

CAIO HENRIQUE CHRISOSTOMO MENDONÇA

**DETECÇÃO E CORREÇÃO DE PERDAS DE CICLOS PARA DADOS
GPS DE TRIPLA FREQUÊNCIA**



Presidente Prudente – SP

Abril de 2019

CAIO HENRIQUE CHRISOSTOMO MENDONÇA

**DETECÇÃO E CORREÇÃO DE PERDAS DE CICLOS PARA DADOS
GPS DE TRIPLA FREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Profa. Dra. Daniele Barroca Marra Alves

Presidente Prudente – SP

Abril de 2019

M539d Mendonça, Caio Henrique Chrisóstomo
Detecção e correção de perdas de ciclos para dados GPS
de tripla frequência / Caio Henrique Chrisóstomo
Mendonça. -- Presidente Prudente, 2019
107 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente
Prudente
Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves

1. Geodesia. 2. Sistema de Posicionamento Global. 3.
Perdas de ciclos. 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).

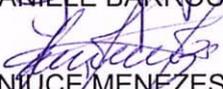
Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de CAIO HENRIQUE CHRISOSTOMO MENDONÇA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CÂMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE.

Aos 26 dias do mês de abril do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Sala de Apresentação de Projetos, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES - Orientador(a) do(a) Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, Profa. Dra. ENIUCE MENEZES DE SOUZA do(a) Centro de Ciências Exatas / Universidade Estadual de Maringá, Prof. Dr. LUIZ PAULO SOUTO FORTES do(a) Faculdade de Engenharia / Universidade do Estado do Rio de Janeiro, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de CAIO HENRIQUE CHRISOSTOMO MENDONÇA, intitulada **Detecção e correção de perdas de ciclos para dados GPS de tripla frequência**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES



Profa. Dra. ENIUCE MENEZES DE SOUZA



Prof. Dr. LUIZ PAULO SOUTO FORTES

DADOS CURRICULARES

Caio Henrique Chrisóstomo Mendonça

NASCIMENTO: 12/04/1994 – Presidente Bernardes – SP

FILIAÇÃO: Claudio Mendonça
Maria Aparecida Chrisóstomo Mendonça

2009-2011: Curso de Nível Técnico
Técnico em Agropecuária
ETEC Prof. Dr. Antônio Eufrásio de Toledo

2010-2011: Curso de Nível Técnico
Técnico em Agrimensura
ETEC Prof. Dr. Antônio Eufrásio de Toledo

2012-2017: Curso de Graduação
Engenharia Cartográfica
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

2017-2019 Curso de Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais, Claudio Mendonça e Maria Aparecia Chrisóstomo Mendonça, por todo o apoio, incentivo, compreensão e carinho, que não mediram esforços para que eu chegasse a essa etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Desejo externar os meus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram com o desenvolvimento desse trabalho, em especial:

A Deus, que sempre me guiou pelos melhores caminhos, pois sem Sua ajuda não conseguiria seguir em frente para alcançar meus objetivos.

A minha orientadora Profa. Dra. Daniele Barroca Marra Alves, pela oportunidade, confiança e ensinamentos a mim transmitidos, permitindo o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu irmão Caic Mendonça, pela imensa amizade e companheirismo.

A minha namorada Gabrielly Christina Marcolino Santana, que representa meu porto seguro, pelo carinho, apoio e força nos momentos mais difíceis.

A todos os amigos do PPGCC, pelas discussões, conversas e ajuda. Em especial a Juliane Komazaki e Ana Lúcia Souza pelo companheirismo desde a graduação até a pós-graduação.

Aos familiares e demais amigos que sempre me incentivaram e acreditaram em mim.

A Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente – SP e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) por toda estrutura e suporte disponibilizados.

Aos professores do Departamento de Cartografia e aos funcionários da FCT que de forma direta ou indireta contribuíram no desenvolvimento dessa dissertação.

Ao Projeto CIGALA/GALIBRA, administrado pela Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente – SP, pela disponibilização dos dados da rede.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Ao apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), sob forma de bolsa de demanda social. Processo: 2016/26000-5.

