

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

EMANOEL GOMES DE SOUSA SILVA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO POSICIONAMENTO
POR SATÉLITES COM INTEGRAÇÃO GPS/GLONASS**



Recife, 2015

Emanoel Gomes de Sousa Silva

**Avaliação da qualidade do posicionamento por satélites
com integração GPS/GLONASS**

Dissertação de Mestrado

Dissertação de Mestrado apresentado, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração: Geodésia, defendida no dia 06/03/2015.

Orientador: Prof. Dr. Haroldo Antonio Marques

Recife, 2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586a Silva, Emanuel Gomes de Sousa.
Avaliação da qualidade do posicionamento por satélites com integração GPS/GLONASS / Emanuel Gomes de Sousa Silva. - Recife: O Autor, 2015.
119 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Haroldo Antonio Marques.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2015.
Inclui Referências.

1. Engenharia Cartográfica. 2. GNSS. 3. Integração GPS e GLONASS. 4. PPP. I. Marques, Haroldo Antonio. (Orientador). II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.) BCTG/2015-239

**“AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO POSICIONAMENTO POR SATÉLITE
ENVOLVENDO A INTEGRAÇÃO GPS/GLONASS”**

POR

EMANOEL GOMES SOUSA SILVA

Dissertação defendida e aprovada em 06/03/2015.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. HAROLDO ANTONIO MARQUES

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. SÍLVIO JACKS DOS ANJOS GARNÉS

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO

Departamento de Gerência de Geodésia e Cartografia da UNESP

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Manoel Gomes (Nanço) e Ana Maria, pelo amor, dedicação e apoio em todos os momentos.

À minha querida esposa, Edilene, pelo amor, carinho e companheirismo que dia a dia demonstra e me faz sentir.

Às minhas irmãs, Ticiane e Thais, pela torcida e grande carinho, ao meu primeiro sobrinho, João Vítor e ao meu cunhado Nilson.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois tudo o que sou, tudo o que tenho e o que vier a ser, vem de Ti, Senhor.

Agradeço ao meu orientador nesta pesquisa, o Prof. Dr. Haroldo Antonio Marques, por acreditar no meu trabalho. Obrigado por tudo que me ensinou nesses dois anos, tanto nos assuntos da dissertação, quanto pelo exemplo de profissional digno, dedicado, paciente e amigo. Desejo seguir seus conselhos e repassá-los a quem precisar.

Ao Prof. Dr. Silvio Jacks, por sua amizade e por estar presente em todas as minhas bancas durante o Mestrado com suas importantes contribuições. Ao Prof. Dr. Galera Monico pelas valiosas contribuições no andamento e defesa final. Aos Professores Rodrigo Mikosz e Andrea de Seixas pelas participações em algumas das bancas durante o Mestrado com contribuições muito importantes.

Agradeço aos meus amigos e companheiros de mestrado, especialmente Gilmara Carvalho, Anderson Reis, Elaine Cristina, Ester Ribeiro, André Rocha, Jaidson Becker e Bruno Santos. Obrigado por me ajudarem nos momentos difíceis, por me incentivarem. Obrigado pelos momentos de descontração, que foram fundamentais para afastar a tensão no desenvolvimento da pesquisa, vocês foram muito importantes. Agradeço também os meus amigos Hélder Gramacho, Ana Itamara, Alexandre Souza e todos os demais com os quais tive a felicidade de conviver ao longo desses anos.

Agradeço à Prof^a. Dr^a. Simone Sato da Graduação em Engenharia Cartográfica (UFPE) e ao Tenente Arlindo Cruz da Seção de Fotogrametria e Imagem da 3^a Divisão de Levantamento (Exército Brasileiro), pela oportunidade de trabalhar em um projeto geotécnico para a cidade de Ipojuca e ainda agradeço aos demais professores da Pós-Graduação, pelo ensino recebido nas disciplinas do curso, as quais foram base para a escrita desta dissertação.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida, ao Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação pela infraestrutura e financiamento participações em eventos.

Agradeço aos funcionários que trabalham tanto na Pós-Graduação como na Graduação, especialmente à Elizabeth Galdino e Dona Judite, pela amizade, atenção e simpatia durante esses anos. Não esquecerei jamais.

Agradeço aos meus professores da graduação Alessandro Rhadamek (UFPI) e Adolfo Lino (IFSC), que me apresentaram a possibilidade de fazer o Mestrado e me ajudaram desde o início do sonho.

Agradeço ao Pr. Geraldo Junior e família e demais irmãos em Cristo da Primeira Igreja Batista em Iputinga, os quais me receberam em Recife como irmão em Cristo, pela comunhão e solicitude. E agradeço aos irmãos em Cristo da Igreja Batista da Ressurreição, minha igreja em Teresina, pelo carinho e principalmente orações durante esses dois anos.

EPÍGRAFE

“Oh profundidade das riquezas, tanto da sabedoria, como da ciência de Deus! Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis os seus caminhos!”

“Quem compreendeu a mente do Senhor? Ou quem foi seu conselheiro?”

“... Porque dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas, glórias sejam dadas pois a Ele eternamente, amém”

RESUMO

O posicionamento geodésico atualmente é realizado em sua maioria a partir do GNSS. Dentre os sistemas disponíveis, o GPS ainda é o mais utilizado na atualidade, porém, o GLONASS está totalmente operacional, o que torna possível a aplicação de sistema multi-constelação no posicionamento geodésico. Os dois sistemas encontram-se em fase de modernização, o que permite estudos e pesquisas relacionadas à integração dos sinais GPS e GLONASS (GPS/GLONASS), seja para fins de posicionamento geodésico ou em outras atividades da comunidade usuária, dentro das engenharias e pesquisas científicas. Dentre os métodos de posicionamento, destaca-se o método PPP, o qual tem sido alvo de muitas investigações e melhoramentos nos últimos anos em função das melhorias nos produtos disponíveis pelos centros do IGS. O PPP em sua forma convencional requer o uso de medidas em duas frequências, órbitas e correções precisas dos erros dos relógios dos satélites, além da modelagem matemática para corrigir os diversos efeitos envolvidos com a propagação dos sinais GNSS e efeitos geodinâmicos afetando as estações terrestres. Uma vez que os diversos efeitos tenham sido corrigidos, espera-se precisão da ordem de poucos centímetros na estimativa de coordenadas no método PPP após algumas horas de coleta de dados. A integração GPS/GLONASS no PPP requer compatibilização entre sistemas de referência e sistemas de tempo. Espera-se que a utilização de dados GPS/GLONASS, forneça melhor geometria para estimativa dos parâmetros, além de proporcionar maior redundância para o ajustamento, o que gera maior confiabilidade (capacidade de detectar erros) nos resultados. Dentro deste contexto, esta pesquisa tem como objetivos investigar a modelagem matemática para a integração de dados GPS/GLONASS no método PPP, além de avaliar a acurácia do posicionamento para dados coletados no Brasil. Análises qualitativas foram realizadas para verificar o impacto da utilização das medidas GLONASS juntamente com medidas GPS no PPP considerando o caso de posicionamento estático e cinemático. A análise das precisões dos parâmetros foi realizada a priori com base na construção da matriz Jacobiana (matriz A), a qual não requer o uso de observações GNSS. A partir desta matriz se obtém a matriz N e sua inversa proporciona a Matriz de Covariância dos parâmetros. Esta tarefa é muito útil, por exemplo, no planejamento de redes

geodésicas e, no caso da integração GPS/GLONASS no método PPP observou-se melhorias nas estimativas das precisões das coordenadas em torno de 30%. A precisão da componente úmida da troposfera, no caso da análise a priori, foi de até 20% com observações em dias distintos de um ano. Para a análise de acurácia no caso de posicionamento cinemático, as coordenadas estimadas no método relativo foram adotadas como referência em relação ao PPP cinemático. No caso de análise de acurácia do PPP estático as coordenadas divulgadas das estações da RBMC e da rede SIRGAS-CON foram adotadas como referência. Foram processados no modo PPP estático dados de cinco estações distribuídas em diferentes latitudes no Brasil ao longo do ano de 2013 com a geração de séries temporais anuais de coordenadas. A melhoria em acurácia posicional ao utilizar integração GPS/GLONASS atingiu máximo de aproximadamente 25%. Além disto, observaram-se melhorias no tempo de convergência do PPP.

Palavras chaves: GNSS. Integração GPS e GLONASS. PPP.

ABSTRACT

The geodetic positioning is currently accomplished in most of part by using GNSS. Among available systems, GPS is still the most widely used nowadays; however GLONASS is totally operational, what turns possible the application of multi-constellation system in the geodetic positioning. Both GPS and GLONASS (GPS/GLONASS) are under modernization process allowing studies about integration of signals either for geodetic positioning purposes or other activities in the engineering field and scientific researches. Among the geodetic positioning methods the PPP method (Precise Point Positioning) has been widely investigated in the last years and experienced many improvements, as for instance due to improvements in available products through IGS centers. The PPP in its conventional form requires the use of measures on two frequencies, precise orbits and correction of satellite clock error as well as adequate mathematical modeling to correct for several effects involved in the spread of GNSS signals and geodynamic effects affecting ground stations. Once the various effects have been corrected, it is expected coordinates accuracy of a few centimeters in the PPP method after a few hours of data collection. The Combined GPS/GLONASS in PPP requires compatibility between reference systems and time systems. It is expected that the use of GPS/GLONASS data, provide better geometry to estimate parameters and also provide increased redundancy for the adjustment, which generates higher reliability (ability to detect errors) in the results. Within this context, the aim of this research is to investigate the mathematical model for the Combined GPS/GLONASS data in the PPP method and evaluate the accuracy of positioning for data collected in Brazil. Qualitative analyzes were performed to verify the impact of using GLONASS together with GPS measurements in PPP considering static and kinematic positioning. Precision analysis of parameters was a priori performed based on the inverse of the matrix N . This task is very useful a for instance in geodetic network planning and for GPS/GLONASS integrations in PPP it was observed improvements of the order of 30% in the estimated precision. The parameter related with tropospheric wet delay was also a priori analyzed and improvements of up to 20% were observed at different days of a year. In the case of kinematic positioning, the coordinates estimated in the relative method were adopted as reference to compute

accuracy of kinematic PPP. Concerning the static positioning it was used as ground truth official coordinates of RBMC stations and SIRGAS-CON network. For the static PPP, it was processed data from five stations distributed in different latitudes along of Brazil in the year 2013 with generations of time series of coordinates. The Improvement in positional accuracy when applying GPS/GLONASS reached maximum value of 25%. Besides that, it was observed improvements in the PPP convergence time.

.Keywords: GNSS. GPS and GLONASS integration. PPP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – PROBLEMA DOS TRÊS CORPOS NO CASO DA ATRAÇÃO GRAVITACIONAL DO SOL E LUA SOBRE UM SATÉLITE.....	55
FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO DO CONCEITO DE INTEGRAÇÃO NAS EFEMÉRIDES GLONASS.	62
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA TRANSFORMAÇÃO DAS COORDENADAS PARA O SGL.....	69
FIGURA 4 – DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES RBMC ESCOLHIDAS.....	74
FIGURA 5 – ANTENA GNSS HIPER LITE+ (BASE) FIXA NO PONTO LAASTRO (LABORATÓRIO DE ASTRONOMIA).....	76
FIGURA 6 – ANTENA GNSS HIPER LITE+ (ROVER) FIXA NO AUTOMÓVEL	76
FIGURA 7 – TRAJETÓRIA DO LEVANTAMENTO RELATIVO CINEMÁTICO.....	76
FIGURA 8 – NÚMERO DE SATÉLITES E GDOPS NO PPP CINEMÁTICO (RECF – 14/10/2013).....	79
FIGURA 9 – HPL CALCULADO UTILIZANDO DADOS APENAS GPS E GPS+GLONASS	80
FIGURA 10 – VPL CALCULADO UTILIZANDO DADOS APENAS GPS E GPS+GLONASS.....	81
FIGURA 11 – DIFERENÇAS NO ZTD ESTIMADO UTILIZANDO GPS E GPS/GLONASS	82
FIGURA 12 – PRECISÕES DO ZTD ESTIMADO UTILIZANDO GPS E GPS/GLONASS.	83
FIGURA 13 – SÉRIE TEMPORAL DOS ERROS NO SGL - BOAV	85
FIGURA 14 – ERRO 2D E ERRO 3D DO PPP (BOAV).....	85
FIGURA 15 – SÉRIE TEMPORAL DOS ERROS NO SGL – GOJA.....	87
FIGURA 16 – ERRO 2D E ERRO 3D DO PPP (GOJA)	87
FIGURA 17 – SÉRIE TEMPORAL DOS ERROS NO SGL - PPTE	89
FIGURA 18 – ERRO 2D E ERRO 3D DO PPP (PPTE)	89
FIGURA 19 – SÉRIE TEMPORAL DOS ERROS NO SGL - RECF	91
FIGURA 20 – ERRO 2D E ERRO 3D DO PPP (RECF)	91
FIGURA 21 – SÉRIE TEMPORAL DOS ERROS NO SGL - UFPR.....	93
FIGURA 22 – ERRO 2D E ERRO 3D DO PPP (UFPR).....	93
FIGURA 23 – DIFERENÇA ENTRE GPS E GPS+GLONASS NAS COORDENADAS DOS PONTOS DA TRAJETÓRIA.	96
FIGURA 24 – PRECISÕES DAS COMPONENTES DO SGL NO POSICIONAMENTO RELATIVO CINEMÁTICO.	98

FIGURA 25 – RESULTANTE CONSIDERANDO AS TRÊS PRECISÕES OBTIDAS PARA AS COMPONENTES NOS PONTO DA TRAJETÓRIA.	99
FIGURA 26 – PRECISÕES DAS COORDENADAS GEODÉSICAS CARTESIANAS EM CADA ÉPOCA PARA AS DUAS SOLUÇÕES.	102
FIGURA 27 – DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS ESTIMADAS NO PPP CINEMÁTICO COM DADOS GPS E GPS/GLONASS.	104
FIGURA 28 – ERROS NO SGL – PPP CINEMÁTICO (GPS E GPS/GLONASS).	105
FIGURA 29 – ERRO 2D (À ESQUERDA) E ERRO 3D (À DIREITA) DAS COORDENADAS ESTIMADAS COM DADOS APENAS GPS E GPS+GLONASS.	105

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – FREQUÊNCIA DOS SINAIS GPS.	30
TABELA 2 – FREQUÊNCIAS DAS BANDAS DO GLONASS.....	32
TABELA 3 – ERROS ENVOLVIDOS NO GNSS.	36
TABELA 4 – ACURÁCIA E DISPONIBILIDADE ATUAL DOS PRODUTOS IGS PARA OS DADOS GPS E GLONASS.....	37
TABELA 5 – PARÂMETROS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA WGS84 E PZ-90.11.....	48
TABELA 6 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA WGS84 PARA O PZ-90.02.....	49
TABELA 7 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA WGS84 (G1150) PARA O PZ-90.11.....	50
TABELA 8 – ELEMENTOS DAS EFEMÉRIDES TRANSMITIDAS GLONASS PARA UM SATÉLITE.....	51
TABELA 9 – ACURÁCIA DAS EFEMÉRIDES TRANSMITIDAS GLONASS.....	52
TABELA 10 – FORÇAS PERTURBADORAS AGINDO NOS SATÉLITES GLONASS.	57
TABELA 11 – PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES USADAS NO PROCESSAMENTO DO PPP....	72
TABELA 12 – PRECISÕES DOS PARÂMETROS ESTIMADOS	78
TABELA 13 – DOPS CALCULADOS COM BASE NAS PRECISÕES OBTIDAS.....	79
TABELA 14 – PRECISÕES MÉDIAS DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO	83
TABELA 15 – ESTATÍSTICAS PARA A ESTAÇÃO BOAV.....	86
TABELA 16 – EMQ 2D E EMQ 3D CALCULADO PARA A ESTAÇÃO BOAV	86
TABELA 17 – ESTATÍSTICAS PARA A ESTAÇÃO GOJA	88
TABELA 18 – EMQ 2D E EMQ 3D CALCULADO PARA A ESTAÇÃO GOJA.....	88
TABELA 19 – ESTATÍSTICAS PARA A ESTAÇÃO PPTE	90
TABELA 20 – EMQ 2D E EMQ 3D CALCULADO PARA A ESTAÇÃO PPTE.....	90
TABELA 21 – ESTATÍSTICAS PARA A ESTAÇÃO RECF	92
TABELA 22 – EMQ 2D E EMQ 3D CALCULADO PARA A ESTAÇÃO RECF	92
TABELA 23 – ESTATÍSTICAS PARA A ESTAÇÃO UFPR	94
TABELA 24 – EMQ 2D E EMQ 3D CALCULADO PARA A ESTAÇÃO UFPR.....	94
TABELA 25 – RESUMO DOS VALORES DE EMQ 2D E EMQ 3D PARA CADA ESTAÇÃO ANALISADA.	95

TABELA 26 – PRECISÕES MÉDIAS DAS COMPONENTES ESTIMADAS.	100
TABELA 27 – PRECISÕES MÉDIAS CALCULADAS PARA CADA COORDENADA GEODÉSICA CARTESIANA.....	103
TABELA 28 – EMQ DAS COORDENADAS ESTIMADAS NO PPP.....	106
TABELA 29 – EMQ 2D E EMQ 3D CALCULADO	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARP	<i>Antenna Reference Point</i>
AL	<i>Alarm Limit</i>
BIH	<i>Bureau International de l'Heure</i>
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
BKG	<i>Bundesamt für Kartographie und Geodäsie</i>
BNC	<i>BKG NTRIP Client</i>
C/A	<i>Coarse/Acquisition</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CIP	<i>Celestial Intermediate Pole</i>
CIO	<i>Celestial Intermediate Origin</i>
CODE	<i>University Berne, Switzerland</i>
COMPASS/BeiDou	<i>CNSS - Compass Navigation Satellite System</i>
CTP	<i>Conventional Terrestrial Pole</i>
DECART	<i>Departamento de Engenharia Cartográfica</i>
DGPS/GNSS	<i>Differential GPS/GNSS</i>
DOPs	<i>Dilution of Precisions</i>
EMQ	<i>Erro Médio Quadrático</i>
ESA/ESOC	<i>European Space Operations Center</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FORTAN	<i>FORmula TRANslation System</i>
GBAS	<i>Ground-Based Augmentation Systems</i>
GCRS	<i>Geocentric Celestial Reference System</i>
GLONASS	<i>GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikkovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>

HPL	<i>Horizontal Position Level</i>
IAC	<i>Information - Analytical Center</i>
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IAU	<i>International Astronomical Union</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
ICD	<i>Interface Control Document</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IGEX-98	<i>International GLONASS Experiment 1998</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
LAASTRO	<i>Laboratório de Astronomia – UFPE</i>
LAGEO	<i>Laboratório de Geodésia – UFPE</i>
MMQ	<i>Método dos Mínimos Quadrados</i>
NRCAN	<i>Natural Resources Canada</i>
NTRIP	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
PCO	<i>Antenna Phase Center offsets</i>
PCV	<i>Phase Center Variation</i>
P	<i>Precise code</i>
PE	<i>Position Error</i>
PL	<i>Protection Level</i>
PPP	<i>Posicionamento por Ponto Preciso</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
PZ-90.11	<i>Parametry Zemli 1990 (Época 2010,0)</i>
RAIM	<i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i>
RBMC	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo</i>
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>

RIS DE	<i>Russian Institute of Space Device Engineering</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
RTPPP	<i>Real Time Precise Point Positioning</i>
SBAS	<i>Space-Based Augmentation Systems</i>
SOFA	<i>Standards of Fundamental Astronomy</i>
TAI	<i>Tempo Atômico Internacional</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TIO	<i>Terrestrial Intermediate Origin</i>
TTA	<i>Time To Alarm</i>
UNAVCO	<i>Non-profit University-governed COnsortium</i>
UNOOSA	<i>United Nations Office for Outer Space Affairs</i>
USNO	<i>Observatory Naval of the United States</i>
UT	<i>Universal Time</i>
UTC (SU)	<i>Universal Coordinated Time of Sovietic Union</i>
VPL	<i>Vertical Precision Level</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>
ZHD	<i>Zenith Hidrostatic Delay</i>
ZTD	<i>Zenithal Tropospheric Delay</i>
ZWD	<i>Zenithal Wet Delay</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1 Estado da Arte	23
1.2 Objetivos	27
1.2.1 Objetivo geral	27
1.2.2 Objetivos específicos	27
1.3 Justificativa da Pesquisa	28
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 Introdução ao GNSS	29
2.2 Equações de Pseudodistância e Fase da Onda Portadora	32
2.3 Introdução aos erros envolvidos no GNSS	35
2.4 Modelo Matemático funcional e estocástico do PPP com Integração GPS e GLONASS	41
2.5 Compatibilização entre sistema de tempo GPS e GLONASS	46
2.6 Transformação de coordenadas entre os sistemas de referência PZ-90.11 e WGS84	47
2.7 Cálculo das órbitas GLONASS	50
2.7.1 Principais forças perturbadoras da órbita	52
2.7.2 Integração numérica do modelo orbital de forças	59
2.7.3 Método Runge-Kutta	62
2.8 Diluição da Precisão DOPs	64
2.9 Integridade no PPP com GPS/GLONASS	67
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	72
4. RESULTADOS E ANÁLISES	77
4.1 Análise inicial da precisão e DOPs	77
4.2 Análise dos níveis de proteção na integridade com PPP	80
4.3 Análise da estimativa do ZTD	81

4.4	Análise de acurácia do PPP em séries temporais anuais.....	84
4.5	Análise do Posicionamento Relativo Cinemático com integração GPS/GLONASS	95
4.6	Análise de acurácia do PPP Cinemático.....	100
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
6.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
	REFERÊNCIAS.....	113

1. INTRODUÇÃO

O posicionamento geodésico atualmente é realizado em sua maioria a partir do GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Este sistema engloba o GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikkovaya Sistema*), COMPASS/BeiDou (*CNSS - Compass Navigation Satelllite System*), Galileo e outros, além dos sistemas de aumento (*augmentation system*) e várias outras definições tais como: acurácia e integridade (HOFMANN-WELLENHOF *et al.* 2007).

Dentre os sistemas disponíveis, o GPS ainda é o mais utilizado na atualidade, considerando que ele tem sido empregado como sistema de navegação em sua forma operacional completa por aproximadamente três décadas. O GLONASS se encontra atualmente em sua forma totalmente operacional com uma constelação de satélites praticamente completa, alternando entre 24 a 29 satélites (GLONASS, 2014). A maior diferença entre os satélites GLONASS e GPS é que cada satélite GLONASS transmite na sua própria frequência e, dessa forma, a identificação dos satélites se dá pela frequência do sinal a partir da técnica denominada FDMA (*Frequency Division Multiple Acces*) (LEICK, 2004; MONICO, 2008). Porém, na atual fase de modernização dos sinais, o GLONASS também transmitirá os dados da mesma forma que o GPS, ou seja, utilizando a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), o que começou com o lançamento do satélite GLONASS-K em fevereiro de 2011. O GPS se encontra em fase de modernização, onde já se tem diversos satélites transmitindo o novo código civil na portadora L2 (L2C) e na nova portadora L5.

Em termos de posicionamento geodésico a partir destes sistemas, têm-se os métodos de posicionamento absoluto e relativo, os quais podem ser realizados no modo pós-processado ou em tempo real. O posicionamento em tempo real pode ser realizado através do método RTK (*Real Time Kinematic*) ou RTK em rede, do DGPS/GNSS (*Differential GPS/GNSS*) ou através do RTPPP (*Real Time Precise Point Positioning*), o qual permite realizar o PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) em tempo real (LEICK, 2004; MONICO, 2008; MARQUES, 2012).

Enquanto o RTK e o DGPS requerem o uso de dois receptores GNSS e link de comunicação, o RTPPP requer o uso de somente um receptor ao nível de usuário GNSS, porém todos os erros envolvidos com as observações do GNSS devem ser adequadamente modelados. Além disto, o método RTPPP requer a disponibilidade em tempo real de órbitas precisas e das correções dos relógios dos satélites (não sincronização do relógio do satélite com o sistema de tempo GNSS) com boa qualidade para posicionamento com acurácia podendo chegar a poucos centímetros (MARQUES, 2012).

Para o caso de PPP pós-processado, pode-se utilizar os produtos finais disponíveis pelo IGS (*International GNSS Service*), onde atualmente se tem órbitas precisas com acurácia divulgada da ordem de 5 centímetros. Assim, a acurácia posicional no PPP pode atingir a ordem de poucos centímetros fazendo com que o método seja empregado em diversas atividades, seja de engenharia ou de pesquisas.

A integração de dados GPS e GLONASS no PPP pode fornecer melhor geometria para estimativa dos parâmetros, além de proporcionar maior redundância de observações para o ajustamento, o que gera maior confiabilidade (capacidade de detectar erros) dos resultados. Dentro deste contexto, esta pesquisa tem como objetivo investigar a modelagem matemática para a integração de dados GPS e GLONASS no PPP e analisar a acurácia do Posicionamento por Ponto Preciso com integração de dados GPS/GLONASS no Brasil.

Desta forma, foi realizada a revisão bibliográfica relacionada aos modelos matemáticos (funcional e estocástico) para o ajustamento dos dados no PPP com integração GPS/GLONASS, além da modelagem matemática necessária para o cálculo das órbitas transmitidas dos satélites GLONASS, as quais são disponibilizadas em termos de estado vetor e forças orbitais, requerendo um processo de integração numérica para instantes futuros. Adicionalmente o indicador de qualidade conhecido como integridade foi analisado no PPP com integração GPS/GLONASS.

Em termos de análise de acurácia foi utilizado o EMQ (Erro médio Quadrático). Neste caso, foram realizados processamentos de dados GNSS em trajetórias estáticas e cinemáticas com o auxílio do *software* GPSPPP disponibilizado pelo NRCAN (*Natural Resources Canada*). Para o caso estático, as coordenadas

estimadas no PPP, seja utilizando somente dados GPS ou GPS/GLONASS, foram comparadas com as coordenadas oficiais das estações RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) escolhidas, considerando as localizações em diferentes latitudes dentro do território brasileiro.

As análises mostram que a aplicação da integração GPS/GLONASS pode fornecer melhorias na precisão da estimativa da ordem de até 30%, haja vista que o número de medidas praticamente duplica em cada época.

Em termos de análise do EMQ no PPP estático, os melhoramentos ao aplicar GPS/GLONASS ao invés de somente GPS foram em geral da ordem de 25%. Em cada estação RBMC utilizada obteve-se em média 14% de melhorias ao aplicar a integração GPS/GLONASS. Para o caso cinemático, onde as coordenadas advindas do posicionamento relativo foram utilizadas como referência, as melhorias em termos de EMQ 3D foram próximas a 70% com dados GLONASS presentes no processamento.

