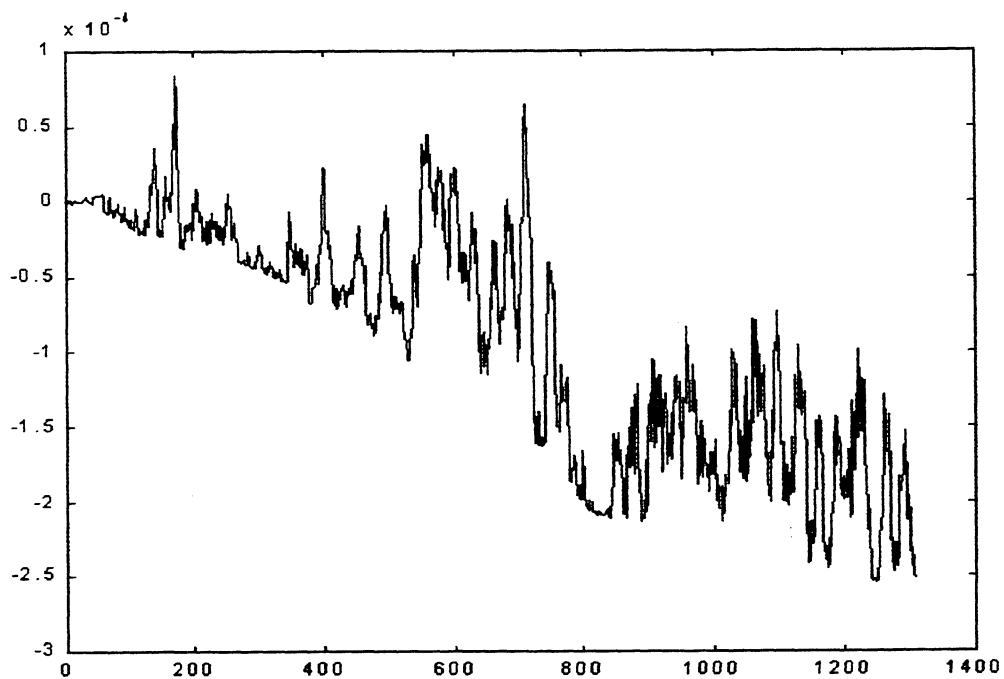
FONTE: O autor

**GRÁFICO 88 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM METROS**



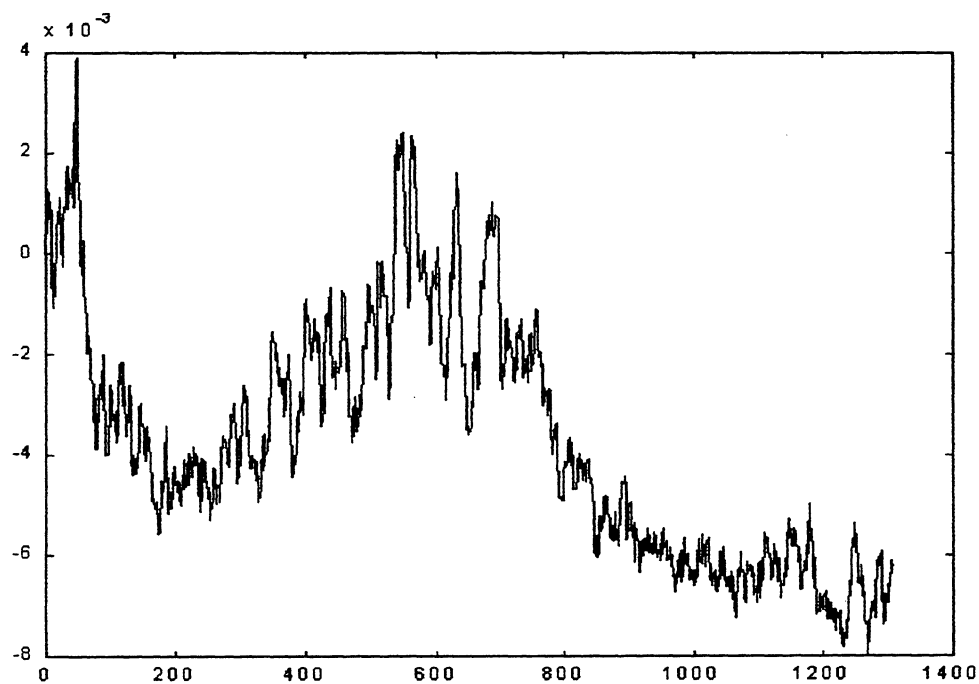
FONTE: O autor

**GRÁFICO 89 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA ZERO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM METROS**



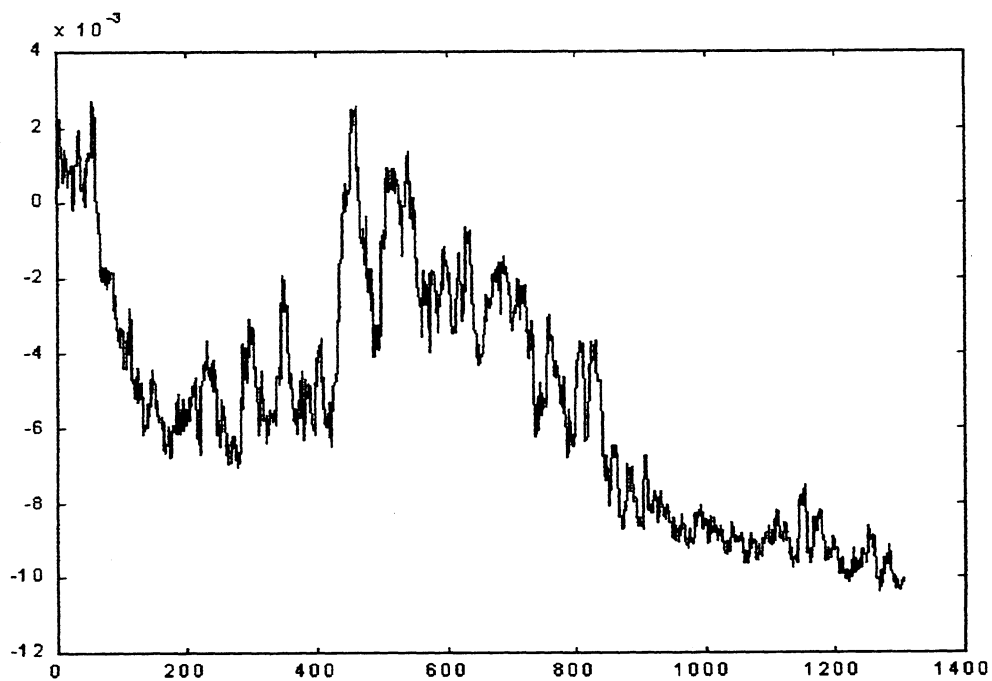
FONTE: O autor

GRÁFICO 90 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE  
26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM METROS



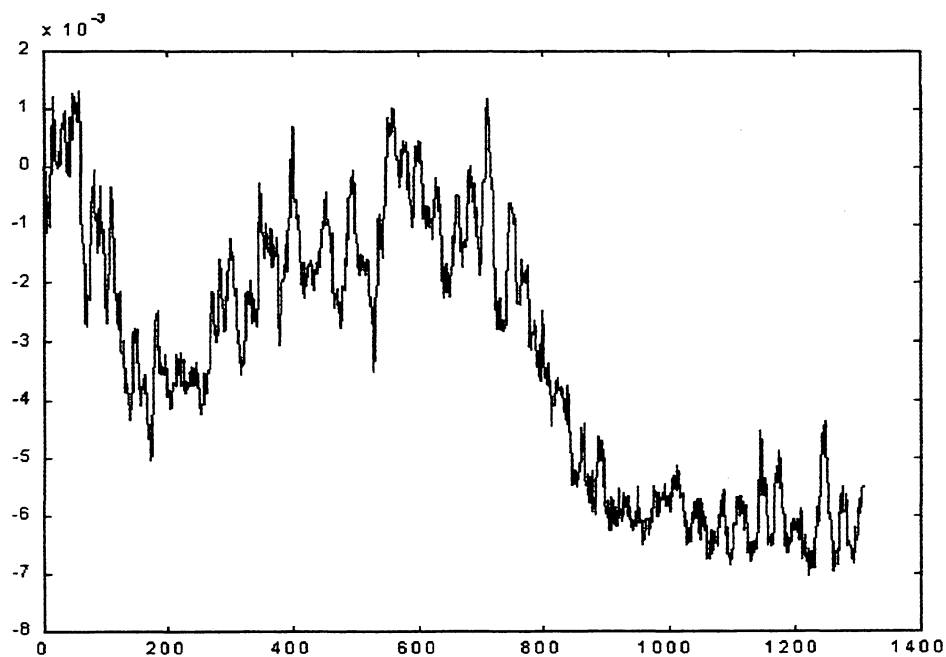
FONTE: O autor

GRÁFICO 91 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE  
26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM METROS



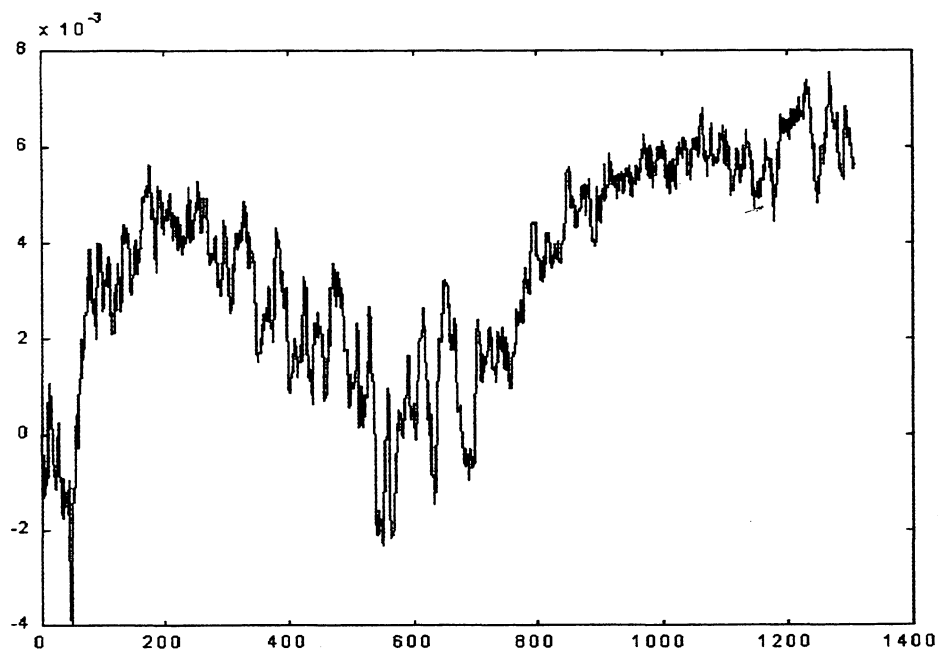
FONTE: O autor

**GRÁFICO 92 – EFEITO DO MULTICAMINHO NA ANTENA UM PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM METROS**



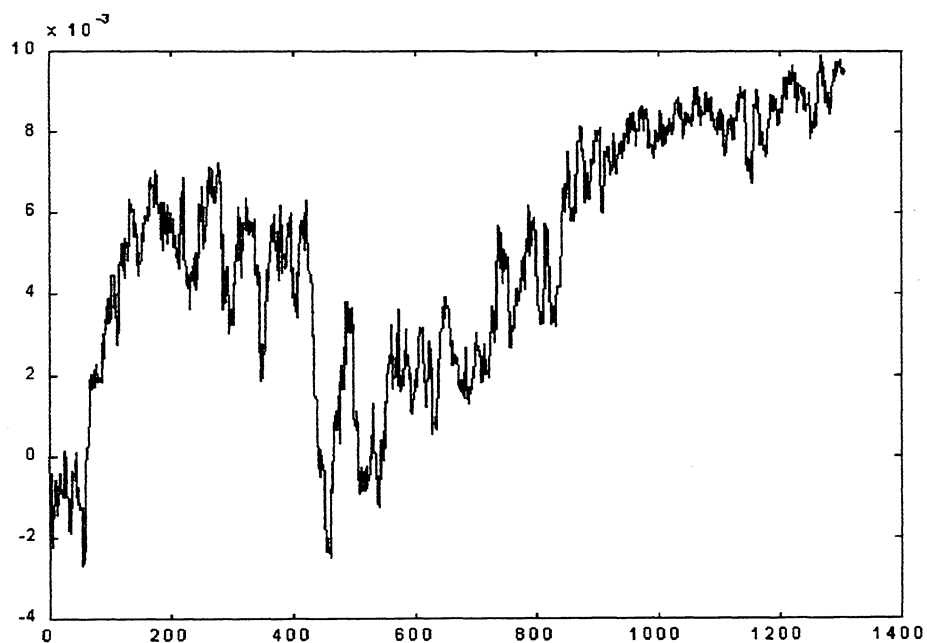
FONTE: O autor

**GRÁFICO 93 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENAS PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM METROS**



