

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

CRISLAINE MENEZES DA SILVA

**SOLUÇÃO RÁPIDA DAS AMBIGUIDADES PARA LINHAS DE BASES
LONGAS COM O USO COMBINADO DOS SISTEMAS GPS E GALILEO**



Presidente Prudente

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

CRISLAINE MENEZES DA SILVA

**SOLUÇÃO RÁPIDA DAS AMBIGUIDADES PARA LINHAS DE BASES
LONGAS COM O USO COMBINADO DOS SISTEMAS GPS E GALILEO**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutora em Ciências Cartográficas na área “Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais” (Posicionamento e Sensoriamento Remoto Geodésico).

Orientadora: Profa. Dra. Daniele Barroca Marra Alves

Coorientador: Dr. João Francisco Galera Mônico

Presidente Prudente

2021

S586s Silva, Crislaine Menezes da
Solução rápida das ambiguidades para linhas de bases longas com o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo / Crislaine Menezes da Silva. -- Presidente Prudente, 2021
146 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente
Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves
Coorientador: João Francisco Galera Monico

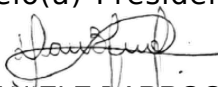
1. Solução das ambiguidades. 2. Posicionamento relativo. 3. GNSS. 4. GPS. 5. Galileo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE CRISLAINE MENEZES DA SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA.

Aos 24 dias do mês de março do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de CRISLAINE MENEZES DA SILVA, intitulada **Solução rápida das ambiguidades para linhas de bases longas com o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, Profa. Dra. ENIUCE MENEZES DE SOUZA (Participação Virtual) do(a) Centro de Ciências Exatas / Universidade Estadual de Maringá, Prof. Dr. FELIPE GEREMIA NIEVINSKI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Geodésia / Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Prof. Dr. PAULO SÉRGIO DE OLIVEIRA JÚNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná, Profa. Dra. CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER (Participação Virtual) do(a) Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná. Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Daniele Barroca Marra Alves", is positioned above the printed name of the signatory.

Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES

CURRICULUM VITÆ

Crislaine Menezes da Silva

18-09-1988 Nascida em Presidente Prudente, São Paulo.

Filiação Sueli Cristina Menezes
 Valdecir Pereira da Silva

1995–2002 Ensino Fundamental
 Escola Municipal Profa Góes Brandão, Presidente Prudente (1995–1998)
 Escola Estadual Florivaldo Leal, Presidente Prudente (1999–2002)

2003–2005 Ensino Médio
 Escola Estadual Sarrion Monsenhor

2009–2012 Licenciatura em Matemática
 Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
 Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente

2013–2015 Mestrado em Matemática Aplicada e Computacional
 Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
 Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente

2016–2021 Doutorado em Ciências Cartográficas
 Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
 Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente

Prêmios

2019 AGU Fall Meeting Student Travel Grant Winner

2020 Outstanding Paper Award for Young Scientists, COSPAR

*Aos meus amados sobrinhos Bernardo e Alice, obrigada por serem minhas inspirações e
incentivos diários.*

AGRADECIMENTOS

"I am no longer accepting the things I cannot change. I am changing the things I cannot accept."

— Angela Y. Davis

Começo, agradecendo a Deus, ao Universo e a todas as energias que possam ter me acompanhado durante essa trajetória. Finalizar esse trabalho, no momento delicado que vivíamos no Brasil, não foi fácil. Apesar de tudo, acredito que vale a pena acreditar e investir na educação.

Sinto um misto de alívio e sensação de dever cumprido. Quando entrei nessa jornada, não fazia ideia do que estava por vir. E quem fazia, né? Uma pandemia, um país em crise, cortes na ciência e na educação...

Eu não conseguiria descrever quantos sentimentos essa tese carrega. Entretanto, consigo ao menos dizer o quão sou grata por ter chegado até aqui e o tamanho do orgulho que sinto por lembrar de minhas origens! Essa conquista que é carregada de muita abdicção, muito ônus, mas também de muito aprendizado!

Nunca foi fácil! Só quem estava perto consegue sentir junto a mim cada lembrança boa e ruim.

Um agradecimento especial à minha orientadora Daniele, por todo o apoio, suporte e orientação, que foram essenciais durante esta trajetória e ao meu coorientador Galera, por terem proporcionado muitas oportunidades, cuja importância vai além da vida acadêmica.

Ao pessoal do PPGCC, agradeço por cada almoço, cafés e conversas, que tornaram os dias mais leves. Um agradecimento especial, aqueles cuja amizade e estímulo foram essenciais: Gabriel Jerez, Lucas Jamiro, Marcela Machado, Paulo Setti, Samara Calçado e Tayná Gouveia. Obrigada por terem sempre me apoiado e ajudado nos dias mais difíceis.

À minha família, por ter me amparado e dado suporte. Sem vocês, isso não teria sido possível! Obrigada tias, tios, primos pelas risadas nos nossos encontros. Em especial agradeço a minha mãe Sueli, minhas irmãs, Andressa e Adriely e aos meus amados sobrinhos Bernardo e Alice, pela compreensão e pelo imenso apoio, me estimulando nos

momentos mais difíceis. Obrigada por me desejarem o melhor, pelo esforço que fizeram para que eu pudesse superar cada obstáculo e pelo imenso amor que vocês tem por mim. Sou eternamente grata a vocês por tudo que sou.

À Universidade Tecnológica de Delft, por ter me recebido durante o intercâmbio. Em especial, a Sandra Verhagen cujos ensinamentos trouxeram novas possibilidades para a pesquisa desenvolvida. À Bia, Carol, Vini, Luiz, Daniel e Paty, por terem sido companheiros de conversas e cafés.

Ao Bruno, meu complementar e amigo de sempre, agradeço as longas conversas, os telefonemas, a preocupação, por sempre estar ao meu lado, me apoiando e torcendo por mim, independente da distância entre nós. Ao Paul von Winckelmann, com amor, pelo permanente incentivo e preocupação que acompanhou os últimos anos de realização deste trabalho. Agradeço a paciência e amor, demonstrados nos momentos que mais precisei.

À CAPES pela concessão da bolsa de doutorado e pelo Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia –Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea (INCT GNSS-NavAer), financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Processo 465648/2014 – 2), FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – Processo 2017/50115–0) e CAPES (Processo nº 88887.137186/2017 – 00).

Obrigada a todas e todos que fizeram parte da minha trajetória!

It took nearly ten years to see my dream come true. It was indeed worth the effort and the wait. [...]

No longer in space and now an "earthling" once again, I feel that my good fortune yet continues.

I welcome the opportunity to express my heartfelt gratitude to many people who have encouraged me to believe that if you can dream it, you can do it.

And I strongly believe that education enables us to envision and to pursue our dreams.

Chiaki Mukai

RESUMO

Os GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) têm sido amplamente utilizados em atividades de levantamento, geodésia e navegação, bem como em outros campos. Em 2021, há previsão que quatro sistemas globais estejam operacionais, são eles, o americano GPS, o russo GLONASS, o chinês BeiDou e o da União Europeia Galileo. O uso de multi-GNSS pode beneficiar usuários de posicionamento global, navegação e tempo, não apenas em termos de disponibilidade de satélites, mas também precisão, integridade e confiabilidade. Entretanto, para alcançar precisão centimétrica é necessário solucionar corretamente as ambiguidades inteiras nas medidas de fase da onda portadora. A solução das ambiguidades inteiras e a sua validação têm sido questões importantes para posicionamento preciso GNSS ao longo das últimas décadas. Esta tese visa elaborar, analisar e resumir sistemicamente a modelagem e solução das ambiguidades para o posicionamento relativo multi-GNSS de linhas de bases longas, aperfeiçoando e projetando algoritmos, para desenvolver um sistema computacional eficiente, considerando as condições atmosféricas brasileiras. Dentre as contribuições deste trabalho, cabe ressaltar, uma revisão teórica abrangente sobre os algoritmos de solução e validação das ambiguidades e o desenvolvimento de um sistema computacional que realiza o posicionamento relativo de linhas de bases longas, para observações multifrequência, utilizando os sistemas GPS e Galileo, de forma autônoma ou combinada, que realiza a solução das ambiguidades, considerando a modelagem dos efeitos atmosféricos no Brasil. O desempenho dos modelos e do sistema computacional desenvolvidos é avaliado com dados GNSS reais, em períodos de diferente atividade ionosférica. No primeiro experimento, analisou-se o desempenho do posicionamento relativo utilizando observações dos sistemas GPS, Galileo de forma isolada e combinada. Um conjunto de 4 linhas de bases, de 280 m a 144 km, localizadas no estado de São Paulo, num período de junho e outubro de 2019 foi selecionado. Os resultados mostraram que o uso do modelo com ionosfera ponderada teve uma melhoria de 62% na média para as linhas de base longas. Em relação ao uso combinado dos sistemas GPS e Galileo, a melhoria em comparação ao sistema GPS foi de 24% e em comparação ao sistema Galileo foi de 21%. Visando a solução rápida das ambiguidades, a combinação de duas estratégias foi proposta no segundo experimento: a solução parcial das ambiguidades para o posicionamento relativo com o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo. Os resultados foram analisados em relação processamento conjunto dos sistemas GPS e Galileo, juntamente com solução parcial das ambiguidades (PAR). Assim, no segundo expe-

rimento foram analisadas duas técnicas de solução das ambiguidades, a solução completa do vetor das ambiguidades (FAR) e a solução parcial (PAR), utilizando dados do sistema GPS e GPS combinado com Galileo, para duas linhas de base, uma curta e uma longa. Os resultados são apresentados em termos de número de satélites rastreados, acurácia do posicionamento, percentual de fixação das ambiguidades e número de ambiguidades fixas. Verificou-se que, no geral, o uso da solução parcial das ambiguidades apresentou um melhor desempenho em relação a solução completa do vetor de ambiguidades. Para a linha de base curta, foi possível obter a solução instantânea das ambiguidades em todo o período processado utilizando os sistemas GPS e Galileo juntamente com a técnica PAR. Para as técnicas PAR e FAR, o percentual de fixação das ambiguidades foi de 98% e 92% para o sistema GPS e 100% e 95% para o uso combinado dos sistemas, respectivamente. Os resultados obtidos para a linha de base longa, demonstram que o melhor desempenho foi obtido como uso combinado dos sistemas juntamente com a técnica PAR. O tempo para fixar as ambiguidades (TTFF) do sistema GPS foi de 49 min e 12 min para as técnicas FAR e PAR, respectivamente. Para o uso dos sistemas combinados, o TTFF das ambiguidades foi de 33 min e 4 min para as técnicas FAR e PAR, respectivamente. Os resultados mostram que a solução parcial das ambiguidades pode possibilitar o posicionamento instantâneo centimétrico para estações de referência próximas e reduzir significativamente o tempo necessário para linhas de bases longas em comparação com a solução completa do vetor de ambiguidades.

Palavras-chaves: Solução das ambiguidades, Posicionamento relativo, GPS, Galileo, Solução Parcial das ambiguidades.

ABSTRACT

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) have been widely used in surveying, geodesy, and navigation activities, as well as in other fields. In 2021, the four global systems are expected to be operational, which are the American GPS, the Russian GLONASS, the European Union's Galileo, and the Chinese BeiDou. The use of multi-GNSS can benefit users of global positioning, navigation, and timing not only in terms of satellite availability but also accuracy, integrity, and reliability. However, to achieve centimeter accuracy, resolving integer ambiguities in carrier phase measurements is essential. Only if the number of the integer unknown cycles is correctly resolved, the accuracy of centimeter level positioning becomes achievable. Once the integer ambiguities are resolved, the carrier phase measurements begin to act as precise distance measurements. Integer ambiguities resolution and validation have been important issues for GNSS precise positioning over the past three decades. This thesis aims to systemically elaborate, analyze, and summarize the modeling and ambiguity resolution for long-baseline relative multi-GNSS positioning, then improve and design algorithms and develop an efficient software, considering the Brazilian atmospheric conditions. The main contributions of this thesis are a comprehensive theoretical review on the algorithms of ambiguity resolution, and the development of a software that performs RTK positioning of long baselines, using multifrequency observations of GPS and Galileo systems, with ambiguity resolution, considering the modeling of atmospheric effects in Brazil. The performance of the developed models and software is evaluated with real GNSS data, in periods of different ionospheric activity. In the first experiment, the performance of the RTK positioning was analyzed using the GPS and Galileo systems in an isolated and combined way. A set of 4 baselines, from 280 m to 144 km, in São Paulo state and a period of June and October 2019 were selected. The results showed that the use of the weighted ionosphere model had an improvement of 62% on average for the long baselines. Regarding the combined use of the GPS and Galileo systems, an improvement of 24% was obtained compared to the GPS system and 21% compared to the Galileo system. To obtain fast ambiguity resolution, a combination of two strategies was proposed in the second experiment: the joint processing of the GPS and Galileo systems with the partial ambiguity resolution (PAR). The second experiment analyzed two ambiguity resolution techniques, full ambiguity resolution (FAR) and PAR, using GPS-only data and combined with Galileo, for a short and a long baseline. Results were presented in terms of the number of tracked satellites, positioning accuracy, ambiguity success rate, and the number of fixed

ambiguities. It was found that, in general, the use of the PAR presented better performance when compared to the FAR. To the short baseline, it was possible to obtain instantaneous ambiguity resolution throughout the processed period using the GPS and Galileo systems together with the PAR technique. For the PAR and FAR techniques, the percentage of ambiguities fixing was of 98% and 92% for the GPS system and 100% and 95% for the combined use of the systems, respectively. The results obtained for the long baseline demonstrate that the best performance was obtained in the combined use of the systems together with the PAR technique. Time to First Fix (TTFF) of ambiguities considering the GPS system was 49 min and 12 min for the FAR and PAR, respectively. For GPS + Galileo, the TTFF of ambiguities was 33 min and 4 min for the FAR and PAR techniques, respectively. The results show that partial ambiguity resolution can enable instantaneous centimeter level positioning to nearby reference stations, and clearly reduces the time required for long baselines compared to full ambiguity vector resolution.

Keywords: Ambiguity resolution, Real Time kinematic positioning, GPS, Galileo, Partial Ambiguity Resolution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Erros nas coordenadas locais E, N, U, com o uso das ambiguidades reais (<i>float</i>) (em azul) e ambiguidades inteiras (fixa) (em verde)	24
Figura 2 – Erros envolvidos na propagação do sinal para o posicionamento relativo.	35
Figura 3 – Duplas diferenças multi-GNSS. Satélites s e v pertencem a primeira constelação X e os satélites u e z a segunda constelação Y. A estação base é denotada por r e a estação a ser determinada é denotada como q . . .	48
Figura 4 – Procedimento para solucionar o modelo misto inteiro.	60
Figura 5 – Região de atração para o método de arredondamento inteiro – IR	63
Figura 6 – Região de atração para o método de inicialização inteira – IB	64
Figura 7 – Região de atração para o método dos mínimos quadrados inteiros – ILS	66
Figura 8 – Um exemplo bidimensional de decorrelação das ambiguidades. Em azul, o espaço de procura de $Q_{\hat{a}}$ e em preto o espaço de procura de $Q_{\hat{z}}$, antes e após a decorrelação, respectivamente.	70
Figura 9 – Um exemplo bidimensional do cálculo da taxa de sucesso das ambiguidades.	72
Figura 10 – Logotipo do sistema computacional FCT-RTK, desenvolvido durante esta tese.	77
Figura 11 – Resumo da estrutura do FCT-RTK. As setas vermelhas denotam sequências de processamento e as setas pretas denotam entrada/saída.	78
Figura 12 – Localização das estações utilizadas neste experimento. À esquerda: Linhas de bases longas. À direita: Linha de base formada no campus da UNESP Presidente Prudente (Google Earth).	80
Figura 13 – Indicadores de atividade solar, Kp e F10,7, para os períodos utilizados neste experimento.	81
Figura 14 – Percentual de melhoria, em comparação ao Cenário 1, na acurácia do posicionamento para a linha de base curta no período de baixa atividade ionosférica, utilizando os sistemas GPS (a), Galileo (b) e GPS+Galileo (c) de forma combinada. Preto representa o DOY 161, cinza representa o DOY 162 e branco o DOY 163.	86

Figura 15 – Melhoria do posicionamento GPS+Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base curta (280 m) no período de baixa atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.	87
Figura 16 – Percentual de melhoria em comparação ao Cenário 1 para a linha de base curta, para os sistemas GPS, Galileo e GPS+Galileo.	89
Figura 17 – Melhoria do posicionamento GPS+Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base PPTE – PRU2 no período de alta atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.	90
Figura 18 – Diagramas polares para os dias 10, 11 e 12 de junho de 2019 na estação PPTE, para os sistemas GPS e Galileo, em vermelho e azul, respectivamente.	92
Figura 19 – Melhoria, em metros, dos cenários em relação ao Cenário 1, para a linha de base PPTE – SPDR, para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo. . .	94
Figura 20 – Melhoria do posicionamento GPS + Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base PPTE – SPDR no período de baixa atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.	95
Figura 21 – Percentual de melhoria, dos cenários em relação ao Cenário 1, para a linha de base longa (95 km), para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.	97
Figura 22 – Melhoria do posicionamento combinado GPS + Galileo em relação ao uso dos sistemas GPS e Galileo, de forma isolada, para a linha de base de 95 km no período de baixa atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.	98
Figura 23 – Percentual de melhoria em comparação dos cenários descritos na Seção 4.2.2 em comparação ao cenário sem correção (Cenário 1) para a linha de base longa (142 km), para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.	100
Figura 24 – Melhoria do posicionamento GPS + Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base longa com 142 km para período de baixa atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.	102
Figura 25 – Diagramas polares para os dias 25, 26 e 27 de outubro de 2019 na estação PPTE, para os sistemas GPS e Galileo, em vermelho e azul, respectivamente.	103
Figura 26 – Melhoria de cada um dos cenários descritos na Seção 4.2.2 em relação ao Cenário 1, para o período de alta atividade ionosférica da linha de base com 72 km.	105
Figura 27 – Melhoria do posicionamento GPS + Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base com 72 km no período de alta atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.	106
Figura 28 – Melhoria obtida quando se compara os cenários descritos na Seção 4.2.2 em relação ao Cenário 1, para a linha de base PPTE – SPTU, para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.	108

Figura 29 – Melhoria do posicionamento GPS + Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base longa com 95km no período de alta atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.	109
Figura 30 – Percentual de melhoria para o período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (142 km), para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.	111
Figura 31 – Melhoria do posicionamento GPS + Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base de 142 km no período de alta atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.	112
Figura 32 – Desempenho do posicionamento instantâneo para o sistema GPS de tripla frequência (L1/L2/L5) comparando as técnicas FAR/PAR na linha de base PPTE – PRU2.	116
Figura 33 – Desempenho do posicionamento instantâneo para os sistemas GPS e Galileo combinados comparando as técnicas FAR/PAR na linha de base PPTE – PRU2.	118
Figura 34 – Desempenho do posicionamento relativo com o modelo de ionosfera ponderada para o sistema GPS de tripla frequência (L1/L2/L5) comparando as técnicas FAR/PAR na linha de base PPTE – SPAR.	119
Figura 35 – Desempenho do posicionamento relativo com o modelo de ionosfera ponderada para o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo comparando as técnicas FAR/PAR na linha de base PPTE – SPAR. Em azul, FAR e em vermelho PAR.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Status do multi-GNSS em Janeiro de 2021.	26
Tabela 2 – Frequências GNSS	27
Tabela 3 – Configuração das linhas de bases utilizadas no experimento.	80
Tabela 4 – Descrição dos detalhes dos cenários utilizados.	82
Tabela 5 – Estratégia de processamento adotada para este experimento.	83
Tabela 6 – Número de satélites rastreados para a linha de base curta (280 m), no período de baixa atividade ionosférica, para os sistemas GPS e Galileo, de forma autônoma e combinada.	85
Tabela 7 – Valores obtidos para o REQM (metros) no período de baixa atividade ionosférica para a linha de base curta (280 m), em centímetros.	85
Tabela 8 – Número de satélites rastreados para a linha de base curta (280 m), no período de alta atividade ionosférica, para os sistemas GPS e Galileo, de forma autônoma e combinada.	88
Tabela 9 – Valores obtidos para a REQM (metros) no período de alta atividade ionosférica para a linha de base curta (280 m), em centímetros.	88
Tabela 10 – Número de satélites rastreados para a linha de base longa (72 km), no período de baixa atividade ionosférica, para os sistemas GPS e Galileo, de forma autônoma e combinada.	92
Tabela 11 – REMQ 3D (metros) obtidos para o período de baixa atividade ionosférica para a linha de base PPTE - SPDR (72 km).	93
Tabela 12 – Número de satélites rastreados para o período de baixa atividade ionosférica para a linha de base longa (95 km), para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.	96
Tabela 13 – REQM (metros) obtidas para o período de baixa atividade ionosférica para a linha de base longa (95 km).	96
Tabela 14 – Número de satélites rastreados para o período de baixa atividade ionosférica para a linha de base de 142 km, para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.	99
Tabela 15 – Valores obtidos para a REQM (metros) no período de baixa atividade ionosférica para a linha de base longa (142 km).	101

Tabela 16 – Número de satélites rastreados no período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (142 km).	103
Tabela 17 – Valores da REQM (metros) obtidos para o período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (72 km).	104
Tabela 18 – Número de satélites rastreados no período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (95 km).	107
Tabela 19 – Valores de REQM (metros) obtidos para o período de alta atividade ionosférica para a linha de base PPTE - SPTU (95 km).	107
Tabela 20 – Número de satélites rastreados no período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (142 km).	110
Tabela 21 – REQM (metros) obtidos no período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (142 km).	110
Tabela 22 – Estatística (REQM), em metros, para os erros obtidos no posicionamento utilizando o sistema GPS na linha de base PPTE – PRU2.	117
Tabela 23 – Estatística (REMQ), em metros, para os erros obtidos no posicionamento com o uso dos sistemas GPS e Galileo combinados para a linha de base PPTE – PRU2.	118
Tabela 24 – Estatística (REQM), em metros, para os erros obtidos no posicionamento utilizando o sistema GPS na linha de base PPTE – SPAR (144 km). . . .	120
Tabela 25 – Estatística (REQM), em metros, para os erros obtidos no posicionamento com o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo para a linha de base PPTE – SPAR (144 km).	120

LISTA DE SIGLAS

3D	Tridimensional
ADOP	<i>Ambiguity Dilution of Precision</i>
ANTEX	<i>Antenna Exchange</i>
ARP	<i>Antenna Reference Point</i>
BDS	<i>BeiDou navigation satellite system</i>
CDMA	<i>Code division multiple access</i>
CODE	<i>Center for Orbit Determination in Europe</i>
DD	Dupla Diferença
DIA	<i>Detection, identification, and adaptation</i>
DOY	<i>Day of Year</i>
DT	<i>Difference test</i>
EMQ	Erro Médio Quadrático
FAR	<i>Full ambiguity resolution</i>
FDMA	<i>Frequency division multiple access</i>
FFRT	<i>Fixed Failure Ratio Test</i>
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>

GPS	<i>Global Positioning System</i>
IB	Integer bootstrapping
IGS	<i>International GNSS Service</i>
ILS	<i>Integer least-squares</i>
IR	<i>Integer rounding</i>
LAMBDA	<i>Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment</i>
MGEX	<i>Multi GNSS experiment</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MVC	Matriz de Variância e Covariância
NAVSTAR-GPS	<i>Navigation Satellite with Time and Ranging - Global Positioning System</i>
P_{ADOP}	Aproximação da probabilidade de sucesso das ambiguidades do ILS baseada no ADOP
PAR	<i>Partial ambiguity resolution</i>
PNT	Previsão Numérica de Tempo
PPP	Posicionamento por Ponto
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	<i>The Receiver-Independent Exchange Format</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SD	Simples diferença
SPP	Posicionamento por Ponto Simples
TTFF	<i>Time-To-First-Fix</i>

TEC	<i>Total Electron Content</i>
ZTD	Zenith Tropospheric Delay

SUMÁRIO

Curriculum Vitæ		3
1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Estado da arte	27
1.2	Objetivos	30
1.3	Justificativa	31
2	MODELOS MATEMÁTICOS PARA O POSICIONAMENTO POR GNSS . .	32
2.1	Observáveis GNSS	32
2.2	Fontes de erros	34
2.2.1	Troposfera	35
2.2.2	Ionosfera	36
2.2.3	Multicaminho	37
2.2.4	Perdas de ciclos	38
2.2.5	Centro de fase da antena	39
2.2.6	Mitigação de erros	40
2.3	Combinações das observáveis GNSS	41
2.3.1	Combinações de observações envolvendo um único satélite e um único receptor	41
2.3.1.1	Combinações <i>Wide-lane</i> e <i>Narrow-lane</i>	42
2.3.1.2	Combinação Melbourne-Wubben	44
2.3.1.3	Combinação livre de ionosfera	44
2.3.2	Combinações lineares entre diferentes satélites e estações	46
2.3.2.1	Simple diferença	46
2.3.2.2	Dupla diferença	48
2.3.2.3	Tripla Diferença	50
2.3.2.4	Tetra Diferença	50
2.4	Modelo Funcional	51
2.4.1	Filtro de Kalman	51
2.4.1.1	Modelo de medidas	52
2.4.1.2	Predição	52
2.4.1.3	Filtragem	53
2.4.2	Modelo de ionosfera ponderada	54
2.4.3	Modelos estocásticos	55

3	SOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES INTEIRAS: ESTIMATIVA E VALIDAÇÃO	56
3.1	Processo geral de solução das ambiguidades	57
3.2	Estimadores inteiros admissíveis	60
3.2.1	Arredondamento inteiro	62
3.2.2	Método de arredondamento inteiro sequencial	63
3.2.3	Método dos mínimos quadrados inteiros	64
3.2.3.1	Busca com enumeração	65
3.2.3.2	Busca com encolhimento	67
3.3	Decorrelação	68
3.4	Confiabilidade da estimativa inteira	70
3.5	Solução parcial das ambiguidades	72
3.6	Validação	74
3.6.1	Teste da Razão (Ratio Test)	74
3.6.2	FF-RT (<i>Fixed Failure Ratio Test</i>)	74
4	FCT-RTK: MULTI GNSS	76
4.1	Estrutura do sistema	77
4.2	Investigação de estratégias para o posicionamento relativo multi-GNSS	79
4.2.1	Dados	79
4.2.2	Material empregado	80
4.3	Solução parcial das ambiguidades para o posicionamento relativo com o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo	82
5	INVESTIGAÇÃO DE ESTRATÉGIAS PARA O POSICIONAMENTO RELATIVO MULTI-GNSS	84
5.1	Linha de base curta: 280 m	84
5.1.1	Período de baixa atividade ionosférica	84
5.1.2	Período de alta atividade ionosférica	87
5.1.3	Conclusões para a linha de base curta	91
5.2	Linhas de bases longas: Período de baixa atividade ionosférica	91
5.2.1	Linha de base longa (72 km)	92
5.2.2	Linha de base longa (95 km)	95
5.2.3	Linha de base longa (142 km)	99
5.2.4	Conclusões para o período de baixa atividade ionosférica	102
5.3	Linhas de bases longas: Período de alta atividade ionosférica	103
5.3.1	Linha de base longa (72 km)	103
5.3.2	Linha de base longa (95 km)	106
5.3.3	Linha de base longa (142 km)	109

5.3.4	Conclusões para o período de alta atividade ionosférica	112
5.3.5	Conclusões para linhas de bases longas	113
6	SOLUÇÃO PARCIAL DAS AMBIGUIDADES PARA O POSICIONAMENTO RELATIVO COM O USO COMBINADO DOS SISTEMAS GPS E GALILEO	115
6.1	Linha de base curta (280 m)	115
6.1.1	GPS	115
6.1.2	GPS + Galileo	117
6.2	Linha de base longa (142 km)	118
6.2.1	GPS	118
6.2.2	GPS + Galileo	120
6.3	Conclusões	122
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS, TENDÊNCIAS E RECOMENDAÇÕES	123
7.1	Resumo desta pesquisa	123
7.2	Tendências, desafios e trabalhos futuros	125
	REFERÊNCIAS	127
	Lista de Publicações	137

INTRODUÇÃO

“Comece pelo começo”, disse o Rei com muita gravidade, “e siga até o fim: daí pare.”

— Lewis Carroll, *Alice no País das Maravilhas*

O posicionamento por satélite é essencial para a vida da nossa sociedade moderna e é usado por milhares de pessoas em todo o mundo. Para posicionamento com GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), a fase de batimento da onda portadora e a pseudodistância são as observáveis básicas (HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017). Devido à baixa precisão da pseudodistância e das efemérides transmitidas, a precisão do posicionamento por ponto simples (*Standard Point Positioning* - SPP) é de nível de vários metros e é comumente utilizado em navegação automobilística, marítima em mar aberto e também em smartphones. Com o uso de dois receptores, utilizando apenas dados de pseudodistância, pode-se realizar o posicionamento diferencial GNSS (*Differential GNSS* - DGNSS), que pode obter precisão decimétrica. Para isto, os receptores devem estar separados por uma curta distância e assim reduzir os erros relacionados à atmosfera e a órbita do satélite. O DGNSS é muito utilizado em aplicações de navegação aérea e na navegação marítima próxima a portos.

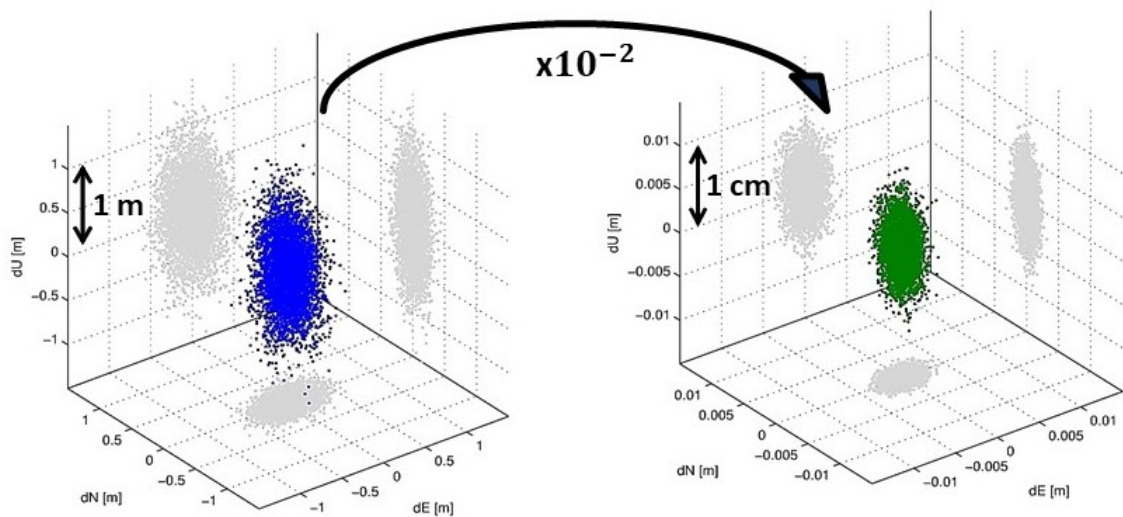
Para posicionamento mais acurado, de nível centimétrico e/ou milimétrico, é necessário utilizar a observável fase da onda portadora, que é cerca de cem vezes mais precisa do que a pseudodistância (HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017). As técnicas de posicionamento baseadas na fase portadora podem ser divididas em relativo (RTK – *Real Time Kinematic*) e por ponto preciso (PPP – *Precise Point Positioning*). O posicionamento relativo requer o uso de dois receptores, como o DGNSS, enquanto o PPP, a nível de usuário, necessita de um único receptor com modelagem robusta dos erros e efemérides precisas geradas através

de uma infraestrutura global de estações GNSS ativas. Apenas o posicionamento relativo pós-processado será considerado, pois foi o método de posicionamento adotado.

Apesar da fase da onda portadora ser mais precisa do que a pseudodistância, o problema em utilizar a fase é que ela é ambígua, ou seja, é enviesada por um número desconhecido de ciclos inteiros, denominado ambiguidade. Uma vez que as ambiguidades da fase da onda portadora são resolvidas como valores inteiros (AR – *Ambiguity Resolution*) é possível obter precisão centimétrica ou milimétrica no posicionamento relativo. Se o comprimento da linha de base for de no máximo alguns quilômetros¹, os erros atmosféricos podem ser negligenciados. Por outro lado, se o comprimento da linha de base for de algumas dezenas de quilômetros (ou mais), esses erros precisam ser também estimados (SEEBER, 2003; MONICO, 2008; ODIJK, 2000).

Na Figura 1, uma representação da dispersão dos erros no posicionamento relativo com solução instantânea das ambiguidades nas componentes E, N e U é apresentada. Dentre as aplicações do posicionamento relativo, destaca-se o uso na indústria, no setor de construção, no cadastro, na predição de tsunamis, no monitoramento de inundações e terremotos e na agricultura de precisão.

Figura 1 – Erros nas coordenadas locais E, N, U, com o uso das ambiguidades reais (*float*) (em azul) e ambiguidades inteiras (fixa) (em verde)



Fonte: Adaptada de Verhagen, Li e Teunissen (2013).

Dentre os erros que afetam o posicionamento, pode-se destacar os de propagação do sinal, como a Troposfera, a Ionosfera e o multicaminho. A Troposfera corresponde à parte inferior da atmosfera com uma altura acima da superfície da Terra até aproximadamente 50 quilômetros, enquanto a Ionosfera é a parte superior, com uma altura

¹ a depender das condições ionosféricas

aproximada de 50-1000 km (HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017). Usualmente, o atraso devido à troposfera é dividido em componente úmida (*Wet Delay*), composta por vapor de água, e componente hidrostática (*Hydrostatic Delay*), formada pelos gases secos. O atraso causado pela componente seca tem a ordem de grandeza de 2,3 m no zênite e varia de acordo com a temperatura, a altitude e a pressão atmosférica. No entanto, representa 90% do atraso total com baixa variação temporal. Já na úmida o atraso é menor e representa aproximadamente 10% do atraso total, cerca de 30 cm, porém, sua variação é muito maior, atingindo cerca de 20% em poucas horas (HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017), devido à variação do vapor d'água ao longo de poucas horas do dia. A melhor previsão dessa variável pode ser dada pela boa qualidade e distribuição de medidas de umidade e vapor d'água. A soma das duas componentes resulta no atraso troposférico total (ZTD – *Zenith Tropospheric Delay*).

A refração ionosférica depende da frequência utilizada e do índice de refração. O efeito causado pela refração é proporcional ao conteúdo total de elétrons (*Total Electron Content* - TEC), ou seja, está sujeito ao número de elétrons presentes ao longo da trajetória do sinal entre as antenas do satélite e do receptor. O efeito causado pode variar de um a cem metros (HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017). O grande problema é a variabilidade do TEC no tempo e espaço, em função da variação de diversos fatores, dentre eles, pode-se citar: a radiação solar, variação temporal, da localização, do campo geomagnético. Além desses fatores, ocorrem outras anomalias e irregularidades, como a cintilação ionosférica (CONKER et al., 2003).

Como dito anteriormente, o RTK pode atingir precisão centimétrica ou melhor, com a solução das ambiguidades. Apesar de ser uma técnica clássica de posicionamento, o interesse da comunidade científica internacional e nacional permanece, devido ao advento dos GNSS, que possibilita usar os sistemas combinados, podendo resultar em maior disponibilidade, solução mais rápida das ambiguidades e maior precisão no posicionamento (ODOLINSKI; TEUNISSEN, 2019; TIAN et al., 2020; ZHANG et al., 2020).

O GNSS, denominação empregada quando mais de um sistema é adotado, passou de apenas um, o GPS, para quatro sistemas globais, o GLONASS russo, o BeiDou (BDS) chinês e o Galileo europeu. A modernização do GPS (*Global Positioning System*) e o desenvolvimento de novas constelações GNSS (mostradas na Tabela 1) oferecem novas possibilidades para melhorias no posicionamento RTK. Em particular, o GLONASS que teve sua constelação restaurada desde 2011 (JEREZ; ALVES, 2018).

O desenvolvimento do BeiDou foi planejado em três etapas (YANG et al., 2018). O estabelecimento formal do BDS-1 foi marcado pelo lançamento do terceiro satélite BeiDou em 2003. O segundo passo foi a implantação do sistema regional BDS-2, que foi

realizado por uma constelação de 14 satélites em 2012. Com o lançamento bem-sucedido dos satélites experimentais de terceira geração BeiDou em 2015, a construção do sistema global do BeiDou (BDS-3) iniciou-se e foi declarada completa em junho de 2020 (SYSTEM, 2020) com 27 satélites MEO em órbita, e o sistema foi declarado operacional em julho do mesmo ano. São transmitidos sinais abertos e autorizados em três frequências, denominadas de B1, B2, B3 pela técnica CDMA (Tabela 2).

De forma análoga ao BeiDou, o Galileo foi desenvolvido nos últimos anos (HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; BARTOLOMÉ et al., 2014; STEIGENBERGER; MONTENBRUCK, 2017). A partir de 2014, satélites Galileo vêm sendo continuamente lançados visando atingir a fase operacional completa – FOC (*Full Operational Capability*) do sistema. Serviços iniciais foram anunciados pela ESA em dezembro de 2016. Enquanto o sistema não é declarado operacional, a ESA (*European Space Agency*) não garante que os sinais Galileo estejam disponíveis, mesmo que os níveis mínimos de performance sejam atingidos durante todo o tempo. O sistema deve ser declarado operacional este ano, 2021.

Tabela 1 – Status do multi-GNSS em Janeiro de 2021.

	Sistema			
	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Número de satélites operacionais	31	23	24	27
Número de satélites em manutenção e/ou comissionamento	1	5	4	8
Número de satélites para constelação estar completa e data prevista	24	24	24	27
Observação	Lançamento do primeiro satélite GPS III em 23/12/18	A série de satélites K, que transmitem sinais em CDMA, deve gradualmente substituir os satélites existentes	Serviços iniciais desde 15/12/16	Os serviços globais foram iniciados em 27/12/18

Fonte: Adaptada de Langley, Teunissen e Montenbruck (2017).

Como pode ser visto na Tabela 1, existem 105 satélites GNSS em órbita e 18 satélites em comissionamento ou manutenção no momento. Quando os quatro sistemas globais atingirem suas constelações completas, haverá mais de 120 satélites operacionais. Comparado com o sistema GPS precursor e declarado operacional com 24 satélites, o uso combinado de vários sistemas pode aumentar significativamente o número de satélites visíveis em um fator de 5 e melhorar a geometria, a precisão, integridade e eficiência do posicionamento em todo o mundo. A disponibilidade de muitos outros satélites e sinais cria oportunidades interessantes para estender o uso do posicionamento relativo com o

uso da fase da onda portadora, que normalmente é restrito a cerca de 15 km, permitindo até obter um posicionamento instantâneo no nível centimétrico para linhas de base longas, a depender de condições atmosféricas e multicaminho.

Os novos satélites GNSS transmitem sinais em três ou mais frequências. Por exemplo, o GPS modernizado acrescentou o sinal L5, além dos sinais L1 e L2 existentes. O Galileo foi projetado para transmitir sinais nas frequências E1, E6, E5A e E5B e o BeiDou está transmitindo nas frequências B1, B2 e B3 (FENG, 2008; LI; FENG; SHEN, 2010). Todas as frequências dos três sistemas são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Frequências GNSS

Sistema	Banda	Frequência (MHz)	Comprimento de onda (cm)
GPS/Galileo	L1/E1	1575,42	19,03
Galileo	E5b	1207,14	24,83
Galileo	E6	1278,75	23,44
GPS	L2	1227,60	24,42
GPS/Galileo	L5/E5a	1176,45	25,48

Fonte: Adaptada de Feng (2008).

1.1 Estado da arte

O estado da arte em posicionamento GNSS é o uso de vários sistemas combinados, que é denominado posicionamento multi-GNSS e tem vantagem inegável sobre o uso de um único sistema em termos de precisão, confiabilidade e disponibilidade, além de ser benéfico em ambientes obstruídos (CELLMER; PAZIEWSKI; WIELGOSZ, 2013; HE et al., 2014; TEUNISSEN; ODOLINSKI; ODIJK, 2014; ODOLINSKI; TEUNISSEN; ODIJK, 2015; SETTI JÚNIOR; GOUVEIA; ALVES, 2016; GAO; GAO; PAN, 2017; PAZIEWSKI; SIERADZKI, 2017; LI et al., 2018; ZHANG et al., 2020; SETTI JÚNIOR et al., 2020).

Nos últimos anos, os estudos sobre a solução das ambiguidades usando várias frequências GNSS têm sido realizados por muitos pesquisadores. Jonkman et al. (2000) analisaram o desempenho da solução das ambiguidades com três frequências quando comparados à solução das ambiguidades para dados de dupla frequência, para linhas de base longas. Os resultados evidenciaram que a terceira frequência não permitiria a solução das ambiguidades de forma instantânea para linhas de base longas para o modelo livre de geometria.

Tiberius et al. (2002) demonstraram que a capacidade de solucionar as ambiguidades instantaneamente, com o uso dos sistemas GPS e Galileo combinado melhorou consideravelmente. Os resultados mostraram que para linhas de base curtas, a taxa de

sucesso de ambiguidade foi superior a 95%, mesmo usando uma única época de dados. Já para linhas de base médias, normalmente 20-30 km, a taxa de sucesso foi 95% maior, quando utilizando informações de correção advindas de uma rede. Enquanto que para linhas de base longas, considerando até algumas centenas de quilômetros, a taxa de sucesso instantânea foi baixa para possibilitar aplicações práticas.

Em Zhang et al. (2003), a possibilidade da solução instantânea das ambiguidades foi analisada. Para isso, uma combinação dos métodos TCAR (*Three-Carrier Ambiguity Resolution*) e CIR (*Cascading Integer Resolution*) foi proposta para obter uma estimativa mais rápida e confiável das ambiguidades inteiras para linhas de base longas. Os resultados mostraram que a solução instantânea das ambiguidades foi possível com o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo, para linhas de base de até 10km.

Ji et al. (2007) investigaram o desempenho da solução das ambiguidades utilizando as quatro frequências do Galileo para uma única época, com o uso de dados simulados. Neste trabalho, dois métodos de solução das ambiguidades foram comparados, o LAMBDA (*Least squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*) e o CAR (*Cascade Ambiguity Resolution*). Os resultados obtidos evidenciaram que o método LAMBDA apresentou um desempenho superior do que o método CAR para a solução instantânea das ambiguidades.

Odijk et al. (2010) apresentaram, com o uso de dados simulados, como o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo pode melhorar a solução das ambiguidades para o WARTK (*Wide Area Real-Time Kinematic*). O método LAMBDA foi utilizado juntamente com o FF-RT (*Fixed Failure Ratio Test*). Os resultados comprovaram que o uso de dados integrados dos sistemas GPS e Galileo melhorou o desempenho da solução das ambiguidades de um usuário WARTK em relação apenas ao GPS.

Mais atualmente, Odolinski, Teunissen e Odijk (2014) demonstraram os benefícios para o RTK quando se utilizam os sistemas GPS, Galileo, BeiDou e QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*), para linhas de base longas. Chu e Yang (2014) desenvolveram uma abordagem de longo alcance generalizada para o uso integrado do GPS e Galileo para linhas de base longas, com a utilização de dados de tripla frequência e os resultados mostraram que utilizar o Galileo e dados de tripla frequência melhorou o desempenho da solução das ambiguidades. Li et al. (2015) propuseram um modelo de posicionamento cinemático em tempo real para linhas de base longas usando observações BeiDou de tripla frequência, que proporcionou posicionamento decimétrico e centimétrico quando as ambiguidades EWL/WL (*Extra Wide-Lane/ Wide-Lane*) e NL (*Narrow-Lane*) eram fixadas.

Zhao et al. (2015) propuseram um método TCAR modificado, que utiliza as combinações EWL (*Extra Wide Lane*) e WL (*Wide Lane*) para resolver as ambiguidades.