1.1 Estado da Arte

A integração entre os sistemas que compõem o GNSS tem sido objeto de esforço internacional, culminando em muitos estudos e pesquisas, em especial, relacionadas à integração GPS/GLONASS. Neste caso tem sido aplicado o PPP, tanto no modo pós-processado, quanto em tempo real, os quais tem recebido especial atenção pela comunidade científica nos últimos anos podendo-se citar os trabalhos de Gao *et al.* (2006), Cai, (2009), Jokinen, (2011), Geng *et al.* (2011), Martin *et al.* (2012), Marques, (2012), Souza, (2013), entre outros.

Alguns fatores influenciam na qualidade do posicionamento, dentre eles a geometria da constelação no momento das observações aliada a quantidade de satélites acima da máscara de elevação adotada. A influencia da geometria pode ser observada pelos valores de DOPs (*Dilution of Precision* – Diluição da Precisão), os quais estão relacionados à precisão das coordenadas estimadas e são utilizados como indicadores de qualidade no posicionamento (HOFFMAN-WELLENHOF *et al.* 2007).

Em situações onde o posicionamento é realizado em locais propícios a efeitos de multicaminho e perdas de ciclos, como nos centros de grandes cidades, o uso de dados de satélites GPS e GLONASS pode fornecer melhor geometria para o posicionamento, além de redundância para o ajustamento dos dados. Sendo assim, espera-se que a integração GPS/GLONASS proporcione estimativa das coordenadas a partir do método PPP com melhor qualidade.

Desde o IGEX-98 (*International GLONASS Experiment 1998*) as órbitas precisas e as correções de relógios dos satélites GLONASS foram disponibilizadas e então abriram um bom campo para pesquisas e desenvolvimentos de estudos com integração de dados GPS/GLONASS, como por exemplo, Stewart e Tsakiri, (1998); Cheng, (1998); Boucher & Altamimi, (2001).

Stewart e Tsakiri (1998) no mesmo ano da realização do IGEX98 realizaram uma abordagem que tratou da questão da determinação dos vetores de posição e velocidade de satélites GLONASS a partir das efemérides transmitidas. Foi discutido o modelo de força orbital e apontados detalhes do processo de integração numérica, além de experimentos que tratam da influência da variação no “passo a passo” da integração. No referido trabalho os autores realizaram apontamentos com relação à diminuição da precisão das coordenadas obtidas ao ultrapassar o intervalo de integração recomendado, 15 minutos antes e depois do tempo de referência.

Zinoiev (2005) descreveu o estado da arte, envolvendo o lançamento dos satélites do bloco GLONASS-M, que abriu novos horizontes para a navegação utilizando dados GLONASS. As vantagens associadas com o lançamento dos satélites deste novo bloco são discutidas em termos de inovações no *hardware* do satélite e transmissão do novo código civil na portadora L2.

Ainda em Zinoiev (2005) destaca-se que o uso integrado dos sistemas GNSS proporciona vantagens em relação à solução inteira de ambiguidades de forma mais rápida, além do aumento da capacidade de detecção de erros. Neste trabalho também foi realizada a comparação de resultados da integração numérica para cálculo das efemérides GLONASS utilizando os métodos de Runge-Kutta (quarta ordem), Fehlberg (quinta ordem) e Shanks (sétima ordem). As análises mostram que os métodos de integração numérica citados são equivalentes para um passo de integração de até 5 segundos. No trabalho também foi abordada a transformação de coordenadas entre os sistemas WGS84 (*World Geodetic System 1984*) e PZ-90.11 (*Parametry Zemli 1990 – Época 2011.0*).

A integração GPS/GLONASS requer a interoperabilidade entre os sistemas, Assim, as diferenças nos projetos iniciais de ambos os sistemas devem ser resolvidas. Segundo Zinoiev (2005), quando se trata de transmissão de dados dos sistemas aparecem problemas de interoperabilidade relacionados com os modos DGPS/RTK quando estes utilizam o padrão RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*). Para o PPP em tempo real utiliza-se atualmente o protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) que transmite dados no formato RTCM. Atualmente existe a versão RTCM 3.1 que visa atender a demanda de transmissão de dados GNSS em tempo real.

CAI e GAO (2007) e CAI (2009) descreveram modelos matemáticos para aplicação do PPP usando a integração GPS/GLONASS. O método foi avaliado utilizando dados GNSS da rede IGS com aplicação de órbitas precisas e correções dos relógios dos satélites GLONASS. A precisão das coordenadas estimadas, o tempo de convergência e a geometria no PPP foram analisados ao aplicar dados somente GPS e GPS/GLONASS e os resultados indicaram melhoria no caso da integração.

O RIS DE (*Russian Institute of Space Device Engineering*) é um dos desenvolvedores da *interface* de controle dos satélites GLONASS e também é responsável pelo desenvolvimento, coordenação, revisão e manutenção, cujas informações são disponibilizadas no ICD GLONASS (*Interface Control Document GLONASS*). Este documento lançado em 2008 é de fundamental importância no estudo dos parâmetros que envolvem as definições para o GLONASS, incluindo estrutura dos sinais transmitidos e mensagens de navegação, além de recomendações para cálculos que envolvem a determinação de órbita GLONASS e sistema de referência adotado, no caso, o PZ-90.11.

No que se refere ao posicionamento PPP em tempo real, atualmente os usuários contam com a disponibilidade de órbitas e correções dos relógios em tempo real, através do BKG (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*) e do IGS. Pesquisas e desenvolvimentos têm sido dedicados ao PPP em tempo real, podendo-se citar, por exemplo, MARQUES (2012), o qual desenvolveu uma tese, relacionada ao tema estimativa de correções dos relógios dos satélites no contexto de redes GNSS e aplicação no PPP em tempo real, tem-se ainda Geng *et al.*(2011) e Laurichesse *et al.* (2009) onde são abordadas questões a respeito da resolução de

ambiguidades GPS de dupla frequência para o Posicionamento por Ponto Preciso em tempo real.

Nas pesquisas e desenvolvimentos relacionados à questão de avaliação do posicionamento, uma importante contribuição foi dada por Souza (2013) em sua dissertação, na qual analisa os métodos de posicionamento PPP cinemático, tais como o pós-processado pelo serviço de PPP *online* do NRCAN e IBGE-PPP, além do PPP em tempo real via *software* BNC 2.6 do BKG, RTK usando NTRIP da RBMC-IP e ainda o posicionamento relativo cinemático pós-processado.

Segundo Barbosa, (2010), a avaliação do posicionamento GNSS também pode ser realizada através de indicadores de qualidade para indicar a confiança no sistema de posicionamento e navegação tais como: acurácia, continuidade, disponibilidade e integridade. Barbosa, (2010) trata destes indicadores em seu trabalho relativo à análise do posicionamento RTK e RTK em rede na investigação da Rede ativa do Estado de São Paulo. O indicador chamado integridade é abordado no presente trabalho no caso da utilização de dados envolvendo a integração GPS/GLONASS no PPP.

Com o processo de modernização do GLONASS, novos satélites se encontram em lançamento, estes contam com novas tecnologias inseridas. Isto tem contribuído com o desenvolvimento de pesquisas sobre a integração GPS/GLONASS. Como exemplo, podem-se citar os satélites do bloco GLONASS-M a partir de 2003, os quais tem vida útil em torno de 7 anos. Os sinais emitidos pelos satélites antecessores do bloco GLONASS foram mantidos e ainda acrescentado o código civil L2OF, cuja técnica de transmissão de sinais ainda era a FDMA (GLONASS *space segment and modernization* <http://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/icg-7/wg/wga1-1.pdf>).

Em 2011 começaram a ser lançados satélites do bloco GLONASS-K1, os quais adicionaram mais um código civil, denominado L3OC e são os primeiros a transmitir sinais paralelamente usando a mesma técnica do GPS, a técnica CDMA. Para o ano de 2014 era esperado o lançamentos de satélites do novo bloco chamado de GLONASS-K2 com a inclusão de códigos civis nas portadoras e a técnica CDMA totalmente implementada nos satélites lançados pertencentes a este bloco (GLONASS *Status* <https://igscb.jpl.nasa.gov/assets/pdf/Poland%202012%20-%20ICG%20Marareskul%20PR67.pdf>), mas houve atrasos devido à sanções que restringem a entrega de componentes eletrônicos resistentes à radiação, estes vindos

do ocidente (GPS WORLD – <http://gpsworld.com/sanctions-delay-russias-glonass-k2-program/>), e lançamentos desta família de satélites está previsto para após 2015. (UNOOSA – <http://www.unoosa.org/pdf/sap/2015/RussiaGNSS/Presentations/2.pdf>).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é investigar sobre os modelos matemáticos para a integração GPS/GLONASS no PPP e realizar análise de acurácia considerando dados coletados no Brasil.

1.2.2 Objetivos específicos

Tem-se como objetivos específicos desta pesquisa:

- Investigar a modelagem matemática funcional e estocástica para o ajustamento no modo PPP com integração GPS/GLONASS;
- Investigar os modelos matemáticos para a integração numérica de órbitas transmitidas do GLONASS;
- Avaliar a influencia da inserção de medidas GLONAS na geometria posicional através dos valores de DOPs (*Dilution of Precisions*), além da análise de integridade.
- Analisar a acurácia posicional, usando os valores de EMQ, ao utilizar somente dados GPS e utilizando GPS e GLONASS.

1.3 Justificativa da Pesquisa

O GPS tem sido utilizado em sua forma completa para posicionamento desde a metade da década de 90. Atualmente o GLONASS se encontra em sua forma totalmente operacional com uma constelação nominal de 24 satélites disponíveis e mais 4 para reposição. A integração destes dois sistemas pode fornecer melhor geometria e redundância para a estimativa dos parâmetros no processamento dos dados, principalmente em condições propícias a efeitos de multicaminho e perdas de ciclos como, por exemplo, para levantamentos em meios a prédios urbanos.

Ambos os sistemas se encontram em fase de modernização com novos sinais, o que permite a investigação de modelagem adequada para minimização dos efeitos envolvidos com a propagação dos sinais. Diversos satélites GPS já contam com o código civil na L2 (L2C), além de medidas na portadora L5, enquanto que o GLONASS já conta com satélites transmitindo dados no formato CDMA. A modernização dos sistemas com uma grande quantidade de informações abre oportunidades para investigações científicas, como por exemplo, a estimativa de parâmetros atmosféricos e outros. Assim, são favorecidos o posicionamento geodésico e outros ramos da ciência, tal como a Meteorologia e outras.

O método PPP atualmente permite obter coordenadas com acurácia na ordem de poucos centímetros, considerando que a acurácia atual divulgada das órbitas precisas disponíveis pelo IGS é da ordem de cinco centímetros. Os erros dos relógios dos satélites estão disponíveis tanto no modo pós-processado como em tempo real através do projeto piloto do IGS (RTPPP - <http://www.rtigs.net>). Dessa forma é possível aplicar a integração GPS/GLONASS no modo pós-processado e em tempo real. A aplicação para tempo real requer comunicação via *internet* utilizando o protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) e o padrão RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*). Desta forma, considerando a disponibilidade das medidas do GPS e do GLONASS, além da modernização destes sistemas, justifica-se a investigação, implementação de modelos matemáticos e análise da acurácia do posicionamento a partir do método PPP considerando integração de dados GPS e GLONASS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução ao GNSS

Em 1991 o termo GNSS foi concebido durante a 10ª Conferência de Navegação Aérea. Na época o ICAO (*International Civil Aviation Organization*) entendeu que a tendência era de que a navegação por satélites se tornasse cada vez mais baseada em uma composição de sistema de navegação global. Cerca de 20 anos depois o entendimento é realidade, pois atualmente o GNSS é uma composição de sistemas de navegação por satélites operacionais e em fase de implementação. O norte-americano GPS, o russo GLONASS, Galileo da União Europeia, COMPASS/BeiDou da China e sistemas de aumento para o GPS que se dividem em SBAS (*space-based augmentation systems*) representado por WASS, EGNOS, MSAS, entre outros e GBAS (*ground-based augmentation systems*) representado principalmente por LAAS (HOFMANN-WELLENHOF *et al.* 2007).

O GPS foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos em 1975 e em abril de 1995 foi declarado totalmente operacional. O controle do sistema é realizado pelos militares, mas com o passar dos anos o grande aumento do número de usuários do sistema dentro da comunidade civil fez com que o sistema tivesse seu uso popularizado pelas mais diversas atividades que envolvem posicionamento. O sistema norte-americano é o mais utilizado no posicionamento geodésico no mundo e isso se deve ao tempo de operação, além da confiabilidade adquirida ao longo dos anos através do enorme desenvolvimento da tecnologia envolvida.

O GLONASS compõe o GNSS sendo um sistema de posicionamento por satélite russo que, iniciado em 1971, oficialmente foi colocado em operação em 24 de setembro de 1993 com 20 satélites. Em 1995 foi declarado operacional com 24 satélites em órbita, mas devido à falta de lançamentos e melhorias na constelação, a mesma foi bastante reduzida até chegar ao número de 7 satélites em funcionamento no final de 2002 (SEEBER, 2003). Atualmente conta com uma constelação

operacional composta por 24 a 29 satélites (<http://www.glonass-center.ru/en/>) (acesso em jun. de 2014).

Os sistemas de posicionamento que compõem o GNSS embora tenham finalidades semelhantes possuem características diferentes quanto à formação da constelação e quanto às características dos sinais e frequências utilizadas. No GPS, a constelação é formada por seis planos orbitais que possuem aproximadamente 55° de inclinação em relação ao plano equatorial. Os satélites estão classificados em blocos e atualmente estão operacionais aproximadamente 32 satélites pertencentes aos blocos II-A, II-R, IIR-M, e II-F. O *status* atualizado da constelação GPS pode ser visto em (<http://www.usno.navy.mil/USNO/time/gps/current-gps-constellation> ou <http://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>) (acesso em fev. de 2015).

Os satélites do GPS emitem sinais gerados a partir de uma frequência fundamental (f_0) de 10,23 MHz, cuja multiplicação por números inteiros permite formar a frequência de cada uma das três portadoras denominadas de L1, L2 e L5 (Tabela 1).

Tabela 1 – Frequência dos sinais GPS.

Portadora (MHz)	Multiplicador	Frequência Fundamental (MHz)	Frequência da portadora (MHz)
L1	154	10,23	1575,42
L2	120		1227,60
L5	115		1176,45

Fonte: MONICO, (2008 p. 43).

Sobre as portadoras são modulados em fase códigos que formam o PRN (*Pseudo Random Noise*). Assim, as pseudodistancias são calculadas com base no tempo de propagação satélite/receptor. Os códigos que formam o PRN são o C/A (*Coarse/Acquisition*) modulado apenas sobre a portadora L1 e o P (*Precise code*) utilizado sobre as portadoras L1 e L2. Há ainda o novo código civil L2C sobre a portadora L2 que foi projetado para atender, em especial, necessidades comerciais (HOFMANN-WELLENHOF *et al*, 2007). Existe ainda o código civil na portadora L5, o L5C que foi lançado inicialmente com os satélites do bloco IIR-M e visa atender os

procedimentos que envolvam navegação e segurança de vida. São formados segmentos de código que zeram ao fim de sete dias, a 0h UT (*Time Universal*) do sábado para domingo. Os códigos modulados sobre as portadoras produzem PRN únicos designados por números que são os mesmos relacionados a cada satélite. Assim, mesmo que emitam sinais na mesma frequência, os satélites podem ser identificados por seu segmento semanal de código PRN, essa técnica é chamada de CDMA (SEEBER, 2003).

Os satélites GLONASS tem órbita circular com altitude em torno de 19.000 km distribuídos em três planos orbitais com separação de 120° e inclinação de 64,8° em relação ao equador. A constelação atual conta com 24 satélites acrescida de outros 4 satélites de reposição. Assim como os satélites GPS, os satélites GLONASS estão classificados em blocos e são denominados de GLONASS-M, GLONASS-K e GLONASS-KM (<http://www.glonass-center.ru/en/>).

O GLONASS apresenta características diferentes em relação ao GPS quanto à frequência dos sinais e distinção dos satélites emissores desses sinais. Cada satélite GLONASS fornece continuamente sinais de navegação no qual estão presentes o código C/A e o código P. Os códigos são modulados sobre duas portadoras chamadas originalmente de G1 e G2, mas comumente denominada na literatura em geral como L1 e L2 (mesma denominação usada nas portadoras GPS), sendo o código C/A modulado somente sobre a portadora G1 enquanto que o código P, mais preciso do que o anterior é modulado tanto sobre G1 como G2. Porém, como o GLONASS usa a técnica FDMA, cada satélite está distribuído com uma frequência particular dentro de cada banda, a qual é determinada por um número de canal de frequência definida por (HOFMANN-WELLENHOF *et al.* 2007):

$$f_{1k} = f_1 + \Delta f_1 k = 1602,000 + 0,5625 k \quad [MHz]; \quad (2.1);$$

$$f_{2k} = f_2 + \Delta f_2 k = 1246,000 + 0,4375 k \quad [MHz]; \quad (2.2);$$

$$f_{3k} = f_3 + \Delta f_3 k = 1204,704 + 0,4230 k \quad [MHz]. \quad (2.3).$$

onde k diferencia os canais de frequência, os termos precedidos por Δ são fatores que denotam incrementos na frequência de sinais de satélite em dois canais adjacentes, sendo que a frequência f_3 e o respectivo incremento não são fixos e

estão sujeitos a mudanças. Um triplo de frequências f_{1k} , f_{2k} , f_{3k} é atribuído a cada satélite, Assim, a relação entre estas frequências é $f_{1k}/f_{2k} = 9/7$ e $f_{1k}/f_{3k} = 125/94$ (Tabela 2).

Tabela 2 – Frequências das bandas do GLONASS.

Link	Fator (* f_1)	Frequência [MHz]	Incremento [MHz]	Comprimento de onda [cm]
G1	1	1602,000	0,5625	18,7
G2	$7/9$	1246,000	0,4375	24,1
G3	$94/125$	1204,704	0,4230	24,9

Fonte: HOFMANN-WELLENHOF *et al.* (2007. p. 357).

CAI (2009) destaca que apesar dos receptores dos usuários poderem diferenciar os satélites por suas diferentes frequências, nem todos os satélites tem diferentes frequências, pois dois satélites ocupando posições diametralmente opostas em um mesmo plano orbital transmitem sinais exatamente em uma mesma frequência, com algumas poucas exceções.

2.2 Equações de Pseudodistância e Fase da Onda Portadora

A medida da pseudodistância é obtida a partir da correlação entre o código gerado pelo satélite no instante de transmissão e sua réplica gerada no receptor no instante de recepção (t_r). O sistema de tempo dos satélites (t^s) é obtido com base em relógios atômicos de alta precisão e é utilizado como referência para todos os sinais gerados e transmitidos. No caso dos receptores, estes dispõem de relógios de menor qualidade, os quais operam no sistema de tempo t_r do receptor. Esses dois sistemas de tempo são relacionados com o sistema de tempo GPS, (Monico, 2008):

$$\begin{aligned} t_t^{\text{GPS}} &= t^s - dt^s \\ t_r^{\text{GPS}} &= t_r - dt_r \end{aligned} \quad (2.4)$$

Na Equação (2.4) tem-se:

t_t^{GPS} - tempo de transmissão no satélite (sistema de tempo GPS);

t_r^{GPS} - tempo de recepção no receptor (sistema de tempo GPS);

dt^s - erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante t^s ;

dt_r - erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante t_r .

A distância medida seria igual à diferença entre o tempo t_r de recepção (receptor) e o tempo t^s de transmissão (satélite) multiplicada pela velocidade da luz (c) no vácuo se não fosse os diversos efeitos envolvidos. Considerando os erros envolvidos na propagação do sinal ($\varepsilon_{PD_r^s}$), a distância medida que recebe o nome de pseudodistância (PD) pode ser escrita segundo Monico (2008); Marques (2012) como:

$$\begin{aligned} PD_r^s &= c \left[\left(t_r^{\text{GPS}} + dt_r \right) - \left(t_t^{\text{GPS}} + dt^s \right) \right] + \varepsilon_{PD_r^s} \\ \Rightarrow PD_r^s &= c \underbrace{\left(t_r^{\text{GPS}} - t_t^{\text{GPS}} \right)}_{\tau_r^s} + c \left(dt_r - dt^s \right) + \varepsilon_{PD_r^s} \quad . \quad (2.5) \\ \Rightarrow PD_r^s &= c \tau_r^s + c \left(dt_r - dt^s \right) + \varepsilon_{PD_r^s} \end{aligned}$$

Na Equação (2.5) tem-se que, $\tau_r^s = \left(t_r^{\text{GPS}} - t_t^{\text{GPS}} \right)$ é o intervalo de propagação do sinal e $\varepsilon_{PD_r^s}$ representa os erros envolvidos na medida de pseudodistância. A componente $c \tau_r^s$ resulta na distância geométrica (ρ_r^s) entre o satélite e o receptor, nos instantes de transmissão e recepção do sinal, respectivamente. Dessa forma, a equação de pseudodistância (unidade de metros) entre o satélite s e o receptor r considerando os efeitos da troposfera, da ionosfera, multicaminho, erro da órbita do satélite, entre vários outros, pode ser escrita como (SEEBER, 2003; MONICO, 2008; MARQUES, 2012):

$$PD_{rLi}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_{rLi}^s + T_r^s + Orb^s + dm_r^s + b_{rLi} + b_{Li}^s + v_{PD_r^s} \quad (2.6)$$

Na Equação (2.6) tem-se:

L_i - refere-se à portadora GPS ($i=1, 2, 5$);

ρ_r^s - distância geométrica entre o satélite e o receptor, a qual deve ser calculada entre o instante de transmissão e o de recepção do sinal;

c - velocidade da luz no vácuo;

dt_r - erro do relógio do receptor;

dt^s - erro do relógio do satélite;

I_{rLi}^s - atraso provocado pela ionosfera;

T_r^s - atraso provocado pela troposfera;

Orb^s - erro da órbita (posição) do satélite;

dm_r^s - efeito provocado pelo multicaminho;

b_{rLi} - atraso de *hardware* para o receptor;

b_{Li}^s - atraso de *hardware* para o satélite;

$v_{PD_r^s}$ - efeitos aleatórios e não modelados da pseudodistância.

A fase da onda portadora é uma observável muito mais precisa que a pseudodistância. Ela é também conhecida como fase de batimento da onda portadora (ϕ_r^s) e é obtida a partir da diferença entre a fase gerada pelo satélite, no instante de transmissão do sinal, e sua réplica, gerada pelo receptor, no instante de recepção do sinal. Apenas uma medida fracionária é obtida no início da coleta e a partir daí inicia-se a contagem do número inteiro de ciclos, restando um número inteiro de ciclos desconhecido na primeira época, denominado ambiguidade da fase (N). A equação da fase de batimento (em ciclos) da onda portadora pode ser escrita como (SEEBER, 2003; MONICO, 2008; MARQUES, 2012):

$$\Phi_{rLi}^s = f_i \left(\frac{\rho_r^s - I_{rLi}^s + T_r^s + Orb_r^s + dm_r^s + b_{rLi} + b_{Li}^s}{c} \right) + f_i(dt_r - dt^s) + (\Phi_t^s(t_0) - \Phi_r(t_0) + N_{rLi}^s + v_{\Phi_{rLi}^s}) \quad (2.7)$$

Na Equação (2.7) tem-se:

f_i - frequência da fase (i=1, 2, 5);

$\Phi_t^s(t_0)$ - fase inicial no satélite, correspondente à época de referência t_0 ;

$\Phi_r(t_0)$ - fase inicial no receptor, correspondente à época de referência t_0 ;

N_{rLi}^s - ambiguidade da fase da onda portadora no instante inicial de rastreamento;

$v_{\Phi_{rLi}^s}$ - efeitos aleatórios e não modelados da fase da portadora.

Os outros termos na equação da fase já foram definidos a partir da Equação (2.6). A acurácia que o usuário pode determinar sua posição e velocidade, além da sincronização com o sistema de tempo GPS, depende da interação dos sinais dos satélites com diversos fatores. Em geral, a acurácia do posicionamento GPS depende da qualidade das medidas de pseudodistância e de fase da onda portadora e da modelagem dos diversos efeitos envolvidos. As equações de pseudodistância e fase do GLONASS podem ser definidas da mesma maneira que para o GPS.

2.3 Introdução aos erros envolvidos no GNSS

Os erros e efeitos envolvidos com as observações do GNSS devem ser devidamente modelados. As fontes de erros podem ser classificadas conforme apresentadas por Monico (2008):

Tabela 3 – Erros envolvidos no GNSS.

Fontes	Erros
Satélite	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade Atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do satélite Centro de fase da antena do satélite Fase <i>wind-up</i>
Propagação do Sinal	Refração troposférica Refração ionosférica Perdas de ciclos Multicaminho ou sinais refletidos Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena do receptor Atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do receptor Fase <i>wind-up</i>
Estação (influenciadas por efeitos geodinâmicos que devem ser corrigidos)	Erro nas coordenadas Multicaminho ou sinais refletidos Marés terrestres Movimento do polo Carga oceânica Pressão atmosférica

Fonte: MONICO (2008, p. 190)

Os erros dos relógios dos satélites tanto no GPS quanto no GLONASS, podem ser obtidos através de informações contidas em efemérides transmitidas em tempo real pelos satélites ou a partir de estimativas precisas realizadas pela rede IGS. As efemérides transmitidas do GPS são baseadas em um conjunto de elementos keplerianos, enquanto as efemérides transmitidas do GLONASS são dadas em forma de coordenadas, velocidades e acelerações. No caso das efemérides precisas finais tanto do GPS quanto do GLONASS, estas são fornecidas

pelo IGS com 12 a 18 dias após a coleta. Além desta, também são disponibilizadas as efemérides rápidas e ultra-rápidas com menores tempos de latência (Tabela 4). Informações importantes dos produtos gerados pelo IGS para o GPS e GLONASS são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Acurácia e disponibilidade atual dos produtos IGS para os dados GPS e GLONASS.

Produtos IGS	Acurácia	Latência	Atualizações	Intervalo amostral dos dados	
GPS					
Transmitida pelos satélites	Órbitas	~100 cm	Tempo Real	-	10 seg.
	Relógio	~5 ns			
Ultra-rápida (IGU predita)	Órbitas	~ 5 cm	Tempo Real	03, 09, 15, 21 horas UTC	15 min.
	Relógio	~3 ns			
Ultra-rápida (IGU predita)	Órbitas	~3 cm	3 – 9 horas	03, 09, 15, 21 horas UTC	15 min.
	Relógio	~0,15 ns			
Rápida (IGR)	Órbitas	~2,5 cm	14 – 41 horas	Diariamente, às 17 horas UTC	15 min.
	Relógio	~0,075 ns			5 min.
Final (IGS)	Órbitas	~2,5 cm	12 – 18 horas	Semanalmente, às quintas-feiras.	15min.
	Relógio	~0,075 ns			5 min. / 30 seg
GLONASS					
Final	~3 cm	12 – 18 horas	Semanalmente, às quintas-feiras.	15 min.	