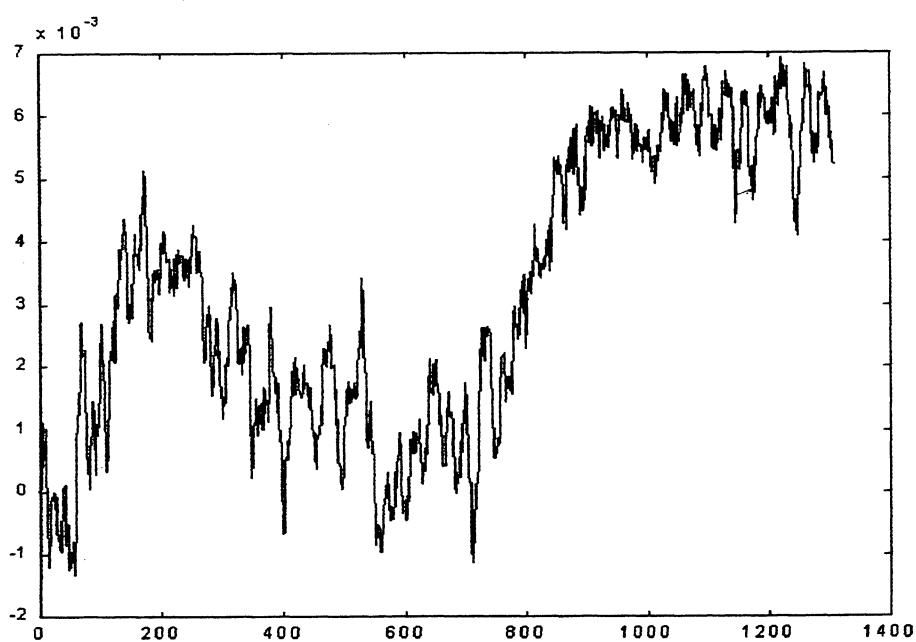
FONTE: O autor

**GRÁFICO 94 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENAS PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM METROS**



FONTE: O autor

**GRÁFICO 95 – DIFERENÇA DE EFEITO DO MULTICAMINHO CALCULADO ENTRE AS ANTENAS PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM METROS**



FONTE: O autor

### 5.2.1.1 Análise dos resultados do EKF e do multicaminho calculado

Também para o satélite 26 comprova-se, para todos os fatores analisados, uma alta correlação entre os três dias de rastreo, acompanhando a alta correlação do vetor de medidas entre esses três dias, do qual dependem diretamente. Há uma exceção a isso na elevação do sinal refletido no dia 20 de junho (gráfico 79) que difere levemente dos dias anterior (gráfico 78) e posterior (gráfico 80). O mesmo ocorre em relação à fase do sinal refletido na antena um neste mesmo dia (gráfico 85) em relação aos demais dias (gráficos 84 e 86). Não foi possível detectar a causa deste problema mas, por ser um fator localizado em um dia, atribuiu-se o mesmo a um problema de transmissão por parte do satélite.

A análise conjunta do coeficiente de reflexão (gráficos 72, 73 e 74) com o efeito do multicaminho na antena um (gráficos 90, 91 e 92) mostra uma concordância quase perfeita entre os mesmos. Observa-se que o decréscimo no multicaminho à medida que o satélite teve um leve movimento de elevação durante o período de rastreo (gráfico 16), foi acompanhado no mesmo sentido pelo coeficiente de reflexão.

A análise da fase do sinal refletido na antena zero, a antena de referência (gráficos 75, 76 e 77) pode ser analisada em conjunto com a fase do sinal refletido na antena um (gráficos 84, 85 e 86). Para este satélite ocorreu uma grande uniformidade na variação conjunta da fase nas duas antenas, o que era esperado. A diferença entre as mesmas manteve-se em torno de 6 cm, o que é um valor bastante coerente considerando-se um azimute para o sinal refletido (gráficos 81, 82 e 83) de valor quase nulo.

Também para este satélite aparece a forte influência das reflexões de solo no multicaminho, como pode ser observado na elevação do sinal refletido (gráficos 78, 79 e 80).

O efeito do multicaminho nas antenas zero (gráficos 87, 88 e 89) e um (gráficos 90, 91 e 92), também chegando a mais de 1,1 cm, mostra similaridade com os do satélite 9, apesar da presença do anteparo de alumínio, o que mostra que o mesmo não acrescentou multicaminho significativo no ambiente anterior.

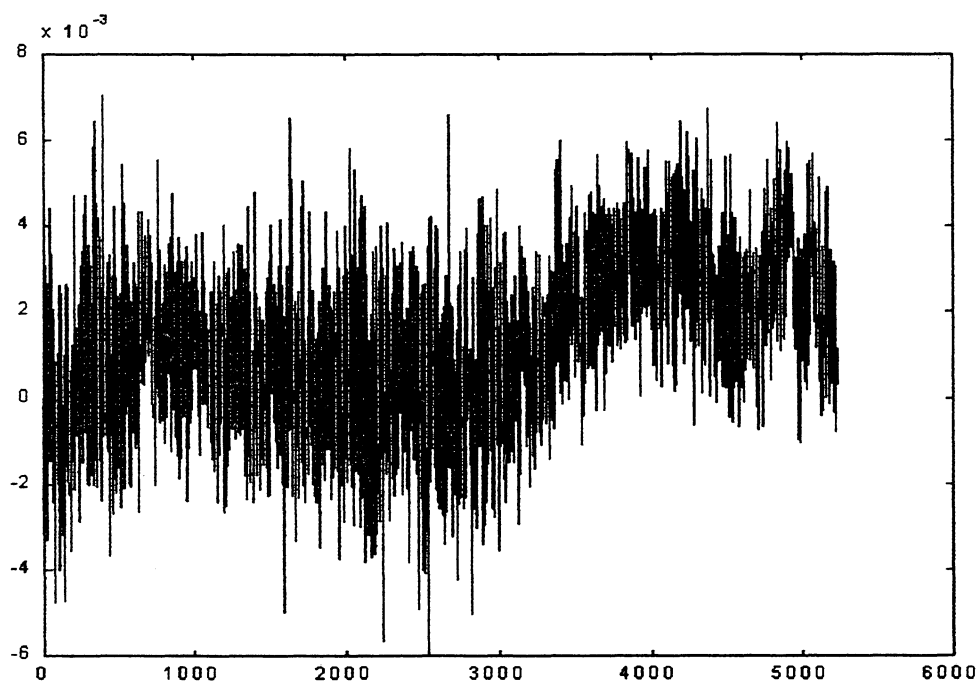
A diferença no efeito do multicaminho calculado entre as antenas zero e um (gráficos 93, 94 e 95), mostra uma coerência de diminuição quando comparado com

a elevação do satélite, que aumenta durante a sessão (gráfico 16), comprovando a problemática do uso da simples diferença de fase entre antenas.

### 5.2.2 Demonstração Gráfica dos Resultados de Verificação da Metodologia Proposta

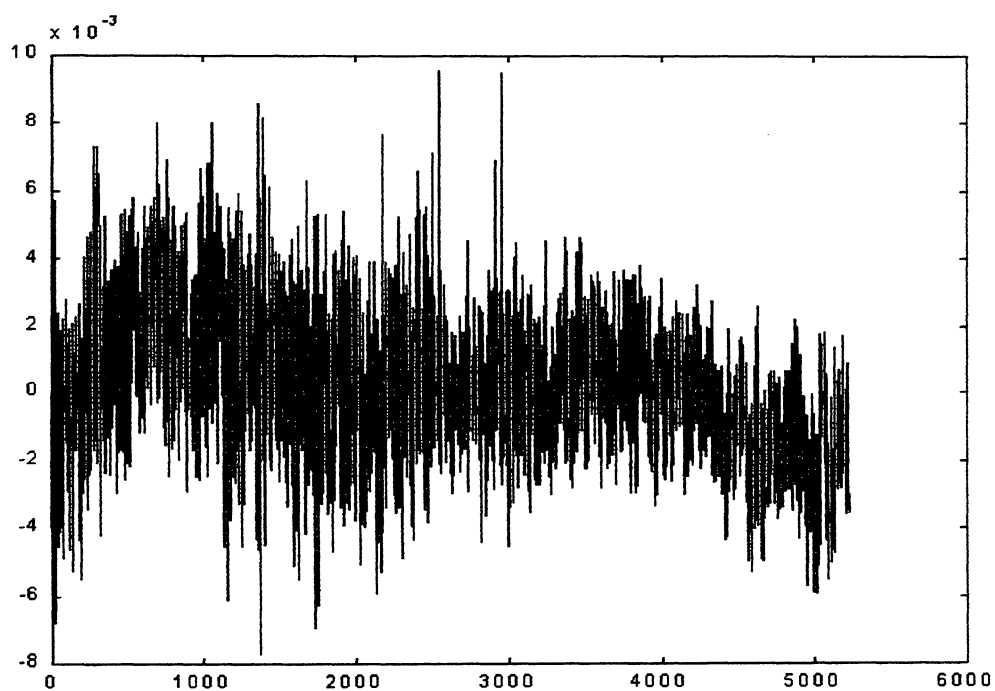
Os gráficos 96, 97 e 98 mostram os resultados do sinal suavizado para o satélite 26, formado pela SDFr (vetor de medidas do EKF), ou seja, o multicaminho medido, menos a diferença entre o multicaminho nas antenas zero e um, ou seja, o multicaminho calculado.

**GRÁFICO 96 - SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 19 DE JUNHO DE 2000, EM METROS**



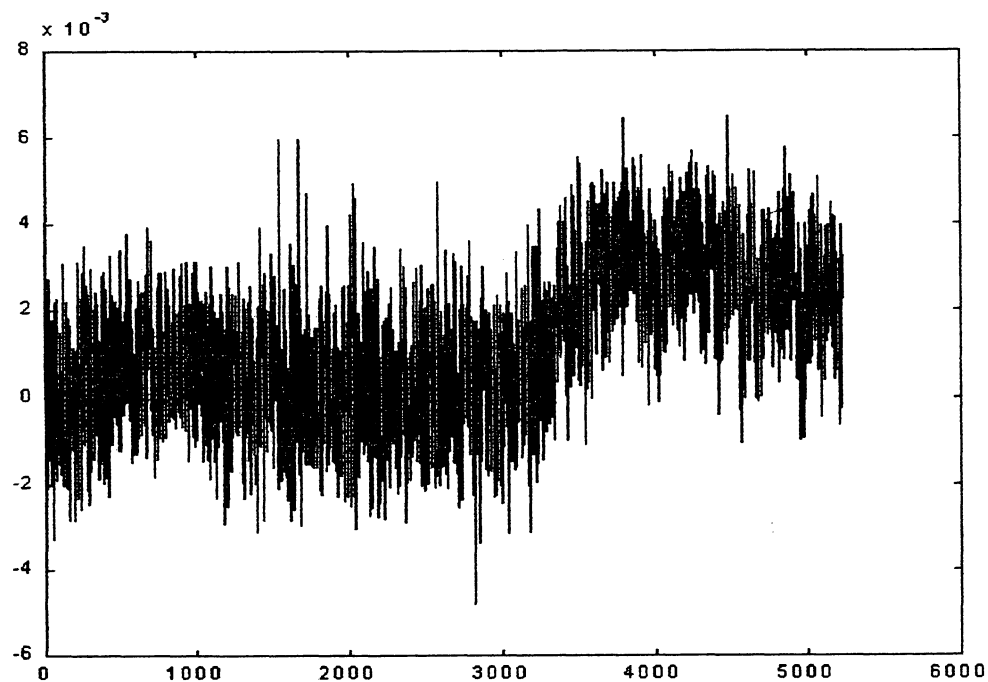
FONTE: O autor

GRÁFICO 97 - SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 20 DE JUNHO DE 2000, EM METROS



FONTE: O autor

GRÁFICO 98 - SINAL SUAVIZADO PARA O SATÉLITE 26 NO DIA 21 DE JUNHO DE 2000, EM METROS



FONTE: O autor

### 5.2.2.1 Análise dos resultados de verificação da metodologia proposta

A média do desvio-padrão do sinal medido para os três dias para o satélite 26 é de 0,00357 m, e para o sinal suavizado este valor é de 0,00182. Considerando-se a repetibilidade média nos três dias, para este satélite, de 73,4%, observa-se uma suavização de 62,6%, sendo essa a medida da eficiência do método neste caso.

