

GLONASS: Revisão teórica e estado da arte

RESUMO

Gabriel Oliveira Jerez

gabrielojerez@gmail.com

orcid.org/0000-0001-6893-2144

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Daniele Barroca Marra Alves

danibarroca@fct.unesp.br

orcid.org/0000-0002-9033-8499

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

O GPS (*Global Positioning System*) e o GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*) começaram a ser desenvolvidos ainda no início da década de setenta e são, atualmente, os principais sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) com constelação completa disponível. Apesar de os dois sistemas terem obtido constelações completas em períodos próximos, o GLONASS passou por um longo período de degradação, causada principalmente pela falta de investimentos e lançamentos para substituição de satélites mais antigos. Com isso o uso de dados combinados GPS/GLONASS acabou se tornando inviável já no final da década de noventa, devido à instabilidade do GLONASS. Porém, o sistema passou por um processo de modernização e restabelecimento a partir de 2001, obtendo novamente constelação completa de 24 satélites e cobertura global em 2011. A partir dessa nova realidade, novos estudos se fizeram necessário. Nesse sentido o presente trabalho buscou fazer uma revisão dos principais conceitos relacionados ao sistema, bem como do seu histórico, estrutura, além do seu processo de modernização e algumas perspectivas futuras.

PALAVRAS-CHAVE: GLONASS. Modernização. GNSS.

INTRODUÇÃO

O surgimento dos sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) revolucionou as atividades que envolvem posicionamento. Desenvolvidos de maneira simultânea e independente, o russo GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*) (<https://glonass-iac.ru/en/>) e o americano GPS (*Global Positioning System*) (<http://gps.gov/>) são, atualmente, os principais sistemas de navegação por satélite, sendo os únicos a dispor de constelações completas. Além desses, mais dois sistemas globais encontram-se em desenvolvimento, o europeu Galileo (<http://galileoic.org/>) e o chinês BeiDou (<http://beidou.gov.cn/>), além dos sistemas de aumento baseados em estações terrestres e satélites.

Com a obtenção de constelação completa pelos dois sistemas em 1995, a utilização de dados combinados gerou grande interesse devido ao número de satélites disponíveis que os dois sistemas podiam oferecer (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; LEICK, 2004). O maior número de satélites visíveis tem importância devido à quantidade de observações disponíveis e a possibilidade de melhoria na geometria dos satélites, principalmente quando são levados em conta intervalos de coleta menores. Porém, logo após completar sua constelação, o GLONASS passou por um longo período de degradação devido à falta de investimentos e curta vida útil dos primeiros satélites. Com isso, o sistema teve uma rápida queda no número de satélites operacionais, chegando a contar com períodos como de 2001, em que apenas de seis a oito satélites estavam disponíveis (FEAIRHELLER; CLARK, 2006). Enquanto o GPS, além de se manter em pleno funcionamento ao longo desse período, no ano 2000 deixou de utilizar a técnica SA (*Selective Availability*) que degradava o posicionamento intencionalmente. Com a extinção da SA a precisão no posicionamento melhorou em torno de dez vezes (MONICO, 2008).

A partir deste cenário, a maior parte das pesquisas desenvolvidas se concentrou na aplicação dos dados apenas do sistema GPS. Isso porque com a constelação do GLONASS incompleta, a utilização de seus dados oferecia resultados variáveis e, muitas vezes insatisfatórios, principalmente devido à instabilidade do número de satélites visíveis durante o período de coleta, como apresentado em alguns resultados de Vaz et al. (2013), Polezel (2010) e Bruyninx (2007). Porém, após esse período de degradação do GLONASS, teve início em 2001, um plano de restabelecimento e modernização do sistema, visando primeiramente a cobertura completa do território russo e, posteriormente, cobertura global (FEAIRHELLER; CLARK, 2006). No processo de modernização novas gerações de satélites começaram a ser desenvolvidas e novas estações de monitoramento passaram a ser instaladas em todo o globo, a partir de parcerias do governo russo com diversos países. Em 2011 o GLONASS restabeleceu sua constelação, alcançando novamente 24 satélites operacionais.

Por ter se estabelecido e disseminado primeiro, diversos estudos foram desenvolvidos com o intuito de analisar o sistema GPS e seus dados no emprego de diversos métodos de posicionamento, como em Ge et al. (2008), Marques (2012) e Alves e Monico (2011). Porém, com o GLONASS existem ainda muitas investigações a serem realizadas. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo fazer uma revisão teórica do sistema GLONASS, apresentando sua estrutura, histórico, modernização e perspectivas futuras.

GLONASS

O GLONASS (cuja nomenclatura oficial é *Global'naya Navigatíonnaya Sputnikowaya Sistema*) é o sistema que foi desenvolvido pela antiga União Soviética. Inicialmente de responsabilidade do *Sovietic Union's Scientific Publication Association of Applied Mechanics*, atualmente é mantido pelo governo russo, sendo controlado e desenvolvido pela *Russian Federation Space Forces*. Assim como o GPS, o GLONASS foi desenvolvido com o objetivo de determinar coordenadas tridimensionais, medidas de velocidade e de tempo, independente das condições climáticas em qualquer lugar do planeta ou próximo a ele. Inicialmente com finalidade militar, ele também teve sua utilização expandida para uso civil, conforme declarações posteriores do governo russo (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Hofmann-Wellenhof et al. (2008) apresentam os cinco segmentos de abrangência do programa de desenvolvimento do GLONASS e as respectivas instituições responsáveis, sendo esses:

- Manutenção, modernização, desenvolvimento, operação e pesquisa relacionada e atividades de desenvolvimento (*Federal Space Agency e Ministry of Defense*);
- Desenvolvimento de receptores de navegação e equipamentos para usuários civis, preparação da indústria para produção em massa de receptores GNSS (*Agency of Control Systems ou Ministry of Industry*);
- Implementação de equipamentos GNSS e tecnologia para transporte, seja para aviação, marinha ou transporte terrestre (*Ministry of Transport*);
- Desenvolvimento de receptores GNSS e equipamentos para usuários especiais (militar e forças especiais) (*Ministry of Defense*).