Fonte: IGS (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>) (acesso em Dezembro de 2014).

As órbitas precisas do GLONASS começaram a ser geradas com a implantação do IGEX-98 (*International GLONASS Experiment 1998*) organizado pelo IGS pela IAG (*International Association of Geodesy*) e pelo IERS (*International Earth Rotation Service and Reference System*). Atualmente, quatro centros estão rotineiramente providenciando órbitas precisas GLONASS. São eles: CODE (*University Berne, Switzerland*), IAC (*Information - Analytical Center*), ESA/ESOC (*European Space Operations Center, Germany*) and BKG (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Germany*) (CAI & GAO, 2007). Para o caso de tempo real se faz necessário a estimativa das órbitas e correções dos relógios dos satélites

em tempo real, algo que está se tornando disponível através do projeto para tempo real do IGS (*IGS Pilot Project* - <http://www.rtigs.net>).

Na camada ionosférica (50 a 1000 km acima da Terra), a luz ultravioleta ioniza átomos e moléculas criando íons livres que degradam os sinais dos satélites. Os sinais sofrem mudanças nas velocidades das quais são proporcionais ao valor do TEC (*Total Electron Content* - Conteúdo Total de Elétrons). Segundo Matsuoka (2007), o TEC varia no tempo e espaço e são influenciados por diversos fatores tais como ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica e outros.

Para usuários com receptores de dupla frequência, os efeitos podem ser 99% eliminados através de uma combinação de medidas nas duas frequências de acordo com a propriedade dispersiva da ionosfera, efeitos esses de 1ª ordem, restando os efeitos de ordem superior (2ª e 3ª ordem), que devem ser considerados na realização de posicionamento com alta acurácia (MARQUES *et al.* 2009). Em seguida, as equações que representam a combinação *ion-free* dada em MONICO (2008):

$$PD_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} PD_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} PD_{L2}. \quad (2.8)$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \Phi_{L1} - \frac{f_{L1}f_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \Phi_{L2}. \quad (2.9)$$

Nas equações 2.8 e 2.9 P_{IF} e Φ_{IF} são combinações *ion-free* das observáveis, código e fase respectivamente, P_{L1} e P_{L2} (metros) são as observações do código nas portadoras L1 e L2 respectivamente, assim como Φ_{L1} e Φ_{L2} (ciclos) são as observações da fase em L1 e L2 e por fim, f_{L1} e f_{L2} são as frequências portadoras em L1 e L2 respectivamente.

Outra camada na atmosfera, a troposfera, é responsável por degradação do sinal advindo dos satélites GNSS. O atraso troposférico é dividido em duas componentes, hidrostática (ZHD – *Zenith Hydrostatic Delay*) e úmida (ZWD - *Zenith Wet Delay*). O atraso troposférico deve ser calculado como a soma dos efeitos das componentes hidrostática e úmida. Geralmente, cada uma das componentes é expressa como o produto do atraso zenital por uma função de mapeamento, a qual relaciona o atraso zenital com o atraso para o ângulo de elevação do satélite. Em

geral a modelagem é realizada por modelos como Hopfield, Saastamoinen ou estimativas da troposfera (SAPUCCI, 2001; MONICO 2008).

O relógio do receptor (normalmente de quartzo) é de menor qualidade e, portanto sofre atrasos em relação às medidas realizadas por relógios atômicos mantidos pelo sistema de tempo GPS, os quais são mais precisos. Dessa forma, os erros dos relógios dos receptores e dos relógios dos satélites estão referenciados em relação ao sistema de tempo GPS (CAI, 2009).

Os erros por reflexão dos sinais próximos a estação provocam o erro chamado de multicaminho e estes degradam as medidas de código e fase. Estudos para mitigação e detecção do efeito de multicaminho têm sido desenvolvidos ultimamente, (SOUZA, 2009; POLEZEL, 2010). Estes efeitos também podem ser minimizados fazendo uso de antenas do modelo *choke-ring*, tais como as disponibilizadas nas estações pertencentes à RBMC.

O ponto virtual no qual as medidas dos sinais GNSS são referenciadas é chamado de centro de fase eletrônico e este não coincide com o centro mecânico da antena, assim, por meio de um ponto de referência denominado ARP (*Antenna Reference Point*) é possível obter a relação entre a posição determinada com o GNSS e a marca de referência em um monumento geodésico (MONICO, 2008). O centro de fase eletrônico varia em função do ângulo de elevação e azimute do satélite, sendo ainda diferente para cada frequência da onda portadora no caso do GPS.

A variação tridimensional do centro de fase – PCO (*Antenna Phase Center offsets*) em relação ao ARP na maioria das antenas é fornecida pelos fabricantes, sendo que devido à dependência da frequência, os PCOs devem ser dados em relação a cada onda portadora. O desvio do centro de fase atual para o centro de fase eletrônico médio é denominado de PCV (*Phase Center Variation*) e pode alcançar a ordem de milímetros a poucos centímetros (MARQUES, 2012).

Para o posicionamento de alta acurácia este efeito deve ser eliminado, o que requer técnicas de calibração de antenas. Os principais métodos de calibração são a calibração relativa em campo, calibração absoluta e calibração utilizando câmaras anecóicas (*anechoic chambre*). A descrição detalhada destes métodos podem ser encontradas em Seeber (2003), Hoffman-Wellenhof *et al.* (2007) e Marques (2012).

Outro efeito relacionado com o receptor e a antena ocorrem devido ao fato de que a polarização dos sinais de satélites tanto no GPS quanto no GLONASS é feita circularmente à direita e as observações da fase da portadora dependem de uma orientação mutua das antenas do receptor e dos satélites (MONICO, 2008; MARQUES, 2012), a rotação das antenas dos satélites e dos receptores podem mudar a fase da portadora observada e este erro é chamado de fase *windup*. No PPP o efeito da fase *windup* não pode ser desprezado, pois a negligência deste erro pode ocasionar diferenças na ordem de decímetros.

As estações envolvidas no posicionamento podem sofrer efeitos resultantes de fenômenos geofísicos que tenham ocorrido durante o período de coleta das observações, sendo que a maioria não são erros, mas correções que devem ser aplicadas às coordenadas das estações, ou às medidas. Assim, efeitos tais como as marés terrestres e cargas oceânicas devem ser levadas em consideração principalmente em atividades de posicionamento que requerem alta acurácia (MONICO, 2008).

A variação da atração lunissolar sobre a crosta terrestre causa o efeito conhecido como marés terrestres (*Earth Bodies Tides*), isso se deve à natureza não rígida da Terra, afetando seu campo gravitacional (TORGE, 2001). Sobre a superfície oceânica admitida como equipotencial, a atração lunissolar causa aumento do potencial das marés (MARQUES, 2012). Tanto para as marés terrestres e marés oceânicas o cálculo de seu efeito em uma estação sobre a Terra pode ser encontrado em Petit & Luzum (2010) e mais detalhes são encontrados em TORGE (2001).

MARQUES (2012) realizou experimento para a estação PPTTE pertencente à RBMC em um dia do ano de 2008 e verificou variações na componente radial de até 20 cm durante alguns períodos do dia de observação. Quanto às marés oceânicas, sua variação temporal é de uma ordem menor que as variações devido às marés de corpos terrestres (MARQUES, 2012). Sabe-se que as mesmas seguem as leis da hidrodinâmica com fortes perturbações que ocorrem em porções do mar adjacentes aos continentes, ou seja, em linhas de costa (TORGE, 2001). Segundo Monico (2008), as características elásticas da crosta, posições do Sol e da Lua, e ainda do local da estação, afetam a intensidade do deslocamento podendo alcançar 10 cm e

em regiões afastadas ainda podem alcançar 1 cm. Portanto, no posicionamento de alta acurácia esse efeito não deve ser negligenciado.

2.4 Modelo Matemático funcional e estocástico do PPP com Integração GPS e GLONASS

O PPP é realizado fazendo uso das medidas de pseudodistância e de fase da onda portadora. Diferentemente do posicionamento relativo, onde a maioria dos efeitos sistemáticos é eliminada no processo de dupla diferenciação das medidas, o PPP requer a modelagem matemática precisa dos efeitos para obtenção de coordenadas com acurácia centimétrica. A estimativa das coordenadas pode ser no modo pós-processada ou próxima ao tempo real (latência de poucos segundos) (MARQUES, 2012).

O modelo matemático (unidades em metros) necessário para integração GPS/GLONASS no PPP pode ser descrito com base nas equações de pseudodistância e fase nas duas frequências:

$$PD_{Li}^G = \rho^G + c(dt_{rec}^G - dt_{sat}^G) + I_{Li}^G + T^G + Orb^G + dm^G + v_{PD}^G \quad (2.10)$$

$$\Phi_{Li}^G = \rho^G + c(dt_{rec}^G - dt_{sat}^G) - I_{Li}^G + T^G + Orb^G + dm^G + v_{\Phi}^G \quad (2.11)$$

$$PD_{Li}^R = \rho^R + c(dt_{rec}^R - dt_{sat}^R) + I_{Li}^R + T^R + Orb^R + dm^R + v_{PD}^R \quad (2.12)$$

$$\Phi_{Li}^R = \rho^R + c(dt_{rec}^R - dt_{sat}^R) - I_{Li}^R + T^R + Orb^R + dm^R + v_{\Phi}^R. \quad (2.13)$$

O símbolo G e R representam respectivamente o GPS e GLONASS. Os elementos das equações (2.10) a (2.13) foram descritos nas equações (2.6) e (2.7) com diferenças apenas nas denominações dos erros dos relógios do receptor (dt_{rec}^G ou dt_{rec}^R) e do satélite (dt_{sat}^G ou dt_{sat}^R) com objetivo de facilitar o entendimento.

Para o processamento dos dados na integração GPS/GLONASS comparece o parâmetro incógnito relacionado com o sistema de tempo (dt_{sys}). O erro do relógio do receptor pode ser descrito como (CAI & GAO, 2007):

$$dt_{rec} = t - t_{sys} \quad . \quad (2.14)$$

O termo t_{sys} denota o sistema de tempo GPS (T_{GPS}) para observações GPS ou o sistema de tempo GLONASS ($T_{GLONASS}$) para observações GLONASS. Uma vez que o erro do relógio do receptor está relacionado com o sistema de tempo, seja do GPS ou do GLONASS, o processamento dos dados com integração GPS/GLONASS no modo PPP inclui a estimativa de dois parâmetros de erro do relógio do receptor. É possível escrever o erro do relógio do receptor relacionado com o GLONASS da seguinte maneira (CAI & GAO, 2007):

$$\begin{aligned} dt_{rec}^R &= t - t_{GLONASS} \\ &= \underbrace{t - t_{GPS}}_{dt_{rec}^G} + \underbrace{t_{GPS} - t_{GLONASS}}_{dt_{sys}} \quad . \quad (2.15) \\ &= dt_{rec}^G - dt_{sys} \end{aligned}$$

que é função do erro do relógio do receptor para o GPS e da diferença do sistema de tempo entre GPS e GLONASS. Aplicando a Equação (2.14) nas Equações (2.12 e 2.13), tem-se:

$$PD_{Li}^R = \rho_R + c \left(\underbrace{dt_{rec}^G + dt_{sys}}_{dt_{rec}^R} - dt_{sat}^R \right) + I_{Li}^R + T^R + Orb^R + dm^R + v_{PD^R} \quad (2.16)$$

$$\phi_{Li}^R = \rho_R - I_{Li}^R + T^R + Orb^R + dm^R + c \left(\underbrace{dt_{rec}^G + dt_{sys}}_{dt_{rec}^R} - dt_{sat}^R \right) + \lambda_i^R N_{Li}^R + v_{\phi_{Li}^R} \quad (2.17)$$

A estimativa do PPP com integração GPS/GLONASS pode ser realizada com o uso das efemérides e correções de relógios precisas dos satélites, as quais atualmente são disponibilizados pelos centros do IGS. Com base nas Equações (2.16) e (2.17) pode se estimar as coordenadas das estações, erro do relógio do receptor para o GPS (dt_{rec}^G), diferença do sistema de tempo (dt_{sys}), troposfera e ambiguidades para cada satélite.

Reescrevendo as equações (2.10, 2.11, 2.12 e 2.13) em forma da combinação *ion-free* com parametrização do atraso troposférico úmido na direção vertical tem-se:

$$PD_{IF}^G = \frac{(f_{GL1}^2 \cdot PD_{L1}^G - f_{GL2}^2 \cdot PD_{L2}^G)}{(f_{GL1}^2 - f_{GL2}^2)}$$

$$= \rho_G + cdt^G + m_f T^G + \varepsilon_{PD_{IF}}^G \quad (2.18)$$

$$\lambda_{IF} \Phi_{IF}^G = \frac{(f_{GL1}^2 \cdot \Phi_{L1}^G - f_{GL2}^2 \cdot \Phi_{L2}^G)}{(f_{GL1}^2 - f_{GL2}^2)}$$

$$= \rho_G + cdt^G + m_f T^G + \lambda_{Li} N_{IF}^G + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^G \quad (2.19)$$

$$PD_{IF}^R = \frac{(f_{RL1}^2 \cdot PD_{L1}^R - f_{RL2}^2 \cdot PD_{L2}^R)}{(f_{RL1}^2 - f_{RL2}^2)}$$

$$= \rho_R + c(dt^G + dt_{sys}) + m_f T^R + \varepsilon_{PD_{IF}}^R \quad (2.20)$$

$$\lambda_{IF} \Phi_{IF}^R = \frac{(f_{RL1}^2 \cdot \Phi_{L1}^R - f_{RL2}^2 \cdot \Phi_{L2}^R)}{(f_{RL1}^2 - f_{RL2}^2)}$$

$$= \rho_R + c(dt^G + dt_{sys}) + m_f T^R + \lambda_{Li} N_{IF}^R + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^R \quad (2.21)$$

Os termos ρ_G e ρ_R nas equações (2.18, 2.19, 2.20 e 2.21) representam a distância geométrica entre as antenas dos satélites (GPS e GLONASS respectivamente) e do receptor. A função de mapeamento da troposfera é representada por m_f .

As coordenadas dos satélites (X^s , Y^s e Z^s) são injuncionadas aos valores obtidos a partir das efemérides transmitidas ou precisas e considerados como constantes para o ajustamento. Então, são adotados valores aproximados para as coordenadas do receptor (X_{r0} , Y_{r0} , Z_{r0}) e as coordenadas estimadas da estação são representadas como:

$$\begin{aligned} X_r &= X_{r0} + \Delta X_r \\ Y_r &= Y_{r0} + \Delta Y_r \\ Z_r &= Z_{r0} + \Delta Z_r \end{aligned} \quad (2.22)$$

em que ΔX_r , ΔY_r , ΔZ_r são as correções aos parâmetros aproximados.

O modelo matemático para o ajustamento conforme apresentado nas equações 2.18 a 2.21 é não linear em relação aos parâmetros coordenadas das estações. Assim, faz-se necessária a linearização para aplicação do ajustamento por MMQ (Método dos Mínimos Quadrados), o que pode ser realizado aplicando a linearização por série de Taylor (GEMAEL, 1994).

$$\begin{aligned} f(X_r, Y_r, Z_r) &\equiv f(X_{r0} + \Delta X_r, Y_{r0} + \Delta Y_r, Z_{r0} + \Delta Z_r) \\ &= f(X_r, Y_r, Z_r) + \left. \frac{\partial f(X_r, Y_r, Z_r)}{\partial X_r} \right|_{X_r=X_0} \Delta X_r + \left. \frac{\partial f(X_r, Y_r, Z_r)}{\partial Y_r} \right|_{Y_r=Y_0} \Delta Y_r \\ &\quad + \left. \frac{\partial f(X_r, Y_r, Z_r)}{\partial Z_r} \right|_{Z_r=Z_0} \Delta Z_r + \dots \end{aligned} \quad (2.23)$$

A expansão é truncada no termo linear, sendo necessário um processo iterativo no ajustamento dos dados. As derivadas parciais para o caso do PPP são dadas por:

$$\left. \frac{\partial f(X_r, Y_r, Z_r)}{\partial X_r} \right|_{X_r=X_0} = - \frac{X^s(t^t) - X_{r0}(t_r)}{\rho_{r0}^s(t)} = a_r^s$$

$$\left. \frac{\partial f(X_r, Y_r, Z_r)}{\partial Y_r} \right|_{X_r=X_0} = - \frac{Y^s(t^t) - Y_{r0}(t_r)}{\rho_{r0}^s(t)} = b_r^s \quad . \quad (2.24)$$

$$\left. \frac{\partial f(X_r, Y_r, Z_r)}{\partial Z_r} \right|_{X_r=X_0} = - \frac{Z^s(t^t) - Z_{r0}(t_r)}{\rho_{r0}^s(t)} = c_r^s$$

A equação da distância geométrica entre receptor e o satélite é dada por:

$$\rho_r^s(t) = \sqrt{(X^s(t^t) - X_{r0}(t_r))^2 + (Y^s(t^t) - Y_{r0}(t_r))^2 + (Z^s(t^t) - Z_{r0}(t_r))^2} \quad . \quad (2.25)$$

Realiza-se a substituição da Equação (2.25) e do conjunto de Equações (2.24) na Equação (2.23), obtêm-se a distância geométrica com a seguinte equação linear em relação aos parâmetros desconhecidos $\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r$:

$$\rho_r^s(t) = \rho_{r0}^s(t) - \frac{X^s(t^t) - X_{r0}(t_r)}{\rho_{r0}^s(t)} \Delta X_r - \frac{Y^s(t^t) - Y_{r0}(t_r)}{\rho_{r0}^s(t)} \Delta Y_r - \frac{Z^s(t^t) - Z_{r0}(t_r)}{\rho_{r0}^s(t)} \Delta Z_r \quad . \quad (2.26)$$

Assim, pode-se montar a matriz A (Jacobiana) do ajustamento das equações de pseudodistância e fase para a integração GPS/GLONASS utilizando as equações (2.18 a 2.21) considerando a Equação (2.26), tem-se:

$$E\{\Delta L\} = A_L \Delta X$$

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \Delta PD_{IF}^G \\ \Phi_{IF}^G \\ \Delta PD_{IF}^R \\ \Phi_{IF}^R \end{bmatrix} \right\} = A_L \Delta X = \begin{bmatrix} a_r^G & b_r^G & c_r^G & 1 & 0 & m_f & 0 & 0 \\ a_r^G & b_r^G & c_r^G & 1 & 0 & m_f & \lambda_{IF}^G & 0 \\ a_r^R & b_r^R & c_r^R & 1 & 1 & m_f & 0 & 0 \\ a_r^R & b_r^R & c_r^R & 1 & 1 & m_f & 0 & \lambda_{IF}^R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ cdt_r \\ cdt_{sys} \\ T \\ \Delta N_{IF}^G \\ \Delta N_{IF}^R \end{bmatrix} \quad . \quad (2.27)$$

Na matriz Jacobiana da Equação (2.27), os termos a , b e c foram obtidos na equação (2.25).

Os modelos funcionais descrevem a relação matemática entre as medições e os parâmetros desconhecidos, enquanto os modelos estocásticos descrevem a qualidade das observações. Assim, o modelo estocástico expressa a incerteza esperada ou variabilidade dos dados observados (CAI, 2009; MARQUES, 2012). A MVC das observações para o caso do PPP envolvendo integração GPS/GLONASS é dada por.

$$\Sigma_{Lb} = \begin{bmatrix} \sigma_{PD_{IF}^G}^2 & & & 0 \\ & \sigma_{\Phi_{IF}^G}^2 & & \\ & & \sigma_{PD_{IF}^R}^2 & \\ 0 & & & \sigma_{\Phi_{IF}^R}^2 \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

Na Equação (2.28), as variâncias σ_{PD}^{G,R^2} e σ_{Φ}^{G,R^2} se referem à pseudodistância e fase em forma da combinação *ion-free* para o G (GPS) ou R (GLONASS). S_i onde ($i = 1, 2, 3$, etc.) representa o número do satélite observado. Em geral, cada incerteza como representada na Equação (2.28) é ponderada por uma função que considera o ângulo de elevação do satélite, tal como apresentado em Silva (2009).

2.5 Compatibilização entre sistema de tempo GPS e GLONASS

Para o processamento de dados GPS/GLONASS duas questões são fundamentais: a compatibilização entre sistemas geodésicos de referência e de tempo no caso da utilização das efemérides operacionais. Os satélites GLONASS usam um sistema de tempo que é referenciado ao UTC (SU) (*Universal Coordinated Time of Sovietic Union*), incluindo os ajustes dos saltos de segundos. Os satélites GPS seguem o UTC do USNO (*Observatory Naval of the United States*) sem o ajustamento dos saltos de segundo. Segundo o ICD GLONASS (2008) a escala de tempo dos satélites GLONASS é periodicamente corrigida para o número inteiro de segundos simultaneamente com as correções UTC que são executadas de acordo

com as notas do BIH (*Bureau International de l'Heure*), isto é, correção dos saltos de segundos.

Para compatibilizar os dois sistemas de tempo as medidas de tempo do GLONASS em UTC (SU) podem ser transformadas para o UTC (USNO), corrigindo as diferenças entre esses dois sistemas de tempo, seguindo também a correção dos saltos de segundos, levando em consideração que o sistema de tempo GLONASS é 3 horas adiantadas em relação ao UTC (SU). Assim, pode-se então converter uma escala de tempo em outra utilizando a Equação 2.29 (ICD GLONASS 2008):

$$t_b^G = t_b^R - 3h - (TAI - t_R)(TAI - t_G) \quad (2.29)$$

Na Equação 2.29, t_b^G e t_b^R representam o tempo GPS e GLONASS no instante de tempo t_b nesta ordem. É possível obter o TAI (Tempo Atômico Internacional) a partir das escalas de tempo GPS e GLONASS, de forma direta, pelas seguintes relações (STATELLA *et al.* 2013):

$$(TAI - t_R) = 34s + C_1 \quad (2.30)$$

$$(TAI - t_G) = 19s + C_0 \quad (2.31)$$

sendo que os valores de C_1 e C_0 são constantemente publicados pelo BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*).

2.6 Transformação de coordenadas entre os sistemas de referência PZ-90.11 e WGS84

Os sistemas geodésicos de referência WGS84 e PZ-90.11 são adotados pelo GPS e GLONASS, respectivamente. Este último teve sua transição do sistema anterior (PZ-90) para sua atualização em 31 de dezembro de 2013 (PZ-90.11 época 2010.0).

Tanto o PZ-90.11 quanto o WGS84 possuem concepções semelhantes: A origem do sistema é no centro de massa da Terra, o eixo Z aponta para o Pólo Norte Terrestre Convencional – CTP (*Conventional Terrestrial Pole*), o eixo X aponta para a interseção do equador terrestre no meridiano de origem (Meridiano de *Greenwich*) e o eixo Y completa o sistema dextrógiro.

Entre os referenciais PZ-90.11 e WGS84, embora tenham concepções semelhantes como abordado anteriormente, são sistemas de referência que adotam parâmetros elipsoidais diferentes (Tabela 5).

Tabela 5 – Parâmetros do sistema de referência WGS84 e PZ-90.11.

Parâmetros	WGS84	PZ-90.11
Taxa de rotação da Terra (ω_e)	$7,292115 \times 10^{-8} \text{ rad/s}^{-1}$	$7,292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}^{-1}$
Constante gravitacional (GM)	$398\,600,5000 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$	$398\,600,4418 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$
Semi-eixo maior/Raio equatorial (a_e)	6 378 137 m	6 378 136 m
Achatamento (f)	1/298,257223563	1/298,257840000
Velocidade da luz no vácuo (c)	$2,9979458 \times 10^8 \text{ m/s}$	$2,9979458 \times 10^8 \text{ m/s}$
Harmônico zonal de grau 2 do geopotencial (C_{20})	-	$1.082.625,75 \times 10^{-9}$

Fonte: MONICO (2008 p. 126) e ICD GLONASS (2008 p. 22)

Relacionados às transformações de coordenadas entre os referenciais do GPS e do GLONASS tem-se os parâmetros que permitem tal procedimento, estes podem ser encontrados nos trabalhos de Cheng, (1998), Boucher & Altamimi, (2001), Zinoviev, (2005), Gaglione *et al.* (2009) e outros. Nestes trabalhos, o referencial do GLONASS utilizado para transformação é o PZ-90. Segundo Gaglione *et al.* (2009) as coordenadas referenciadas ao WGS84 a partir do PZ90 são dados como:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} -0,47m \\ -0,51m \\ -1,56m \end{bmatrix} + (1 + 22 \cdot 10^{-9}) \begin{bmatrix} 1 & 1,728 \cdot 10^{-6} & -0,017 \cdot 10^{-6} \\ 1,728 \cdot 10^{-6} & 1 & 0,076 \cdot 10^{-6} \\ -0,017 \cdot 10^{-6} & 0,076 \cdot 10^{-6} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{PZ-90} \quad . \quad (2.32)$$

Recentes atualizações do referencial PZ-90 foram realizadas, no caso do referencial PZ-90.02, estabelecido em 2007, os parâmetros de transformação de coordenadas no WGS84 para o PZ-90.02 podem ser encontrados no site da UNOOSA (*United Nations Office for Outer Space Affairs*) (<http://www.unoosa.org/pdf/icg/2014/wg/wgd7.pdf>). Na Tabela 6 os valores referentes à 9ª Reunião do comitê internacional sobre o GNSS, assim, os referidos valores são apresentados:

Tabela 6 – Parâmetros de transformação do sistema de referência WGS84 para o PZ-90.02.

A partir	Para	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	ω_x (mas)	ω_y (mas)	ω_z (mas)	m (ppm)	Época
WGS84	PZ-90.02	+0,36 $\pm 0,10$	+0,08 $\pm 0,10$	-0,18 $\pm 0,10$	0	0	0	0	2002.0

Fonte: UNOOSA (<http://www.unoosa.org/pdf/icg/2014/wg/wgd7.pdf>).

Na tabela acima as colunas onde há as coordenadas X, Y e Z precedidas por Δ estão relacionados às translações em cada eixo, em metros e o ω refere-se à taxa de rotação de cada eixo coordenado, em miliarcos de segundo e m é o fator de escala em partes por milhão.