## 5.3 ANÁLISE GERAL DA CONSISTÊNCIA MATEMÁTICA DO EKF PELA UNIDADE DOS DADOS DE ENTRADA

Essa análise foi feita calculando-se o EKF, e os resultados dele advindos, com unidades de entrada (vetor de medidas) na unidade original (metro), isto é, sem a prévia conversão para radianos. Esse procedimento resultou em sinais mais estáveis, sem os saltos (aleatórios ou não) de quando do uso do vetor de medidas em radianos. Usou-se um bom tempo da pesquisa na procura de matrizes de covariância mais adequadas e que resultassem em menores desvios-padrões dos parâmetros calculados, parecendo haver espaço para um melhor refinamento desse estimador.

Entre os satélites 9 e 26, a média da correlação de sinais em todos os dias foi de 74,7% e da eficiência foi de 61,45%. A semelhança de valores entre ambos os satélites mostra a eficiência do método, independentemente da posição do satélite, confirmando a hipótese de possível melhora no estimador. A parte não repetida do sinal (25,3% neste caso e para estes satélites) pode ser atribuída ao ruído térmico.

A tabela 2 mostra os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida no presente trabalho para os satélites 9 e 26. Mostra-se valores de antes e após a aplicação da mesma. Usam-se os valores da média do sinal de entrada (multicaminho medido) e do desvio-padrão do sinal suavizado (multicaminho medido menos o calculado), considerando os três dias de rastreo. Mostra-se também a correlação entre os sinais nesses três dias e o percentual da melhora conseguida com a aplicação da técnica.

**TABELA 2 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA, PARA OS SATÉLITES 9 E 26**

| Satélite<br>(PRN) | Multicaminho<br>(cm) | Sinal de<br>entrada –<br>antes ( $\sigma$ ) | Sinal<br>suavizado –<br>Após ( $\sigma$ ) | Repetibilidade<br>(%) | Eficiência<br>(%) |
|-------------------|----------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| 9                 | 0,569                | 0,433                                       | 0,226                                     | 76,0                  | 60,3              |
| 26                | 0,525                | 0,357                                       | 0,182                                     | 73,4                  | 62,6              |

**FONTE:** O autor

A tabela 2 mostra valores médios de 0,5 cm, mas o multicaminho na antena um, em relação a ambos os satélites, ultrapassou 1,1 cm, o que é um valor considerável para aplicações de alta precisão que se utilizam de medidas da fase da portadora.

A redução no desvio-padrão do sinal suavizado, em comparação com o sinal de entrada (multicaminho medido, representado pela SDFr) mostra, juntamente com a repetibilidade diária do multicaminho, a eficiência do método em detectar esse erro.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 7.1 CONCLUSÕES GERAIS SOBRE A METODOLOGIA PROPOSTA

Conclui-se que os objetivos propostos de elaboração de uma metodologia de identificação e atenuação do multicaminho nas medidas da fase das portadoras GPS foram plenamente atingidos.

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem concluir que é altamente viável o uso da alta correlação de sinais em antenas próximas e num curto intervalo de tempo para atingir o objetivo proposto.

A variação angular do satélite, em relação às antenas, no tempo de tomada das medidas para alimentar o EKF (dois minutos de arco em quatro segundos de tempo), mostrou-se insignificante. Isso torna plenamente válido o pressuposto da sua baixa variação para formar o sistema de equações de observação utilizado neste estimador.

Comparativamente ao trabalho com seis antenas (Ray & Cannon, 1999), a presente técnica mostrou-se prática e econômica, uma vez que faz uso de apenas um receptor e duas antenas para gerar todo o quadro de identificação e atenuação do multicaminho para todos os satélites rastreados. Além disso, dispensa o uso de mais receptores e osciladores atômicos externos.

Quanto à precisão, a metodologia proposta de identificação e atenuação do multicaminho, conseguiu atingir uma média entre todos os satélites, de 61,45% em relação ao multicaminho medido. A semelhança de eficiência entre os satélites sugerem que eventuais melhoras nesse índice devem-se menos à geometria (azimute e elevação) do satélite em relação à antena e mais a ajustes no estimador.

Para os diferentes satélites, a semelhança na correlação entre os sinais com multicaminho entre os diferentes dias de rastreio, com horários de sessões correspondentes a cenários com idêntica geometria, demonstram ser esse um valor indicativo da real correlação desses sinais nessas condições. A parte que não se repete (25,3%) se deve ao fator alheio ao multicaminho, ou seja, o ruído térmico. Pode-se, a partir dessa proporção, fazer uma estimativa do seu valor nas diferentes situações, embora esse não tenha sido objeto do presente trabalho.

Embora por questões práticas tenha-se usado somente medidas da fase da portadora L1, a metodologia proposta no presente trabalho aplica-se também a medidas da fase da portadora L2, identificando e atenuando o multicaminho também nas medidas da fase dessa portadora.

O tempo de processamento do algoritmo proposto, da entrada de dados até a geração de correções, foi bem inferior ao tempo de tomadas das medidas (ver 2.5). Isso demonstra ser altamente viável o uso do algoritmo proposto não somente para uso de correções ou de medidas da fase já atenuadas do multicaminho em pós-processamento como também para transmissão em tempo real. Isso geraria posicionamentos mais precisos, tanto num contexto de estação de referência, como de usuário, embora aspectos de transmissão de dados não tenham sido objeto do presente trabalho.

A metodologia proposta também abre a possibilidade de modelamentos do multicaminho para diversos ambientes separadamente, gerando correções para os diversos horários do dia e auxiliando nos trabalhos de pesquisa do comportamento desse fenômeno, a partir da coleta de dados a médio e longo prazos.

O método mostrou-se positivo em quase todos os itens exigidos de um bom estimador do multicaminho: apresenta solução em nível de canal, não tem limitações quanto à natureza e número de sinais com multicaminho (modelos), é passível de transmissão em tempo real e não exige o carregamento de alta quantidade de dados para as soluções.

O desenvolvimento do presente trabalho disponibiliza, em nível de Brasil, uma coletânea de dados e conhecimentos gerados acerca do multicaminho na fase da portadora para ambientes estáticos. Pretende-se que isso possa iniciar estudos efetivos em nosso País para um melhor conhecimento e domínio deste importante fenômeno que tanto afeta as medidas GPS.

## 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por tratar-se de um trabalho pioneiro em muitos aspectos, como o uso da alta correlação de sinais em antenas próximas no espaço e no tempo, recomenda-se que o mesmo continue sendo investigado em uma maior diversidade de cenários. Essa

diversidade seria quanto a distância, tamanho e natureza dos objetos refletos, para confirmar a eficiência do método.

Alguns aspectos, como o desconhecimento do potencial de melhora da eficiência do método além do valor de 61,45% atingido até aqui, recomendam que seja buscado um melhor afinamento do estimador usado (EKF). Pode-se levar em conta, para isso, melhoras nas matrizes de covariância, no modelamento do processo e nos valores iniciais. Pode-se, inclusive, usar valores modelados pelo método para dias consecutivos e buscar melhoras na inicialização.

Pode-se fazer desdobramentos da tecnologia proposta em termos de formação de correções para outros intervalos de tempo (como, por exemplo, 15 segundos). Neste caso há alternativas como fazer uma iteração do EKF ("Iterated Extended Kalman Filtering") nesses intervalos, ou usar o EKF recursivo ("Adaptative" ou "Self-Learning") e analisar as eventuais melhoras introduzidas.

Sugere-se trabalhos experimentais adicionais usando medidas da fase da portadora corrigidas e não-corrigidas do efeito do multicaminho a partir da metodologia proposta. Pode-se quantificar a melhora de posição em termos mais visíveis numericamente e em termos de resolução de ambigüidades, tanto em termos de estação de referência como de usuário.

Trabalhos com receptores de dupla frequência podem ser realizados no sentido de confirmar a eficiência do método também nas medidas da fase da portadora L2, embora não pareça haver motivo para isso não ocorrer.

Finalmente, recomendam-se estudos adicionais quanto à transmissão de dados, que analisem a aplicabilidade do algoritmo proposto no presente trabalho para casos em tempo real.

## REFERÊNCIAS

- AXELRAD, P.; COMP, C.; MACDORAN P. K. Use of Signal-to-Noise Ratio for Multipath Error Correction in GPS Differential Phase Measurements: Metodology and Experimental Results. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 7., 1994, Salt Lake City. **Proceedings...** Salt Lake City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1994.
- BECKER, D.; THIEL, K. H.; HARTL, P. A Special Method of Managing Multipath Effects. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 7., 1994, Salt Lake City. **Proceedings...** Salt Lake City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1994.
- BRAASCH, M.S. **Multipath Effects, Global Positioning Systems: Theory and Applications**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 1. 1996.
- BRENNER, M.; REUTER, R.; SCHIPPER, B. GPS Landing System Multipath Evaluation Techniques and Results. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings...** Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 999-1008.
- BROWN, R.G.; HWANG, P.Y.C. **Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering**. 2. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- COMP, C.; AXELRAD, P. An Adaptative SNR-Based Carrier Phase Multipath Technique. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9., 1996, Kansas City. **Proceedings...** Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1996. p. 683-697.
- DAI, D.; WALTER, T.; COMP, C. J. et al. High Integrity Multipath Mitigation Techniques for Ground Reference Stations. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings...** Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 593-604.
- DAI, D.; WALTER, T.; COMP, C. J. et al. High Integrity Multipath Mitigation Techniques for Ground Reference Stations. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings...** Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 593-604.

DEUTSCHMANN, J.; BAR-ITZHACK, I. **Attitude and Trajectory Estimation Using Earth Magnetic Field Data - Extended Kalman Filter Algorithm**. Disponível em: <http://fdd.gsfc.nasa.gov/gmod/papdeut/abstr.html> Acesso em: 29 set. 1999.

DIERENDONCK, V. A.J.; FENTON, P.; FORD, T. Theory and Performance of Narrow Correlator Technology in GPS Receiver. **Journal of The Institute of Navigation**, v. 39, n. 3. 1992.

FARREL, J.; GIVARGIS, T. Differential GPS Reference Station Algorithm – Design and Analysis. **IEEE Transactions on Control, Systems Technology**, v. 8, n. 3, p. 519 – 531, may 2000.

FARRET, J. C. **O multicaminho no sistema GPS**. Curitiba, 1999. 32 f. Trabalho Acadêmico (Seminário II) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

FENTON, P.; FALKENBERG, B.; FORD, T.; NG, K; DIERENDONCK, A.J. Novatel's GPS Receiver: The High Performance OEM Sensor of the Future. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 4., 1991, Albuquerque. **Proceedings**...Albuquerque: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1991.