Na próxima seção é apresentado um breve histórico do sistema GLONASS, em seguida é descrita sua estrutura levando em conta os segmentos espacial e de controle e os sistemas de referência e tempo adotados, na sequência é abordada sua fase de modernização e, por fim, são apresentadas algumas perspectivas futuras.

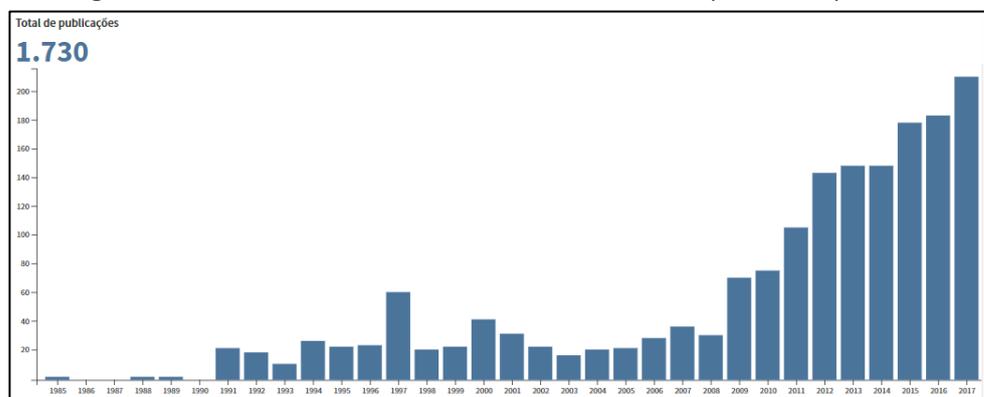
HISTÓRICO

Ainda na antiga União Soviética foi dado início ao projeto que se tornaria o sistema GLONASS. Em 1995 o sistema alcançou constelação completa, com 24 satélites, sendo logo declarado operacional. Com a falta de lançamentos e a curta vida útil dos primeiros satélites, o sistema passou por um grande período de degradação, chegando a contar com apenas seis satélites operacionais em alguns períodos de 2001 (POLISCHUK et al., 2002; FAIRHELLER e CLARK, 2006).

No início dos anos 2000 teve início um plano de modernização e restauração do GLONASS. Com seu restabelecimento foi possível notar novo interesse nas possibilidades de aplicação do sistema. Não apenas nas pesquisas envolvendo o tema, como também no desenvolvimento de produtos que utilizam o sistema, desde celulares com sistemas de navegação até receptores convencionais. Para ilustrar o crescimento do interesse pelo tema a Figura 1 apresenta a evolução do

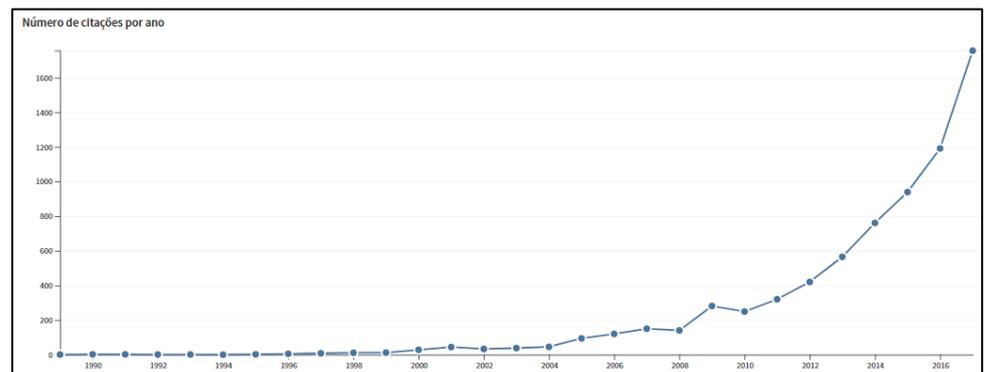
número de trabalhos publicados com temática relacionada ao GLONASS. Já a Figura 2 mostra a evolução do número de citações do termo “GLONASS”. Os valores correspondem a informações obtidas até 2017 e são fornecidas pela plataforma de pesquisa *Web of Science*. A variação no interesse sobre o sistema também pode ser observada para o público geral. Na Figura 3 é apresentada a variação das pesquisas pelo termo “GLONASS” na página de busca do *Google*. A versão disponível da ferramenta permite visualizar as consultas de termos a partir de 2004 e realiza uma normalização das consultas, sendo atribuído o valor 100 ao dia com maior número de pesquisas. É possível verificar significativo aumento de produções e pesquisas, principalmente a partir de 2010, período em que o sistema estava próximo de restabelecer sua constelação, e posteriormente, já com constelação completa.

Figura 1 – Número de trabalhos relacionados ao GLONASS publicados por ano



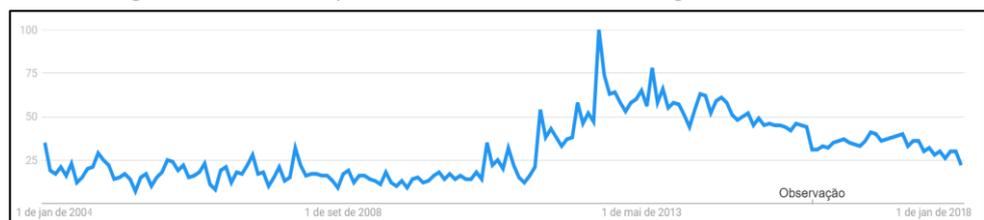
Fonte: <<http://apps-webofknowledge.ez87.periodicos.capes.gov.br>>.

