

Galileo: a consolidação do sistema de posicionamento europeu

RESUMO

Crislaine Menezes da Silva

crislaine.menezes@unesp.br
orcid.org/0000-0003-2023-4237
Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências de Tecnologia,
Campus de Presidente Prudente,
Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Paulo de Tarso Setti Junior

p.setti@unesp.br
orcid.org/0000-0001-5080-1832
Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências de Tecnologia,
Campus de Presidente Prudente,
Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

Daniele Barroca Marra Alves

daniele.barroca@unesp.br
orcid.org/0000-0002-9033-8499
Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências de Tecnologia,
Campus de Presidente Prudente,
Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

João Francisco Galera Monico

galera.monico@unesp.br
orcid.org/0000-0003-4101-9261
Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências de Tecnologia,
Campus de Presidente Prudente,
Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

O Galileo é a contribuição da União Europeia ao GNSS (ingl. *Global Navigation Satellite Systems* – Sistemas de Navegação Global por Satélite) e está próximo da declaração da fase operacional completa, que deve ocorrer no final de 2020 ou início de 2021. Este sistema começou a ser concebido na década de 90, após a decisão do governo americano em não permitir que outras nações participassem da construção e manutenção do sistema NAVSTAR – GPS (ingl. *Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global). O sistema Galileo é a primeira contribuição civil para o GNSS e foi desenvolvido de forma a ser independente dos outros sistemas nos segmentos espacial, de controle e operacional. Além disso, está sendo desenvolvido para ser interoperável e compatível com os outros GNSS, em especial o GPS. Nos últimos anos, o desenvolvimento do Galileo fez progressos significativos. A constelação atual compreende um total de 26 satélites orbitando a Terra, 22 operacionais, dos quais três pertencentes à primeira geração de satélites de validação de órbita, e a infraestrutura de controle terrestre está em pleno funcionamento. Para o usuário, são transmitidos sinais em três frequências E1, E5 e E6. Os sinais em E1 e E5 são transmitidos nas mesmas frequências que os sinais GPS L1 e L5 e ambos sistemas usam princípios de modulação equivalentes. Isso é benéfico pois proporciona uma melhor cobertura e maior robustez para usuários que podem utilizar os sistemas de forma combinada. Além disso, o Galileo oferece vários novos serviços específicos, como o serviço aberto, o serviço de alta acurácia e de busca e resgate. Como o sistema Galileo está atualmente em fase final de implantação, faz-se necessário na literatura brasileira, um artigo que trate exclusivamente desse sistema, este artigo apresenta o estado da arte do sistema Galileo (julho de 2020). Resultados iniciais demonstraram que o Galileo tem acurácia comparável ao GPS, no posicionamento por ponto simples.

PALAVRAS-CHAVE: Galileo. GNSS. Posicionamento pelo GNSS.

INTRODUÇÃO

Os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (ingl. *Global Navigation Satellite Systems* – GNSS) vêm sendo cada vez mais utilizados em uma ampla variedade de aplicações que requerem estimativas de posição. Dentre os sistemas que compõem o GNSS destacam-se o estadunidense NAVSTAR – GPS (ingl. *Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global), que usaremos a denominação GPS, o russo GLONASS (ingl. *Global NAVigation Satellite System*), o europeu Galileo e o chinês BDS (ingl. *BeiDou Navigation Satellite System* – Sistema de Navegação por Satélite BeiDou), além dos sistemas de aumento baseados tanto em satélites quanto em estações terrestres.

Iniciados durante a Guerra Fria com fins militares, os sistemas GPS e GLONASS foram os primeiros a atingir constelação completa, no ano de 1995. O GLONASS, entretanto, ficou por um longo período sem a devida manutenção com o fim da União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), chegando a contar, no início dos anos 2000, com apenas seis satélites operacionais (FEAIRHELLER; CLARK, 2006). Com isso, a maioria expressiva das pesquisas e aplicações se concentrou na utilização do sistema GPS. Nas duas últimas décadas, o GLONASS passou uma restauração do sistema, e surgiram ainda os sistemas Galileo e BDS (LANGLEY et al., 2017).

Devido a esse cenário atual do GNSS com diversas constelações e sinais, a tendência no meio acadêmico e comercial tem sido o uso dos diversos sistemas em conjunto (posicionamento multi-GNSS). Na literatura (BARTOLOMÉ et al., 2015; LI et al., 2015a; LI et al., 2015b; LOU et al., 2016; MONTENBRUCK et al., 2017; PAN et al., 2017; ODIJK, 2017; SETTI JÚNIOR et al., 2016), diversas vantagens são enumeradas na utilização do uso conjunto dos sistemas, como a obtenção de um maior número de observações para o ajustamento da posição do receptor, melhor geometria dos satélites, indicada pela Diluição de Precisão (ingl. *Dilution of Precision* – DOP) (LANGLEY, 1999), melhor cobertura em áreas de visibilidade restrita como os grandes centros urbanos, possibilitando um aumento da máscara de elevação, além da minimização de erros sistemáticos inerentes a cada sistema de forma individual.

Nesse sentido, diversas investigações ainda devem ser realizadas com relação ao sistema Galileo, que está prestes a se consolidar no cenário mundial com constelação completa e diversos serviços e sinais. Esse artigo, então, tem por objetivo fazer uma revisão teórica do sistema Galileo, apresentando seu histórico, estrutura e serviços, bem como uma avaliação da utilização do sistema para posicionamento por ponto simples no Brasil.

HISTÓRICO

Com a operacionalidade dos sistemas GPS e GLONASS, na segunda metade da década de 90, a União Europeia (UE) percebeu a importância estratégica, econômica, social e tecnológica da navegação por satélite. A parceria da Agência Espacial Europeia (ingl. *European Space Agency* – ESA) com a Comissão Europeia (ingl. *European Commission* – EC) resultou inicialmente no sistema de aumento EGNOS (ingl. *European Geostationary Navigation Overlay Service*), que tinha por objetivo melhorar o desempenho do GPS na região europeia nas atividades de navegação aérea. Visando um sistema de cobertura global, a UE buscou

inicialmente uma cooperação com os Estados Unidos no desenvolvimento das próximas gerações GPS, com participação ativa no seu controle. A decisão do governo norte-americano de não autorizar outras nações a participarem da manutenção e desenvolvimento do GPS devido a seus fins militares, levou a UE a desenvolver uma solução própria para o GNSS (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; BARTOLOMÉ et al., 2015).