RESUMO

A observável fase da onda portadora é utilizada quando se deseja obter alta acurácia no posicionamento por sistemas globais de navegação por satélite. Mas, esta observável pode sofrer perdas de ciclos durante o rastreamento do sinal. 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. Assim, as perdas de ciclos devem ser detectadas e corrigidas para que se obtenha posicionamento acurado. Diversos métodos foram desenvolvidos com esse objetivo. Algo que também vem sendo amplamente estudado é a detecção das perdas de ciclos nos novos sinais GPS. O advento da terceira frequência disponibilizada a partir da modernização do GPS também deve ser explorado. Na presente pesquisa buscou-se estudar os diferentes métodos de detecção e correção de perdas de ciclos e implementar o mais adequado para o posicionamento de alta acurácia no Brasil. Foram selecionadas duas metodologias para fim de detecção e correção, sendo a primeira baseada no método das triplas diferenças (TD) clássico e a segunda baseada no método de sequência de combinações lineares. Além disso, foi proposta uma terceira metodologia para melhoria do método das TD. Foram realizados dois experimentos, sendo o primeiro realizado com dados simulados e o segundo com dados reais em período de alta atividade ionosférica, e para ambos os casos foram considerados dois cenários: linha de base curta e linha de base longa. Para dados simulados, em linha de base curta, o método TD clássico, o método TD proposto e o método das sequências de combinações lineares apresentaram 100%, 99,91% e 100% de acerto na detecção, resultando em 99,91%, 99,88% e 100% de acerto na correção das perdas de ciclos, respectivamente. Para linha de base longa, com dados simulados, obteve-se 31,37%, 63,79% e 100% de acerto na detecção, resultando em 49,45%, 95,32% e 100% de acerto na correção das perdas de ciclos quando utilizado o método TD clássico, o método TD proposto e o método das sequências de combinações lineares, respectivamente. No segundo experimento, conduzido com dados reais foi possível avaliar somente a melhoria no posicionamento, sendo esta para linha de base curta, de 81,71%, 67,08% e 10,79% para o método TD clássico, o método TD proposto e o método das sequências de combinações lineares, respectivamente. Em linha de base longa, após correção, o método TD clássico obteve piora de 12,18%, o método TD proposto proporcionou melhoria de 40,63%, enquanto o método das combinações lineares não apresentou melhoria.

Palavras-chaves: Perdas de ciclos; Detecção; Correção; Posicionamento relativo; tripla frequência GPS.

ABSTRACT

Carrier phase observable are used in high accuracy positioning by global navigation satellite systems. However, the carrier phase measurement may suffer cycle slips during signal tracking. A cycle slip is a discontinuity of an integer number of cycles in the phase observable, caused by a temporary loss of lock in the receiver carrier tracking loop. Thus, cycle slips must be detected and corrected in order to obtain accurate positioning. Several methods were developed for this purpose. Something that has also been studied is the detection of cycle slip in the new GPS signals. The advent of the third frequency available from the GPS modernization. Should be explored in the context of cycle slip detection and correction. In the present research the different cycle slip detection and correction methods were studied and the most suitable for the high accuracy positioning in Brazil was implemented. Two methodologies were selected for the purpose of this research, the first one based on the classical triple difference (TD) method and the second based on the linear combination sequence method. In addition, a third methodology was proposed to improve the TD method. Two experiments were performed, the first one being carried out with simulated data and the second with real data in the period of high ionospheric activity, and for both cases two scenarios were considered: short baseline and long baseline. For simulated short baseline data, the classical TD method, the proposed TD method and the linear combination sequence method presented 100%, 99.91% and 100% accuracy in the detection, resulting in 99.91%, 99.88% and 100% accuracy in the correction of cycle slips, respectively. For the simulated long baseline data, 31.37%, 63.79% and 100% of detection accuracy were obtained, resulting in 49.45%, 95.32% and 100% accuracy in the correction of cycles slips when using the classical TD method, the proposed TD method and the linear combination sequence method, respectively. In the second experiment, conducted with real data, it was possible to evaluate only the improvement in the positioning, being this for short baseline, of 81.71%, 67.08% and 10.79% for the classical TD method, the proposed TD method and linear combination sequence method, respectively. In the long baseline, after correction, the classical TD method obtained a worsening of 12.18%, the proposed TD method provided an improvement of 40.63%, whereas the linear combination sequence method could not show evaluated.