Figura 2 – Citações do termo “GLONASS” em publicações por ano



Fonte: <<http://apps-webofknowledge.ez87.periodicos.capes.gov.br>>.

Figura 3 – Consultas pelo termo “GLONASS” no *Google* de 2004 a 2017



Fonte: <<https://trends.google.com/trends/explore?date=2004-01-01%202017-03-25&q=glonass>>.

A seguir é apresentado um breve histórico com os principais acontecimentos relacionados ao sistema GLONASS desde seu surgimento. Os dados apresentados foram obtidos em Hofmann-Wellenhof et al. (2008), NIS-GLONASS (2015) e GPS World (2016a; 2016b; 2017).

- 1972** - O trabalho de criação do sistema, que viria a ser conhecido como GLONASS, tem início, com participação de diversas organizações;
- 1982** - O primeiro satélite GLONASS é lançado em órbita em 12 de outubro;
- 1991** - Testes do Governo para o sistema e constelação parcial de satélites é concluída;
- 1993** - Por decreto presidencial, o GLONASS é declarado oficialmente em produção pelo Ministério de Defesa russo. A constelação inclui oito satélites;
- 1995** - O número de veículos espaciais GLONASS chega a 24, completando a constelação de satélites e fornecendo posicionamento global a qualquer momento;
- 2001** - Após um longo período de degradação, um programa de metas do sistema global de navegação é adotado, o mesmo prevê a cobertura total do território russo até o ano de 2008;
- 2003** - Lançado o primeiro GLONASS-M, da segunda geração de satélites;
- 2010** - Seis veículos espaciais GLONASS-M são lançados, levando a constelação ao número total de 22 satélites. Disponibilidade integral do posicionamento GLONASS em 100% da Rússia e 99,5% do restante do planeta;
- 2011** - O primeiro GLONASS-K1 da terceira geração de satélites é lançado em 26 de fevereiro. Veículo espacial GLONASS-M é lançado em órbita em 03 de outubro, levando o sistema a alcançar constelação completa;
- 2013** - Primeira estação terrestre do sistema GLONASS no Hemisfério Ocidental é posta em funcionamento na capital do Brasil em 19 de fevereiro;
- 2014** - Segundo satélite GLONASS-K1 é lançado em 01 de dezembro. Produção dos satélites GLONASS-K2 é adiada. No dia 14 de junho é lançado um novo satélite GLONASS-M com L3 (CDMA) experimental;

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A seguir são apresentadas as principais características do sistema GLONASS, relacionadas aos segmentos espacial e de controle, bem como dos sistemas de tempo e referência. Em algumas referências são utilizadas as nomenclaturas G1, G2 e G3 para relacionar as portadoras do GLONASS, porém, no presente trabalho optou-se pela utilização das nomenclaturas mais utilizadas, L1, L2 e L3, também adotadas no documento oficial do sistema, *Interface Control Document 5.1* (GLONASS, 2008).

SEGMENTO ESPACIAL

O GLONASS é constituído de 24 satélites operacionais e 03 de reserva, distribuídos em três planos orbitais aproximadamente circulares, separados em 120°, inclinados aproximadamente 64,8° em relação ao equador. Com altitude média de 19.100 km e período orbital de 11h15min44seg (Tempo Sideral).

Devido ao ângulo de inclinação maior que o do GPS (55°), a constelação GLONASS apresenta cobertura um pouco diferente, podendo fornecer melhor cobertura para altas latitudes. Com o sistema completo, entre seis e onze satélites são visíveis em qualquer ponto da Terra (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Em relação às frequências, em sua concepção original, a tecnologia utilizada é a FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), na qual cada satélite transmite em uma frequência, sendo o satélite identificado de acordo com a mesma (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). A obtenção das frequências é a partir de uma frequência fundamental e de um acréscimo multiplicado pelo número do canal de transmissão. Os demais sistemas utilizam a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), na qual todos os satélites transmitem na mesma frequência, sendo a identificação do mesmo realizada a partir de um código (SEEBER, 2003).

A partir das frequências fundamentais (Tabela 1) e dos canais dos satélites obtidos na página oficial do sistema (GLONASS, 2018) é possível obter a Tabela 2 com as frequências de cada satélite da constelação GLONASS atual. Onde NS é o número do satélite, c é o canal de frequência e f_{L1} , f_{L2} e f_{L3} são as frequências das portadoras L1, L2 e L3. Na coluna das frequências em L3 são apresentados os valores apenas dos dois satélites operacionais que atualmente transmitem dados desta portadora. A obtenção das frequências é apresentada por Seeber (2003):

$$f_L = f_0 + k\Delta_{f_L} \quad (1)$$

Tabela 1 – Dados das ondas portadoras L1, L2 e L3

	L1 (MHz)	L2 (MHz)	L3 (MHz)
f_0	1602,0000	1246,0000	1204,7040
Δ_f	0,5625	0,4375	0,4230

Fonte: Hofmann-Wellenhof et al. (2008).

Inicialmente os valores de k variavam de 0 a 24, sendo o valor 0 utilizado para testes. Devido a interferências nas observações de radioastronomia e satélites de comunicação as frequências foram realocadas para valores menores (MONICO, 2008). Segundo *Interface Control Document 5.1*, os satélites lançados a partir de 2005 usariam canais de -7 a +6 (GLONASS, 2008). De acordo com Hofmann-Wellenhof et al. (2008) os canais +5 e +6 seriam apenas para fins técnicos, porém, atualmente (abril de 2018) o canal +5 é utilizado para os satélites 03 e 07, e o canal +6 para os satélites 04 e 08. O canal -5 atualmente pertence ao satélite GLONASS-K1, lançado em 2011. Vale ressaltar que os satélites que compartilham os mesmos canais são diametralmente opostos, com isso não são visíveis simultaneamente.