A mais recente atualização PZ-90.11, estabelecida em 2012 e em utilização desde 2014 apresenta os parâmetros relativos à transformação a partir do WGS84 (G1150). Na apresentação, referente à 8ª Reunião do comitê internacional sobre o GNSS e disponibilizada no site da UNOOSA (*United Nations Office for Outer Space Affairs*) (http://www.unoosa.org/pdf/icg/2013/icg-8/wgD/D3_3_2.pdf), são dados os valores para a devida transformação:

Tabela 7 – Parâmetros de transformação do sistema de referência WGS84 (G1150) para o PZ-90.11.

A partir de	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	ω_x (mas)	ω_y (mas)	ω_z (mas)	m (ppm)	Época
WGS84 (G1150)	-0,013	+0,106	+0,022	-2,300	+3,540	-4,210	-0,008	2010.0

Fonte: UNOOSA (http://www.unoosa.org/pdf/icg/2013/icg-8/wgD/D3_3_2.pdf)

Na Tabela 7 tem-se a mesma notação para o caso dos símbolos utilizados na Tabela 6. Tanto nas respectivas fontes para os valores da Tabela 6 e Tabela 7 podem-se obter valores relativos aos parâmetros de transformação entre os sistemas PZ-90, PZ-90.02 e ITRF2008 para o PZ-90.11. Adicionalmente são disponibilizados os parâmetros de transformação do PZ-90 para o PZ-90.02 e do PZ-90.11 para o ITRF2008.

2.7 Cálculo das órbitas GLONASS

A determinação da posição do receptor requer o conhecimento das posições dos satélites em sua órbita. As informações de órbitas e sistemas de tempo são disponibilizadas nas efemérides, as quais podem ser transmitidas (*Broadcast Ephemerides*) ou precisas (*Precise Ephemerides*).

Para o caso das efemérides transmitidas do GPS, o cálculo da posição do satélite é realizado com base nos elementos keplerianos e parâmetros definidores da órbita. O procedimento para obtenção das efemérides transmitidas e as etapas envolvidas no cálculo das coordenadas dos satélites com base nessas efemérides podem ser encontrados em MONICO (2008 p. 162).

As órbitas GLONASS são disponibilizadas de forma diferente das órbitas GPS e contêm as coordenadas cartesianas do satélite, relacionadas ao sistema de referência, atualmente, PZ-90.11, acompanhadas de suas respectivas velocidades (vetor estado) e acelerações lunissolares com atualização destas informações a cada 30 minutos.

Para o cálculo da órbita de um satélite GLONASS adota-se um modelo dinâmico da órbita (envolve velocidades e forças atuantes no satélite), cuja formulação matemática pode ser encontrada no documento oficial ICD GLONASS (2008). Este documento especifica parâmetros de interface entre o segmento espacial e o segmento de usuário além de incluir informações de interface do bloco GLONASS-M, o mais moderno dos blocos GLONASS. Os elementos das efemérides transmitidas GLONASS relevantes para o cálculo da órbita de um satélite GLONASS podem ser vistos na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8 – Elementos das efemérides transmitidas GLONASS para um satélite.

Elemento	Símbolo	Unidade
Tempo de referência	t_b	Minutos
Correção Relativística	$\gamma_n(t_b)$	adimensional
Erro do relógio do satélite	$\tau_n(t_b)$	segundos
Posição do satélite	$x_n(t_b), y_n(t_b), z_n(t_b)$	Km
Velocidade do satélite	$\dot{x}_n(t_b), \dot{y}_n(t_b), \dot{z}_n(t_b)$	Km/s
Acelerações lunissolares	$\ddot{x}_n(t_b), \ddot{y}_n(t_b), \ddot{z}_n(t_b)$	Km/s ²
Ano da Efeméride	E_n	dias

Fonte: ICD GLONASS (2008).

Para o cálculo da posição do satélite em um determinado instante é necessária a posição e velocidade do satélite em um determinado instante de referência além das forças atuantes sobre o satélite. Então, se aplica a integração numérica da órbita para obtenção da posição do satélite em um instante futuro, que segundo o ICD GLONASS (2008), deve estar dentro de um intervalo de 15 minutos antes e depois do instante de referência.

A acurácia divulgada para as efemérides transmitidas GLONASS podem ser vistas na Tabela 9, onde se nota que as órbitas para os satélites GLONASS-M são mais acuradas.

Tabela 9 – Acurácia das efemérides transmitidas GLONASS.

Componente	Erro médio quadrático			
	Coordenadas (m)		Velocidades (cm/s)	
SV	GLONASS	GLONASS-M	GLONASS	GLONASS-M
Along track (Transversal)	20	7	0,05	0,03
Cross track (Normal)	10	7	0,1	0,03
Radial	5	1,5	0,3	0,2

Fonte: ICD GLONASS (2008).

O vetor estado do satélite é formado pelo menor conjunto de variáveis que permita uma descrição completa de sua órbita, ou seja, conhecida a sua equação dinâmica e respectivas entradas, os seus estados futuros poderão ser previstos, o que geralmente é feito a partir da integração numérica da órbita. Assim, conhecendo as posições, velocidades e forças atuantes sobre o satélite, pode-se calcular a posição do satélite para um determinado instante considerando um intervalo válido. No caso da órbita GLONASS, o intervalo de integração numérica recomendado pelo ICD GLONASS (2008) é de 15 minutos antes e 15 minutos após o tempo de referência. A próxima seção descreve as principais forças atuantes nos satélites.

2.7.1 Principais forças perturbadoras da órbita

O conhecimento preciso da órbita do satélite contribui com os usuários na determinação da sua posição, além de fornecer informações para o sistema de controle, o qual pode atuar aplicando correções de órbita, incluindo possíveis manobras para desvios na trajetória dos satélites, além da manutenção da “saúde” (integridade dos componentes físicos, elétricos e eletrônicos) do satélite (PARDAL, 2011).

Para o conhecimento preciso da órbita é necessária a modelagem das diversas forças perturbadoras atuantes sobre os satélites. No caso de uma órbita Kepleriana, o modelo dinâmico se resume ao problema de dois corpos, onde se

considera apenas a força gravitacional do corpo principal, desconsiderando as demais forças perturbadoras (FERREIRA, 1998; SEEBER, 2003; GOMES, 2004)

Assim, os modelos de determinação de órbita de satélites artificiais em torno da Terra consideram efetivamente as principais forças capazes de influenciar a dinâmica do satélite durante sua órbita. Para o caso da órbita transmitida do GLONASS, as forças perturbadoras consideradas são a constante gravitacional, coeficiente segundo harmônico zonal C_{20} (caracteriza o achatamento polar da Terra) e acelerações devido à perturbação gravitacional lunissolar (ICD GLONASS, 2008).

Uma primeira aproximação da posição do satélite é obtida a partir da equação do movimento considerando apenas o campo gravitacional terrestre (GM) e o raio vetor do satélite (\vec{r}), sendo:

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{GM}{r^3} \vec{r} \quad (2.33)$$

Para o cálculo da órbita, as acelerações devido às forças perturbadoras supracitadas são acrescentadas ao modelo inicial (Equação 2.33). Assim, têm-se as seguintes acelerações atuantes (FERREIRA, 1998; SEEBER, 2003):

$$\ddot{\vec{r}} = \ddot{\vec{r}}_G + \ddot{\vec{r}}_{LS} + \ddot{\vec{r}}_{PR} + \ddot{\vec{r}}_m + \ddot{\vec{r}}_{AT} \quad (2.34)$$

Na Equação (2.34) tem-se:

$\ddot{\vec{r}}$ – Aceleração resultante;

$\ddot{\vec{r}}_G$ – Aceleração devido ao campo gravitacional;

$\ddot{\vec{r}}_{LS}$ – Aceleração Lunissolar;

$\ddot{\vec{r}}_{PR}$ – Aceleração devido à pressão de radiação solar;

$\ddot{\vec{r}}_m$ – Aceleração devido às marés;

$\ddot{\vec{r}}_{AT}$ – Aceleração devido ao arrasto atmosférico.

A principal força que exerce maior influência na órbita dos satélites artificiais, é a força de atração gravitacional, cujo potencial é dado segundo Stewart & Tsakiri (1998):

$$V = \frac{GM}{r} + U \quad (2.35)$$

onde:

U é a parte da força gravitacional cuja equação desenvolvida em harmônicos esféricos é:

$$U(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r}\right)^n \bar{P}_{n,m}(\text{sen}\varphi) [(\bar{C}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{S}_{n,m} \text{sen } m\lambda)] . \quad (2.36)$$

Sendo que :

- a_e - Raio equatorial da Terra;
- r, λ, φ - Raio geocêntrico, longitude e latitude geocêntrica;
- n, m - Grau e ordem da expansão do harmônico esférico (com $n \geq m$);
- $P_m^n(\cos\theta)$ - Funções associadas de Legendre normalizadas; e
- $\bar{C}_{n,m}, \bar{S}_{n,m}$ - Coeficientes dos harmônicos esféricos normalizados.

A aceleração (\ddot{r}) sofrida pelo satélite é calculada considerando o problema de dois corpos. No caso da aceleração devido à força de atração lunissolar considera-se a perturbação gravitacional de um terceiro corpo, no caso, o Sol ou a Lua. Neste problema, um dos três corpos, ou seja, o satélite, tem massa considerada desprezível em relação aos demais. A aceleração considerando o caso da atração da Lua pode ser expressa por (SEEBER, 2003):

$$\ddot{r} = G \left(-\frac{m_T}{|r|^3} r + \frac{m_L}{|\rho_L|^3} \rho_L \right) \quad (2.37)$$

Na Equação (2.37), as massas da Terra e da Lua são representadas por m_T e m_L e r é o raio vetor entre a Terra e o satélite e ρ_L o raio vetor entre a Lua e o satélite. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta tal situação, onde os eixos X, Y e Z possuem origem arbitrária (SEEBER, 2003):

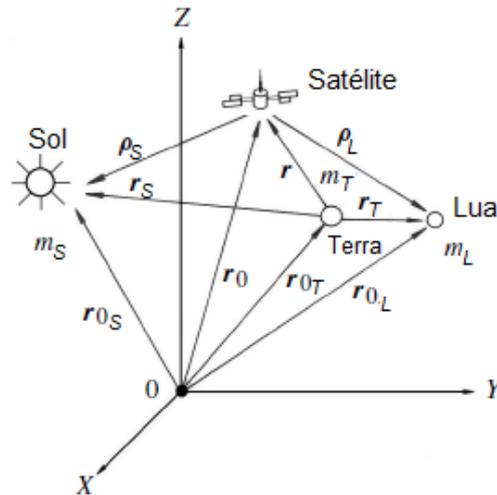


Figura 1 – Problema dos três corpos no caso da atração gravitacional do Sol e Lua sobre um satélite - Adaptado de Seeber (2003).

Com $|\rho| = \rho$, $|r| = r$ e ainda $m_T = M$, sendo a origem do sistema de coordenadas no Geocentro, a equação do movimento dos satélites considerando apenas a perturbação devido à atração lunar pode ser escrita de acordo com Seeber (2003) como:

$$\ddot{r} = -\frac{GM}{r^3}r + G_{m_L} \left(\frac{\rho_L}{\rho_L^3} - \frac{\rho_S}{\rho_S^3} \right) \quad (2.38)$$

Então, para o caso da atração gravitacional do Sol e da Lua agindo sobre o satélite, têm-se respectivamente:

$$\ddot{r}_S = G_{m_S} \left(\frac{r_S - r}{|r_S - r|^3} - \frac{r_S}{r_S^3} \right) \quad (2.39)$$

$$\ddot{r}_L = G_{m_L} \left(\frac{r_L - r}{|r_L - r|^3} - \frac{r_L}{r_L^3} \right) \quad (2.40)$$

Segundo o ICD GLONASS (2008), no cálculo das órbitas GLONASS, os valores das constantes gravitacionais para o Sol e Lua são dados por:

$$G_{m_S} = 0,1325263 * 10^{12} \text{ km/s}^2;$$

$$G_{m_L} = 4902,835 \text{ km}^3/\text{s}^2.$$

Em função dos valores do grau n e ordem m dos harmônicos esféricos (Equação 2.36), estes podem ser classificados em zonais, setoriais e tesserais. Quando $m=0$, a superfície harmônica depende apenas da colatitude e tem-se o harmônico zonal, se $n - m = 0$, então dependerá apenas da latitude, sendo classificado como harmônico setorial e quando $m > 0$ e a diferença $n - m = 0$ indica que depende somente da longitude e é denominado harmônico tesseral (GEMAEL, 1999).

A Equação (2.36) pode ser simplificada baseada na insignificância do harmônico tesseral para um curto intervalo de tempo, em contraste com a significância muito maior do harmônico zonal, o qual é dependente de latitude. Assim, tem-se:

$$U = -\frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r}\right)^{n+1} J_n P_n(\cos \theta) \quad . \quad (2.41)$$

a qual depende do harmônico zonal J_n ($J_2 = -C_{20}$), denominado também de “fator dinâmico de órbita”, o qual está em função de r e θ apenas. O seu valor é baseado na relação entre a força centrífuga no equador e a gravidade normal equatorial e ainda no achatamento do modelo do elipsoide adotado.

No caso dos satélites GLONASS o valor utilizado com base no sistema de referência PZ-90.11 é de (ICD GLONASS 2008):

$$C_{20} = -484165,0 \times 10^{-9}.$$

Os erros provocados na órbita devido a não consideração dos principais elementos perturbadores após uma hora de integração são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Forças perturbadoras agindo nos satélites GLONASS.

Forças Pertubadoras	Magnitude após 1h (m)
$J_2 = -C_{20}$	300
$J_n (n>2)$	0,6
Não-zonal	0,06
Gravidade Lunar	40
Gravidade Solar	20
Pressão da Radiação Solar	0,6

Fonte: STEWART & TSAKIRI (1998 p. 19).

Na tabela acima percebe-se que o erro devido a não consideração do termo J_2 é relativamente muito maior que os demais, entretanto as outras forças perturbadoras também se acumulam com o tempo e os efeitos da gravidade lunar e solar são dominantes em relação às outras forças.

Substituindo o termo $P_2(\cos^2\theta) = 3/2 \cos^2\theta - 1/2$ (Polinômio de Legendre para grau 2), a Equação (2.36) pode ser reescrita como:

$$U = -\frac{GMa_e^2}{r^3} J_2 \left(\frac{3}{2} \cos^2\theta - \frac{1}{2} \right) \quad . \quad (2.42)$$

Assumindo $z = r\cos\theta$, a Equação (2.42), é dada por:

$$U = -\frac{GMa_e^2}{r^3} J_2 \left(\frac{3}{2} \frac{z^2}{r^2} - \frac{1}{2} \right) \quad . \quad (2.43)$$

O vetor aceleração do satélite é obtido a partir do gradiente do potencial gravitacional (∇U) (STEWART & TSAKIRI, 1998; STATELLA *et al.* 2013):

$$\ddot{\mathbf{r}} = \nabla V \quad . \quad (2.44)$$

Assim, tem-se:

$$\ddot{R}_i = \frac{dV}{dR_i} = \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial R_i} + \frac{\partial V}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial R_i} + \frac{\partial V}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial R_i} \quad (2.45)$$

R_i é uma das componentes do vetor posição (x, y, z) . Como a Equação (2.42) é dependente apenas de r e θ , assim $\frac{\partial V}{\partial \lambda}$ é zero, e ainda o último termo da Equação (2.45) é muito menor que o termo radial desta mesma equação e é negligenciado (ICD GLONASS, 2008).

Substituindo a Equação (2.43) na Equação (2.45) e desenvolvendo os termos a partir da Equação (2.37) dados, têm-se segundo STEWART & TSAKIRI (1998):

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}x + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_e^2}{r^5}x\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \ddot{x}_{LS} \\ \frac{dV_y}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}y + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_e^2}{r^5}y\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \ddot{y}_{LS} \\ \frac{dV_z}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}z + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_e^2}{r^5}z\left(3 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \ddot{z}_{LS} \end{aligned} \quad (2.46)$$

em que \ddot{x}_{LS} , \ddot{y}_{LS} e \ddot{z}_{LS} são as acelerações lunissolares no satélite. É importante notar que o modelo orbital negligencia forças perturbadoras menores como as componentes não zonais do campo gravitacional e a pressão da radiação solar. O conjunto de equações (2.46) apresenta apenas a componente radial negligenciando a componente dependente da colatitude, o que pode produzir erros significantes na determinação da órbita em função do tempo. Por esta razão o modelo orbital de forças é recomendado para uso considerando intervalos de tempo de 30 minutos sendo 15 minutos antes e 15 minutos depois do tempo de referência das efemérides transmitidas (STEWART & TSAKIRI, 1998).

2.7.2 Integração numérica do modelo orbital de forças

A integração numérica da órbita de um satélite tem por objetivo calcular a trajetória do satélite sujeito a ação do campo gravitacional e demais perturbações, conhecendo-se a sua posição e velocidade iniciais em uma época de referência. O cálculo pode ser realizado através de métodos de resolução de equações diferenciais do movimento (GOMES, 2004).

No caso da orbita GLONASS, a equação dos movimentos dos satélites é dada, de tal forma que, o vetor aceleração pode ser representado em função do tempo, posição e velocidade da seguinte forma (ICD GLONASS, 2008; POLEZEL, 2010):

$$\ddot{\vec{r}} = f(t, \vec{r}, \dot{\vec{r}}) . \quad (2.47)$$

A integração variando do tempo inicial (t_0) até o tempo (t) é escrita como:

$$\dot{\vec{r}}(t) = \dot{\vec{r}}(t_0) + \int_{t_0}^t \ddot{\vec{r}} dt . \quad (2.48)$$

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{\vec{r}} dt . \quad (2.49)$$

A integração do vetor aceleração é realizada duas vezes nas equações (2.47 e 2.48) e se obtém assim a posição do satélite. A integração da órbita como descrito no conjunto de equações (2.46) deve ser realizada em um sistema inercial, pois as leis de Newton que regem as forças perturbadoras são válidas apenas para referenciais inerciais. Desta forma, o vetor estado inicial deve ser transformado do sistema terrestre para o celeste e após o processo de integração numérica, transforma-se novamente a posição do satélite para o sistema terrestre, no caso do GLONASS, o PZ-90.11 (STEWART & TSAKIRI, 1998; POLEZEL, 2010).

A transformação a ser usada para relacionar o ITRS (*International Terrestrial Reference System*) para o GCRS (*Geocentric Celestial Reference System*) é dada considerando a atual resolução, IAU (*International Astronomical Union*) 2000:

$$[GCRS] = Q(t)R(t)W(t)[ITRS] . \quad (2.50)$$

Em que:

$Q(t)$ - matriz de rotação resultante do movimento do polo;

$R(t)$ - matriz de rotação resultante do ângulo de rotação da Terra;

$W(t)$ - matriz de rotação resultante do movimento do polo celeste no sistema celeste (precessão e nutação).

A matriz $Q(t)$ é obtida a partir de:

$$Q(t) = R_3(s') + R_2(-x_p) + R_1(-y_p) . \quad (2.51)$$

Sendo s' uma quantidade que proporciona a posição do TIO (*Terrestre Intermediate Origin*) referenciada no ITRS. Pode ser obtida através da expressão (PETIT & LUZUM, 2010):

$$s' = -47uas t \quad (2.52)$$

sendo, uas , a unidade de medida microssegundos de arco.

A matriz $R(t)$ é obtida através do ângulo de rotação da Terra ($\theta(t)$) medido sobre o equador do CIP (*Celestial Intermediate Polo*), entre o CIO (*Celestial Intermediate Origin*) e o TIO (*Terrestrial Intermediate Origin*). O ângulo de rotação da Terra está relacionado à medida UT1 (PETIT & LUZUM, 2010) através de:

$$\theta(Tu) = 2\pi(0,7790572732640 + 1,00273781191135448Tu) . \quad (2.53)$$

Onde o termo Tu na expressão acima é dado por ($Tu = Data\ Juliana\ em\ UT1 - 2451545,0$).

A matriz $Q(t)$ é obtida por:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 1 - ax^2 & -axy & x \\ -axy & 1 - ay^2 & y \\ -x & -y & 1 - a(x^2 + y^2) \end{bmatrix} \cdot R_3(s) \quad (2.54)$$

em que x e y são coordenadas que fornecem a posição do CIP no sistema celeste e o termo $a=1/2 + 1/8 (x^2 + y^2)$. A quantidade s fornece a posição do CIO no equador do CIP.

O IERS disponibiliza código fonte de sub-rotinas em linguagem de programação FORTRAN (*FORmula TRANslation System*) para a implementação da resolução IAU 2000/2006. No site do SOFA (*Standards of Fundamental Astronomy*) são disponibilizadas diversas sub-rotinas relacionadas à resolução IAU. Considerando as transformações descritas acima o ICD GLONASS (2008) disponibiliza o conjunto de equações para a obtenção final das acelerações no sistema celeste, o qual aplica um processo simplificado de transformação. Ao conjunto de Equações (2.46) são acrescentadas as acelerações devido às forças perturbadoras, lunissolar e geopotencial e apresentadas como:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}x + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_e^2}{r^5}x\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \omega_e^2x + 2\omega_e V_y + \ddot{x}_{LS} \\ \frac{dV_y}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}y + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_e^2}{r^5}y\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \omega_e^2y - 2\omega_e V_x + \ddot{y}_{LS} \\ \frac{dV_z}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}z + \frac{3}{2}C_{20}\frac{GMa_e^2}{r^5}z\left(3 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \ddot{z}_{LS} \end{aligned} \quad (2.55).$$

O termo ω_e representa a velocidade angular da Terra dado em *rad/s* (*radianos/segundos*). A integração numérica do modelo dinâmico, geralmente, é

realizada a partir do método de Runge-Kutta, o qual será brevemente descrito a seguir.

2.7.3 Método Runge-Kutta

A propagação de órbita é classificada por: método analíticos, semi-analíticos e numéricos. Os métodos numéricos utilizam procedimentos de cálculo passo a passo. Em tais métodos aproximações polinomiais da trajetória são realizadas, integrando exatamente um polinômio com truncamento até certo grau (GOMES, 2004).

O método de integração numérica recomendado para a integração das órbitas GLONASS é o de Runge-Kutta de 4ª ordem, sendo este um dos métodos mais populares que proporciona resultados com boa acurácia.

Com base na integração numérica por Runge-Kutta é possível utilizar o valor atual de uma dada função para prever o valor em um instante qualquer, aproximando uma extrapolação da série de Taylor por vários cálculos das primeiras derivadas em pontos pertencentes ao intervalo de extrapolação. A ordem de um membro particular da família é a ordem da potência mais alta do tamanho do passo h na expansão da série de Taylor equivalente (GOMES, 2004).

A Figura 2 exemplifica o processo de integração numérica:

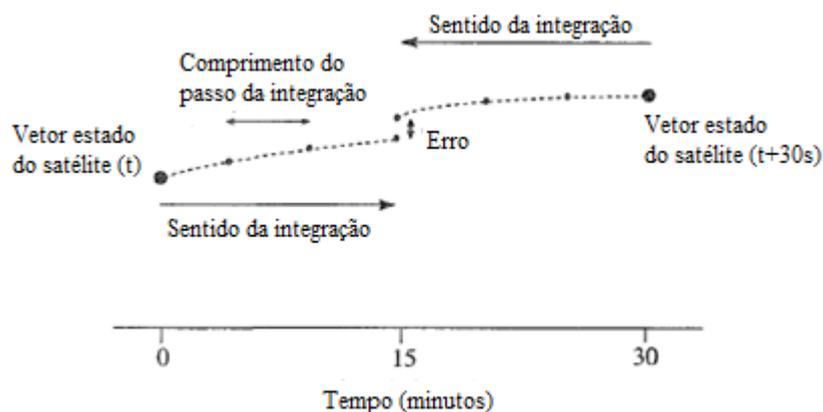


Figura 2 – Ilustração do conceito de integração nas efemérides GLONASS.

A integração numérica pode ser definida da seguinte forma:

$$\bar{r}_{n+1} = \bar{r}_n + ak_1 + bk_2 + ck_3 + dk_4 \quad (2.56)$$

sendo a , b , c e d constantes e k_i estimado a partir de $f(t, \bar{r}, \dot{\bar{r}})$. Os coeficientes são estimados a partir da expansão por Taylor das componentes de \bar{r}_{n+1} aproximada por \bar{r}_n . Para calcular as componentes de posição, velocidade e aceleração no instante qualquer t_{n+1} para a componente no instante t_i (STEWART & TSAKIRI, 1998; POLEZEL, 2010):

$$t_{i+1} = t_i + h . \quad (2.57)$$

O termo h é o comprimento da integração em segundos. Então se tem as componentes para aceleração, velocidade e posição para o instante t_i abaixo:

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{r}}_i &= (\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i) \\ \dot{\bar{r}}_i &= (\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i) = (u_i, v_i, w_i) . \\ \bar{r} &= (x_i, y_i, z_i) \end{aligned} \quad (2.58)$$

As componentes individuais da aceleração são calculadas em função do tempo, posição e velocidade, representadas pelo modelo de forças dado no conjunto de Equações (2.55) são escritas a seguir, considerando-se ainda a troca de variáveis relacionada ao vetor velocidade na segunda expressão do conjunto de equações (2.53), como:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i &= f_1(t_i, u_i, v_i, w_i, x_i, y_i, z_i) \\ \ddot{y}_i &= f_2(t_i, u_i, v_i, w_i, x_i, y_i, z_i) \\ \ddot{z}_i &= f_3(t_i, u_i, v_i, w_i, x_i, y_i, z_i) \end{aligned} \quad (2.59)$$

O vetor velocidade é calculado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} u_i &= \left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=t_i} = f_4 \\ v_i &= \left(\frac{dy}{dt}\right)_{t=t_i} = f_5 \\ w_i &= \left(\frac{dz}{dt}\right)_{t=t_i} = f_6 \end{aligned} \quad (2.60)$$

As fórmulas completas do método de Runge-Kutta de 4ª ordem para as equações diferenciais de segunda ordem, escritas na forma da equação principal do método (2.56) são (STEWART & TSAKIRI, 1998):

$$\begin{aligned} u_{i+1} &= u_i + \frac{1}{6}(k_{11} + 2k_{12} + 2k_{13} + k_{14}) \\ v_{i+1} &= v_i + \frac{1}{6}(k_{21} + 2k_{22} + 2k_{23} + k_{24}) \\ w_{i+1} &= w_i + \frac{1}{6}(k_{31} + 2k_{32} + 2k_{33} + k_{34}) \\ x_{i+1} &= x_i + \frac{1}{6}(k_{41} + 2k_{42} + 2k_{43} + k_{44}) \\ y_{i+1} &= y_i + \frac{1}{6}(k_{51} + 2k_{52} + 2k_{53} + k_{54}) \\ z_{i+1} &= z_i + \frac{1}{6}(k_{61} + 2k_{62} + 2k_{63} + k_{64}) . \end{aligned} \quad (2.61)$$

Os coeficientes k_{nm} dependem das funções f_1, f_2, \dots, f_6 advindas dos conjuntos de equações (2.59 e 2.60) e dos comprimentos dos passos de integração h , os quais são dados em segundos (POLEZEL, 2010).