Gao et al. (2017) apresentaram um modelo modificado livre de ionosfera para melhorar o desempenho da solução das ambiguidades utilizando as combinações EWL/WL para linhas de base longas no posicionamento baseado em redes. Gong et al. (2017) apresentaram um método que visa reduzir o tempo inicial ou de re-convergência da solução das ambiguidades, empregando observações multi-frequência dos sistemas GPS e BeiDou. Neste método as duplas diferenças (DD) das observáveis são utilizadas para obter a solução *float* com atraso atmosférico estimado como parâmetro *random-walk* utilizando o filtro de Kalman. Após isso, as ambiguidades são divididas em três combinações, EWL, WL e NL (*Narrow Lane*), em seguida são fixadas sequencialmente usando o método LAMBDA. Os resultados mostraram que leva apenas aproximadamente 1, 2 e 6 épocas (intervalos de 30 s) para corrigir ambiguidades EWL, WL e NL, respectivamente. E que mais épocas são necessárias para corrigir a ambiguidade de WL e NL quando a ionosfera está mais ativa.

Se por um lado o uso de sistemas combinado apresenta inúmeros benefícios, por outro lado, o uso de observações de múltiplas frequências e sistemas também apresenta algumas dificuldades, como a multiplicidade de diferentes tendências de hardware entre os canais, que não são mitigadas, o aumento das possibilidades de perdas de ciclo a se detectar e a necessidade computacional para a solução das ambiguidades devido ao grande número de observáveis e parâmetros a serem estimados. Para resolver este problema, a solução parcial das ambiguidades (*Partial Ambiguity Resolution* - PAR) foi desenvolvida (CAO; O'KEEFE; CANNON, 2007; PARKINS, 2011; LI et al., 2015; GAO; GAO; PAN, 2017). Alguns resultados na literatura demonstram que ao utilizar a técnica PAR pode-se encurtar o tempo para alcançar a precisão centimétrica para linhas de base longas (ODIJK; ARORA; TEUNISSEN, 2014; NARDO; LI; TEUNISSEN, 2016; BRACK, 2017). Os resultados apresentados em Odijk, Arora e Teunissen (2014), Nardo, Li e Teunissen (2016) e Brack (2017) indicam que a PAR é particularmente útil para aplicações com o uso de múltiplos sistemas.

A AR de forma rápida e confiável, no entanto, continua a ser difícil de ser obtida, mesmo para o uso de sistemas GNSS combinados, especialmente com o aumento do comprimento da linha de base quando os atrasos atmosféricos não são mais desprezíveis, no caso do Brasil. A atmosfera brasileira apresenta características peculiares tanto na Ionosfera, quanto na Troposfera, que impactam diretamente no posicionamento GNSS. O Brasil está inserido na região do Equador geomagnético, sujeito aos efeitos causados pelas anomalias ionosféricas, como a cintilação. O atraso troposférico ocorre devido à variação dos constituintes desta camada, que são diferentes de acordo com a região e a época do ano. A floresta amazônica apresenta forte influência na climatologia brasileira. Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos nesta instituição, no Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE), sob estas temáticas (SETTI JÚNIOR; GOUVEIA; ALVES, 2016; ALVES et al.,

2016; GOUVEIA; ALVES; SAPUCCI, 2017; PROL et al., 2018; SETTI JÚNIOR; ALVES; SILVA, 2019; SILVA et al., 2019; VANI et al., 2019; SETTI JÚNIOR et al., 2020; SETTI JÚNIOR et al., 2020).

Como pôde ser visto, é muito amplo o número de pesquisas relativas à solução das ambiguidades para posicionamento relativo empregando linhas de base médias e principalmente longas. Um dos aspectos que fortalece essa linha de pesquisa é o fato de que esse tipo de posicionamento tem uma extensa gama de aplicações e a solução correta das ambiguidades da fase da onda portadora é essencial para obtenção de alta acurácia. Além disso, apesar de ser um dos principais temas de pesquisas nos últimos anos, esse problema ainda não pode ser considerado resolvido, principalmente para linhas de base longas com efeitos ionosféricos relevantes, como é o caso, por exemplo, de grande parte do território brasileiro .

O foco desta tese foi o de realizar a combinação dos sistemas GPS e Galileo para a solução das ambiguidades no posicionamento relativo. O GLONASS não foi considerado pois apenas 3 satélites transmitem sinais CDMA (*Code Division Multiple Access*) que, além disso, não se sobrepõem as frequências GPS na Tabela 2. Logo, as observações GNSS em múltiplas frequências e sistemas podem trazer grandes benefícios para o posicionamento RTK (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2003; CAO; O'KEEFE; CANNON, 2008; MONTENBRUCK et al., 2013; LI; FENG; SHEN, 2010). Para a solução das ambiguidades, este uso combinado ou de múltiplas frequências apresenta melhorias na eficiência e confiabilidade.

Embora muitos estudos tenham sido focados neste tema, existem deficiências sobre este tópico. Pode-se destacar a inexistência de estudos com enfoque nessa temática no Brasil, em particular, e/ou combinando os sistemas GPS e Galileo para o posicionamento relativo, utilizando dados reais com variabilidade ionosférica e o benefício para AR.

1.2 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa desta tese foi desenvolver (e implementar) um procedimento eficiente para a solução das ambiguidades de linhas de bases longas no posicionamento relativo por meio da integração de observações multi-GNSS e multifrequência, considerando as condições atmosféricas brasileiras. Em detalhes, as seguintes questões e aspectos foram abordados nessa tese:

- De que modo a AR se beneficia com a integração multi-GNSS?
- É possível, e como, obter a AR com as observações multifrequência para linhas de bases longas com o Galileo?

- Qual a melhoria para a AR com o uso de observações multifrequência?
- Qual a influência da atmosfera na AR? Como minimizar essa influência, como por exemplo, na estimativa e quais configurações para ionosfera e troposfera adotar?

1.3 Justificativa

Uma das principais justificativas desta tese está relacionada ao uso do GNSS para atividades que necessitem de alta acurácia. Para isso, é de suma importância o uso de observações de fase da onda portadora, o que torna indispensável a solução das ambiguidades de forma rápida e confiável. Dentre as contribuições deste trabalho, cabe ressaltar, uma revisão teórica abrangente sobre os algoritmos de solução e validação das ambiguidades e o desenvolvimento de um sistema que realiza o posicionamento relativo de linhas de bases longas, para observações multifrequência, utilizando os sistemas GPS e Galileo, de forma autônoma ou combinada, que realiza a solução das ambiguidades, considerando a modelagem dos efeitos atmosféricos no Brasil.

O Brasil, um país de dimensões continentais, tem uma rede de estações GNSS esparsas, resultando na necessidade do uso de linhas de base longas para o posicionamento relativo (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019). Ainda assim, a posição do país no globo faz com que os sinais GNSS, em sua propagação através da atmosfera terrestre, sejam fortemente influenciados pela ionosfera, exigindo um tratamento correto para a determinação das posições na superfície. Maior confiabilidade no uso de linhas de base longas, que é a realidade das redes de monitoramento brasileiras, seria extremamente benéfica nas atividades que necessitam de posicionamento.

Finalizando, esta pesquisa também contribui com diversos outros projetos em execução com apoio financeiro das agências brasileiras de fomento à pesquisa. Um projeto que merece destaque, na qual este trabalho está inserido, é o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia –Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea – INCT GNSS-NavAer, financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – processo 465648/2014-2), FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – processo 2017/50115-0) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – processo nº 88887.137186/2017-00) e também no projeto “GNSS: Investigações no Posicionamento Geodésico e Efeitos Atmosféricos” sob coordenação da orientadora deste trabalho, uma vez que busca contribuir com investigações relacionadas ao posicionamento geodésico.

MODELOS MATEMÁTICOS PARA O POSICIONAMENTO POR GNSS

O modelo matemático para o posicionamento por GNSS inclui dois aspectos: o modelo funcional e o modelo estocástico. O modelo funcional descreve a relação entre observações ou entre observações e parâmetros. Já o modelo estocástico descreve as características estocásticas das observações. Neste capítulo, o modelo funcional e o modelo estocástico para o posicionamento por GNSS são apresentados. Um modelo funcional adequado pode controlar todos os erros envolvidos nas observações GNSS e um modelo estocástico realista pode garantir a confiabilidade. Para fins de posicionamento, ambos são necessários, especialmente no caso de posicionamento baseado em observações de fase da onda portadora.

2.1 Observáveis GNSS

Os satélites GNSS transmitem quatro tipos de observáveis: pseudodistância (código), fase de batimento da onda portadora, a variação Doppler e o SNR (*Signal to Noise Ratio* – Razão Sinal Ruído). As observações de pseudodistância e fase da onda portadora são as observáveis mais utilizadas em posicionamento por GNSS. A variação Doppler é utilizada na detecção de perdas de ciclos e o SNR é utilizado na determinação de modelo estocástico, detecção de perdas de ciclos e na refletometria por GNSS. Neste estudo, apenas as observações do código e da fase da portadora são discutidas.

A pseudodistância ($P_{r,j}^s$) é derivada da diferença de tempo entre a transmissão do sinal no satélite s e o tempo de recepção de sinal no receptor r . A fase de batimento

da onda portadora $\Phi_{r,j}^s$ é obtida a partir da diferença de fase gerada pelo receptor e a fase gerada no satélite, ou seja, o receptor gera uma réplica do sinal da portadora, alinha com a portadora recebida do satélite e mede a diferença fracionária de ambos os sinais (a diferença entre a fase recebida e a gerada). Quando essa diferença fracionária ultrapassa um ciclo, o receptor conta os ciclos completos e fornece uma medida contínua.

As observações de pseudodistância e fase podem ser expressas como (BLEWITT, 1989; HAUSCHILD, 2017a):

$$P_{r,j}^s(t) = \rho_r^s(t, t - \tau_r^s) + \xi_{r,j}^s(t) + c \left(d_{r,j}(t) - d_j^s(t - \tau_r^s) \right) + c \left(dt_r(t) - dt^s(t - \tau_r^s) + \delta t^{rel}(t) \right) + I_{r,j}^s(t) + T_r^s(t) + e_{P_{r,j}^s}(t) \quad (2.1)$$

$$\Phi_{r,j}^s(t) = \rho_r^s(t, t - \tau_r^s) - I_{r,j}^s(t) + T_r^s(t) + \zeta_{r,j}^s(t) + c \left(\delta_{r,j}(t) - \delta_j^s(t - \tau_r^s) \right) + c \left(dt_r(t) - dt^s(t - \tau_r^s) + \delta t^{rel}(t) \right) + \lambda_j \left(M_{r,j}^s + \omega_r^s(t) \right) + \epsilon_{\Phi_{r,j}^s}(t), \quad (2.2)$$

$P_{r,j}^s$ observação de pseudodistância (m);

$\Phi_{r,j}^s$ fase da onda portadora (m);

t tempo de recepção (s);

τ_r^s tempo de transmissão (s);

j representa j -ésima frequência (MHz);

c velocidade da luz no vácuo (m/s);

ρ_r^s distância geométrica entre o satélite s e o receptor r (m);

$\xi_{r,j}^s$ correção devido à variação do centro de fase das antenas na pseudodistância (diferente para cada frequência) (m);

$\zeta_{r,j}^s$ correção da variação do centro de fase da antena na fase (diferente para cada frequência) (m);

$d_{r,j}$ atraso instrumental do receptor na pseudodistância (s);

$\delta_{r,j}$ atraso instrumental do receptor na fase (s);

d_j^s atraso instrumental do satélite na pseudodistância (s);

δ_r atraso instrumental do satélite na fase (s);

dt_r erro de relógio do receptor (s);

dt^s erro de relógio do satélite (s);

δt^{rel} correção aos efeitos relativísticos, dado por $\delta t^{rel} = \delta t_{stc}^{rel} - \delta t_{clk}^{rel}$;

$I_{r,j}^s$ atraso ionosférico (m);

T_r^s atraso troposférico (m);

$e_{p_{r,j}}^s, e_{\phi_{r,j}}^s$ efeitos não modelados e outros erros nas observáveis (m).

λ_j comprimento de onda da j -ésima frequência (m);

$M_{r,j}^s$ vieses da fase da onda portadora (ciclos);

ω_r^s correção da fase wind-up (m);

A maior diferença entre as equações da fase da onda portadora ((2.2)) e a da pseudodistância ((2.1)) é a presença dos vieses da fase da onda portadora, que estão contidos na variável $M_{r,j}^s$, com inicialização constante e é composta por três termos (BLEWITT, 1989):

$$M_{r,j}^s = \varphi_{r,j}(t_0) - \varphi_j^s(t_0) + N_{r,j}^s, \quad (2.3)$$

t_0 tempo inicial (s);

$\varphi_{r,j}$ fase inicial gerada no receptor (ciclos);

φ_j fase inicial gerada no satélite (ciclos);

$N_{r,j}^s$ número de ciclos inteiros da j -ésima frequência da fase da onda portadora, também conhecido como ambiguidades.

2.2 Fontes de erros

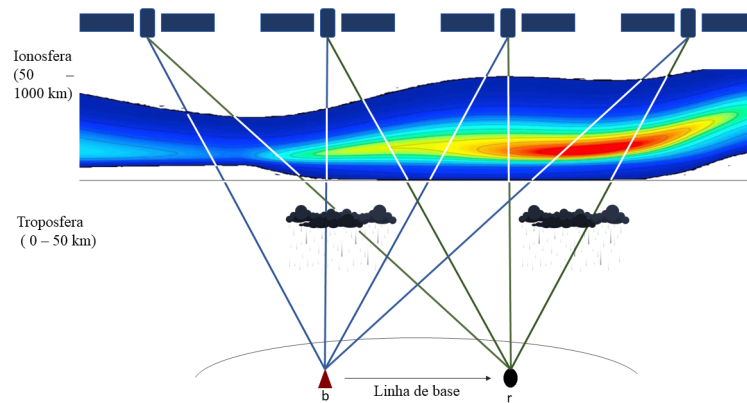
O sistema de posicionamento por satélites permite o cálculo da posição dos usuários medindo as distâncias entre os satélites e o receptor. Com as coordenadas conhecidas dos satélites, as coordenadas do receptor podem ser expressas em função das distâncias medidas. No entanto, as observações brutas do GNSS são afetadas por várias fontes de erros, como os atrasos de hardware, o meio de propagação do sinal e ambiente de observação. Essas fontes de erro precisam ser tratadas adequadamente antes de calcular a posição do usuário. Nesta seção, as fontes de erro nas observações GNSS são analisadas.

Nas equações das observáveis GNSS (2.1) e (2.2), alguns erros não foram incluídos, como, o multicaminho, o efeito de rotação da terra, o efeito da maré da terra e do oceano. As fontes de erro podem ser agrupadas em três tipos: erro devido ao satélite, erro devido ao receptor e erro devido à propagação do sinal (MONICO, 2008; HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

Os erros devidos ao satélite incluem o erro orbital, o erro no relógio do satélite, atraso instrumental do satélite, fase gerada no satélite. O erro devido ao receptor inclui o erro do relógio do receptor, atraso instrumental do receptor e a fase gerada no receptor. Já os erros devidos à propagação do sinal são: o atraso troposférico e ionosférico e o multicaminho. A maioria dos erros devido aos satélites podem ser mitigados empregando melhores equipamentos ou técnicas de observação, como erro de órbita e erro de relógio por satélite. Muitos erros especificados pelo receptor, como atraso instrumental do receptor, podem ser atenuados pela calibração. Portanto, o grande desafio do tratamento de erros é como lidar com os erros devidos à propagação do sinal.

Nesta seção serão detalhados apenas os erros sistemáticos de grande magnitude no posicionamento. São eles: a refração atmosférica (ionosférica e troposférica), o multicaminho, as perdas de ciclos e o centro de fase da antena. Na Figura 2, uma representação de alguns erros que afetam o posicionamento relativo é apresentada.

Figura 2 – Erros envolvidos na propagação do sinal para o posicionamento relativo.



Fonte: Elaborada pela autora.

2.2.1 Troposfera

A troposfera (T_r^s) é a camada neutra da atmosfera entre a superfície da Terra e uma altitude de aproximadamente 50 km, que não é dispersiva nas frequências GNSS. O atraso causado pela troposfera depende do caminho de propagação e pode atingir até 2,5 metros de magnitude no zênite, podendo ser 10 vezes maior para satélites próximos ao horizonte. Usualmente, este atraso é decomposto em duas componentes, a componente úmida, composta por vapor de água e a componente hidrostática, formada pelos gases secos (LEICK; RAPOPORT; TATARNIKOV, 2004; MONICO, 2008; SAPUCCI, 2001).

O atraso troposférico é dado por (LEICK; RAPOPORT; TATARNIKOV, 2004):

$$T_r^s = T_{z,h} m_h(E) + T_{z,w} m_w(E), \quad (2.4)$$

em que:

$T_{z,h}$ atraso zenital hidrostático;

$T_{z,w}$ atraso zenital úmido;

m_h, m_w funções de mapeamento para as componentes seca e úmida;

E ângulo de elevação do satélite em relação ao receptor r .

O atraso causado pela componente hidrostática representa 90% do atraso total com baixa variação temporal e varia de acordo com a temperatura, a altitude e a pressão atmosférica. Já na componente úmida, o atraso é menor e representa aproximadamente 10% do atraso total, porém, sua variação é muito maior, atingindo cerca de 20% em poucas horas (SEEBER, 2003), devido à variação do vapor d'água ao longo de poucas horas do dia.

A componente hidrostática pode ser modelada e corrigida com o uso de modelos empíricos, como os modelos Hopfield e Saastamoinen (HOPFIELD, 1969; SAASTAMOINEN, 1972). Um método comumente utilizado para corrigir a maior parte do atraso úmido é estimar os resíduos da troposfera na direção zenital. O benefício de expressar o atraso causado pela troposfera na Equação (2.4) é que apenas um parâmetro é introduzido no sistema, mas a precisão do atraso zenital úmido estimado dependerá da função de mapeamento.

Extensos estudos vêm sendo realizados sobre a função de mapeamento da troposfera, como a função de mapeamento de Neill (NMF – *Niell Mapping Function*), a função de mapeamento de Viena (VMF), a função de mapeamento global (GMF – *Global Mapping Function*) e mais recentemente, a função de mapeamento brasileira (BMF – *Brazilian Mapping Function*) (NIELL, 1996; BOEHM; SCHUH, 2004; BOEHM; WERL; SCHUH, 2006; GOUVEIA, 2019).

2.2.2 Ionosfera

A Ionosfera (I_r^s) corresponde à camada mais alta da atmosfera, compreendida entre aproximadamente 50 e 1000 km de altura da superfície terrestre. A Ionosfera é um meio dispersivo, o que significa que o efeito ionosférico depende da frequência f do sinal. Isto causa um atraso nas observações de pseudodistância e um avanço nas observações de fase da onda portadora, por conta disso os sinais são opostos nas equações (2.1) e (2.2).

O efeito causado pela refração é proporcional ao conteúdo total de elétrons, ou seja, está sujeito ao número de elétrons presentes na trajetória do sinal entre as antenas do satélite e do receptor. O efeito causado pode variar de um a cem metros (SEEBER, 2003).

O grande problema é a variabilidade do TEC no tempo e espaço, em função da variação de diversos fatores, dentre eles, pode-se citar: a radiação solar, variação temporal, da localização, do campo geomagnético, além desses fatores, ocorrem outras anomalias e irregularidades, como a cintilação ionosférica (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; KLOBUCHAR et al., 1996; MCNAMARA, 1991; SEEGER, 2003; ZOLESI; CANDLER, 2016).

O efeito ionosférico pode ser decomposto em efeitos de primeira ordem, que pode atingir valores de dezenas de metros em más condições e efeitos de ordem superior, que para posicionamento relativo são da ordem milimétrica para linhas de bases menores de 400 km (ODIJK, 2002).

O efeito ionosférico nas equações (2.1) e (2.2) pode ser descrito como:

$$I_{r,j}^s(t) = \mu_j I_r^s(t), \quad (2.5)$$

em que:

$\mu_j = f_1^2 / f_j^2$ com f_1 correspondente a primeira frequência;

I_r^s atraso ionosférico na primeira frequência.

O impacto da primeira ordem da Ionosfera pode chegar a 150 unidades de TEC (TECU) em um ano solar ativo, o que equivale a cerca de 25 m na primeira frequência (LANGLEY, 2000). As ambiguidades da fase da onda portadora não podem ser estimadas corretamente como inteiros com as observações perturbadas por vários metros. O atraso ionosférico pode ser corrigido com o uso de modelos empíricos, como o modelo de Klobuchar e o modelo NeQuick (KLOBUCHAR, 1987; RADICELLA, 2009) e também com o uso de mapas globais/ou regionais ionosféricos que são disponibilizados por serviços internacionais GNSS, como o IGS (*International GNSS Service*).

Devido à alta variabilidade da Ionosfera, esses modelos não são precisos o suficiente para possibilitar a solução das ambiguidades (KLOBUCHAR, 1987; ODIJK, 2002). Assim, para casos onde observações multifrequências são utilizadas pode-se eliminar os atrasos ionosféricos a partir do uso das combinações lineares livres de Ionosfera (IF – *ion-free*), Seção 2.3.1.3.

2.2.3 Multicaminho

Em condições normais, os sinais de satélite viajam diretamente do satélite para a antena do receptor ao longo do caminho. Se houver um objeto refletivo próximo à antena do receptor, o sinal que chega à antena é um sinal sobreposto do sinal direto e do sinal

refletido. O efeito do sinal refletido no valor observado produz uma quantidade adicional de atraso. Este fenômeno é denominado como efeito de multicaminho.

Quando o efeito de multicaminho for significativo, o sinal do satélite poderá ser perdido, sendo uma importante fonte de erro nas medidas. A influência deste efeito na pseudodistância pode atingir o nível métrico, enquanto a influência na fase da onda portadora, pode atingir o nível do centímetro e o valor máximo pode atingir até um quarto do comprimento de onda (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Atualmente, as principais medidas para reduzir a influência dos efeitos de multicaminho são as seguintes:

1. Ao instalar a antena do receptor, evitar superfícies de forte reflexão que possam causar efeitos de multicaminho, como a superfície da água, solo plano, árvores ao redor e superfície de construção plana;
2. Escolher as antenas *choke-ring*;
3. Extrair os efeitos de multicaminho dos dados de observação por pós-processamento (SOUZA, 2008; SOUZA, 2004).

No entanto, no posicionamento cinemático, o ambiente ao redor do receptor é variável e, portanto, os efeitos de multicaminho são inevitáveis.

2.2.4 Perdas de ciclos

Uma perda de ciclo é uma descontinuidade de um número inteiro de ciclos na fase da onda portadora, causada por uma perda temporária de rastreamento do sinal pelo receptor. Esta descontinuidade pode ser ocasionada por diversos fatores, como: obstruções causadas por árvores, prédios, montanhas, multicaminho, cintilação ionosférica, baixo ângulo de elevação do satélite, dentre outros. A sua amplitude pode variar de um a milhões de ciclos (SEEBER, 2003).

Quando uma perda de ciclo ocorre ela ocasiona uma mudança no número inteiro de ambiguidades, sendo necessário solucioná-las novamente. Por isso, as perdas de ciclos devem ser detectadas e corrigidas, para que seja possível obter alta acurácia no posicionamento.

A detecção e correção das perdas de ciclos é uma parte importante no processamento de dados GNSS. Desta forma, muitos algoritmos foram desenvolvidos para detectar e corrigir perdas de ciclo em dados de dupla frequência GPS. Métodos para detectar e reparar perdas de ciclos usando observações diferenciadas podem ser encontrados em Bisnath (2000), Kim e Langley (2001), Lee, Wang e Rizos (2003), MONICO, Souza e Machado

(2009). Algumas técnicas para detectar e corrigir observações sem diferenciação foram desenvolvidas, dentre elas, destacam-se Blewitt (1990), Lacy et al. (2008), Banville e Langley (2010) e Liu (2011).

Com o uso de múltiplos sistemas GNSS, novas frequências foram adicionadas e mais perdas de ciclo estão susceptíveis de ocorrer. Por isso, técnicas de correção de perdas de ciclo vêm sendo otimizadas para resolver esta situação (ODIJK, 2015). Na Seção 2.3.1.2 é apresentada a combinação linear Melbourne-Wubbena que é muito utilizada na detecção de perdas de ciclos de dados sem diferenciação, enquanto a Seção 2.3.2 apresenta as combinações que são utilizadas na detecção e correção de perdas de ciclos para dados diferenciados.

2.2.5 Centro de fase da antena

As medidas de distância entre o satélite e o receptor estão relacionadas ao centro de fase da antena. A posição do centro de fase da antena não é necessariamente o centro geométrico da antena e é definido como a fonte aparente de radiação. Além disso, o centro de fase de uma antena não é apenas dependente do ângulo de elevação e azimute do satélite, mas também depende da intensidade (frequência) do sinal observado (MADER, 1999; EL-RABBANY, 2002).

Os centros de fase do satélite e da antena do receptor são importantes, pois servem como pontos finais da distância medida entre o satélite GNSS e o receptor. Sua posição exata é modelada por um conjunto de valores de deslocamento do centro de fase (*Phase Center Offset* – PCO) e sua variação (*Phase Center Variation* – PCV). O PCO descreve o vetor do ponto de referência da antena do receptor (*Antenna Reference Point* – ARP) ou o centro de massa do satélite para o centro de fase médio, enquanto os valores de PCV fornecem as correções adicionais que são dependentes do ângulo de elevação e/ou do azimute para obter a posição real do centro da fase (MADER, 1999; EL-RABBANY, 2002; HUINCA; KRUEGER, 2011; HAUSCHILD, 2017a).

No caso do satélite, quando as efemérides transmitidas são utilizadas, não é necessário utilizar a correção do centro de fase da antena, pois as efemérides estão referenciadas a ele. No entanto, se efemérides precisas são utilizadas é necessário considerar o centro de fase, pois as efemérides precisas estão referenciadas ao centro de massa do satélite.

A partir da calibração, este efeito pode ser removido na modelagem das observações. Utilizando antenas receptoras de modelo e orientação idênticas, os efeitos relativos ao centro de fase da antena e suas variações são cancelados. Com antenas diferentes, esse efeito não é mais cancelado no processo de diferenciação e pode afetar a solução das

ambiguidades (WIROLA; KONTOLA; SYRJARINNE, 2008; XIN et al., 2020). Desde 2006, o IGS (*International GNSS Service*) compila e disponibiliza o valor médio, no formato ANTEX (*Antenna Exchange Format*), para o PCO e PCV para diferentes modelos de antenas de receptores e satélites (SCHMID, 2010).

2.2.6 Mitigação de erros

Geralmente, existem quatro abordagens para lidar com essas fontes de erros: a modelagem, a eliminação, a estimação e negligenciá-los. A primeira abordagem, a modelagem descreve o erro a partir de um modelo matemático adequado, que pode ser obtido a partir da estimativa de uma rede externa, como por exemplo, produtos de órbitas e relógios e mapas globais ionosféricos; modelos empíricos, como os modelos ionosféricos Klobuchar e NeQuick e os modelos troposféricos Hopfield e Saastamoinen; calibração externa, como os DCBs (*Differential Code Bias*) e centro de fase da antena (HOPFIELD, 1969; KLOBUCHAR, 1987; SAASTAMOINEN, 1972; RADICELLA, 2009).

O método de modelagem é adequado para erros relacionados ao satélite, uma vez que os erros são iguais para todos os usuários. Alguns modelos empíricos são utilizados na correção dos erros atmosféricos, mas estes corrigem apenas uma parte devido à complexidade da variação atmosférica. Os erros relacionados ao receptor são de difícil modelagem, pois dependem do modelo e fabricante do receptor (LANGLEY; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

A segunda abordagem é a eliminação, onde se cancela ou mitiga os erros a partir de combinações lineares ou diferenciações. Esta abordagem utiliza a correlação ou função entre os erros para cancelá-los ou atenuá-los. A eliminação pode remover os erros independentemente de suas características de magnitude ou variação, por isso é simples e eficiente. Existem duas limitações nesta abordagem: a perda de informações e a degradação da precisão das observações. A primeira limitação é a perda de informações que inevitavelmente acontece quando uma combinação linear é formada ou quando as observações são diferenciadas. A terceira e última limitação desta abordagem é que as combinações lineares ou as diferenciações das observações podem se tornar mais ruidosas do que a observação original (MONICO, 2008; HAUSCHILD, 2017b).

A terceira abordagem é a estimação, em que os erros são inseridos como parâmetros desconhecidos no procedimento de estimação. Esta abordagem não apenas pode remover o erro na observação, como também pode ser usada com quaisquer erros estimados, além de ser mais flexível que a abordagem do método de eliminação. No entanto, apenas um número limitado de erros podem ser estimados, pois o excesso de parametrização pode causar baixa precisão nas estimativas ou problema de deficiência de *rank*. Normalmente, apenas um número de erros que não podem ser tratados por outros

métodos são incorporados no modelo funcional.

Para estimar os parâmetros adequadamente é necessário um modelo matemático adequado, que inclui o modelo funcional e o modelo estocástico. O modelo funcional descreve a relação entre as observações e os parâmetros e é conhecido como um modelo determinístico. Já o modelo estocástico descreve características estatísticas entre as observações e os parâmetros. No modelo estocástico é possível considerar informações prévias para melhorar a precisão dos parâmetros estimados e também pode ser incorporado no modelo funcional adicionando pseudo-observações (SCHAFFRIN; BOCK, 1988; ODIJK; TEUNISSEN, 2010).

Para posicionamento GNSS rápido e preciso, o grande desafio é obter o número inteiro de ciclos da fase portadora corretamente. Conforme mostrado na Equação 2.2, as observáveis GNSS estão contaminados com vieses e a natureza inteira das ambiguidades não pode ser obtida diretamente. Portanto, é necessário um modelo funcional adequado para lidar com esses vieses e recuperar a natureza inteira das ambiguidades.

Existem três modelos para recuperar a natureza inteira das ambiguidades: o modelo com duplas diferenças, o modelo de simples diferença e o modelo sem diferenciação. O primeiro modelo requer no mínimo dois receptores e é utilizado no posicionamento relativo, enquanto os outros dois modelos necessitam de apenas um receptor e são utilizados no PPP-RTK (LOYER et al., 2012).

2.3 Combinações das observáveis GNSS

Nesta seção são apresentados os conceitos das combinações das equações de observações, que são empregadas para posicionamento multifrequência ou para estudos de multicaminho ou ionosfera.

2.3.1 Combinações de observações envolvendo um único satélite e um único receptor

Formar combinações de múltiplas observações pode ser útil para vários aspectos no processamento ou análise de dados GNSS. Em particular, a combinação de observações pode ser utilizada para eliminar parâmetros, como o atraso ionosférico.

Além disso, tais combinações são uma medida útil para isolar e enfatizar determinados erros ou características a serem estudadas, como erros de multicaminho ou parâmetros de ambiguidade. Nesta seção, são apresentadas as combinações de observações que utilizam medidas de um receptor e um satélite, considerando uma ou mais frequências. As combinações foram divididas de acordo com a sua aplicação:

- Solução das ambiguidades da fase da onda portadora;

- Isolamento ou eliminação de erros ionosféricos.

Várias combinações podem ser encontradas para cada uma dessas categorias com apenas dados de dupla frequência. Agora com a modernização dos GNSS, mais opções estão disponíveis com novas frequências. Assim, nesta seção serão apresentadas apenas as combinações mais utilizadas.

2.3.1.1 Combinações *Wide-lane* e *Narrow-lane*

Ao se combinar duas ou mais observações de fase da onda portadora em um novo sinal, obtêm-se frequência e comprimento de onda diferentes para esta combinação. E a partir do comprimento de onda pode-se dividir as combinações de fase da onda portadora em três grupos:

1. As combinações de *wide-lane* (faixa larga), onde o comprimento de onda da combinação é maior do que os comprimentos de onda envolvidos na combinação;
2. As combinações intermediárias (faixa intermediária), na qual o comprimento de onda da combinação fica entre o maior e menor comprimento de onda envolvido na combinação;
3. As combinações *narrow-lane* (faixa estreita), que têm um comprimento de onda menor do que os comprimentos de onda envolvidos na combinação.

O grupo de combinações *wide-lane* é muito utilizado na solução das ambiguidades inteiras devido ao seu longo comprimento de onda. Com observações de múltiplas frequências disponíveis, diversas combinações podem ser formadas para cada uma das categorias. Mesmo com apenas medidas de dupla frequência, existe uma série de possibilidades para formar combinações *wide-lane* que possuem características diferentes no que concerne ao ruído e atraso ionosférico.

A combinação *wide-lane* (WL) mais comum será apresentada, utilizando a fase da onda portadora nas frequências f_A e f_B de forma que preserve a geometria. A combinação *wide-lane* da fase da onda portadora em ciclos:

$$\varphi_{r,WL}^s = \varphi_{r,A}^s - \varphi_{r,B}^s = \frac{\Phi_{r,A}^s}{\lambda_A} - \frac{\Phi_{r,B}^s}{\lambda_B}, \quad (2.6)$$

em que $\varphi_{r,j}^s$ é a fase da onda portadora em ciclos para um satélite s observado, num instante de tempo t , para a j -ésima frequência. O comprimento de onda da combinação *wide-lane* λ_{WL} é:

$$\lambda_{WL} = \frac{c}{f_A - f_B}. \quad (2.7)$$

Com a multiplicação da equação (2.6) pela equação (2.7) se pode obter a combinação *wide-lane* da fase da onda portadora em metros:

$$\Phi_{WL}^s = \frac{f_A}{f_A - f_B} \Phi_{r,A}^s - \frac{f_B}{f_A - f_B} \Phi_{r,B}^s. \quad (2.8)$$

A combinação *narrow-lane* da fase da onda portadora que preserva a geometria e seu comprimento de onda, são:

$$\varphi_{r,NL}^s = \varphi_{r,A}^s + \varphi_{r,B}^s = \frac{\Phi_{r,A}^s}{\lambda_A} + \frac{\Phi_{r,B}^s}{\lambda_B}, \quad (2.9)$$

$$\lambda_{NL} = \frac{c}{f_A + f_B}, \quad (2.10)$$

em que λ_{NL} é o comprimento da onda da combinação *narrow-lane* para a fase da onda portadora. Analogamente à combinação *wide-lane* é possível obter a equação para a combinação *narrow-lane* em metros:

$$\Phi_{r,NL}^s = \frac{f_A}{f_A + f_B} \Phi_{r,A}^s + \frac{f_B}{f_A + f_B} \Phi_{r,B}^s. \quad (2.11)$$

As combinações *narrow-lane* e *wide-lane* também podem ser formadas a partir de observações de pseudodistância no lugar da fase da onda portadora, basta realizar as substituições nas equações (2.6) e (2.9). Essas combinações recebem este nome devido aos seus comprimentos de onda. Por exemplo, se for considerado os sinais do GPS nas frequências L1 e L2, o comprimento de onda *narrow-lane* tem $\approx 10,7$ cm. Já a combinação *wide-lane* tem um comprimento de onda ≈ 86 cm para as mesmas frequências.

No caso do GPS modernizado com sinais de três frequências disponíveis, as observações da fase da onda portadora de L1 e L5 podem ser usados para formar uma combinação com um comprimento de onda ≈ 75 cm, que é conhecido como uma combinação intermediária, muitas vezes denominada de *medium lane*. Ao usar os sinais nas duas frequências mais próximas L2 e L5 na equação (2.6) produz um comprimento de onda de $\approx 5,86$ m, conhecido como combinação linear *Extra Wide-Lane* (EWL) (FENG; RIZOS, 2005; COCARD et al., 2008).

Combinações semelhantes também podem ser formadas para os outros sistemas GNSS, assim como também é possível formar equações utilizando as três frequências conjuntamente (RICHERT; EL-SHEIMY, 2007; FENG, 2008; LI et al., 2017). Assumindo que os desvios padrão para os sinais da fase da onda portadora envolvidos nas combinações são iguais, pode-se obter o desvio padrão para as combinações *wide-lane* e *narrow-lane* em unidades de metros:

$$\sigma_{WL} = \sqrt{\frac{f_A^2 + f_B^2}{(f_A - f_B)^2}} \sigma^2, \quad (2.12)$$

$$\sigma_{NL} = \sqrt{\frac{f_A^2 + f_B^2}{(f_A + f_B)^2}} \sigma^2. \quad (2.13)$$

Avaliando estas expressões para as frequências L1 e L2 GPS, verifica-se que o ruído da combinação *narrow-lane* é reduzido por um fator de $\approx 0,71$ comparado a uma medida de fase de portadora individual, isso não se aplica apenas para GPS L1 e L2, mas é praticamente o mesmo para todas as combinações de sinais GNSS atuais. Formar uma combinação *wide-lane* com as frequências GPS L1 e L2, por outro lado, leva a um aumento no ruído, que é ≈ 6 vezes maior do que o ruído das observações individuais, esse valor pode ser ainda maior combinando outros sinais, por exemplo, GPS L2 e L5, que forma a combinação EWL, o aumento é de ≈ 33 vezes.

2.3.1.2 Combinação Melbourne-Wubben

A combinação Melbourne-Wubben (MW) tem as características de ser livre de geometria e eliminar o atraso ionosférico de primeira ordem, que desempenha um papel importante no posicionamento por GNSS (MELBOURNE, 1985; WUBBENA, 1985). No algoritmo TurboEdit, a combinação MW é utilizada para detecção de perdas de ciclos (BLEWITT, 1990). Com relação ao posicionamento relativo de linha de base longa ou no PPP com solução das ambiguidades esta combinação também é utilizada na solução das ambiguidades WL (BLEWITT, 1989; BLEWITT, 1990; GE et al., 2008).

A combinação MW é formada a partir da diferença de observações de pseudo-distância *narrow-lane* e observações de fase de portadora *wide-lane* e é dada por:

$$C_{MW} = \Phi_{r,WL}^s - P_{r,NL}^s = \frac{f_A}{f_A - f_B} \Phi_{r,A}^s - \frac{f_B}{f_A - f_B} \Phi_{r,B}^s - \frac{f_A}{f_A + f_B} P_{r,A}^s - \frac{f_B}{f_A + f_B} P_{r,B}^s. \quad (2.14)$$

A combinação MW tem um comprimento de onda longo, e fornece uma estimativa ruidosa da ambiguidade *wide-lane*, pois ela é afetada pelo ruído das combinações de fase da onda portadora e pseudodistância, sendo que a última é a fonte dominante de ruído, embora sua contribuição seja reduzida através da combinação *narrow-lane*.

2.3.1.3 Combinação livre de ionosfera

Uma das combinações mais importantes para o posicionamento preciso é a combinação *ion-free* ou livre de ionosfera. Esta combinação remove os efeitos ionosféricos de primeira ordem, até 99,9%, que é dependente da frequência. Os efeitos de segunda e terceira ordem, tem magnitude de poucos centímetros ou até menos (MARQUES; MONICO; AQUINO, 2011).

Se apenas observações de simples frequência estão disponíveis, a combinação GRAPHIC (*GRoup And PHase Ionospheric Calibration*) pode ser formada. Uma vez

que utiliza apenas observações de pseudodistância e fase da onda portadora de simples frequência, tal combinação se torna apropriada para o uso com receptores de simples frequência. A combinação GRAPHIC explora o sinal oposto do erro ionosférico na pseudodistância e na fase da onda portadora é dada por (HAUSCHILD, 2017b):

$$C_{GPH} = \frac{1}{2} \left(P_{r,j}^s + \Phi_{r,j}^s \right) = \frac{1}{2} \left[\rho_r^s(t) + c \left(dt_r(t) - dt^s(t) + \delta t^{rel}(t) \right) + T_r^s(t) \right] + \frac{1}{2} \left(\xi_{r,j}^s(t) + \zeta_{r,j}^s(t) \right) + \frac{1}{2} \left(d_{r,j}^s(t) + \delta_{r,j}^s(t) \right) + \frac{1}{2} \lambda_j \left(N_{r,j}^s + \omega_r^s(t) \right) + \frac{1}{2} \left(e_{p_{r,j}}^s + \epsilon_{\Phi_{r,j}}^s \right). \quad (2.15)$$

Na combinação GRAPHIC todos os erros da pseudodistância são reduzidos por um fator de 0,5. No entanto, tal combinação também é afetada por todos os parâmetros da fase da onda portadora ponderados com um fator de 0,5. Isso faz com que um novo parâmetro deva ser estimado, a ambiguidade da fase de portadora, em aplicações de posicionamento.

Com observações em duas ou mais frequências diferentes, mais combinações livres de ionosfera podem ser formadas. Tais combinações exploram o fato de que a ionosfera é um meio dispersivo e combinações de observações em diferentes frequências são afetadas diferentemente pelo atraso correspondente. Com pelo menos duas observações de diferentes frequências, é possível determinar o atraso e eliminá-lo das equações de observação, pelo menos até a primeira ordem. Deve ser enfatizado que apenas a combinação de fase da onda portadora será apresentada.

Utilizando duas frequências, a combinação linear livre de ionosfera da fase da onda portadora é dada por (SEEBER, 2003; HAUSCHILD, 2017b):

$$\Phi_{r,IF}^s = \frac{f_A^2}{f_A^2 - f_B^2} \Phi_{r,A}^s - \frac{f_B^2}{f_A^2 - f_B^2} \Phi_{r,B}^s. \quad (2.16)$$

A vantagem de eliminar o erro da primeira ordem do atraso ionosférico tem um custo, o desvio padrão da combinação aumenta quando comparada às observações de fase originais. Assumindo que as observações de fase originais não estão correlacionadas e têm a mesma precisão (σ), o desvio padrão da combinação livre de ionosfera é calculado da seguinte forma (HAUSCHILD, 2017b):

$$\sigma_{IF} = \sqrt{\frac{f_A^2 + f_B^2}{f_A^2 - f_B^2}} \sigma. \quad (2.17)$$

Com medições de dupla frequência, apenas uma combinação livre de ionosfera pode ser formada. Com sinais em mais de duas frequências disponíveis, várias possibilidades de eliminar a ionosfera e preservar a natureza inteira da ambiguidade combinada são possíveis. Quando as observáveis de fase em três frequências estão disponíveis, não há

apenas uma única combinação livre de ionosfera. Para a eliminação do atraso ionosférico duas frequências são suficientes, é possível traçar três combinações diferentes de ionosfera de dupla frequência para este fim, em vez de apenas uma no caso de dupla frequência. Por outro lado, também é possível formar apenas uma combinação livre de ionosfera para dados de tripla frequência (ODIJK; TEUNISSEN; TIBERIUS, 2002).

2.3.2 Combinações lineares entre diferentes satélites e estações

Nas seções anteriores, combinações entre observações foram formadas a partir de medidas de um único satélite rastreado por um único receptor. Entretanto, as combinações também podem ser formadas entre dois satélites ou entre dois receptores. Esta última é muito utilizada no posicionamento relativo pois permite a eliminação de parâmetros das observáveis. Diferenças entre observações de dois satélites em um receptor ou de dois receptores para o mesmo satélite é conhecido como simples diferença (SD). A diferença entre duas simples diferenças forma uma dupla diferença (DD). A diferença de duas épocas entre duas duplas diferenças é conhecida como tripla diferença. O indicador de tempo é descartado para obter uma notação mais concisa. Enquanto que a diferença entre duas triplas diferenças é conhecido como tetra diferença.

A utilização de observações combinadas, no que se refere à diferença de observáveis, apresenta como vantagem a eliminação ou redução dos erros que estão presentes nas observações originais (SEEBER, 2003; KAPLAN; HEGARTY, 2006).

2.3.2.1 Simples diferença

Simples diferenças podem ser formadas entre dois receptores, dois satélites ou duas épocas. Em posicionamento GNSS, usualmente são formadas simples diferenças entre dois receptores (SEEBER, 2003), ou seja, medidas de pseudodistância e fase de uma estação (r) são subtraídas das medidas de pseudodistância e fase medidas de um mesmo satélite (s) em uma segunda (q) estação.