Tabela 2 – Frequências das portadoras por satélite

NS	C	f _{L1}	f _{L2}	f _{L3}
01	1	1602,5625	1246,4375	-
02	-4	1599,7500	1244,2500	-
03	5	1604,8125	1248,1875	-
04	6	1605,3750	1248,6250	-
05	1	1602,5625	1246,4375	-
06	-4	1599,7500	1244,2500	-
07	5	1604,8125	1248,1875	-
08	6	1605,3750	1248,6250	-
09	-2	1600,8750	1245,1250	1203,8580
10	-7	1598,0625	1242,9375	-
11	0	1602,0000	1246,0000	-
12	-1	1601,4375	1245,5625	-
13	-2	1600,8750	1245,1250	-
14	-7	1598,0625	1242,9375	-
15	0	1602,0000	1246,0000	-
16	-1	1601,4375	1245,5625	-
17	4	1604,2500	1247,7500	-
18	-3	1600,3125	1244,6875	-
19	3	1603,6875	1247,3125	-
20	2	1603,1250	1246,8750	-
21	4	1604,2500	1247,7500	1206,3960
22	-3	1600,3125	1244,6875	-
23	3	1603,6875	1247,3125	-
24	2	1603,1250	1246,8750	-

Fonte: Autoria própria (2017).

Em relação aos receptores utilizados, uma vez que as frequências dos sistemas GPS e do GLONASS são semelhantes, é possível ser utilizada uma antena combinada e um amplificador comum em um mesmo equipamento. Isso facilita o desenvolvimento de equipamentos que rastreiam satélites de ambos os sistemas simultaneamente. Em relação ao processamento dos sinais, porém, ocorrem algumas diferenças que devem ser levadas em consideração nas metodologias empregadas (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Quanto às informações das órbitas dos satélites, assim como com o GPS, têm-se as efemérides transmitidas e precisas. As efemérides precisas GLONASS são produzidas e disponibilizadas desde 1998 seguindo o mesmo formato de arquivo das efemérides precisas GPS. Atualmente as efemérides precisas GLONASS são disponibilizadas por meio da página do IGS (*International GNSS Service*) (<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/glonass/products/>).

Já as efemérides transmitidas, ao invés dos elementos keplerianos usados nas efemérides GPS, são fornecidas as posições, velocidades e acelerações dos satélites, causadas pelas perturbações gravitacionais do sol e da lua. Os valores são fornecidos em intervalos de trinta minutos, sendo que para o cálculo das

coordenadas é necessária a aplicação de um método de interpolação. Um método de integração numérica utilizado é o Runge-Kutta de quarta ordem (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

SEGMENTO DE CONTROLE

O segmento de controle é composto pelo sistema de controle central, pela central responsável pela sincronização do tempo GLONASS e pelas estações de rastreamento. Entre outras atribuições de responsabilidade do segmento de controle Monico (2008) apresenta:

- predição das órbitas dos satélites;
- transferência das efemérides, das correções dos relógios e dos almanaques em cada um dos satélites;
- sincronização dos relógios dos satélites com o sistema de tempo do GLONASS;
- estimativa das discrepâncias entre o sistema de tempo do GLONASS e o TUC_{US} (TUC da União Soviética);
- controle dos satélites.

O segmento de controle é também responsável por atividades não operacionais como de aquisição e lançamento (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). O controle central do GLONASS está localizado na cidade de Moscou e as estações de monitoramento, inicialmente distribuídas de maneira homogênea no território da antiga União Soviética, estão sendo expandidas por diversos países desde 2013. Essas estações começaram a ser implantadas em outras regiões como parte do projeto de modernização do sistema, mais detalhes serão apresentados na seção Modernização e Perspectivas Futuras. A Figura 4 apresenta as estações inicialmente implantadas, assim como os locais de lançamentos e escritórios de desenvolvimento e pesquisa.

Figura 4 – Distribuição das primeiras estações de controle GLONASS



Fonte: <<http://www.russianspaceweb.com/centers.html>>.

SISTEMA DE REFERÊNCIA

Inicialmente o sistema de referência adotado pelo GLONASS foi o SGS-85 (*Sovietic Geodetic System 1985*), refinado para o SGS-90, com mesma definição. Posteriormente o sistema de referência utilizado foi alterado para o PE-90 (*Parameters of the Earth 1990*) ou PZ-90 (*Parametry Zemli 1990*). O PZ-90 tem orientação seguindo: origem no centro de massa da Terra; eixo Z orientado para o polo terrestre conforme recomendado pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*), direcionado para o Polo Norte Médio da época 1900-1905; eixo X resulta da linha de interseção entre o plano do equador com o plano representado pelo Meridiano de Greenwich; e o eixo Y completa o sistema dextrógiro (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). A Tabela 3 apresenta os parâmetros do elipsoide associado ao PZ-90.

Tabela 3 – Parâmetros do elipsoide PZ-90

Parâmetro	Valor	Descrição
a	6.378.136 m	semi-eixo maior
f	1/298,257839303	achatamento
ω_e	$7.292.115 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$	velocidade angular da Terra
μ	$3.986.004,4 \times 10^{-08} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$	constante gravitacional da Terra

Fonte: Hofmann-Wellenhof et al. (2008).