FILLIPOV, V. Et al. The First Dual-Depth Dual Frequency Choke Ring. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings**...Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 1035-1040.

FORD, T; et al. Beeline RT20 – a Compact, Medium Precision Positioning system with an Attitude. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 687-698.

GADALLAH, E. S.; PACHTER, M.; DeVILBISS, S. Design of GPS Receiver Code and Carrier Tracking Loops for Multipath Mitigation. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings**...Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 1041-1054.

GARIN, L.; DIGGELEN F.; ROUSSEAU, J-M. Strobe and Edge Correlator Multipath Mitigation for Code. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9., 1996, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1996. p. 657-664.

GARIN, L.; ROUSSEAU, J-M. Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code & Carrier. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings...**Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 559-568.

GOMEZ, S. F.; HWU, S. U.; Comparisson of Space Shuttle GPS Flight Data to Geometric Theory of Diffraction Predictions. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings...**Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 605-604614.

HATCH, R. The Synergism of GPS Code and Carrier Measurement. In: International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, 3., 1982, Washington. **Proceedings...** Washington: 1982.

KEE, C.; PARKINSON, B. Calibration of Multipath Errors on GPS Pseudorange Measurements. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 1994, San Diego. **Proceedings...**San Diego: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1994.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1990.

MACHADO, K. D. **Equações diferenciais aplicadas à física**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 1999.

MCGRAW, G.; BRAASCH, M. GNSS Multipath Mitigation using Gated Correlator Technique. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 12., 1999, San Diego. **Proceedings...**San Diego: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1999.

MOELKER, D-J. Multiple Antennas for Advanced GNSS Multipath Mitigation and Multipath Direction Finding. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings...**Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 541-550.

MORA-CASTRO, E.J.; CARRASCOSA-SANZ C.; ORTEGA, G. Characterisation of the Multipath Effects on the GPS Pseudorange and Carrier Phase Measurements. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings...**Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 1065-1074.

NEE, V. The Multipath Estimating Delay Lock Loop: Approaching Theoretical Accuracy Limits. In: IEEE PLANS, 1994, Las Vegas. **Proceedings...**Las Vegas, 1994.

NOVATEL, INC. **Beeline User Manual.** Disponível em: [www.novatel.ca/productmanuals.html](http://www.novatel.ca/productmanuals.html)> Acesso: 9 maio. 2000.

OKI ELECTRIC INDUSTRY Co., Ltd. **Extended Kalman Filter and Its Problems** Disponível em: [www.obd.com/oki/otr/html/nf/otr-159-06-2.html](http://www.obd.com/oki/otr/html/nf/otr-159-06-2.html)> Acesso: 9 jul. 1999.

PARKINSON, B.W. et al. **Global Positioning System: Theory and Applications.** 3. v 1. Washington, DC : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996.

PARKINSON, B.W. et al. **Global Positioning System: Theory and Applications.** 3. v 2. Washington, DC : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996.

RAQUET, J.; LACHAPELLE, G. Determination and Reduction of GPS Reference Station Multipath using Multiple Receivers. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9., 1996, Kansas City. **Proceedings...**Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1996. p. 673-681.

RAY, J. K.; CANNON, M. E. Mitigation of Static Carrier Phase Multipath Effects Using Multiple Closely-Spaced Antennas. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings...**Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 1025-1034.

RAY, J. Use of Multiple Antennas to Mitigate Carrier Phase Multipath in Reference Stations. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 12., 1999, Nashville. **Proceedings...**Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1999. p. 269-280.

ROTHACHER, R.; MERVART, L. **Bernese GPS Software Version 4.0.** Berne: Astronomical Institute – University of Berne, 1996.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy - Foundations, Methods and Applications.** New York : Walter Gruyter, 1993.

TOWSEND, B.; FENTON P. A Practical Approach to the Reduction of Pseudorange Multipath Errors in a L1 GPS Receiver. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 7., 1994, Salt Lake City. **Proceedings...** Salt Lake City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1994.

WEILL, L.R. Conquering Multipath: The GPS Accuracy Battle. **GPS World**, p. 59-66, apr. 1997.

WELLENHOF, B.H.; LICHTENEGGER, H. **Global Positioning System Theory and Practice**. 3. New York : Springer-Verlag Wien, 1994.

WELLS, D. et al. **Guide to GPS Positioning**. Fredericton : Canadian GPS Associates, 1987.

ZHANG, Z. **Extended Kalman Filter**. Disponível em: <<http://www-sop.inria.fr/robotvis/personnel/zzhang/Publis/Tutorial-Estim/node16.html>> Acesso em: 6 jun. 1999.

### OBRAS CONSULTADAS

ALOI, D. N. Phase Center Variation (PCV) Determination of the Ohio University Dipole Array Using GPS Data. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 12., 1999, San Diego. **Proceedings...** San Diego: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1999. p. 705-710.

ASHTech GPS RECEIVER OPERATING MANUAL. Sunnyvale: Ashtech, Inc., 1993.

ASÍN, F. M. **Geodesia y Cartografía Matemática**. Madrid: Universidade Politécnica, 1987.

AUTON, J.; CRUZ, J. Simulating GPS Receiver Measurement Errors. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9., 1996, Kansas City. **Proceedings...** Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1996. p. 739-747.

BERALDO, P.; SOARES, G. M. **GPS – Teoria e aplicações práticas**. Brasília: Editora e Livraria Luana Ltda., 1995.

BRENNER, M.; REUTER, R.; SCHIPPER, B. GPS Landing System Multipath Evaluation Techniques and Results. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings...**Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 999-1008.

BRONSHTEIN, I. SEMENDIAEV, K. **Manual de matemáticas**. 2. Tradução: I. H. Rojas. Moscou: Editora Mir, 1973. Original russo.

Bulletins A and B-Explanatory Supplement. Paris: International Earth Rotation Service, 1998-

CAHN, C. R.; CHANSARKAR, M. M. Multipath Corrections for a GPS Receiver. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings...**Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 551-557.

CAMPANA, R.; MARRADI, L.; BONFANTI, S. GPS Attitude Determination by Adaptive Kalman Filtering. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 12., 1999, San Diego. **Proceedings...**San Diego: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1999. p. 1979-1988.

DORIS, D.; BENHALLAM On Correlation Processes Reducing Multipath Errors in the L1 GPS Receiver. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9., 1996, Kansas City. **Proceedings...**Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1996. p. 699-708.

EISSFELLER, B.; WINKEL, J. O. GPS Dynamic Multipath Analysis in Urban Areas. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9., 1996, Kansas City. **Proceedings...**Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1996. p. 719-727.

FAULKNER, R. **RE: About 521 antennas**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: [jcfarret@geoc.ufpr.br](mailto:jcfarret@geoc.ufpr.br) em: 5 abr. 2000.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações – aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, 1994.

GOMEZ, S. ; PANNETON, R.; SAUNDERS, P. GPS Multipath Modeling Using Geometrical Theory of Diffraction. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 8., 1995, Palm Springs. **Proceedings**...Palm Springs: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1995. p. 195-204.

GOMEZ, S. F.; HWU, S. U. Comparison of Space Shuttle GPS Flight Data to Geometric Theory of Diffraction Predictions. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 605-614.

HANNAH, B.; WALKER, R.; KUBIK, K. Towards a Complete Virtual Multipath Analysis Tool. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings**...Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 1055-1064.

HANSELMAN, D.; LITTFIELD, B. **Matlab 5 – versão do estudante – guia do usuário**. Tradução: A. V. Saa, F. A. Neto, M. A. Ehrhardt. São Paulo: Makkron Books do Brasil Editora Ltda., 1999. Original inglês.

HICKMANN, D. Multipath Measurements System (MMS) B A System to Detect Multipath Effects and the Causing Reflectors. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings**...Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 1075-1083.

HOLMES, J. K. Noncoherent Late Minus Early Power Code Tracking Performance With Front End Filtering. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 583-591.

ITANI, K.; HAMADA, K.; HAYASHI, T. Development of a Real-Time Multipath Monitor and Experimental Results. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9., 1996, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1996. p. 729-738.

JET PROPULSION LABORATORY **Products – Precise orbits**. Disponível em: [www.igs.cbl.nasa.gov](http://www.igs.cbl.nasa.gov)> Acesso: 26 jul. 2000.

LOPEZ, S.; CUERVO, E. **Topografia**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1993.

MACABIAU, C.; BOTURIER, C. BENHALLAN, A. Performance of GPS Receivers with More Than One Multipath. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 12., 1999, San Diego. **Proceedings**...San Diego: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1999. p. 289-306.

MACHADO, K.D. **Teoria do eletromagnetismo**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2000. v 1.

MATTOS, P. Multipath Elimination for Low-Cost Consumers GPS. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9., 1996, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1996. p. 657-671.

McCRACKEN, D. D. **Programación Fortran IV. 2.** Tradução: J. O. Suarez. México: Galvez Impresores, 1972. Original inglês.

NELSON, L. M.; AXELRAD, P.; ETTER, D. M. Adaptive Detection of Code Delay and Multipath in a Simplified GPS Signal Model. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 569-581.

NOVATEL, INC. **Comand Description Manual – section OEM3 – manual number OM-20000026**. Disponível em: <[www.novatel.ca/productmanuals.html](http://www.novatel.ca/productmanuals.html)> Acesso: 9 maio. 2000.

NOVATEL, INC. **Millenium GPSCard command description manual**. Disponível em: <[www.novatel.ca/productmanuals.html](http://www.novatel.ca/productmanuals.html)> Acesso: 9 maio. 2000.

NOVATEL, INC. **GPSolution 3.1**. Disponível em: <[www.novatel.ca](http://www.novatel.ca)> com senha via [ftp://ftp.novatel.ca/outgoing/support/Software/GPSolution/FULL\\_310.exe](ftp://ftp.novatel.ca/outgoing/support/Software/GPSolution/FULL_310.exe). Acesso: 9 maio. 2000.

ORNDORFF, T.; SCHWARTZ, J.; PAUTLER, J. Urban Location Simulation and Treatment of Multipath Effects. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 8., 1995, Anaheim. **Proceedings**...Anaheim: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1995. p. 303-312.

ORTEGA, G.; MORA, E.; CARRASCOSA, C. GPS Multipath Effects During the Shuttle to MIR Rendezvous for the STS-84 Flight Atlantis. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings**...Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 1017-1024.

ORVIS, W. J. **Visual basic for applications – técnicas de programação**. Tradução: J. Chedid. Rio de Janeiro: Axcel Books, 1994. Original inglês.

OTNES, R. K.; ENOCHSON, L. **Applied Time Series Analysis**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1978.

PETERSON, B.; BRUCKNER, D.; HEYE, S. Measuring GPS Signals Indoors. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 615-624.

RAY, J. R.; CANNON, M. E.; FENTON, P. Code Range and Carrier Phase Multipath Mitigation Using SNR, Range and Phase Measurements in a Multi-Antenna System. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 12., 1999, San Diego. **Proceedings**...San Diego: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1999. p. 713-726.

RAY, J. K. **RE: greetings from Brazil**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: [jcfarret@geoc.ufpr.br](mailto:jcfarret@geoc.ufpr.br) em: 3 set. 1999.

SCHWAB, S. S. **Sistemas de Referência em Geodésia**. Curitiba, 1995. 20 f. Trabalho Acadêmico (Geodésia Avançada) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

SLEEWAEGEN, J. M. Multipath Mitigation, Benefits from using the Signal-to-Noise Ratio. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10., 1997, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. p. 531-540.

SONG, I. GPS Differential Positioning Using Quality Controlled P-Code Pseudoranges. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9., 1996, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1996. p. 749-757.

STTAFORD, J. A Practical Technique for Assessing Multipath Mitigation Methods for DGPS Applications. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998, Nashville. **Proceedings**...Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998. p. 1009-1016.

TIBERIUS, C.; JONKMAN, N.; KENSELAAR, F. The Stochastics of GPS Observables. **GPS World**, Oregon, v. 10, n. 7, p. 49-54, feb. 1999.