A equação de simples diferença para a pseudodistância é dada por:

$$\Delta P_{rq}^s = P_r^s - P_q^s = \Delta \rho_{rq}^s + c(\Delta dt_{rq} - \Delta \delta_{stc,rq}^{rel,s}) + \Delta cd_{rq}^s + \Delta \xi_{rq}^s + \Delta I_{rq}^s + \Delta T_{rq}^s + e_{P_{SD}}, \quad (2.18)$$

em que:

$$\Delta \rho_{rq}^s = \rho_r^s - \rho_q^s;$$

$$\Delta dt_{rq} = dt_r - dt_q;$$

$$\Delta \delta_{stc,rq}^{rel,s} = \delta_{stc,r}^{rel,s} - \delta_{stc,q}^{rel,s};$$

$$\Delta d_{rq}^s = cd_r^s - cd_q^s;$$

$$\Delta \xi_{rq}^s = \xi_r^s - \xi_q^s;$$

$$\Delta I_{rq}^s = I_r^s - I_q^s;$$

$$\Delta T_{rq}^s = T_r^s - T_q^s;$$

$e_{P_{SD}}$ outros erros na SD da pseudodistância.

No processo de simples diferença, o erro referente ao erro do relógio do satélite foi eliminado e não está presente na equação (2.18), o mesmo ocorre com o termo relativístico referente ao erro do relógio do satélite. Já os termos relativos à correção relativística da curvatura ($\Delta \delta_{stc,rq}^{rel,s}$), atraso troposférico (ΔT_{rq}^s), atraso ionosférico (ΔI_{rq}^s) e variações no centro de fase ($\Delta \xi_{rq}^s$) ainda estão presentes nas equações, pois estão correlacionados com a distância entre as duas antenas. Para linhas de base curtas esses erros são reduzidos ou até mesmo eliminados.

O termo referente aos atrasos instrumentais (Δd_{rq}^s) também permanece na equação, uma vez que apenas para receptores iguais os atrasos instrumentais, dos satélites e receptores, podem ser separados em termos individuais. Nesse caso, o componente devido ao satélite seria eliminado. Além disso, os termos referentes ao erro do relógio do receptor e ruído permanecem na equação.

De forma similar, pode-se obter a equação de simples diferença para a fase da onda portadora:

$$\Delta \Phi_{rq,j}^s = \Delta \rho_{rq}^s - \Delta I_{rq,j}^s + \Delta T_{rq}^s + \Delta \zeta_{rq,j}^s + c \Delta \delta_{rq,j} + c \left(\Delta d_{rq} + \Delta \delta_{stc,rq}^{rel} \right) + \lambda_j \left(\Delta N_{rq,j}^s + \Delta \omega_{rq}^s \right) + e_{\Phi_{SD}},$$

em que:

$$\Delta \delta_{rq}^s = \delta_r^s - \delta_q^s;$$

$$\Delta \zeta_{rq,j}^s = \zeta_{r,j}^s - \zeta_{q,j}^s;$$

$$\Delta N_{rq}^s = N_r^s - N_q^s;$$

$$\Delta \omega_{rq}^s = \omega_r^s - \omega_q^s;$$

$e_{\Phi_{SD}}$ outros erros na SD da fase da onda portadora.

Discussões similares às efetuadas para a equação de pseudodistância podem ser realizadas para os termos da fase. Em relação aos termos adicionais, o termo da fase *wind-up* depende da orientação das antenas do satélite e receptor. Supondo que a orientação das antenas dos receptores não muda em relação um ao outro, o valor residual da fase *wind-up* em linhas de base curtas até a ordem de 100 km, será da ordem de alguns

milímetros e pode assim ser negligenciado. Os efeitos residuais aumentam com o aumento do comprimento da linha de base e teoricamente podem atingir a metade do comprimento de onda das antenas do receptor em lados opostos na Terra.

Devido à presença da diferença de fase no oscilador do receptor, as simples diferenças entre receptores não são de interesse primário (GOAD, 1996). Neste sentido, outra operação de diferenciação deve ser utilizada para a remoção dos termos indesejados. Para isto, é considerada a inserção de um segundo satélite, gerando assim uma simples diferença adicional.

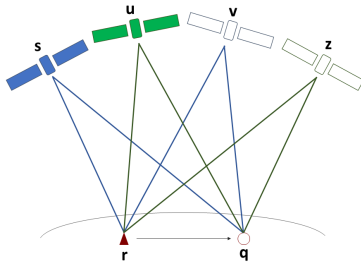
O desvio padrão das SD é dado por:

$$\sigma_{rq}^s = \sqrt{2}\sigma. \quad (2.19)$$

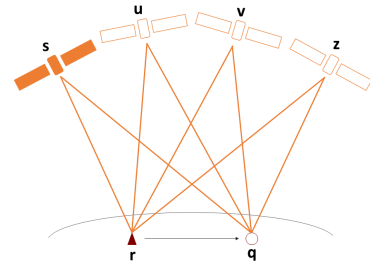
2.3.2.2 Dupla diferença

Dupla diferença é a diferença entre duas simples diferenças, envolvendo assim dois satélites e dois receptores (SEEBER, 2003; GOAD, 1996). Na Figura 3 é possível observar uma ilustração de como são formadas as DD no posicionamento multi-GNSS.

Figura 3 – Duplas diferenças multi-GNSS. Satélites s e v pertencem a primeira constelação X e os satélites u e z a segunda constelação Y. A estação base é denotada por r e a estação a ser determinada é denotada como q .



(a) Representação da DD clássica. Um satélite base por constelação, ou seja, os satélites s e u para as constelações X e Y, respectivamente.



(b) Representação da DD entre sistemas. Um satélite base s para as constelações X e Y.

Fonte: Elaborada pela autora.

A equação de DD para a pseudodistância, considerando dois receptores, r e q , e dois satélites s e v , é dada:

$$\Delta \nabla P_{rq}^{sv} = \Delta P_{rq}^s - \Delta P_{rq}^v = \Delta \nabla \rho_{rq}^{sv} + \Delta \nabla c d_{rq}^{sv} + \Delta \nabla \xi_{rq}^{sv} + \Delta \nabla I_{rq}^{sv} + \Delta \nabla T_{rq}^{sv} + e_{P_{DD}}, \quad (2.20)$$

em que:

$$\Delta \nabla \rho_{rq}^{sv} = \Delta \rho_{rq}^s - \Delta \rho_{rq}^v;$$

$$\Delta \nabla d_{rq}^{sv} = \Delta d_{rq}^s - \Delta d_{rq}^v;$$

$$\Delta \nabla \xi_{rq}^{sv} = \Delta \xi_{rq}^s - \Delta \xi_{rq}^v;$$

$$\Delta \nabla I_{rq}^{sv} = \Delta I_{rq}^s - \Delta I_{rq}^v;$$

$$\Delta \nabla T_{rq}^{sv} = \Delta T_{rq}^s - \Delta T_{rq}^v;$$

$e_{P_{DD}}$ erros na DD da pseudodistância.

Observe que o erro do relógio do receptor e as correções relativísticas foram eliminados na dupla diferença. Os termos para a Troposfera, a Ionosfera e o centro de fase da antena estão ainda presentes na equação, mas são cancelados para linhas de bases curtas.

Da mesma forma que nas SD, nas DD os atrasos instrumentais não são eliminados, a não ser que receptores iguais sejam utilizados. Se satélites de diferentes constelações são usados na dupla diferença, o ISB (*Inter System Biases*) correspondente ainda permanecerá na observável combinada, mesmo com receptores iguais. Observe que se a DD clássica, quando apenas um único sistema é utilizado, for realizada os atrasos instrumentais são eliminados.

A equação de dupla diferença para a fase da onda portadora é dada por:

$$\Delta \nabla \Phi_{rq,j}^{sv} = \Delta \nabla \rho_{rq,j}^{sv} - \Delta \nabla I_{rq,j}^{sv} + \Delta \nabla T_{rq,j}^{sv} + \Delta \nabla \zeta_{rq,j}^{sv} + c \Delta \nabla \delta_{rq,j} + \lambda_j \left(\Delta \nabla N_{rq,j}^{sv} + \Delta \nabla \omega_{rq,j}^{sv} \right) + \epsilon_{\Phi_{DD}}, \quad (2.21)$$

em que:

$$\Delta \delta_{rq}^s = \Delta \delta_{rq}^s - \Delta \delta_{rq}^v;$$

$$\Delta \nabla \zeta_{rq,j}^s = \Delta \zeta_{rq,j}^s - \Delta \zeta_{rq,j}^v;$$

$$\Delta \nabla N_{rq}^s = \Delta N_{rq}^s - \Delta N_{rq}^v;$$

$$\Delta \nabla \omega_{rq}^s = \Delta \omega_{rq}^s - \Delta \omega_{rq}^v;$$

$e_{\Phi_{DD}}$ outros erros na DD da fase da onda portadora.

Considerações similares às realizadas para as DD da pseudodistância podem ser realizadas para as DD da fase. O erro de fase *wind-up* também não é eliminado para linhas de base longas. Assumiu-se que todas as observações de fase da onda portadora envolvidas na dupla diferença têm o mesmo comprimento de onda, isto é, mesma frequência. Assim, para o GLONASS, o erro do relógio do receptor e os efeitos relativísticos não são eliminados na DD de fase.

O desvio padrão da equação de dupla diferença é aumentado por um fator de $\sqrt{2}$, em comparação com a combinação de simples diferença, uma vez que quatro observações com erros estocásticos não correlacionados estão envolvidas. A partir da propagação de erro pode-se obter o desvio padrão da DD, dado por:

$$\sigma_{rq}^{sv} = \sqrt{2}\sigma = 2\sigma. \quad (2.22)$$

2.3.2.3 Tripla Diferença

Considerando a equação de dupla diferença de fase dada na equação (2.21), uma tripla diferença (TD) é caracterizada como a diferença de duas DD entre duas épocas adjacentes, envolvendo os mesmos satélites e receptores. As equações de observação de tripla diferença para pseudodistância e fase são idênticas, exceto pelo sinal do atraso ionosférico, entretanto não é usual o uso da observável de TD para dados de pseudodistância (SEEBER, 2003; MONICO, 2008):

$$TD_{\Phi_j}(t) = \Delta\nabla\Phi_{rq,j}^{sv}(t) - \Delta\nabla\Phi_{rq,j}^{sv}(t-1) = \partial\Delta\nabla\rho_{rq}^{sv} - \partial\Delta\nabla I_{rq,j}^{sv} + \partial\Delta\nabla T_{rq}^{sv} + \partial\Delta\nabla\zeta_{rq,j}^{sv} + \lambda_j \left(\partial\Delta\nabla\omega_{rq}^{sv} \right) + \partial\epsilon_{\Phi_{DD}}, \quad (2.23)$$

em que ∂ denota a diferença entre duas épocas. Como vantagem da TD é o cancelamento do valor inteiro da ambiguidade (N) da equação de observação (SEEBER, 2003; HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008). Se os termos referentes à Ionosfera, Troposfera, variação do centro de fase e fase *wind-up* não foram completamente eliminados nas DD, sua magnitude é reduzida na TD. Por eliminar as ambiguidades, a equação (2.23) é muito utilizada para a detecção de perdas de ciclos (MONICO, 2008). A partir da lei de propagação de erros e assumindo o mesmo desvio padrão para as duas duplas diferenças, pode-se obter a seguinte expressão para o desvio padrão da tripla diferença:

$$\sigma_{TD\Phi} = \sqrt{2}\sigma_{rq}^{sv} = \sqrt{8}\sigma. \quad (2.24)$$

2.3.2.4 Tetra Diferença

A Tetra diferença (TT) é a diferença entre duas TDs, envolvendo os mesmos satélites e receptores, mas em instantes de tempos distintos. A equação de TT para a fase da onda portadora é dada por:

$$TT_{\Phi_j}^{s,v}(t) = \partial TD_{\Phi_j}(t) = TD_{\Phi_j}(t) - TD_{\Phi_j}(t-1) = \partial\partial\Delta\nabla\rho_{rq}^{sv} - \partial\partial\Delta\nabla I_{rq,j}^{sv} + \partial\partial\Delta\nabla T_{rq}^{sv} + \partial\partial\Delta\nabla\zeta_{rq,j}^{sv} + \lambda_j \left(\partial\partial\Delta\nabla\omega_{rq}^{sv} \right) + \partial\partial\epsilon_{\Phi_{DD}}. \quad (2.25)$$

A equação (2.25) é muito utilizada na correção de perdas de ciclos (MONICO; SOUZA; MACHADO, 2009).

2.4 Modelo Funcional

O papel do modelo funcional é descrever a relação entre as observações e os parâmetros, e é considerado bom quando consegue representar os erros presentes nas observações. Os modelos funcionais usados para o posicionamento GNSS podem ser derivados para as observáveis originais, sem diferenciação, para as simples diferenças ou para duplas diferenças das observáveis.

Os métodos de posicionamento que utilizam observações de fase da onda portadora, o posicionamento relativo e PPP, têm diferentes modelos funcionais. O primeiro utiliza observações de duplas diferenças, enquanto o segundo utiliza observações de simples diferença (PPP-RTK) ou sem diferenciação. Nesta seção, apenas o modelo funcional do posicionamento relativo será discutido por ser o método utilizado nesta tese.

As equações de observação são funções não lineares em relação às coordenadas do receptor. Essas coordenadas são os principais parâmetros de interesse em aplicações de posicionamento. Uma vez que os métodos de mínimos quadrados padrão são usados para resolver os modelos de posicionamento, consulte a Seção 2.4.1, as equações de observação são linearizadas.

O sistema de equações de observação linearizadas pode ser escrito na forma:

$$y = Aa + Bb + e, \quad (2.26)$$

y vetor que contém as observações de pseudodistância e fase da onda portadora, $y \in \mathbb{R}^q$;

a vetor das ambiguidades, $a \in \mathbb{Z}^n$;

b vetor dos parâmetros reais, $b \in \mathbb{R}^p$;

A, B matrizes design que relacionam as observações e os parâmetros;

e erros.

A maneira mais direta de lidar com os erros, Seção 2.2, é o modelo de dupla diferenças. Este modelo, que pode determinar a posição relativa de forma eficiente, tem sido usado desde a década de 1980 (BOSSLER; GOAD; BENDER, 1980; BLEWITT, 1989).

2.4.1 Filtro de Kalman

O Filtro de Kalman é um modo recursivo de estimação, de forma que a estimativa atual é obtida a partir da estimativa anterior. Nele todas as medidas disponíveis são

combinadas para obter uma estimativa que minimize o erro. Depois de iniciado o filtro de Kalman segue o procedimento recursivo de duas etapas de atualizações no tempo e medidas. A estimativa recursiva é de suma importância, especialmente quando um número grande de observações é utilizado, como no caso do GNSS (VERHAGEN; TEUNISSEN, 2017).

2.4.1.1 Modelo de medidas

$$\begin{aligned} y_k &= A_k \hat{x}_k - v_k, \\ D\{y_k\} &= Q_{y_k}, \end{aligned} \quad (2.27)$$

k - época;

y_k - vetor das m observações da época k ;

$\hat{x}_k$ - vetor estado de n parâmetros da época k ;

A_k - matriz *design* da época k , de dimensão $m \times n$;

v_k - vetor dos resíduos;

Q_{y_k} - MVC das observações.

2.4.1.2 Predição

A predição descreve a evolução no tempo do vetor estado $\hat{x}_k$ e é utilizada quando se deseja obter o vetor estado, baseado em informações anteriores à época k . Com a estimativa da época anterior é possível obter a estimativa predita do vetor estado e sua MVC,

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \Phi \hat{x}_{k-1} + w_k, \\ Q_k &= \Phi Q_{k-1} \Phi^T + Q_{w_k}, \end{aligned} \quad (2.28)$$

$\hat{x}_{k-1}$ - vetor estado inicial;

Φ - matriz transição entre as épocas;

w_k - ruído do processo;

Q_{w_k} - MVC do ruído.

A partir da Equação (2.28) pode-se obter o vetor estado $\hat{x}_k$ a partir da estimativa inicial $\hat{x}_{k-1}$ e suas respectivas MVCs Q_k e Q_{k-1} . Para a matriz transição Φ atribui-se a matriz

identidade, além disso, assume-se que o ruído w_k é não correlacionado no tempo, com distribuição normal e média zero $E\{w_k\} = 0$.

Baseado nas seguintes premissas,

$$E\{w_k, w_l^T\} = \begin{cases} Q_{w_k}, k = l \\ 0, k \neq l \end{cases} \quad (2.29)$$

$$E\{v_k, v_l^T\} = \begin{cases} Q_{y_k}, k = l \\ 0, k \neq l \end{cases} \quad (2.30)$$

$$E\{w_k, v_l^T\} = 0, \forall k, l. \quad (2.31)$$

juntamente com as Equações 2.27 e 2.28 é possível desenvolver as equações de filtragem do Filtro de Kalman para sistemas lineares (VERHAGEN; TEUNISSEN, 2017).

2.4.1.3 Filtragem

A filtragem ou atualização é utilizada quando se quer obter a estimativa do vetor estado $\hat{x}_k$ com base em todas as observações coletadas até a época k . Para isso, utiliza-se o resíduo predito e sua MVC, dados por:

$$\begin{aligned} v_k &= y_k - A_k \hat{x}_{k-1}, \\ Q_{v_k} &= Q_{y_k} + A_k Q_{k-1} A_k^T. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Os resíduos preditos têm a propriedade de terem média zero e não serem correlacionados no tempo. Desta forma, a partir da Equação (2.32), obtém-se o vetor estado filtrado $\hat{x}_k$:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k v_k, \quad (2.33)$$

com K_k a matriz ganho de Kalman dada como:

$$K_k = Q_{k-1} A_k^T Q_{y_k}^{-1}. \quad (2.34)$$

A MVC de $\hat{x}_k$, pode ser atualizada como (MONICO, 2008):

$$Q_k = (Q_{k-1}^{-1} + A_k^T Q_{y_{k-1}}^{-1} A_k)^{-1}. \quad (2.35)$$

Note que nas Equações 2.34 e 2.35 a dimensão da matriz a ser invertida é igual ao número de parâmetros envolvidos. Se o número de observações é maior do que o número de parâmetros, utiliza-se o procedimento a seguir onde a dimensão da

matriz a ser invertida é igual ao número de observações. Dessa forma, tem-se no lugar da Equação (2.34) (MONICO, 2008):

$$K_k = Q_{\hat{x}_{k-1}} A_k^T Q_{v_k}^{-1}. \quad (2.36)$$

Além disso, a Equação (2.35) é substituída por (MONICO, 2008):

$$Q_k = (I - K_k A_k) Q_{k-1}. \quad (2.37)$$

Para linhas de base longas os atrasos ionosféricos não são eliminados no processo de diferenciação. Para aplicar de forma flexível para toda a gama de comprimentos de linha de base, três modelos de posicionamento foram desenvolvidos em relação à presença dos atrasos diferenciais ionosféricos $\Delta\nabla I$. Para linhas de base curtas, o modelo de ionosfera fixa é adotado, em que os atrasos diferenciais ionosféricos são considerados ausentes. Isso corresponde ao pressuposto de que os atrasos ionosféricos absolutos para um determinado satélite é igual para todos os receptores, à medida que se cruzam a ionosfera na mesma parte. Para linhas de base mais longas, o tamanho dos atrasos diferenciais ionosféricos podem estar dentro de certos limites tais que o conhecimento possa ser incorporado sob a forma de restrições. O modelo é referido como o modelo de ionosfera ponderada. Enquanto que para linhas de base ainda mais longas, quando não temos nenhum conhecimento a priori sobre os atrasos diferenciais ionosféricos, estes são assumidos como parâmetros desconhecidos e o modelo é conhecido como modelo de ionosfera-*float* (TEUNISSEN, 1997).

2.4.2 Modelo de ionosfera ponderada

Normalmente são utilizados modelos que assumem que não há uma informação a priori sobre a DD do atraso ionosférico. Mas, geralmente se conhece informação sobre a magnitude esperada das DDs dos atrasos ionosféricos, dependendo do comprimento da linha de base, a localização na Terra e o ciclo solar de 11 anos. Este conhecimento a priori sobre as DDs dos atrasos ionosféricos pode ser adicionado usando o modelo ionosfera ponderada. Este modelo realiza uma introdução de pseudo-observáveis estocásticas para as DDs dos atrasos ionosféricos (ODIJK; TEUNISSEN, 2010).

O modelo de ionosfera ponderada é dado, (ODIJK; TEUNISSEN, 2010)

$$\begin{aligned} \Delta\nabla\phi_i &= \Delta\nabla\rho + \Delta\nabla T - \frac{f_1^2}{f_i^2} \Delta\nabla I + \lambda_i \Delta\nabla N_1 + \varepsilon_i \\ \Delta\nabla P_i &= \Delta\nabla\rho + \Delta\nabla T + \frac{f_1^2}{f_i^2} \Delta\nabla I + e_i \\ \Delta\nabla\iota &= \Delta\nabla I. \end{aligned} \quad (2.38)$$

A informação estocástica da ionosfera e da troposfera pode ser escolhida com base em um dos processos aleatórios *random-walk* ou *white-noise* (ODIJK, 2000; ODIJK; TEUNISSEN, 2010).

2.4.3 Modelos estocásticos

White Noise

Seja $X_n, n = 1, 2, \dots$ uma sequência de variáveis aleatórias definidas no mesmo espaço amostral Ω . Uma sequência de variáveis aleatórias é dita ser independente e identicamente distribuída (iid), se $P[X_n = a_n | X_1 = a_1, \dots, X_{n-1} = a_{n-1}]$, e se todas as variáveis aleatórias têm a mesma distribuição (MORETTIN; TOLOI, 2004; CHATFIELD, 2003).

Um processo *White Noise*, também conhecido como puramente aleatório ou ruído branco, é formado por uma sequência de variáveis aleatórias iid (CHATFIELD, 2003). Segue da definição que um processo *White Noise* é estritamente estacionário e suas variáveis aleatórias são não correlacionadas. Isto é, $\{\varepsilon_t, t \in Z\}$ é um *White Noise* se $\{\varepsilon_t, \varepsilon_s\} = 0, t \neq s$.

Random Walk

Seja $\{\varepsilon_t\}$ um ruído branco com média μ e variância σ^2 . Um processo $\{X_t\}$ é dito ser *Random Walk*, ou passeio aleatório se (CHATFIELD, 2003):

$$X_t = X_{t-1} + \varepsilon_t. \quad (2.39)$$

A partir de substituições sucessivas pode-se reescrever a Equação (2.39), como:

$$X_t = X_0 + \sum_{j=1}^t \varepsilon_j. \quad (2.40)$$

Segue que $E(X_t) = t\mu$ e $var(X_t) = t\sigma^2$. Além disso, o processo estocástico passeio aleatório não é estacionário, mas a estacionariedade pode ser obtida através de uma diferença simples.

CAPÍTULO

SOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES INTEIRAS: ESTIMATIVA E VALIDAÇÃO

O processo de solução das ambiguidades da fase da onda portadora como valores inteiros é essencial para uma estimativa rápida e precisa dos parâmetros GNSS. Se este processo é realizado com sucesso, os dados de fase da onda portadora passarão a ser como dados de pseudodistância precisos, que possibilita aplicações de posicionamento precisos (BLEWITT, 1989).

A teoria da inferência inteira na qual o processo de solução das ambiguidades é baseado, abrange a teoria da estimativa inteira e da validação. Apesar de uma grande parte desta teoria ter sido desenvolvida a partir da década de 1980 para o sistema GPS, a teoria tem uma gama maior de aplicabilidade, podendo ser utilizada para os diversos sistemas GNSS.

Este capítulo está organizado da seguinte forma. Na Seção 3.1, o modelo central para a teoria é introduzido, além disso uma visão geral das etapas de solução das ambiguidades é apresentada. Na Seção 3.2, os estimadores inteiros admissíveis: arredondamento inteiro (IR), arredondamento inteiro sequencial (IB) e método dos mínimos quadrados inteiros (ILS) são apresentados. Este último é o método ideal visto que pode alcançar a maior taxa de sucesso quando comparados aos outros métodos de solução das ambiguidades. Tal método é o mais complexo, pois requer uma busca sobre um espaço de procura das ambiguidades. Duas formas de realizar esta busca são detalhadas. Alguns exemplos que ilustram os conceitos envolvidos nesta seção também são apresentados.

Na Seção 3.3 é descrito o procedimento de decorrelação das ambiguidades

e o número de decorrelação das ambiguidades. A definição da taxa de sucesso das ambiguidades é apresentada na Seção 3.4. O conceito de solução parcial das ambiguidades é apresentado na Seção 3.5 que é uma alternativa caso a solução do vetor completo de ambiguidades não possa ser realizado com uma taxa de sucesso suficientemente alta.

Caso as ambiguidades inteiras sejam fixadas incorretamente, pode resultar em erros de grande magnitude no posicionamento. Por conta disso, é essencial que existam métodos rigorosos para aceitar ou rejeitar a estimativa inteira calculada. Tais métodos são apresentados na Seção 3.6.

3.1 Processo geral de solução das ambiguidades

O ponto de partida da teoria da inferência inteira é o modelo inteiro misto. Para introduzir este modelo, utilizam-se as equações linearizadas de DDs da pseudodistância e da fase da onda portadora. O modelo matemático pode ser expresso como um modelo linear inteiro misto, dado como (TEUNISSEN, 1995):

$$y = Aa + Bb + \epsilon, \quad (3.1)$$

em que $a \in \mathbb{Z}^n$ é o vetor das ambiguidades inteiras, $b \in \mathbb{R}^p$ é o vetor dos parâmetros remanescentes, como as coordenadas e os atrasos atmosféricos (troposfera e ionosfera), as matrizes design são $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ e $B \in \mathbb{R}^{m \times p}$ e ϵ é o vetor dos erros não modelados. O vetor de observação $y \in \mathbb{R}^m$ contém as DDs das observáveis pseudodistância e fase da onda portadora, com matriz de variância-covariância denotada por Q_y . Este sistema é conhecido como modelo linear inteiro misto, pois alguns parâmetros são inteiros, como as ambiguidades, e outros são reais.

Infelizmente, a estimativa de mínimos quadrados padrão não pode incorporar a natureza inteira de alguns parâmetros, por isso, um procedimento em etapas é empregado para resolver o modelo, Equação (3.1). Para resolver o modelo inteiro misto, cuja função objetivo é igual ao método dos mínimos quadrados padrão, (TEUNISSEN, 1993)

$$\min_{a,b} \|y - Bb - Aa\|_{Q_y}^2. \quad (3.2)$$

O problema de minimização pode ser resolvido a partir de uma decomposição ortogonal. A forma quadrática é decomposta em três termos ortogonais, dados como (TEUNISSEN, 1993; TEUNISSEN, 1995):

$$\|y - Aa - Bb\|_{Q_y}^2 = \|\hat{e}\|_{Q_{\hat{e}}}^2 + \|\hat{a} - a\|_{Q_{\hat{a}}}^2 + \|\check{b} - b\|_{Q_{\check{b}}}^2, \quad (3.3)$$

em que $\hat{a}$ é a estimativa real para o vetor das ambiguidades, $Q_{\hat{a}}$ é a MVC das ambiguidades, $\check{b}$ é o vetor dos outros parâmetros condicionados às ambiguidades e sua MVC $Q_{\check{b}}$.

Em geral, um procedimento em quatro etapas é empregado para resolver o modelo, Equação (3.1), com base no critério dos mínimos quadrados.

Etapa 1: Solução *float*

A primeira etapa consiste em descartar a restrição inteira das ambiguidades e aplicar o método dos mínimos quadrados. Isto resulta nas estimativas em valores reais para as ambiguidades, $\hat{a}$, e outros parâmetros, $\hat{b}$, além de suas correspondentes MVC (TEUNISSEN, 1995):

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Q_{\hat{a}} & Q_{\hat{a}\hat{b}} \\ Q_{\hat{b}\hat{a}} & Q_{\hat{b}} \end{bmatrix} \right), \quad (3.4)$$

em que N representa a distribuição normal.

Outras formas do método dos mínimos quadrados, como a recursiva ou o Filtro de Kalman, podem ser utilizadas para obter a solução *float*, a escolha irá depender da aplicação. Idealmente, esta etapa inclui testes para *outliers*, perdas de ciclos ou outros erros de modelagem.

Etapa 2: Solução inteira

Na segunda etapa, a estimativa para as ambiguidades inteiras é calculada a partir da solução *float* $\hat{a}$ (TEUNISSEN, 1995; TEUNISSEN, 1999):

$$\check{a} = F(\hat{a}), \quad (3.5)$$

em que $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{Z}^n$ é a função do espaço n -dimensional de números reais para o espaço n -dimensional de números inteiros.

Existem diferentes opções de estimadores possíveis, que podem definir a função F . Existem três classes diferentes de tais estimadores, são elas: a classe de estimadores inteiros (I), a classe de estimadores de abertura inteira (IA) e a classe de estimadores equi-variantes inteiros (IE) (TEUNISSEN, 1999; TEUNISSEN, 2003a; TEUNISSEN, 2003b). Estes estimadores são subconjuntos um do outro e podem ser relacionados como:

$$I \subset IA \subset IE. \quad (3.6)$$

Cada classe contém uma variedade de estimadores e como os estimadores da classe dos estimadores inteiros são mais frequentemente usados, eles serão detalhados na Seção 3.2. Os estimadores mais populares são: o arredondamento inteiro (IR - *Integer Rounding*), o *bootstrapping* inteiro (IB - *Integer Bootstrapping*) e o método dos mínimos quadrados inteiro (ILS - *Integer Least Squares*). Na Seção 3.4 são apresentadas as taxas de sucesso dos estimadores, ou seja, as probabilidades da estimativa inteira correta (TEUNISSEN, 1999).

Etapa 3: Validação

Esta terceira etapa consiste em decidir se a solução inteira deve ou não ser aceita, uma vez que a estimativa inteira $\check{a}$ das ambiguidades for computada. Muitos testes foram propostos na literatura como Euler e Schaffrin (1991), Han e Rizos (1996), Han (1997), Landau e Euler (1992), Tiberius e Jonge (1995), Verhagen e Teunissen (2006), Wang, Stewart e Tsakiri (1998). Exemplos de alguns testes utilizados na prática incluem: o Teste da Razão (*Ratio Test*), o Teste da Razão-F (*F-Ratio*), o Teste da Diferença e o Teste do Projetor.

Etapa 4: Solução fixa

Uma vez que as ambiguidades inteiras são calculadas e aceitas pela validação, o resíduo $\hat{a} - \check{a}$ é utilizado na quarta etapa para ajustar a solução float $\hat{b}$ do primeiro passo para obter a solução fixa $\check{b}$. Como resultado, a solução final fixa é obtida da seguinte forma (TEUNISSEN, 1995):

$$\check{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - \check{a}). \quad (3.7)$$

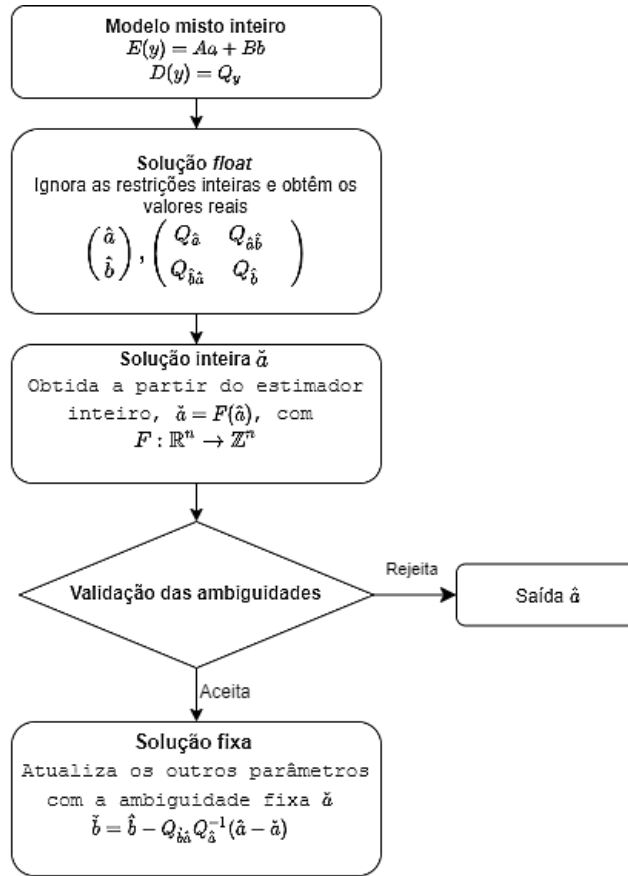
A MVC é dada por

$$Q_{\check{b}} = Q_{\hat{b}} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} Q_{\hat{a}\hat{b}}. \quad (3.8)$$

Na prática a Equação 3.8 é utilizada para descrever a precisão final dos outros parâmetros. A MVC $Q_{\check{b}}$ é derivada a partir da propagação dos erros, baseada no fato de que a solução inteira $\check{a}$ é determinística. Isso só é verdade quando a probabilidade da estimativa inteira está suficientemente perto de 1. Nesse caso, $Q_{\check{b}} \ll Q_{\hat{b}}$, se as ambiguidades tiverem sido estimadas com sucesso. Assim, as medidas de fase da onda portadora passam a agir como medidas de distância muito precisas. No entanto, se a taxa de sucesso não é suficientemente alta, a solução fixa $\check{b}$ não é necessariamente melhor do que a solução *float* $\hat{b}$ (TEUNISSEN, 1995; VERHAGEN; LI; TEUNISSEN, 2013).

Um resumo do procedimento descrito nesta seção é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Procedimento para solucionar o modelo misto inteiro.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2 Estimadores inteiros admissíveis

Na Seção 3.1 e na Figura 4, mostrou-se que uma das etapas para resolver o modelo inteiro misto é estimar a ambiguidade inteira $\check{a} \in \mathbb{Z}^n$ a partir do seu valor real $\hat{a} \in \mathbb{R}^n$.

O espaço dos números inteiros $\mathbb{Z}^n$ é de natureza discreta, o que implica que vários vetores de ambiguidades reais serão levados no mesmo vetor de ambiguidades inteiras. Um método geral de mapeamento é mapear todos os vetores reais com valores próximos a um determinado número inteiro para esse número inteiro. Desta forma, pode-se definir um subconjunto dos números reais, $S_z \subset \mathbb{R}^n$ para cada vetor inteiro $z \in \mathbb{Z}^n$, como (TEUNISSEN, 1999):

$$S_z = \{x \in \mathbb{R}^n \mid z = F(x)\}, \quad z \in \mathbb{Z}^n. \quad (3.9)$$

Este subconjunto S_z contém todos os vetores reais de ambiguidade *float* que serão mapeados para o mesmo vetor inteiro e é conhecido como região de atração de z (*pull in*) (TEUNISSEN, 1998b; TEUNISSEN, 1999). Isso implica que se $\check{a} = z \Leftrightarrow \hat{a} \in S_z$.

Assim, o estimador inteiro pode ser denotado da seguinte forma:

$$\check{\alpha} = \sum_{z \in \mathbb{Z}^n} z s_z(\hat{\alpha}), \quad (3.10)$$

com a função indicadora $s_z(x)$ dada por:

$$s_z(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in S_z \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases}$$

O estimador inteiro pode ser definido a partir de sua região de atração S_z , para definir uma classe de estimadores inteiro, basta impor algumas restrições nas regiões de atração. Isso significa que nem todos os estimadores inteiros são permitidos, mas apenas os estimadores que pertencem a classe de estimadores inteiros admissíveis. Para que um estimador inteiro seja admissível, a sua região de atração precisa atender a três condições (TEUNISSEN, 1999):

1. Todo vetor com valor real pode ser mapeado para um vetor inteiro, o que significa que não há espaço entre duas regiões de atração adjacentes, dadas como:

$$\bigcup_{z \in \mathbb{Z}^n} S_z = \mathbb{R}^n;$$

2. Todo vetor com valor real pode ser mapeado para apenas um vetor inteiro, o que significa que entre as regiões não pode acontecer sobreposição e isso pode ser expresso como:

$$S_{z_1} \cap S_{z_2} = \emptyset, \quad \forall z_1, z_2 \in \mathbb{Z}^n, \quad z_1 \neq z_2;$$

3. A forma e o tamanho das regiões de atração são independentes do seu centro z . Esta propriedade é conhecida como invariante translacional e é dada como:

$$S_z = z + S_0, \quad z \in \mathbb{Z}^n.$$

A região de atração é definida pelo estimador inteiro, e com isso, diferentes estimadores inteiros têm regiões de atração diferentes. Se a região de atração de um estimador inteiro atender às três condições acima, o estimador é denominado estimador inteiro admissível (TEUNISSEN, 1999). Os estimadores inteiros admissíveis mais populares são apresentados nas seções subsequentes.

As matrizes bidimensionais utilizadas nas próximas subseções são:

$$Q_{\hat{\alpha}_0} = \begin{pmatrix} 0,1021 & -0,0364 \\ -0,0364 & 0,11 \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

$$Q_{\hat{\alpha}_1} = \begin{pmatrix} 261,45 & 259,372 \\ 259,372 & 257,541 \end{pmatrix}, \quad (3.12)$$

$$Q_{\hat{a}_2} = \begin{pmatrix} 0,6392 & -0,0486 \\ -0,0486 & 0,1583 \end{pmatrix}, \quad (3.13)$$

$$Q_{\hat{a}_3} = \begin{pmatrix} 0,1392 & -0,0001 \\ -0,0001 & 0,1583 \end{pmatrix}. \quad (3.14)$$

3.2.1 Arredondamento inteiro

O arredondamento inteiro (IR) é o estimador inteiro admissível mais simples. Ele arredonda a solução *float*, simplesmente, para o número inteiro mais próximo. O vetor inteiro fixo pode ser denotado como (TEUNISSEN, 1999):

$$\check{a}_{IR} = \begin{pmatrix} [\hat{a}_1] \\ \vdots \\ [\hat{a}_n] \end{pmatrix}, \quad (3.15)$$

em que $[\]$ representa o arredondamento para o inteiro mais próximo.

Visto que cada componente de $\hat{a}$ é arredondada para o número inteiro mais próximo, a diferença máxima entre cada entrada $\hat{a}$ e $\check{a}_{IR}$ é 0,5. Logo, a região de atração $S_{z,IR}$ que corresponde ao estimador IR é dada por (TEUNISSEN, 1999):

$$S_{z,IR} = \bigcap_{i=1}^n \left\{ x \in \mathbb{R}^n \mid |x_i - z_i| \leq \frac{1}{2} \right\}, \quad \forall z \in \mathbb{Z}^n. \quad (3.16)$$

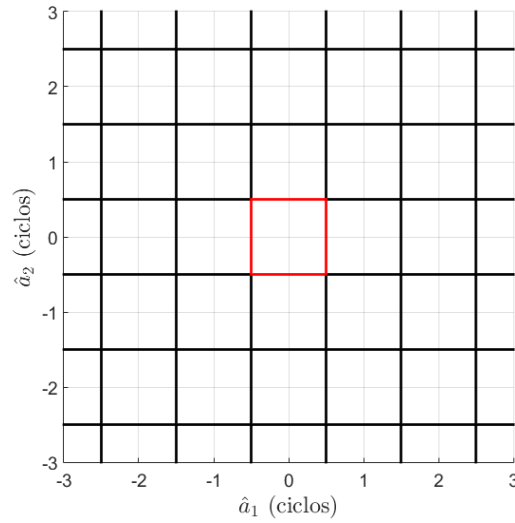
A região de atração do estimador de arredondamento inteiro é um quadrado no caso bidimensional, representado na Figura 5. A definição do estimador de arredondamento inteiro indica que sua região de atração é insensível a MVC das ambiguidades. Além disso, o estimador de arredondamento inteiro executa o procedimento de arredondamento em cada componente independentemente, portanto, a correlação entre diferentes componentes não é considerada.

Este método apesar de ser um estimador admissível, geralmente não produz a solução correta para a Equação (3.2), pois não considera a correlação existente entre as ambiguidades. Desta forma, este método só proporciona a solução correta quando as ambiguidades são completamente não correlacionadas, ou seja, quando a MVC $Q_{\hat{a}}$ na Equação (3.4) é diagonal. Assim, se $Q_{\hat{a}}$ é diagonal, é possível escrever a Equação (3.2), como sendo, (TEUNISSEN, 1999):

$$\min_{a_1, \dots, a_m} \sum_{i=1}^m \frac{(\hat{a}_i - a_i)^2}{\sigma_{\hat{a}_i}^2}. \quad (3.17)$$

Porém, na prática as ambiguidades são fortemente correlacionadas e a MVC não é diagonal. Assim, faz-se necessário a introdução de outros estimadores inteiros que possam ser utilizados e que forneçam uma taxa de sucesso razoável.

Figura 5 – Região de atração para o método de arredondamento inteiro – IR



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.2 Método de arredondamento inteiro sequencial

O estimador inteiro sequencial ou método de inicialização inteira (IB – *Integer Bootstrapping*) é um estimador simples, que utiliza o arredondamento para o inteiro mais próximo, que leva em consideração a correlação existente entre as ambiguidades (DONG; BOCK, 1989; BLEWITT, 1989). Este estimador resulta do ajuste sequencial condicional por mínimos quadrados (TEUNISSEN, 1993; TEUNISSEN, 1998a).

O estimador sequencial funciona da seguinte maneira: se há n ambiguidades, a primeira é fixa e arredondada para o seu inteiro mais próximo. Em seguida, o valor da primeira é utilizado para corrigir a segunda ambiguidade, por conta da correlação entre elas. Após isso, a segunda ambiguidade corrigida é arredondada para o seu inteiro mais próximo. Este processo continua até que todas as ambiguidades estejam corrigidas. Os componentes do estimador de inicialização são dados como:

$$\begin{aligned}
 \check{a}_{1,IB} &= [\hat{a}_1] \\
 \check{a}_{2,IB} &= [\hat{a}_{2|1}] = [\hat{a}_2 - \sigma_{\hat{a}_2\hat{a}_1} \sigma_{\hat{a}_1}^{-2} (\hat{a}_1 - \check{a}_{1,IB})] \\
 &\vdots \\
 \check{a}_{n,IB} &= [\hat{a}_{n|N}] = \left[\hat{a}_n - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\sigma_{\hat{a}_n\hat{a}_{i|I}}}{\sigma_{\hat{a}_{i|I}}^2} (\hat{a}_{i|I} - \check{a}_{i,IB}) \right],
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

em que $I = 1, 2, \dots, (i-1)$.

Assim, o estimador de inicialização inteira $\check{a}_{IB}$ é dado como (TEUNISSEN, 1998a):

$$\check{a}_{IB} = [\hat{a}_{n|N}] = \left[\hat{a}_n - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\sigma_{\hat{a}_n\hat{a}_{i|I}}}{\sigma_{\hat{a}_{i|I}}^2} (\hat{a}_{i|I} - \check{a}_{i,IB}) \right]. \tag{3.19}$$

A solução sequencial condicional por mínimos quadrados também pode ser obtida através de uma decomposição LDL^T de $Q_{\hat{a}}$, com L uma matriz unitária triangular inferior, cujas entradas são

$$l_{j,i} = \frac{\sigma_{\hat{a}_j \hat{a}_{i|I}}}{\sigma_{\hat{a}_{i|I}}^2},$$

e D uma matriz diagonal com as variâncias condicionais como entradas $\sigma_{\hat{a}_{i|I}}^2$.