De outubro de 1998 a abril de 1999 foi realizado o IGEX-98 (*International GLONASS EXperiment*), realizado em parceria pelo IAG (*International Association of Geodesy*), IGS, ION (*US Institute of Navigation*) e IERS, com contribuição de em torno de 75 organizações. Nele foram utilizados dados de mais de 60 estações em mais de 25 países, com dados de simples e dupla frequências de satélites GPS e GLONASS. Além disso, foram ainda coletados dados laser de 30 satélites em estações em todo o planeta (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

Os resultados obtidos foram reunidos em oito sessões de trabalhos disponíveis em formato digital (<https://igscb.jpl.nasa.gov/overview/pubs/igex98.html>). Entre as maiores contribuições obtidas com o experimento, além dos parâmetros de transformação do PZ-90 para o ITRF97 e para o WGS-84, houve ainda melhoria na determinação das órbitas precisas do GLONASS, cujas precisões passaram de dezenas de metros para até alguns decímetros (WEBER AND FRAGNER, 1999).

O projeto que deu continuidade ao rastreamento e análise de dados GLONASS de algumas estações foi chamado de IGLOS (*International GLONASS Service*) sob responsabilidade da IAG (MONICO, 2008). O projeto que teve início em 2000 se encerrou em 2005 após os dados e produtos GLONASS terem alcançado os padrões operacionais do IGS. Mais informações sobre o projeto estão disponíveis *on-line* na página do IGS (<https://igscb.jpl.nasa.gov/projects/iglos/>). Atualmente as órbitas precisas do GLONASS possuem acurácia de aproximadamente 3 cm, sendo a acurácia das órbitas finais e rápidas do GPS de 2,5 cm (IGS, 2017).

A primeira modernização do PZ-90 (PZ-90.02) foi finalizada em 2002, sendo utilizados dados coletados desde 1990 de estações da rede SGN (*Space Geodetic Network*) com receptores GPS/GLONASS. A última realização do sistema foi a PZ-90.11, que utilizou dados de estações da rede SGN e de algumas da rede IGS.

Outra melhoria na nova realização foi a utilização de dados DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) (2002, 2008 e 2010), obtidos de estações combinadas da rede IGS (RUSSIAN FEDERATION, 2014). Desde 31 de dezembro de 2013 adota-se a realização PZ-90.11 como sistema de referência nacional para apoio a missões orbitais e de navegação (GLONASS, 2016a).

Com a orientação dos eixos, escala e origem do PZ-90 é assegurado alinhamento aos parâmetros do ITRF com similaridade a nível centimétrico. Na Tabela 04 são apresentados os parâmetros de transformação para o PZ-90.11 do PZ-90, PZ-90.02, WGS-84 (G1150) e ITRF 2008 fornecidos pelo documento de referência do PZ-90.11 (RUSSIAN FEDERATION, 2014).

Tabela 4 – Parâmetros de transformação para o PZ-90.11

Parâmetros → Transformações	Δ_x (m)	Δ_y (m)	Δ_z (m)	ω_x (10^{-03} arcsec)	ω_y (10^{-03} arcsec)	ω_z (10^{-03} arcsec)	m (10^{-06})
PZ-90	-1,443	0,156	0,222	-2,300	3,540	-134,210	-0,228
PZ-90.02	-0,373	0,186	0,202	-2,300	3,540	-4,210	-0,008
WGS-84 (G1150)	-0,013	0,106	0,022	-2,300	3,540	-4,210	-0,008
ITRF 2008	0,003	0,001	0,000	-0,019	0,042	-0,002	0,000

Fonte: Adaptado de Russian Federation (2014).

SISTEMA DE TEMPO

O sistema de tempo do GLONASS é relacionado ao TUC (Tempo Universal Coordenado), mas com um *offset* constante de três horas, devido à diferença de fusos entre Moscou e *Greenwich*. A relação implica que os saltos de segundos, presentes no TUC, também estão incluídos no tempo GLONASS. Existe ainda um termo a ser inserido na relação, devido ao uso de relógios diferentes para o monitoramento das escalas de tempo. Essa diferença, τ_c , é inferior a 1 milissegundo, sendo seu valor fornecido nos arquivos de navegação GLONASS (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). A relação do tempo GLONASS (t_{GLONASS}) com o TUC é apresentada a seguir:

$$\text{TUC} = t_{\text{GLONASS}} + \tau_c - 3^h. \quad (2)$$

Na Figura 5 é apresentado um trecho de um arquivo de navegação GLONASS, com o valor de τ_c em destaque.

Figura 5 – Efeméride transmitida GLONASS

2.01		GLONASS NAV DATA		RINEX VERSION / TYPE	
CCRINEXG V1.4 UX		CDDIS		PGM / RUN BY / DATE	
IGS BROADCAST EPHEMERIS FILE		02-JUN-14 15:33		COMMENT	
teqc 2009Mar23		20140602 0:19:		COMMENT	
2014 6 1		0.178813934326D-06		CORR TO SYSTEM TIME	
16				LEAP SECONDS	
				END OF HEADER	
1	14	6	1	0 15 0.0	-0.163807533681D-03 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
					0.214273002930D+05 0.663795471191D-01 0.931322574616D-09 0.000000000000D+00
					-0.137748720703D+05-0.205929756165D+00 0.186264514923D-08 0.100000000000D+01
					-0.119218847656D+04 0.355656623840D+01-0.931322574616D-09 0.000000000000D+00
2	14	6	1	0 15 0.0	0.754697248340D-04 0.909494701773D-12 0.000000000000D+00
					0.106227480469D+05 0.191955471039D+01 0.931322574616D-09 0.000000000000D+00
					-0.158563842773D+05-0.131132411957D+01 0.186264514923D-08-0.400000000000D+01
					-0.169006923828D+05 0.242809009552D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
3	14	6	1	0 15 0.0	0.166064128280D-04 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
					-0.665972021484D+04 0.270266437530D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
					-0.875103125000D+04-0.163181114197D+01 0.000000000000D+00 0.500000000000D+01
					-0.229738139648D+05-0.163802146912D+00 0.186264514923D-08 0.000000000000D+00
4	14	6	1	0 15 0.0	0.749798491597D-04 0.909494701773D-12 0.000000000000D+00
					-0.200245639648D+05 0.186107826233D+01-0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
					0.364598560547D+04-0.992887496948D+00-0.931322574616D-09 0.600000000000D+01
					-0.153500825195D+05-0.266123676300D+01 0.279396772385D-08 0.000000000000D+00
5	14	6	1	0 15 0.0	0.840518623591D-05 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
					-0.214652475586D+05-0.484132766724D-01-0.931322574616D-09 0.100000000000D+01
					0.137436655273D+05 0.195640563965D+00-0.186264514923D-08 0.100000000000D+01
					0.104387548828D+04-0.355612659454D+01 0.931322574616D-09 0.000000000000D+00