2.8 Diluição da Precisão DOPs

A precisão dos parâmetros estimados no posicionamento GNSS está diretamente relacionada com a precisão das observações, da modelagem matemática aplicada e da geometria dos satélites. Em termos de geometria, utiliza-

se os DOPs, calculados em função da precisão dos parâmetros (δ_{param}) (MACHADO & MONICO, 2002; SEEBER, 2003).

Na literatura são facilmente encontrados diferentes tipos de DOPs e a relação matemática com a precisão dos parâmetros a serem estimados. Tais como:

- HDOP – relacionado com as coordenadas horizontais do posicionamento;
- VDOP – relacionado com as coordenadas verticais do posicionamento;
- PDOP – relacionado com as coordenadas 3D do posicionamento;
- GDOP – acrescentando-se as precisões nas determinações de tempo ao PDOP;
- ADOP – relacionado com as ambiguidades.

O HDOP, VDOP, PDOP e GDOP são calculados utilizando as precisões estimadas dos parâmetros. Para o caso do Posicionamento por Ponto da MVC (Matriz de Variância e Covariância) pode ser representada por:

$$\Sigma_{Xa} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_{xt} & \sigma_{yt} & \sigma_{zt} & \sigma_t^2 \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

assim, o cálculo dos principais DOPs, com base na Equação (2.62), são:

$$PDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (2.63)$$

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2} \quad (2.64)$$

2.9 Integridade no PPP com GPS/GLONASS

A acurácia, integridade e disponibilidade podem ser utilizadas em um sistema de posicionamento como indicadores estatísticos de qualidade, os quais representam a confiança no sistema. Os parâmetros de qualidade não são independentes, uma vez que a integridade garante a confiabilidade e a acurácia deve atender a determinado requisito. A continuidade é a disponibilidade sobre um intervalo de tempo, a disponibilidade então requer que todos os requisitos apresentados tenham sido atendidos em qualquer instante (BARBOSA, 2010).

No caso da integridade, seu conceito é comumente utilizado na aviação civil sendo denominada de RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*). O monitoramento da integridade é realizado com base nas medidas de pseudodistância e este tema tem sido investigada por muitos anos envolvendo aplicações, como por exemplo, fases de vôo envolvendo aproximações não precisas. Para aplicações que exigem alta acurácia deve ser utilizado o monitoramento da integridade realizado com base nas medidas da fase da onda portadora – CRAIM (*Carrier phase-based RAIM*) ou ainda a possibilidade de utilização dos dois tipos de monitoramento (fase e código) em conjunto (FENG, 2009).

Feng (2009) propõe ainda uma nova algoritmo de monitoramento da integridade com base na fase da onda, o monitoramento nesta forma é realizado usando Filtro de Kalman, neste caso, a resolução inteira de ambiguidades torna-se a maior questão. No caso do método CRAIM apresentado por Feng *et al.* (2009) e Feng *et al.* (2010) as medidas de pseudodistância e fase da onda, ambas obtidas com combinação ion-free, são agrupadas no filtro de kalman. Neste método ocorre a separação em dois níveis de proteção, o horizontal e o vertical, respectivamente HPL e VPL, os quais são calculados como valores máximos por uma questão conservadora, estimando assim os valores em situações desfavoráveis. (OCHIENG *et al.* 2008; JOKINEN *et al.* 2011):

$$HPL = \max(HPL_1, HPL_2) \quad (2.67)$$

$$VPL = \max(VPL_1, VPL_2) \quad (2.68)$$

Onde os índices 1 e 2 referem-se a sucessivas épocas calculadas no algoritmo, o qual tem maiores detalhes com respectivos cálculos apresentados nas referências (OCHIENG *et al.* 2008; FENG, 2009; JOKINEN *et al.* 2011).

A integridade pode ser definida como uma medida de confiança que se pode ter sobre a exatidão das informações fornecidas por um sistema de navegação, isto é, a capacidade que o sistema tem de informar aos usuários quando o sistema não deve ser utilizado (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF *et al.* 2007; MONICO, 2008).

Dentro da integridade têm-se parâmetros comumente utilizados na aviação civil, tais como o AL (*Alarm Limit*), quando, em termos de posição, o erro máximo tolerável é excedido, o TTA (*Time To Alarm/Alert*), o qual é relativo ao tempo especificado para o alarme. Existem também os níveis de proteção PL (*Protection Levels*) usados para a descrição e risco da Integridade, uma vez que o erro verdadeiro instantâneo é desconhecido, sendo denotado o erro de posição PE (*Position Error*) máximo admissível antes que o alarme seja disparado. Assim, têm-se integridade garantida quando $PL > PE$, mas quando $PL > AL$ perde-se a integridade e o alarme é disparado e, por conseguinte os outros indicadores de qualidade também são perdidos (HOFMANN-WELLENHOF *et al.* 2007; BARBOSA, 2010).

Existem duas componentes para o PL, a componente horizontal do PL denotada por HPL (*Horizontal Precision Level*) e a vertical por VPL (*Vertical Precision Level*), ambas dadas em Hofmann-Wellenhof *et al.* (2007) como:

$$VPL = k_{VPL} \sigma_0 \sqrt{\sigma_{uu}} \quad (2.69)$$

$$HPL = k_{HPL} \sigma_0 \sqrt{\frac{\sigma_{nn}^2 + \sigma_{ee}^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{nn}^2 + \sigma_{ee}^2}{2}\right)^2 + \sigma_{ne}^2}} \quad (2.70)$$

Onde σ_{nn}^2 , σ_{ee}^2 , σ_{uu}^2 , σ_{ne}^2 , representam as variâncias das coordenadas estimadas propagadas para o Sistema Geodésico Local (E, N, U). O processo de transformação para o SGL (Sistema Geodésico Local), utilizando a MVC e

respectiva propagação, pode ser encontrado em várias literaturas tais como: Seeber (2003) e Torge (2001), Hoffman-Wellenhof *et al.* (2007).

Segundo Dalmolin (2004), com a propagação de covariâncias é possível a obtenção de características estocásticas das variáveis funcionalmente dependentes, a partir das características das variáveis independentes, desde que as variáveis dependentes e as independentes tenham uma relação entre si conhecida.

A propagação para o caso de uma transformação de coordenadas, segundo Gemael (1994) e Aguiar *et al.* (2002), consiste em determinar as propriedades estocásticas das coordenadas transformadas, a partir das propriedades das coordenadas originais. Mesmo que as coordenadas originais sejam independentes, não correlacionadas, as coordenadas transformadas não necessariamente tem a mesma característica, pois o próprio modelo matemático é dado por uma função que correlaciona essas coordenadas.

Partindo da MVC do sistema de coordenadas cartesianas tridimensional pela expressão 2.64

$$\Sigma_{XYZ} = \begin{bmatrix} \sigma_{XX}^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{XY} & \sigma_{YY}^2 & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{XZ} & \sigma_{YZ} & \sigma_{ZZ}^2 \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

A Figura 3 mostra a transformação para o SGL das coordenadas cartesianas de um ponto qualquer i , onde os eixos X , Y , Z representam os eixos do sistema de coordenadas cartesianas:

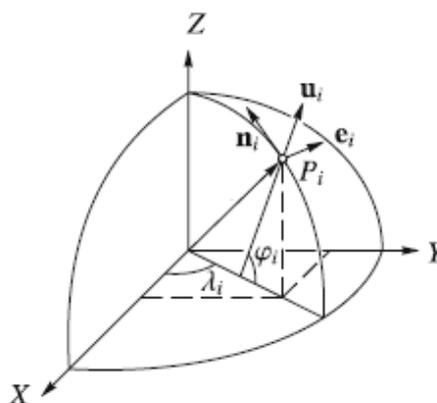


Figura 3 – Representação gráfica da transformação das coordenadas para o SGL. (Fonte: HOFMANN-WELLENHOF *et al.* 2007).

Assim, os eixos do sistema geodésico local no ponto i (e_i, n_i, u_i) são dados pelo conjunto de expressões seguintes:

$$e_i = \begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda_i \\ -\text{cos}\varphi_i \\ 0 \end{bmatrix}; \quad n_i = \begin{bmatrix} -\text{sen}\varphi_i \text{cos}\lambda_i \\ -\text{sen}\varphi_i \text{sen}\lambda_i \\ -\text{cos}\varphi_i \end{bmatrix}; \quad u_i = \begin{bmatrix} \text{cos}\varphi_i \text{cos}\lambda_i \\ \text{cos}\varphi_i \text{sen}\lambda_i \\ \text{sen}\varphi_i \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

Com base no conjunto de equações 2.72 monta-se a matriz de rotação R , a qual é dada por:

$$R_i = \begin{bmatrix} -\text{sen}\varphi_i \text{cos}\lambda_i & -\text{sen}\lambda_i & \text{cos}\varphi_i \text{cos}\lambda_i \\ -\text{sen}\varphi_i \text{sen}\lambda_i & -\text{cos}\varphi_i & \text{cos}\varphi_i \text{sen}\lambda_i \\ -\text{cos}\varphi_i & 0 & \text{sen}\varphi_i \end{bmatrix} \quad (2.73).$$

A lei de propagação da matriz variância-covariância permite obter a MVC das coordenadas no SGL utilizando a matriz de rotação R :

$$\Sigma_{neu} = R\Sigma_{XYZ}R^T \quad (2.74).$$

Têm-se nesse caso a seguinte expressão, com a qual as variâncias e covariâncias apresentadas formam a MVC das coordenadas no SGL:

$$\Sigma_{neu} = \begin{bmatrix} \sigma_{nn} & \sigma_{ne} & \sigma_{nu} \\ \sigma_{ne} & \sigma_{ee} & \sigma_{eu} \\ \sigma_{nu} & \sigma_{eu} & \sigma_{uu} \end{bmatrix} \quad (2.75).$$

Nas Equações 2.69 e 2.70, σ_0 representa o sigma *a priori*, k refere-se à escala de variação da posição a um nível compatível com a exigência de integridade. Assim, no caso da aviação civil são adotados para aproximações

precisas, os níveis de proteção horizontal e vertical, respectivamente, de 5,33 e 6,00 (BARBOSA, 2010).

O objetivo ao se monitorar a integridade é determinar se um sistema ou se uma medida atende aos requisitos de desempenho de um sistema de navegação. O monitoramento da integridade é utilizado para integrar, disseminar ou complementar um sistema de navegação, por exemplo, o GBAS. Além disso, com estações de monitoramento contínuo pode-se monitorar o sinal do satélite e enviar informações, sobre qualquer comportamento errôneo, ao usuário (HOFMANN-WELLENHOF *et al.* 2007; BARBOSA, 2010).

Nos serviços de monitoramento da integridade, uma rede de estações analisa a condição dos sinais dos satélites quanto à sua integridade. Como no RTK em rede é utilizado uma rede de estações, também é possível implementar o monitoramento desse elemento. No entanto, esse elemento ainda não é de uso comum na Geodésia, requerendo investigações no que concerne a quantificação, padronização e certificação (BARBOSA, 2010).

Nesta pesquisa, cálculos dos valores de integridade foram realizados ao considerar o PPP utilizando somente GPS e GPS/GLONASS, cujo objetivo é verificar a melhoria na determinação da integridade ao aplicar a integração de sistemas no posicionamento.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização de experimentos e análises foi utilizado o *software* GPSPPP (Versão 1.05) do NRCAN, licenciado para o DEPARTAMENTO DE Engenharia Cartográfica) da UFPE para fins de pesquisa. Esta versão do GPSPPP permite processar os dados GPS e GLONASS no modo PPP e com acesso ao *software* é possível modificar, por exemplo, parâmetros de entrada e configurações, tal como, a precisão das medidas, o tipo de órbita a ser utilizada, etc.

Nos processamentos PPP, em geral, foram utilizadas as configurações apresentadas na Tabela 11:

Tabela 11 – Principais configurações usadas no processamento do PPP.

OBSERVÁVEIS	CÓDIGO E FASE
FREQUÊNCIAS HABILITADAS	L1 e L2
MÁSCARA DE ELEVAÇÃO	10°
COMBINAÇÃO EM L1 e L2	ION-FREE
TIPO DE ÓRBITAS	PRECISAS (Formato .sp3)
TIPO DE RELÓGIOS	Finais de 30s (Formato .clk)
ALTURA DE ANTENA	VARIÁVEIS EM RELAÇÃO A CADA ESTAÇÃO
PRECISÃO (PSEUDODISTÂNCIA)	1,00 m
PRECISÃO (FASE DA ONDA)	0,010 m

No caso do processamento PPP cinemático, a precisão das observações foi degradada de 1 m para 2 m no caso do código e de 0,01m para 0,02 m no caso da fase. Esta estratégia foi adotada após a obtenção dos primeiros resultados, onde se verificou que o GPSPPP retira as medidas do satélite com possível erro grosseiro do processamento fazendo com que muitas épocas não apresentem solução por falta de redundância.

Os resultados obtidos no posicionamento são analisados no contexto do PPP cinemático, tais como os que envolvem a estimativa das precisões e GDOPs. Os DOPs são importantes indicadores de avaliação da qualidade do posicionamento por estarem diretamente relacionados com as precisões das observações (Seção 2.8).

Tratando-se das precisões dos parâmetros envolvidos no PPP com integração tem-se a obtenção da MVC dos parâmetros, o que permite a observação do nível de melhoria na precisão dos parâmetros estimados. Os dados são relativos às soluções apenas GPS e integração GPS/GLONASS. As precisões dos parâmetros foram a princípio analisados com base na inversa da matriz N, a qual requer o conhecimento da matriz A do ajustamento.

Experimentos foram realizados com o objetivo de analisar como a integração GPS/GLONASS influencia no parâmetro de qualidade chamado integridade (seção 2.9). A integridade de um sistema de navegação possui níveis de proteção (PL), os quais podem ter suas componentes, horizontal (HPL) e vertical (VPL), calculadas em função das precisões contendo somente a precisão das coordenadas no SGL.

Neste caso, foram processados no PPP cinemático os dados GNSS coletados da estação RECF referente ao dia 14/10/2013 (Semana GPS: 1752). Assim, foi possível obter as precisões nas coordenadas (X, Y, Z), onde através da transformação entre sistemas de referência puderam-se obter as precisões nas coordenadas do SGL (ver seção 2.9).

Com relação ao PPP tanto no modo estático e cinemático foram realizadas análises da acurácia posicional ao utilizar somente dados GPS e utilizando GPS e GLONASS. Para a análise da acurácia foi utilizado o EMQ, o qual envolve valores de precisão ($\sigma_{medidas}^2$) e tendência ($bias^2$). O EMQ é dado segundo Monico *et al.* 2009 pode ser calculado da seguinte forma:

$$EMQ = \sqrt{\sigma_{medidas}^2 + bias^2}. \quad (3.1).$$

No PPP estático, foram utilizados dados GNSS coletados em cinco estações RBMC, quais sejam: BOAV (Boa Vista - RR), GOJA (Jataí - GO), PPTE (Pres.

Prudente-SP), RECF (Recife/PE), UFPR (Curitiba – PR). As referidas estações foram escolhidas considerando diferentes latitudes ao longo do Brasil e ainda por estarem envolvidas em condições atmosféricas específicas em diversas regiões do território nacional (Figura 4).



Figura 4 – Distribuição das estações RBMC escolhidas.

A estratégia de processamento envolveu dados GNSS diários referentes ao ano de 2013, gerando assim série temporal anual para cada estação. Cada arquivo em formato RINEX (versão 2.11) (*Receiver Independent Exchange Format*) foi submetido ao *software* “TEQC” disponibilizado pela UNAVCO (*Non-profit University-governed Consortium*), o qual permitiu a retirada dos dados GLONASS e assim pôde-se realizar o processamento dos arquivos com observações somente GPS e em seguida GPS/GLONASS.

Ao final do processamento dos dados no modo PPP as coordenadas estimadas foram comparadas com as coordenadas de referência obtidas a partir da rede SIRGAS-CON (solução em ITRF 2008) com a devida atualização para a época da coleta dos dados.

Os erros em coordenadas cartesianas foram transformados para o Sistema Geodésico Local. Neste caso, o sistema de eixos do SGL é centrado na latitude e longitude média de todo o período de processamento e as análises foram realizadas em termos de discrepância nas coordenadas referenciadas ao SGL, ou seja, DE, DN e DU, além do EMQ.

A análise de acurácia foi realizada com base no EMQ. Além disto, a análise das precisões estimadas das coordenadas foram realizadas, bem como análises dos valores de DOP.

O posicionamento relativo cinemático foi realizado visando obter coordenadas de referências para comparações com o PPP cinemático. Neste caso, o receptor GNSS Hiper Lite+ foi posicionado no vértice geodésico no prédio do CTG (Centro de Tecnologias e Geociências), especificamente no topo do LAASTRO (Laboratório de Astronomia) da UFPE (Figura 5), o qual possui as coordenadas conhecidas, enquanto o outro receptor GNSS Hiper Lite+ (Rover) foi fixado em um veículo (Figura 6) que realizou a trajetória por diversos pontos nos arredores da cidade do Recife com taxa de coleta de 1 segundo (Figura 7), os dados do levantamento são do dia 24/07/2014 (Dia do ano: 208, semana GPS: 1803).

Neste caso, tem-se uma trajetória cinemática considerando o caso urbano onde existem diversas obstruções aos sinais GNSS tal como pontes, viadutos, prédios e outros, além do movimento inerente ao automóvel. As coordenadas do posicionamento relativo com dados GPS/GLONASS foram utilizadas como referência para a devida comparação com as coordenadas e precisões estimadas no PPP cinemático. O processamento dos dados foi realizado com o *software Topcon Tools* (versão 8.2) e as análises foram realizadas com base nas discrepâncias das coordenadas estimadas entre o processamento usando apenas dados GPS e dados da integração GPS/GLONASS, além das precisões das coordenadas.



Figura 5 – Antena GNSS Hiper Lite+ (Base) fixa no ponto LAASTRO (Laboratório de Astronomia).



Figura 6 – Antena GNSS Hiper Lite+ (Rover) fixa no automóvel

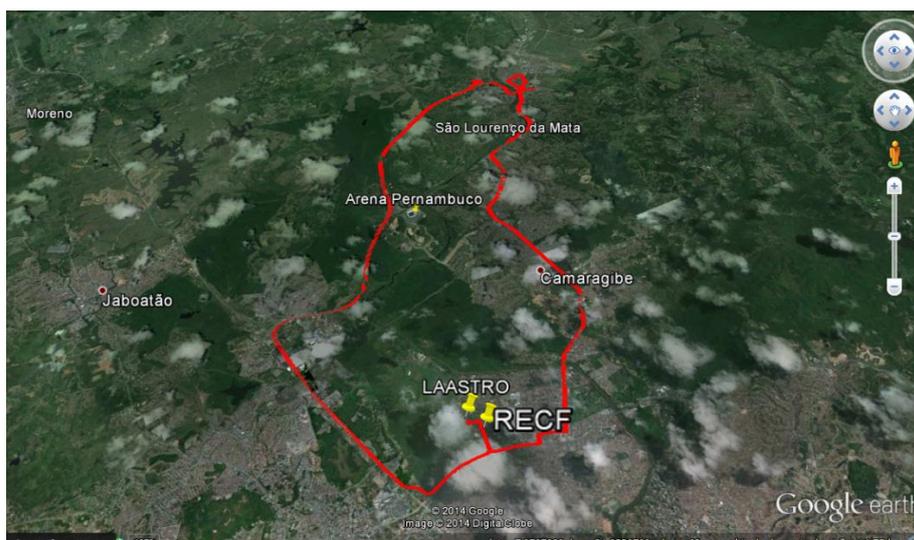


Figura 7 – Trajetória do levantamento relativo cinemático. (Fonte: Google Earth)

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção serão apresentados os resultados e análises dos experimentos realizados no PPP com integração GPS/GLONASS (ver seção 3). A próxima seção apresenta a análise de precisões e DOPs baseada na MVC (inversa da matriz N) da etapa de planejamento.

4.1 Análise inicial da precisão e DOPs

A montagem da matriz A do ajustamento não requer que se conheçam as observações de código e fase propriamente dita. Pode-se desta forma montar a matriz A (ver seção 2.4) que juntamente com a matriz dos pesos permite calcular a matriz N, cuja inversa é a MVC de parâmetros. Desta forma, foi verificado o nível de melhoria esperado em termos de precisão ao se aplicar a integração dos dados GPS/GLONASS no método PPP.

Neste experimento foram utilizadas as posições dos satélites obtidas na época (00:00:00 horas à 0:00:15 horas) da efeméride precisa referente ao dia 14/10/2013 (Semana GPS: 1752), considerando os satélites GPS e GLONASS cujas medidas foram coletados pelo receptor na estação RECF (Recife – PE) na referida época. A Tabela 12 apresenta as precisões calculadas no experimento ao usar somente GPS e GPS/GLONASS.

Tabela 12 – Precisões dos parâmetros estimados

PARÂMETROS	σ - PRECISÕES CALCULADAS (m)		MELHORIAS σ (%)
	APENAS GPS	GPS + GLONASS	
X	0,696	0,519	25,44
Y	1,066	0,676	36,57
Z	0,662	0,518	21,67
c_dtr	0,421	0,411	2,38
c_dtsys	-	0,711	-
NG01	6,215	5,978	3,81
NG08	7,190	6,375	11,34
NG11	5,881	5,784	1,65
NG15	7,187	6,695	6,84
NG19	5,985	5,886	1,64
NG23	6,089	5,845	4,00
NG27	6,244	5,925	5,11
NG32	6,095	5,883	3,47
NR02	-	6,426	-
NR06	-	6,599	-
NR13	-	6,191	-
NR15	-	6,000	-
NR18	-	6,136	-
NR24	-	6,200	-

Os resultados apresentados na Tabela 12 verifica-se que houve melhorias percentuais em todos os parâmetros analisados quando utilizados dados da integração GPS/GLONASS. Quanto aos parâmetros relacionados às coordenadas as melhorias com a integração GPS/GLONASS foi, em média, 27,9%, para os parâmetros relacionados ao erro do relógio do receptor, foi de 2,38%. É importante também notar na Tabela 12 que ocorreram melhorias nas precisões das ambiguidades GPS com o uso de dados da integração, em média, 4,7%.

Os valores de DOP, GDOP e ADOP, calculados com base nas precisões estimadas (Tabela 12) são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – DOPs calculados com base nas precisões obtidas

PDOP (m)		GDOP (m)		ADOP (m)	
Apenas GPS	GPS / GLONASS	Apenas GPS	GPS / GLONASS	Apenas GPS	GPS / GLONASS
1,435	0,998	1,496	1,292	6,178	5,968

Na Tabela 13 os valores de DOPs calculados para o posicionamento apresentaram menores valores para as situações onde houve uso de dados da integração GPS/GLONASS. A integração GPS/GLONASS influenciou também diretamente nas precisões das ambiguidades, sobre os quais se calcula o ADOP, o qual apresentou melhor resultado para o caso da integração. Um menor valor do ADOP indica uma maior probabilidade de ter a resolução da ambiguidade, e assim melhores estimativas dos parâmetros e maior qualidade no posicionamento. Uma análise mais profunda das medidas de ADOP pode ser encontrada em Teunissen *et al.* (1999) e Monico *et al.* (2014).

Os valores de GDOP também foram analisados para um caso de coletas de dados na estação RECF no dia 14/10/2013 (Semana GPS: 1752). Neste caso, foi aplicado o PPP no modo cinemático e os valores de GDOP foram analisados considerando as soluções apenas com dados GPS e com dados GPS/GLONASS. A Figura 8 apresenta a relação entre a quantidade de satélites visíveis e os GDOPs estimados em cada época do levantamento.

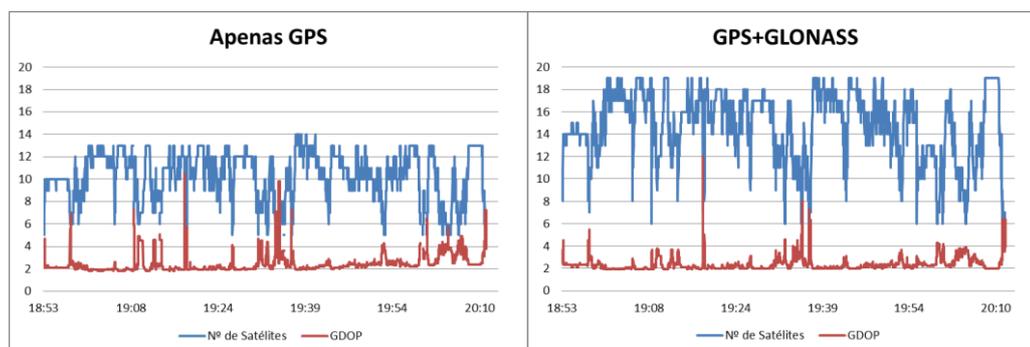


Figura 8 – Número de satélites e GDOPs no PPP cinemático (RECF – 14/10/2013).

Nota-se que a quantidade maior de satélites em função da integração GPS/GLONASS contribui para uma melhoria significativa no valor dos GDOPs na maioria das épocas. O acréscimo de, em média, 5 a 8 satélites GLONASS diminuiu os picos de GDOP encontrados ao usar dados somente GPS ao longo do levantamento, por exemplo no intervalo entre 19:08 – 19:39 e ainda a diminuição dos valores como visto entre 19:54 – 20:10.

4.2 Análise dos níveis de proteção na integridade com PPP

Através das Equações 2.69 e 2.70, foram calculados os níveis de proteção horizontal (HPL) e vertical (VPL) para o caso cinemático do PPP. Com o processamento considerando a solução apenas GPS e GPS/GLONASS foram obtidas as precisões necessárias, assim, são apresentados os resultados na Figura 9 e Figura 10.