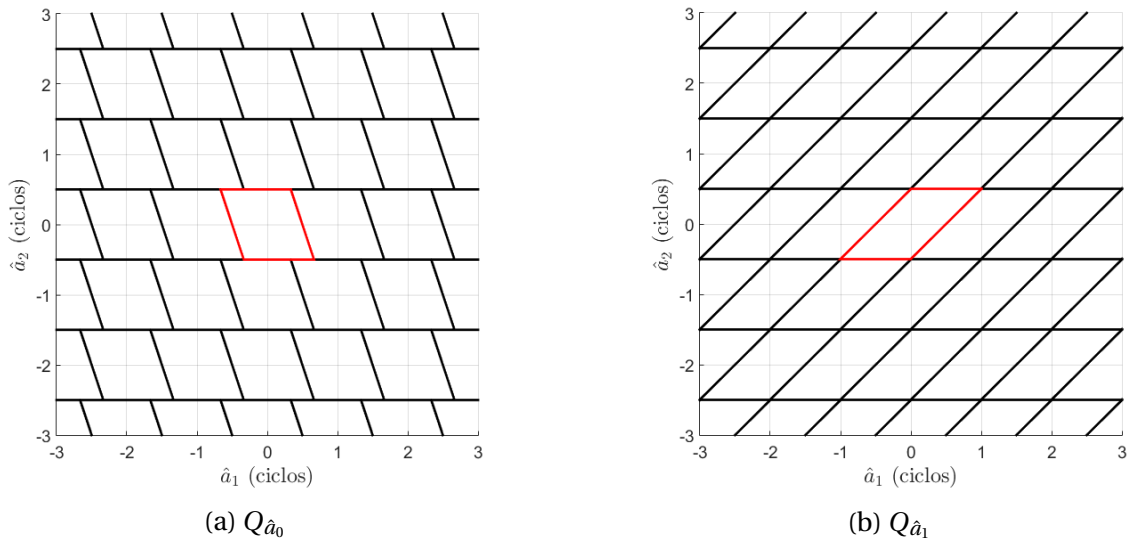
Por definição, tem-se que $|\hat{a}_{i|I} - [\hat{a}_{i|I}]| \leq \frac{1}{2}$, então a região de atração do estimador inteiro sequencial é dado por (TEUNISSEN, 1999):

$$S_{z,IB} = \bigcap_{i=1}^n \left\{ x \in R^n \mid |c_i^T L^{-1}(x - z)| \leq \frac{1}{2} \right\}, \forall z \in Z^n \quad (3.20)$$

em que c_i^T é um vetor cujas entradas são valores iguais a um. Note que a Equação (3.20) se reduz a Equação (3.16) se $Q_{\hat{a}}$ é diagonal.

A região de atração desse método é formada por paralelepípedos n-dimensionais. No caso bidimensional é um paralelogramo, exemplos bidimensionais das regiões de atração do IB são mostrados nas Figuras 6a e 6b. são especificadas no Apêndice ??.

Figura 6 – Região de atração para o método de inicialização inteira – IB



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.3 Método dos mínimos quadrados inteiros

Ambos os estimadores apresentados empregam um limite de 0,5 para definir os limites de suas regiões de atração, mas essa pode não ser uma escolha adequada. Se a matriz das ambiguidades $Q_{\hat{a}}$ for uma matriz identidade, então a escolha do limite 0,5 teria um bom desempenho, mas usualmente $Q_{\hat{a}}$ é uma matriz simétrica definida positiva

arbitrária. Neste caso, 0,5 pode não ser a melhor escolha, pois a norma euclidiana entre dois inteiros próximos pode não ser igual a 1.

O estimador do método dos mínimos quadrados inteiros considera todas as correlações entre os elementos da solução *float* $\hat{a}$. A estimativa inteira $\check{a}_{ILS}$ é o vetor inteiro com a menor distância para a solução *float* na métrica da MVC $Q_{\hat{a}}$ (TEUNISSEN, 1999):

$$\check{a}_{ILS} = \min_{z \in \mathbb{Z}^n} \|\hat{a} - z\|_{Q_{\hat{a}}}^2, \quad (3.21)$$

em que $\|x\|_Q^2 = x^T Q^{-1} x$.

A estimativa de mínimos quadrados inteiros não pode ser obtida a partir de operações de arredondamento simples, mas requer uma busca pelo ponto de grade inteiro mais próximo, o que não é uma tarefa trivial, especialmente se a dimensão n do problema de minimização acima for alta.

A região de atração do método dos mínimos quadrados inteiros é dada por (TEUNISSEN, 1999):

$$S_{a,ILS} = \left\{ \hat{a} \in \mathbb{R}^n \mid \|\hat{a} - a\|_{Q_{\hat{a}}}^2 \leq \|\hat{a} - z\|_{Q_{\hat{a}}}^2, \forall z \in \mathbb{Z}^n \right\}. \quad (3.22)$$

A Equação mostra que a distância euclidiana do vetor *float* para o vetor inteiro correto é menor do que a distância a quaisquer outros vetores inteiros. A Equação (3.22) pode ser reescrita como:

$$\|\hat{a} - a\|_{Q_{\hat{a}}}^2 \leq \|\hat{a} - z\|_{Q_{\hat{a}}}^2 \Leftrightarrow (z - a)^T Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - a) \leq \frac{1}{2} \|z - a\|_{Q_{\hat{a}}}^2, \forall z \in \mathbb{Z}^n. \quad (3.23)$$

Exemplos bidimensionais das regiões de atração do estimador ILS são mostrados nas Figuras 7a, 7b e 7c. As regiões de atração podem ser obtidas a partir das MVC, que também é responsável por sua forma e independem da solução *float*.

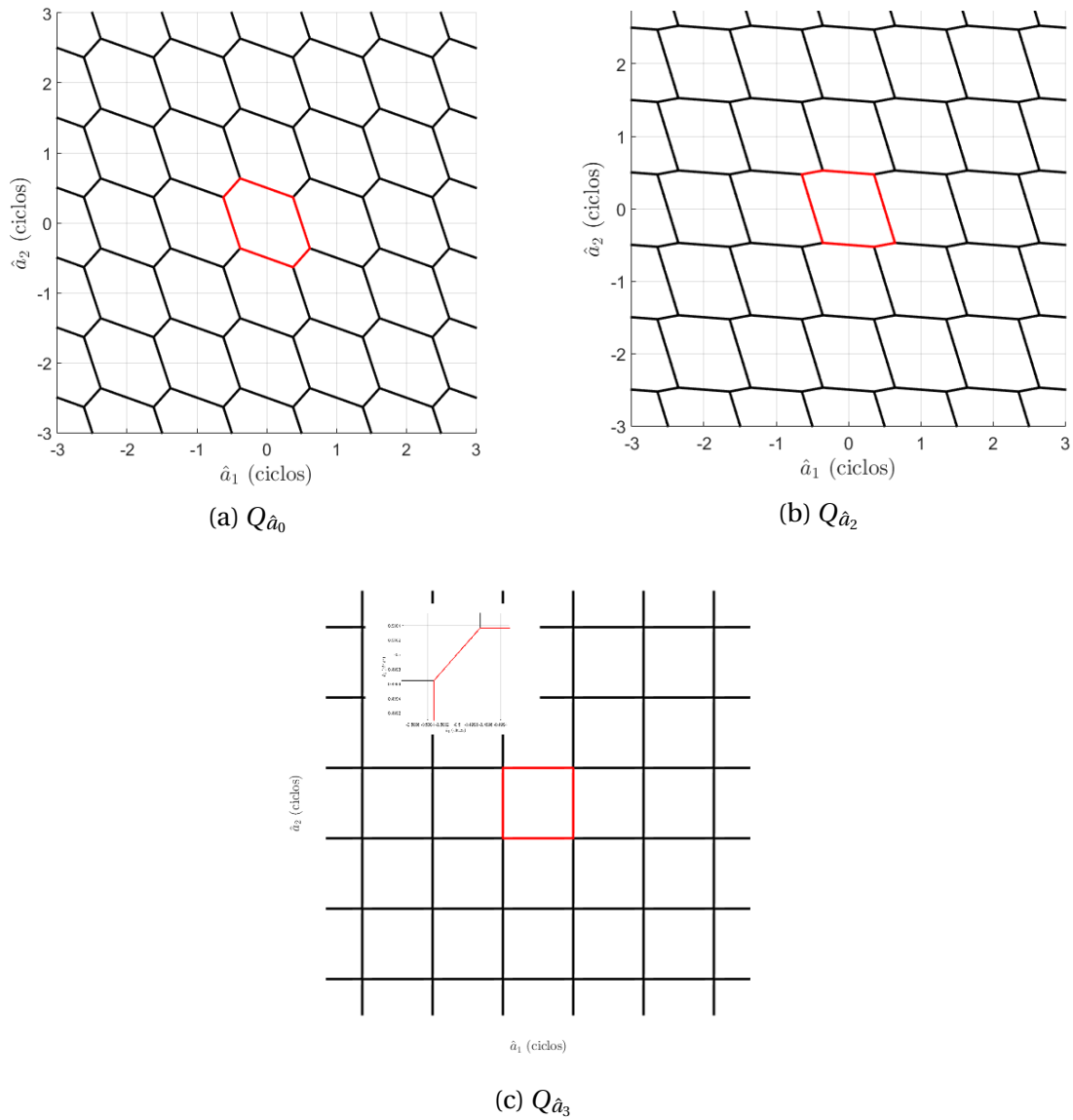
O procedimento do ILS é eficientemente mecanizado no Método LAMBDA. Um elemento-chave do método LAMBDA é a decorrelação realizada nas ambiguidades, apresentada na seção 3.3, o que torna a pesquisa mais eficiente. Maiores informações sobre o método LAMBDA e suas aplicações podem ser encontrados em Teunissen (1993), Teunissen (1995), Teunissen (1998a), Teunissen (2017).

3.2.3.1 Busca com enumeração

A técnica de busca com enumeração é descrita detalhadamente em Jonge e Tiberius (1996). Uma visão geral de como essa busca funciona será resumida aqui.

Primeiramente, o tamanho do elipsóide de busca é fixado escolhendo um valor para o volume χ^2 , de forma que o número de candidatos inteiros necessários estejam

Figura 7 – Região de atração para o método dos mínimos quadrados inteiros – ILS



Fonte: Elaborada pela autora.

contidos no elipsóide. Se apenas um candidato for solicitado, χ^2 pode ser determinado a partir da estimativa do IB. Se no máximo $n + 1$ candidatos forem solicitados, em cada etapa do procedimento de arredondamento condicional são necessários dois candidatos inteiros: o número inteiro mais próximo e o segundo número inteiro mais próximo, e arredondamento condicional é procedido para ambos os casos. Isto dá $n + 1$ valores para $F(z)$ - Equação (3.5). Se p candidatos forem solicitados, os valores de $F(z)$ são ordenados de forma ascendente e χ^2 é escolhido igual ao p -ésimo valor.

Se mais de $n + 1$ ambiguidades forem solicitadas, pode-se utilizar o volume do elipsóide de busca. Jonge e Tiberius (1996) demonstraram que a relação entre o volume e o número de pontos de grade inteira dentro do elipsóide são aproximadamente iguais para

n grande. O volume de um hiperelipsóide é dado por :

$$E_n = \chi^n |Q\hat{a}|^{\frac{1}{2}} V_n, \quad (3.24)$$

com $V_n = \frac{2}{\pi} \frac{\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2})}$ e $\Gamma(\cdot)$ a função Gamma. Normalmente, a aproximação acima tem um bom desempenho se o número de candidatos requeridos é grande e χ^2 é calculado com a Equação (3.24), fazendo $E_n = 1,5p$.

Uma vez que o tamanho do elipsóide de busca é definido a partir de χ^2 , todos os candidatos inteiros no elipsóide de busca são coletados, escaneando o intervalo em torno das estimativas condicionais em cada nível de ambiguidade utilizando o ajuste sequencial condicional. Os limites dos intervalos podem ser calculados recursivamente durante o ajuste sequencial condicional.

3.2.3.2 Busca com encolhimento

A estratégia de busca alternativa baseada em encolher o elipsóide de busca durante a busca foi proposto por Chang, Yang e Zhou (2005) e foi denominado de MLAMBDA (*Modified LAMBDA*). Os resultados mostraram que a busca proposta no MLAMBDA pode ser muito mais rápida do que a busca apresentada na Seção 3.2.3.1 para problemas dimensionais elevados. Isso é particularmente necessário para a solução das ambiguidades na era multi-GNSS, em que há mais satélites sendo rastreados simultaneamente e com observações de fase da portadora em três ou mais frequências.

O valor de χ^2 é o definido como infinito. Se for solicitado um p número de candidatos inteiros, no primeiro passo χ^2 é definido como o máximo das normas quadradas $F(z^{(1)}), F(z^{(2)}), \dots, F(z^{(p)})$ para os p candidatos inteiros, $z^{(1)}, z^{(2)}, \dots, z^{(p)}$, respectivamente.

O primeiro candidato $z^{(1)}$ será igual à solução do método de arredondamento inteiro sequencial. Os candidatos restantes $p - 1$ são selecionados mantendo os valores das ambiguidades fixadas no método IB e definindo o valor de $z^{(1)}$ igual ao segundo número inteiro mais próximo, terceiro número inteiro mais próximo, etc, em relação à estimativa condicional $z_{1|\hat{2} \dots n}$ como na Equação (3.19).

Assim, tem-se que $F(z^{(1)}) \leq F(z^{(2)}) \leq \dots \leq F(z^{(p)})$. No próxima passo, a região elipsoidal é encolhida fazendo $\chi^2 = F(z^{(p)})$, e como resultado é possível garantir que pelo menos p candidatos estejam dentro do elipsóide.

Em seguida, a busca é continuada no nível de ambiguidade 2: o segundo inteiro mais próximo de $z_{2|\hat{3} \dots n}$ é tomado. Se este inteiro está dentro dos limites, a estimativa condicional correspondente $z_{1|\hat{2} \dots n}$ é determinada e arredondada para o número inteiro mais próximo, todas as outras ambiguidades (níveis 3 a n) permanecem inalteradas. E se o

vetor candidato inteiro resultante $(p + 1)$ satisfaz $F(z^{(p+1)}) \leq \chi^2$, então χ^2 é substituído por $F(z^{(p+1)})$ e, ao mesmo tempo, o seu vetor candidato inteiro correspondente é substituído por $z^{(p+1)}$. Como resultado, a região elipsoidal é encolhida.

A busca continua nesse elipsóide encolhido na ambiguidade nível 1 até que nenhum novo candidato possa ser encontrado. Nesse caminho, a busca continua em todos os níveis até que não haja mais candidatos (além dos atuais p candidatos) cuja norma quadrada é menor que a atual χ^2 . Os vetores inteiros encontrados são então os p candidatos procurados.

3.3 Decorrelação

O mapeamento - Equação (3.5) pode ser realizado a partir das DDs das ambiguidades originais. No entanto, devido à alta correlação entre os elementos do vetor de ambiguidade, bem como à má precisão destes elementos, a solução inteira obtida das ambiguidades DD originais pode ser pouco confiável, se os estimadores IR ou IB são utilizados, ou o cálculo pode ser muito demorado caso o estimador do ILS for utilizado. Reparametrizar as ambiguidades faz com que a correlação entre elas seja reduzida.

A decorrelação é realizada com o uso de uma matriz de transformação das ambiguidades admissível¹, denominada transformação Z (TEUNISSEN, 1995):

$$\begin{aligned}\hat{z} &= Z^T \hat{a}, \\ Q_{\hat{z}} &= Z^T Q_{\hat{a}} Z,\end{aligned}\tag{3.25}$$

em que:

$\hat{z}$ - vetor das ambiguidades *float* reparametrizado;

$Q_{\hat{z}}$ - MVC das ambiguidades reparametrizada.

Após a transformação, a solução *float* torna-se:

$$\begin{bmatrix} \hat{z} \\ \hat{b} \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} z \\ b \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Q_{\hat{z}} & Q_{\hat{z}\hat{b}} \\ Q_{\hat{b}\hat{z}} & Q_{\hat{b}} \end{bmatrix} \right)\tag{3.26}$$

A pesquisa pode ser realizada com $\hat{z}$ e $Q_{\hat{z}}$ e depois que o melhor candidato inteiro $\check{z}$ é encontrado, o melhor candidato inteiro $\check{a}$ pode ser obtido a partir de uma transformação inversa (TEUNISSEN, 1995):

$$\begin{aligned}\check{a} &= Z^{-T} \check{z}, \\ Q_{\check{a}} &= Z^{-T} Q_{\check{z}} Z^{-1}.\end{aligned}\tag{3.27}$$

¹ Uma matriz é uma matriz de transformação das ambiguidades admissível, se todos os seus elementos e de sua inversa são inteiros (TEUNISSEN, 1995).

A transformação de retorno, Equação (3.27), não é necessária para o cálculo da solução fixa correspondente, pois esta pode ser obtida diretamente com:

$$\check{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{z}} Q_{\hat{z}}^{-1} (\hat{z} - \check{z}). \quad (3.28)$$

A Equação (3.27) indica que a matriz de transformação Z deve ser invertível. Além disso, existem três condições para que uma transformação de ambiguidade seja admissível (TEUNISSEN, 1995):

- A matriz Z precisa ser uma matriz inteira significa que $Z \in \mathbb{Z}^{n \times n}$. Tal condição garante que a transformação preserva a natureza inteira dos parâmetros de ambiguidade;
- A matriz Z precisa preservar volume, isto é, $|Q_{\hat{a}}| = |Q_{\hat{z}}|$. Esta condição garante que $\|\hat{a} - \check{a}\|_{Q_{\hat{a}}}^2 = \|\hat{z} - \check{z}\|_{Q_{\hat{z}}}^2$. Assim, a transformação não altera o resultado da pesquisa.
- A matriz Z precisa diminuir a correlação entre as ambiguidades, isto é, os elementos fora da diagonal de $Q_{\hat{z}}$ são menores que os seus correspondentes na matriz $Q_{\hat{a}}$. Tal condição garante que a transformação torne os componentes de ambiguidade menos correlacionados, ao invés de degradar a eficiência da pesquisa.

Um exemplo bidimensional da decorrelação das ambiguidade é ilustrado na Figura 8, que apresenta os espaços de procura de $Q_{\hat{a}}$ e $Q_{\hat{z}}$, antes e depois da decorrelação, respectivamente. O volume das duas regiões é o mesmo e o número de candidatos inteiros nas duas elipses também. O exemplo utilizado foi:

$$Q_{\hat{a}} = \begin{pmatrix} 4,97176575398708 & 3,87332851922115 \\ 3,87332851922115 & 3,01878170253896 \end{pmatrix}, \quad (3.29)$$

$$Q_{\hat{z}} = \begin{pmatrix} 0,0865145651993995 & -0,0363609972315935 \\ -0,0363609972315935 & 0,0846538584211469 \end{pmatrix}. \quad (3.30)$$

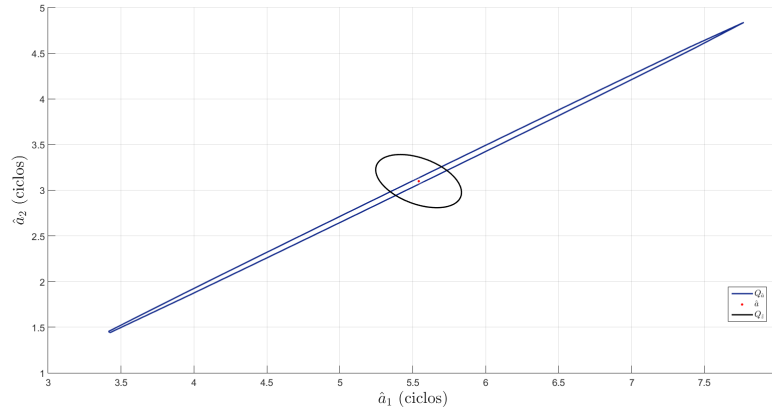
Uma medida que possa fornecer informações se a decorrelação foi realizada com sucesso ou não é de grande utilidade. A MVC das ambiguidades $Q_{\hat{a}}$ é diagonal quando os coeficientes de correlação das ambiguidades são nulos. A matriz $Q_{\hat{a}}$ é diagonal se e somente se sua matriz correlação $R_{\hat{a}}$ é igual à matriz identidade. A matriz correlação é dada por (TEUNISSEN, 1994):

$$R_{\hat{a}} = (diag(Q_{\hat{a}}))^{-1/2} Q_{\hat{a}} (diag(Q_{\hat{a}}))^{-1/2}, \quad (3.31)$$

em que $diag(Q_{\hat{a}})$ é a matriz diagonal cujos elementos são idênticos a $Q_{\hat{a}}$. Tal medida pode ser derivada a partir dos coeficientes de correlação, que fornece uma informação da diagonalidade de $Q_{\hat{a}}$. Este escalar é dado por (TEUNISSEN, 1994):

$$r_{\hat{a}} = \sqrt{det(R_{\hat{a}})}, \quad (3.32)$$

Figura 8 – Um exemplo bidimensional de decorrelação das ambiguidades. Em azul, o espaço de procura de $Q_{\hat{a}}$ e em preto o espaço de procura de $Q_{\hat{z}}$, antes e após a decorrelação, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

com $0 \leq r_{\hat{a}} \leq 1$. Este escalar é conhecido como número de decorrelação das ambiguidades.

A partir da Equação (3.32) é possível medir a diagonalidade da MVC das ambiguidades. Note que o número de decorrelação das ambiguidades é adimensional. Assim, a MVC das ambiguidades $Q_{\hat{a}}$ é diagonal quando $r_{\hat{a}}$ é igual a um e está longe da diagonalidade quando $r_{\hat{a}}$ é próximo de zero e singular quando $r_{\hat{a}}$ é igual a zero.

Na matriz $Q_{\hat{a}}$ utilizada na Figura 8, o número de decorrelação das ambiguidades é 0,2, enquanto que o da matriz decorrelacionada $Q_{\hat{z}}$ é 0,9052. Tais matrizes são apresentadas no Apêndice ??.

3.4 Confiabilidade da estimativa inteira

A teoria da região de atração interpreta a estimativa de inteiros a partir de uma perspectiva geométrica. É intuitivo e fácil de seguir, mas difícil de avaliar o desempenho do estimador inteiro. Nesta seção, a estimativa de inteiros será investigada a partir da teoria da probabilidade.

De acordo com a definição de estimador inteiro admissível na Seção 3.2, a ambiguidade *float* pode ser fixada corretamente em seu número inteiro se e somente se o inteiro pertencer à região de atração, isto é:

$$\check{a} = a \iff \hat{a} \in S_a, \quad (3.33)$$

a o vetor das ambiguidades verdadeiras desconhecido.

Uma medida importante para a qualidade da estimativa $\check{a}$ é a probabilidade da

estimativa inteira correta P_s , também conhecida como taxa de sucesso de ambiguidade. Assim, a taxa de sucesso é igual à probabilidade de que $\hat{a}$ resida na região de atração S_a e é dada por (TEUNISSEN, 1999):

$$P_s = P(\check{a} = a) = P(\hat{a} \in S_a) = \int_{S_a} f_{\hat{a}}(x|a) dx, \quad (3.34)$$

$f_{\hat{a}}$ função de densidade de probabilidade (FDP) das ambiguidades *float*.

Uma vez que o vetor de observações y segue uma distribuição normal, a ambiguidade *float* também segue uma distribuição normal multivariada, denotada como $\hat{a} \sim N(a, Q_{\hat{a}})$. A função de densidade de probabilidade (FDP) de $\hat{a}$ é dada como (TEUNISSEN, 1999):

$$f_{\hat{a}}(x|a) = \frac{1}{\sqrt{|Q_{\hat{a}}|2\pi^n}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\|x\|_{Q_{\hat{a}}}^2\right\}, \quad (3.35)$$

$|\cdot|$ denota o determinante.

Como as regiões de atração dos estimadores inteiros são invariantes, a taxa de sucesso pode ser descrita como (TEUNISSEN, 1999):

$$P_s = \int_{S_0} f_{\hat{a}}(x|0) dx. \quad (3.36)$$

Isso mostra que a taxa de sucesso pode ser calculada sem o conhecimento do vetor inteiro desconhecido $a \in \mathbb{Z}^n$. A Equação (3.34) é muito importante para aplicações GNSS, uma vez que permite ao usuário avaliar, muitas vezes antes das medições reais serem tomadas, se é possível solucionar as ambiguidades de forma confiável a partir do modelo. Além disso, ela também indica que quanto maior a taxa de sucesso, maior a probabilidade da ambiguidade *float* estar na região de atração certa. Desta forma, a taxa de sucesso pode ser utilizada para medir a confiabilidade da estimativa da ambiguidade, sendo dependente da FDP $f_{\hat{a}}(x|a)$ e da região de atração S_a .

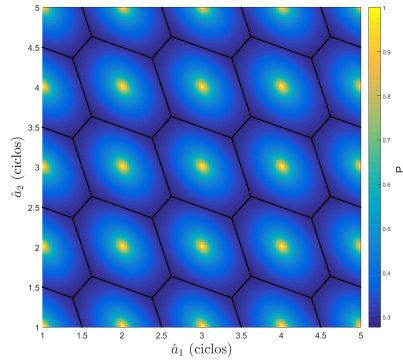
Um exemplo bidimensional da taxa de sucesso do estimador ILS é mostrado na Figura 9, utilizando a matriz $Q_{\hat{a}_0}$ apresentada na Seção 3.2.

A probabilidade de $\hat{a}$ não pertencer a S_a é conhecida como taxa de falha, definida como:

$$P_f = P(\check{a} \neq a) = 1 - P_s. \quad (3.37)$$

Na estimativa de número inteiro, $P_s + P_f = 1$, então a taxa de falha e a taxa de sucesso são equivalentes e a taxa de falha também pode ser usada como indicador de confiabilidade da estimativa inteira.

Figura 9 – Um exemplo bidimensional do cálculo da taxa de sucesso das ambiguidades.



Fonte: Elaborada pela autora.

A integração sobre a região de atração é muito complexa para os estimadores ILS e IR sendo difícil calcular (3.33) exatamente. Portanto, alguns limites probabilísticos fáceis de utilizar foram desenvolvidos para uma aproximação da taxa de sucesso exata.

O limite inferior pode ser utilizado para informar se a solução das ambiguidades poderá ser bem sucedida, enquanto o limite superior mostrará quando se pode esperar da taxa de falha da solução das ambiguidades. Assim, há confiança suficiente de que a solução das ambiguidades será bem sucedida quando o limite inferior é próximo de um, enquanto essa confiança não existe quando o limite superior for pequeno.

As taxas de sucesso também dependem do estimador inteiro utilizado, uma vez que a região de atração é diferente para cada um deles, o IR, o IB e o ILS. Com isso, pode-se utilizar a relação entre as taxas de sucesso e os diferentes estimadores da seguinte forma (TEUNISSEN, 1999):

$$P(\check{a}_{IR} = a) \leq P(\check{a}_{IB} = a) \leq P(\check{a}_{IRLS} = a). \quad (3.38)$$

A ordenação segue a complexidade do estimador, uma vez que o IR é o mais simples e ILS o mais complexo. Isso significa que se IR ou IB fornecer um limite inferior adequado, existe a possibilidade de utilizar um estimador inteiro mais simples se sua taxa de sucesso for próxima de 1 e ainda obter um bom desempenho.

3.5 Solução parcial das ambiguidades

O processo de solução das ambiguidades visa solucionar todas as ambiguidades simultaneamente (FAR - *Full Ambiguity Resolution*). No entanto, pode acontecer que não seja possível solucionar o vetor completo de ambiguidades com probabilidade adequada. Como alternativa para resolver esse problema, pode-se ter confiança sufici-

ente solucionar um subconjunto das ambiguidades. Este processo é denominado solução parcial das ambiguidades (PAR - *Partial Ambiguity Resolution*) (TEUNISSEN; JOOSTEN; TIBERIUS, 1999; TEUNISSEN, 2001).

A PAR baseia-se no fato de que a taxa de sucesso aumenta quando menos restrições inteiras para as ambiguidades são impostas. No entanto, para utilizar a PAR, a questão primordial é determinar qual subconjunto de ambiguidades deverá ser utilizado. Essa seleção deverá ser baseada na precisão das ambiguidades *float*, de forma que a taxa de sucesso exceda ao limiar pré definido pelo usuário e que também resulte numa melhoria significativa na precisão das estimativas de posição.

Na literatura algumas estratégias foram propostas para a determinação de qual subconjunto deve ser utilizado. Uma das estratégias propostas é, quando se usam duas ou mais frequências, apenas as ambiguidades *wide lane* ou *extra wide lane* são fixadas (MOWLAM, 2001; CAO; O'KEEFE; CANNON, 2007).

Outra estratégia é corrigir apenas combinações lineares de ambiguidades para as quais as melhores e as segundas melhores soluções são consistentes (LAWRENCE, 2009). Semelhante a esta estratégia, é selecionar o subconjunto a partir das ambiguidades inteiras que são idênticas na melhor e na segunda melhor solução obtida com o LAMBDA (DAI et al., 2007).

Algumas outras estratégias são baseadas nas ambiguidades com um mínimo ângulo de elevação ou com uma relação sinal-ruído mínima exigida, ou até em satélites que são visíveis por um certo tempo (TEUNISSEN; JOOSTEN; TIBERIUS, 1999; PARKINS, 2011). Na estratégia proposta por Parkins (2011), para a seleção do subconjunto, primeiramente o algoritmo forma todos os subconjuntos possíveis, ordenados de acordo com o ADOP (diluição da precisão de ambiguidade – *Ambiguity Dilution Of Precision*) correspondente ou o SNR médio. Depois, a partir do subconjunto com o melhor valor do ADOP ou SNR médio, as ambiguidades correspondentes são fixas e validadas. Se o subconjunto não for aceito, o próximo melhor subconjunto será escolhido, até que seja encontrado um subconjunto que possa ser corrigido, se houver algum. Em uma etapa posterior, tenta-se estender o subconjunto com ambiguidades que ainda não foram fixadas. As taxas de sucesso obtidas com esse método são mais altas do que com a fixação de conjunto completo.

Uma desvantagem da maioria das estratégias do PAR é que a escolha do subconjunto não é baseada na taxa de sucesso ou na melhoria da precisão da linha de base. Além disso, algumas estratégias envolvem um procedimento iterativo no qual muitos subconjuntos diferentes são avaliados. O que pode acarretar num longo tempo de pesquisa. A estratégia adotada nesta tese foi baseada em (TEUNISSEN; JOOSTEN; TIBERIUS, 1999; TEUNISSEN, 2001; VERHAGEN et al., 2011).

3.6 Validação

A teoria de estimação das ambiguidades não pode ser considerada completa sem medidas rigorosas para validar a solução obtida. É de suma importância entender que calcular a estimativa inteira das ambiguidades é apenas uma etapa e a validação é outra. A estimação inteira sempre é possível de ser realizada, sendo a estimativa correta ou não. Por isso, a validação faz-se necessária, pois ela fornece a informação se a estimativa obtida pode ou não ser aceita.

3.6.1 Teste da Razão (Ratio Test)

O *Ratio test* é o mais popular teste de validação das ambiguidades. Ele foi introduzido por Euler e Schaffrin (1991). Seja $\check{a}$ a solução obtida pelo ILS. Então, ela é aceita se (VERHAGEN, 2005):

$$\frac{\|\hat{a} - \check{a}_2\|_{Q_{\hat{a}}}^2}{\|\hat{a} - \check{a}\|_{Q_{\hat{a}}}^2} = \frac{R_2}{R_1} \geq c, \quad (3.39)$$

em que c é o valor de tolerância ou valor crítico, dado pelo usuário e R_i é utilizado para expressar a norma ao quadrado dos resíduos das ambiguidades da melhor ($i = 1$) e segunda melhor ($i = 2$) solução inteira obtida, $\check{a}$ e $\check{a}_2$, respectivamente.

O problema em utilizar este teste é que a determinação do valor crítico não é claro. Em Euler e Schaffrin (1991) o teste estatístico é derivado através da aplicação da teoria clássica de testes de hipóteses. Outras abordagens para determinar o valor crítico c foram propostas na literatura, todas baseadas na escolha de um valor fixo determinado empiricamente. Maiores detalhes sobre as formas de determinação do valor crítico do *Ratio test* podem ser encontrados em Verhagen (2005). Mas, apesar das críticas, a validação inteira baseada no teste ratio pode funcionar satisfatoriamente na prática.

3.6.2 FF-RT (Fixed Failure Ratio Test)

O problema em utilizar o teste Ratio com um valor c fixo é que a taxa de falha pode ser muito alta, e a estimativa inteira incorreta pode ter um grave impacto sobre a solução fixa. Por isso o FF-RT foi introduzido por Verhagen e Teunissen (2006). Neste teste, um valor μ é determinado de forma que garanta que a taxa de falha não exceda a um limite definido pelo usuário.

Seja $\check{a}$ a solução obtida pelo ILS. Então, ela é aceita se (VERHAGEN, 2005):

$$\frac{\|\hat{a} - \check{a}\|_{Q_{\hat{a}}}^2}{\|\hat{a} - \check{a}_2\|_{Q_{\hat{a}}}^2} \leq \frac{1}{c} = \mu, \quad (3.40)$$

onde c é o valor de tolerância do teste ratio e $0 \leq \mu \leq 1$.

A desvantagem em utilizar o FF-RT, é que não existe uma expressão analítica para calcular o valor de μ apropriado para uma determinada taxa de falha. Esse valor é encontrado através de simulações. A seguir, o procedimento para encontrar o valor crítico μ é apresentado.

Procedimento para determinar o valor μ baseado em simulações

1. Calcule a $P_{f,ILS}$. Se $P_{f,ILS} \leq P_f$, faça $\mu = 1$. Caso contrário, vá para o passo 2.
2. Gere N amostras de $\hat{a}_i \sim N(0, Q_{\hat{a}})$, $i=1, \dots, N$.
3. Determine $\check{a}_i$, $\check{a}_{2i}$ e R_i .
4. $P_f(\mu) = \frac{N_f}{N}$, com $N_f = \sum_{i=1}^N \omega(R_i, a_i)$, onde $\omega(R_i, a_i) = \begin{cases} 1, R_i \leq \mu, a_i \neq 0 \\ 0, c.c. \end{cases}$.
5. Escolha $\mu_{min} = (\min(R_i) - 10^{-16})$ e $\mu_{max} = \max(R_i)$.
6. Utilize um método de encontrar raiz² para determinar $\mu \in [\mu_{min}, \mu_{max}]$ de forma que $P_f(\mu) - P_f = 0$.

sendo $P_{f,ILS}$ a probabilidade de falha do MMI, normalmente adotado como o limite superior do método de arredondamento inteiro sequencial. A probabilidade de falha do FF-RT, P_f é adotada geralmente como 0,1%

Após algumas simulações, observa-se que o número de amostras necessário para determinar o valor crítico μ é muito alto, o que é um grande problema. Visando eliminar essa desvantagem, Verhagen e Teunissen (2013) introduziram uma tabela que apresenta os valores para μ baseada em diversos modelos GNSS, possibilitando assim o seu uso. Este é um dos problemas ainda em aberto, investigar se tais modelos utilizados na tabela são aplicáveis para a realidade brasileira e também, outras formas de determinar tal valor crítico.

² como o método da bissecção ou de Newton.

FCT-RTK: MULTI GNSS

O FCT—RTK é um sistema computacional que processa dados de múltiplas constelações e frequências GNSS para estimar as posições de um ou mais receptores. Foi projetado nessa tese para realizar o posicionamento relativo, utilizando as observações de DD de pseudodistância e de fase da onda portadora GNSS para linhas de base de qualquer comprimento.

Este sistema foi implementado em linguagem C++, tendo como ponto de partida a ferramenta FCTRTK_Net (ALVES; MONICO, 2011), adaptando do modo de geração de VRS (*Virtual Reference Station*) para o posicionamento relativo, além de ser expandido do processamento de dados GPS para dados de múltiplas constelações e frequências GNSS.

Este capítulo tem como objetivo descrever como o FCT—RTK foi desenvolvido, apresentando primeiramente sua estrutura geral e, em seguida, detalhes da sua implementação. Note que o desenvolvimento deste sistema também é uma das importantes contribuições dessa tese. Todos os resultados que serão mostrados nos capítulos subsequentes foram obtidos com este sistema. Embora os dados sejam pós-processados, o processamento é completamente análogo ao processamento em tempo real, ou seja, o carregamento de dados e todos os cálculos são implementados época por época. A Figura 10 apresenta o logo desenvolvido para o sistema FCT-RTK.

Figura 10 – Logotipo do sistema computacional FCT-RTK, desenvolvido durante esta tese.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.1 Estrutura do sistema

Esta seção apresenta uma visão geral da estrutura do código FCT-RTK e descreve a ordem em que o programa executa cada uma de suas tarefas. A Figura 11 apresenta um fluxograma da estrutura do FCT-RTK.

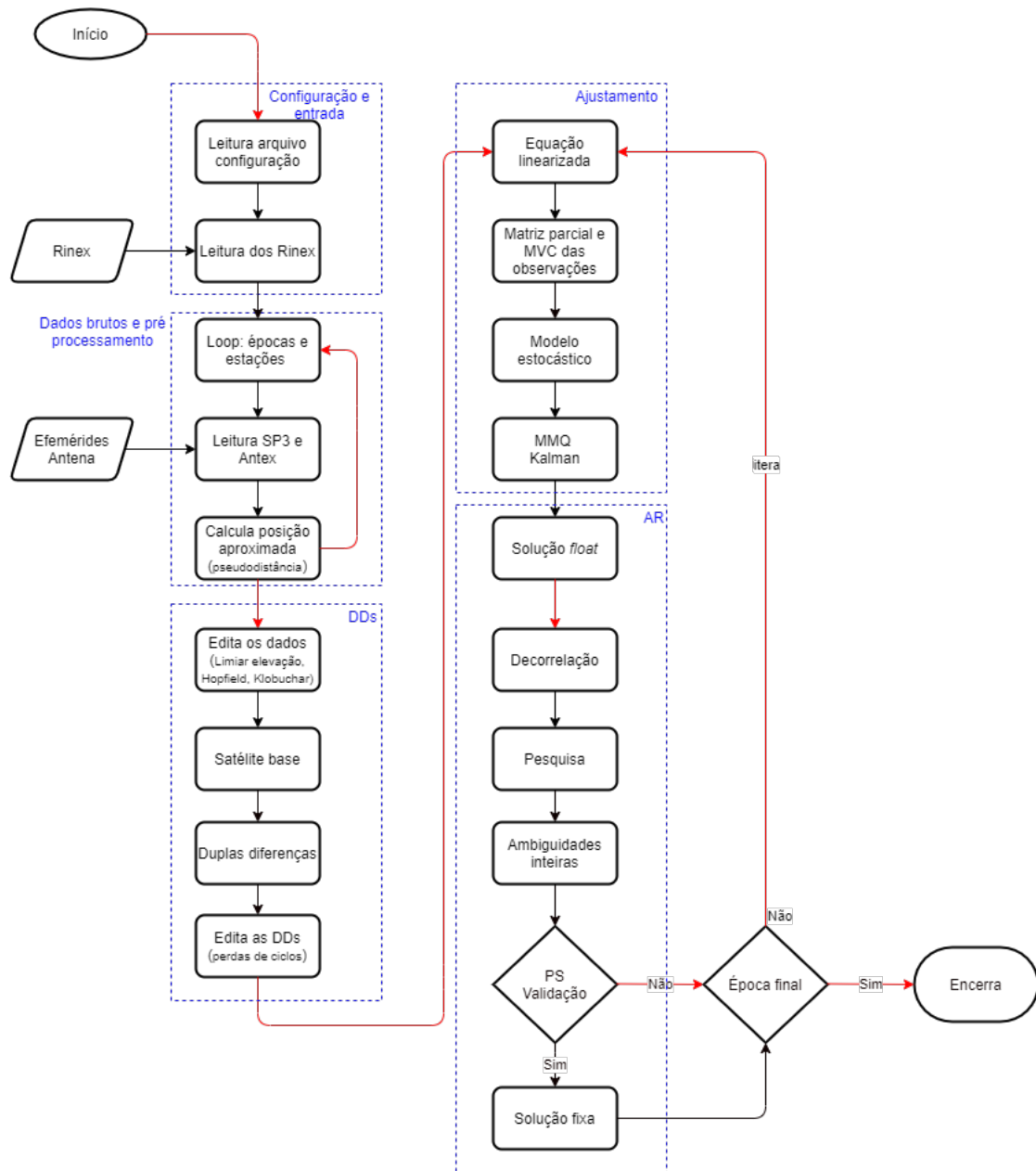
Existem cinco módulos principais no FCT-RTK:

1. Entrada e configuração dos dados;
2. Leitura dos dados e Pré-processamento;
3. Formação das DDs;
4. Ajustamento e estimativa da solução *float*;
5. Solução das ambiguidades.

No primeiro módulo, o FCT-RTK lê o arquivo de configurações e verifica se este é consistente. Ele verifica se os nomes dos arquivos RINEX (*Receiver INdependent EXchange*) são válidos, os abre e realiza a leitura, armazenando os dados para uso posterior nos módulos de pré-processamento e ajustamento. O FCT-RTK também atualiza a coordenada da estação base para a época dos dados.

No segundo módulo, o FCT-RTK faz o download dos arquivos de efemérides de forma automática. A seguir, a leitura dos arquivos de efemérides e antena para cada uma das estações, dentro do intervalo de processamento determinado pelo usuário é realizado. O pré-processamento consiste em ler todos os dados e armazená-los em ordem de tempo. Então, o cálculo da posição aproximada do receptor utilizando dados de pseudodistância para cada uma das estações em cada época é realizado. Isso tem como objetivo produzir uma estimativa do relógio do receptor. No pré processamento também é calculada a correção do movimento de rotação da Terra.

Figura 11 – Resumo da estrutura do FCT-RTK. As setas vermelhas denotam sequências de processamento e as setas pretas denotam entrada/saída.



Fonte: Elaborada pela autora.

Em seguida, no terceiro módulo, o FCT-RTK realiza o cálculo das DDs. Primeiramente, os satélites que estão acima do limiar do ângulo de elevação são selecionados. No segundo passo, as correções baseadas nos modelos teóricos Hopfield e Klobuchar e do centro de fase da antena são calculadas. A seguir, é realizado o cálculo das SD (Seção 2.3.2.1) e selecionado o satélite base do processamento, como o satélite com o maior ângulo de elevação que tenha todas as frequências selecionadas pelo usuário. Então, é realizado o cálculo das DDs (Seção 2.3.2.2) e as armazena. A próxima etapa é a da detecção de perdas de ciclos. Esta etapa é realizada utilizando as triplas diferenças (Seção 2.3.2.3),

com o limiar dado pela combinação Melbourne-Wubben (Seção 2.3.1.2). Para a correção das perdas de ciclos, o FCT-RTK modifica a MVC das ambiguidades, colocando o valor da tetra diferença calculada (Seção 2.3.2.4) como variância do satélite afetado pela perda.

O quarto módulo é responsável pelo ajustamento, em que é realizado o cálculo da solução *float* das ambiguidades. Neste módulo é possível utilizar o método dos mínimos quadrados ou o Kalman como estimador. Aqui também são calculados o modelo estocástico e os testes de convergência. As coordenadas da estação e as ambiguidades *float* são obtidas. As ambiguidades são iniciadas como zero e as coordenadas estimadas no módulo 2 são utilizadas como valor inicial para a posição inicial.

Finalmente, no quinto módulo é realizado o processo de solução das ambiguidades, este é o módulo mais importante. A solução das ambiguidades se inicia com a decorrelação, após isso a busca é executada. Então, as ambiguidades inteiras são obtidas e a decisão sobre se estas estão corretas ou não é realizada. Se a PAR está sendo realizada, a decisão é baseada na taxa de sucesso. Já se a FAR estiver sendo realizada, pode-se escolher o teste Ratio ou o FF-RT como testes de validação para as ambiguidades. Após isso, se a estimativa passa no teste de decisão, as coordenadas e os outros parâmetros são melhorados a partir da precisão das ambiguidades inteiras. Se a estimativa é rejeitada no teste de decisão, a estimativa das coordenadas da época é a obtida no módulo 4.

4.2 Investigação de estratégias para o posicionamento relativo multi-GNSS

As subseções a seguir descrevem a metodologia utilizada no experimento apresentado no Capítulo 5. A seção 4.2.1 apresenta os dados, já a seção 4.2.2 apresenta os materiais utilizados.