VANEK, B. J.; MAYBECK, P. S.; RAQUET, J. S. GPS Signal Offset Detection and Noise Strength Estimation in a Parallel Kalman Filter Algorithm. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 12., 1999, San Diego. **Proceedings**...San Diego: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1999. p. 2243-2252.

VANICEK, P.; KRAKIWSKI, E. **Geodesy – The Concepts**. 2. Amsterdam: North-Holland, 1987.

WALKER, R.; KUBIK, K. Numerical Modeling of GPS Signal Propagation and Multipath. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9., 1996, Kansas City. **Proceedings**...Kansas City: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1996. p. 709-717.

ZAKATOV, P. S. **Curso de Geodesia Superior**. Tradução: J. A. Rico Baez. Moscou: Editora Mir, 1981. Original russo.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1 – MATERIAL RELATIVO AO MECANISMO DE ATUAÇÃO DO MULTICAMINHO NO GPS, EXTRAÍDO ORIGINALMENTE DO SEMINÁRIO II DO PROJETO DA PRESENTE TESE (FARRET, 1999), APRESENTADO EM JUNHO DE 1999, CONSERVANDO A NUMERAÇÃO E A FORMA DE APRESENTAÇÃO ORIGINAIS**

## **2) MECANISMO DE ATUAÇÃO DO MULTICAMINHO NO DESEMPENHO DO RECEPTOR GPS**

Para entender isso é preciso conhecer os mecanismos de atuação do receptor GPS tanto em código como em fase, especialmente no rastreo (“tracking”) e no processamento do sinal recebido, e saber como as distorções causadas pelo multicaminho se traduzem em erro na medida da distância receptor-satélite. A seguir mostram-se expressões para os erros devidos ao multicaminho tanto em código como em fase extraídas de Parkinson et al, 1996, para um único sinal afetado pelo efeito do multicaminho chegando ao receptor, sabendo-se que os resultados podem ser extrapolados para os casos de sinais múltiplos. Também as derivações seguem uma sequência para receptores analógicos, uma vez que os resultados são exatamente os mesmos para os receptores com arquitetura digital moderna.

### **O QUE É UM DLL?**

Um DLL (“Delay Lock Loop”) é um “tracking loop” para medidas com código, sendo uma forma iterativa de dois diferentes estimadores de atraso estatisticamente ótimos: o estimador de máxima probabilidade e o estimador de erro quadrado médio mínimo. O parâmetro a ser estimado tanto pode ser o atraso (tempo de deslocamento do sinal do satélite ao receptor) como a posição do usuário, parâmetro este tido como invariante sobre o intervalo de tempo de interesse e variando muito vagarosamente de intervalo para intervalo. Os DLLs são tantos quanto o número de canais do receptor (e, portanto, o número de satélites rastreados). O DLL

é alimentado pelo sinal I e Q (“in-phase” e “quadrature”) que chega na presença de ruído branco gaussiano, representado principalmente pelo ruído termal inerente ao aparelho (características dos materiais). Na verdade, a determinação do atraso é um pré-requisito para a determinação da pseudodistância, bem como a extração dos dados da mensagem GPS que vêm modulados na portadora, após o que a mesma resulta recuperada. Em aparelhos de mais alta precisão, esta portadora pura abastece uma outra versão de “tracking loop”, desta vez para a fase da portadora, o PLL (“Phase Lock Loop”). Antes disso, no entanto, os dados são corrigidos de erros como os devidos aos relógios do satélite, efeitos de rotação da Terra, atraso ionosférico, atraso troposférico, efeitos relativísticos e deficiências de equipamento, tudo no processador de dados de navegação onde são também calculadas as posições dos satélites. Pseudodistância e fase corrigidas alimentam um EKF (“Extended Kalman Filter”) para fornecimento de estimativas de posição, velocidade e tempo do centro de fase da antena do usuário.

## **QUE É O RUÍDO BRANCO GAUSSIANO?**

Ruído branco é todo processo aleatório estacionário que tem uma função densidade espectral constante. Se, além disso, tiver distribuição normal, será gaussiano. Se, por comodidade matemática, considera-se ele como tendo amplitude espectral constante em todas as frequências, surge a incômoda situação de ter que considerá-lo com variância infinita, o que é contornado considerando-se sistemas com banda limitada (Brown & Hwang, 1992).

### **2.1) DESCRIÇÃO DO SINAL MODULADO COM RUÍDO PSEUDOALEATÓRIO**

Expressão de um sinal PRN (“Pseudo Random Noise”) transmitido pelo satélite:

$$S_1(t) = A \cos[\omega_0 t + p(t)\pi / 2] \quad (1)$$

...onde  $A^2/2$  é a potência do sinal médio dentro do receptor,  $\omega_0$  é a frequência do sinal recebido, em radianos por segundo (fase da portadora mais a variação Doppler) e  $p(t)$  é o código PRN (que pode assumir os estados +1 ou -1).

A expressão acima é uma simplificação, pois na verdade o sinal GPS é modulado por dois códigos PRN (C/A e P) em adição aos dados de navegação. Aplicando-se identidades trigonométricas na expressão (1), ela torna-se:

$$\hat{S}_1(t) = -Ap(t) \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

...sendo  $\hat{S}_1(t)$  o mesmo sinal  $S_1(t)$  escrito de outra forma.

O multicaminho é caracterizado por quatro parâmetros, todos relativos ao sinal direto: amplitude, tempo de atraso, fase e taxa de variação da fase (a qual é considerada zero neste caso por assumir-se um cenário estável). A fase relativa do multicaminho em relação ao sinal direto é função do tempo de atraso relativo e do coeficiente de reflexão do objeto refletor. A seguir expressa-se o sinal recebido, considerando que ele é composto do sinal direto mais um único sinal oriundo de multicaminho:

$$\hat{S}_{1m}(t) = \hat{S}_1 + \alpha \hat{S}_1(t + \delta) \quad (3)$$

...onde  $\alpha$  é a amplitude relativa do multicaminho e  $\delta$  é o atraso de tempo relativo do multicaminho, que tem que ser negativo devido à convenção usada na equação.

Nota-se que a fase relativa não é mostrada, mas substituindo-se a expressão (2) na (3) e incluindo-se a fase relativa tem-se:

$$\hat{S}_{1m}(t) = -Ap(t) \sin(\omega_0 t) - \alpha Ap(t + \delta) \sin(\omega_0 t + \theta_m) \quad (4)$$

...onde  $\theta_m$  é a fase relativa do multicaminho (identificado pelo índice m).

## 2.2) RECEPTOR DE RUÍDO PSEUDOALEATÓRIO COERENTE

Descrevem-se aqui as expressões para as curvas discriminadoras para um DLL coerente, tanto na ausência como na presença de multicaminho. Também deriva-se a expressão para a fase composta do sinal contaminado pelo multicaminho como ele é rastreado pelo “Carrier Tracking Loop”.

### 2.2.1) CURVA DISCRIMINADORA DO DLL COERENTE NA AUSÊNCIA DE MULTICAMINHO

Ao chegar ao receptor o sinal  $s_1(t)$  é “mixado” com duas versões, uma adiantada (“early” - identificado pelo índice E) e outra atrasada (“late” - identificado pelo índice L), do código PRN modulado dentro de um oscilador local de frequência. A expressão “mixado”, usada acima, vem de “mixer”, que significa o produto de dois sinais juntos para gerar sinais adicionais com frequências iguais à soma e diferença das frequências originais (Wells, 1987).

As expressões desses produtos são:

$$s_E(t) = -p(t + \tau - \tau_d) \sin(\omega_l t + \theta) \quad (5)$$

$$s_L(t) = -p(t + \tau + \tau_d) \sin(\omega_l t + \theta) \quad (6)$$

...onde  $\tau$  é o erro de rastreamento (“tracking”) do DLL,  $\tau_d$  é o tempo de avanço da réplica adiantada ou o tempo de atraso da réplica atrasada (sempre relativamente ao tempo de rastreamento do código - “on-time”),  $\theta$  é o erro de rastreamento do PLL e  $\omega_l$  é a frequência do oscilador local em rad/s.

Após sair dos “mixers” os sinais passam por filtros passa banda (BPFs - “bandpass filters”) suficientemente estreitos para rejeitar termos de frequência somada e também esses filtros completam o processo de correlação. Os produtos de saída desses filtros podem ser expressos da seguinte maneira (com as barras superiores indicando operações com filtros passa banda):

$$\overline{S_1(t) S_E(t)} = 1/2AR(\tau - \tau_d) \cos(\omega_1 t - \theta) \quad (7)$$

$$\overline{S_1(t) S_L(t)} = 1/2AR(\tau + \tau_d) \cos(\omega_1 t - \theta) \quad (8)$$

...onde  $\omega_1$  é a diferença de frequência ( $\omega_1 = \omega_0 - \omega_f$ ) e  $R(\tau)$  é a função de correlação do código PRN. Uma oportuna aproximação desta função é:

$$R(\tau) = 1 - \frac{|\tau|}{T}, |\tau| \leq T$$

$$= 0, |\tau| > T \quad (9)$$

...onde  $T$  é o período de um pedaço (“bit”) de código PRN (também chamado de “chip” de onde vem a expressão “chipping-rate” referente à taxa de transmissão do código).

### O QUE É FUNÇÃO DE AUTO-CORRELAÇÃO?

É definida, para um processo aleatório  $X(t)$ , como:

$$R_x(t_1, t_2) = E[X(t_1)X(t_2)]$$

...onde  $t_1$  e  $t_2$  são tempos amostrais arbitrários. Nota-se que a função de auto-correlação diz como o processo se relaciona com ele mesmo em duas épocas diferentes. Se o processo é estacionário (se as funções densidade descrevendo este processo são invariantes em um dada translação de tempo), a função de auto-correlação depende somente da diferença de tempo  $t_2 - t_1$ . Assim,  $R_x$  se reduz a uma função exatamente da variável diferença de tempo  $\tau$ , isto é:

$$R_x(\tau) = E[X(t)X(t + \tau)] \quad - \quad \text{Caso estacionário}$$

...onde  $t_1$  é representado por  $t$  e  $t_2$  por  $t + \tau$ . A estacionariedade assegura que a esperança não é dependente de  $t$ . Nota-se que a função de auto-correlação é a média de conjunto (isto é, a esperança) do produto de  $X(t_1)$  e  $X(t_2)$  (Brown & Hwang, 1992).

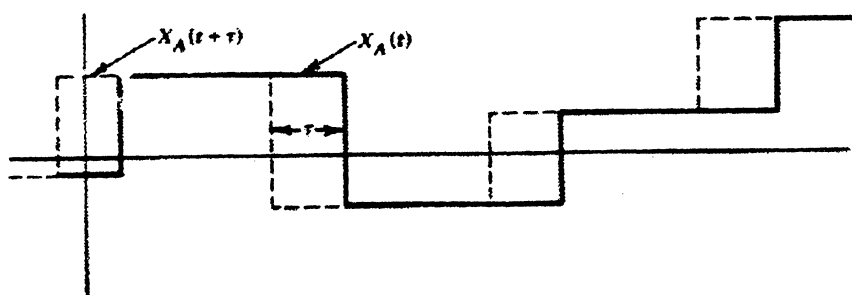
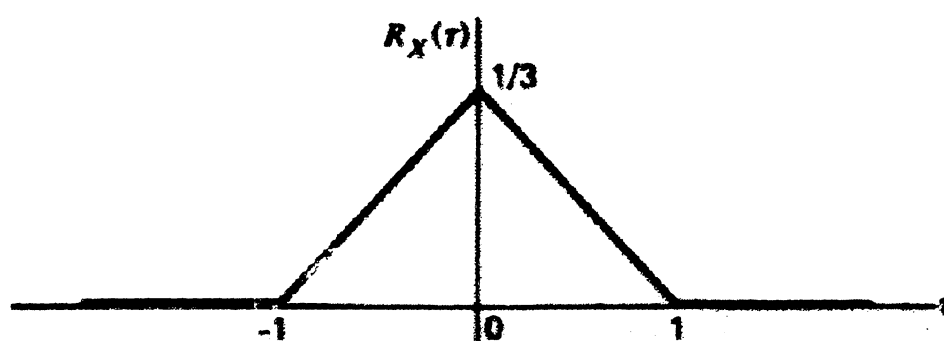


FIGURA 3 – Forma de onda de um processo aleatório.