Keywords: Cycle Slips; Detection; Repair; Relative positioning; GPS Triple-frequency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio básico do posicionamento GPS	20
Figura 2 - Localização das instalações do segmento de controle GPS	22
Figura 3 - Diferença entre receptores e satélites.....	24
Figura 4 - Perda de ciclos na época ($t + dt$).....	35
Figura 5 – Dupla, tripla e tetra diferença da observação de fase.....	37
Figura 6 - Função $P(x)$ para os valores de s_0	46
Figura 7 - Localização das estações da rede CIGALA/CALIBRA utilizadas na pesquisa.....	47
Figura 8 - Localização das estações da RBMC utilizadas na pesquisa.....	50
Figura 9 - Índice de irregularidade ionosférica ROTI para estação PPTE em 24 de outubro de 2014.....	52
Figura 10 - Índice de cintilação ionosférica S4 para estação PRU2 em 24 de outubro de 2014	52
Figura 11 - Acurácia posicional da estação PRU2 sem perdas de ciclos.....	56
Figura 12 - Acurácia posicional da estação PRU2 obtidas com a presença de perdas de ciclos	57
Figura 13 - Séries de TD do satélite G26 para L1, L2 e L5	58
Figura 14 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção.....	60
Figura 15 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto.....	62
Figura 16 - Série de dados para as diferentes combinações	64
Figura 17 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequências de combinações	64
Figura 18 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção das perdas pelo método de sequência de combinações	66
Figura 19 - Acurácia posicional na estimativa das coordenadas da estação SPTU em perdas de ciclos.....	67
Figura 20 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas com a presença de perdas de ciclos.....	68
Figura 21 - Séries de TD do satélite G26 para L1, L2 e L5	69
Figura 22 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas após correção	71
Figura 23 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto.....	73
Figura 24 - Série de dados para as diferentes combinações	75
Figura 25 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequencias de combinações	75
Figura 26 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas após correção das perdas pelo método de sequência de combinações	77
Figura 27 - Acurácia posicional na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com dados reais sem correção de perda de ciclos	78
Figura 28 - Série de dados de tripla diferença para L1	79
Figura 29 - Série de dados de tripla diferença para L2	80
Figura 30 - Detecção de perdas de ciclos em L1 pelo método clássico.....	80
Figura 31 - Detecção de perdas de ciclos em L2 pelo método clássico.....	80
Figura 32 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção	81
Figura 33 - Detecção com limiar proposto em L1	82

Figura 34 - Detecção com limiar proposto em L2.....	83
Figura 35 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto.....	84
Figura 36 - Série de dados para as diferentes combinações para estação PRU1.....	85
Figura 37 - Série de dados para as diferentes combinações para estação PRU2.....	85
Figura 38 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequencias de combinações na estação PRU1	85
Figura 39 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequencias de combinações na estação PRU2	86
Figura 40 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção das perdas pelo método de sequência de combinações	86
Figura 41 - Acurácia posicional na estimativa das coordenadas da estação SPTU com dados reais sem correção de perda de ciclos	87
Figura 42 - Série de dados de tripla diferença para L1	89
Figura 43 - Série de dados de tripla diferença para L2	89
Figura 44 - Detecção com limiar proposto em L1	89
Figura 45 - Detecção com limiar proposto em L2.....	90
Figura 46 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas após correção.....	90
Figura 47 - Detecção com limiar proposto em L1	91
Figura 48 - Detecção com limiar proposto em L2.....	92
Figura 49 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto.....	92
Figura 50 - Série de dados para as diferentes combinações para estação SPDR	93
Figura 51 - Série de dados para as diferentes combinações para estação SPTU.....	93
Figura 52 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequencias de combinações na estação SPDR	94
Figura 53 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequencias de combinações na estação SPTU	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequência e comprimento de onda para os sinais GPS	21
Tabela 2 - Características das combinações lineares	29
Tabela 3 - Característica das combinações lineares de dados GPS de tripla frequência	32
Tabela 4 - Valor do desvio padrão a priori obtido em função do comprimento da linha de base.....	45
Tabela 5 - Perdas de ciclos simuladas no satélite G26 para linha de base curta	48
Tabela 6 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 sem perdas de ciclos	56
Tabela 7 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com a presença de perdas de ciclos	57
Tabela 8 - Detecção e valores aproximados das perdas de ciclos para o satélite G26	59
Tabela 9 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 após correção.....	60
Tabela 10 - Detecção com limiar proposto e valores aproximado das perdas de ciclos para o satélite G26	61
Tabela 11 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto	63
Tabela 12 - Detecção das perdas de ciclos para o satélite G26	65
Tabela 13 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 após correção das perdas de ciclo pelo método de sequência de combinações	66
Tabela 14 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU sem perdas de ciclos	67
Tabela 15 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU com a presença de perdas de ciclos	68
Tabela 16 - Detecção e valores aproximado das perdas de ciclos para o satélite G26	70
Tabela 17 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU após correção.....	71
Tabela 18 - Detecção com limiar proposto e valores aproximado das perdas de ciclos para o satélite G26	72
Tabela 19 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto	74
Tabela 20 - Detecção das perdas de ciclos para o satélite G26	76
Tabela 21 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU após correção das perdas de ciclo pelo método de sequência de combinações	77
Tabela 22 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com dados reais sem correção de perda de ciclos	79
Tabela 23 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com dados reais após correção de perda de ciclos pelo método clássico	82
Tabela 24 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com dados reais após correção de perda de ciclos pelo método proposto.....	84