Fonte: <<http://www.igs.org/>>.

A central de sincronização do tempo é localizada em Schelkovo, próxima a Moscou. Para o controle do sistema de tempo do GLONASS dois tipos de medidas são realizados, a distância dos satélites por técnicas de radar e o sinal de navegação transmitido pelos satélites, que são comparados a um tempo e a uma fase de referência. A partir dessas medidas os *offsets* do relógio e da fase são determinados e preditos. Esses valores são então transmitidos aos satélites ao menos uma vez ao dia (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

MODERNIZAÇÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Após um período de rápida degradação, em 2001 teve início um plano de metas que visava, entre outros objetivos, o restabelecimento da cobertura global e modernização do sistema GLONASS. Com isso novas gerações de satélites foram desenvolvidas, sendo a primeira delas a dos satélites GLONASS-M, posteriormente foram desenvolvidos os GLONASS-K1 e, atualmente, está em desenvolvimento a geração dos satélites GLONASS-K2. A Figura 6 apresenta, da esquerda para a direita, as gerações de satélites GLONASS na ordem de lançamento.

Figura 6 – Gerações dos satélites GLONASS



Fonte: Adaptado de <<http://www.russianspaceweb.com/uragan.html>>.

Os primeiros satélites GLONASS tinham massa de aproximadamente 1450 kg, três osciladores de Césio e vida útil estimada em três anos (na prática o tempo médio foi quatro anos e meio). Os satélites eram equipados ainda com propulsores (possibilitando manutenção das órbitas e realocações), controle de atitude, refletores laser e painéis solares (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). Como nos primeiros satélites GPS, a portadora L1 possuía sinal civil

e para usuários autorizados, enquanto a segunda portadora apresentava apenas sinal para usuários autorizados (MONICO, 2008).

A geração GLONASS-M contou com melhorias na acurácia do posicionamento e vida útil, estendida para sete anos (URLICHICH et al., 2011b). Os satélites tiveram, entre as melhorias, a diminuição do peso, que passou para 1230 kg, aumento na estabilidade dos relógios, comunicação entre satélites, operação autônoma do veículo, melhor sistema de controle de atitude, melhores baterias e parte eletrônica modernizada (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). Além disso, as mensagens de navegação foram melhoradas devido a informações adicionais, como divergências na escala de tempo do GPS e do GLONASS e informações de correção do tempo. E, ainda, foi incluído um novo sinal civil na portadora L2 (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). No dia 20 de julho de 2015 o último satélite GLONASS-M foi produzido, se juntando aos oito já prontos para lançamento naquele momento.

Os satélites GLONASS-K1 passaram a transmitir, além dos sinais FDMA, uma nova portadora, L3, com tecnologia CDMA, e com sinal civil. É importante ressaltar que apesar da nova portadora com CDMA, será mantida a transmissão dos sinais com tecnologia FDMA enquanto houver usuários de receptores com a configuração original (URLICHICH et al., 2011a). Entre as melhorias desta geração tem-se ainda, aumento da vida útil, que passou para dez anos, diminuição do peso dos satélites, que passou para 850 kg, e aumento na estabilidade dos relógios atômicos. Uma consequência importante da diminuição significativa do peso dos satélites é a possibilidade de aumento do número de unidades lançadas simultaneamente. Com a nova geração, dependendo do veículo utilizado, podem ser lançados pares ou até mesmo seis satélites ao mesmo tempo (POLISCHUK et al., 2002).

A geração GLONASS-K2 apresenta como principal modificação a inclusão de sinal com tecnologia CDMA nas três portadoras, enquanto a vida útil prevista continuará em dez anos. Essa geração na verdade constitui a sequência no projeto das gerações de satélites. A versão GLONASS-K1, no projeto inicial, era uma versão de testes, que atualmente já se encerrou com os dois satélites lançados (GPS WORLD, 2016c). A ideia inicial dos desenvolvedores era logo após esses testes dar início à produção da série GLONASS-K2. Porém, devido a problemas na importação de elementos dos satélites, foi decidido produzir mais nove satélites GLONASS-K1 e dois GLONASS-K2, para testes. A previsão inicial é que os nove satélites GLONASS-K1 sejam lançados até 2020. Já para os GLONASS-K2 não são esperados lançamentos antes de 2018. E, entre 2019 e 2020, após os testes previstos para os dois primeiros protótipos, é esperado o início da produção de mais satélites da geração (GPS WORLD, 2015, 2016c).