(Fonte: Brown & Hwang, 1992)



FIGUR 4: Função de auto-correlação para o exemplo anterior.

(Fonte: Brown & Hwang, 1992)

### O QUE É FUNÇÃO DE CORRELAÇÃO CRUZADA?

É definida, entre os processos  $X(t)$  e  $Y(t)$ , como:

$$R_{XY}(t_1, t_2) = E[X(t_1)Y(t_2)]$$

Novamente, se o processo é estacionário, somente a *diferença* de tempo entre pontos amostrais é relevante, e assim a função de correlação cruzada reduz-se a:

$$R_{XY}(\tau) = E[X(t)Y(t + \tau)] \quad - \quad \text{Caso estacionário}$$

De forma semelhante como a função de auto-correlação diz da relação do processo com ele mesmo, a função de correlação cruzada fornece informações acerca da correlação mútua entre

os dois processos. A ordem dos índices é importante. Existe uma relação simétrica para o caso estacionário, como é visto agora. Por definição:

$$R_{XY}(\tau) = E[X(t)Y(t + \tau)]$$

$$R_{YX}(\tau) = E[Y(t)X(t + \tau)]$$

A esperança na equação acima não muda em uma translação de  $-\tau$ . Desta forma,  $R_{YX}(\tau)$  é também dada por:

$$R_{YX}(\tau) = E[Y(t - \tau)X(t)]$$

...e assim pode-se dizer que  $R_{XY}(\tau) = R_{YX}(-\tau)$

Portanto, a troca da ordem dos índices da função de correlação cruzada tem o efeito de trocar o sinal do argumento (Brown & Hwang, 1992).

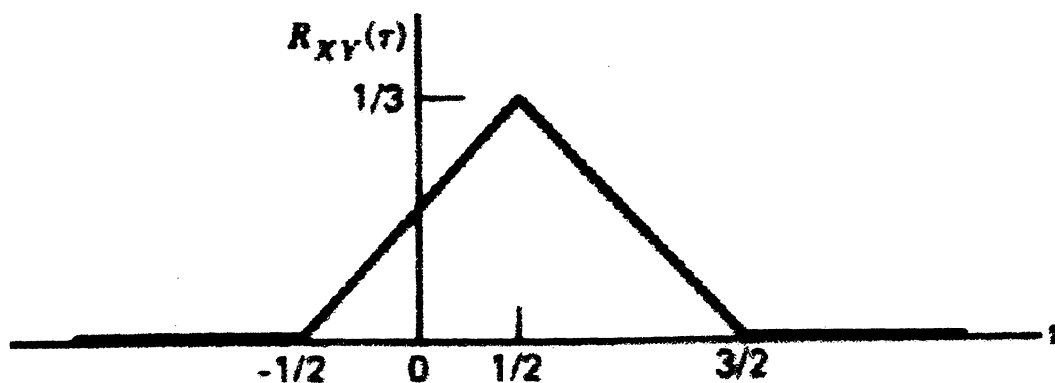


FIGURA 5 – Função de correlação cruzada.

(Fonte: Brown & Hwang, 1992)

Comprimentos de banda finitos dos BPFs distorcem a “ponta” do “bit” do código PRN e resultam em uma suavização da função de correlação. Comparação de resultados destas análises com aqueles obtidos com a suavização da função de correlação revela que este “smoothing” reduz o erro máximo de distância devido a um dado conjunto de parâmetros do

multicaminho e, com isso, a equação (9) produz resultados que apresentam uma certa uniformidade.

Portanto, os sinais que saem dos BPFs são as funções de correlação “early-late” em uma frequência intermediária (IF - “intermediate frequency”). Filtros passa baixa (LPFs - “low-pass filters”) podem reduzir os termos IF levando a um sinal banda base (“baseband signal”).

### OQUE É O “BASEBAND SIGNAL”?

O termo “baseband” em tratamento de sinais designa a origem do espectro de frequências que está sendo considerado.

Assumindo-se um erro de fixação da fase da portadora no PLL de zero ( $\theta=0$ ), tem-se:

$$\overline{S_1(t) S_E(t)} = 1/2AR(\tau - \tau_d) \quad (10)$$

$$\overline{S_1(t) S_L(t)} = 1/2AR(\tau + \tau_d) \quad (11)$$

Finalmente, a função discriminadora (representada por D) é formada pela diferenciação das saídas dos LPFs, e sua forma normalizada é a seguinte:

$$D_c(\tau) = R(\tau + \tau_d) - R(\tau - \tau_d) \quad (12)$$

...onde o índice “c” é relativo ao DLL “coerente”.

Observa-se que o DLL fixa o pico da função de correlação por fixar a passagem pelo zero da função discriminadora, pois ambos ocorrem para  $\tau = 0$ . O multicaminho distorce a curva discriminadora fazendo com que a passagem do zero ocorra para algum valor de  $\tau$  diferente de zero, o que corresponde ao erro de “tracking” do DLL causado pelo multicaminho. Embora  $\tau$  seja um erro em correlação, a distância é uma função no domínio do tempo. Um erro em correlação corresponde a um erro em tempo igual mas oposto, de modo que o erro em distância é dado pelo oposto do erro de “tracking” do DLL.

### 2.2.2) CURVA DISCRIMINADORA DO DLL COERENTE NA PRESENÇA DE MULTICAMINHO

No caso do DLL coerente, as réplicas “early” e “late” são modulados dentro de um oscilador local de frequência, o qual está fechado em fase com o sinal que chega. A equação (4) mostra o sinal que chega, e que está perturbado pela presença do multicaminho, de forma que o PLL rastreia a fase do sinal composto que chega, e não do sinal direto. Os sinais “early” e “late” são agora representadas pelas seguintes expressões:

$$S_{Em}(t) = -p(t + \tau - \tau_d) \sin(\omega_I t + \theta_c + \theta) \quad (13)$$

$$S_{Lm}(t) = -p(t + \tau + \tau_d) \sin(\omega_I t + \theta_c + \theta) \quad (14)$$

...onde  $\theta_c$  é a fase composta do sinal direto mais o sinal com multicaminho e  $\theta$  é o erro de rastreamento da fase da portadora no PLL.

Neste item derivam-se as relações que governam a fase composta do sinal direto mais do sinal com multicaminho. As saídas dos “mixers” são dadas multiplicando-se a equação (4) pelas equações (13) e (14).

Passando-se a saída dos “mixers” através de BPFs completa-se o processo de correlação e removem-se os termos da frequência somada. LPFs então permitem passar somente sinais banda base, produzindo o seguinte:

$$\begin{aligned} \overline{S_{1m}(t) S_{Em}(t)} &= 1/2 AR(\tau - \tau_d) \cos(-\theta_c - \theta) \\ &+ 1/2 \alpha AR(\tau - \tau_d - \delta) \cos(\theta_m - \theta_c - \theta) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \overline{S_{1m}(t) S_{Lm}(t)} &= 1/2 AR(\tau + \tau_d) \cos(-\theta_c - \theta) \\ &+ 1/2 \alpha AR(\tau + \tau_d - \delta) \cos(\theta_m - \theta_c - \theta) \end{aligned} \quad (16)$$

Assumindo-se um erro de fixação no PLL como sendo zero, e tendo-se a vantagem do fato de que o cosseno é uma função par, tem-se:

$$\begin{aligned} \overline{S_{1m}(t) S_{Em}(t)} &= 1/2AR(\tau - \tau_d) \cos(\theta_c) \\ &+ 1/2\alpha AR(\tau - \tau_d - \delta) \cos(\theta_m - \theta_c) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \overline{S_{1m}(t) S_{Lm}(t)} &= 1/2AR(\tau + \tau_d) \cos(\theta_c) \\ &+ 1/2\alpha AR(\tau + \tau_d - \delta) \cos(\theta_m - \theta_c) \end{aligned} \quad (18)$$

Novamente a função discriminadora é formada pela diferenciação das saídas dos LPFs. A forma normalizada desta função é a seguinte:

$$\begin{aligned} D_{cm}(\tau) &= R(\tau + \tau_d) \cos(\theta_c) + \alpha R(\tau + \tau_d - \delta) \cos(\theta_m - \theta_c) \\ &- R(\tau - \tau_d) \cos(\theta_c) - \alpha R(\tau - \tau_d - \delta) \cos(\theta_m - \theta_c) \\ &= [R(\tau + \tau_d) - R(\tau - \tau_d)] \cos(\theta_c) \\ &+ \alpha [R(\tau + \tau_d - \delta) - R(\tau - \tau_d - \delta)] \cos(\theta_m - \theta_c) \end{aligned} \quad (19)$$

...onde o índice "cm" é relativo ao DLL "coerente na presença de multicaminho".

### 2.2.3) OPERAÇÃO DE PLL ("PHASE LOCK LOOP") DA PORTADORA NA PRESENÇA DE MULTICAMINHO

Antes de entrar no PLL o sinal que chega é "mixado" com o código modulado naquele momento dentro do oscilador local de frequência. Lembrando que o sinal que chega na presença de um único sinal com multicaminho é dado pela equação (4), o sinal gerado no momento pelo receptor é dado por:

$$S_{Om}(t) = -p(t + \tau) \text{sen}(\omega_I t + \theta_c + \theta) \quad (20)$$

Após "mixar" os dois sinais e passar por um BPF, consegue-se:

$$\begin{aligned} \overline{S_{1m}(t) S_{Om}(t)} &= 1/2AR(\tau) \cos((\omega_0 - \omega_I)t - \theta_c - \theta) \\ &+ 1/2\alpha AR(\tau - \delta) \cos((\omega_0 - \omega_I)t + \theta_m - \theta_c - \theta) \end{aligned} \quad (21)$$

Assumindo-se uma perfeita fixação da portadora do sinal composto no PLL ( $\theta = 0$ ) e substituindo  $\omega_1 = \omega_0 - \omega_I$ , a equação (21) torna-se:

$$\begin{aligned} \overline{S_{1m}(t) S_{Om}(t)} &= 1/2AR(\tau) \cos(\omega_1 t - \theta_c) \\ &+ 1/2\alpha AR(\tau - \delta) \cos(\omega_1 t + \theta_m - \theta_c) \end{aligned} \quad (22)$$

Usando-se a identidade trigonométrica para o cosseno de uma soma:

$$\begin{aligned} \overline{S_{1m}(t) S_{Om}(t)} &= 1/2AR(\tau) [\cos(\omega_1 t) \cos(\theta_c) + \sin(\omega_1 t) \sin(\theta_c)] \\ &+ 1/2\alpha AR(\tau - \delta) [\cos(\omega_1 t) \cos(\theta_c - \theta_m)] \end{aligned} \quad (23)$$

Agrupando-se os termos seno e cosseno, tem-se:

$$\begin{aligned} \overline{S_{1m}(t) S_{Om}(t)} &= 1/2A[R(\tau) \cos(\theta_c) \\ &+ \alpha R(\tau - \delta) \cos(\theta_c - \theta_m)] \cos(\omega_1 t) + 1/2A[R(\tau) \sin(\theta_c) \\ &+ \alpha R(\tau - \delta) \sin(\theta_c - \theta_m)] \sin(\omega_1 t) \end{aligned} \quad (24)$$

O PLL fixa o sinal composto de forma que o coeficiente do termo  $\sin(\omega_1 t)$  é nulo:

$$R(\tau) \sin(\theta_c) + \alpha R(\tau - \delta) \sin(\theta_c - \theta_m) = 0 \quad (25)$$

### 2.2.3.1) REGIÃO I: VALOR ABSOLUTO DO ERRO DE “TRACKING” NO DLL MENOR QUE UM “CHIP”

Nesta região a função de correlação  $R(\tau)$  não é zero. Após substituições trigonométricas e rearranjos, a equação (25) pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \tan \theta_c &= \sin(\theta_c) / \cos(\theta_c) \\ &= \alpha R(\tau - \delta) \sin(\theta_m) / [R(\tau) + \alpha R(\tau - \delta) \cos(\theta_m)] \end{aligned} \quad (26)$$

Portanto, para operações na região I, a fase composta do sinal que entra no PLL é calculada pelo arco cuja tangente é fornecida pelo lado direito da equação (26). Nesta equação também pode ser observada a interdependência entre os “tracking loops” do código e da portadora, notando-se a presença da função de correlação de código.