No ano de 1999, a EC juntamente com a ESA lançou o comunicado “*Galileo-Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services*” (EC, 1999), anunciando a pretensão europeia de desenvolver seu próprio sistema global de navegação por satélite. Três razões foram citadas: aumentar o controle europeu sobre os sistemas de navegação, que é necessário em situações críticas de segurança; assegurar serviços de posicionamento à população europeia a longo prazo, sem depender de possíveis mudanças nas políticas norte-americanas que pudessem afetar o GPS; e apoiar a competitividade da indústria europeia no mercado mundial de navegação por satélite. Surgiu daí o sistema Galileo, cujo nome é uma homenagem ao astrônomo italiano Galileo Galilei (1564 – 1642), que primeiro descreveu como o movimento regular de quatro satélites poderiam ser utilizados para determinação da longitude (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

Terminada a fase de definição, o desenvolvimento do Galileo iniciou-se de fato em 2003 pela ESA, financiado pela própria ESA e pela UE (FALCONE et al., 2017). No ano de 2005 foi lançado o primeiro satélite GIOVE (*Galileo In-Orbit Validation Element* – Elemento de validação de órbita Galileo) (GIOVE A). Esse satélite, juntamente com o segundo GIOVE (GIOVE B), lançado em 2008, assegurou as frequências designadas para o sistema e serviu como teste e validação das tecnologias empregadas, como os relógios atômicos utilizados e geração dos sinais de navegação (ESA, 2006). Tais satélites não estão mais ativos, e foram movidos para altitudes acima da órbita nominal Galileo (ESA, 2012).

O lançamento de dois satélites em 2011 e outros dois em 2012 marcaram a fase de validação de órbita (ingl. *In-Orbit Validation – IOV*), que teve como objetivo possibilitar as validações iniciais do sistema e da rede de estações terrestres utilizando uma constelação reduzida em locais de teste. A primeira determinação de posição utilizando a constelação Galileo foi realizada em março de 2013 e, a partir desse momento, as mensagens de navegação Galileo vêm sendo transmitidas continuamente (FALCONE et al., 2017). Embora estes satélites tenham servido para a fase de validação, eles integram hoje a constelação operacional do sistema.

A partir de 2014, os satélites Galileo vêm sendo continuamente lançados visando atingir a fase operacional completa (ingl. *Full Operational Capability – FOC*) do sistema. Serviços iniciais foram anunciados pela ESA em dezembro de 2016; um total de 26 satélites Galileo ocupam atualmente suas respectivas órbitas (ESA, 2020), 22 dos quais estão operacionais. Enquanto o sistema não é declarado operacional, a ESA não garante que os sinais Galileo estejam disponíveis nem que os níveis mínimos de desempenho sejam atingidos durante todo o tempo. A exemplo disso, uma falha em estações terrestres fez com que o sistema transmitisse para seus usuários informações imprecisas de órbitas e relógios dos satélites durante uma semana de junho de 2019 (GPS WORLD, 2019). O sistema deve ser declarado operacional no final do ano 2020 ou início do ano de 2021.

SEGMENTO ESPACIAL

O segmento espacial do Galileo, quando estiver totalmente implantado, terá uma constelação com um número total de 30 satélites em órbita média (ingl. *Medium Earth Orbit* – MEO), incluindo 6 satélites reservas, distribuídos homoganeamente em três planos orbitais (BARTOLOMÉ et al., 2015; ESA, 2019; FALCONE et al., 2017; GSC, 2019).

A trajetória nominal seguida pelos satélites operacionais é uma órbita circular com um raio de aproximadamente 29600 km, que corresponde a 23229 km de altitude sobre a superfície da Terra, com um período orbital de aproximadamente 14 h. Tal configuração garante que a constelação se repetirá a cada 10 dias, ou 17 órbitas (BARTOLOMÉ et al., 2015; ESA, 2019; FALCONE et al., 2017; GSC, 2019). Os principais parâmetros orbitais da constelação de referência Galileo são resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de referência da constelação Galileo

Parâmetro	Valor
Constelação	24 satélites em 3 planos orbitais + 6 satélites reservas
Semieixo maior	29600,318 km
Frequências	E1
	E6
	E5a
	E5b
Excentricidade	0,0001
Inclinação	56°
Período orbital	14h 04m 42s
Repetibilidade	10 dias siderais

Fonte: Autoria própria (2020), adaptada de Bartolomé et al. (2015) e Falcone et al. (2017).

A constelação descrita acima foi implementada visando obter boas condições geométricas para uma escala global, possibilitando que o usuário possa ter precisão e disponibilidade adequadas. A inclinação dos planos orbitais possibilita uma maior cobertura para altas latitudes. A constelação com mais de 24 satélites permitirá que entre seis e onze satélites estejam visíveis em qualquer lugar da Terra. Com a constelação completa, prevê-se que oito satélites com mais de 5° de elevação estarão visíveis, em média (BARTOLOMÉ et al., 2015; ESA, 2019; FALCONE et al., 2017; GSC, 2019).

Após o final do funcionamento dos satélites eles deverão ser removidos das órbitas nominais do Galileo, sendo necessário considerar esse descarte de forma planejada, primeiro por conta do controle de detritos espaciais e segundo por conta da manobra desses detritos que pode afetar os satélites operacionais. O cuidado deve ser o mesmo para os detritos dos foguetes lançadores. A forma de descarte prevista é mover os satélites e foguetes para uma órbita cemitério que ficará localizada pelo menos 300 km acima das órbitas operacionais do Galileo (FALCONE et al., 2017).