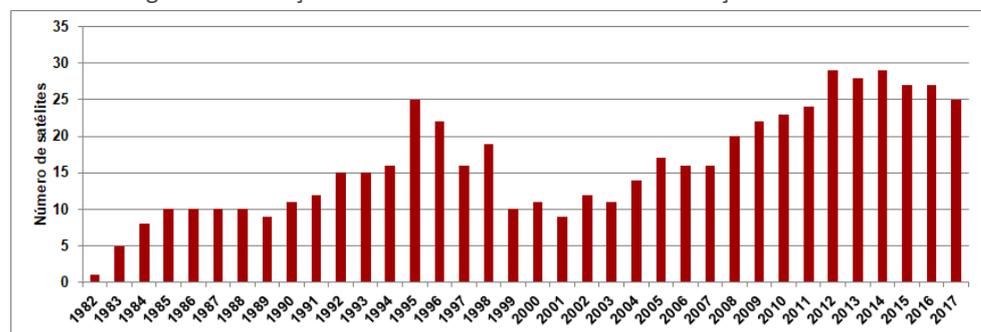
O primeiro satélite GLONASS-K foi lançado em 2011 e permanece com o *status* “em fase de testes”. Foi planejado o lançamento de um segundo satélite GLONASS-K entre o final de 2011 e início de 2012, porém, o lançamento foi adiado diversas vezes até ocorrer no dia 01 de dezembro de 2014, o mesmo se tornou operacional no dia 15/02/16 (VOZ DA RUSSIA, 2014).

Além dos satélites GLONASS-K em órbita, que transmitem também com tecnologia CDMA, no dia 14 de junho de 2014 foi lançado um novo satélite GLONASS-M experimental com uma nova portadora L3 que também transmite sinal com a mesma tecnologia. Desde o dia 03 de agosto de 2014 ele se encontra

operacional e testes de validação da acurácia da nova portadora estão em andamento (GPS WORLD, 2016b). Como citado anteriormente, além da transmissão com CDMA nessa portadora, a nova geração, GLONASS-K2, contará com essa transmissão também nas portadoras L1 e L2 (URLICHICH, 2011a). A transmissão de sinais com tecnologia CDMA pelo GLONASS é de grande importância devido à facilidade permitida para interoperabilidade com os outros sistemas GNSS, que se utilizam dessa técnica.

A Figura 7 mostra a evolução do número de satélites da constelação GLONASS desde o seu primeiro lançamento. Desde o ano 2011 o número de satélites operacionais se estabilizou e na maior parte do tempo o GLONASS se manteve com 24 satélites operacionais.

Figura 7 - Evolução do número de satélites da constelação GLONASS



Fonte: Adaptado e atualizado de URLICHICH et al. (2011b).

Atualmente (abril/2018) o sistema conta com 25 satélites em órbita, conforme Tabela 5, onde é possível verificar que 23 satélites se encontram operacionais, um em manutenção (desde 19/04/18) e um em fase de testes (primeiro GLONASS-K1 lançado).

Tabela 5 – Status da constelação GLONASS em 24/04/2018

Total de satélites na Constelação	25
Operacional	23
Em fase de comissionamento	-
Em manutenção	01
Sob verificação pelo <i>Satellite Prime Contractor</i>	-
Reservas	-
Em fase de vôo de testes	01
Total de satélites na Constelação	25

Fonte: <<https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>>.

Além dos projetos de modernização dos satélites, com o intuito de melhorar a qualidade do posicionamento, foram realizados refinamentos do monitoramento do sistema de tempo do sinal, como dito anteriormente também foram realizados refinamentos do sistema de referência e, além disso, novas estações terrestres de controle passaram a ser implantadas. Inicialmente existiam estações apenas no território da antiga União Soviética, conforme apresentado anteriormente na Figura 4.

A primeira estação fora dessa região e primeira no Hemisfério Sul foi a implantada no Brasil, em Brasília, em fevereiro de 2013, na Universidade de Brasília. Uma estação de dados quânticos foi instalada próxima à primeira, em Brasília, e, além dessas, mais duas estações em território nacional foram planejadas como parte da rede de estações do GLONASS. Uma na sede do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) em Recife, inaugurada em fevereiro de 2016, e outra na Universidade de Santa Maria, inaugurada em 20 de abril de 2016. Além disso, projetos de instalação de outras estações em todo o mundo estão em andamento, incluindo países como China, Cuba e Nicarágua (SPUTINK NEWS, 2015; UFSM, 2016; GAZETA RUSSA, 2014; DIÁRIO DE PERNAMBUCO, 2016).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas GPS e GLONASS começaram a ser desenvolvidos simultaneamente, mas de forma independente ainda na década de setenta. Após um longo período de degradação, o GLONASS passou por modernizações e restabelecimento de sua constelação. Com este novo cenário, no presente trabalho foi proposta a realização de uma revisão dos principais conceitos relacionados ao sistema GLONASS, sendo descrita sua estrutura, histórico, modernização, bem como algumas perspectivas futuras.

GLONASS: Theory background and state of the art

ABSTRACT

GPS (Global Positioning System) and GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) development began in the seventies. They are currently the main GNSS (Global Navigation Satellite Systems) systems with full constellation available. Although both systems have achieved full constellation in near periods, GLONASS passed thru a fast degradation, mainly caused by the lack of investment and the non-launch of new satellites to replace the old and damaged ones. In this context the use of GPS/GLONASS combined data became not feasible in the late nineties caused by the GLONASS instability. However, in 2001 a modernization and restoration plan began and, since 2011, GLONASS have full constellation of 24 satellites with global coverage. With this new scenario, other studies become necessary. In this context this paper intended to review the main concepts related to the system, present a brief historic, structure and the modernization plan as well as some future perspectives.

KEYWORDS: GLONASS. Modernization. GNSS.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento da bolsa de pesquisa do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. GPS/VRS positioning using atmospheric modeling. **GPS Solutions**. Berlin: Springer-Verlag, n. 15, n. 3, p. 253-261, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10291-010-0187-3>.