4.2.1 Dados

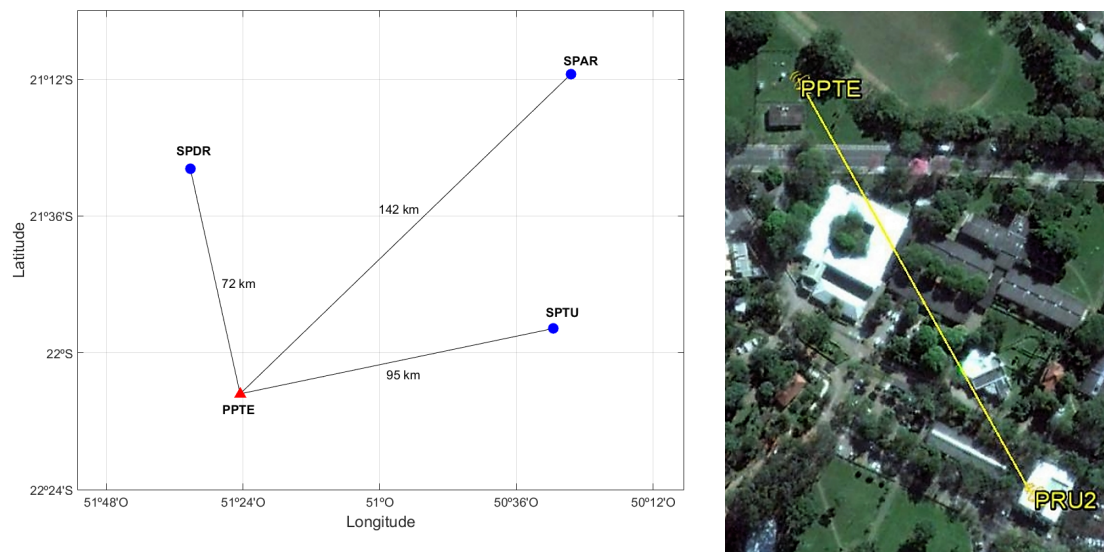
Neste experimento foram selecionadas dados de cinco estações de referência GNSS, Tabela 3, Figura 12, quatro pertencentes a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), que são: PPTE localizada na cidade de Presidente Prudente, selecionada como estação base e as estações SPAR, SPDR, SPTU, localizadas em Araçatuba, Dracena e Tupã, respectivamente (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019). A outra estação utilizada é a PRU2, que pertence a rede do INCT GNSS-NavAer. Quatro linhas de base foram utilizadas neste experimento, uma linha de base curta, com 280 m e quatro linhas de base longas que variam de 72 a 144 km.

Os dados empregados neste experimento são referentes a três dias de alta atividade ionosférica em 2019 (25, 26 e 27 de outubro de 2019) e três dias de baixa atividade ionosférica em 2019 (10, 11 e 12 de junho de 2019). O intervalo das observações GNSS

Tabela 3 – Configuração das linhas de bases utilizadas no experimento.

Linha de base	Comprimento (km)
PPTE - PRU2	0,28
PPTE - SPDR	72
PPTE - SPTU	95
PPTE SPAR	142

Figura 12 – Localização das estações utilizadas neste experimento. À esquerda: Linhas de bases longas. À direita: Linha de base formada no campus da UNESP Presidente Prudente (Google Earth).



Fonte: Elaborada pela autora.

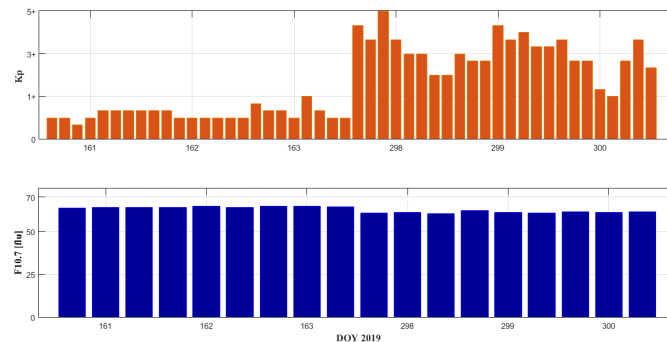
utilizadas foi de 30 s e a máscara de elevação foi de 10° . O período de dados utilizado foi de uma hora, iniciando às 14 horas local. Para mensurar a atividade solar e a variação da ionosfera durante o período dos experimentos, o índice de fluxo de rádio solar F10,7 e o índice geomagnético Kp são apresentados na Figura 13. O índice Kp é dado em intervalos de três horas e é obtido como a média dos níveis de perturbação observados a nível global a partir de observatórios geomagnéticos. O índice Kp final é determinado pelo GFZ na Alemanha (MATZKA et al., 2021).

Observe na Figura 13 que no período de alta perturbação o índice Kp atingiu 5+, ou seja, a uma forte tempestade geomagnética de magnitude G3 (o índice Kp máximo é 9o), seguido por um índice Kp de 5– e 4–, respectivamente.

4.2.2 Material empregado

No experimento foi realizado o posicionamento relativo no modo de pós-processamento utilizando dados de tripla frequência GPS e Galileo. O processamento dos dados foi realizado no FCT-RTK, um sistema computacional sem registro, desenvolvido

Figura 13 – Indicadores de atividade solar, Kp e F10,7, para os períodos utilizados neste experimento.



Fonte: Adaptada de Matzka et al. (2021).

durante esta tese (Seção 4.1).

Em relação à avaliação da qualidade do posicionamento, foi utilizado a raiz do erro médio quadrático tridimensional (REMQ 3D), calculado a partir das coordenadas oficiais das estações da RBMC atualizadas.

Este experimento foi realizado com a finalidade de analisar qual o cenário mais adequado para a solução das ambiguidades de linhas de bases longas no Brasil. A Tabela 4 apresenta os detalhes dos cenários utilizados, no qual:

EPE significa que as ambiguidades e as coordenadas foram estimadas de forma independente, época a época;

REC significa que as ambiguidades foram estimadas de forma recursiva;

HOP que o modelo Hopfield de correção da troposfera foi utilizado;

KLO significa que a ionosfera foi corrigida utilizando o modelo teórico de Klobuchar;

FLOAT significa que os efeitos ionosféricos foram estimados utilizando o modelo de ionosfera *float*;

PON significa que os efeitos ionosféricos foram estimados utilizando o modelo de ionosfera ponderada;

RZTD que o resíduo troposférico foi estimado;

ANT que os efeitos devido ao centro de fase da antena foram corrigidos utilizando o ANTEX.

Tabela 4 – Descrição dos detalhes dos cenários utilizados.

Cenário	EPE	REC	HOP	KLO	FLOAT	PON	RZTD	ANT
1	X							
2	X		X					
3	X			X				
4	X		X				X	
5	X		X		X			
6	X		X			X		
7	X		X			X		X
8		X						
9		X	X					
10		X		X				
11		X	X				X	
12		X	X		X			
13		X	X			X		
14		X	X			X		X

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3 Solução parcial das ambiguidades para o posicionamento relativo com o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo

Semelhante ao experimento anterior (Seção 4.2), a estimativa das ambiguidades inteiras foi realizada para as frequências L1, L2 e L5 do sistema GPS e E1, E5a, E5b e E5 do sistema Galileo, para duas linhas de bases, uma curta e uma longa. Duas estações pertencentes à RBMC, PPTE e SPAR e uma estação da rede INCT GNSS NavAer, PRU4, foram utilizadas.

A Tabela 5 resume a estratégia de processamento detalhada para este experimento. A órbita precisa disponibilizada pelo MGEX (CODE) em intervalos de 5 minutos foi utilizada (PRANGE et al., 2020). Para a modelagem dos erros, a correção dos centros de fase foram aplicados e o erro troposférico foi corrigido com o modelo de Hopfield, utilizando a função de mapeamento de Niell. A máscara de elevação aplicada foi de 10° e a precisão para as observáveis adotadas foi de 3 mm e 30 cm para a fase e a pseudodistância, respectivamente. Também adotou-se a taxa de sucesso de 0,995 e o limiar para o teste Ratio de 3. Os dados foram coletados no DOY 298 de 2019 com o intervalo de 30s.

Neste experimento alguns indicadores foram utilizados para analisar o desempenho do posicionamento relativo e da solução das ambiguidades: os valores críticos obtidos para o teste Ratio, o percentual de fixação das ambiguidades, o número de ambiguidades fixas e a REQM do posicionamento.

A taxa de sucesso das ambiguidades foi utilizada como critério para a solução parcial das ambiguidades, juntamente com o erro horizontal. Sua estimativa é baseada exclusivamente na MVC das ambiguidades *float* estimadas, que é disponível em todas as épocas do processamento. Além da taxa de sucesso, para contar que a PAR foi fixa, é

Tabela 5 – Estratégia de processamento adotada para este experimento.

	Modelos
Tipo de solução	Estática
Constelações	GPS, GPS + Galileo
Observações	Fase e Pseudodistância
Estimador	Filtro de Kalman
Frequências	GPS: L1/L2/L5; Galileo:E1/E5a/E5b/E5
Máscara de elevação	10°
Intervalo amostral	30 s
Ponderação	Dependente da elevação, com precisão de 3 mm para a fase e 30 cm para a pseudodistância
Ionosfera	Estimada como um processo random-walk
Troposfera	Corrigida pelo modelo de Hopfield
Satélites PCO/PCV	Corrigido utilizando IGS 14.atx
Receptor PCO/PCV	PCO/PCV valores do GPS do IGS 14.atx foram utilizados
Órbitas	MGEX (CODE)
Erro do relógio do satélite	Eliminado pela DD
Erro do relógio do receptor	Eliminado pela DD
Ambiguidades	Estimada
Limiar da taxa de sucesso	0,995
Limiar para o teste Ratio	3

necessário alcançar um erro no posicionamento horizontal melhor do que 15 cm. Quando a FAR é utilizada, o limiar do teste Ratio foi adotado como critério para avaliação, se a ambiguidade foi ou não fixa. Para a solução das ambiguidades, o método LAMBDA com a busca por encolhimento foi empregado (Seção 3.2.3.2).

INVESTIGAÇÃO DE ESTRATÉGIAS PARA O POSICIONAMENTO RELATIVO MULTI-GNSS

O posicionamento relativo pode ser beneficiado com as diferentes constelações GNSS. Este capítulo apresenta uma avaliação da qualidade dos cenários apresentados na Tabela ??, utilizando as constelações GPS e Galileo, de forma autônoma e combinada, no posicionamento relativo de linhas de base de até uma centena de quilômetros. A avaliação do desempenho das estratégias selecionadas foi baseada na acurácia das coordenadas da estação de referência “rover”, utilizando dados de tripla frequência GPS e Galileo. Os resultados obtidos foram comparados com as coordenadas oficiais das estações fornecidas pelo IBGE, atualizadas para a época dos dados processados. A partir das resultantes das discrepâncias calculadas nos processamentos foram calculados as REMQs 3D que foram utilizados nas análises.

5.1 Linha de base curta: 280 m

Nessa seção são apresentados os resultados e análises do experimento para avaliar os diferentes cenários descritos na Seção 4.2 para o posicionamento relativo de linhas de bases curtas.

5.1.1 Período de baixa atividade ionosférica

A Tabela 6 apresenta o número de satélites rastreados para a linha de base curta, considerando o período de baixa atividade ionosférica, para os sistemas GPS e Galileo, de forma autônoma e combinada. Considerando todo o período analisado, para o sistema

GPS, 8 satélites foram rastreados a cada época na média, variando entre 7 e 9 satélites. Enquanto que para o sistema Galileo, 7 satélites foram rastreados na média, variando entre 6 e 8 satélites. Para a configuração GPS+Galileo, 15 satélites foram rastreados na média, que variou entre 11 e 18 satélites rastreados em cada época.

Tabela 6 – Número de satélites rastreados para a linha de base curta (280 m), no período de baixa atividade ionosférica, para os sistemas GPS e Galileo, de forma autónoma e combinada.

Dias	GPS			Galileo			GPS + Galileo		
	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max
DOY 161	8	7	10	8	7	8	16	14	18
DOY 162	8	7	9	8	7	8	16	14	17
DOY 163	8	7	9	6	4	7	14	11	16

Fonte: Elaborada pela autora.

A Tabela 7 apresenta a REQM 3D do posicionamento para os sistemas GPS, Galileo e a combinação dos sistemas GPS e Galileo, representados por G, E e GPS+Gal, respectivamente, para cada uma das configurações analisadas (Tabela ??) para a linha de base curta (280 m).

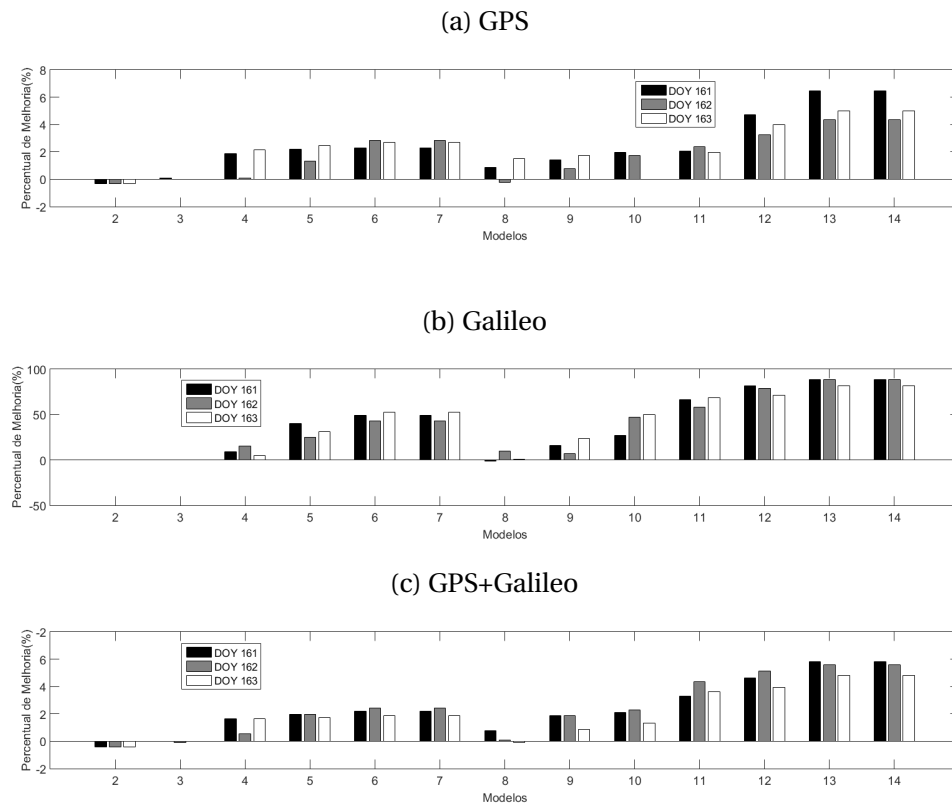
Tabela 7 – Valores obtidos para o REQM (metros) no período de baixa atividade ionosférica para a linha de base curta (280 m), em centímetros.

	DOY								
	DOY 161			DOY 162			DOY 163		
	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal
Cenário 1	9,13	61,58	9,1	9,21	79,53	9,15	9,25	49,14	9,15
Cenário 2	9,16	61,6	9,14	9,24	79,52	9,19	9,28	49,17	9,19
Cenário 3	9,12	61,6	9,1	9,21	79,5	9,16	-	49,19	9,15
Cenário 4	8,96	55,9	8,95	9,19	67,28	9,097	9,05	46,66	9,00
Cenário 5	8,93	36,7	8,923	9,09	59,76	8,97	9,02	33,88	8,99
Cenário 6	8,92	31,28	8,9	8,95	45,13	8,93	9,00	23,29	8,98
Cenário 7	8,92	31,28	8,9	8,95	45,13	8,93	9,00	23,29	8,98
Cenário 8	9,05	62,185	9,03	9,23	71,59	9,14	9,11	48,79	9,16
Cenário 9	9,00	51,67	8,93	9,14	74,17	8,98	9,09	37,45	9,07
Cenário 10	8,95	45,11	8,91	9,05	42,23	8,94	-	24,59	9,03
Cenário 11	8,94	20,62	8,8	8,99	33,05	8,75	9,07	15,47	8,82
Cenário 12	8,7	11,11	8,68	8,91	16,68	8,68	8,88	14,07	8,79
Cenário 13	8,54	7,22	8,57	8,81	8,96	8,64	8,79	8,91	8,71
Cenário 14	8,54	7,22	8,57	8,81	8,96	8,64	8,79	8,91	8,71

Fonte: Elaborada pela autora.

Com uma análise geral da Tabela 7 pode-se notar que adicionar correções aos cenários não proporcionou grandes melhorias na acurácia do posicionamento para o GPS. Nota-se também, que a introdução da correção do centro de fase da antena (Cenário 14), não apresentou nenhuma melhoria, quando comparado ao Cenário 13. Isso ocorreu devido a proximidade das estações. A Figura 14 apresenta o percentual de melhoria quando comparados cada um dos cenários, tomando como referência o Cenário 1 (sem correção).

Figura 14 – Percentual de melhoria, em comparação ao Cenário 1, na acurácia do posicionamento para a linha de base curta no período de baixa atividade ionosférica, utilizando os sistemas GPS (a), Galileo (b) e GPS+Galileo (c) de forma combinada. Preto representa o DOY 161, cinza representa o DOY 162 e branco o DOY 163.



Fonte: Elaborada pela autora.

Para avaliar o Cenário com o melhor desempenho para a linha de base curta, a Figura 14 é utilizada. Considerando o sistema GPS, Figura 14a, o Cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 13, com um percentual de melhoria médio de 5,26%, que corresponde a uma melhoria média de 4,8 mm para os três dias analisados. Tal Cenário apresentou uma melhoria de 5,9 mm, 4,0 mm e 4,6 mm para os dias 161, 162 e 163, respectivamente.

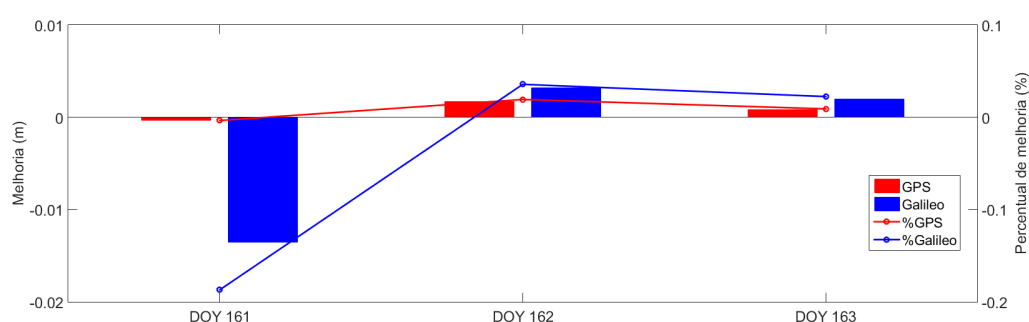
Com base na Figura 14b, tem-se que o melhor Cenário para o sistema Galileo é o Cenário 13, com um percentual médio de 86,29%, melhorando em 55,05 cm, na média, os valores obtidos para o Cenário 1. Para cada um dos dias analisados a melhoria foi de 54,36 cm, 70,57 cm e 40,23 cm para os dias 161, 162 e 163, respectivamente. A melhoria foi maior no sistema Galileo devido a não fixação das ambiguidades para o Cenário 1.

Em relação ao uso combinado dos sistemas, para a configuração GPS+Galileo, Figura 14c, o Cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 13, com um per-

centual de melhoria de 5,4%, que equivale a uma melhoria de 4,9 mm no posicionamento. Analisando quantitativamente, considerando cada um dos dias analisados, o Cenário 13 apresentou uma melhoria de 5,3 mm, 5,1 mm e 4,4 mm, respectivamente.

A melhoria ao utilizar o posicionamento GPS+Galileo é apresentada na Figura 15. O gráfico de barras apresenta a melhoria em metros, enquanto as linhas apresentam o percentual de melhoria. Os valores apresentados na cor vermelha são os resultados da melhoria ao utilizar o GPS+Galileo quando comparado ao sistema GPS, enquanto que em azul são em relação ao sistema Galileo.

Figura 15 – Melhoria do posicionamento GPS+Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base curta (280 m) no período de baixa atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

Baseado na Figura 15, considerando o período total analisado, nota-se que houve melhoria na REQM 3D, que variou entre 0,91 a 1,93% para o sistema GPS e entre 2,25 e 3,57% para o sistema Galileo. A melhoria média foi de 0,83% quando comparado o uso do GPS+Galileo ao sistema GPS e uma melhoria média de 2,91% quando comparado ao sistema Galileo. Analisando quantitativamente, a melhoria média foi de 0,7 mm e 0,2 m em relação aos sistemas GPS e Galileo, respectivamente.

Com os resultados obtidos para a linha de base curta, no período de baixa atividade ionosférica, pode-se concluir que quando são utilizados o uso de observações GPS+Galileo, a depender da aplicação, deve se considerar o uso de cenários robustos, pois a melhoria proporcionada neste experimento foi pequena devido ao custo computacional.

5.1.2 Período de alta atividade ionosférica

A Tabela 8 apresenta o número de satélites rastreados para a linha de base curta (280 m) para o período de alta atividade ionosférica, para os sistemas GPS e Galileo e GPS+Galileo.

Tabela 8 – Número de satélites rastreados para a linha de base curta (280 m), no período de alta atividade ionosférica, para os sistemas GPS e Galileo, de forma autônoma e combinada.

Dias	GPS			Galileo			GPS + Galileo		
	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max
DOY 298	7	6	8	5	4	6	12	11	13
DOY 299	7	6	8	5	5	5	12	11	13
DOY 300	7	6	8	6	5	6	13	12	14

Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando a Tabela 8, para todo o período, tem-se que 7 satélites GPS foram rastreados na média. Para o sistema Galileo, 5 satélites foram rastreados na média, enquanto que para a configuração GPS+Galileo, 12 foi o número médio de satélites rastreados. Na Tabela 9 são apresentados os valores obtidos para a REMQ, levando em consideração os cenários descritos na Seção 4.2.2 para o período de alta atividade ionosférica.

Tabela 9 – Valores obtidos para a REQM (metros) no período de alta atividade ionosférica para a linha de base curta (280 m), em centímetros.

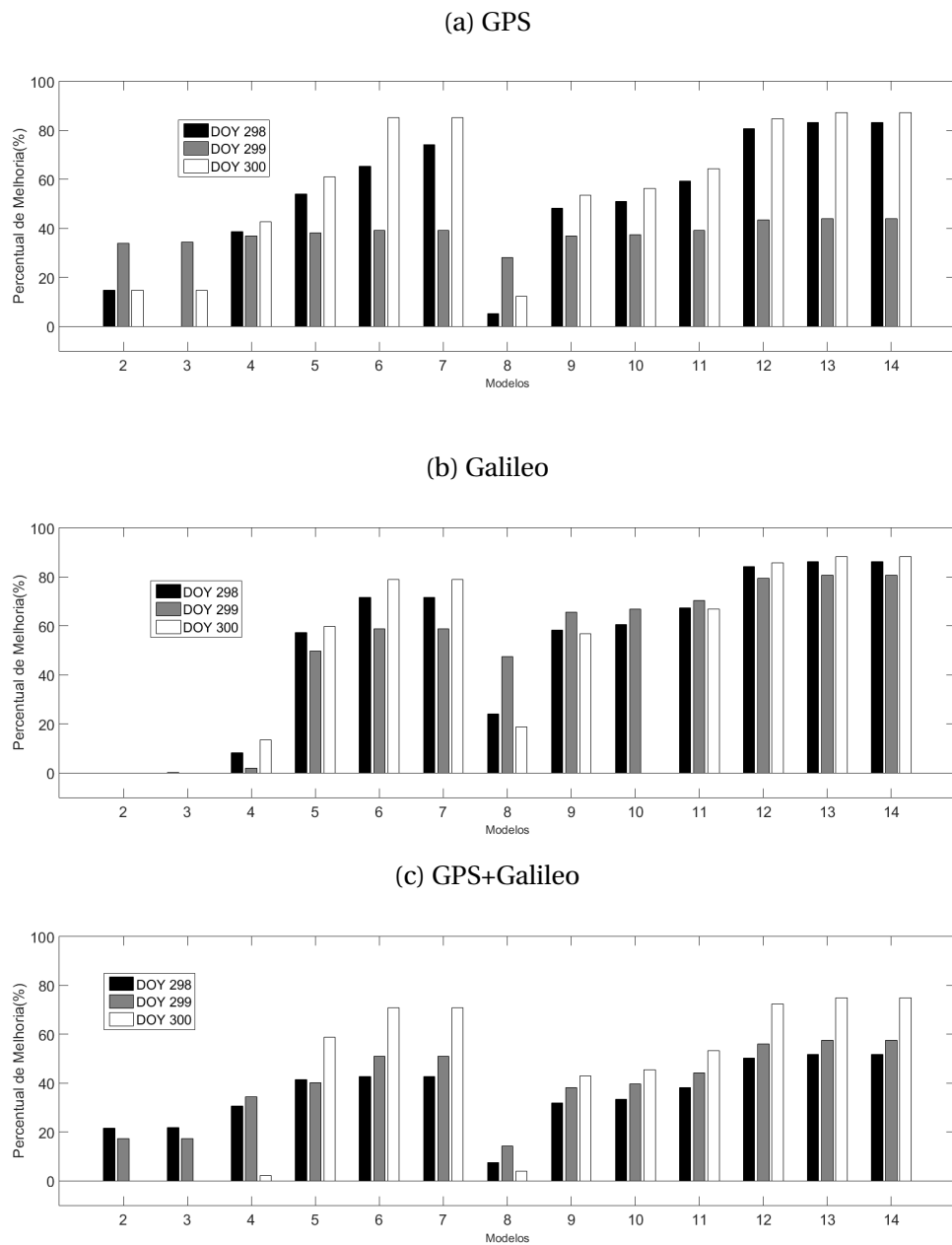
	Período de alta atividade ionosférica								
	DOY 298			DOY 299			DOY 300		
	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal
Cenário 1	42,25	82,94	14,57	14,07	98,46	16,99	68,2	69,29	29,3
Cenário 2	35,95	82,91	11,42	9,29	98,48	14,07	58,03	69,26	29,32
Cenário 3	42,25	82,86	11,4	9,23	98,53	14,03	58,03	-	29,32
Cenário 4	25,85	76,11	10,12	8,88	96,46	11,15	39,13	59,9	28,66
Cenário 5	19,45	35,32	8,51	8,69	49,36	10,16	26,55	27,89	12,05
Cenário 6	14,60	23,45	8,36	8,55	40,62	8,33	10	14,57	8,49
Cenário 7	10,84	23,45	8,36	8,55	40,62	8,33	10	14,57	8,49
Cenário 8	40,03	62,93	13,46	10,1	51,68	14,56	59,75	56,27	28,15
Cenário 9	21,89	34,59	9,91	8,87	33,76	10,52	31,66	29,83	16,71
Cenário 10	20,72	32,75	9,69	8,79	32,6	10,26	29,84	-	15,97
Cenário 11	17,13	27,14	8,99	8,55	29,06	9,46	24,28	22,89	13,71
Cenário 12	8,17	13,14	7,23	7,95	20,2	7,46	10,4	9,83	8,05
Cenário 13	7,04	11,37	7,01	7,87	19,08	7,21	8,65	8,18	7,34
Cenário 14	7,04	11,37	7,01	7,87	19,08	7,21	8,65	8,18	7,34

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao contrário do que os resultados do período de baixa atividade mostram, no período de alta atividade ionosférica (Tabela 9) a introdução de correções apresentou benefícios significativos. No caso do Cenário 14, o mesmo comportamento ocorreu, ou seja, não houve nenhum benefício ao introduzir as correções referentes aos centros de fase da antena. Para definir qual o melhor Cenário para cada um dos sistemas, GPS, Galileo ou Combinado, a Figura 16 apresenta o percentual de melhoria quando comparados cada um cenários, tomando como referência o Cenário 1 (sem correção).

Baseado na Figura 16a, tem-se que o melhor Cenário para o sistema GPS é o

Figura 16 – Percentual de melhoria em comparação ao Cenário 1 para a linha de base curta, para os sistemas GPS, Galileo e GPS+Galileo.



Fonte: Elaborada pela autora.

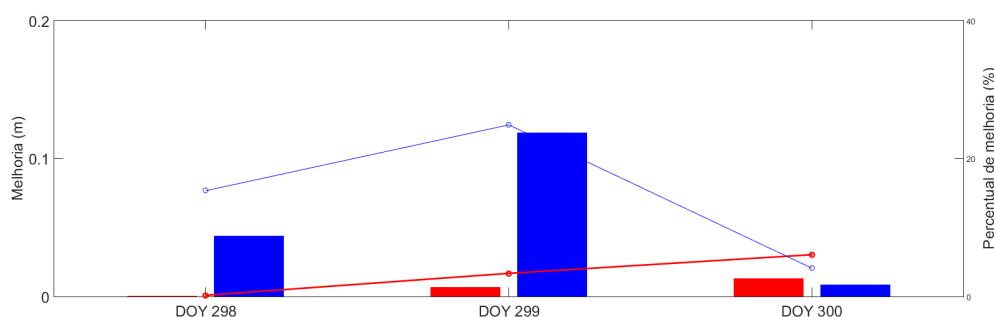
Cenário 13, com um percentual de melhoria médio de 71,6%, que corresponde a uma melhoria média de 33,65 cm para os três dias analisados. Tal Cenário apresentou uma melhoria de 35,21 cm, 6,2 cm e 59,55 cm para os dias 298, 299 e 300, respectivamente.

Com a análise da Figura 16b, tem-se que o melhor Cenário para o sistema Galileo é o Cenário 13, com um percentual médio de 85,06%, melhorando em 70,69 cm, na média, comparados aos valores obtidos para o Cenário 1. Para cada um dos dias analisados a melhoria foi de 71,57 cm, 79,38 cm e 61,11 cm para os dias 298, 299 e 300, respectivamente.

Já para o uso combinado dos sistemas, Figura 16c, o Cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 13, com um percentual de melhoria de 61,5%, que equivale a uma melhoria de 13,10 cm no posicionamento. Analisando quantitativamente, considerando cada um dos dias analisados, o Cenário 13 apresentou uma melhoria de 5,3 cm, 5,1 cm e 4,4 cm, respectivamente.

Para ilustrar os resultados obtidos com o posicionamento GPS+Galileo, a Figura 17 apresenta a melhoria e o percentual de melhoria, no gráfico de barras e no gráfico de linhas, respectivamente, comparando aos resultados do posicionamento com os sistemas isolados, GPS e Galileo, com o melhor Cenário obtido no posicionamento das diferentes configurações.

Figura 17 – Melhoria do posicionamento GPS+Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base PPTE – PRU2 no período de alta atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

Baseado na Figura 17, considerando o período total analisado, nota-se que houve melhoria na REQM 3D. A melhoria média foi de 8% quando comparado o uso do GPS+Galileo ao sistema GPS e uma melhoria média de 36,9% quando comparado ao sistema Galileo. Analisando quantitativamente, a melhoria média foi de 5,69 cm e 0,67 cm em relação aos sistemas GPS e Galileo, respectivamente.

5.1.3 Conclusões para a linha de base curta

De maneira geral fica clara a diferença entre os períodos de baixa e alta atividade ionosférica. No período de baixa, a introdução de correções apresentou uma melhoria média de 32,3%, considerando todas as configurações, GPS, Galileo e GPS+Galileo e comparando o Cenário 13 ao Cenário 1. Enquanto que para o período de alta a melhoria média foi de 72,7%. Em termos quantitativos, tais percentuais correspondem a uma melhoria de 18,68 cm e 39,15 cm para os períodos de baixa e alta, respectivamente.

Comparando o posicionamento instantâneo (Cenário 6) com o recursivo (Cenário 13), tem-se que para todas as configurações houve uma melhoria ao utilizar o posicionamento recursivo. Para o sistema GPS, a melhoria média foi de 18,8% e 2,7% para os períodos de alta e baixa, respectivamente. Enquanto que para o sistema Galileo, a melhoria média foi de 72,9%, equivalendo a 24,87 cm para o período de baixa e 49,5%, com 13,34 cm para o período de alta atividade ionosférica. Já para a configuração GPS+Galileo, a melhoria média foi de 3,3% e 14,4%, para os períodos de baixa e alta atividade ionosférica. Com os resultados obtidos, recomenda-se o uso do posicionamento instantâneo para o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo, ou apenas o sistema GPS autônomo.

Com relação ao benefício de utilizar observações de múltiplos sistemas, os resultados evidenciaram que tal uso é mais vantajoso quando as ambiguidades não são fixadas no uso de observações do sistema autônomo. Tal melhoria pode ser observada na introdução de observação GPS a observações do sistema Galileo, que apresentou uma melhoria média de 16,3%. Cabe ressaltar que maiores detalhes relativos a solução das ambiguidades serão apresentados no próximo capítulo, cujas análises serão avaliadas no domínio da AR, utilizando indicadores como o percentual de fixação das ambiguidades, juntamente com a acurácia do posicionamento.

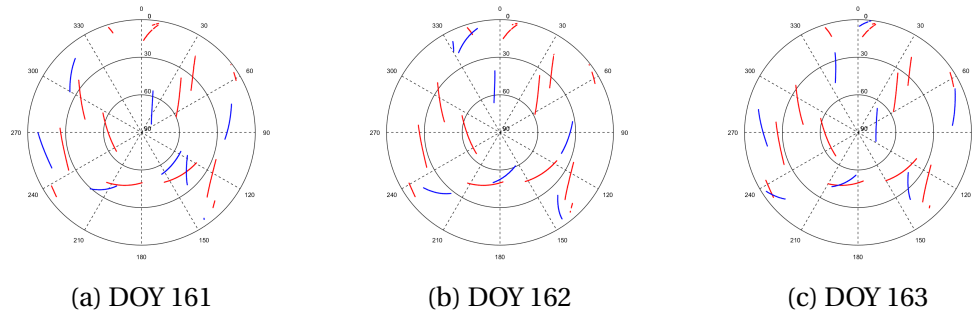
Por fim, os resultados obtidos com a realização deste experimento evidenciam o potencial do sistema científico desenvolvido nesta tese. Cabe ressaltar que outras investigações poderiam ser realizadas, como a análise dos índices de multicaminho das estações visando aumentar a acurácia obtida no posicionamento. Outro ponto a destacar é a realização do posicionamento relativo utilizando apenas observações do sistema Galileo, uma vez que existem poucas possibilidades de softwares que realizam este tipo de posicionamento.

5.2 Linhas de bases longas: Período de baixa atividade ionosférica

As Figuras 18a, 18b e 18c apresentam o diagrama polar para a estação PPTE, estação base do processamento, nos dias 10, 11 e 12 de junho de 2019, que correspondem ao Dia do Ano (DOY – *Day Of Year*) 161, 162 e 163 de 2019. Para os DOY 161 e 163, a combinação GPS+Galileo faz com que se tenha disponível dois satélites com elevação

superior a 60° , melhorando a geometria da configuração. Enquanto que para o dia 162 pelo menos um satélite estará nesta configuração.

Figura 18 – Diagramas polares para os dias 10, 11 e 12 de junho de 2019 na estação PPTE, para os sistemas GPS e Galileo, em vermelho e azul, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

5.2.1 Linha de base longa (72 km)

A Tabela 10 apresenta o número de satélites rastreados para a linha de base longa (72 km), PPTE – SPDR, para os DOY 161, 162 e 163 de 2019, para os sistemas GPS e Galileo e a soma destes, considerado como GPS+Galileo.

Tabela 10 – Número de satélites rastreados para a linha de base longa (72 km), no período de baixa atividade ionosférica, para os sistemas GPS e Galileo, de forma autônoma e combinada.

Dias	GPS			Galileo			GPS + Galileo		
	Média	Min.	Max.	Média	Min.	Max.	Média	Min.	Max.
DOY 161	8	6	9	8	6	8	16	13	17
DOY 162	7	8	9	8	6	8	16	15	17
DOY 163	8	7	9	7	4	7	15	11	16

Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme a Tabela 10 o número de satélites rastreados para os DOY 161 e DOY 162, varia entre 7 e 9, para o sistema GPS com uma média de 8 satélites rastreados a cada época. Já para o sistema Galileo, a média é de 7 satélites, variando entre 6 e 8. No DOY 163, a média de satélites rastreados é de 8 para o sistema GPS, variando entre 7 e 9, enquanto que para o sistema Galileo a média é de 6 satélites rastreados, variando entre 4 e 7.

Considerando todo o período analisado, a Tabela 11 apresenta a REQM 3D do posicionamento para os sistemas GPS, Galileo e a combinação dos sistemas GPS e Galileo, representados por G, E e GPS+Galileo, respectivamente, para cada uma das configurações analisadas (Tabela ??) para a linha de base PPTE – SPDR.

Tabela 11 – REMQ 3D (metros) obtidos para o período de baixa atividade ionosférica para a linha de base PPTE - SPDR (72 km).

Cenário	Período de baixa atividade ionosférica								
	DOY 161			DOY 162			DOY 163		
	G	E	GPS+Galileo	G	E	GPS+Galileo	G	E	GPS+Galileo
1	1,81	0,80	0,95	1,75	1,04	0,80	1,93	1,19	0,80
2	1,79	0,82	0,82	1,72	1,06	0,77	1,51	1,21	0,74
3	1,74	1,05	0,84	1,68	1,14	0,74	-	1,15	0,77
4	1,55	0,68	0,81	1,49	0,89	0,83	1,97	1,30	0,97
5	1,35	0,70	0,70	1,48	0,91	0,81	1,54	1,32	0,90
6	1,05	0,86	0,55	1,24	1,19	0,77	1,13	1,26	0,93
7	1,05	0,86	0,53	1,10	0,93	0,86	1,02	1,43	0,92
8	1,52	0,67	0,80	1,47	0,70	0,63	2,18	1,21	0,89
9	1,51	0,79	0,69	1,32	0,69	0,59	1,23	0,97	0,70
10	1,21	0,99	0,64	1,30	0,74	0,55	-	0,85	0,76
11	1,13	0,50	0,60	1,10	0,69	0,50	1,08	1,43	0,68
12	1,02	0,60	0,60	0,96	0,68	0,48	0,99	0,91	0,66
13	0,63	0,71	0,45	0,82	0,57	0,46	0,83	0,78	0,59
14	0,62	0,67	0,41	0,80	0,56	0,44	0,82	0,76	0,58

Fonte: Elaborada pela autora.

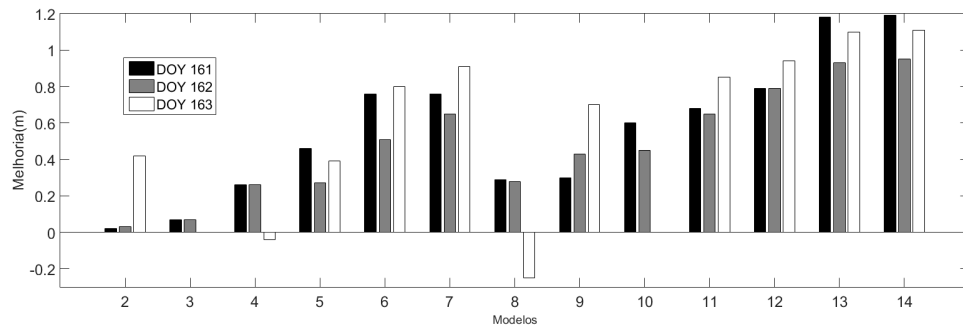
Com a análise da Tabela 11 fica claro que a introdução de correções apresentou melhorias na acurácia do posicionamento, bem como o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo quando comparado ao uso isolado dos sistemas GPS e Galileo.

A Figura 19 apresenta a melhoria dos cenários em relação ao Cenário 1, em metros, para os sistemas GPS, Galileo e o GPS + Galileo, para a linha de base PPTE – SPDR. Os dados apresentados em preto representam o DOY 161, enquanto que em cinza correspondem ao DOY 162 e em branco ao DOY 163.

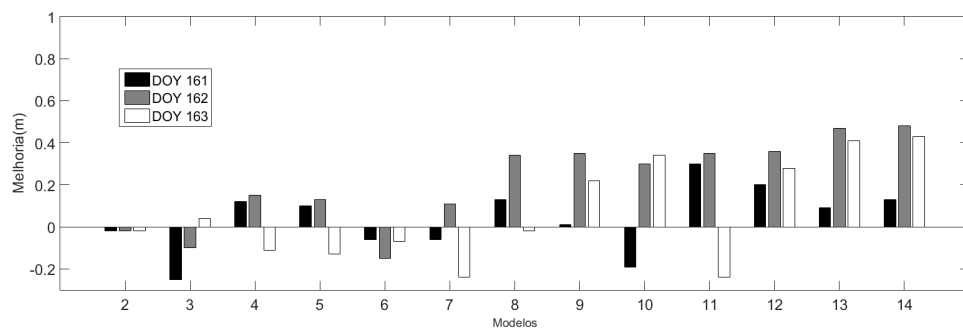
Analisando em relação ao sistema GPS, Figura 19a, considerando os três dias, o cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 14, que considera as ponderações da ionosfera, obtendo um percentual de melhoria de 59,2% comparado ao Cenário 1. Quantitativamente, a melhoria obtida foi de 1,08 m, tendo obtido até 1,20 m de melhoria para o DOY 161. A piora ocorrida para o Cenário 8, no DOY 163, pode ter sido ocasionada devido a oscilações no número de satélites rastreados, que ocasiona perdas de ciclos, fazendo com que o cenário não tivesse o desempenho esperado (Figura ??).

A Figura 19b apresenta a melhoria, em metros, para o sistema Galileo. Como pode-se observar o cenário que apresentou o melhor percentual de melhoria foi o Cenário 14, com 32,9%, que corresponde a uma melhoria média de 0,35 m para os três dias analisados. Analisando quantitativamente, a melhoria máxima obtida foi de 0,43 m para o DOY 161, obtido com o Cenário 14. Para o DOY 163, muitos cenários apresentam uma piora quando comparado ao cenário 1, isso pode ter sido ocasionado devido ao baixo número de satélites rastreados e à baixa elevação dos mesmos (Figura 18c).

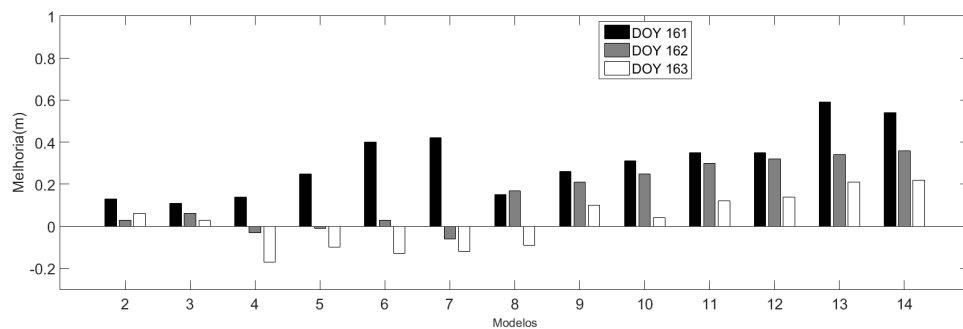
Figura 19 – Melhoria, em metros, dos cenários em relação ao Cenário 1, para a linha de base PPTE – SPDR, para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.



(a) GPS



(b) Galileo



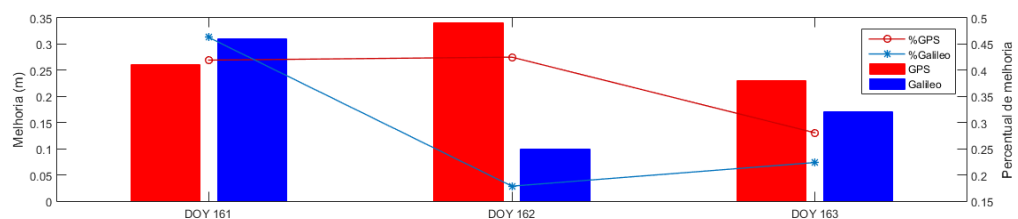
(c) GPS + Galileo

Fonte: Elaborada pela autora.