SINAIS E SERVIÇOS

Cada satélite Galileo transmite sinais em três diferentes frequências pela técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), denominados de E1 (1575,420 MHz, alinhada à GPS L1), E5 (1191,795 MHz) e E6 (1278,750 MHz). O sinal E5 é dividido em duas sub-bandas, E5a (1176,450 MHz, alinhada à GPS L5) e E5b (1207,140 MHz), que podem ser rastreadas e utilizadas de forma individual, equivalente à duas portadoras diferentes na banda E5. Cada sinal contém diferentes componentes, com pelo menos um par de canais piloto e de dados. Os canais piloto consistem apenas na sequência de código, enquanto os canais de dados transmitem também as mensagens de navegação (Galileo OS SIS ICD, 2016; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

SERVIÇOS

Os sinais e componentes servem de base para quatro serviços de posicionamento (GSA, 2020): o Serviço Aberto (ingl. *Open Service – OS*), que é um serviço básico de posicionamento disponível gratuitamente nas bandas E1, E5a e E5b; o Serviço de Alta Acurácia (ingl. *High Accuracy Service – HAS*) que é complementar ao OS e adiciona um terceiro sinal criptografado na banda E6, disponível para fins comerciais; o Serviço Público Regulado (ingl. *Public Regulated Service – PRS*), um serviço de posicionamento restrito, que é acessível apenas a usuários autorizados pelo governo europeu; e o Serviço de Busca e Resgate (ingl. *Search and Rescue Service – SAR*), que é um serviço suporte ao COSPAS-SARSAT, um serviço de busca e resgate internacional liderado pelos Estados Unidos, Rússia, Canadá e França, em que os satélites são capazes de rastrear sinais eletromagnéticos de emergência.

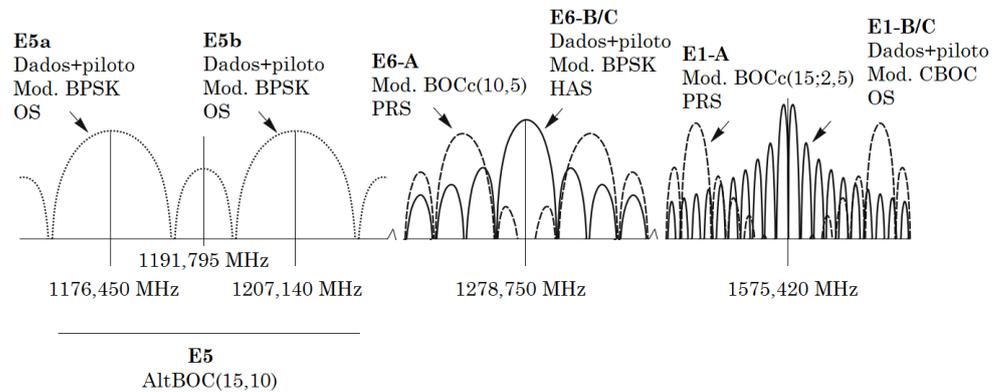
CÓDIGOS E MODULAÇÃO

Diferentes modulações são utilizadas pelo Galileo: BPSK (ingl. *Binary Phase Shift Keying*), BOCc (ingl. *Cosine Binary Offset Carrier*), CBOC (ingl. *Composite Binary Offset Carrier*) e AltBOC (ingl. *Alternative Binary Offset Carrier*) (Galileo OS SIS ICD, 2016). A modulação BOC é uma extensão da BPSK, utilizada pelo GPS, incluindo uma sub-portadora de onda quadrada, permitindo que vários sinais possam ser emitidos na mesma frequência sem causar interferência. Nesse caso, o espectro do sinal codificado é dividido em duas componentes, localizadas simetricamente ao redor da frequência principal (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). Os sinais BOC podem ser modulados em relação ao seno (BOCs) ou em relação ao cosseno (BOCc). Um sinal semelhante ao BOC pode ser gerado a partir de dois sinais modulados pela técnica BPSK. Nesse caso, os lóbulos principais BPSK são deslocados da frequência principal em sentidos opostos, e são utilizados com PRN (ingl. *Pseudorandom Noise*) diferentes, dando origem à modulação AltBOC (MEURER e ANTREICH, 2017).

Na Figura 1 são apresentadas as diferentes bandas, sinais e componentes do sistema Galileo, incluindo a densidade espectral de potência dos sinais. Seis sinais, incluindo três sinais de dados e três canais piloto, são acessíveis a todos os usuários Galileo nas portadoras E1, E5a e E5b no Serviço Aberto. Um canal de dados e um piloto são modulados de forma criptografada na portadora E6 para uso reservado

de usuários do Serviço de Alta Acurácia. Além disso, o Serviço de Alta Acurácia também depende de dados criptografados de navegação emitidos pelos sinais abertos. Já os usuários do Serviço Público Regulado têm acesso à componentes moduladas nas portadoras E1 e E6 (FALCONE et al., 2017).

Figura 1 – Bandas, sinais e componentes Galileo



Fonte: Adaptado de Hofmann-Wellenhof et al. (2008); Falcone et al. (2017).

Três componentes dos sinais de navegação são moduladas na portadora E1. Os sinais do Serviço Aberto E1-B e E1-C são acessíveis a qualquer usuário. O canal de dados E1 transporta, além das mensagens de navegação tradicionais, informações de integridade e dados criptografados do Serviço de Alta Acurácia. O código modulado em E1-A é acessível apenas a usuários do Serviço Público Regulado. De maneira similar, três códigos são modulados na portadora E6, sendo um deles reservado para o Serviço Público Regulado (E6-A), e os outros dois para o Serviço de Alta Acurácia (E6-B e E6-C). Sinais E5 carregam quatro componentes: um par de canais de dados e piloto nas bandas E5a e E5b, todas acessíveis ao Serviço Aberto. As componentes dos sinais E5a e E5b são moduladas na portadora E5 pela técnica AltBOC, com lóbulos principais separados em 30,69 MHz, o que faz com que os efeitos de multicaminho sejam reduzidos e a qualidade de rastreamento do sinal aumentada (FALCONE et al., 2017; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; SILVA et al., 2012;).