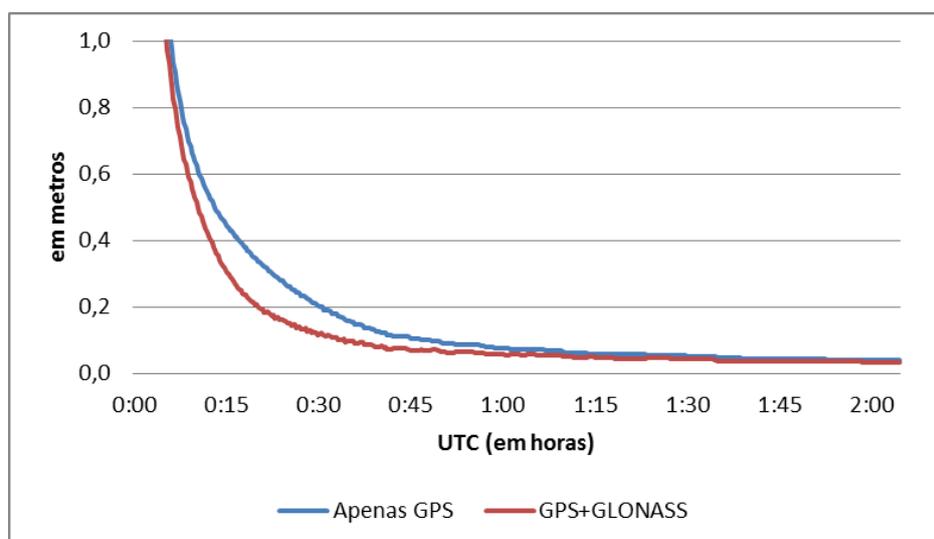


Figura 9 – HPL calculado utilizando dados apenas GPS e GPS+GLONASS

O nível de proteção horizontal apresentou menores valores durante toda a série temporal diária quando utilizados dados GPS/GLONASS. O início da série apresentou altos valores chegando a 8m para ambas as soluções, optou-se por mostrar no gráfico que estivessem menores que 1 m para melhor visualização do desempenho ao comparar as soluções. Assim, o HPL calculado para este dia apresentou média de 0,323 m para a solução apenas GPS e média de 0,276 m. O

desempenho geral durante o restante da série temporal manteve-se constante, sendo 0,008 m para uso de dados apenas GPS e 0,007 m para a integração. Os valores de VPL são apresentados na Figura 9.

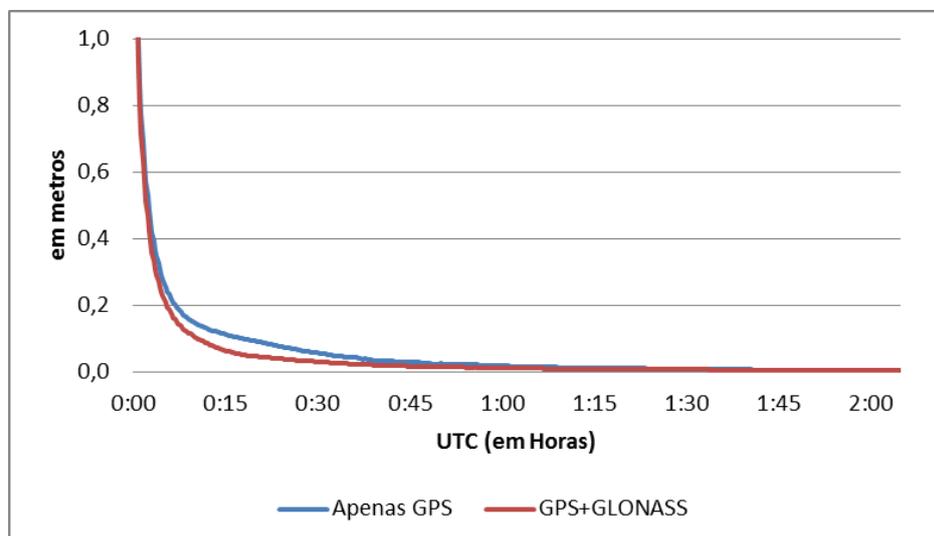


Figura 10 – VPL calculado utilizando dados apenas GPS e GPS+GLONASS

Quanto ao nível de proteção vertical o desempenho diário foi semelhante à componente horizontal (Figura 9) durante a série temporal, ou seja, foram em geral melhores para os casos onde houve uso de dados GPS/GLONASS. A média dos valores calculados foi de 0,005m para o caso do uso da integração GPS/GLONASS e 0,006m no uso de dados apenas GPS. Semelhante ao experimento com os valores do HPL (Figura 9) optou-se por mostrar apenas até a segunda hora de processamento, pois os valores ao longo do restante da série temporal mantiveram-se constantes. Foram notados no início do processamento valores de cerca de 2m, mas em menos de 30min os valores do VPL já eram menores que 0,1m.

4.3 Análise da estimativa do ZTD

Na propagação do sinal alguns erros estão relacionados à atmosfera, tais como os causados pela ionosfera e troposfera, para o último é possível observar a sua estimativa no processamento com PPP cinemático. Como amostra, considerou-se dados GNSS da estação RECF referentes à quatro dias de dados distintos ao longo do ano de 2013 distribuídos segundo as diferentes estações do ano, sendo:

Outono (10/04/2013), Inverno (06/08/2013), Primavera (14/10/2013) e Verão (29/12/2013).

A Figura 11 apresenta as diferenças no Atraso Troposférico Zenital (ZTD – *Zenithal Tropospheric Delay*) estimado utilizando as duas estratégias de processamento, ou seja, somente GPS e GPS/GLONASS.

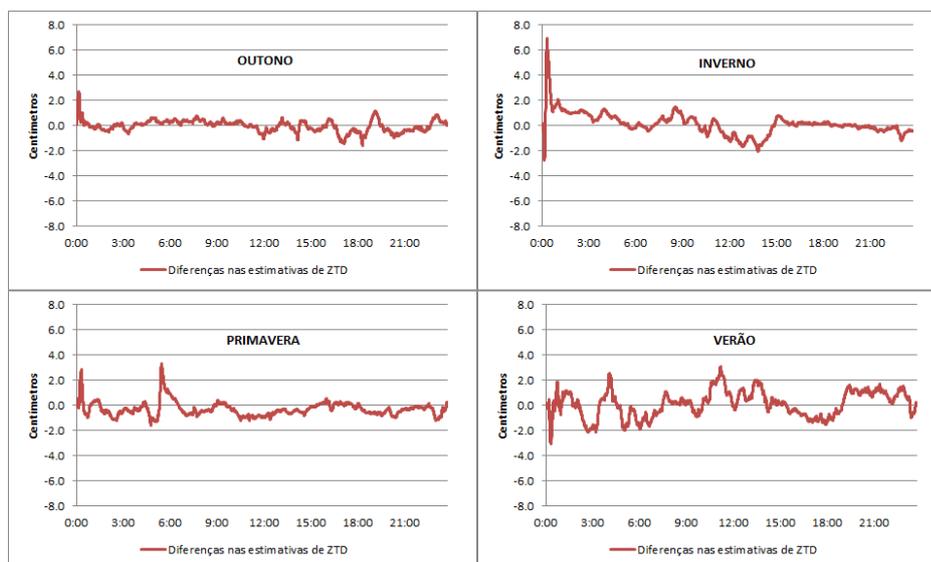


Figura 11 – Diferenças no ZTD estimado utilizando GPS e GPS/GLONASS

Na Figura 11 é possível observar menores diferenças na estimativa do ZTD no dia de outono (10/04/2013) com valores em sua maioria menores que 1,0 cm. Para o dia de inverno pico de 7 cm foi observado no início do rastreamento com valores atingindo até 2 cm ao longo do dia. No dia de primavera os valores máximos observados foram de aproximadamente 3,5 cm. No dia de verão, verifica maior variabilidade nas diferenças de ZTD ao aplicar a integração dos dados GPS/GLONASS.

Na Figura 12 as precisões nas estimativas do ZTD são apresentadas para o caso das soluções apenas GPS e integração GPS/GLONASS.

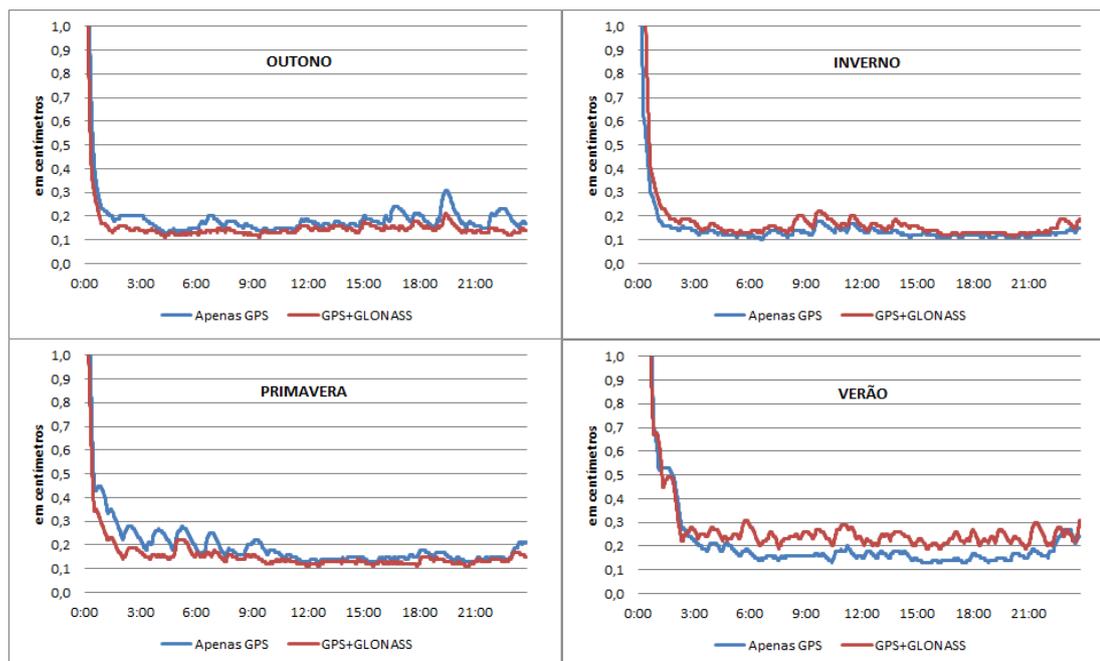


Figura 12 – Precisões do ZTD estimado utilizando GPS e GPS/GLONASS.

A Tabela 14 mostra as precisões médias em relação às soluções utilizadas no processamento com PPP cinemático.

As precisões do atraso troposférico (ZTD) estimado com uso da integração GPS/GLONASS, apresentaram melhores valores ao longo da série diária nos dias de Outono e Primavera. A Tabela 14 com as médias das precisões durante a série temporal diária indica as melhorias em termos percentuais para a estimativa.

Tabela 14 – Precisões médias do atraso zenital troposférico

DIA RELATIVO ÀS ESTAÇÕES DO ANO	APENAS GPS (cm)	GPS+GLONASS (cm)	MELHORIAS (%)
OUTONO	0,20	0,16	20,0
INVERNO	0,15	0,19	-
PRIMAVERA	0,21	0,17	19,0
VERÃO	0,24	0,30	-

A solução envolvendo a integração GPS/GLONASS proporcionou melhorias somente nos dias de Outono e Primavera. Para os dias de inverno e verão, no

entanto, a integração GPS/GLONASS proporcionou valores piores de precisão em relação ao uso de somente GPS no PPP com valores de 0,2 cm e 0,3 cm, respectivamente.

4.4 Análise de acurácia do PPP em séries temporais anuais

Para a análise da acurácia do PPP foram utilizados dados GNSS de estações da RBMC (BOAV, GOJA, PPTTE, RECF e UFPR) considerando diferenças em termos de latitudes ao longo do Brasil e boa distribuição espacial no território nacional. Os dados somente GPS e GPS/GLONASS da série anual foram processados separadamente no *software* GPSPPP. Foi realizada a atualização das coordenadas obtidas e realizada a comparação com coordenadas da rede SIRGAS-CON (solução em ITRF 2008), tidas como de referência.

Os erros em coordenadas cartesianas foram transformados para o Sistema Geodésico Local, ou seja, DE, DN e DU (ver seção 2.9). A análise de acurácia foi realizada com base no EMQ (ver capítulo 3). Além disto, análise das precisões estimadas das coordenadas e DOPs foram realizadas. A seguir os resultados são apresentados para cada uma das estações envolvidas no experimento.

Estação BOAV

Inicialmente é apresentada a série temporal dos erros no SGL para a estação BOAV no ano de 2013 (Figura 13). As séries temporais dos erros 2D e 3D são apresentadas na Figura 14.

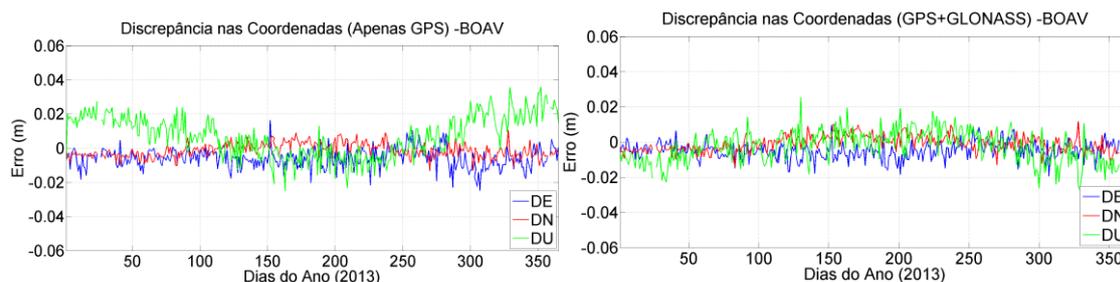


Figura 13 – Série temporal dos erros no SGL - BOAV

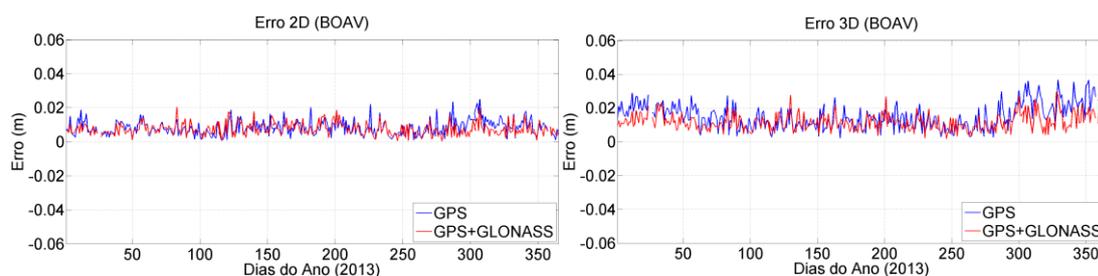


Figura 14 – Erro 2D e Erro 3D do PPP (BOAV).

Na Figura 13 pode-se notar que os erros no SGL em relação às coordenadas de referência apresentaram menores valores quando utilizada a solução GPS/GLONASS. No uso da solução apenas GPS o valor máximo de erro foi de 0,035 m relativo à componente altimétrica (DU) no dia 330. No uso da solução GPS/GLONASS o maior valor do erro foi de 0,025 m na componente DU no dia 131.

Em geral, o uso da integração GPS/GLONASS proporcionou menores valores no erro 2D e 3D quando comparado com a solução aplicando apenas dados GPS para a estação BOAV (Figura 14).

O Erro 2D calculado para a estação BOAV apresentou máximo em cerca de 0,025 m utilizando solução apenas GPS e 0,020 m na solução GPS/GLONASS. O erro 3D teve máximo valor com 0,036 m para apenas GPS e 0,028 m para GPS/GLONASS.

As Tabelas 15 e 16, a seguir, apresentam o erro médio, desvio padrão dos erros, EMQ e melhorias percentuais para todo o período (ano 2013) ao utilizar somente GPS e GPS/GLONASS.

Tabela 15 – Estatísticas para a estação BOAV

	ERRO MÉDIO (m)		DESVIO PADRÃO DO ERRO (m)		EMQ (m)		MELHORIAS EMQ (%)
	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	
DE	-0,0059	-0,0048	0,0058	0,0048	0,0082	0,0068	17,0
DN	-0,0013	-0,0010	0,0040	0,0044	0,0042	0,0045	-
DU	0,0070	-0,0031	0,0120	0,0091	0,0139	0,0096	30,9

Tabela 16 – EMQ 2D e EMQ 3D calculado para a estação BOAV

EMQ 2D (m)		MELHORIAS (%)
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
0,0093	0,0082	11,8
EMQ 3D (m)		MELHORIAS (%)
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
0,0167	0,0126	24,5

A Tabela 15 apresenta o valor de EMQ na ordem do milímetro em todas as coordenadas. As melhorias no uso de dados da integração GPS/GLONASS em termos de acurácia ocorreram nas coordenada E e N. Houveram melhorias em termos percentuais de até 30%.

Para o caso do EMQ 2D e 3D da estação BOAV como apresentados na Tabela 16, a melhoria percentual foi respectivamente de 11,8% e 24,5%.

Estação GOJA

A Figura 15 apresenta a série temporal dos erros no SGL para a estação GOJA no ano de 2013. As séries temporais dos erros 2D e 3D são apresentadas na Figura 16.

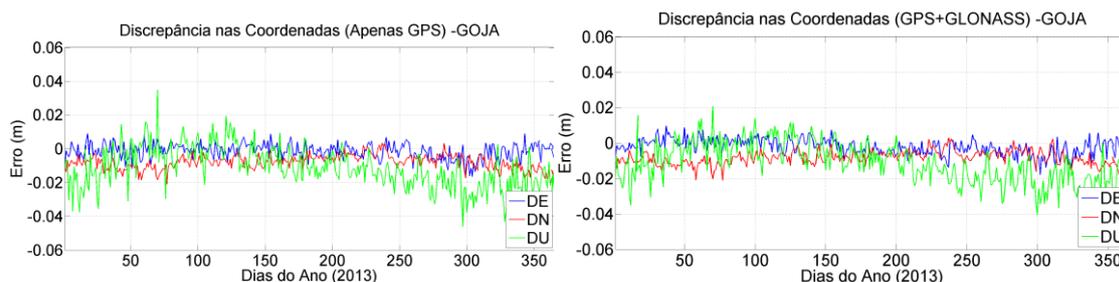


Figura 15 – Série temporal dos erros no SGL – GOJA

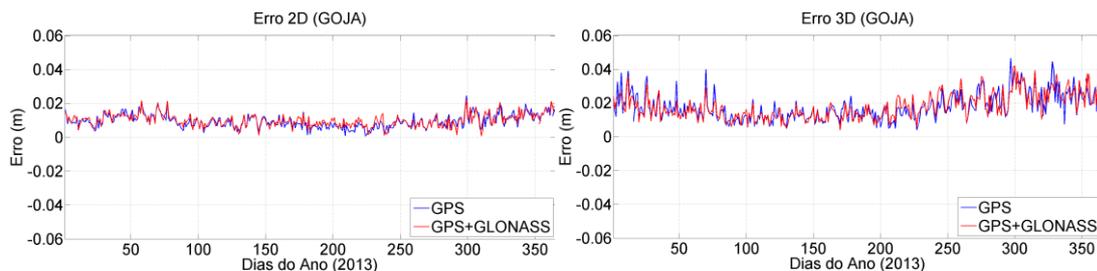


Figura 16 – Erro 2D e Erro 3D do PPP (GOJA)

A Figura 15 mostra que as soluções apresentaram discrepâncias maiores na componente U com máximo de 0,046 m para somente GPS e de 0,04 m para GPS/GLONASS.

O erro 2D conforme apresentado na Figura 16 mostra que a solução GPS/GLONASS teve discrepâncias planimétricas muito próximas das calculadas no caso de uso de dados apenas GPS, sendo que para ambas as soluções os erros 2D apresentaram valores, no geral, menores que 0,020 m. O erro 3D calculado para ambos os tipos de solução (Figura 16) apresentou picos de até aproximadamente 0,040 m e valores mínimos em cerca de 0,010 m.

A Tabela 17 e a Tabela 18, a seguir, apresentam o erro médio, desvio padrão dos erros, EMQ e melhorias percentuais para todo o período (ano 2013) ao utilizar somente GPS e GPS/GLONASS na estação GOJA.

Tabela 17 – Estatísticas para a estação GOJA

	ERRO MÉDIO (m)		DESVIO PADRÃO DO ERRO (m)		EMQ (m)		MELHORIAS NO EMQ (%)
	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	
DE	-0,0016	-0,0022	0,0045	0,0045	0,0048	0,0050	-
DN	-0,0080	-0,0084	0,0042	0,0040	0,0090	0,0093	-
DU	-0,0114	-0,0113	0,0118	0,0113	0,0164	0,0160	2,4

Tabela 18 – EMQ 2D e EMQ 3D calculado para a estação GOJA

EMQ 2D (m)		MELHORIAS (%)
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
0,0102	0,0106	-
EMQ 3D (m)		MELHORIAS (%)
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
0,0193	0,0192	0,5

Conforme pode ser visto na Tabela 17, o EMQ na componente U ficou abaixo de 0,020 m. As melhorias com o uso de dados da integração GPS/GLONASS foram detectadas apenas na componente altimétrica. A melhoria em EMQ conforme apresentada na Tabela 18 foi obtida apenas para o erro resultante 3D das coordenadas com valor de 0,5%.

Estação PPTE

A Figura 17 apresenta a série temporal dos erros no SGL para a estação PPTE no ano de 2013. As séries temporais dos erros 2D e 3D são apresentadas na Figura 18.

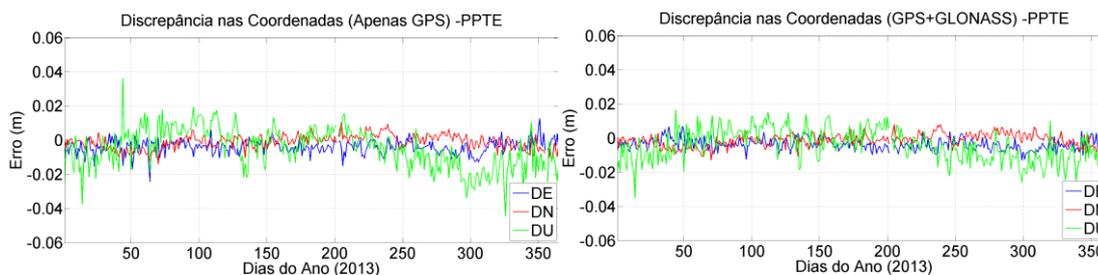


Figura 17 – Série temporal dos erros no SGL - PPTTE

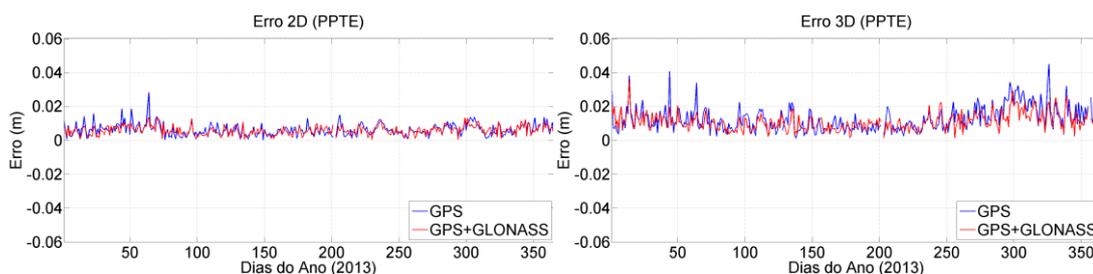


Figura 18 – Erro 2D e Erro 3D do PPP (PPTTE)

Na Figura 17 são percebidas melhorias no uso dos dados da integração GPS/GLONASS. Os erros das estimativas usando dados GPS/GLONASS tiveram valores máximos de 0,020 m com o valor 0,035 m no dia 15, no caso da solução apenas GPS os valores máximos ultrapassaram 0,030 m chegando a 0,045 m no dia 327.

O erro 2D calculado para a estação PPTTE (Figura 18) apresenta em geral menores valores ao aplicar dados da integração. Nota-se que a diferença do erro 2D calculado para ambas as soluções foi da ordem de milímetros.

Na Figura 18 notam-se diversos picos com valores acima de 0,020 m referentes ao erro 3D calculado e, em geral, são maiores, para o uso de dados apenas GPS. A aplicação de dados da integração GPS/GLONASS proporcionou redução para valores abaixo de 0,020 m em sua maioria.

A Tabela 19 e Tabela 20, a seguir, apresentam o erro médio, desvio padrão dos erros, EMQ e melhorias percentuais para todo o período (ano 2013) ao utilizar somente GPS e GPS/GLONASS na estação PPTTE.

Tabela 19 – Estatísticas para a estação PPTE

	ERRO MÉDIO (m)		DESVIO PADRÃO DO ERRO (m)		EMQ (m)		MELHORIAS NO EMQ (%)
	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	
DE	-0,0040	-0,0036	0,0041	0,0034	0,0057	0,0050	12,2
DN	-0,0011	-0,0013	0,0041	0,0038	0,0042	0,0040	4,7
DU	-0,0049	-0,0043	0,0115	0,0092	0,0125	0,0101	19,2

Tabela 20 – EMQ 2D e EMQ 3D calculado para a estação PPTE

EMQ 2D (m)		MELHORIAS (%)
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
0,0071	0,0063	11,2
EMQ 3D (m)		MELHORIAS (%)
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
0,0144	0,0119	17,3

A integração GPS/GLONASS proporcionou menores valores de EMQ nas três componentes (E, N, U) do SGL para a estação PPTE, cuja melhoria média foi de 12% (Tabela 19). Na referida estação, a integração GPS/GLONASS apresentou melhor acurácia das resultantes 2D e 3D conforme pode ser visto na Tabela 20.

Estação RECF

A Figura 19 apresenta a série temporal dos erros no SGL para a estação RECF no ano de 2013. As séries temporais dos erros 2D e 3D são apresentadas na Figura 20.

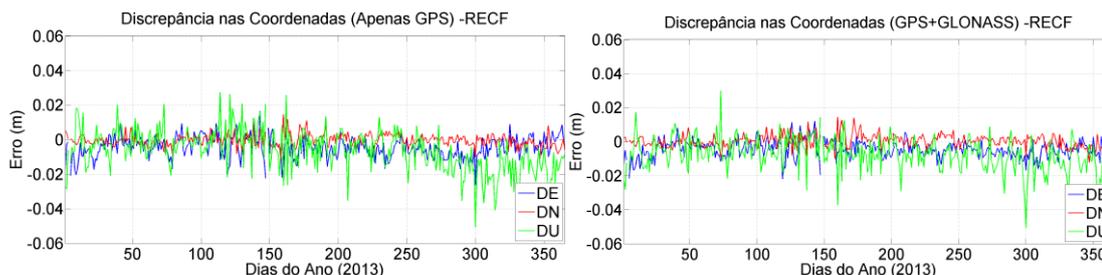


Figura 19 – Série temporal dos erros no SGL - RECF

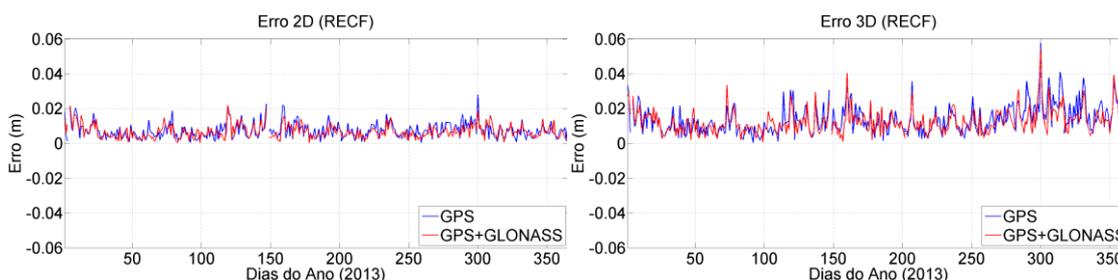


Figura 20 – Erro 2D e Erro 3D do PPP (RECF)

Os gráficos para esta estação (Figura 20) apresentam mesmo comportamento dos anteriores quando se compara a variabilidade do erro durante a série anual. Nesta estação o erro na componente altimétrica apresentou o maior valor entre todas as outras. Para a solução apenas GPS os valores do erro chegaram a 0,050 m, com mínimo de 0,001 m no dia 246. No caso da integração a componente DU novamente apresentou maiores valores, embora em vários dias os picos acentuados ficaram abaixo de 0,040 m.