É interessante notar o comportamento da série de melhoria para o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo, acompanha o comportamento dos resultados obtidos para o sistema Galileo. No entanto, foi obtida uma magnitude um pouco maior, de 0,59 m quando comparada a melhoria máxima obtida pelo melhor Cenário, que no caso do GPS + Galileo, foi o Cenário 13, apesar da diferença, na média, ter sido mínima quando comparado ao cenário 14. Assim, para o caso GPS + Galileo, o percentual de melhoria do melhor cenário foi de 43,6%, o que representa, em termos quantitativos, uma melhoria de 0,38 m para os três dias analisados.

Ainda com relação aos resultados obtidos para o posicionamento GPS + Galileo, a Figura 20 apresenta a melhoria, no gráfico de barras, e o percentual de melhoria, no gráfico de linhas, deste em relação ao posicionamento dos sistemas isolados, GPS e Galileo, com o melhor cenário obtido no posicionamento das diferentes configurações.

Figura 20 – Melhoria do posicionamento GPS + Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base PPTE – SPDR no período de baixa atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

Com base na Figura 20, considerando o período total analisado, nota-se que houve melhoria na REQM 3D, que variou entre 28 a 42,5% para o sistema GPS e entre 17,8 e 46,2% para o sistema Galileo. A melhoria média foi de 37,5% quando comparado o uso do GPS + Galileo ao sistema GPS e uma melhoria média de 28,8% quando comparado ao sistema Galileo. Analisando quantitativamente, a melhoria média foi de 27,7 cm e 19,3 cm em relação aos sistemas GPS e Galileo, respectivamente.

5.2.2 Linha de base longa (95 km)

A Tabela 12 apresenta o número de satélites rastreados. Considerando todo o período, a quantidade de satélites rastreados foi 8 para o GPS, 8 para o Galileo e 16 para o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo.

Levando em consideração o período analisado, a Tabela 13 apresenta a REQM 3D do posicionamento com os diferentes sistemas, para cada uma das configurações utilizadas no experimento (Seção 4.2.2) para a linha de base longa (95 km), PPTE – SPTU.

Tabela 12 – Número de satélites rastreados para o período de baixa atividade ionosférica para a linha de base longa (95 km), para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.

Dias	GPS			Galileo			GPS + Galileo		
	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max
DOY 161	8	7	10	8	6	8	16	13	18
DOY 162	8	7	9	8	7	8	16	14	17
DOY 163	8	7	9	7	4	7	15	11	16

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 13 – REQM (metros) obtidas para o período de baixa atividade ionosférica para a linha de base longa (95 km).

	Período de baixa atividade ionosférica								
	161			162			163		
	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal
Cenário 1	1,46	1,14	1,11	1,28	1,89	0,92	1,27	1,77	1,00
Cenário 2	1,51	1,04	1,03	1,25	1,84	0,91	1,22	1,67	0,97
Cenário 3	3,05	1,03	1,03	2,10	1,77	0,91	-	0,95	0,97
Cenário 4	1,23	0,96	0,93	1,08	1,27	0,89	1,06	1,51	0,85
Cenário 5	1,04	0,93	0,79	0,82	0,70	0,59	0,85	1,08	0,64
Cenário 6	0,73	0,87	0,61	0,68	0,67	0,55	0,74	0,68	0,51
Cenário 7	0,72	0,64	0,54	0,60	0,65	0,52	0,73	0,50	0,49
Cenário 8	1,25	0,97	0,95	1,10	1,62	0,78	1,43	1,80	1,11
Cenário 9	1,30	0,89	0,89	1,07	1,57	0,71	0,99	1,35	0,92
Cenário 10	2,61	0,88	0,89	1,79	1,51	0,81	-	0,70	0,83
Cenário 11	1,06	0,82	0,80	0,92	1,09	0,64	1,09	1,66	1,03
Cenário 12	0,79	0,79	0,68	0,71	0,60	0,41	0,73	1,18	0,68
Cenário 13	0,44	0,62	0,40	0,51	0,53	0,36	0,67	0,75	0,40
Cenário 14	0,42	0,52	0,39	0,47	0,53	0,35	0,64	0,75	0,37

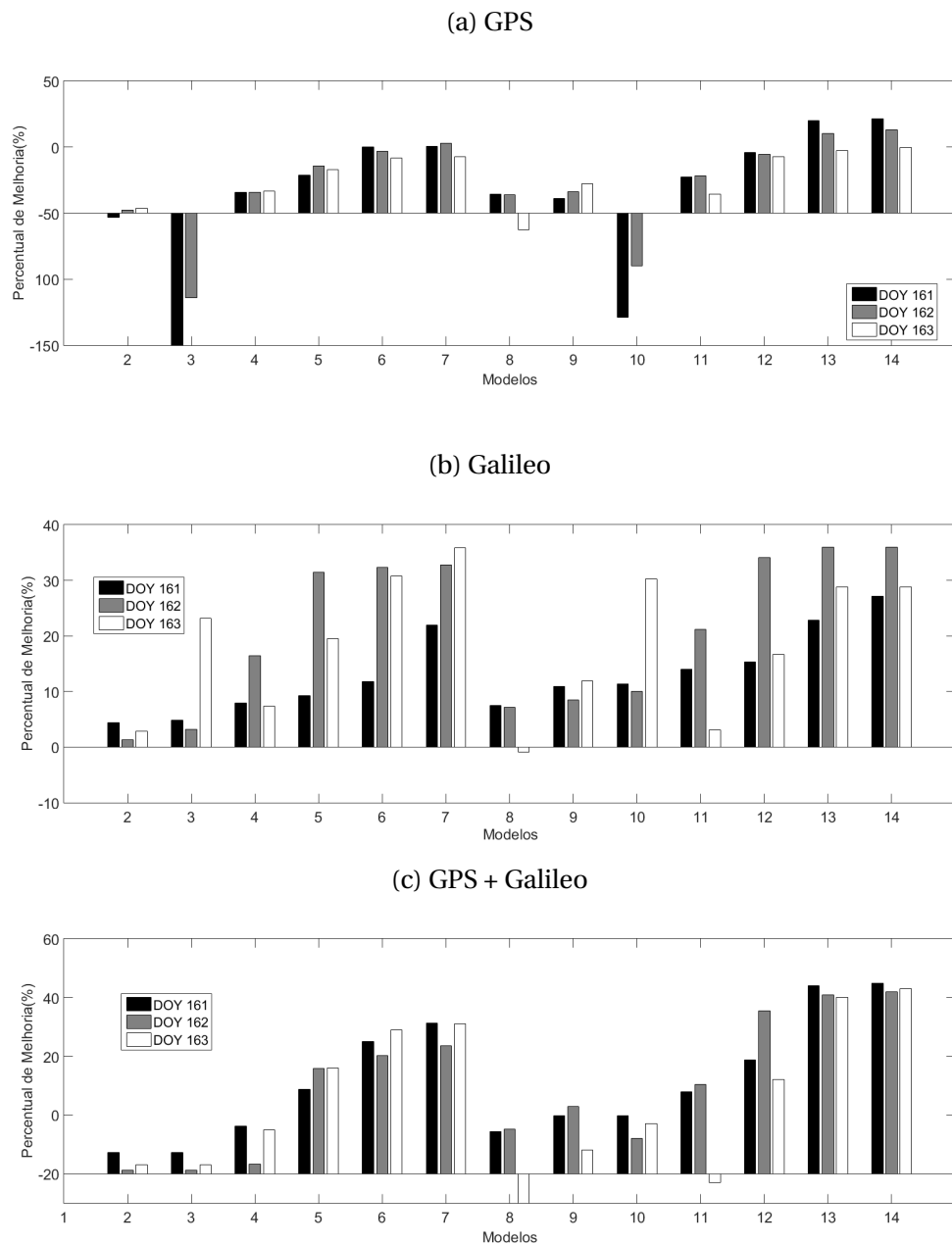
Fonte: Elaborada pela autora.

Com uma análise geral da Tabela 13 pode-se notar que adicionar correções aos cenários proporcionou uma melhoria na acurácia do posicionamento. A Figura 21 apresenta o percentual de melhoria quando comparados cada um cenários, tomando como referência o Cenário 1 (sem correção).

Para avaliar o cenário com o melhor desempenho para a linha de base de 95 km, a Figura 21 será utilizada. Considerando o sistema GPS, Figura 21a, o cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 14, com um percentual de melhoria médio de 61,4%, que corresponde a uma melhoria média de 0,82 m para os três dias analisados. Tal cenário apresentou uma melhoria de 1,04 m, 0,81 m e 0,63 m para os dias 161, 162 e 163, respectivamente. Os cenários 3 e 14, que utilizam o cenário matemático de Klobuchar para a correção da ionosfera, apresentaram uma piora em relação ao Cenário 1 para esta linha de base e investigações adicionais deverão ser realizadas.

Com a análise da Figura 21b, tem-se que o melhor cenário para o sistema

Figura 21 – Percentual de melhoria, dos cenários em relação ao Cenário 1, para a linha de base longa (95 km), para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.



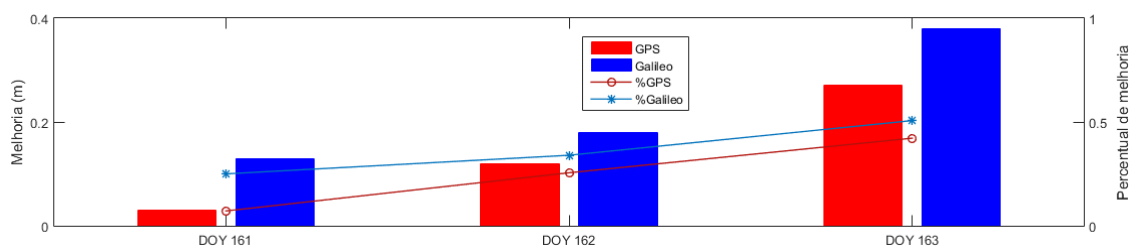
Fonte: Elaborada pela autora.

Galileo é o Cenário 14, com um percentual médio de 61,2%, melhorando em 1 m, na média, os valores obtidos para o Cenário 1. Para cada um dos dias analisados a melhoria foi de 0,62 m, 1,36 m e 1,02 m para os dias 161, 162 e 163, respectivamente. A pequena piora apresentada para o Cenário 8, no dia 163, deve ter sido ocasionada devido a oscilações no número de satélites rastreados, que ocasiona perdas de ciclos, fazendo com que o cenário não tivesse o desempenho esperado.

Em relação ao uso combinado dos sistemas, para a configuração GPS + Galileo, Figura 21c, o cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 14, com um percentual de melhoria de 63,3%, que equivale a uma melhoria de 0,64 m no posicionamento. O Cenário 8, que apresentou um ligeiro deterioramento nos resultados para o dia 163, que pode ter ocorrido devido a variação do números de satélites rastreados, considerando a baixa elevação dos mesmos (Figura 18c). Analisando quantitativamente, considerando cada um dos dias analisados, o Cenário 14 apresentou um melhoria de 0,72 m, 0,57 m e 0,63 m, respectivamente.

A Figura 22 apresenta o benefício ao utilizar o posicionamento combinado dos sistemas GPS e Galileo, em relação ao uso isolado destes. No gráfico de barras é apresentada a melhoria em termos quantitativos, metros, enquanto que o gráfico de linhas apresenta o percentual. Os valores apresentados na cor vermelha são os resultados da melhoria ao utilizar o GPS + Galileo quando comparado ao sistema GPS, enquanto que em azul são em relação ao sistema Galileo.

Figura 22 – Melhoria do posicionamento combinado GPS + Galileo em relação ao uso dos sistemas GPS e Galileo, de forma isolada, para a linha de base de 95 km no período de baixa atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

Com a análise da Figura 22, tem-se que a melhoria ao utilizar os sistemas GPS e Galileo quando comparado ao sistema GPS foi de 25% e de 36,5% quando comparado ao sistema Galileo. Considerando todo o período analisado, obtém-se uma média de 14 cm quando comparado o uso combinado ao sistema GPS e de 23 cm em relação ao sistema Galileo.

5.2.3 Linha de base longa (142 km)

A Tabela 14 apresenta o número de satélites rastreados para a linha de base longa com 142 km para os dias analisados.

Tabela 14 – Número de satélites rastreados para o período de baixa atividade ionosférica para a linha de base de 142 km, para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.

Dias	GPS			Galileo			GPS + Galileo		
	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max
DOY 161	8	8	10	8	6	8	16	13	18
DOY 162	8	7	9	8	6	8	16	14	17
DOY 163	8	7	9	7	4	7	14	11	16

Fonte: Elaborada pela autora.

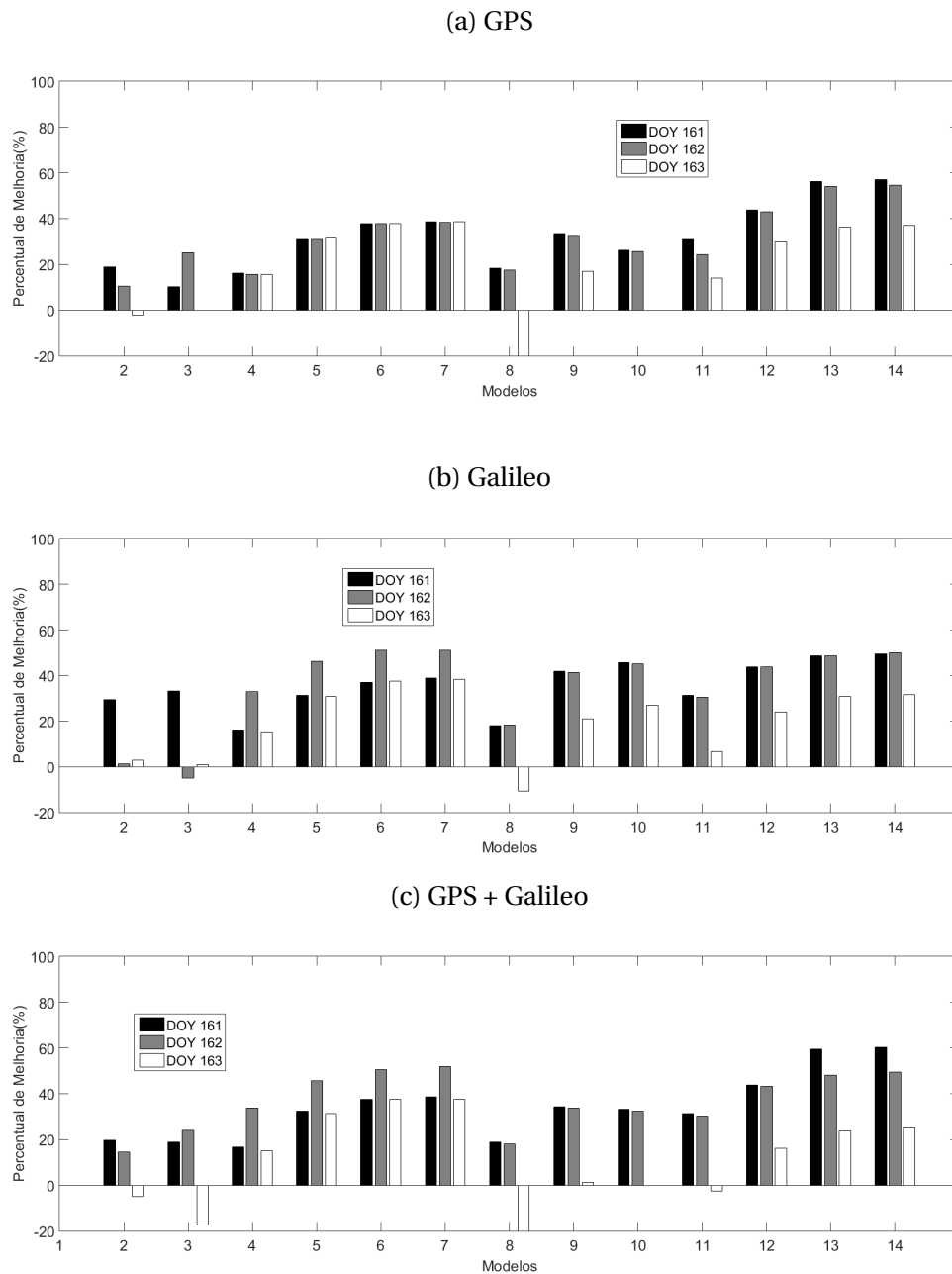
De acordo com a Tabela 14, o número de satélites rastreados para o dia 161, varia entre 7 e 10, para o sistema GPS com uma média de 8 satélites rastreados a cada época. Para o sistema Galileo, a média é de 7 satélites, variando entre 6 e 8. Para o dia 162, o número médio de satélites GPS rastreados foi 8, que variou entre 7 e 9 satélites a cada época. Enquanto para o Galileo foram rastreados uma média de 7 satélites, variando entre 6 e 8. No dia 163, o número médio de satélites GPS rastreados foi de 8, que variou entre 7 e 9 satélites rastreados. Para o sistema Galileo, o número médio foi de 6 satélites a cada época, variando de 4 a 7 satélites. Considerando a configuração GPS + Galileo, o número médio de satélites rastreados para os dias 161 e 162, foi de 15 satélites, variando entre 13 e 18 satélites rastreados a cada época. Para o dia 163, foram rastreados 14 satélites na média, que variou entre 11 e 16 satélites rastreados a cada época.

A Tabela 15 apresenta os valores obtidos para a REQM, considerando todas as configurações descritas na Seção 4.2.2.

A partir da Tabela 15 pode-se observar que os cenários apresentaram uma melhoria quando da introdução de correções. Para verificar qual o melhor cenário para cada uma das configurações, a Figura 23 é apresentada.

Com a análise em relação ao sistema GPS, Figura 23a, considerando os três dias, nota-se que houve melhoria na introdução das correções na REQM 3D, em grande parte dos cenários, melhoria esta que variou entre aproximadamente 10,5 e 56,9%. O cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 14, pois obteve um percentual de melhoria de 49,5%. Em termos numéricos, esse percentual corresponde a uma melhoria média de 74cm, tendo obtido até 94cm para o dia 162. A piora ocorrida para o Cenário 8, no DOY 163, pode ter sido ocasionada devido a oscilações no número de satélites rastreados, que ocasiona perdas de ciclos, fazendo com que o cenário não tivesse o desempenho esperado.

Figura 23 – Percentual de melhoria em comparação dos cenários descritos na Seção 4.2.2 em comparação ao cenário sem correção (Cenário 1) para a linha de base longa (142 km), para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 15 – Valores obtidos para a REQM (metros) no período de baixa atividade ionosférica para a linha de base longa (142 km).

	Período de baixa atividade ionosférica								
	161			162			163		
	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal
Cenário 1	1,37	1,05	0,96	1,72	0,82	0,83	1,35	1,04	0,80
Cenário 2	1,11	0,74	0,77	1,54	0,81	0,71	1,38	1,01	0,84
Cenário 3	1,23	0,70	0,78	1,29	0,86	0,63	-	1,03	0,94
Cenário 4	1,15	0,88	0,80	1,45	0,55	0,55	1,14	0,88	0,68
Cenário 5	0,94	0,72	0,65	1,18	0,44	0,45	0,92	0,72	0,55
Cenário 6	0,85	0,66	0,60	1,07	0,40	0,41	0,84	0,65	0,50
Cenário 7	0,84	0,64	0,59	1,06	0,40	0,40	0,83	0,64	0,50
Cenário 8	1,12	0,86	0,78	1,42	0,67	0,68	1,91	1,15	0,98
Cenário 9	0,91	0,61	0,63	1,16	0,48	0,55	1,12	0,82	0,79
Cenário 10	1,01	0,57	0,64	1,28	0,45	0,56	-	0,76	0,80
Cenário 11	0,94	0,72	0,66	1,30	0,57	0,58	1,16	0,97	0,82
Cenário 12	0,77	0,59	0,54	0,98	0,46	0,47	0,94	0,79	0,67
Cenário 13	0,60	0,54	0,39	0,79	0,42	0,43	0,86	0,72	0,61
Cenário 14	0,59	0,53	0,38	0,78	0,41	0,42	0,85	0,71	0,60

Fonte: Elaborada pela autora.

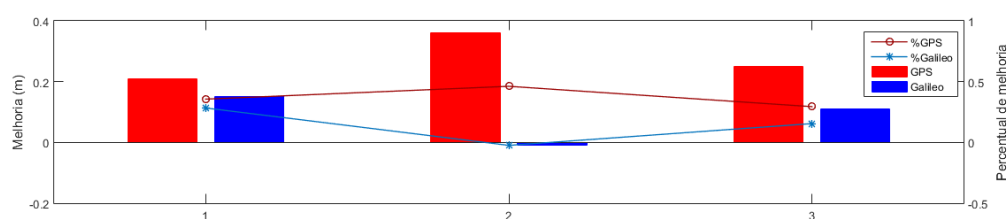
Para o sistema Galileo, Figura 23b, levando em consideração o período analisado, o Cenário 14 foi o que apresentou o maior percentual de melhoria médio, de 43,8% que representa uma melhoria de 42 cm, que chegou a 52 cm para o dia 161. Cabe ressaltar que o Cenário 13, também apresentou bom desempenho para o Galileo durante o período analisado, tendo sido apenas 1% inferior do que o Cenário 14.

Com relação aos resultados obtidos para o posicionamento GPS + Galileo, Figura 23c, considerando o período total analisado, nota-se que houve melhoria na introdução das correções nos cenários, que variou entre aproximadamente 1,2 e 60,4%. O cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 14, com um percentual médio de 44,9% que condiz com uma melhoria média de 39,6cm. A melhoria máxima obtida por este cenário foi de 58cm para o dia 161.

A Figura 24 apresenta a melhoria no uso dos sistemas GPS e Galileo combinados comparado ao uso isolado dos sistemas. O gráfico de barras apresenta a melhoria em metros, enquanto as linhas apresentam o percentual de melhoria. Os valores apresentados na cor vermelha são os resultados da melhoria ao utilizar o GPS + Galileo quando comparado ao sistema GPS, enquanto que em azul são em relação ao sistema Galileo.

Com a análise da Figura 24 nota-se que para o dia 162, o uso de observações GPS + Galileo apresentou uma ligeira deterioração, 1cm, nos resultados, quando comparado ao sistema Galileo. Apesar disso, o percentual de melhoria médio do uso dos sistemas combinados foi de 37% quando ao sistema GPS e 13,8% quando comparado ao sistema Galileo. Considerando todo o período analisado, a melhoria média foi de 27,4 cm quando

Figura 24 – Melhoria do posicionamento GPS + Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base longa com 142 km para período de baixa atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

comparado o uso combinado ao sistema GPS e de 8,3 cm em relação ao sistema Galileo.

5.2.4 Conclusões para o período de baixa atividade ionosférica

Neste experimento, buscou-se avaliar alguns cenários, a partir da acurácia obtida no Posicionamento relativo utilizando observações de múltiplos sistemas GNSS para o período de baixa atividade ionosférica. Foram utilizados os sistemas GPS e Galileo de modo autônomo e combinado, denominado GPS+Galileo.

Para o período de baixa atividade ionosférica, pode-se concluir que dentre todos os cenários analisados o que apresentou melhor desempenho foi o Cenário 14, com um percentual de melhoria médio de 51% que variou entre 32,9 a 63,6%, considerando todas as configurações e dias analisados. Correspondendo a uma melhoria de aproximadamente 67 cm.

Para o sistema GPS, considerando todas as linhas de base, o percentual de melhoria do Cenário 14 quando comparado ao Cenário 1 (sem correção) foi de 56,6%, variando entre 49,5 e 61,4%. Enquanto que para o Galileo, a melhoria foi de aproximadamente 46%, equivalendo a uma melhoria de 59 cm. Já para a combinação GPS+Galileo, o percentual médio foi de 50% que representa um melhoria de aproximadamente 54 cm.

Sumarizando todos os resultados obtidos quanto ao REQM, para o Cenário 14 pode-se concluir que independente das configurações adotadas o erro obtido foi de 56 cm. Considerando todo o período e estações analisadas, o posicionamento GPS obteve a REQM 3D de 66,5 cm e a REQM 3D do posicionamento Galileo é de 58,8 cm. Já para o posicionamento combinado GPS+Galileo é de 43,7 cm, representando uma melhoria de 34,2% e 25,6% em relação aos sistemas GPS e Galileo, respectivamente.

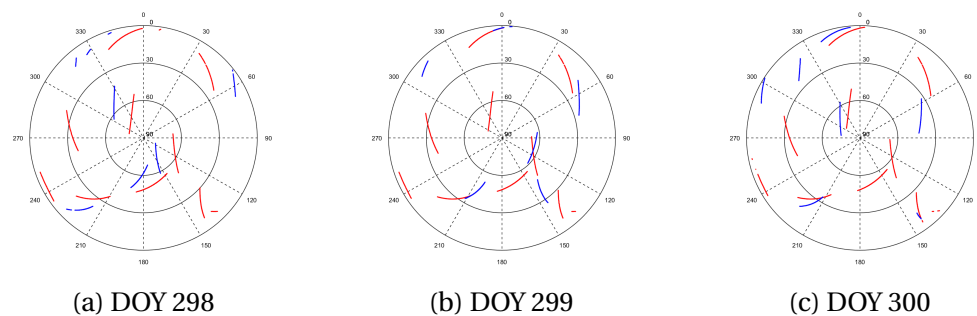
Em relação à melhoria obtida com o uso de dados combinados GPS e Galileo, considerando todos os dias analisados, independente da linha de base e sistema, houve uma melhoria de 29,9% correspondendo a 18,9 cm de melhoria. Comparando o uso dos

sistemas combinados com o sistema GPS autônomo, a melhoria média foi 23 cm. Quando comparado ao sistema Galileo essa melhoria foi de 15 cm.

5.3 Linhas de bases longas: Período de alta atividade ionosférica

As Figuras 25a, 25b e 25c apresentam os diagramas polares para a estação PPTE, estação base do processamento, nos dias 25, 26 e 27 de outubro de 2019, que correspondem aos dias 298, 299 e 300 de 2019. Para o período de alta atividade ionosférica, Figura 25, a combinação dos sistemas faz com se tenha pelo menos dois satélites com elevação superior a 60° , melhorando a geometria da configuração, para cada um dos dias analisados.

Figura 25 – Diagramas polares para os dias 25, 26 e 27 de outubro de 2019 na estação PPTE, para os sistemas GPS e Galileo, em vermelho e azul, respectivamente.



5.3.1 Linha de base longa (72 km)

A Tabela 16 apresenta o número de satélites rastreados para a linha de base com 72 km para os dias 298, 299 e 300 de 2019, para os sistemas GPS e Galileo e GPS + Galileo.

Tabela 16 – Número de satélites rastreados no período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (142 km).

Dias	GPS			Galileo			GPS + Galileo		
	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max
DOY 298	7	6	8	5	4	5	11	10	12
DOY 299	7	6	8	5	4	6	12	10	14
DOY 300	7	6	8	5	5	6	12	11	14

Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando a Figura ??, tem-se que o número médio de satélites GPS rastreados é de 7 satélites. Já para o sistema Galileo, 5 satélites foram rastreados na média, enquanto que para os sistemas combinados GPS e Galileo 12 foi o número médio de satélites rastreados.

Considerando os dados de todos os dias analisados neste experimento, a Tabela 17 apresenta a REQM 3D do posicionamento GPS, Galileo e GPS + Galileo, para a linha de base com 72 km, para cada um dos cenários descritos na Seção 4.2.2.

Tabela 17 – Valores da REQM (metros) obtidos para o período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (72 km).

Cenário	Período de alta atividade ionosférica								
	DOY 298			DOY 299			DOY 300		
	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal
Cenário 1	1,90	1,75	0,99	1,49	1,58	0,96	1,85	1,41	0,97
Cenário 2	1,84	1,52	0,83	1,41	1,29	0,98	1,77	1,06	0,78
Cenário 3	1,87	1,62	0,93	1,43	13,9	0,77	1,78	-	0,76
Cenário 4	0,84	0,87	0,89	0,91	0,87	0,65	0,77	1,00	0,73
Cenário 5	0,81	0,76	0,75	0,86	0,86	0,66	0,74	0,75	0,60
Cenário 6	0,82	0,80	0,84	0,75	0,73	0,52	0,74	0,71	0,57
Cenário 7	0,80	0,79	0,76	0,73	0,74	0,51	0,73	0,71	0,55
Cenário 8	1,60	1,43	0,90	1,44	1,13	0,87	1,13	1,35	1,04
Cenário 9	1,26	0,99	0,85	0,91	0,97	0,76	0,94	0,96	0,75
Cenário 10	0,92	0,80	0,84	0,88	1,12	0,68	0,74	-	0,67
Cenário 11	0,87	0,93	0,78	0,76	0,68	0,60	0,73	0,71	0,63
Cenário 12	0,84	0,87	0,75	0,73	0,63	0,58	0,70	0,63	0,55
Cenário 13	0,76	0,75	0,70	0,66	0,60	0,46	0,64	0,60	0,51
Cenário 14	0,75	0,73	0,69	0,64	0,58	0,45	0,62	0,59	0,49

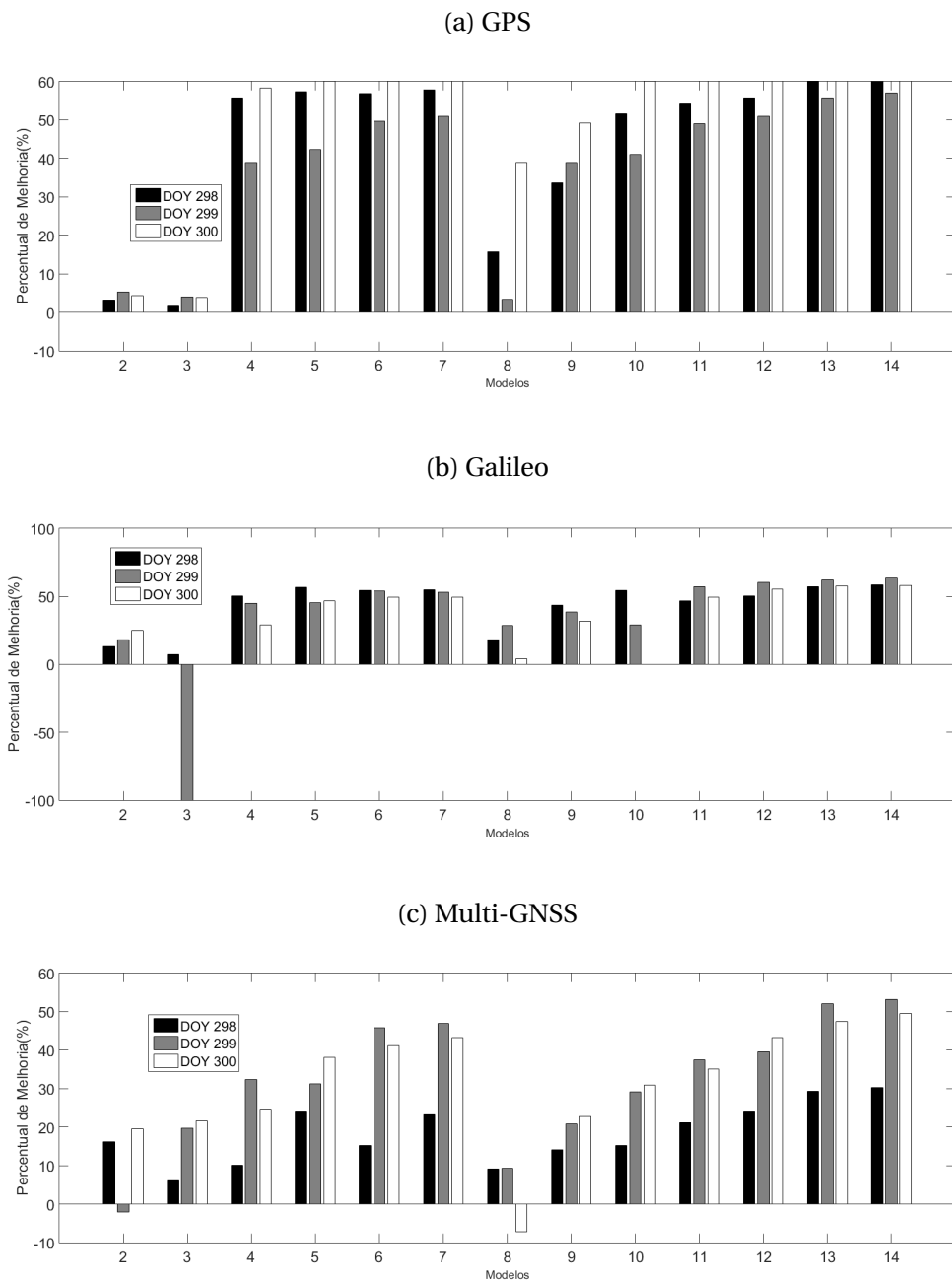
Fonte: Elaborada pela autora.

Com a análise da Tabela 17 fica clara a diferença de comportamento dos cenários, como a introdução das correções apresentou melhorias. Para definir qual cenário apresentou o melhor desempenho, a Figura 26 apresenta a melhoria para cada uma das configurações, GPS, Galileo e o Multi-GNSS, tomando o cenário sem correção como comparação. Os dados apresentados em preto representam o DOY 298, enquanto que em cinza correspondem ao DOY 299 e em branco ao DOY 300.

Com a análise da Figura 26a, que apresenta os resultados para o sistema GPS, pode-se notar que o cenário com o melhor desempenho foi o Cenário 14, que considera a ponderação da Ionosfera, com um percentual de melhoria que variou entre 57 e 66,5%, tendo uma melhoria média de 61,4% que corresponde a uma diferença de 1,08m entre os cenários. O erro no posicionamento com o sistema GPS para este cenário foi de 67cm, considerando todos os dias analisados.

A Figura 26b apresenta a melhoria ao comparar os cenários com correção com o cenário sem correção, para o sistema Galileo. O cenário com o melhor desempenho foi o Cenário 14, com percentual de melhoria médio de aproximadamente 60%, que corresponde a uma melhoria de 94 cm. Pode-se notar que o Cenário 3, que considera o uso do Klobuchar para a correção da Ionosfera, ocasionou uma degradação no posicionamento, que ainda carece de maiores investigações para determinar a causa. Levando em conside-

Figura 26 – Melhoria de cada um dos cenários descritos na Seção 4.2.2 em relação ao Cenário 1, para o período de alta atividade ionosférica da linha de base com 72 km.



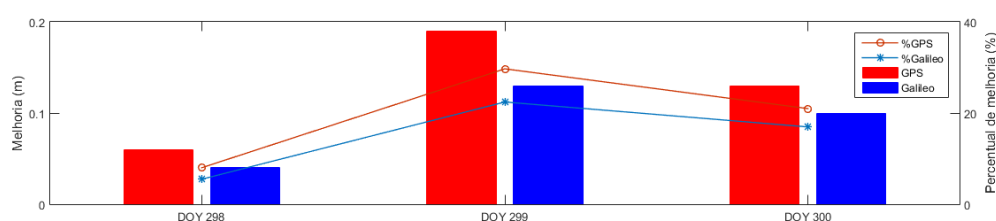
Fonte: Elaborada pela autora.

ração todo o período, o posicionamento com o sistema Galileo obteve um REQM 3D de 63,3 cm.

Analisando a Figura 26c nota-se que o cenário desempenho superior foi o Cenário 14, com um percentual de melhoria médio de 44,3%, que representa 43 cm. Considerando todos os dias analisado, o posicionamento GPS + Galileo obteve a REQM 3D de 54,3 cm, representando uma melhoria de aproximadamente 19% e 14% em relação aos resultados dos sistemas GPS e Galileo, respectivamente.

Para ilustrar os resultados obtidos com o posicionamento GPS + Galileo, a Figura 27 apresenta a melhoria e o seu percentual, no gráfico de barras e no gráfico de linhas, respectivamente, comparando aos resultados do posicionamento com os sistemas isolados, GPS e Galileo, com o cenário 14.s.

Figura 27 – Melhoria do posicionamento GPS + Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base com 72 km no período de alta atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

Com a análise da Figura 27, observa-se que o uso dos sistemas combinados apresentou uma melhoria aproximada de 12cm quando comparado ao sistema GPS e uma melhoria média de 9cm quando comparado ao sistema Galileo.

5.3.2 Linha de base longa (95 km)

A Tabela 18 apresenta o número de satélites rastreados para a linha de base longa com 95 km, PPTE – SPTU, para os dias 298, 299 e 300 de 2019, para os sistemas GPS e Galileo, de forma autônoma e combinada, GPS + Galileo. Considerando todo o período analisado, para o sistema GPS, sete satélites foram rastreados a cada época na média, variando entre seis e nove satélites. Enquanto que para o sistema Galileo, apenas cinco satélites foram rastreados na média, variando entre quatro e seis satélites. Para a configuração GPS + Galileo, doze satélites rastreados foram rastreados na média, que variou entre dez e catorze satélites rastreados em cada época.

A Tabela 19 apresenta a REQM 3D do posicionamento para os sistemas GPS, Galileo, de forma autônoma e combinada, para cada uma das configurações utilizadas

Tabela 18 – Número de satélites rastreados no período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (95 km).

Dias	GPS			Galileo			GPS + Galileo		
	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max
DOY 298	7	6	9	5	4	5	12	11	14
DOY 299	7	6	8	5	4	5	12	10	13
DOY 300	7	6	8	5	5	6	12	11	14

Fonte: Elaborada pela autora.

no experimento (Seção 4.2.2) para a linha de base longa com 95 km. Observa-se que os cenários apresentaram o comportamento esperado, ou seja, a introdução de correções trouxe melhorias aos cenários apresentados.

Tabela 19 – Valores de REQm (metros) obtidos para o período de alta atividade ionosférica para a linha de base PPTE - SPTU (95 km).

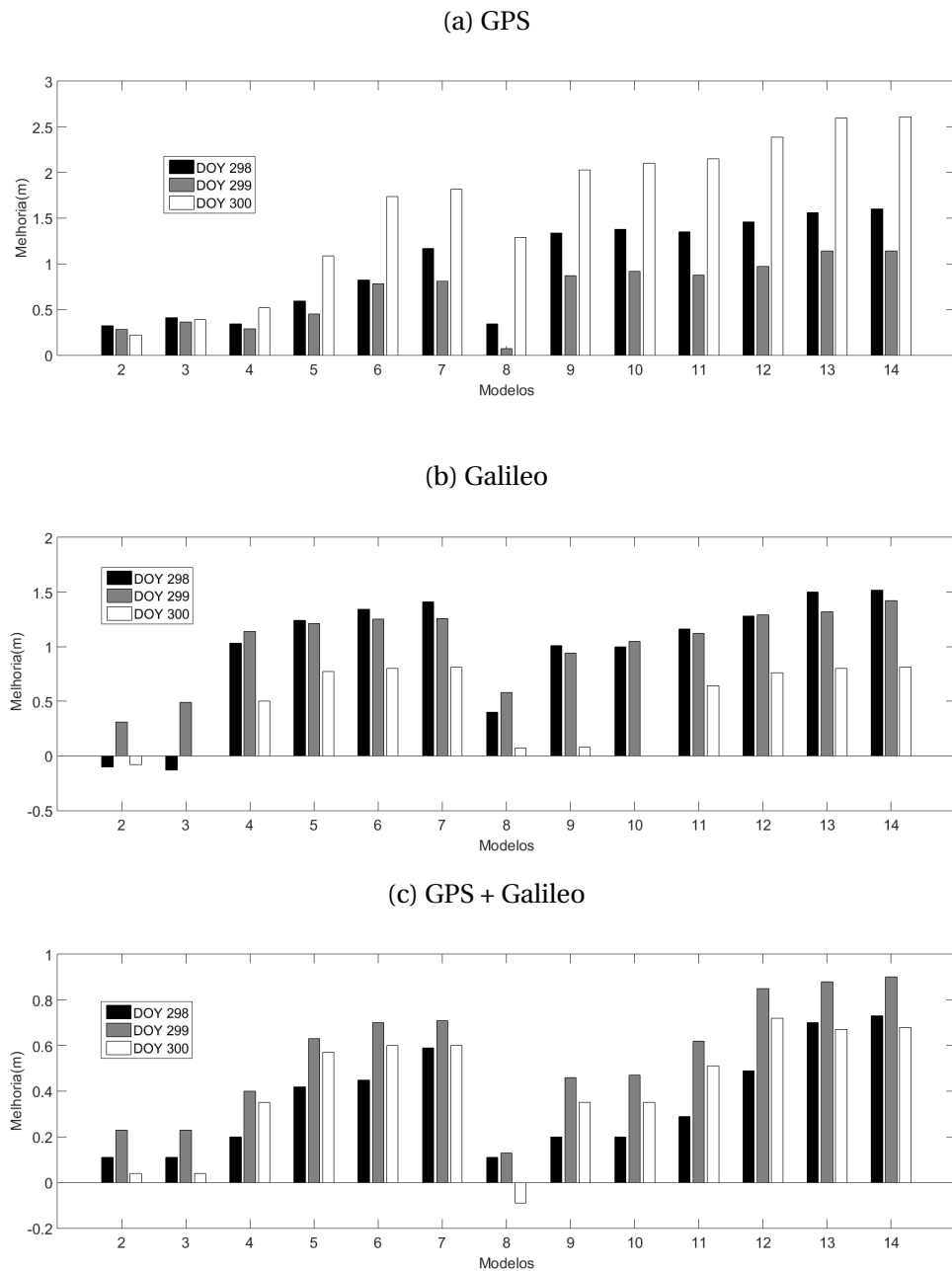
	Período de alta atividade ionosférica								
	161			162			163		
	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal
Cenário 1	2,14	2,11	1,15	1,80	2,01	1,39	3,31	1,51	1,30
Cenário 2	1,82	2,21	1,04	1,52	1,70	1,16	3,09	1,59	1,26
Cenário 3	1,73	2,24	1,04	1,44	1,52	1,16	2,92	–	1,26
Cenário 4	1,80	1,08	0,95	1,51	0,87	0,99	2,79	1,01	0,95
Cenário 5	1,55	0,87	0,73	1,35	0,80	0,76	2,22	0,74	0,73
Cenário 6	1,32	0,77	0,70	1,02	0,76	0,69	1,57	0,71	0,70
Cenário 7	0,97	0,70	0,56	0,99	0,75	0,68	1,49	0,70	0,70
Cenário 8	1,80	1,71	1,04	1,73	1,43	1,26	2,02	1,44	1,39
Cenário 9	0,80	1,10	0,95	0,93	1,07	0,93	1,28	1,43	0,95
Cenário 10	0,76	1,11	0,95	0,88	0,96	0,92	1,21	–	0,95
Cenário 11	0,79	0,95	0,86	0,92	0,89	0,77	1,16	0,87	0,79
Cenário 12	0,68	0,83	0,66	0,83	0,72	0,54	0,92	0,75	0,58
Cenário 13	0,58	0,61	0,45	0,66	0,69	0,51	0,71	0,71	0,63
Cenário 14	0,54	0,59	0,42	0,66	0,59	0,49	0,70	0,70	0,62

Fonte: Elaborada pela autora.

Para avaliar o cenário com o melhor desempenho para a linha de base com 95 km, a Figura 28 é apresentada. Para o sistema GPS, Figura 28a, o cenário com o melhor desempenho foi o Cenário 14, com um percentual de melhoria médio de 72,3%, que corresponde a uma melhoria de 1,78 m para os três dias analisados. Com o uso da Tabela 19, tem-se que o erro no posicionamento com o sistema GPS, para o Cenário 14, foi de 0,63 m, considerando os três dias analisados.

Para o sistema Galileo, Figura 28b, tem-se que o cenário com o melhor desempenho é o Cenário 14, com um percentual médio de 65,4%, melhorando em 1,25 m, na média, os valores obtidos para o Cenário 1. Com a análise da Tabela 19, para o Cenário 14, o erro no posicionamento obtido com o sistema Galileo foi de 0,62 m em relação aos três dias analisados.