MENSAGENS DE NAVEGAÇÃO

Três diferentes tipos de mensagens de navegação são transmitidos pelos sinais Galileo: mensagens I/NAV (ingl. *Integrity NAVigation*), F/NAV (ingl. *Free NAVigation*) e C/NAV (ingl. *Commercial NAVigation*) (Galileo OS SIS ICD, 2016). O conteúdo das mensagens de navegação pode ser dividido entre aqueles utilizados para determinação direta de posição, velocidade e tempo (PVT), e os elementos de baixa latência (FALCONE et al., 2017).

As mensagens I/NAV e F/NAV dão suporte direto à determinação de PVT, fornecendo o GST (ingl. *Galileo System Time – Sistema de Tempo Galileo*) (semana e tempo da semana) (Seção 4), efemérides e relógio dos satélites, parâmetros de correção da ionosfera (modelo NeQuick G, seção 3.4), *Bias Group Delay* (BGD), validade dos dados e indicativo da saúde dos satélites. Todos os parâmetros são compatíveis com as efemérides GPS. Entre os elementos de baixa latência, destaca-se o canal de transmissão de dados aos satélites na frequência E1 para o

Serviço de Busca e Resgate nas mensagens I/NAV, e a transmissão de dados em tempo quase real pela portadora E6 nas mensagens C/NAV (Galileo OS SIS ICD, 2016). Uma das principais diferenças entre as mensagens I/NAV e F/NAV diz respeito à correção dos relógios: enquanto as mensagens I/NAV calculam tal correção para dupla frequência E1/E5b, as frequências E1 e E5a são utilizadas nas mensagens F/NAV (FALCONE et al., 2017).

NEQUICK G

Para correção do atraso ionosférico no posicionamento em simples frequência, especialmente em tempo real, são normalmente utilizados modelos ionosféricos. O GPS, por exemplo, estabeleceu como padrão a utilização do modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987). Para o Galileo foi desenvolvido o modelo NeQuick G, uma adaptação do modelo tridimensional de elétrons NeQuick (HOBIGER e JAKOWSKI, 2017; RADICELLA, 2009). Como parâmetros de entrada, o modelo necessita de três coeficientes ionosféricos que descrevem o estado da ionosfera a nível global, transmitidos nas mensagens de navegação Galileo, além da posição tridimensional do receptor e do satélite, da hora UT (ingl. *Universal Time – Tempo Universal*) e do mês da época de processamento.

O modelo semiempírico baseia-se nas características das camadas ionosféricas E, F1 e F2. O comportamento espaço-temporal dos parâmetros do modelo, como a máxima densidade de elétrons na camada F2, são obtidos de coeficientes disponíveis em tabelas mensais do *Comité Consultatif International des Radiocommunications* (CCIR). Em adição à dependência em latitude e longitude destes parâmetros, o cálculo do atraso é dependente do campo magnético terrestre, expresso pela latitude modificada (MODIP) (ROWER, 1963) do local (μ), dada por:

$$tg(\mu) = \frac{I}{\sqrt{\cos \varphi}}, \quad (1)$$

em que I é a inclinação magnética a 300 km e φ é a latitude geográfica do ponto ionosférico. A atividade solar é modelada por um polinômio de segunda ordem, dado por (RADICELLA, 2009):

$$Az(\mu) = a_0 + a_1\mu + a_2\mu^2, \quad (2)$$

em que Az representa o nível efetivo de ionização e a_i são os parâmetros ionosféricos transmitidos nas mensagens de navegação, atualizados a cada 12 ou 24 horas usando um conjunto de estações globais. Embora nenhuma informação venha sendo transmitida até então, o modelo foi desenvolvido de modo a transmitir cinco coeficientes relacionados a um parâmetro de perturbação ionosférica, dando um indicativo da atividade ionosférica em cada região magnética do globo (altas, médias e baixas latitudes). Segundo a documentação, o modelo corrige cerca de 70% do efeito da ionosfera sobre os sinais transmitidos (EC, 2016).

Um componente essencial do sistema Galileo são os relógios, que necessitam ser precisos para a escala de nanossegundos (ns), que equivale a um bilionésimo de segundo, para que seja possível obter a distância com precisão (BARTOLOMÉ et al., 2015; ESA, 2019; FALCONE et al., 2017).

O relógio principal a bordo de cada satélite é um relógio atômico com base no maser de hidrogênio passivo, que utiliza a transição ultra estável de 1,4 GHz em um átomo de hidrogênio para medir o tempo dentro de 0,45 ns em 12 horas. Já a segunda fonte de tempo é um relógio de rubídio, que tem a precisão de 1,8 ns em 12 horas (BARTOLOMÉ et al., 2015; ESA, 2019; FALCONE et al., 2017).

Ambos os relógios atômicos do Galileo são muito estáveis por algumas horas. Se eles fossem deixados para rodar indefinidamente, a cronometragem deles se arrastaria, por isso eles precisam ser sincronizados regularmente com uma rede de relógios de referência, localizados na Terra, ainda mais estáveis. Estes incluem relógios baseados no padrão de frequência de césio, que mostram uma estabilidade a longo prazo muito melhor do que os relógios atômicos do Galileo.

Os relógios terrestres, instalados nos centros de controle do Galileo (ingl. *Galileo Control Centre – GCC*), geram o sistema de referência de tempo do Galileo, o GST, com uma precisão de 28 bilionésimos de segundo (BARTOLOMÉ et al., 2015; ESA, 2019; FALCONE et al., 2017). O sistema de referência de tempo adotado pelo Galileo é baseado no segundo do Sistema Internacional e exibe uma diferença constante de 19 s do tempo atômico internacional (ingl. *International Atomic Time – TAI*) (JEKELI e MONTENBRUCK, 2017).