A estação RECF apresentou os mais altos valores do erro 3D ao longo da série anual, destaque para o dia do ano 300 que chegou a aproximadamente de 0,060 m para a solução apenas GPS e valor pouco menor para a situação de integração GPS/GLONASS. No gráfico da resultante do erro planimétrico (2D) na estação RECF (Figura 20) a solução apenas GPS apresentou “pico” de 0,030 m para o dia 300 da série anual, já no caso da integração GPS/GLONASS os maiores valores do erro 2D foram de 0,020 m.

A Tabela 21 e Tabela 22, a seguir, apresentam o erro médio, desvio padrão dos erros, EMQ e melhorias percentuais para todo o período (ano 2013) ao utilizar somente GPS e GPS/GLONASS.

Tabela 21 – Estatísticas para a estação RECF

	ERRO MÉDIO (mm)		DESVIO PADRÃO DO ERRO (m)		EMQ (m)		MELHORIAS NO EMQ (%)
	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	
DE	-0,0047	-0,0044	0,0061	0,0051	0,0077	0,0067	12,9
DN	-0,0004	0,0002	0,0035	0,0037	0,0036	0,0037	-
DU	-0,0063	-0,0074	0,0117	0,0092	0,0133	0,0118	11,2

Tabela 22 – EMQ 2D e EMQ 3D calculado para a estação RECF

EMQ 2D (m)		MELHORIAS (%)
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
0,0085	0,0076	10,5
EMQ 3D (m)		
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
0,0158	0,0141	10,7

Os dados em negrito na Tabela 21 mostram que houve melhorias nos valores do EMQ quando aplicada a integração GPS/GLONASS no processamento. As melhorias na componente E foi de aproximadamente 13%, enquanto que a componente U apresentou cerca de 11% de melhorias. Na Tabela 22, os dados relativos aos erros planimétricos (Erro 2D) e planialtimétricos (Erro 3D) apresentaram melhorias em torno de 10,5%.

Estação UFPR

A Figura 21 apresenta a série temporal dos erros no SGL para a estação UFPR no ano de 2013, enquanto a Figura 22 apresenta as séries temporais dos erros 2D e 3D.

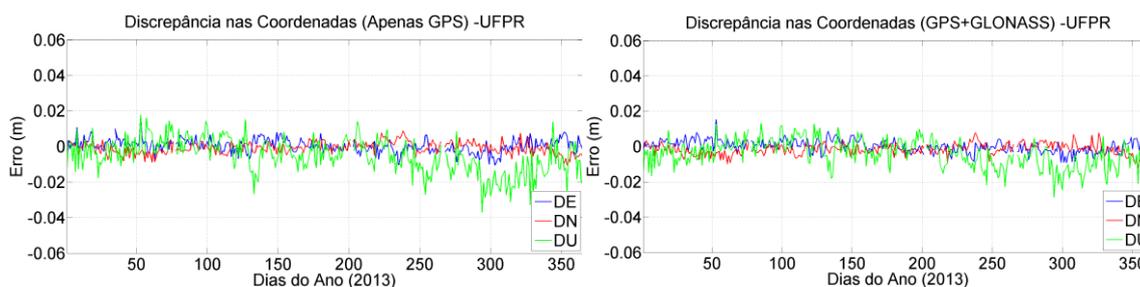


Figura 21 – Série temporal dos erros no SGL - UFPR

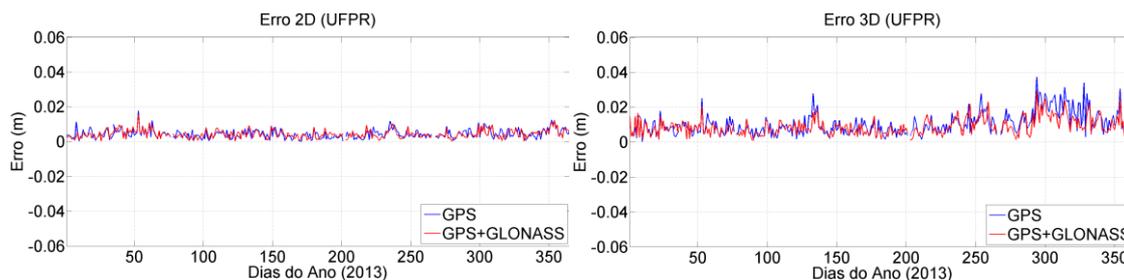


Figura 22 – Erro 2D e Erro 3D do PPP (UFPR)

Na Figura 21 foram observadas melhorias ao aplicar dados da integração, especialmente relativas à componente altimétrica, os quais apresentaram valores máximos de 0,028 m, ao passo que para a solução apenas GPS o valor máximo do erro foi de 0,037 m.

A série temporal do erro 2D para a estação UFPR (Figura 22) foi a que apresentou menor variação ao longo do ano de 2013, A integração GPS/GLONASS proporcionou menores valores de erro 2D em comparação com a solução apenas GPS. Os erros 2D com integração GPS/GLONASS ficaram abaixo de 0,050 m.

Para o erro 3D considerando a solução apenas GPS valores máximos estiveram acima de 0,010 m chegando a 0,037m no dia 295, no caso da solução GPS/GLONASS o erro 3D em geral os maiores valores estiveram em média 0,020 m chegando ao maior valor, 0,029 m no dia 295.

A Tabela 23 e 24 apresentam o erro médio, desvio padrão dos erros, EMQ e melhorias percentuais para todo o período (ano 2013) ao utilizar somente GPS e GPS/GLONASS.

Tabela 23 – Estatísticas para a estação UFPR

	ERRO MÉDIO (m)		DESVIO PADRÃO DO ERRO (m)		EMQ (m)		MELHORIAS NO EMQ (%)
	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	
DE	0,0003	0,0001	0,0037	0,0034	0,0037	0,0034	8,1
DN	-0,0009	-0,0016	0,0033	0,0031	0,0034	0,0035	-
DU	-0,0055	-0,0043	0,0096	0,0077	0,0111	0,0088	20,7

Tabela 24 – EMQ 2D e EMQ 3D calculado para a estação UFPR

EMQ 2D (m)		MELHORIAS (%)
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
0,0050	0,0049	2,0
EMQ 3D (m)		
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
0,0122	0,0101	17,2

Na Tabela 23 verificam-se valores menores para o EMQ nas componentes E e U. Destaca-se que o erro médio para ambas as soluções apresentou valores da ordem de milímetros. Ao aplicar a integração de dados, o EMQ, obtiveram-se melhorias de 8,1% e 20,7% respectivamente para as coordenadas E e U.

Como se pode observar na Tabela 24, a acurácia 2D foi milimétrica tanto para a solução apenas GPS como para a solução que envolve a integração GPS/GLONASS. O erro 2D apresentou menor melhoria percentual, 2,0% enquanto que a acurácia foi centimétrica com melhoria percentual maior, 17,2%.

A Tabela 25 apresenta um resumo dos valores de acurácia obtidos, tanto no caso das coordenadas planimétricas (EMQ 2D) como planialtimétricas (EMQ 3D) para todas as estações envolvidas nas análises.

Tabela 25 – Resumo dos valores de EMQ 2D e EMQ 3D para cada estação analisada.

ESTAÇÕES		APENAS GPS (m)	GPS+GLONASS (m)	MELHORIAS (%)
BOAV	EMQ 2D	0,0093	0,0082	11,8
	EMQ 3D	0,0167	0,0126	24,5
GOJA	EMQ 2D	0,0102	0,0106	-
	EMQ 3D	0,0193	0,0192	0,5
RECF	EMQ 2D	0,0071	0,0063	11,2
	EMQ 3D	0,0144	0,0119	17,3
PPTE	EMQ 2D	0,0085	0,0076	10,5
	EMQ 3D	0,0158	0,0141	10,7
UFPR	EMQ 2D	0,0050	0,0049	2,0
	EMQ 3D	0,0122	0,0101	17,2

Ao aplicar a integração GPS/GLONASS, o EMQ 2D, conforme a tabela acima, apresentou melhoria média de 8,9%, com mínima de 2% e máxima de 11,8%, respectivamente, para as estações UFPR e BOAV. Para o caso do EMQ 3D, a mínima melhoria foi de 0,5% para a estação GOJA e a máxima foi 24,5% para a estação BOAV com média de 14,04%.

4.5 Análise do Posicionamento Relativo Cinemático com integração GPS/GLONASS

Para analisar a acurácia no PPP cinemático pelo uso da integração GPS/GLONASS foi escolhido o posicionamento relativo cinemático para gerar as coordenadas e precisões de referência, pois o modo relativo proporciona, em geral, melhores estimativas.

Inicialmente foram realizados, no caso do relativo cinemático, processamentos envolvendo dados apenas GPS e em seguida, da integração GPS/GLONASS, assim dentro do modo relativo escolheu-se a solução que apresentou melhores estimativas.

A Figura 23 apresenta as diferenças nas estimativas realizadas no relativo cinemático entre o uso de dados GPS e dados da integração.

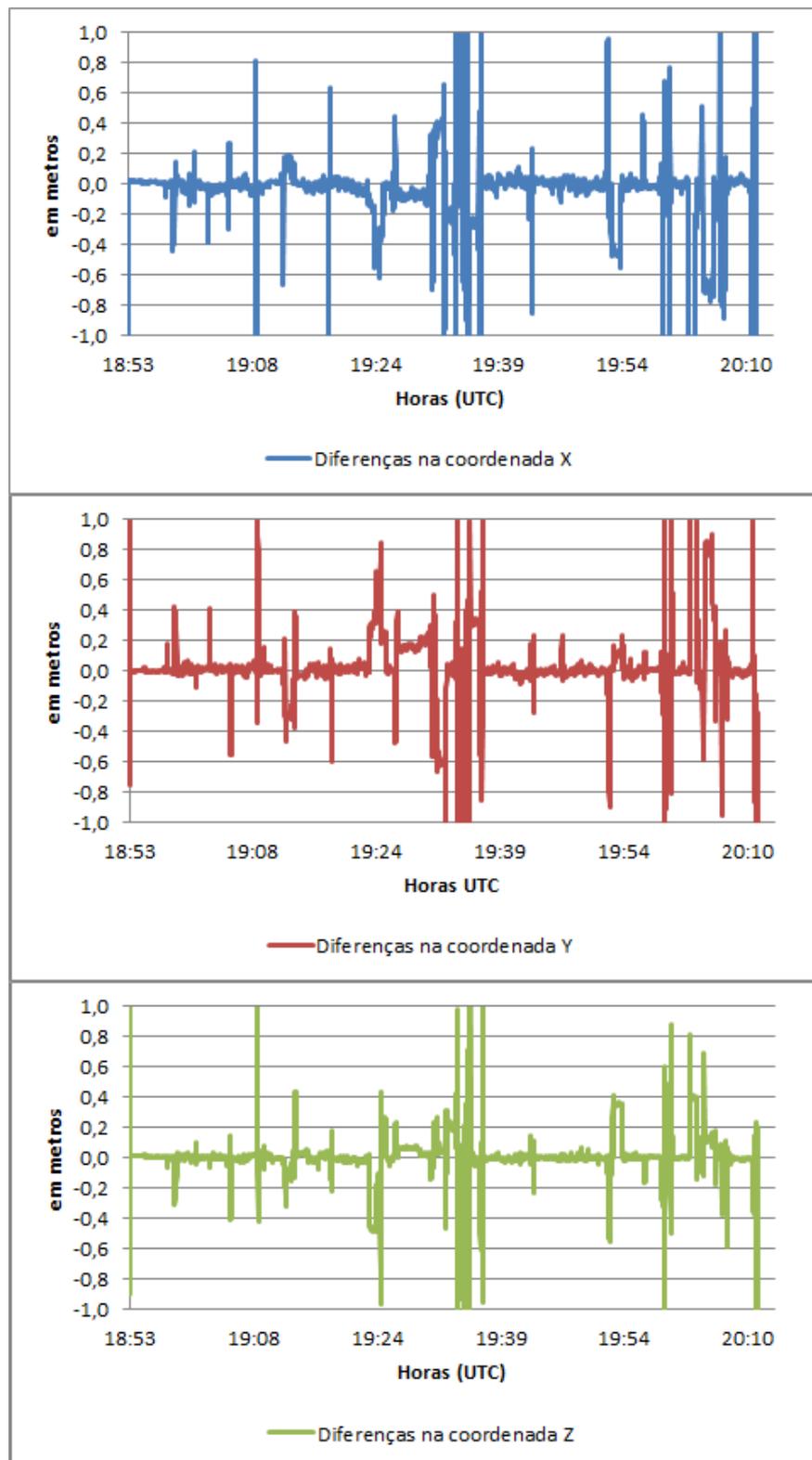


Figura 23 – Diferença entre GPS e GPS+GLONASS nas coordenadas dos pontos da trajetória.

A Figura 23 mostra que ocorreram diversos picos nas diferenças das coordenadas dos pontos quando comparadas as soluções GPS com GPS/GLONASS. Estes picos podem estar relacionados com o reinício do processamento pelo *software* devido a perdas de sinal com os satélites ou outros efeitos.

Em média as diferenças entre as coordenadas X estimadas com uso da solução apenas GPS e GPS/GLONASS foram de 0,012 m, para a coordenada Y as diferenças foram em média de -0,011 m e para a coordenada Z, -0,010 m.

Como indicador de melhor estimativa entre as coordenadas estimadas entre as soluções utilizadas no processamento, tem-se os valores das precisões obtidas época a época. No caso das precisões, apesar das coordenadas obtidas estarem em coordenadas cartesianas, estas foram obtidas (*via* processamento no *software* Topcon Tools), em termos de coordenadas representadas no SGL (σ_E , σ_N , σ_U).

A Figura 24 apresenta as precisões das coordenadas representadas no SGL, as quais foram estimadas ao usar a solução somente GPS e solução com dados GPS/GLONASS.

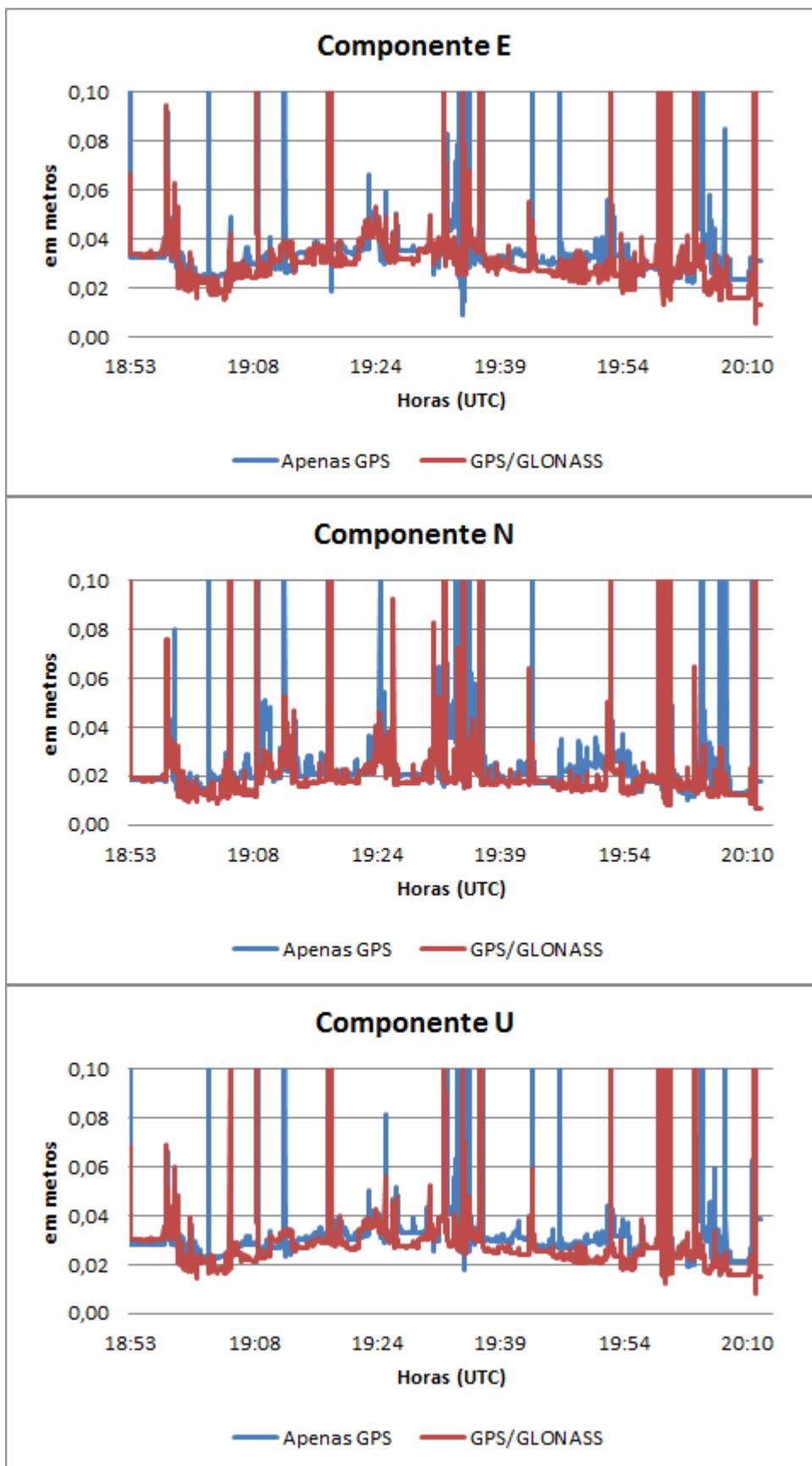


Figura 24 – Precisões das componentes do SGL no posicionamento relativo cinemático.

Na Figura 24 notam-se menores valores, em quase todos os pontos da trajetória, para as precisões estimadas com uso da integração GPS/GLONASS. Utilizando dados apenas GPS para as componentes do SGL (E, N e U), as precisões ao longo da trajetória, em sua maioria, estiveram em torno de 0,056 m, 0,045 m e 0,054 m respectivamente. No caso da integração GPS/GLONASS as médias dos valores de precisão mantiveram-se menores, 0,038 m para a componente E, 0,026 m para a componente N e 0,036 m para a componente U.

Os valores das precisões apresentadas na Figura 24 ficaram em geral em torno de 0,052 m para o caso do uso de dados apenas GPS, para o uso da integração GPS/GLONASS, a precisão média considerando as três componentes esteve em torno de 0,033 m.

A Figura 25 apresenta o gráfico com as resultantes das precisões estimadas no relativo cinemático.

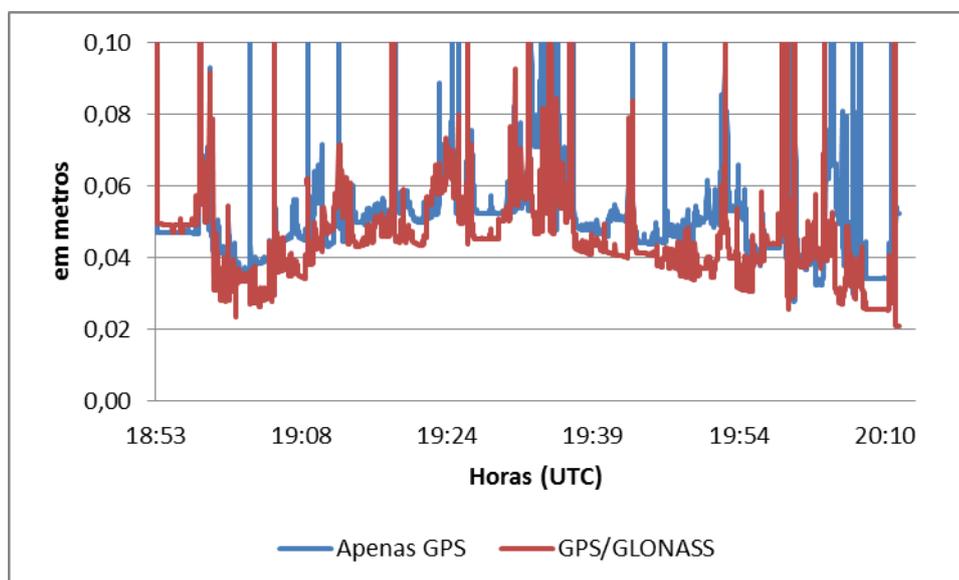


Figura 25 – Resultante considerando as três precisões obtidas para as componentes nos ponto da trajetória.

Ao analisar a Figura 25, observa-se que em geral as precisões obtidas usando apenas dados GPS mantiveram valores mais altos em relação às precisões obtidas com a integração. Em média os valores foram de 0,091 m com dados

apenas GPS e 0,056 m com dados GPS/GLONASS, ou seja, em termos percentuais houve melhorias em torno de 38%.

A tabela seguinte mostra as discrepâncias entre o uso das soluções analisadas para este posicionamento cinemático através da análise das médias das precisões (precisões médias) em cada coordenada representada no SGL.

Tabela 26 – Precisões médias das componentes estimadas.

Componentes	Apenas GPS (m)	GPS+GLONASS (m)	Melhorias (%)
σE	0,056	0,038	32,1
σN	0,045	0,026	42,2
σU	0,054	0,036	33,3

Ambas as soluções oscilaram dentro da ordem de centímetros. As melhorias quando utilizados dados GPS/GLONASS estiveram em torno de 36%. Conforme esperado, os resultados obtidos no processamento do modo relativo cinemático indicaram uma melhor qualidade em termos da precisão usando dados da integração GPS/GLONASS. Assim, estes dados, com melhor qualidade, serão utilizadas como “coordenadas de referência”, para o PPP cinemático (apresentado em seguida), a solução com integração GPS/GLONASS.

4.6 Análise de acurácia do PPP Cinemático

O objetivo deste experimento é a avaliação de coordenadas no PPP cinemático para uma trajetória (Figura 7) e das esperadas influências pelo acréscimo de mais um sistema de navegação, no caso o GLONASS.

Houve algumas épocas que não tiveram os dados processados numa primeira tentativa e uma alternativa encontrada para minimizar este problema foi o relaxamento das precisões nas medidas de pseudodistancia e fase da onda. Em

testes anteriores, foram utilizadas precisões de 1,0 m e 0,010 m para a pseudodistância e fase, respectivamente. Estes valores então foram alterados para 2,000 m e 0,020 m respectivamente.

Os resultados desse experimento são inicialmente apresentados em termos das precisões estimadas no PPP. Em seguida, apresentam-se as diferenças entre as estimativas dessas coordenadas usando dados somente GPS e dados GPS/GLONASS e a comparação com as coordenadas estimadas no posicionamento relativo cinemático (ver seção 4.5). Por fim, é realizada a análise do EMQ.

Na Figura 26 são apresentadas as precisões estimadas em cada coordenada geodésica cartesiana conforme cada época do levantamento processada no PPP cinemático.

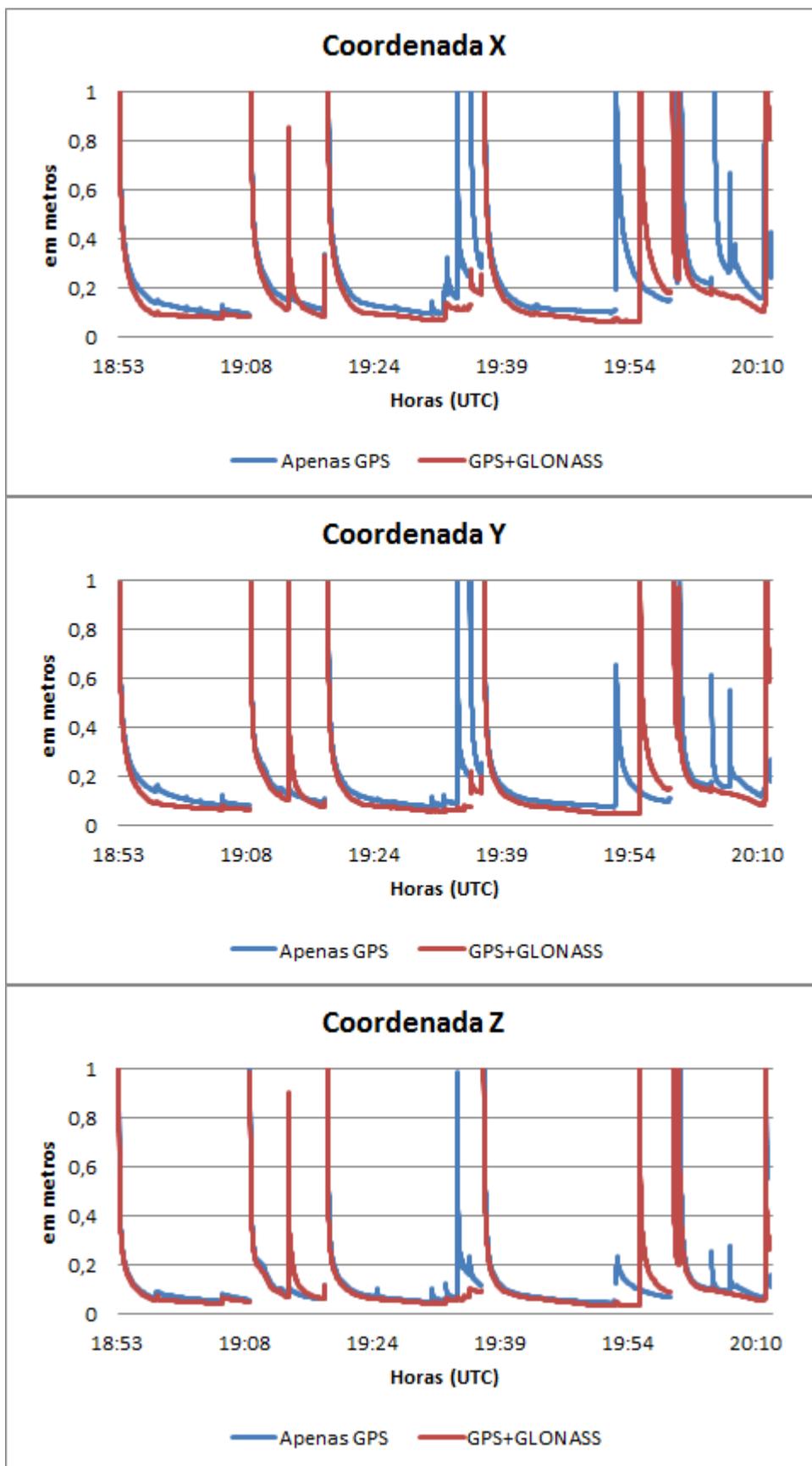


Figura 26 – Precisões das coordenadas geodésicas cartesianas em cada época para as duas soluções.