Figura 28 – Melhoria obtida quando se compara os cenários descritos na Seção 4.2.2 em relação ao Cenário 1, para a linha de base PPTE – SPTU, para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.

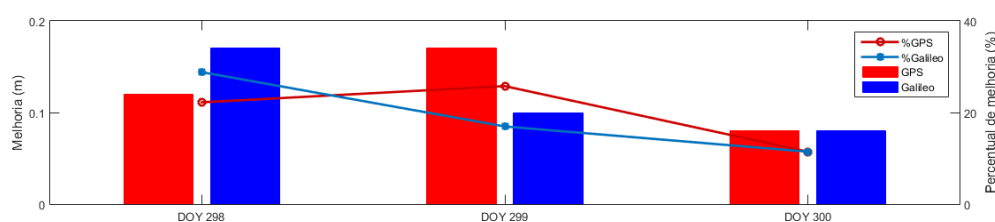


Fonte: Elaborada pela autora.

Em relação ao uso combinado dos sistemas, para a configuração GPS + Galileo, Figura 28c, o cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 14, com um percentual de melhoria de 60,2% que equivale a uma melhoria de 0,77 m no posicionamento. Analisando quanto ao erro no posicionamento (Tabela 19) do Cenário 14, considerando todo o período analisado, a REQM foi de 0,51 m, que representa uma melhoria de aproximadamente 20% e 19% em relação aos resultados dos sistemas GPS e Galileo, respectivamente.

A melhoria ao utilizar o posicionamento GPS + Galileo é apresentada na Figura 29. O gráfico de barras apresenta a melhoria em metros, enquanto as linhas apresentam o percentual de melhoria. Os valores apresentados na cor vermelha são os resultados da melhoria ao utilizar o GPS + Galileo quando comparado ao sistema GPS, enquanto que em azul são em relação ao sistema Galileo.

Figura 29 – Melhoria do posicionamento GPS + Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base longa com 95km no período de alta atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

Levando em consideração os três dias analisados, Figura 29, tem-se que a melhoria ao utilizar os sistemas GPS e Galileo quando comparado ao sistema GPS foi de 12,4 cm e de 11,6 cm em relação ao sistema Galileo.

5.3.3 Linha de base longa (142 km)

A Tabela 20 apresenta o número de satélites rastreados para a linha de base longa (142 km) para o período de alta atividade ionosférica.

Considerando todo o período analisado, para o sistema GPS, 7 satélites foram rastreados a cada época na média, variando entre 5 e 9 satélites. Enquanto que para o sistema Galileo, 5 satélites foram rastreados na média, variando entre 4 e 6 satélites. Para a configuração GPS+Galileo, 12 satélites foram rastreados na média, que variou entre 10 e 14 satélites rastreados em cada época.

Na Tabela 21 são apresentados os valores obtidos para a REMQ, levando em consideração os cenários descritos na Seção 4.2.2.

Tabela 20 – Número de satélites rastreados no período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (142 km).

Dias	GPS			Galileo			GPS + Galileo		
	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max	Média	Min.	Max
DOY 298	7	6	9	5	4	5	12	11	13
DOY 299	7	5	8	5	4	5	12	10	13
DOY 300	7	6	8	5	5	6	12	11	14

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 21 – REQM (metros) obtidos no período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (142 km).

	Período de alta atividade ionosférica								
	298			299			300		
	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal	G	E	GPS+Gal
Cenário 1	2,26	1,98	1,08	1,62	2,54	1,18	2,31	1,36	1,08
Cenário 2	1,79	1,56	0,96	1,24	1,56	0,84	2,00	1,02	0,96
Cenário 3	1,64	1,61	0,98	1,27	1,14	0,65	1,87	-	0,91
Cenário 4	1,89	1,01	0,90	1,36	1,10	0,84	1,95	0,90	0,79
Cenário 5	1,54	0,82	0,73	1,11	0,90	0,68	1,58	0,74	0,64
Cenário 6	1,40	0,75	0,67	1,01	0,82	0,62	1,44	0,67	0,58
Cenário 7	1,39	0,74	0,66	1,00	0,80	0,61	1,42	0,66	0,57
Cenário 8	1,68	1,58	1,01	1,52	1,91	1,09	1,61	1,27	1,13
Cenário 9	0,79	0,77	0,87	0,76	0,98	0,57	0,83	0,92	0,72
Cenário 10	0,72	0,79	0,89	0,77	0,72	0,44	0,78	-	0,69
Cenário 11	0,83	0,80	0,81	0,83	0,60	0,56	0,81	0,64	0,59
Cenário 12	0,68	0,67	0,66	0,68	0,55	0,46	0,65	0,62	0,48
Cenário 13	0,62	0,62	0,60	0,62	0,53	0,42	0,60	0,57	0,44
Cenário 14	0,61	0,60	0,59	0,61	0,51	0,41	0,59	0,56	0,43

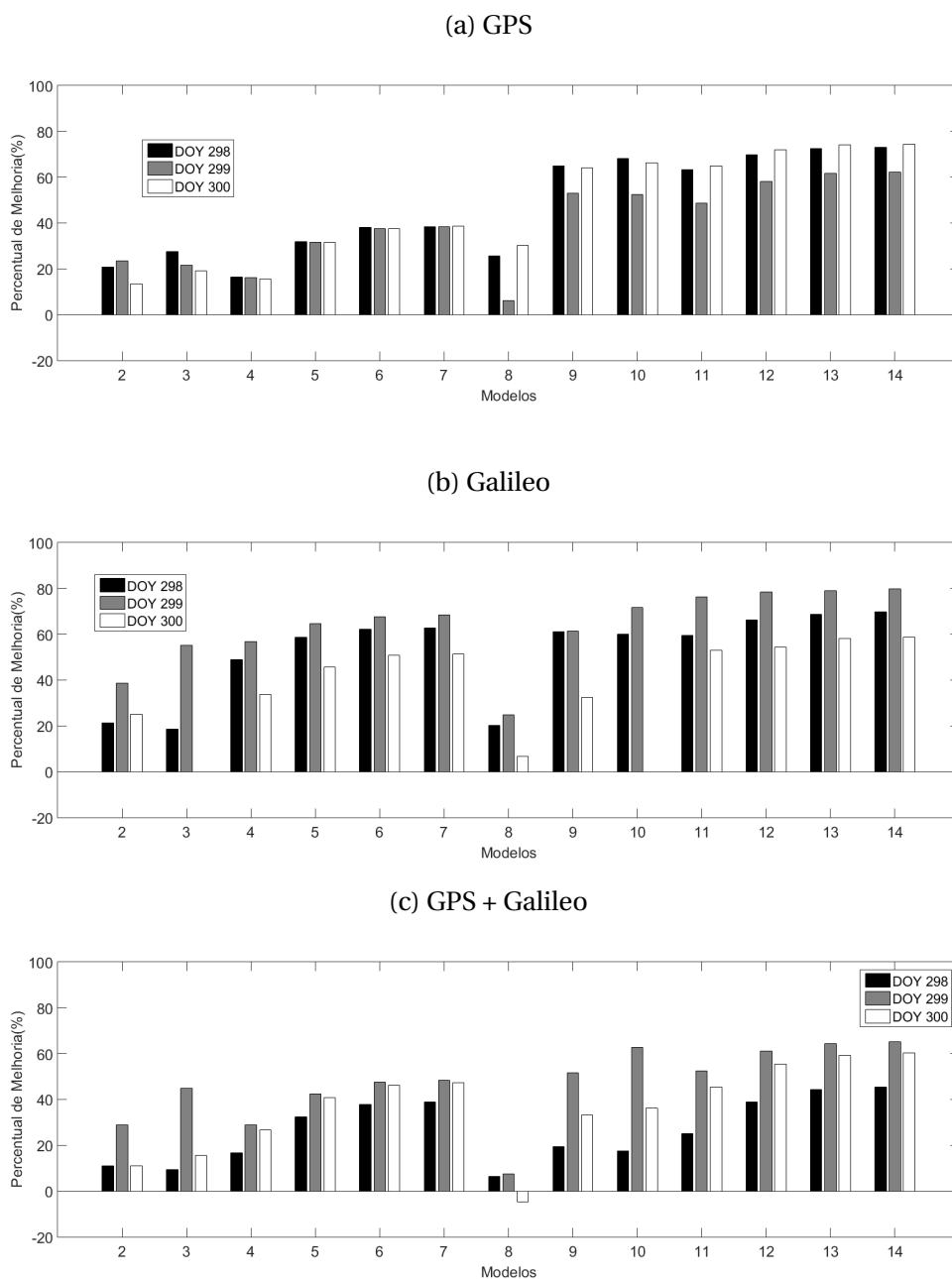
Fonte: Elaborada pela autora.

A partir da Tabela 15 pode-se observar que os cenários apresentaram uma melhoria quando da introdução de correções. Para verificar qual o melhor cenário para cada uma das configurações, a Figura 23 é apresentada. Diferentemente das outras figuras apresentadas nesta Seção, as cores estão relacionadas aos dias processados. Desta forma, a cor preta corresponde ao dia 298, a cor cinza ao dia 299 e a cor branca ao dia 300.

Com a análise em relação ao sistema GPS, Figura 30a, considerando os três dias, nota-se que houve melhoria na introdução das correções na REQM 3D, em todos os cenários analisados, melhoria esta que variou entre aproximadamente 16 e 75%. O cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 14, pois obteve um percentual de melhoria de 70%. Em termos numéricos, esse percentual corresponde a uma melhoria média de 1,46 m, tendo obtido até 1,72 m para o dia 300. O erro no posicionamento com o sistema GPS para este cenário foi de 0,60 m, considerando todos os dias analisados.

Para o sistema Galileo, Figura 30b, levando em consideração o período analisado, o Cenário 14 foi o que apresentou o maior percentual de melhoria médio, de 69,5%

Figura 30 – Percentual de melhoria para o período de alta atividade ionosférica para a linha de base longa (142 km), para os sistemas GPS, Galileo e GPS + Galileo.



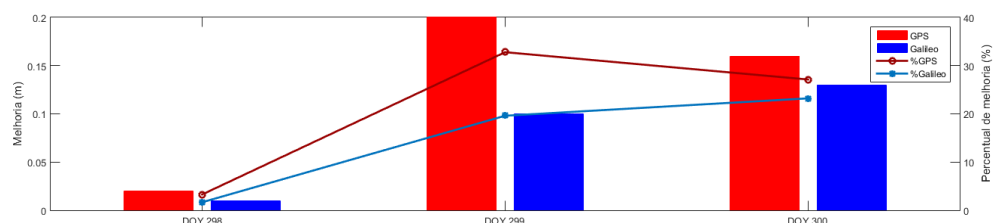
Fonte: Elaborada pela autora.

que representa uma melhoria de 1,4 m, que chegou a 2,03 m para o dia 299. Levando em consideração todo o período, o posicionamento com o sistema Galileo obteve uma REQM 3D de 55,6 cm.

Com relação aos resultados obtidos para o posicionamento GPS + Galileo, Figura 30c, o cenário que apresentou o melhor desempenho foi o Cenário 14, com um percentual médio de 56,9% que condiz com uma melhoria média de 63,6 cm. A melhoria máxima obtida por este cenário foi de 77 cm para o dia 161. Analisando o erro no posicionamento para o GPS + Galileo, tem-se que o Cenário 14 apresentou uma REQM de 48,3 cm, que representa uma melhoria de aproximadamente 20% e 13% em relação aos resultados dos sistemas GPS e Galileo, respectivamente.

A Figura 31 apresenta a melhoria no uso dos sistemas GPS e Galileo combinados comparado ao uso isolado dos sistemas. O gráfico de barras apresenta a melhoria em metros, enquanto as linhas apresentam o percentual de melhoria. Os valores apresentados na cor vermelha são os resultados da melhoria ao utilizar o GPS + Galileo quando comparado ao sistema GPS, enquanto que em azul são em relação ao sistema Galileo. Com a análise da Figura 31 considerando todo o período analisado, a melhoria média foi de 12 cm quando comparado o uso combinado ao sistema GPS e de 8 cm em relação ao sistema Galileo.

Figura 31 – Melhoria do posicionamento GPS + Galileo em relação aos sistemas GPS e Galileo para a linha de base de 142 km no período de alta atividade ionosférica, em vermelho e azul, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

5.3.4 Conclusões para o período de alta atividade ionosférica

Com a realização deste experimento, pode-se concluir que para o período de alta atividade ionosférica, dentre todos os cenários analisados o que apresentou melhor desempenho foi o Cenário 14, com um percentual de melhoria médio de 62% que variou entre 44,3 a 72,3%, considerando todas as configurações e dias analisados. Correspondendo a uma melhoria de aproximadamente 95 cm.

Para o sistema GPS, considerando todas as linhas de base o percentual de melhoria do Cenário 14 quando comparado ao Cenário 1 (sem correção) foi de 67,9%, variando entre 41,4 e 72,3%. Enquanto que para o Galileo, a melhoria foi de aproximadamente 65%, equivalendo a uma melhoria de 120 cm. Já para o GPS + Galileo, o percentual médio foi de 54% que representa uma melhoria de aproximadamente 52 cm.

Sumarizando todos os resultados obtidos quanto a REQM, que corresponde ao erro no posicionamento, para o Cenário 14 pode-se concluir que independente das configurações adotadas o erro obtido foi de 58 cm. Considerando todo o período e estações analisadas, o posicionamento GPS tem REQM a 3D de 63,6 cm e a REQM 3D do posicionamento Galileo é de 60,5 cm. A REQM do posicionamento GPS + Galileo é de 54,4 cm, representando uma melhoria de 19,5% e 15,4% em relação aos sistemas GPS e Galileo, respectivamente.

Em relação a melhoria obtida com o uso de dados combinados GPS e Galileo, considerando todos os dias analisados, independente da linha de base e sistema, houve uma melhoria de 18% correspondendo a 11cm de melhoria. Comparando o uso dos sistemas combinados com o sistema GPS autônomo, a melhoria média foi 12,4 cm. Quando comparado ao sistema Galileo essa melhoria foi de 9,3 cm.

5.3.5 Conclusões para linhas de bases longas

Neste experimento, foi avaliado o desempenho de diferentes cenários para posicionamento relativo GPS + Galileo. Para isso, foram avaliados catorze cenários de ajustamento para a estimativa das ambiguidades inteiras e coordenadas, foram implementados, juntamente com o método LAMBDA.

A avaliação do desempenho foi realizada utilizando observações dos sistemas GPS e Galileo, obtidas para estações pertencentes a RBMC. Os cenários podiam ser divididos em duas estratégias distintas: posicionamento instantâneo e recursivo. Os processamentos foram realizados considerando o uso autônomo e combinado dos sistemas GPS e Galileo. Como o objetivo desta tese é solução rápida das ambiguidades, apenas uma hora de processamento foi realizada, utilizando dados das 14h local.

A metodologia empregada neste experimento buscou considerar diferentes realidades ionosféricas, por isso foram utilizados dados de junho e outubro, que correspondem a períodos de baixa e alta atividade ionosférica. Em relação ao número de frequências utilizadas, a diferença nesse caso foi que para o sistema GPS, de duas a três frequências estavam disponíveis - L1, L2 e L5, enquanto que para o Galileo, todos os satélites transmitiam dados de quatro frequências - E1, E5a, E5b e E5.

Nos resultados obtidos em todos os casos analisados houve melhoria na adição

de dados Galileo, quando comparado ao sistema GPS. Considerando todos os dias analisados, independente da linha de base, houve uma melhoria de 24,4% dos casos utilizando-se dados combinados. Os resultados para o período de baixa atividade ionosférica, apresentaram uma melhoria mais expressiva de 34,1%, 25,2% e 36,5%, para as linhas de base PPTE – SPDR, PPTE – SPTU e PPTE – SPAR, respectivamente. Os resultados de outubro apresentaram um menor percentual de melhoria, os valores obtidos foram de 11,0%, 19,2% e 20,4%, para as linhas de base PPTE – SPDR, PPTE – SPTU e PPTE – SPAR, respectivamente. Assim, para o período de baixa atividade ionosférica, o percentual de melhoria quando observações Galileo são combinadas a observações GPS foi de 32% enquanto no período de alta atividade ionosférica foi de 16,9%.

Em relação a melhoria obtida na introdução de dados GPS quando comparado ao sistema Galileo, considerando todos os dias analisados, independente da linha de base, houve uma melhoria de 21,4% dos casos utilizando-se dados combinados. Para o período de baixa atividade ionosférica, os percentuais de melhoria obtidos foram de 30,3%, 36,5% e 13,7%, para as linhas de base PPTE – SPDR, PPTE – SPTU e PPTE – SPAR, respectivamente. Observe que para as linhas de bases menores de 100 km, o percentual de melhoria foi maior do que 30%. Já para o período de alta atividade ionosférica, os percentuais de melhoria obtidos foram de 14,9%, 18,7% e 14,4%, para as linhas de base PPTE – SPDR, PPTE – SPTU e PPTE – SPAR, respectivamente. Desta forma, considerando o desempenho médio para o período de baixa atividade ionosférica, quando observações GPS são combinadas a observações Galileo foi de 26,82% enquanto no período de alta atividade ionosférica foi de 16,02%.

Concluindo, com a realização deste experimento, é possível recomendar a utilização do cenário de ionosfera ponderado e aplicar as correções do centro de fase da antena para quando linhas de bases longas são utilizadas. Uma vez que, em todos os recortes realizados este foi o cenário que apresentou o melhor desempenho. Cabe ressaltar ainda, que o uso combinado de observações GPS e Galileo apresentou uma melhoria média de na maioria dos dias analisados, tendo percentuais de melhoria aproximados de 29,4% e 16,4%, quando comparado ao uso isolado dos sistemas, considerando os períodos de baixa e alta atividade ionosférica, respectivamente.

SOLUÇÃO PARCIAL DAS AMBIGUIDADES PARA O POSICIONAMENTO RELATIVO COM O USO COMBINADO DOS SISTEMAS GPS E GALILEO

O posicionamento relativo com alta precisão requer que as ambiguidades da fase da onda portadora sejam estimadas de forma confiável, com uma taxa de falha baixa. Alguns estudos mostraram o benefício da PAR quando comparada à FAR, uma vez que é mais provável que um subconjunto de todas as ambiguidades possa ser resolvido de forma confiável, ao invés do conjunto completo. Consequentemente, a fixação de tais subconjuntos permitem melhorias no posicionamento, como soluções mais rápidas ou maior disponibilidade para estimativas instantâneas das coordenadas no nível centimétrico. Neste experimento, foi avaliado o impacto da PAR no desempenho do posicionamento relativo utilizando os sistemas GPS e GPS e Galileo combinados. O principal objetivo é determinar se e quando a PAR pode melhorar o posicionamento em comparação com a FAR.

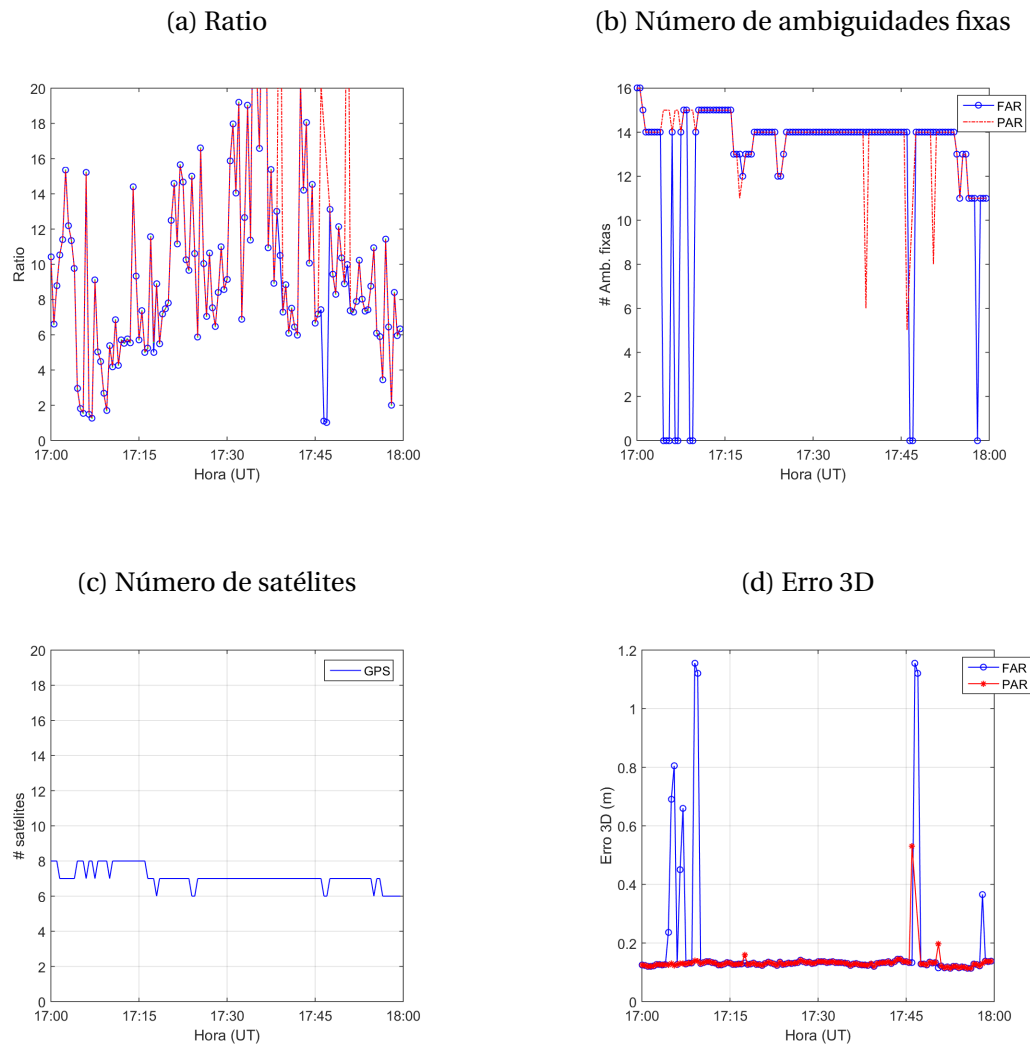
6.1 Linha de base curta (280 m)

6.1.1 GPS

Esta subseção apresenta uma análise do desempenho da AR e do posicionamento para a linha de base PPTE – PRU2. A Figura 32 apresenta os resultados para a solução

das ambiguidades e o desempenho do posicionamento para o sistema GPS ao utilizar as técnicas FAR e PAR no DOY 298 de 2019.

Figura 32 – Desempenho do posicionamento instantâneo para o sistema GPS de tripla frequência (L1/L2/L5) comparando as técnicas FAR/PAR na linha de base PPTE – PRU2.



Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados mostram que a solução instantânea das ambiguidades foi possível, utilizando as técnicas FAR e PAR. Apesar que em algumas épocas tem-se que a FAR não excedeu o critério de validação (Figura 32a), não alcançando a precisão proporcionada pela ambiguidade corrigida. Isso pode ter ocorrido devido a oscilação no número de satélites, Figura 32c. É aqui que reside a vantagem proeminente da PAR, uma vez que esta técnica visa solucionar um subconjunto de ambiguidades, ao invés do vetor completo, desde que atenda ao critério da taxa de sucesso. Desta forma, tem-se um método automático que descarta as ambiguidades de baixa precisão que geralmente estão relacionadas a satélites recém-rastreados, resolvendo assim o efeito de flutuações rápidas devido ao aumento dos

satélites, conforme apresentado na Figura 32d.

Os erros obtidos no posicionamento são apresentados na Tabela 22 para as soluções *float* e fixas, obtidas com as técnicas FAR e PAR.

Tabela 22 – Estatística (REQM), em metros, para os erros obtidos no posicionamento utilizando o sistema GPS na linha de base PPTE – PRU2.

	FAR		PAR	
	<i>float</i>	fixa	<i>float</i>	fixa
Erro 2D	0,706	0,092	–	0,092
U	0,3151	0,0909	–	0,0915

Os resultados comprovaram que utilizar as ambiguidades inteiras apresenta melhorias quando comparado ao resultado obtidos com as ambiguidades *float*. Nesta configuração, foi possível obter a solução instantânea das ambiguidades para a linha de base curta. A taxa de sucesso das ambiguidades foi de 92% para a técnica FAR e 98% para a PAR. Quando comparado a melhoria obtida pela fixação, tem-se que os percentuais foram de 97%, 83% e 71% para E, N e Up, respectivamente. Cabe ressaltar que a introdução da técnica PAR para a linha de base curta não apresentou uma melhoria significativa devido a taxa de sucesso da FAR ter sido alta.

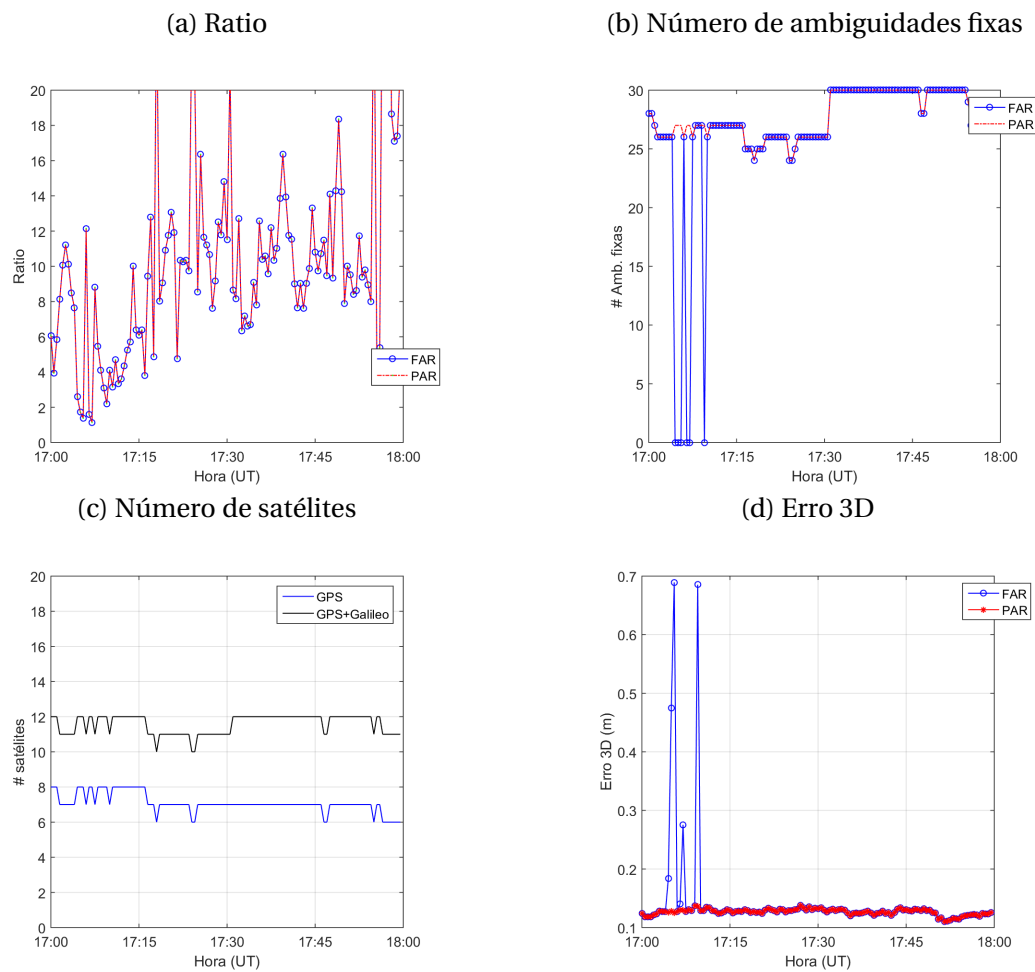
6.1.2 GPS + Galileo

Esta subseção apresenta os resultados do uso combinado dos sistemas GPS e Galileo para a linha de base PPTE – PRU2 (Figura 33) para o DOY 298 de 2019.

Por se tratar de uma linha de base curta, mesmo no período de alta atividade ionosférica, o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo proporcionou uma alta taxa de sucesso das ambiguidades. Com o uso da técnica FAR, a taxa de sucesso das ambiguidades foi de 95% enquanto para a técnica PAR foi de 100%, isto significa que utilizar a técnica PAR juntamente com os sistemas combinados fez com que em todas as épocas as ambiguidades fossem fixadas. Como a taxa de sucesso da FAR não atingiu 100% significa que o critério de validação não foi atingido em algumas épocas (Figura 33a). Isso deve ter ocorrido devido a oscilação no número de satélites, Figura 33c. Assim, o erro 3D das coordenadas com o uso da FAR ficou acima de 10 cm devido à não fixação das ambiguidades, conforme apresentado na Figura 33d. A Tabela 23 apresenta o REMQ para cada uma das componentes obtidas com as técnicas FAR e PAR.

As técnicas PAR e FAR podem atingir o nível centimétrico no posicionamento quando as ambiguidades são fixas como inteiros. O percentual de melhoria da solução fixa quando comparada a solução *float* foi de 91%, 33% e 77% para as componentes E, N e U, respectivamente. Para o erro 3D, o percentual de melhoria foi de 49% e 48% para as técnicas PAR e FAR.

Figura 33 – Desempenho do posicionamento instantâneo para os sistemas GPS e Galileo combinados comparando as técnicas FAR/PAR na linha de base PPTE – PRU2.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 23 – Estatística (REMQ), em metros, para os erros obtidos no posicionamento com o uso dos sistemas GPS e Galileo combinados para a linha de base PPTE – PRU2.

	FAR		PAR	
	<i>float</i>	<i>fixa</i>	<i>float</i>	<i>fixa</i>
Erro 2D	0,216	0,091	–	0,091
U	0,387	0,088	–	0,088

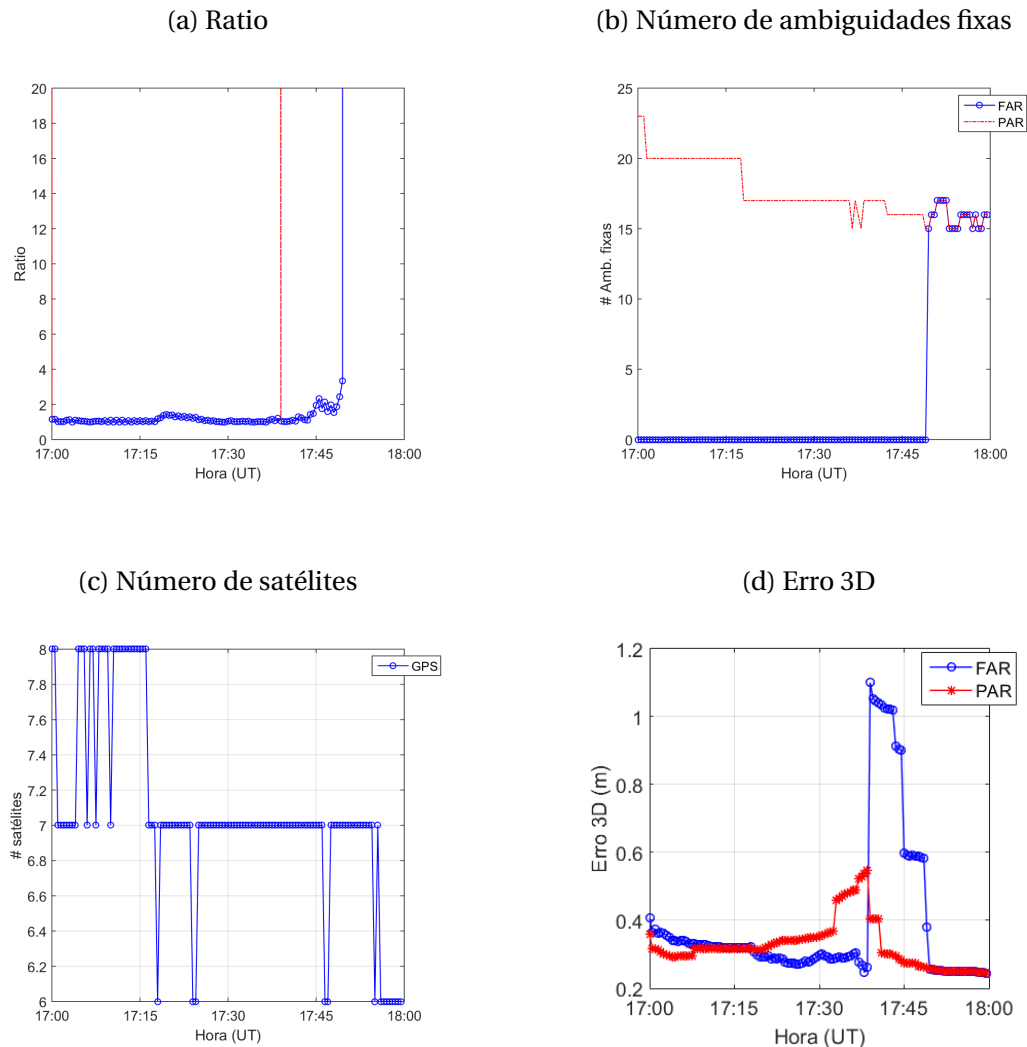
6.2 Linha de base longa (142 km)

6.2.1 GPS

Esta subseção apresenta os resultados do sistema GPS para a linha de base PPTE – SPAR (Figura 34) para o DOY 298 de 2019.

A partir da Figura 34a pode-se notar o tempo de convergência para a solução fixa, o TTFF (*Time To First Fix*) para a técnica FAR é igual a 99 épocas (49 min), enquanto que na PAR foi de 22 épocas (11 min) para atender ao critério. Com a análise das Figuras 34c

Figura 34 – Desempenho do posicionamento relativo com o modelo de ionosfera ponderada para o sistema GPS de tripla frequência (L1/L2/L5) comparando as técnicas FAR/PAR na linha de base PPTE – SPAR.



Fonte: Elaborada pela autora.

e 34d, a diminuição do número de satélites rastreados apresentou uma deterioração no erro, devido a ocorrência de perdas de ciclos. O salto grande apresentado na Figura 34d foi devido à mudança do satélite base, que faz com o filtro reinicie. Os resultados mostram que a solução instantânea das ambiguidades não foi possível para esta linha de base longa, mas com a PAR um subconjunto das ambiguidades foi fixo. A taxa de sucesso das ambiguidades foi de 18% e 64% para as técnicas FAR e PAR, respectivamente. Com isso, pode-se observar que utilizar da técnica PAR proporcionou um percentual de fixação três vezes maior do que a técnica FAR. A Tabela 24 apresenta os erros obtidos no posicionamento considerando as soluções *float* e fixas, obtidas com as técnicas FAR e PAR.

Como o apresentado na teoria, os resultados comprovaram que utilizar as ambiguidades inteiras apresenta melhorias no posicionamento quando comparado ao

Tabela 24 – Estatística (REQM), em metros, para os erros obtidos no posicionamento utilizando o sistema GPS na linha de base PPTE – SPAR (144 km).

	FAR		PAR	
	<i>float</i>	fixa	<i>float</i>	fixa
Erro 2D	0,323	0,237	0,229	0,138
U	0,435	0,158	0,315	0,176

resultado obtidos com as ambiguidades *float*. Com o uso do sistema GPS foi possível obter a solução fixa para a linha de base longa com o modelo de ionosfera ponderada. A melhoria ocasionada pela ambiguidade fixa em relação a *float* na técnica FAR foi de 45%, 20% e 64% para as componentes E, N e U, respectivamente. Enquanto que para a técnica PAR, a melhoria da solução fixa foi de 43%, 34% e 44% para cada uma das componentes. Considerando o erro 3D, a melhoria foi de 47% e 43% para a FAR e a PAR, respectivamente. O percentual de melhoria obtida pelo uso da PAR em comparação com a FAR para o erro 3D na solução fixa foi de 21%, que corresponde a 6 cm.

6.2.2 GPS + Galileo

Os resultados do uso combinado dos sistemas GPS e Galileo para a linha de base PPTE – SPAR (Figura 35) para o DOY 298 de 2019 são apresentados nesta subseção.

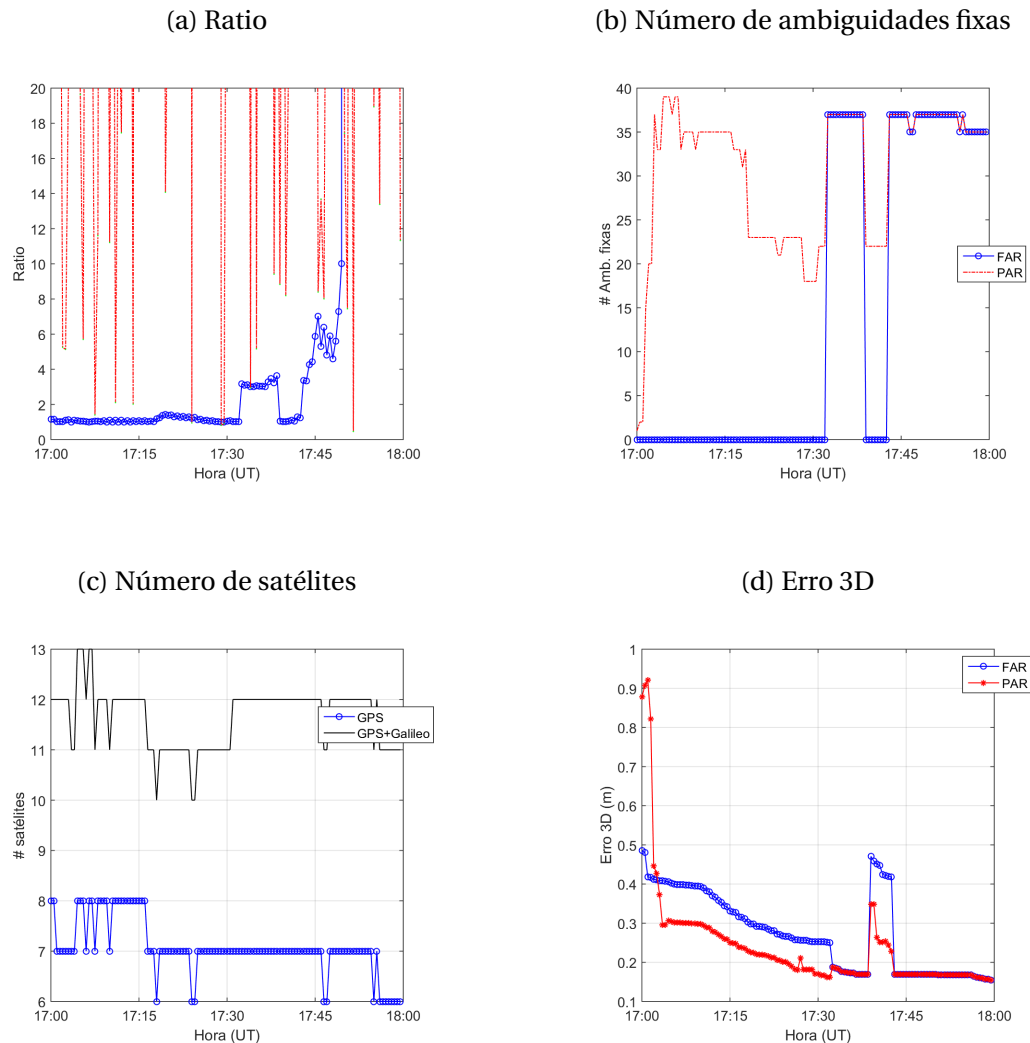
A partir da Figura 35a pode-se notar o tempo de convergência para a solução fixa, o TTFF para a técnica FAR é igual a 66 épocas (33 min), enquanto que na PAR foi de 8 épocas (4 min) para atender ao critério. Com a análise das Figuras 35c e 35d, a diminuição do número de satélites rastreados apresentou uma deterioração no erro, devido a ocorrência de perdas de ciclos. O salto apresentado na Figura 35d foi devido à mudança do satélite base, que faz com que o filtro reinicie.

Os resultados mostram que a solução instantânea das ambiguidades não foi possível para esta linha de base longa, mas com a PAR um subconjunto das ambiguidades foi fixo. A taxa de sucesso das ambiguidades foi de 39% e 82% para as técnicas FAR e PAR, respectivamente. Desta forma, pode-se notar que utilizar da técnica PAR proporcionou um percentual de fixação duas vezes maior do que a técnica FAR. A Tabela 25 apresenta os erros obtidos no posicionamento para cada uma das componentes considerando as soluções *float* e fixas, obtidas com as técnicas FAR e PAR.

Tabela 25 – Estatística (REQM), em metros, para os erros obtidos no posicionamento com o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo para a linha de base PPTE – SPAR (144 km).

	FAR		PAR	
	<i>float</i>	fixa	<i>float</i>	fixa
Erro 2D	0,252	0,140	0,229	0,138
U	0,231	0,154	0,217	0,145

Figura 35 – Desempenho do posicionamento relativo com o modelo de ionosfera ponderada para o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo comparando as técnicas FAR/PAR na linha de base PPTE – SPAR. Em azul, FAR e em vermelho PAR.



Fonte: Elaborada pela autora.

Como o apresentado na teoria, os resultados comprovaram que utilizar as ambiguidades inteiras apresenta melhorias no posicionamento quando comparado ao resultado obtidos com as ambiguidades *float*. Com o uso do sistema GPS, foi possível obter a solução fixa para a linha de base longa com o modelo de ionosfera ponderada. A melhoria ocasionada pela ambiguidade fixa em relação a *float* na técnica FAR foi de 60%, 40% e 33% para as componentes E, N e U, respectivamente. Enquanto que para a técnica PAR, a melhoria da solução fixa foi de 66%, 54% e 37% para cada uma das componentes. Considerando o erro 3D, a melhoria foi de 50% e 65% para a FAR e a PAR, respectivamente. O percentual de melhoria obtida pelo uso da PAR em comparação a FAR para o erro 3D na solução fixa foi de 31%, que corresponde a 5 cm.

6.3 Conclusões

Neste experimento foi investigado o desempenho da solução das ambiguidades para o posicionamento relativo para os sistemas GPS e combinado GPS e Galileo. O desempenho da solução das ambiguidades utilizando as técnicas FAR e PAR foi medido em termos de percentual de fixação, valor crítico para o teste Ratio, número de ambiguidades fixas. Dados de duas linhas de base foram utilizados, uma curta e uma longa. As seguintes conclusões podem ser tiradas deste experimento:

- Solucionar um subconjunto de ambiguidades, ao invés do vetor completo, ou seja, a PAR é especialmente benéfica para encurtar o tempo para fixação das ambiguidades, principalmente com o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo.
- Os resultados obtidos para a solução parcial das ambiguidades com o uso combinado de dados GPS e Galileo, demonstrou que é possível obter a solução das ambiguidades com apenas 4 minutos, para uma linha de base de 121 km, em comparação com 33 minutos para o caso com a solução completa do vetor de ambiguidades.
- O uso da PAR para o sistema GPS, mostrou que o ganho no percentual de solução das ambiguidades foi de mais de 300%, uma vez que o uso de apenas um sistema faz que seja necessário tempo relativamente longo para solucionar as ambiguidades. O tempo para solucionar as ambiguidades foi de 49 min para a técnica FAR para 12 min para a técnica PAR.

Por fim, é importante destacar que todos os resultados apresentados neste experimento foram obtidos no programa de computador desenvolvido durante esta tese. Além disso, os dados utilizados neste experimento correspondem a um período de alta atividade ionosférica, que aumenta o tempo de convergência para a obtenção da ambiguidade fixa. E apesar disso, resultados promissores foram obtidos. Como próximos trabalhos, recomenda-se investigar qual o desempenho da técnica PAR com o uso do teste da diferença como valor crítico, uma vez que os resultados apresentados por Brack (2020) foram promissores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS, TENDÊNCIAS E RECOMENDAÇÕES

7.1 Resumo desta pesquisa

O posicionamento por satélite é essencial para a vida da sociedade moderna e é utilizado por milhões de pessoas diariamente. O advento do GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) despertou muito interesse na comunidade científica. Atualmente, tem-se três sistemas globais operacionais, o GPS, o GLONASS e o BeiDou, além do Galileo que está em fase final de desenvolvimento e implantação e deve ser declarado operacional em 2021.