Similarmente ao sistema de tempo do GPS (ingl. *GPS time – GPST*), o GST não contém os segundos bissextos. A época de início do GST foi definida como às 00:00 horas do dia 22 de agosto de 1999. Nesta época o GST foi definido para estar à frente do UTC por 13 segundos de modo a ser consistente com o sistema de tempo GPS (BEARD e SENIOR, 2017; JEKELI e MONTENBRUCK, 2017).

O GPST e GST tem um viés entre eles, que apesar de desconhecido pode ser determinado quando se utilizam ambos os sistemas (BARTOLOMÉ et al., 2015; FALCONE et al., 2017; JEKELI e MONTENBRUCK, 2017).

SISTEMA DE REFERÊNCIA

O sistema de referência do Galileo (ingl. *Galileo Terrestrial Reference Frame – GTRF*) foi estabelecido com precisão compatível à versão mais atual do Sistema Internacional de Referência Terrestre (ingl. *International Terrestrial Reference Frame – ITRF*) a um nível de 3 cm (2 sigmas) (GENDT et al., 2011). Sua realização e manutenção é de responsabilidade do Provedor de Serviços Geodésicos Galileo (ingl. *Galileo Geodetic Service Provider – GGSP*), um consórcio entre cinco instituições europeias. Juntamente com a realização do GTRF, o GGSP determina também os parâmetros de orientação da Terra e das órbitas precisas e erros nos relógios dos satélites Galileo (FRITSCHKE, 2016).

A última versão do GTRF, disponibilizada em julho de 2018, é denominada GTRF18v01. O GTRF18v01 foi obtido a partir da solução combinada de soluções semanais GTRF, com séries temporais de 11,66 anos. Sua realização incluiu dados de 193 estações GPS e GPS/Galileo em 111 localidades. Seu alinhamento com o

ITRF2014 está a um nível de 3,65 mm na componente horizontal e de 6,43 mm na componente vertical (ENDERLE, 2018).

Considerando que o sistema de referência do GPS, WGS 1984 (ingl. *World Geodetic System*), também é alinhado ao ITRF a nível centimétrico (JEKELI e MONTENBRUCK, 2017), para usuários de posicionamento por ponto simples multi-GNSS, em que a acurácia está no nível métrico, tais diferenças de referenciais não precisam ser levadas em consideração. O mesmo é válido para posicionamento relativo de linha de base curta, que acaba com cancelar ou minimizar tais discrepâncias nas diferenciações de observáveis (ODIJK, 2017).

SEGMENTO DE CONTROLE

O segmento de controle Galileo é composto por um segmento de controle terrestre (ingl. *Ground Control Segment – GCS*) para controle da constelação e um segmento de missão terrestre (ingl. *Ground Mission Segment – GMS*), que é responsável pelas tarefas relacionadas ao serviço (BARTOLOMÉ et al., 2015; FALCONE et al., 2017; GSC, 2019).

O centro do segmento de controle mundial do Galileo não está em um único local, mas em dois. Esta redundância fornece confiabilidade e robustez ao sistema Galileo. Os dois GCC são localizados em Oberpfaffenhofen (Alemanha) e Fucino (Itália) e são responsáveis por gerenciar as funções dos GCS e GMS (BARTOLOMÉ et al., 2015; FALCONE et al., 2017; GSC, 2019).

O GMS e o GCS utilizam uma rede global de estações terrestres para implementar as funções de controle e monitoramento do sistema Galileo. O GCS é responsável por todas as funções relacionadas à coordenação e controle dos satélites. O GMS, por sua vez, mede e monitora os sinais Galileo, gera as mensagens de navegação e as distribui aos satélites através de uma rede de estações de comunicação (BARTOLOMÉ et al., 2015; FALCONE et al., 2017; GSC, 2019).

Além da rede de estações e os GCS, a infraestrutura principal do Galileo é composta por instalações de serviços que apoiam a prestação dos serviços Galileo (FALCONE et al., 2017; GSC, 2019).

SEGMENTO DO USUÁRIO

O segmento do usuário é composto por todos os receptores e dispositivos compatíveis que coletam os sinais do sistema Galileo e calculam a sua localização. A gama de aplicações previstas do Galileo é enorme e abrange os setores público e privado em vários segmentos de mercado (BARTOLOMÉ et al., 2015; GSC, 2019).

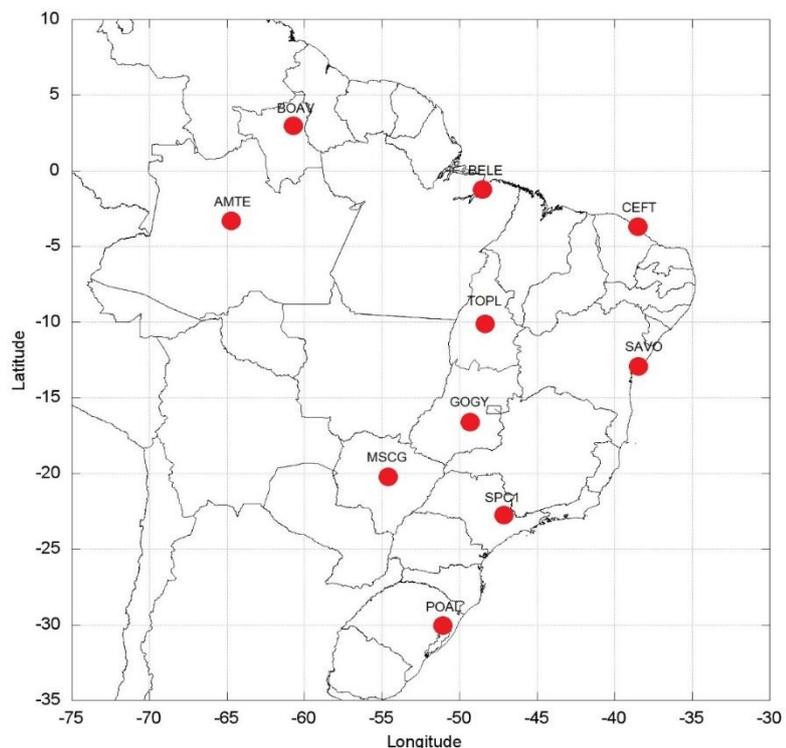
Quando o Galileo estiver totalmente operacional, este desempenhará um papel em muitas aplicações, tais como: transporte, agricultura, pesca, pesquisas científicas em ambiente e clima, a internet das coisas, serviços baseados em localização e serviços de emergência, segurança e assistência humanitária (BARTOLOMÉ et al., 2015; GSC, 2019).