Assumindo-se que a força do multicaminho é sempre menor ou igual a do sinal direto (Parkinson et al, 1996, Wellenhoff, 1994, Seeber, 1993), pode-se mostrar que o erro na fase

da portadora não deve nunca ser maior do que 90 graus, o que, na banda da portadora  $L_1$  do GPS (1.575,42 MHz), corresponde a aproximadamente 4,8 cm contra erros de código que podem ultrapassar os 100 m.

### **2.2.3.2) REGIÃO II: VALOR ABSOLUTO DO ERRO DE “TRACKING” NO DLL IGUAL OU MAIOR QUE UM “CHIP”**

Nesta região,  $R(\tau)$  é aproximadamente zero. Embora isto não seja estritamente verdade, é uma aproximação razoável em vista da proximidade a zero relativo ao valor do pico da função de correlação. Usando-se estes pressupostos, a equação (25) pode ser simplificada da seguinte maneira:

$$\alpha R(\tau - \delta) \sin(\theta_c - \theta_m) = 0 \quad (27)$$

...portanto:

$$\theta_c = \theta_m + 2\pi N \quad (28)$$

Para operações na região II, portanto, a fase composta do sinal que entra no PLL é simplesmente a fase do multicaminho relativo ao sinal direto. A fase do sinal direto é tomada como zero. Conceitualmente, operações na região II envolvem o rastreo pelo DLL (“tracking”) mais do efeito do multicaminho do que do sinal direto. Em ambas regiões, no entanto, o erro na medida da fase da portadora induzida pelo multicaminho é dado por  $\theta_c$ .

### **2.3) RECEPTOR DE RUÍDO PSEUDOALEATÓRIO NÃO-COERENTE**

Descrevem-se aqui as expressões para as curvas discriminadoras para um DLL não-coerente, tanto na ausência como na presença de multicaminho.

### 2.3.1) CURVA DISCRIMINADORA DO DLL NÃO-COERENTE NA AUSÊNCIA DE MULTICAMINHO

A seqüência do sinal para o DLL não-coerente é similar àquela para o DLL coerente, exceto com relação às saídas dos correlacionadores (“mixers” mais BPFs) que são elevadas ao quadrado antes de serem filtradas nos LPFs e diferenciadas. Os sinais que entram nos LPFs são dados pelo quadrado das expressões (7) e (8):

$$\overline{\{s_1(t)s_E(t)\}}^2 = 1/4 A^2 R^2 (\tau - \tau_d) \cos^2(\omega_1 t - \theta) \quad (29)$$

$$\overline{\{s_1(t)s_L(t)\}}^2 = 1/4 A^2 R^2 (\tau + \tau_d) \cos^2(\omega_1 t - \theta) \quad (30)$$

Nota-se que, devido aos sinais adiantado e atrasado terem sido gerados não-coerentemente,  $\theta$  é simplesmente o descompasso de fase da frequência do “tracking loop”. Após as equações (29) e (30) terem sido expandidas, os LPFs rejeitam os termos dupla frequência, produzindo:

$$\overline{\{s_1(t)s_E(t)\}}^2 = 1/8 A^2 R^2 (\tau - \tau_d) \quad (31)$$

$$\overline{\{s_1(t)s_L(t)\}}^2 = 1/8 A^2 R^2 (\tau + \tau_d) \quad (32)$$

Novamente a função discriminadora é formada pela diferenciação das saídas dos LPFs. A forma normalizada desta função é a seguinte:

$$D_n(\tau) = R^2 (\tau + \tau_d) - R^2 (\tau - \tau_d) \quad (33)$$

...onde o índice “n” é relativo ao DLL “não-coerente”.

### 2.3.2) CURVA DISCRIMINADORA DO DLL NÃO-COERENTE NA PRESENÇA DE MULTICAMINHO

Seguindo-se um procedimento similar àquele para as análises do DLL coerente, a forma normalizada da função discriminadora não-coerente, é dada por:

$$\begin{aligned}
D_{nm}(\tau) = & R^2(\tau + \tau_d) - R^2(\tau - \tau_d) \\
& + \alpha^2 [R^2(\tau + \tau_d - \delta) - R^2(\tau - \tau_d - \delta)] \\
& + 2\alpha \cos(\theta_m) [R(\tau + \tau_d)R(\tau + \tau_d - \delta) - R(\tau - \tau_d)R(\tau - \tau_d - \delta)]
\end{aligned} \tag{34}$$

...onde o índice "nm" é relativo ao DLL "não-coerente na presença de um único sinal com multicaminho".

### **2.3.3) OPERAÇÃO DE PLL ("PHASE LOCK LOOP") DA PORTADORA NA PRESENÇA DE MULTICAMINHO**

A forma é a mesma que a do receptor com arquitetura coerente e, portanto, não será repetida.

## ANEXO 2 - PROGRAMA EM MATLAB PARA AS DERIVAÇÕES DA MATRIZ PROJETO USADO PARA VERIFICAÇÃO DAS DERIVAÇÕES MANUAIS

```

clear
% DEFININDO AS VARIÁVEIS SIMBÓLICAS:
alfa0=sym('alfa0')
gama0=sym('gama0')
fimai0=sym('fimai0')
teta0=sym('teta0')
lambda=sym('lambda')
a0i=sym('a0i')
fimin0=sym('fimin0')

% DEFININDO AS EXPRESSÕES SIMBÓLICAS:

f=atan((alfa0*sin(gama0)-alfa0*sin(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*sin(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))/...
(1+alfa0*cos(gama0)-alfa0*cos(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*cos(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))))

fsimples=atan((alfa0*sin(gama0)-alfa0*sin(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))-alfa0^2*sin(2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0)))/...
(1+alfa0*cos(gama0)-alfa0*cos(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*cos(2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))))

f1=atan((alfa0*sin(gama0)-alfa0*sin(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*sin(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))/...
(1+alfa0*cos(gama0)-alfa0*cos(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*cos(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))))

f2=atan((alfa0*sin(gama0)-alfa0*sin(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*sin(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))/...

```

```
(1+alfa0*cos(gama0)-alfa0*cos(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*cos(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))
```

```
f3=atan((alfa0*sin(gama0)-alfa0*sin(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*sin(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))/...
```

```
(1+alfa0*cos(gama0)-alfa0*cos(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*cos(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))
```

```
f4=atan((alfa0*sin(gama0)-alfa0*sin(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*sin(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))/...
```

```
(1+alfa0*cos(gama0)-alfa0*cos(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*cos(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))
```

```
derflalfa=((sin(gama)-sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))-2*alfa*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*...
```

```
a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))-(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-...
```

```
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*...
```

```
cos(fimai-fimin)*cos(teta))^2*(cos(gama)-
cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+2*alfa*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/...
```

```
(1+(alfa*sin(gama)-alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))-alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-...
```

```
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)
```

```

derflgama=((alfa*cos(gama)-alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))+...
    alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*...
    cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-alfa*sin(gama)+alfa*...
    sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*...
    cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)

derflfimai=((2*alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-
fimin)*cos(teta)+2*alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*...
    a01*sin(fimai-fimin)*cos(teta))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-...
    alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*...
    cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-2*alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-fimin)*cos(teta)+2*alfa^2*...
    sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/...
    lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-

```

```
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))^2)
```

```
derfl1teta=((2*alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*sin(teta)+2*alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*...
cos(fimai-fimin)*sin(teta))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-...
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*...
cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-2*alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*sin(teta)+2*alfa^2*...
sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*sin(teta)))/(1+(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/...
lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)
```

```
derf2alfa=((sin(gama)-sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))-2*alfa*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*...
a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))-(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-...
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*...
cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2*(cos(gama)-
cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
```

```
fimin)*cos(teta))+2*alfa*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/...
```

```
(1+(alfa*sin(gama)-alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))-alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-...
```

```
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)
```

```
derf2gama=((alfa*cos(gama)-alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))+...
```

```
alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin))*...
```

```
cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-alfa*sin(gama)+alfa*...
```

```
sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin))*...
```

```
cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)
```

```
derf2fimai=((2*alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-
fimin)*cos(teta)+2*alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*...
```

```
a01*sin(fimai-fimin)*cos(teta))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-...
```

```
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin))*...
```

```

cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-2*alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-fimin)*cos(teta)+2*alfa^2*...
sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/...
lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))^2)

derf2teta=((2*alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*sin(teta)+2*alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*...
cos(fimai-fimin)*sin(teta))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-...
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin))*...
cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-2*alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*sin(teta)+2*alfa^2*...
sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*sin(teta)))/(1+(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/...
lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)

derf3alfa=((sin(gama)-sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))-2*alfa*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*...

```

```

a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))-(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-...
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*...
cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2*(cos(gama)-
cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+2*alfa*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/...
(1+(alfa*sin(gama)-alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))-alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-...
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)

derf3gama=((alfa*cos(gama)-alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))+...
alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*...
cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-alfa*sin(gama)+alfa*...
sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*...
cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)

derf3fimai=((2*alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-
fimin)*cos(teta)+2*alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*...

```

```

a01*sin(fimai-fimin)*cos(teta))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
(alfa*sin(gama)-...
    alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin))*...
    cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-2*alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-fimin)*cos(teta)+2*alfa^2*...
    sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/...
    lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))^2)

derf3teta=((2*alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*sin(teta)+2*alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*...
    cos(fimai-fimin)*sin(teta))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-...
    alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin))*...
    cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-2*alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*sin(teta)+2*alfa^2*...
    sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*sin(teta)))/(1+(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/...

```

```

lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)

derf4alfa=((sin(gama)-sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))-2*alfa*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*...
a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))-(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-...
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*...
cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2*(cos(gama)-
cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+2*alfa*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/...
(1+(alfa*sin(gama)-alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))-alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-...
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)

derf4gama=((alfa*cos(gama)-alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))+...
alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*...
cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-alfa*sin(gama)+alfa*...
sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*...

```

```

cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)

derf4fimai=((2*alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-
fimin)*cos(teta)+2*alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*...
a01*sin(fimai-fimin)*cos(teta))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-...
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin))*...
cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-2*alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-fimin)*cos(teta)+2*alfa^2*...
sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*sin(fimai-
fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/...
lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))^2)

derf4teta=((2*alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*sin(teta)+2*alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*...
cos(fimai-fimin)*sin(teta))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
(alfa*sin(gama)-...
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta))-
alfa^2*sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin))*...