BRUYNINX, C. Comparing GPS-only with GPS + GLONASS positioning in a regional permanent GNSS network. **GPS Solutions**. Berlin: Springer-Verlag, v. 11, n. 2, p. 97-106, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10291-006-0041-9>.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. **Recife vai sediar estação russa de monitoramento de navegação**. 2016. Disponível em <http://www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/tecnologia/2016/02/16/interna_tecnologia,627340/recife-vai-sediar-estacao-russa-de-monitoramento-de-navegacao.shtml>. acessos em mar. 2016.

FEAIRHELLER, S.; CLARK, R. Other Satellite Navigation Systems. In: KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. (Eds). **Understanding GPS: Principles and Applications**, 2 ed. Artech House, Norwood, 2006, cap 11, p. 595-634.

GAZETA RUSSA. **Estações do GLONASS serão instaladas em Cuba e na Nicarágua**. 2014. Disponível em <http://gazetarussa.com.br/ciencia/2014/06/23/estacoes_do_glonass_serao_instaladas_em_cuba_e_na_nicaragua_26181>. acessos em dez. 2014.

GE, M.; GENDT, G.; ROTHACHER, M.; SHI, C.; LIU, J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. **Journal of Geodesy**. Berlin: Springer-Verlag, v. 82, n. 7, p. 389-399, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4>.

GLONASS. **Interface control document**. Edition 5.1. Moscow, 2008. 73p.

GLONASS. **The transition to using the terrestrial geocentric coordinate system "Parametry Zemli 1990" (PZ-90.11) in operating the Global Navigation Satellite System (GLONASS) has been implemented**. 2014. Disponível em <https://www.glonass-iac.ru/en/content/news/?ELEMENT_ID=721>. Acesso em: mai. 2016a.

GLONASS. Disponível em <<https://www.glonass-iac.ru>>. Acesso em: abr. 2018.

GPS WORLD. **Final GLONASS-M Satellite Passes Tests**. 2015. Disponível em <<http://gpsworld.com/final-glonass-m-satellite-passes-tests/>>. Acesso em: mai. 2015.

GPS WORLD. **First GLONASS Station Outside Russia Opens in Brazil**. 2013. Disponível em <<http://gpsworld.com/first-glonass-station-outside-russia-opens-brazil/>>. Acesso em: mai. 2016a.

GPS WORLD. **Russia Launches Single GLONASS Satellite**. 2014. Disponível em <<http://gpsworld.com/russia-launches-single-glonass-satellite/>>. Acesso em: mai. 2016b.

GPS WORLD. **ISS Reshetnev to build 11 new GLONASS-K satellites**. 2016. Disponível em <<http://gpsworld.com/iss-reshetnev-to-build-11-new-glonass-k-satellites/>>. Acesso em: mai. 2016c.

GPS WORLD. **New GLONASS interface control documents released**. 2016. Disponível em <<http://gpsworld.com/new-glonass-interface-control-documents-released/>>. Acesso em: mar. 2017.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer-Verlag, 2008. 516p.

IGS. International GNSS Service. Disponível em <<http://www.igs.org/products/data>>. Acesso em: mar. 2017.

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

MARQUES, H. A. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS**. 2012. 244 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.

NIS GLONASS. **History of GLONASS development**. 2011. Disponível em <http://www.nis-glonass.ru/en/glonass/development_history/>. Acesso em: mar. 2017.

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

RUSSIAN FEDERATION. **Parametry Zemli 1990 (PZ-90.11): Reference Document**. Military Topographic Department of the General Staff of Armed Forces of the Russian Federation. Moscow, 2014. 51p.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SPUTNIK NEWS. **Rússia irá desenvolver seu sistema de navegação por satélite Glonass em 36 países**. 2014. Disponível em <<http://br.sputniknews.com/mundo/20151027/2554254/Glonass-estacao-36-paises-navegacao.html>>. Acesso em: nov. 2015.

UFSM. **UFSM inaugura estação de sistema Glonass**. 2016. Disponível em <<http://site.ufsm.br/noticias/exibir/ufsm-inaugura-estacao-de-sistema-glonass>>. Acesso em: abr. 2018.

URLICHICH, Y.; SUBBOTIN, V.; STUPAK, G.; DVORKIN, V.; POVALYAEV, A.; KARUTIN, S. GLONASS: Developing Strategies for Future. **GPS World**, v.22, n. 4, p. 42-49, 2011a.

URLICHICH, Y.; SUBBOTIN, V.; STUPAK, G.; DVORKIN, V.; POVALYAEV, A.; KARUTIN, S.; BAKITKO, R. **GLONASS Modernization**. **GPS World**, v. 22, n. 11, p. 34-39, 2011b.

VAZ, J.A.; PISSARDINI, R. S.; FONSECA JUNIOR, E.D. Comparação da cobertura e acurácia entre os sistemas GLONASS e GPS obtidas dos dados de observação de uma estação da rede brasileira de monitoramento contínuo. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 3, p. 529-539, 2013.

VOZ DA RÚSSIA. **Segundo satélite Glonass-K entra em contato a partir da órbita**. 2014. Disponível em <http://portuguese.ruvr.ru/news/2014_12_01/Segundo-satelite-Glonass-K-entra-em-contato-a-partir-da-orbita-4740/>. Acesso em: dez. 2014.

WEBER, R.; FRAGNER, E. Combined GLONASS orbits. In: SLATER, J. A.; NOLL, C. E.; GOWEY, K. T. (Eds). International GLONASS experiment (IGEX-98), Workshop **Proceedings**, IGS Central Bureau, p. 233-246, 1999.

Recebido: 20 nov. 2017

Aprovado: 04 mai. 2018

DOI: 10.3895/rbgeo.v6n2.7368

Como citar: JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M. GLONASS: Revisão teórica e estado da arte. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 155-173, abr/jun. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Gabriel Oliveira Jerez

Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