ANÁLISE DO SERVIÇO ABERTO GALILEO

O documento *European GNSS (Galileo) Open Service Definition Document*, versão 1.1 (2019) apresenta os níveis mínimos de desempenho esperados para o sistema. No Serviço Aberto em simples frequência, a acurácia posicional horizontal não deve superar os 7,5 m em 95% do tempo e a vertical não deve superar os 15 m em 95% do tempo. Tais valores são assegurados considerando um mínimo de 4 satélites rastreados, com uma máscara de elevação de 5°, desconsiderando erros que não estão sob controle do sistema, como os atrasos troposférico e ionosférico (Galileo OS SDD, 2019).

Para validação do Serviço Aberto e verificação dos níveis mínimos esperados, o sistema foi utilizado no posicionamento por ponto simples (pseudodistância na frequência E1 e uso de efemérides transmitidas) sem nenhuma outra constelação. Para efeito de comparação, foram também processados dados GPS na frequência L1 C/A. O processamento deu-se no programa de código aberto RTKLib 2.4.2 (TAKASU, 2013), com dados de todo o mês de março de 2019 (dias do ano 60 a 90), totalizando 31 dias de dados. Foram utilizadas 10 estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) espalhadas pelo território brasileiro (Figura 2). Como os níveis mínimos esperados não levam em consideração os efeitos atmosféricos, o atraso troposférico foi estimado pelo modelo de Saastamoinen (SAASTAMOINEN, 1973) e o atraso ionosférico pelo modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987).

Figura 2 – Estações selecionadas



Fonte: Autoria própria (2020).

Considerando todo o período e estações (que resultou em uma amostra de aproximadamente 1,7 milhões de estimativas de posição), o número de satélites Galileo rastreados a cada época variou entre 4 e 10, média de 6 a 7, de um total de 22 satélites operacionais. Já para o sistema GPS, o número de satélites variou entre 7 e 15, média entre 10 e 11. A Tabela 2 apresenta a Raiz do Erro Quadrático Médio

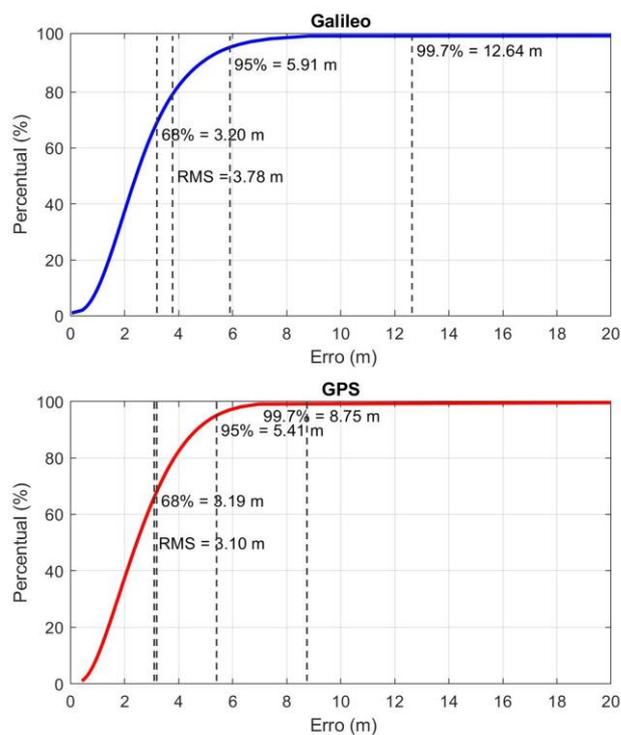
(REQM), bem como os percentis 68, 95 e 99,7% das discrepâncias entre as coordenadas estimadas época a época e seus valores de referência para o posicionamento com os sistemas Galileo e GPS. A Figura 3, por sua vez, apresenta o erro tridimensional acumulado, novamente para o posicionamento com os sistemas Galileo e GPS, respectivamente.

Tabela 2 – Erro posicional do posicionamento Galileo

Sistema	Componente	REQM (m)	Percentil (m)		
			68%	95%	99,7%
Galileo	Horizontal	1,52	1,36	2,95	5,97
	Vertical	3,46	2,82	5,51	11,83
GPS	Horizontal	1,36	1,29	2,63	4,36
	Vertical	2,79	2,83	5,19	8,29

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 3 – Erro tridimensional acumulado para posicionamento Galileo e GPS



Fonte: Autoria própria (2020).

A partir de uma análise dos resultados do posicionamento Galileo apresentados na Tabela 2 e na Figura 3, verifica-se que a REQM horizontal foi de aproximadamente 1,5 m e a vertical por volta de 3,5 m, valores bastante acurados considerando as atividades em que o posicionamento por ponto simples em uma única frequência é usualmente empregado. Da mesma forma, os valores aproximados de 3,0 m e 5,5 m para o percentil 95% nas componentes horizontal e vertical, respectivamente, demonstram que o sistema Galileo já vem apresentando excelentes resultados no posicionamento. Verifica-se também que os resultados Galileo são comparáveis aos GPS, com comportamento similar nas curvas de erro

acumulado, e com REQM tridimensional apenas 21% inferior, mesmo com um número expressivamente menor de satélites rastreados. Vale também ressaltar que os resultados aqui obtidos são melhores que os níveis mínimos previstos para o sistema, que ainda não foi declarado operacional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Galileo foi a primeira contribuição civil ao GNSS, e vem sendo desenvolvido pela ESA, de forma a ser compatível com todos os GNSS existentes e interoperável com GPS e GLONASS. Os primeiros satélites Galileo, para validação da órbita, foram lançados em 2005 e 2008 e os serviços iniciais do sistema se deram em 2016. Atualmente, a constelação conta com 26 satélites em órbita, 22 dos quais estão operacionais. A constelação completa, com 24 satélites + 6 reservas, deve ser atingida no final do ano de 2020, ou início de 2021.