Tabela 25 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com dados reais após correção de perda de ciclos pelo método de sequência de combinações	87
Tabela 26 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU com dados reais sem correção de perda de ciclos	88
Tabela 27 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU com dados reais após correção de perda de ciclos pelo método clássico	91
Tabela 28 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU com dados reais após correção de perda de ciclos pelo método proposto.....	93
Tabela 29 - Síntese dos resultados obtidos com dados simulados	98
Tabela 30 - Síntese dos resultados obtidos com dados reais	99
Tabela 31 - Desempenho dos métodos de detecção e correção de perdas de ciclos	99

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos	16
1.2	Justificativa.....	16
1.3	Conteúdo da dissertação.....	17
2	VISÃO GERAL SOBRE O GPS.....	19
2.1	O GPS	19
2.1.1	Segmento espacial	20
2.1.2	Segmento de controle.....	21
2.1.3	Segmento de usuários	22
2.2	As observáveis GPS.....	22
2.3	Diferenciação entre as observáveis GPS.....	23
2.3.1	Simplex diferença (SD).....	24
2.3.2	Dupla diferença (DD)	25
2.3.3	Tripla diferença (TD).....	26
2.3.4	Tetra diferença (TT).....	26
2.4	Combinação linear entre as observáveis GPS	27
2.4.1	Combinação de dados de dupla frequência.....	27
2.4.2	Combinação de dados de tripla frequência	30
2.4.3	Construção da equação Geometry-free.....	32
2.5	Posicionamento relativo.....	33
3	MÉTODOS DE DETECÇÃO E CORREÇÃO DE PERDAS DE CICLOS	35
3.1	Baseado nas triplas diferenças.....	36
3.2	Baseado em uma sequência de combinações lineares	38
4	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1	Metodologia para melhoria do limiar para o método das triplas diferenças	44
4.2	Primeiro experimento: dados simulados.....	46
4.2.1	Primeiro cenário: linha de base curta.....	47
4.2.2	Segundo cenário: linha de base longa.....	49
4.3	Segundo experimento: dados reais	51
4.3.1	Primeiro cenário: linha de base curta.....	53
4.3.2	Segundo cenário: linha de base longa.....	53
5	EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES	55
5.1	Primeiro experimento: dados simulados.....	55
5.1.1	Primeiro cenário: linha de base curta.....	55
5.1.1.1	Influência das perdas de ciclos no posicionamento.....	55
5.1.1.2	Triplas diferenças clássico	57
5.1.1.3	Triplas diferenças proposto	61
5.1.1.4	Sequência de combinações lineares.....	63
5.1.2	Segundo cenário: linha de base longa.....	67
5.1.2.1	Influência das perdas de ciclos no posicionamento.....	67
5.1.2.2	Triplas diferenças clássico	69
5.1.2.3	Triplas diferenças proposto	72
5.1.2.4	Sequência de combinações lineares.....	74