```

```

cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2*(-2*alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*sin(teta)+2*alfa^2*...
sin(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*sin(teta)))/(1+(alfa*sin(gama)-
alfa*sin(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))-
alfa^2*sin(2*pi/...
lambda0*a01*cos(fimai-fimin)*cos(teta)))^2/(1+alfa*cos(gama)-
alfa*cos(gama+2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta))+alfa^2*cos(2*pi/lambda0*a01*cos(fimai-
fimin)*cos(teta)))^2)

```

% TESTE DA DERIVAÇÃO USANDO alfa0

```

argf=(alfa0*sin(gama0)-alfa0*sin(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*sin(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))/...
(1+alfa0*cos(gama0)-alfa0*cos(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))+alfa0^2*cos(gama0-(gama0+2*pi/lambda*a0i*cos(fimai0-
fimin0)*cos(teta0))))
derfalfa0=diff(f,alfa0)
derfalfa0_teste=diff(argf,alfa0)/(1+argf^2)

```

```

MatProj=[derfl1alfa derfl1gama derfl1fimai derfl1teta
derf2alfa derf2gama derf2fimai derf2teta
derf3alfa derf3gama derf3fimai derf3teta
derf4alfa derf4gama derf4fimai derf4teta]

```

# ANEXO 3 - MODELO DE UM ARQUIVO RINEX DO RECEPTOR NOVATEL BEELINE USADO NO PRESENTE TRABALHO

```

2          OBSERVATION DATA    G (GPS)          RINEX VERSION / TYPE
Convert    15-Sep-00 17:09      PGM / RUN BY / DATE
                                                MARKER NAME
                                                OBSERVER / AGENCY
                                                REC # / TYPE / VERS
                                                ANT # / TYPE
                                                APPROX POSITION XYZ
                                                ANTENNA: DELTA H/E/N
0.0000      0.0000      0.0000
0.0000      0.0000      0.0000
1  0  7  G 2  G 4  G 7  G 8  G 9  G11  G16 WAVELENGTH FACT L1/2
1  0  2  G27  G31 WAVELENGTH FACT L1/2
1  0 WAVELENGTH FACT L1/2
1  0 WAVELENGTH FACT L1/2
3  C1  L1  D1 # / TYPES OF OBSERV
1 INTERVAL
2000 05 31 13 05 44.000000 GPS TIME OF FIRST OBS
2000 05 31 14 23 0.000000 GPS TIME OF LAST OBS
LEAP SECONDS
END OF HEADER
00 05 31 13 05 44.000000 0 16G 2G 2G31G31G11G11G 7G 7G 9G 9G27G27
G 8G 8G16G16
20756445.725 9 109075872.250 9 -893.230 9
20756444.048 9 109075873.191 9 -894.282 9
25228175.196 6 132574900.333 6 3242.239 6
25228178.334 6 132574943.884 6 3241.093 6
21415056.416 9 112536902.703 9 2134.082 9
21415055.840 9 112536898.935 9 2133.093 9
22111691.711 7 116197732.181 7 -2168.636 7
22111691.336 8 116197748.806 8 -2169.657 8
24972178.617 5 131229690.913 5 -2263.668 5
24972178.804 5 131229688.445 5 -2265.032 5
24498780.076 2 128741970.061 2 3635.832 2
24498788.604 4 128741985.205 4 3634.968 4
23652753.125 6 124296000.951 6 3592.614 6
23652751.276 7 124296007.016 7 3591.343 7
24572211.715 7 129127820.736 7 -3666.418 7
24572209.382 6 129127859.215 6 -3667.782 6
00 05 31 13 05 45.000000 0 16G 2G 2G31G31G11G11G 7G 7G 9G 9G27G27
G 8G 8G16G16
20756275.827 9 109074979.797 9 -892.793 9
20756274.190 9 109074980.731 9 -893.907 9
25228792.310 6 132578143.047 6 3242.114 6
25228795.348 6 132578186.597 6 3241.093 6
21415462.659 9 112539037.414 9 2134.395 9
21415462.050 9 112539033.631 9 2133.093 9
22111279.118 7 116195564.168 7 -2168.449 7
22111278.700 8 116195580.786 8 -2169.532 8
24971748.185 5 131227427.756 5 -2263.636 5
24971748.273 5 131227425.283 5 -2264.657 5
24499471.782 2 128745606.304 2 3635.707 2
24499480.238 4 128745621.425 4 3634.593 4
23653436.711 6 124299594.013 6 3592.520 6
23653435.123 7 124299600.063 7 3591.468 7
24571514.228 7 129124154.662 7 -3666.543 7
24571511.870 6 129124193.134 6 -3667.907 6
00 05 31 13 05 46.000000 0 16G 2G 2G31G31G11G11G 7G 7G 9G 9G27G27
G 8G 8G16G16

```

|                           |   |                       |                  |           |   |
|---------------------------|---|-----------------------|------------------|-----------|---|
| 20756106.012              | 9 | 109074087.842         | 9                | -892.293  | 9 |
| 20756104.474              | 9 | 109074088.774         | 9                | -893.282  | 9 |
| 25229409.587              | 6 | 132581385.766         | 6                | 3242.364  | 6 |
| 25229412.402              | 6 | 132581429.318         | 6                | 3241.218  | 6 |
| 21415868.944              | 9 | 112541172.514         | 9                | 2134.864  | 9 |
| 21415868.312              | 9 | 112541168.739         | 9                | 2133.843  | 9 |
| 22110866.658              | 7 | 116193396.317         | 7                | -2168.418 | 7 |
| 22110866.151              | 8 | 116193412.944         | 8                | -2169.282 | 8 |
| 24971317.464              | 5 | 131225165.039         | 5                | -2263.074 | 5 |
| 24971317.797              | 5 | 131225162.577         | 5                | -2264.032 | 5 |
| 24500163.714              | 2 | 128749242.497         | 2                | 3636.051  | 2 |
| 24500172.219              | 4 | 128749257.664         | 4                | 3634.843  | 4 |
| 23654120.375              | 6 | 124303187.175         | 6                | 3592.614  | 6 |
| 23654118.996              | 7 | 124303193.247         | 7                | 3591.718  | 7 |
| 24570816.447              | 7 | 129120488.579         | 7                | -3666.449 | 7 |
| 24570814.165              | 6 | 129120527.060         | 6                | -3667.907 | 6 |
| 00 05 31 13 05 47.0000000 | 0 | 16G 2G 2G31G31G11G11G | 7G 7G 9G 9G27G27 |           |   |
|                           |   | G 8G 8G16G16          |                  |           |   |
| 20755936.358              | 9 | 109073196.457         | 9                | -891.511  | 9 |
| 20755934.910              | 9 | 109073197.399         | 9                | -892.657  | 9 |
| 25230026.850              | 6 | 132584628.541         | 6                | 3242.520  | 6 |
| 25230029.307              | 6 | 132584672.072         | 6                | 3241.093  | 6 |
| 21416275.277              | 9 | 112543308.090         | 9                | 2135.364  | 9 |
| 21416274.741              | 9 | 112543304.304         | 9                | 2134.093  | 9 |
| 22110454.102              | 7 | 116191228.732         | 7                | -2167.824 | 7 |
| 22110453.592              | 8 | 116191245.359         | 8                | -2169.032 | 8 |
| 24970887.060              | 5 | 131222902.853         | 5                | -2262.293 | 5 |
| 24970887.297              | 5 | 131222900.407         | 5                | -2263.407 | 5 |
| 24500855.087              | 2 | 128752878.746         | 2                | 3635.801  | 2 |
| 24500864.208              | 5 | 128752893.901         | 5                | 3634.593  | 5 |
| 23654804.120              | 6 | 124306780.560         | 6                | 3593.020  | 6 |
| 23654802.772              | 7 | 124306786.600         | 7                | 3591.843  | 7 |
| 24570118.752              | 7 | 129116822.551         | 7                | -3666.605 | 7 |
| 24570116.553              | 5 | 129116861.037         | 5                | -3667.532 | 5 |
| 00 05 31 13 05 48.0000000 | 0 | 16G 2G 2G31G31G11G11G | 7G 7G 9G 9G27G27 |           |   |
|                           |   | G 8G 8G16G16          |                  |           |   |
| 20755766.777              | 9 | 109072305.593         | 9                | -891.105  | 9 |
| 20755765.416              | 9 | 109072306.541         | 9                | -892.157  | 9 |
| 25230644.039              | 6 | 132587871.324         | 6                | 3242.489  | 6 |
| 25230646.359              | 6 | 132587914.856         | 6                | 3240.968  | 6 |
| 21416681.733              | 9 | 112545444.097         | 9                | 2135.864  | 9 |
| 21416681.275              | 9 | 112545440.318         | 9                | 2134.593  | 9 |
| 22110041.796              | 7 | 116189061.326         | 7                | -2167.730 | 7 |
| 22110041.106              | 8 | 116189077.947         | 8                | -2168.782 | 8 |
| 24970456.650              | 5 | 131220641.200         | 5                | -2261.636 | 5 |
| 24970457.009              | 5 | 131220638.727         | 5                | -2263.032 | 5 |
| 24501546.532              | 2 | 128756514.986         | 2                | 3635.645  | 2 |
| 24501556.247              | 4 | 128756530.176         | 4                | 3634.843  | 4 |
| 23655487.851              | 6 | 124310374.075         | 6                | 3593.239  | 6 |
| 23655486.543              | 7 | 124310380.122         | 7                | 3592.218  | 7 |
| 24569421.094              | 7 | 129113156.548         | 7                | -3666.418 | 7 |
| 24569418.771              | 5 | 129113195.028         | 5                | -3667.532 | 5 |
| 00 05 31 13 05 49.0000000 | 0 | 16G 2G 2G31G31G11G11G | 7G 7G 9G 9G27G27 |           |   |
|                           |   | G 8G 8G16G16          |                  |           |   |
| 20755597.326              | 9 | 109071415.212         | 9                | -890.636  | 9 |
| 20755596.071              | 9 | 109071416.154         | 9                | -891.657  | 9 |
| 25231261.120              | 6 | 132591114.053         | 6                | 3241.989  | 6 |
| 25231263.331              | 6 | 132591157.621         | 6                | 3241.343  | 6 |
| 21417088.211              | 9 | 112547580.463         | 9                | 2136.020  | 9 |
| 21417087.794              | 9 | 112547576.686         | 9                | 2134.968  | 9 |

```

22109629.320 7 116186894.060 7 -2167.605 7
22109628.517 8 116186910.679 8 -2168.782 8
24970026.570 5 131218379.928 5 -2261.480 5
24970026.831 5 131218377.465 5 -2262.657 5
24502238.170 2 128760151.231 2 3636.114 2
24502248.206 4 128760166.371 4 3634.468 4
23656171.397 5 124313967.708 5 3593.051 5
23656170.488 7 124313973.756 7 3592.093 7
24568723.402 7 129109490.497 7 -3666.386 7
24568721.033 5 129109528.967 5 -3667.532 5
00 05 31 13 05 50.0000000 0 16G 2G 2G31G31G11G11G 7G 7G 9G 9G27G27
G 8G 8G16G16
20755428.011 9 109070525.339 9 -890.136 9
20755426.779 9 109070526.273 9 -891.282 9
25231878.302 6 132594356.804 6 3242.114 6
25231880.301 6 132594400.355 6 3241.093 6
21417494.765 9 112549717.256 9 2136.582 9
21417494.429 9 112549713.478 9 2135.468 9
22109216.866 7 116184726.964 7 -2167.511 7
22109216.043 8 116184743.600 8 -2168.532 8
24969596.380 5 131216119.167 5 -2261.043 5
24969596.561 5 131216116.707 5 -2262.157 5
24502929.854 2 128763787.380 2 3635.770 2
24502940.206 4 128763802.562 4 3634.093 4
23656855.068 5 124317561.444 5 3593.520 5
23656854.333 7 124317567.482 7 3592.093 7
24568025.798 7 129105824.452 7 -3666.480 7
24568023.080 5 129105862.910 5 -3667.657 5
00 05 31 13 05 51.0000000 0 16G 2G 2G31G31G11G11G 7G 7G 9G 9G27G27
G 8G 8G16G16
20755258.787 9 109069635.942 9 -889.717 9
20755257.515 9 109069636.885 9 -890.706 9
25232495.527 6 132597599.530 6 3242.095 6
25232497.256 6 132597643.087 6 3241.168 6
21417901.402 9 112551854.416 9 2136.845 9
21417901.099 9 112551850.633 9 2135.668 9
22108804.482 7 116182560.027 7 -2167.499 7
22108803.773 8 116182576.643 8 -2168.582 8
24969166.320 5 131213858.818 5 -2260.842 5
24969166.391 5 131213856.361 5 -2262.082 5
24503621.974 2 128767423.536 2 3635.501 2
24503632.028 4 128767438.730 4 3634.418 4
23657538.827 5 124321155.281 5 3593.501 5
23657538.202 7 124321161.325 7 3592.043 7
24567328.167 7 129102158.368 7 -3666.811 7
24567325.298 5 129102196.856 5 -3667.582 5

```