Nesse sentido, o Galileo irá aprimorar a cobertura de satélites atualmente disponível e com isso, fornecerá uma experiência mais uniforme e precisa para os usuários que se utilizam dos GNSS em todo o mundo, como por exemplo:

- Permitir que os usuários saibam sua posição com precisão melhor do que a oferecida por outros sistemas disponíveis;
- Estar disponível nos produtos utilizados por pessoas diariamente, desde o dispositivo de navegação no carro até no celular.

Além disso, o Galileo oferece alguns serviços específicos para o programa Galileo, como o Serviço Aberto, de Alta Precisão e de Busca e Resgate.

À medida que o uso de sistemas de navegação por satélite continua a se expandir, as implicações de uma possível falha de sinal se tornam ainda maiores. Com a adição do Galileo ao GNSS, não apenas os riscos são minimizados, mas também oferece melhorias de disponibilidade de posicionamento, geometria receptor-satélite e precisão para o usuário final.

Os experimentos iniciais realizados mostram que o Galileo proporciona resultados similares ao GPS, em acurácia, no posicionamento por ponto simples, com um REQM tridimensional de 3,78 m contra 3,10 m, respectivamente. Os resultados menos acurados podem, possivelmente, ser justificados pelo número de satélites rastreados, que teve uma média entre 6 e 7 para o Galileo, e entre 10 e 11 para o GPS, de modo que a geometria da constelação GPS favorecia a estimativa da posição do receptor. Quando o sistema Galileo for declarado operacional, melhores resultados devem ser esperados.

Galileo: the consolidation of the European positioning system

ABSTRACT

Galileo is the European Union's contribution to GNSS (Global Navigation Satellite Systems) and is close to the declaration of the full operational phase, which should take place in late 2020 or early 2021. This system was conceived in the nineties, after the US government decided not to allow other nations to participate in the construction of the Global Positioning System (NAVSTAR – GPS). The Galileo system is the first civilian contribution to GNSS and was developed to be independent of the other systems in the space, ground, and user segments. In addition, Galileo is being developed to be interoperable and compatible with other GNSS, especially GPS. In recent years, the development of Galileo has made significant progress. The current constellation comprises a total of 26 satellites orbiting the Earth, twenty-two operational, three of them belonging to the first generation of In Orbit Validation satellites, and the terrestrial control infrastructure is fully operational. For the user, Galileo satellites transmit signals at three frequencies E1, E6 and E5. Signals at E1 and E5 are the same frequencies as GPS L1 and L5 signals and both systems use equivalent modulation principles. This is beneficial as it provides better coverage and robustness for users who can use the systems in combination. In addition, Galileo offers several new specific services, such as open service, high accuracy and search and rescue service. As the Galileo system is currently in its final phase of implementation, it is necessary in the Brazilian literature, a paper that deals exclusively with this system, and this is the objective of this work. This paper presents the state of the art of the Galileo system (July 2020). Initial results showed that Galileo has an accuracy comparable to GPS, in single frequency single point positioning with broadcast orbits and clock.

KEYWORDS: Galileo; GNSS; GNSS Positioning.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo 303553/2017-0) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo 2016/24861-3). Agradecimentos ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea (INCT GNSS-NavAer), financiado pelo CNPq (processo 465648/2014-2), FAPESP (processo 2017/50115-0) e CAPES (processo nº 88887.137186/2017-00).

REFERÊNCIAS

BARTOLOMÉ, J. P.; MAUFROID, X.; HERNÁNDEZ, I. F.; SALCEDO, J. A. L.; GRANADOS, G. S. Overview of Galileo system. In: NURMI, J. (ed.); LOHAN, E. S. (ed.); SAND, S. (ed.); HURSKAINEN, H. (ed.). **Galileo Positioning Technology**. Dordrecht: Springer, 2015. pp. 9-33.

BEARD, R.; SENIOR, K. Clocks. In: TEUNISSEN, P.J.G. (ed.); MONTENBRUCK, O. (ed.). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Cham: Springer, 2017. pp. 121-164.

ENDERLE, W. Galileo Terrestrial Reference Frame. In: International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG), 13, 2018, Xi'an, China. **Proceedings.... 2018**. Disponível em <https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/icg13/wgd/wgd_06.pdf>, acessado em julho de 2020.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services**. 1999. Disponível em: <http://aei.pitt.edu/4703/1/000784_1.pdf>, acessado em julho de 2019.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **European GNSS (Galileo) open service ionospheric correction algorithm for Galileo single frequency users**. 2016. Disponível em: <https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo_Ionospheric_Model.pdf>, acessado em julho de 2020.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2006. **The first Galileo satellites**. Disponível em <<http://www.esa.int/esapub/br/br251/br251.pdf>>, acessado em julho de 2020.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2012. **Mission accomplished for Galileo's pathfinder GIOVE-A**. Disponível em <https://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Mission_accomplished_for_Galileo_s_pathfinder_GIOVE-A>, acessado em julho de 2020.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2019. **Orbital and Technical Parameters**. Disponível em < <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/orbital-and-technical-parameters>>, acessado em julho de 2019.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2020. **Galileo constellation status**. Disponível em <<https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>>, acessado em julho de 2020.

FALCONE, M.; HAHN, J.; BURGER, T. Galileo. In: TEUNISSEN, P.J.G. (ed.); MONTENBRUCK, O. (ed.). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Cham: Springer, 2017. pp. 247-272.