Primeiramente, nesta tese foi apresentada uma revisão sobre os modelos matemáticos envolvidos no posicionamento relativo, destacando as formas de realizar combinação entre os sistemas. Além disso, foi feita uma revisão completa do processo de solução das ambiguidades, detalhando e apresentando exemplos em cada uma das etapas envolvidas. Para cumprir os objetivos propostos, dois experimentos foram realizados. O primeiro experimento teve como objetivo analisar as características e acurácia do posicionamento relativo, considerando os sistemas GPS, Galileo e o posicionamento combinado GPS e Galileo. Enquanto o segundo experimento visou avaliar as técnicas FAR e PAR para a solução das ambiguidades, utilizando o percentual de fixação das ambiguidades, o teste Ratio e o erro no posicionamento.

O primeiro experimento avaliou diferentes configurações para o posicionamento relativo, utilizando os sistemas GPS, Galileo e o uso combinado destes. Para isso, utilizou-se os períodos de junho e outubro de 2019. Foram selecionadas quatro linhas de

bases que variam de 280 m a 121 km, pertencentes ao estado de São Paulo. A seleção destes período visou captar as variações sazonais da ionosfera. Considerando todos os períodos e linhas de base analisadas, o modelo com a ponderação da ionosfera mostrou-se superior aos outros em todos os casos, especialmente em períodos de alta atividade ionosférica, quando sua melhoria foi de 62% na média para as linhas de base longas. Em relação ao uso combinado dos sistemas GPS e Galileo, a melhoria em comparação ao sistema GPS foi de 24,4% e em comparação ao sistema Galileo foi de 21,4%. Desta maneira, pelos resultados apresentados no primeiro experimento, o emprego do modelo com ponderação da ionosfera juntamente do uso de dados combinados dos sistemas é recomendado em atividades que requeiram um certo grau de acurácia e em atividades pós processadas ou em tempo real.

O segundo experimento teve como objetivo avaliar o desempenho da solução das ambiguidades com o uso do sistema GPS e combinado dos sistemas GPS e Galileo, utilizando o modelo obtido no primeiro experimento. Neste experimento duas linhas de base foram utilizadas: uma linha de base curta, localizada na cidade de Presidente Prudente e uma linha de base longa de 121 km, formada pelas estações PPTE – SPAR. Foram utilizadas duas técnicas para a solução das ambiguidades: o uso do vetor completo, conhecida como FAR; e o uso de um subconjunto do vetor das ambiguidades, conhecida como PAR. Para a linha de base curta, visou-se a solução instantânea das ambiguidades, enquanto para a linha de base longa, a solução rápida das ambiguidades. Verificou-se que, no geral, o uso da solução parcial das ambiguidades apresenta um melhor desempenho em relação a solução completa do vetor de ambiguidades. Para a linha de base curta, foi possível obter a solução instantânea das ambiguidades em todo o período processado utilizando os sistemas GPS e Galileo juntamente com a técnica PAR. Para as técnicas PAR e FAR, o percentual de fixação das ambiguidades foi de 98% e 92% para o sistema GPS e 100% e 95% para o uso combinado dos sistemas, respectivamente. Os resultados obtidos para a linha de base longa, demonstram que o melhor desempenho foi obtido com o uso combinado dos sistemas juntamente com a técnica PAR. O TTFF das ambiguidades do sistema GPS foi de 49 min e 12 min para as técnicas FAR e PAR, respectivamente. Para o uso dos sistemas combinados, o TTFF das ambiguidades foi de 33 min e 4 min para as técnicas FAR e PAR, respectivamente. É válido ressaltar que o objetivo principal desta tese foi alcançado, uma vez que a solução rápida das ambiguidades foi demonstrada neste segundo experimento.

Finalizando, foi possível concluir que a presente pesquisa cumpriu com os objetivos iniciais previstos. Um programa de computador foi desenvolvido para a realização do posicionamento relativo com o uso de observações GPS e Galileo. Muitos modelos descritos na literatura para a solução das ambiguidades foram implementados. Além disso,

o método LAMBDA, bem como as probabilidades de sucesso das ambiguidades, a solução completa das ambiguidades (FAR), bem como a parcial (PAR) foram investigadas e implementadas neste programa. Ademais, a metodologia proposta foi testada e verificada em períodos de baixa e alta atividade ionosférica. Assim, para linhas de bases longas, recomenda-se o uso do modelo de ionosfera ponderada, enquanto que para linhas de bases curtas, a solução instantânea das ambiguidades foi possível.

7.2 Tendências, desafios e trabalhos futuros

Ainda há muito trabalho a fazer no futuro. Com base nesta pesquisa, os seguintes tópicos foram levantados:

1. Com relação a solução das ambiguidades Multi-GNSS recomenda-se a introdução dos sistemas BDS e GLONASS para verificar o desempenho destes de forma autônoma e combinada. Algo que será de grande interesse científico num futuro próximo, devido ao lançamento de novos satélites GLONASS com a técnica CDMA.
2. Outro ponto importante é considerar a variação do ângulo de elevação. Pois, com isso, pode-se simular locais com visibilidade de satélites prejudicada, como cânions urbanos. Resultados favoráveis foram obtidos por Setti Júnior (2019) quando o uso do sistema GPS combinado com os sistemas Galileo e BeiDou foi empregado no SPP. Pesquisas relacionadas a AR ainda necessitam ser realizadas.
3. Testes adicionais também podem ser realizados comparando os resultados da combinação tradicional dos sistemas utilizado nesta pesquisa com o uso da combinação entre sistemas. Embora estudos tenham sido focados na determinação dos vieses entre sistemas (DISB – *Differential Inter Systems Bias*) com experimentos de linhas de base zero/ultra-curto ou médias, o efeito da aplicação sob condições de linha de base longas ainda precisa ser estudado.
4. Apenas a versão pós-processada foi implementada no sistema de posicionamento relativo Multi-GNSS desenvolvido nesta pesquisa. Como recomendações, sugere-se o desenvolvimento da versão em tempo real, uma vez que todo o módulo de processamento e solução das ambiguidades foram desenvolvidos considerando essa possibilidade.
5. As tendências mais importantes na solução e validação das ambiguidades GNSS são sumarizadas a seguir. A integração do GNSS com outras técnicas, seja para o posicionamento *indoor* e/ou pessoal, para o uso em aeronaves, ou para o posicionamento e navegação de veículos aéreos não tripulados (UAVs - *Unmanned Aerial Vehicles*), uma vez que sua qualidade pode melhorar consideravelmente se as observações

de fase da onda portadora forem incorporados. Se a solução das ambiguidades é realizada, beneficiar da alta precisão com que as fases portadoras geralmente podem ser medidas.

6. Além desta, pode-se incluir o desenvolvimento de métodos e algoritmos para a solução das ambiguidades no PPP, no PPP-RTK e para receptores de baixo custo e embarcados em celulares, bem como a solução instantânea das ambiguidades para o posicionamento relativo de linhas de base longas.
7. Os problemas em investigação mais importantes na solução e validação das ambiguidades podem ser resumidos da seguinte maneira. O primeiro desafio é qual teste de validação utilizar e como determinar o valor crítico, de forma que o usuário tenha controle sobre a taxa de falha. Um segundo desafio é a sensibilidade da solução das ambiguidades devido a erros sistemáticos não modelados e não detectados, como por exemplo, o multicaminho. O terceiro desafio para a solução das ambiguidades é a ocorrência de vetores de alta dimensão, devido ao advento do Multi-GNSS. Já o quarto é o uso de modelos não adequados que acaba por prejudicar a obtenção da solução das ambiguidades. Estes dois últimos problemas podem ser solucionados com a solução parcial das ambiguidades, uma das tendências nesse tópico.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. GPS/VRS positioning using atmospheric modeling. *GPS Solutions*, Springer-Verlag, v. 15, n. 3, p. 253–261, 2011. ISSN 1080-5370. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10291-010-0187-3>>.
- ALVES, D. B. M. et al. Using a regional numerical weather prediction model for gnss positioning over Brazil. *GPS solutions*, Springer, v. 20, n. 4, p. 677–685, 2016.
- BANVILLE, S.; LANGLEY, R. B. Instantaneous cycle-slip correction for real-time ppp applications. *Navigation*, Wiley Online Library, v. 57, n. 4, p. 325–334, 2010.
- BARTOLOMÉ, J. P. et al. Overview of galileo system. In: NUERM J. AND LOHAN, E. S.; SAND, S.; HURKSKAINEN, H. (Ed.). *Galileo Positioning Technology*. Dordrecht: Springer, 2014. p. 9–33.
- BISNATH, S. B. Efficient, automated cycle-slip correction of dual-frequency kinematic GPS data. In: *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*. Salt Lake City: Institute of Navigation, 2000. p. 145–154.
- BLEWITT, G. Carrier phase ambiguity resolution for the global positioning system applied to geodetic baselines up to 2000 km. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Wiley Online Library, v. 94, n. B8, p. 10187–10203, 1989.
- BLEWITT, G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 17, n. 3, p. 199–202, 1990.
- BOEHM, J.; SCHUH, H. Vienna mapping functions in vlbi analyses. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 31, n. 1, 2004.
- BOEHM, J.; WERL, B.; SCHUH, H. Troposphere mapping functions for gps and very long baseline interferometry from european centre for medium-range weather forecasts operational analysis data. *Journal of geophysical research: solid earth*, Wiley Online Library, v. 111, n. B2, 2006.
- BOSSLER, J. D.; GOAD, C. C.; BENDER, P. L. Using the global positioning system (gps) for geodetic positioning. *Bulletin géodésique*, Springer, v. 54, n. 4, p. 553, 1980.
- BRACK, A. Reliable GPS+ BDS RTK positioning with partial ambiguity resolution. *GPS solutions*, Springer, v. 21, n. 3, p. 1083–1092, 2017.
- BRACK, A. Rapid initialization for long baseline rtk positioning: Combined gps+ galileo+ bds+ qzss+ glonass with partial ambiguity resolution. In: IEEE. *2020 European Navigation Conference (ENC)*. [S.l.], 2020. p. 1–9.

- CAO, W.; O'KEEFE, K.; CANNON, M. Partial ambiguity fixing within multiple frequencies and systems. In: *Proceedings of ION GNSS*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 312–323.
- CAO, W.; O'KEEFE, K.; CANNON, M. E. Evaluation of compass ambiguity resolution performance using geometric-based techniques with comparison to GPS and Galileo. In: *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1688–1697.
- CELLMER, S.; PAZIEWSKI, J.; WIELGOSZ, P. Fast and precise positioning using mafa method and new GPS and Galileo signals. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, v. 10, n. 4, p. 172, 2013.
- CHANG, X.-W.; YANG, X.; ZHOU, T. Mlambda: a modified lambda method for integer least-squares estimation. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 79, n. 9, p. 552–565, 2005.
- CHATFIELD, C. *The analysis of time series: an introduction*. 6. ed. London: CRC press, 2003. ISBN 1-58488-317-0.
- CHU, F.-Y.; YANG, M. Gps/galileo long baseline computation: method and performance analyses. *GPS Solutions*, v. 18, n. 2, p. 263–272, Apr 2014. ISSN 1521-1886. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10291-013-0327-7>>.
- COCARD, M. et al. A systematic investigation of optimal carrier-phase combinations for modernized triple-frequency gps. *Journal of geodesy*, Springer, v. 82, n. 9, p. 555–564, 2008.
- CONKER, R. S. et al. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/satellite-based augmentation system availability. *Radio Science*, Wiley Online Library, v. 38, n. 1, p. 1–1, 2003.
- DAI, L. et al. Innovative algorithms to improve long range rtk reliability and availability. In: *Proceedings of ION NTM*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 860–872.
- DONG, D.-N.; BOCK, Y. Global positioning system network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in california. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Wiley Online Library, v. 94, n. B4, p. 3949–3966, 1989.
- EL-RABBANY, A. *Introduction to GPS: the global positioning system*. [S.l.]: Artech house, 2002.
- EULER, H.-J.; SCHAFFRIN, B. On a measure for the discernibility between different ambiguity solutions in the static-kinematic GPS-mode. In: SCHWARZ, K.-P.; LACHAPPELLE, G. (Ed.). *Kinematic Systems in Geodesy, Surveying, and Remote Sensing*. Springer New York, 1991, (International Association of Geodesy Symposia, v. 107). p. 285–295. ISBN 978-0-387-97465-1. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-3102-8_26>. Acesso em: 21 fev. 2014.
- FENG, Y. GNSS three carrier ambiguity resolution using ionosphere-reduced virtual signals. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 82, n. 12, p. 847–862, 2008.
- FENG, Y.; RIZOS, C. Three carrier approaches for future global, regional and local gnss positioning services: concepts and performance perspectives. In: *Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2005)*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 2277–2287.

- GAO, W.; GAO, C.; PAN, S. A method of GPS/BDS/glonass combined RTK positioning for middle-long baseline with partial ambiguity resolution. *Survey review*, Taylor & Francis, v. 49, n. 354, p. 212–220, 2017.
- GAO, W. et al. Method and assessment of bds triple-frequency ambiguity resolution for long-baseline network rtk. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 60, n. 12, p. 2520–2532, 2017.
- GE, M. et al. Resolution of gps carrier-phase ambiguities in precise point positioning (ppp) with daily observations. *Journal of geodesy*, Springer, v. 82, n. 7, p. 389–399, 2008.
- GOAD, C. *Surveying with the global positioning system*. [S.l.: s.n.], 1996. v. 2. 501–517 p.
- GONG, X. et al. Rapid ambiguity resolution over medium-to-long baselines based on gps/bds multi-frequency observables. *Advances in Space Research*, v. 59, n. 3, p. 794 – 803, 2017. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117716303702>>.
- GOUVEIA, T. A. F. *Função de mapeamento brasileira da atmosfera neutra e sua aplicação no posicionamento GNSS na América do Sul*. 129 p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2019.
- GOUVEIA, T. A. F.; ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F. Avaliação da acurácia e tempo de convergência do ppp com o uso de previsão numérica de tempo na modelagem do atraso troposférico. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 69, n. 3, 2017.
- HAN, S. Quality-control issues relating to instantaneous ambiguity resolution for real-time gps kinematic positioning. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 71, n. 6, p. 351–361, 1997.
- HAN, S.; RIZOS, C. Validation and rejection criteria for integer least-squares estimation. *Survey Review*, Taylor & Francis, v. 33, n. 260, p. 375–382, 1996.
- HAUSCHILD, A. Basic observation equations. In: *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Berlin: Springer, 2017. p. 561–582.
- HAUSCHILD, A. Combinations of observations. In: *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Berlin: Springer, 2017. p. 583–604.
- HE, H. et al. Performance assessment of single-and dual-frequency beidou/GPS single-epoch kinematic positioning. *GPS solutions*, Springer, v. 18, n. 3, p. 393–403, 2014.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M. et al. Feasibility of wide-area subdecimeter navigation with Galileo and modernized GPS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, v. 41, n. 9, p. 2128–2131, 2003.
- HOFFMAN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. *GNSS-Global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and more*. Wien: Springer-Verlag, 2008.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. *GNSS – Global Navigation Satellite System: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Morlenbach: Springer-Verlag Wien, 2008.
- HOPFIELD, H. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical research*, Wiley Online Library, v. 74, n. 18, p. 4487–4499, 1969.

HUINCA, S. C. M.; KRUEGER, C. P. Determinação de parâmetros de calibração relativos em nível absoluto de antenas de receptores gps. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 63, p. 649–662, 2011.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS - RBMC*. 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 04 dez. 2019.

JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M. Glonass: Revisão teórica e estado da arte. *Revista brasileira Geomática*, v. 6, n. 2, p. 155–173, 2018.

Ji, S. et al. Single epoch ambiguity resolution for galileo with the CAR and LAMBDA methods. *GPS Solutions*, Springer, v. 11, n. 4, p. 259–268, 2007.

JONGE, P. D.; TIBERIUS, C. C. J. . M. The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. *Publications of the Delft Computing Centre, LGR-Series*, Delft University of Technology, v. 12, n. 12, p. 1–47, 1996. ISSN 93-0928-2122. Disponível em: <http://www.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over_de_faculteit/Afdelingen/Afdeling_Geoscience_and_Remote_Sensing/pubs/lgr12.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2013.

JONKMAN, N. et al. GNSS long baseline ambiguity resolution: impact of a third navigation frequency. In: *Geodesy Beyond 2000*. Birmingham: Springer, 2000. p. 349–354.

KAPLAN, D.; HEGARTY, C. J. *Understanding GPS: principles and applications*. [S.l.]: Artech House, 2006.

KIM, D.; LANGLEY, R. B. Instantaneous real-time cycle-slip correction of dual frequency GPS data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON KINEMATIC SYSTEMS IN GEODESY, GEOMATICS AND NAVIGATION, 2001, Banff. *Proceedings...* [S.l.], 2001. p. 5–8.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency gps users. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, IEEE, n. 3, p. 325–331, 1987.

KLOBUCHAR, J. A. et al. Ionospheric effects on gps. *Global Positioning System: Theory and applications.*, v. 1, p. 485–515, 1996.

LACY, M. C. de et al. The bayesian detection of discontinuities in a polynomial regression and its application to the cycle-slip problem. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 82, n. 9, p. 527–542, 2008.

LANDAU, H.; EULER, H.-J. On-the-fly ambiguity resolution for precise differential positioning. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 5., 1992, Albuquerque. *Proceedings of ION GPS 1992*. Albuquerque, 1992. p. 607–613.

LANGLEY, R. B. Gps, the ionosphere, and the solar maximum. *GPS world*, v. 11, n. 7, p. 44–49, 2000.

LANGLEY, R. B.; TEUNISSEN, P. J.; MONTENBRUCK, O. Introduction to gnss. In: *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Cham: Springer, 2017. p. 3–23.

- LAWRENCE, D. G. A new method for partial ambiguity resolution. In: *Proceedings of the 2009 international technical meeting of the institute of navigation*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 652–663.
- LEE, H.-K.; WANG, J.; RIZOS, C. Effective cycle slip detection and identification for high precision GPS/ins integrated systems. *The Journal of Navigation*, Cambridge Univ Press, v. 56, n. 03, p. 475–486, 2003.
- LEICK, A.; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D. *GPS satellite surveying*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- LI, B.; FENG, Y.; SHEN, Y. Three carrier ambiguity resolution: distance-independent performance demonstrated using semi-generated triple frequency GPS signals. *GPS solutions*, Springer, v. 14, n. 2, p. 177–184, 2010.
- LI, J. et al. An analytical study on the carrier-phase linear combinations for triple-frequency gnss. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 91, n. 2, p. 151–166, 2017.
- LI, J. et al. GNSS multi-carrier fast partial ambiguity resolution strategy tested with real BDS/GPS dual-and triple-frequency observations. *GPS Solutions*, Springer, v. 19, n. 1, p. 5–13, 2015.
- LI, T. et al. High-accuracy positioning in urban environments using single-frequency multi-GNSS RTK/mems-imu integration. *Remote sensing*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 2, p. 205, 2018.
- LIU, Z. A new automated cycle slip detection and repair method for a single dual-frequency GPS receiver. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 85, n. 3, p. 171–183, 2011.
- LOYER, S. et al. Zero-difference gps ambiguity resolution at cnes–cls igs analysis center. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 86, n. 11, p. 991–1003, 2012.
- MADER, G. L. Gps antenna calibration at the national geodetic survey. *GPS solutions*, Springer, v. 3, n. 1, p. 50–58, 1999.
- MARQUES, H. A.; MONICO, J. F.; AQUINO, M. Rinex_ho: second-and third-order ionospheric corrections for rinex observation files. *GPS solutions*, Springer, v. 15, n. 3, p. 305–314, 2011.
- MATZKA, J. et al. The geomagnetic kp index and derived indices of geomagnetic activity. *Space Weather*, Wiley Online Library, v. 19, n. 5, p. e2020SW002641, 2021.
- MCNAMARA, L. F. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. [S.l.]: Krieger publishing company, 1991.
- MELBOURNE, W. The case for ranging in gps-based geodetic systems. In: *Proceedings 1st international symposium on precise positioning with the global positioning system*. [S.l.: s.n.], 1985. p. 373–386.
- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Editora UNESP, 2008.
- MONICO, J. F. G.; SOUZA, E. M. D.; MACHADO, W. C. Avaliação de estratégias de detecção e correção de perdas de ciclos na portadora gps l1. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, n. 2, p. 178–193, 2009.

- MONTENBRUCK, O. et al. Initial assessment of the compass/beidou-2 regional navigation satellite system. *GPS solutions*, Springer, v. 17, n. 2, p. 211–222, 2013.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. *Análise de séries temporais*. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. 535 p. ISBN 85-212-0348-9.
- MOWLAM, A. Baseline precision results using triple frequency partial ambiguity sets. In: *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 2509–2518.
- NARDO, A.; LI, B.; TEUNISSEN, P. Partial ambiguity resolution for ground and space-based applications in a GPS+ Galileo scenario: a simulation study. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 57, n. 1, p. 30–45, 2016.
- NIELL, A. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Wiley Online Library, v. 101, n. B2, p. 3227–3246, 1996.
- ODIJK, D. Weighting ionospheric corrections to improve fast GPS positioning over medium distances. In: *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*. Salt Lake City: Institute of Navigation, 2000. p. 1113–1123.
- ODIJK, D. Fast precise gps positioning in the presence of ionospheric delays. *Publications on Geodesy*, 52, NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie Netherlands Geodetic Commission, 2002.
- ODIJK, D. *Multi-GNSS Precise Positioning*. 2015. Disponível em: <<http://www.insidegnss.com/node/4275>>.
- ODIJK, D.; ARORA, B. S.; TEUNISSEN, P. J. Predicting the success rate of long-baseline GPS+ Galileo (partial) ambiguity resolution. *The journal of navigation*, Cambridge University Press, v. 67, n. 3, p. 385–401, 2014.
- ODIJK, D.; TEUNISSEN, P.; TIBERIUS, C. Triple-frequency ionosphere-free phase combinations for ambiguity resolution. In: *Proc. of the ENC-GNSS 2002 proceedings; The European Navigation Conference, Copenhagen, Denmark*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 27–30.
- ODIJK, D.; TEUNISSEN, P. J. Improving the speed of cors network rtk ambiguity resolution. In: IEEE AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS SOCIETY. *Position Location and Navigation Symposium (PLANS)*. Indian Wells, 2010. p. 79–84.
- ODIJK, D. et al. LAMBDA-based ambiguity resolution for next-generation gnss wide area rtk. In: INSTITUTE OF NAVIGATION. *Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*. San Diego, 2010.
- ODOLINSKI, R.; TEUNISSEN, P.; ODIJK, D. Combined GPS+BDS+Galileo+QZSS for long baseline RTK positioning. In: INSTITUTE OF NAVIGATION. *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014)*. Tampa, 2014. p. 2326 – 2340.
- ODOLINSKI, R.; TEUNISSEN, P. J. An assessment of smartphone and low-cost multi-gnss single-frequency rtk positioning for low, medium and high ionospheric disturbance periods. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 93, n. 5, p. 701–722, 2019.

ODOLINSKI, R.; TEUNISSEN, P. J. G.; ODIJK, D. Combined GPS + BDS for short to long baseline RTK positioning. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 26, n. 4, p. 045801, feb 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F0957-0233%2F26%2F4%2F045801>>.

PARKINS, A. Increasing gnss rtk availability with a new single-epoch batch partial ambiguity resolution algorithm. *GPS solutions*, Springer, v. 15, n. 4, p. 391–402, 2011.

PAZIEWSKI, J.; SIERADZKI, R. Integrated GPS + BDS instantaneous medium baseline RTK positioning: Signal analysis, methodology and performance assessment. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 60, n. 12, p. 2561–2573, 2017.

PRANGE, L. et al. *CODE product series for the IGS-MGEX project*. Astronomical Institute, University of Bern, 2020. Disponível em: <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE_MGEX>. Acesso em: 04 set. 2020.

PROL, F. dos S. et al. Assessment of a tec calibration procedure by single-frequency ppp. *GPS Solutions*, Springer, v. 22, n. 2, p. 35, 2018.

RADICELLA, S. M. The nequick model genesis, uses and evolution. *Annals of geophysics*, v. 52, n. 3-4, p. 417–422, 2009.

RICHERT, T.; EL-SHEIMY, N. Optimal linear combinations of triple frequency carrier phase data from future global navigation satellite systems. *GPS solutions*, Springer, v. 11, n. 1, p. 11–19, 2007.

SAASTAMOINEN, J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *The use of artificial satellites for geodesy*, Wiley Online Library, v. 15, p. 247–251, 1972.

SAPUCCI, L. *Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS*. 167 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2001.

SCHAFFRIN, B.; BOCK, Y. A unified scheme for processing gps dual-band phase observations. *Bulletin géodésique*, Springer, v. 62, n. 2, p. 142–160, 1988.

SCHMID, R. How to use IGS antenna phase center corrections? *GPS World's TECH TALK Blog*, 02 2010. Disponível em: <http://acc.igs.org/antennas/igs-pcvs_gpsworld10.pdf>. Acesso em: 04 set. 2019.

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

SETTI JÚNIOR, P. d. T. *Posicionamento por ponto multi-GNSS: análise dos sistemas, sinais e modelos ionosféricos*. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2019.

SETTI JÚNIOR, P. d. T.; ALVES, D. B. M.; SILVA, C. M. d. Klobuchar and nequick g ionospheric models comparison for multi-gnss single-frequency code point positioning in the brazilian region. *Boletim de Ciências Geodésicas*, SciELO Brasil, v. 25, n. 3, 2019.

- SETTI JÚNIOR, P. d. T. et al. Seasonal analysis of Klobuchar and NeQuick G single-frequency ionospheric models performance in 2018. *Advances in Space Research*, 2020. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117720308139>>.
- SETTI JÚNIOR, P. d. T.; GOUVEIA; ALVES, D. B. M. 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.
- SETTI JÚNIOR, P. d. T. et al. Posicionamento multi-GNSS. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, p. 1200–1224, dez. 2020. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/56580>>.
- SILVA, C. et al. Ionospheric scintillation impact on ambiguity resolution using ADOP in closed form. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 64, n. 4, p. 921–932, 2019.
- SOUZA, E. M. *Efeito de Multicaminho de Alta Frequência no Posicionamento Relativo GPS Estático: Detecção e atenuação utilizando wavelets*. 141 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2004.
- SOUZA, E. M. d. *Análise de wavelets para detecção e correção do multicaminho no posicionamento relativo GNSS estático e cinemático*. 171 p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2008.
- STEIGENBERGER, P.; MONTENBRUCK, O. Galileo status: orbits, clocks, and positioning. *GPS solutions*, Springer, v. 21, n. 2, p. 319–331, 2017.
- SYSTEM, B. N. S. *The BDS-3 Constellation Deployment Is Fully Completed Six Months Ahead of Schedule UNOOSA Sends a Congratulation Letter*. 2020. Disponível em: <http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/202006/t20200623_20692.html>. Acesso em: 03 dezembro de 2020.
- TEUNISSEN, P. The invertible GPS ambiguity transformations. 1995.
- TEUNISSEN, P. The geometry-free gps ambiguity search space with a weighted ionosphere. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 71, n. 6, p. 370–383, 1997.
- TEUNISSEN, P. The probability distribution of the gps baseline for a class of integer ambiguity estimators. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 73, n. 5, p. 275–284, 1999.
- TEUNISSEN, P. Integer aperture gnss ambiguity resolution. *Artificial Satellites*, Versita, v. 38, n. 3, p. 79–88, 2003.
- TEUNISSEN, P. Theory of integer equivariant estimation with application to gnss. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 77, n. 7-8, p. 402–410, 2003.
- TEUNISSEN, P.; JOOSTEN, P.; TIBERIUS, C. Geometry-free ambiguity success rates in case of partial fixing. In: *Proceedings of ION-NTM*. [S.l.: s.n.], 1999. p. 25–27.
- TEUNISSEN, P.; MONTENBRUCK, O. *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Cham: Springer, 2017.

- TEUNISSEN, P.; ODOLINSKI, R.; ODIJK, D. Instantaneous beidou + GPS RTK positioning with high cut-off elevation angles. *Journal of geodesy*, Springer, v. 88, n. 4, p. 335–350, 2014.
- TEUNISSEN, P. J. A new method for fast carrier phase ambiguity estimation. In: IEEE. *Proceedings of 1994 IEEE Position, Location and Navigation Symposium-PLANS'94*. [S.l.], 1994. p. 562–573.
- TEUNISSEN, P. J. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. *Journal of geodesy*, Springer, v. 70, n. 1, p. 65–82, 1995.
- TEUNISSEN, P. J. Gns ambiguity bootstrapping: theory and application. In: *Proceedings of international symposium on kinematic systems in geodesy, geomatics and navigation*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 246–254.
- TEUNISSEN, P. J. Carrier phase integer ambiguity resolution. In: *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Berlin: Springer, 2017. p. 661–685.
- TEUNISSEN, P. J. G. Least-squares estimation of the integer GPS ambiguities. In: *Invited lecture, section IV theory and methodology, IAG general meeting, Beijing, China*. [S.l.: s.n.], 1993.
- TEUNISSEN, P. J. G. GPS carrier phase ambiguity fixing concepts. In: _____. *GPS for Geodesy*. Berlin: Springer Berlin, 1998. p. 271–318.
- TEUNISSEN, P. J. G. On the integer normal distribution of the GPS ambiguities. *Artificial satellites*, v. 33, n. 2, p. 49–64, 1998. ISSN 2083-6104. Disponível em: <<http://saegnss1.curtin.edu.au/Publications/1998/Teunissen1998integer.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2013.
- TEUNISSEN, P. J. G. An optimality property of the integer least-squares estimator. *Journal of Geodesy*, Springer-Verlag, v. 73, n. 11, p. 587–593, 1999. ISSN 0949-7714.
- TIAN, Y. et al. Estimating inter-system biases for tightly combined galileo/bds/gps rtk. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 65, n. 1, p. 572–585, 2020.
- TIBERIUS, C.; JONGE, P. J. D. Fast positioning using the LAMBDA-method. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIFFERENTIAL SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS, 4., 1995, Bergen. *Proceedings DSNS 95*. Bergen, 1995. p. 24–28. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.51.8084&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 18 set. 2013.
- TIBERIUS, C. et al. Integral GPS-Galileo ambiguity resolution. In: INSTITUTE OF NAVIGATION. *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2002)*. Portland, 2002.
- VANI, B. C. et al. A novel approach to improve gnss precise point positioning during strong ionospheric scintillation: theory and demonstration. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 68, n. 5, p. 4391–4403, 2019.
- VERHAGEN, S. *The GNSS integer ambiguities: estimation and validation*. Delft: NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie, Netherlands Geodetic Commission, 2005. (Publications on geodesy). ISBN 9789061322900.

- VERHAGEN, S.; LI, B.; TEUNISSEN, P. J. Ps-lambda: ambiguity success rate evaluation software for interferometric applications. *Computers & Geosciences*, Elsevier, v. 54, p. 361–376, 2013.
- VERHAGEN, S.; TEUNISSEN, P. J. New global navigation satellite system ambiguity resolution method compared to existing approaches. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, v. 29, n. 4, p. 981–991, 2006.
- VERHAGEN, S.; TEUNISSEN, P. J. The ratio test for future gnss ambiguity resolution. *GPS solutions*, Springer, v. 17, n. 4, p. 535–548, 2013.
- VERHAGEN, S.; TEUNISSEN, P. J. Least-squares estimation and kalman filtering. In: *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. [S.l.]: Springer, 2017. p. 639–660.
- VERHAGEN, S. et al. Gnss ambiguity resolution: which subset to fix. In: *IGNSS Symposium*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 15–17.
- WANG, J.; STEWART, M.; TSAKIRI, M. A discrimination test procedure for ambiguity resolution on-the-fly. *Journal of Geodesy*, Springer, v. 72, n. 11, p. 644–653, 1998.
- WIROLA, L.; KONTOLA, I.; SYRJÄRINNE, J. The effect of the antenna phase response on the ambiguity resolution. In: IEEE. *2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*. [S.l.], 2008. p. 606–615.
- WUBBENA, G. Software developments for geodetic positioning with gps using ti 4100 code and carrier measurements. In: US DEPARTMENT OF COMMERCE. *Proceedings 1st international symposium on precise positioning with the global positioning system*. [S.l.], 1985. p. 403–412.
- XIN, S. et al. On the choice of the third-frequency galileo signals in accelerating ppp ambiguity resolution in case of receiver antenna phase center errors. *Remote Sensing*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 8, p. 1315, 2020.
- YANG, Y. et al. Progress and performance evaluation of beidou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-3 demonstration system. *Science China Earth Sciences*, Springer, v. 61, n. 5, p. 614–624, 2018.
- ZHANG, W. et al. Investigation of combined GPS/Galileo cascading ambiguity resolution schemes. In: INSTITUTE OF NAVIGATION. *Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003)*. Portland, 2003. p. 2599–2610.
- ZHANG, Y. et al. Contribution of qzss with four satellites to multi-GNSS long baseline RTK. *Journal of Spatial Science*, Taylor & Francis, v. 65, n. 1, p. 41–60, 2020.
- ZHAO, Q. et al. Three-carrier ambiguity resolution using the modified tcar method. *GPS solutions*, Springer, v. 19, n. 4, p. 589–599, 2015.
- ZOLESI, B.; CANDLER, L. R. *Ionospheric prediction and forecasting*. [S.l.]: Springer, 2016.

LISTA DE PUBLICAÇÕES

Artigos publicados

1. Mendonça, C. H. C.; Alves, D. B. M.; **Silva, C.M.** Melhoria no Limiar de Detecção de Perda de Ciclos para o Método das TD no Posicionamento Relativo. *Revista Brasileira de Cartografia*, 73, p. 106-118, 2021.
2. **Silva, C.M.**; Setti Júnior, P.T.; Alves, D.B.M.; Souza, E.M. GNSS ambiguity resolution with ratio and fixed failure ratio tests for long baseline network RTK under ionospheric activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 202, 105256, 2020.
3. **Silva, C.M.**; Setti Júnior, P.T.; Alves, D.B.M.; Monico, J. F. G. Galileo: a consolidação do sistema de posicionamento europeu. *Revista Brasileira de Geomática*, 8(4), p. 238-255, 2020.
4. Setti Júnior, P.T.; Aquino, M.; Veetil, S. V.; Alves, D.B.M.; **Silva, C.M.** Seasonal analysis of Klobuchar and NeQuick G single-frequency ionospheric models performance in 2018. *Advances in Space Research*, 2020.
5. Setti Júnior, P.T.; **Silva, C.M.**; Oliveira Júnior, P.S.; Alves, D.B.M.; Monico, J. F. G. Posicionamento Multi-GNSS. *Revista Brasileira de Cartografia*, 72, p. 1200-1224, 2020.
6. **Silva, C.M.**; Alves, D.B.M.; Souza, E.M.; Setti Júnior, P.T. Ionospheric scintillation impact on ambiguity resolution using ADOP in closed form. *Advances on Space Research*, 64(4), p. 921-932, 2019.
7. Setti Júnior, P.T.; Alves, D.B.M.; **Silva, C.M.** Klobuchar and NeQuickG ionospheric models comparison for multi-GNSS single-frequency Point Positioning in the Brazilian region *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25(3), 2019.

Trabalhos completos em eventos

1. Moraes, V.V.S.; **Silva, C.M.**; Alves, D.B.M. A medida ADOP e os fatores que influenciam na solução das ambiguidades. In: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 1,422 - 431, 2018.

2. **Silva, C.M.**; Alves, D.B.M.;Souza, E.M.; Monico, J.F.G; Moraes, V.V.S. Análise comparativa dos testes de validação das ambiguidades em períodos de cintilação ionosférica. In: Anais do IV SBG - Simpósio Brasileiro de Geomática e II Jornadas Lusófonas sobre Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica/CTIG, Presidente Prudente, Brazil, 2017. (Oral)
3. Moraes, V.V.S.; **Silva, C.M.**; Alves, D.B.M. Análise da influência de diferentes fatores no ADOP para o modelo de geometria fixa em diferentes linhas de base. In: Anais do IV SBG - Simpósio Brasileiro de Geomática e II Jornadas Lusófonas sobre Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica/CTIG, Presidente Prudente, Brazil, 2017.
4. **Silva, C.M.**; Alves, D.B.M.; Souza, E.M. Avaliação do desempenho da solução das ambiguidades no posicionamento baseado em redes sob influência da atividade ionosférica. In: Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics, Gramado, Brazil, 2016. (Oral)

Apresentações de Trabalhos

1. **Silva, C.M.**; Setti Júnior, P.T.; Alves, D.B.M; Monico, J.F.G. Accuracy Assessment of Long Baseline Real Time Kinematic Ambiguity Resolution with Multi-GNSS Data in Brazil. In: AGU Fall Meeting, San Francisco, 2019.
2. Setti Júnior, P.T.; Wdowinski, S.; **Silva, C.M.**; Alves, D.B.M; Tachibana, V.M. Multivariate Analysis of Vertical GPS Time Series Calculated by Seven Processing Centers Used to Characterize Vertical Crustal Movements. In: AGU Fall Meeting, San Francisco, 2019.
3. **Silva, C.M.** ; Alves, D.B.M.; Monico, J.F.G.; Souza, E.M. Instantaneous Ambiguity Resolution for Long Baselines: Combined GPS+Galileo to Relative Positioning in Brazil. In: 1st International Symposium Applied Geomatics and Geospatial Solutions - Geodata, Rosario, 2017.

Resumos publicados em anais de congressos

Internacional

1. **Silva, C. M.**; Setti Jr, P. T.; Alves, D. B. M.; Monico, J. F. G. Accuracy Assessment of Long Baseline Real Time Kinematic Ambiguity Resolution with Multi-GNSS Data in Brazil In: AGU Fall Meeting, 2019, San Francisco. **Fall Meeting 2019**, 2019.
2. Setti Jr, P. T.; Wdowinski, S.; **Silva, C. M.**; Alves, D. B. M.; Tachibana, V. M. Multivariate Analysis of Vertical GPS Time Series Calculated by Seven Processing Centers Used to Characterize Vertical Crustal Movements In: **AGU Fall Meeting**, 2019, San Francisco. **Fall Meeting 2019**, 2019.

3. Setti Jr, P. T.; Alves, D. B. M.; **Silva, C. M.** Multi-GNSS Point Positioning using Galileo's NeQuick ionospheric model over the Brazilian region In: IX Hotine-Marussi Symposium, 2018, Roma. **Proceedings of IX Hotine-Marussi Symposium**, 2018.
4. Mendonca, C. H. C. ; **Silva, C. M.** ; Alves, D. B. M. ; Setti Jr, P. T. . *Ambiguity resolution for GPS and Galileo combined use: first results in Brazil*. In: *6th International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of GNSS / Galileo*, 2017, Valencia - Espanha. *Proceedings of 6th International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of GNSS / Galileo*, 2017.
5. **Silva, C. M.** ; Alves, D. B. M. ; Monico, J. F. G. ; Souza, E. M. . *Instantaneous Ambiguity Resolution for Long Baselines: Combined GPS+Galileo to Relative Positioning in Brazil*. In: Geodata 2017, 2017, Rosario - Argentina. *PRIMER SIMPOSIO INTERNACIONAL DE GEOMATICA APLICADA Y SOLUCIONES GEOESPACIALES: Libro de Resúmenes de Ponencias y Conferencias* , 2017.

Nacional

1. Mathias, M. V. T.;**Silva, C. M.** ; Alves, D. B. M. ADOP como preditor do percentual de fixação das ambiguidades: análise a partir de dados multifrequência GNSS para posicionamento relativo. In: XXXII CIC - Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2020, Presidente Prudente. **Anais ...**, 2020.
2. Vieira, J. V. E.; Alves, D. B. M.; Jerez, G. O.; **Silva, C. M.** ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO DE DADOS GPS E GLONASS NO POSICIONAMENTO RELATIVO In: XI COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2020, Curitiba. **A Geoinformação em uma sociedade transformada: Anais do evento**, 2020.
3. Vieira, J. V. E.; Alves, D. B. M.; Jerez, G. O.; **Silva, C. M.** Influência do comportamento da ionosfera no posicionamento relativo com integração GPS e GLONASS. In: XXXI Congresso Iniciação Científica da Unesp, 2019, Presidente Prudente. **Anais do XXXI CIC.**, 2019.
4. Setti Jr, P. T.; Wdowinski, S.; **Silva, C. M.**; Alves, D. B. M.; Tachibana, v. M. Multivariate Analysis of Vertical GPS Time Series Calculated by Seven Processing Centers Used to Characterize Vertical Crustal Movements In: AGU Fall Meeting, 2019, San Francisco. **Fall Meeting 2019**, 2019.
5. Moraes, V. V. S.; Vieira, J. V. E.; **Silva, C. M.**; Alves, D. B. M. Aplicação da ferramenta PS-LAMBDA para avaliação da taxa de sucesso na estimativa inteira das ambiguidades In: X Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2018, Curitiba. **Anais do X CBCG**, 2018.
6. Vieira, J. V. E.; Alves, D. B. M.; **Silva, C. M.** Fatores que afetam a solução das ambiguidades no posicionamento baseado em redes In: XXX Congresso de Iniciação Científica - UNESP, 2018, Presidente Prudente. **Anais do XXX Congresso de Iniciação Científica** - UNESP, 2018.

7. Moraes, V. V. S.; Alves, D. B. M.; **Silva, C. M.** OS IMPACTOS DA MODERNIZAÇÃO GNSS E DA ATIVIDADE IONOSFÉRICA NO PROCESSO DE SOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES In: XXX Congresso de Iniciação Científica - UNESP, 2018, Presidente Prudente. **Anais do XXX Congresso de Iniciação Científica** - UNESP, 2018.
8. Moraes, V. V. S.; Alves, D. B. M. ; **Silva, C. M.** . Investigação da decorrelação das ambiguidades GNSS na estimação inteira empregando o método LAMBDA. In: XXIX CIC - Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2017, Presidente Prudente. **Anais do XXIX CIC**, 2017.
9. **Silva, C. M.** Solução das ambiguidades no posicionamento por GNSS In: I EEPGCC, 2017, Presidente Prudente. **Anais do I EEPGCC**, 2017.

Orientações e supervisões concluídas

1. Maria Victoria Testi Mathias. Bolsa PIBIT - Posicionamento relativo com os sistemas GPS e Galileo: avaliação da solução das ambiguidades no território brasileiro. Início: 2019. Iniciação científica (Graduanda em Engenharia Cartográfica) - FCT/UNESP, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves. Coorientadora: **Crislaine Menezes da Silva.**
2. João Vitor Espinhosa Vieira. Bolsa IC PIBIC - Análise da solução das ambiguidades GNSS no posicionamento relativo GPS e GLONASS considerando as condições ionosféricas do Brasil. Início: 2018. Iniciação científica (Graduando em Engenharia Cartográfica) - FCT/UNESP, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientadoar: Daniele Barroca Marra Alves. Coorientadora: **Crislaine Menezes da Silva.**
3. João Vitor Espinhosa Vieira. Bolsa IC PIBIC - Solução das Ambiguidades no Posicionamento por Satélite. Início: 2017. Iniciação científica (Graduando em Engenharia Cartográfica) - FCT/UNESP, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves. Coorientadora: **Crislaine Menezes da Silva.**
4. Victor Vinicius Silva de Moraes. Análise dos fatores que afetam o processo de solução das ambiguidades no posicionamento por GNSS. 2017. Iniciação científica (Graduando em Engenharia Cartográfica) - FCT/UNESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves. Coorientadora: **Crislaine Menezes da Silva.**
5. Victor Vinicius Silva de Moraes. Primeiro Ano - Bolsa IC PIBIC (2016-2017) - Solução das Ambiguidades no Posicionamento por Satélite. 2017. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia Cartográfica) - FCT/UNESP, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves. Coorientadora: **Crislaine Menezes da Silva.**