Em algumas épocas houve interrupções no processamento das mesmas, em seguida às interrupções, o processamento reiniciou, mas com altos valores os quais são suavizados à medida que as épocas vão sendo processadas. Sendo que nestes casos além de melhores valores no caso da integração GPS/GLONASS, a estabilidade, na maioria das vezes, é mantida.

Em geral as precisões foram, para as três coordenadas, melhores quando estimadas utilizando dados da integração GPS/GLONASS. Para o caso do uso de dados apenas GPS as melhores precisões obtidas foram 0,091 m na coordenada X, 0,075 m em Y e 0,041 m em Z. Quanto à integração os melhores valores de precisão obtidos foram 0,059 m, 0,044 m e 0,030 m, em X, Y e Z respectivamente.

As precisões médias em cada coordenada em relação à solução adotada no processamento são apresentadas na tabela seguinte:

Tabela 27 – Precisões médias calculadas para cada coordenada geodésica cartesiana.

Precisões médias (m)			
Coordenadas	Apenas GPS	GPS+GLONASS	Melhorias (%)
σX	0,238	0,183	23,3
σY	0,175	0,150	14,2
σZ	0,111	0,102	0,08

A maior quantidade de satélites advindos da integração GPS/GLONASS forneceu melhores precisões para cada coordenada estimada no PPP cinemático. A precisão média na coordenada X apresentou a maior melhoria percentual, em média, 23,3%. Obtiveram-se diferenças entre 0,9 cm a 5,5 cm, no caso da coordenada Z e X, respectivamente, quando comparadas as precisões estimadas pela integração em relação às estimadas pela solução apenas GPS.

A Figura 27 mostra o gráfico relacionado com as estimativas no PPP cinemático para as duas soluções consideradas no processamento.

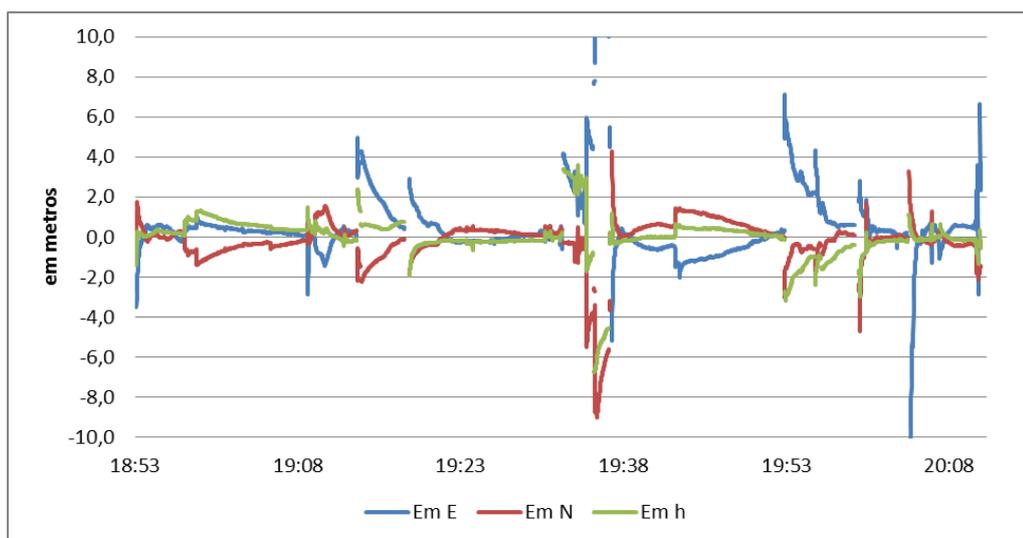


Figura 27 – Diferenças entre as coordenadas estimadas no PPP cinemático com dados GPS e GPS/GLONASS.

A Figura 27 mostra que a diferença entre as coordenadas estimadas pelas soluções GPS e GPS/GLONASS durante o levantamento esteve em sua maioria menor que 10 cm. Nota-se também que após cada reinicialização do processamento as épocas imediatamente posteriores atingem as maiores diferenças, representadas pelos altos valores alcançados, os quais são reduzidos nas épocas seguintes, o tempo para esta redução e estabilização é chamado tempo de convergência.

As diferenças entre as coordenadas obtidas no posicionamento relativo cinemático e o PPP cinemático foram transformadas para o SGL. Os resultados a seguir, referem-se à trajetória realizada pelo automóvel segundo os experimentos dos itens (4.2 e 4.3). Assim os erros no SGL para as soluções apenas GPS e GPS+GLONASS são apresentados na Figura 28.

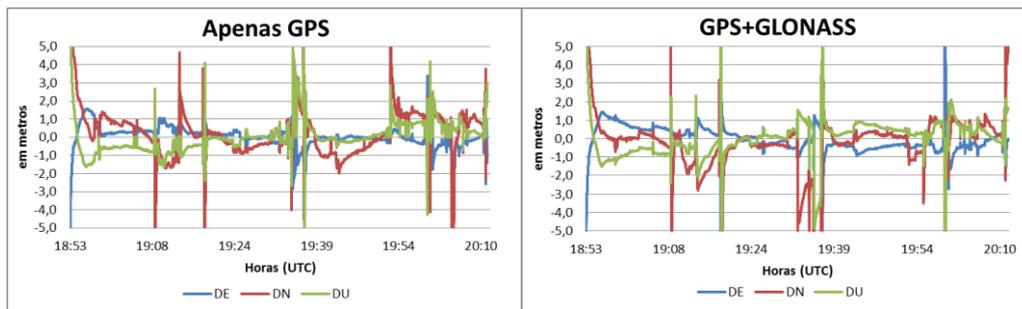


Figura 28 – Erros no SGL – PPP cinemático (GPS e GPS/GLONASS).

Nota-se que a solução envolvendo a integração apresentou maior estabilidade nos valores máximos atingidos (Figura 28). As diferenças ficaram em sua maioria menores que 0,010 m para o caso da integração GPS/GLONASS e em torno de 0,020 m para o uso de dados apenas GPS. O tempo de convergência é menor no caso do processamento com dados GPS+GLONASS.

Com base nos valores dos erros em cada componente são calculadas as resultantes planimétricas (Erro 2D) e planialtimétricas (Erro 3D) e então, apresentadas na Figura 29.

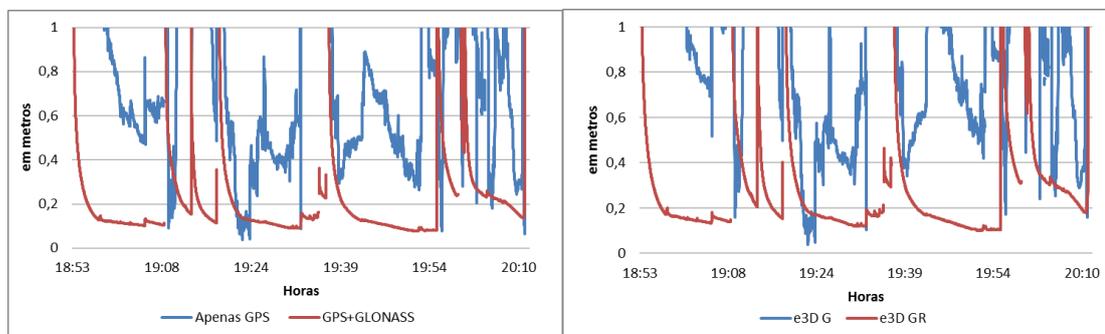


Figura 29 – Erro 2D (à esquerda) e Erro 3D (à direita) das coordenadas estimadas com dados apenas GPS e GPS+GLONASS.

O Erro 2D e Erro 3D foram menores para a integração GPS/GLONASS, no uso dessa solução os valores para os erros 2D e 3D ficam em geral, abaixo de 0,200 m e mantêm-se estabilizado por alguns minutos até haver uma perda de dados. Contrariamente o Erro 2D e 3D calculado no caso do uso da solução apenas GPS

apresenta alta variabilidade e amplitude nos valores, estando em sua maioria acima de 0,400 m.

A Tabela 28 apresenta o erro médio quadrático calculado das coordenadas em função do erro médio e desvio padrão do erro.

Tabela 28 – EMQ das coordenadas estimadas no PPP

	ERRO MÉDIO (m)		DESVIO PADRÃO DO ERRO (m)		EMQ (m)		MELHORIAS NO EMQ (%)
	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	APENAS GPS	GPS + GLONASS	
DE	0,006	-0,055	0,648	0,392	0,648	0,396	38,9
DN	0,270	-0,281	1,524	0,260	1,548	0,383	75,3
DU	0,050	0,000	0,967	0,371	0,969	0,371	61,7

Na Tabela 28, pode-se notar que os resultados envolvendo a integração GPS/GLONASS apresentaram melhor acurácia em comparação com os resultados apenas GPS, as melhorias foram em torno de 58,6%. Mesmo os valores do Erro Médio não apresentando grandes diferenças entre as soluções analisadas, O desvio padrão, no caso da integração, apresentou melhores valores, chegando a 1,264 m de diferença (componente DN).

O EMQ em cada componente esteve em torno de 0,035m para o caso da integração, já a acurácia em cada componente estimada por apenas dados GPS foi em média na ordem de 1 m.

Na Tabela 29 o erro médio quadrático das resultantes planimétricas e planialtimétricas é apresentado para as duas soluções consideradas no experimento.

Tabela 29 – EMQ 2D e EMQ 3D calculado

EMQ 2D (m)		MELHORIAS (%)
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
2,046	0,531	75,0
EMQ 3D (m)		MELHORIAS (%)
APENAS GPS	GPS+GLONASS	
2,308	0,681	70,5

Na tabela anterior foram apresentados os valores calculados para a acurácia planimétrica (EMQ 2D) e acurácia plani-altimétrica (EMQ 3D) do levantamento. Mais uma vez os resultados com relação à acurácia com uso da integração GPS/GLONASS mostrou-se muito melhor quando comparada com a solução apenas GPS.

Conforme a Tabela 29 as melhorias percentuais tanto do EMQ 2D e 3D foram em média 70%. A acurácia esteve na ordem dos decímetros para o caso da integração e pouco acima de 2 m para o uso de dados apenas GPS.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, o principal objetivo foi a análise da acurácia do PPP com integração de dados GPS/GLONASS coletados em estações localizadas no Brasil, além da investigação da modelagem matemática funcional e estocástica necessária para a estimativa de coordenadas geodésicas no método PPP e os modelos matemáticos necessários para a integração numérica de órbitas transmitidas dos satélites GLONASS. Foram ainda realizados experimentos e análises para avaliar a influência na geometria (DOPs) e na integridade calculada no PPP com a inserção de medidas GLONASS juntamente com as medidas GPS.

Para aplicação do GLONASS no PPP é importante a estimativa de parâmetros como, as coordenadas da estação, erros do relógio do receptor em relação ao tempo GLONASS e ao GPS, além das ambiguidades e parâmetros de troposfera. No caso da utilização de órbitas transmitidas é necessária a compatibilização do sistema de referência (WGS84 e PZ-90.11).

Quanto aos erros dos relógios dos receptores, estes são inicialmente relacionados, juntamente com os erros dos relógios dos satélites, ao sistema de tempo GPS (ver Equação 2.4). Para o processamento dos dados é referenciado ao sistema de tempo GLONASS através do erro do relógio do receptor para o GPS e da diferença entre sistema de tempos (t_{sys}) (ver Equação 2.15). Assim, os erros dos relógios dos receptores e a diferença de sistema de tempo são aplicados diretamente nas fórmulas de pseudodistância e fase considerando o satélite GNSS (ver Equação 2.16 e 2.17).

O estado da arte tem mostrado que a modernização pela qual passam os satélites GPS e GLONASS tem favorecido pesquisas científicas e desenvolvimentos quando se trata da integração GPS/GLONASS e conseqüentemente, do posicionamento GNSS usando esses dois sistemas.

O método PPP atualmente permite obter coordenadas com acurácia de poucos centímetros, considerando que a acurácia atual divulgada das órbitas precisas disponíveis pelo IGS é melhor que cinco centímetros. Os erros dos relógios dos satélites GPS e GLONASS podem ser encontrados tanto no modo pós-processado como em tempo real. Assim, é possível aplicar a integração GPS/GLONASS nestes dois modos.

A análise inicial da MVC de parâmetros (seção 4.1) foi realizada a fim de verificar as precisões dos parâmetros estimados no PPP. Em geral, observou-se que a integração GPS/GLONASS proporcionou melhorias em torno de 30% nas estimativas das precisões das coordenadas. Pode-se assim dizer que este é o nível de melhoria esperado na estimativa de precisões em função da inserção de medidas GLONASS. Neste caso, os valores de DOPs também apresentaram melhorias com a aplicação de observações GPS/GLONASS.

As análises mostraram que a incerteza de outros parâmetros fazendo parte da estimativa também apresenta melhoria, como por exemplo, as ambiguidades, o que pode ser observado pela análise do ADOP. O processamento de dados no modo PPP com integração GPS/GLONASS foi realizado com o *software* GPSPPP do NRCAN. Além das coordenadas, avaliaram-se os parâmetros de troposfera considerando as diferentes estações do ano de 2013 (seção 4.3). Para o dia de inverno analisado, a máxima diferença no ZTD usando GPS e GPS/GLONASS foi de 7,0 cm e maior variabilidade foi observada no dia de verão.

A integridade do sistema com integração GPS/GLONASS foi comparada com a integridade do sistema apenas do GPS e os resultados mostraram-se melhores no caso da integração. O nível de proteção horizontal apresentou média de 0,323 m para a solução apenas GPS e média de 0,276 m para o caso da integração GPS/GLONASS na primeira meia hora, mas a partir daí manteve-se constante até o final do período considerado com valores em torno de 0,008 m usando dados apenas GPS e 0,007 m para a integração. Quanto ao nível de proteção vertical o desempenho diário também foi em geral melhor para os casos com dados GPS/GLONASS. A média dos valores calculados foi de 0,005 m para o caso do uso da integração GPS/GLONASS e 0,006 m no uso de dados apenas GPS.

A partir dos resultados dos experimentos realizados no PPP no modo estático, no relativo cinemático e PPP cinemático apresentados verificou-se que a integração GPS/GLONASS em geral proporcionou melhor acurácia no posicionamento em relação ao uso de dados apenas GPS.

Para analisar a acurácia do PPP estático com integração GPS/GLONASS, foram utilizados dados coletados por receptores nas estações RBMC em diferentes

regiões brasileiras, A estratégia de processamento envolveu dados GNSS diários referentes ao ano de 2013, gerando assim série temporal anual para cada estação.

Em relação à análise do EMQ considerando as coordenadas transformadas para o SGL, a integração GPS/GLONASS proporcionou melhorias percentuais na maioria dos processamentos realizados atingindo o valor máximo de 0,016 m e menor de 0,003 m (seção 4.7). Os valores de EMQ 2D apresentaram em média melhoria percentual de 7,1% no uso de dados GPS/GLONASS em relação ao uso de dados apenas GPS no PPP. O EMQ 3D apresentou em média, com a integração GPS/GLONASS, melhoria percentual em torno de 14%.

No posicionamento relativo cinemático, foi realizando a coleta de dados GNSS em uma trajetória cinemática nos arredores de Recife (seção 4.8). Inicialmente analisaram-se as discrepâncias entre coordenadas estimadas usando solução apenas GPS e integração GPS/GLONASS. Pôde-se observar que as discrepâncias neste caso, atingem valores acima da ordem do metro. Em geral, as precisões estimadas pela integração apresentam melhores valores, ou seja, maior qualidade na estimativa das coordenadas relacionadas. Em geral as precisões obtidas com a integração GPS/GLONASS atingiram valores melhores que 2 cm, enquanto que no caso apenas GPS os valores estiveram em torno de 3 a 5 cm. As melhorias percentuais das precisões também foram calculadas e o uso de dados da integração proporcionou melhorias em torno de 35%.

Para o caso do PPP cinemático as coordenadas estimadas após o processamento usando dados apenas GPS e dados da integração GPS/GLONASS foram comparadas com as coordenadas estimadas no levantamento relativo cinemático com integração GPS/GLONASS. A precisão média em cada coordenada atingiu melhorias com a inserção do GLONASS no processamento, percentualmente chegaram à 24,5%, o que representou em torno de 4 cm de diferença nas precisões.

Com relação às diferenças nas estimativas das coordenadas no PPP cinemático obtidos com uso de dados GPS/GLONASS em relação ao uso de dados apenas GPS, indicaram melhorias percentuais em todas as coordenadas, chegando em média a 58%. Quanto a resultante planimétrica do erro (Erro 2D) e planialtimétrica (Erro 3D) melhores resultados foram obtidos, em média 72,5%.

De um modo geral a integração GPS/GLONASS proporcionou melhores estimativas dos parâmetros para o posicionamento GNSS com melhorias variando de 10% a 30% em termos de acurácia e melhor convergência.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os lançamentos de novos satélites com tecnologias cada vez mais modernizadas favorecem o desenvolvimento de pesquisas no campo da Geodésia e aplicações envolvendo o uso de dados da integração GPS/GLONASS e futuramente outros sistemas que compõem o GNSS. Então cresce a importância de se aprofundar ainda mais o estudo da integração GPS/GLONASS, considerando esta fase de modernização dos sistemas. Algumas recomendações são feitas para trabalhos futuros neste campo.

Análises de experimentos envolvendo o sistema de referência, no caso do GLONASS um novo sistema de referência tem sido adotado, o PZ-90.11 e a compatibilização deste com o WGS84 do GPS pode ser explorada.

O PPP nesta pesquisa foi analisado sobre a “óptica” da integração GPS/GLONASS não só em termos de acurácia das coordenadas, mas também de outros parâmetros envolvidos na estimativa. Recomenda-se para trabalhos futuros análise envolvendo estimativas da ionosfera, relógios dos receptores e atrasos de *hardware* entre os sistemas.

Recomenda-se a implementação efetiva da integração numérica das órbitas GLONASS e análises visto que este trabalho contemplou a revisão bibliográfica sobre o assunto. Além disto, recomenda-se a aplicação das efemérides precisas do IGS, as quais já contam atualmente com órbitas GLONASS, as quais são dadas no ITRF.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. A.; GALO, M. **Transformação de coordenadas e Datum com propagação de covariâncias**. Simpósio Brasileiro de Geomática. 2002. p.113-120.

BARBOSA, E. M. **Integridade, disponibilidade e acurácia no posicionamento RTK e RTK em rede: Investigação no contexto da rede GNSS ativa do Estado de São Paulo**. 2010. 140f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente/SP, 2010.

BOUCHER C.; ALTAMIMI, Z. **ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations and the related transformation parameters**. Journal of Geodesy. v.75, p.613-619, 2001.

CAI, C. **Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GPS and GLONASS Measurements**. 2009. 153f. Thesis. University of Calgary, Calgary, Alberta. Canadá, 2009.

_____.; GAO, Y. **Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations**. Journal of Global Positioning System. v.6, p.3-22, 2007.

CAMARGO, P. O.. **Ajustamento de Observações (versão preliminar)**. Presidente Prudente, 2000. Notas de aulas do Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica - FCT/UNESP.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por Mínimos Quadrados**. 2^a ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2004. 175p.

FENG, S. et al. **Carrier phase-based integrity monitoring for high-accuracy positioning**. GPS Solutions. v.13, p.13-22, 2009.

_____. et. al. **Integrity Monitoring for Carrier Phase Ambiguities**. ION GNSS. 2010.

FERREIRA, L. D. D. **Dinâmica Orbital**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1998. 117 p.

GAO, Y., ZHANG, Y., CHEN, K. **Development of a Real-Time Single-Frequency Precise Point Positioning System and Test Results**. ION GNSS 19^o International Technical Meeting of the Satellite Division. Fort Worth, Texas. 2006. p. 26-29.

GEMAEL, Camil. **Introdução ao ajustamento de observações geodésicas: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora da UFPR, 1994. 319p.

_____. **Introdução a geodésia física**. Série didática. Curitiba: Editora da UFPR, 1999. n.43. 304p.

GENG, J.; TEFERLE, F. N.; MENG, X.; DODSON, A. H. **Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning**. Advances in Spaces Research. v.47, n.10, p.1664-1673. 2011.

GLONASS. **GLONASS Status**. Central Research Institute of Machine Building, Information Satellite System – Reshetnev Company, Russian Federal Space Agency. ICG WG-A Meeting. 2012. Disponível em < <https://igsceb.jpl.nasa.gov/assets/pdf/Poland%202012%20-%20ICG%20Marareskul%20PR67.pdf> > Acesso em Set. 2015.

GLONASS. **GLONASS Space segment, status & modernization**. Information Satellite System – Reshetnev Company, Russian Federal Space Agency. ICG-7. Beijing, China. 2012. Disponível em < <http://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/icg-7/wg/wga1-1.pdf> > Acesso em Mar. 2015.

GOMES, V. M. **Determinação de órbita de satellites artificiais em tempo real através da solução de navegação GPS**. 2004. 123f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia e Tecnologias Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos – SP, 2004.

GPS World. **Sanctions delay Russian's GLONASS-K2 Program**. Disponível em <<http://gpsworld.com/sanctions-delay-russias-glonass-k2-program/>> Acesso em: set. 2015.

HOFMANN-WELLENHOF.; LICHTENEGGER, B.; WASLE, E. H. **GNSS: Global Navigation Satellite Systems**. Viena: SprinerWienNewYork. 2007. 522p.

ICD. **Interface Control Document. 2008**. Ed 5.1, Russian Institute of Space Device Engineering. Moscou (Rússia), 2008. Disponível em <<http://www.spacecorp.ru/upload/iblock/1c4/cgsgaaxymyt%205.1%20ENG%20v%202014.02.18w.pdf>>, Acesso em: jan. 2014.

JOKINEN, A. et al. **Precise Point Positioning and integrity monitoring with GPS/GLONASS**. 2011. Disponível em: <<http://www.rin.org.uk/uploadedpdfs/conferenceproceedings/jokinen%20paper%20a-web.pdf>> Acesso em: mar. 2015.

LAURICHESSE, D.; et al. **Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination**. Navigation (Journal). v.56. n.2, 29p. 2009.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 3ª ed. New York: John Wiley & Sons, 2004. 435p.

MACHADO, W. C., MONICO, J. F. G **Utilização do software GPSeq na solução rápida das ambiguidades GPS no posicionamento relativo cinemático de bases curtas**. Pesquisas. Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, v.29, n.2, p.89-99. 2002.

MARQUES, H. A. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS**. 2012. 245f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012.

_____. et al. **Efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera no posicionamento GNSS no Brasil**. Revista Brasileira de Geofísica, São Paulo. v.27, n.3, p.357-374. 2009.

MATSUOKA M.T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. 2007. 263f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.

OCHIENG, W., et al. **User level integrity Monitoring and quality control for high accuracy positioning using GPS/INS measurements**. Journal of Global Positioning Systems. v7, n.2, p.104-114, 2008.

MARTIN, A. et al. **Kinematic GNSS-PPP results from various software packages and raw data configurations**. Scientific Research and Essays. v.7, n.3, p.419-431. 2002.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2008. 476p.

_____.; ROFATTO, V. F.; MENDONÇA, M. A. M. **Introdução e aplicação da diluição da precisão das ambiguidades GNSS – ADOP**. Boletim de Ciências Geodésicas – Online version. Curitiba. v.20, n.2, p.279-299. 2014.

_____. et al. **Acurácia e Precisão: Revendo os conceitos de forma acurada.** Boletim de Ciências Geodésicas, Sér. Comunicações. Curitiba. v.15, n.3, p. 469-483. 2009.

PARDAL, P. C. P. M. **Determinação de órbita em tempo real através de filtro não linear de Kalman Sigma-ponto.** 2011. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39KM826>>. Acesso em: out. 2014.

PETIT G.; LUZUM, B. **IERS Conventions (2010)**, IERS Technical Note 36, Central Bureau of IERS- Frankfurt, Alemanha. 179 p.

POLEZEL, W. G. C. **Investigações sobre o impacto da modernização do GNSS no posicionamento.** 2010. 107f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2010.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS.** 2001. 167f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications.**2. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SILVA, H. A. **Avaliação de modelos estocásticos no posicionamento GNSS.** 2009. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2009.

SOUZA, A. N. **Avaliação das coordenadas GNSS obtidas pelo posicionamento cinemático RTK/NTRIP e PPP.** 2013. 156f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Tecnologias da Geoinformação) Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SOUZA, E. M. **Efeito de multicaminho de alta frequência no GPS: detecção e atenuação utilizando wavelets.** 2009. 140f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2009.

STATELLA, T; et al. **Cálculo dos vetores de posição e velocidade dos satélites GLONASS a partir das efemérides transmitidas e aspectos relacionados à sua integração com o GPS.** Pesquisas em Geociências. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, v.40, n.2, p.177-183, 2013.

STEWART, M; TSAKIRI, M. **GLONASS broadcast orbit computation.** GPS Solutions, v.2, n.2, p.16-27. 1998.

TEUNISSEN, P. J. G; ODIJK, D; de JONG, C. D. **Ambiguity Dilution of Precision: An additional tool for GPS quality control.** Department of Mathematical Geodesy and Positioning. Thijsseweg. The Netherlands. 1999.

TORGE, W. **Geodesy.** 3ªed. Completely revised and extended ed. Berlim, New York: Walter de Gruyter, 2001. 416p.

UNOOSA – *United Nations Office for Outer Space Affairs*. **System of Geodetic Parameters “Parametry Zemli 1990” PZ-90.11**. 9th Meeting of the International Committee on GNSS (ICG-9). Praga. República Checa. Disponível em: <<http://www.unoosa.org/pdf/icg/2014/wg/wgd7.pdf>> Acesso em: ago. 2015.

_____. **GLONASS Status and development**. Information Satellite Systems. Workshop on the applications of Global GNSS Navigations Systems. Krasnoyarsk, Russia. <<http://www.unoosa.org/pdf/sap/2015/RussiaGNSS/Presentations/2.pdf>> Acesso em: set. 2015.

ZINOVIEV, A. E. **Using GLONASS in Combined GNSS Receivers: Current Status**. ION GNSS 18^o International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, California, 2005. p.1046-1057.