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

FRITSCH, M. Determination and Maintenance of the Galileo Terrestrial Reference Frame. In: European Geoscience Union, 2016, Vienna, Austria, **Proceedings....** 2016. Disponível em <http://navigation-office.esa.int/attachments_12649509_1_EGU2016_Poster_GTRF_Fritsche.pdf>, acessado em julho de 2020.

GALILEO OS SDD. **European GNSS (Galileo) Open Service Definition Document. Issue 1.1.** 2019. Disponível em < https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.1.pdf>, acessado em julho de 2019.

GALILEO OS SIS ICD. **European GNSS (Galileo) Open Service Signal-in-space interface control document.** Issue 1.3. 2016. Disponível em < <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf>>, acessado em julho de 2019.

GENDT, G; ALTAMIMI, Z; DACH, R; SÖHNE, W; SPRINGER, T. **GGSP: Realisation and maintenance of the Galileo Terrestrial Reference Frame**. Advances in Space Research, 47, 2, 2011. pp. 174-185.

GPS WORLD, 2019. **What happened when Galileo experienced a week-long service outage**. Disponível em <<https://www.gpsworld.com/why-galileo-experienced-a-week-long-service-outage/>>, acessado em junho de 2019.

EUROPEAN GNSS AGENCY (GSA), 2020. **Galileo services**. Disponível em < <https://www.gsa.europa.eu/galileo/services>>, acessado em julho de 2020.

European GNSS Service Centre (GSC), 2019. Disponível em < <https://www.gsc-europa.eu/galileo/european-gnss-service-centre>>, acessado em julho de 2019.

HOBIGER, T.; JAKOWSKI, N. Atmospheric Signal Propagation. In: TEUNISSEN, P.J.G. (ed.); MONTENBRUCK, O. (ed.). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Cham: Springer, 2017. pp. 165-193.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global navigation satellite systems, GPS, GLONASS, Galileo and more**. Springer-Verlage Wien, 2008. 501p.

JEKELI, C.; MONTENBRUCK, O. Time and Reference Systems. In: TEUNISSEN, P.J.G. (ed.); MONTENBRUCK, O. (ed.). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Cham: Springer, 2017. pp. 25-58.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, AES-23, n.3, 1987. pp. 325-331.

LANGLEY, R. B.; TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. Introduction to GNSS. In: TEUNISSEN, P.J.G. (ed.); MONTENBRUCK, O. (ed.). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Cham: Springer, 2017. pp. 3-23.

LANGLEY, R. B. Dilution of Precision. **GPS World**, Vol. 10, No. 5, 1999, pp. 52-59.

LI, X.; ZHANG, X.; REN, X.; FRITSCHKE, M.; WICKERT, J.; SCHUH, H. Precise positioning with current multi-constellation global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. **Science Reports**. 2015a.

LI, X.; ZHANG, X.; REN, X.; FRITSCHKE, M.; WICKERT, J.; SCHUH, H. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. **Journal of Geodesy**. 89(6), 2015b. pp. 607-635.

LOU, Y.; ZHENG, F.; GU, S.; WANG, C.; GUO, H.; FENG, Y. Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models. **GPS Solutions**. 20(4), 2016. pp. 849-862.

MEURER, M.; ANTREICH, F. Signals and Modulation. In: TEUNISSEN, P.J.G. (ed.); MONTENBRUCK, O. (ed.). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Cham: Springer, 2017. pp. 91-119.

MONTENBRUCK, O.; STEIGENBERGER, P.; PRANGE, L.; DENG, Z.; ZHAO, Q.; PEROSANZ, F.; ROMERO, I.; NOLL, C.; STURZE, A.; WEBER, G.; SCHMID, R.; MACLEOD, K; SCHAER, S. The multi-GNSS experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – achievements, prospects and challenges. **Advances in Space Research**, v. 59, no 7, 2017. pp. 1671-1697.

ODIJK, D. Positioning Model. In: TEUNISSEN, P.J.G. (ed.); MONTENBRUCK, O. (ed.). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Cham: Springer, 2017. pp. 605-638.

PAN, L., CAI, C., SANTERRE, R., ZHANG, X. Performance evaluation of single-frequency point positioning with GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo. **Survey Review**, 49(354), 2017. pp.197-205.

RADICELLA, S. M. The NeQuick Model Genesis, Uses and Evolution. **Annals of Geophysics**, vol. 52, n. 3-4, 2009. pp. 417-422.

ROWER, K. Propagation of decameter waves (h.f. band). In B. LANDMARK (ed.) **Meteorological and Astronomical Influences on Radio Wave Propagation**. Oxford: Pergamon Press Inc, 1963. pp. 221-250.

SAASTAMOINEN, J. Contribution to the theory of atmospheric refraction. **Bulletin Géodésique**. 107, 1973. pp. 13-34.

SETTI JÚNIOR, P. T.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F. Uso integrado dos sistemas Galileo e GPS: uma análise da acurácia no posicionamento por ponto com correções atmosféricas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 3, 2016. pp. 595-607.

SILVA, P.F.; SILVA, J.S.; PERES, T.R.; FERNÁNDEZ, A.; PALOMO, J.M.; ANDREOTTI, M.; HILL, C.; COLOMINA, I.; MIRANDA, C.; PARÉS, M.E. Results of Galileo AltBOC for precise positioning. In: ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing. Holanda, 6, **Proceedings...**, 2012. pp. 1-9.

TAKASU, T., **RTKLIB ver. 2.4.2** Manual. 2013. 183p.

Recebido: 08 jan. 2020

Aprovado: 11 ago. 2020

DOI: 10.3895/rbgeo.v8n3.11484

Como citar: SILVA, C. M.; SETTI JR, P. T.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. Galileo: a consolidação do sistema de posicionamento europeu. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 8, n. 4, p. 238-255, out/dez. 2020.

Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Crislaine Menezes da Silva

Rua Roberto Simonsen, 305 - Centro Educacional - P. Prudente/SP - CEP 19060-900

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