5.2	Segundo experimento: dados reais	78
5.2.1	Primeiro cenário: linha de base curta.....	78
5.2.1.1	Triplas diferenças clássico	79
5.2.1.2	Triplas diferenças proposto	82
5.2.1.3	Sequência de combinações lineares.....	85
5.2.2	Linha de base longa	87
5.2.2.1	Triplas diferenças clássico	88
5.2.2.2	Triplas diferenças proposto	91
5.2.2.3	Sequência de combinações lineares.....	93
6	CONCLUSÃO.....	96
	REFERÊNCIAS	101
	APÊNDICE A – Estudo de caso: avaliação do limiar para o método das triplas diferenças clássico.....	105

1 INTRODUÇÃO

A observável fase da onda portadora é sempre empregada em posicionamento de alta acurácia, como no posicionamento cinemático em tempo real (RTK – *Real Time Kinematic*) e posicionamento por ponto preciso, uma vez que a fase é muito mais precisa que a pseudodistância (SEEBER, 2003; MONICO, 2008). Entretanto, a medida de fase pode sofrer perdas de ciclos durante o rastreamento do sinal, dificultando assim a solução do vetor das ambiguidades.

Uma perda de ciclo é caracterizada como uma descontinuidade no número inteiro de ciclos na fase da onda portadora, causada por uma perda temporária do sinal durante o rastreamento. Tal descontinuidade pode ser causada por diversos fatores, como obstruções físicas, cintilação ionosférica, baixo ângulo de elevação do satélite, entre outros. De acordo com Seeber (2003) a amplitude pode variar de um a milhões de ciclos.

A ocorrência de perdas de ciclos provoca uma mudança (salto) repentina no número inteiro de ciclos (SEEBER, 2003), alterando assim o número de ambiguidades, sendo necessário solucioná-las novamente. Neste sentido, para o posicionamento GPS (*Global Positioning System*), assim como para os demais sistemas que compõem o GNSS (*Global Navigation Satellite System*), de alta acurácia, torna-se necessário que as perdas de ciclos sejam detectadas e corrigidas, quando possível. A detecção visa a identificação da ocorrência de perdas de ciclos, bem como as observáveis afetadas, enquanto a correção visa determinar seu valor e corrigir as observáveis afetadas (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

Tendo em vista a importância da detecção e correção de perdas de ciclos, diversos algoritmos foram desenvolvidos e implementados nos últimos anos. Estes algoritmos podem ser classificados em quatro grupos: sem diferenciação, auxiliados por sensores, dupla frequência e tripla frequência.

No primeiro grupo cabe destacar o *TurboEdit*, desenvolvido por Blewitt (1990), que utiliza a combinação livre de geometria (GF - *Geometric Free*) junto com a combinação linear Hatch-Melbourne-Wübbena (HMW). Cederholm e Plausinaitis (2014) utilizam o valor esperado da variação da observável Doppler para avaliar a ocorrência de perdas de ciclos na observável de fase. No segundo grupo, destacam-se Lee, Wang e Rizos (2003) e Du e Gao (2012), que integraram o sistema inercial ao GPS para detectar perdas de ciclos, mas essa técnica fica limitada por sua complexidade e alto custo.

No terceiro grupo, formado pelos métodos de detecção e correção de perdas de ciclos para dados de dupla frequência, ressalta-se o método desenvolvido por Bisnath (2000), baseado na GF de fase e na observável formada pela diferença da *wide-lane* da fase com a *narrow-lane* da pseudodistância. Kim e Langley (2001) utilizaram as medidas Doppler juntamente com a pseudodistância, que são imunes a perdas de ciclos, para determiná-las. Já Banville e Langley (2010), Banville e Langley (2013) estudaram modelos de diferenciação no tempo e, nesses métodos, todas as observações foram processadas em um ajustamento integrado para estimar as perdas de ciclos, as variações ionosféricas e outros parâmetros.

Os métodos citados foram desenvolvidos e implementados para a detecção e correção de perdas de ciclos para dados de dupla frequência GPS. Entretanto, com a atual modernização da constelação GPS, uma nova frequência foi adicionada, a L5. Desta forma, é necessária a otimização dos métodos para detecção e correção das perdas para resolver esta nova realidade com dados de fase da onda portadora para tripla frequência.

Dentre os métodos para detecção e correção de perdas de ciclos para tripla frequência, compondo o quarto grupo, tem-se a tripla diferença (TD) de dados de fase da onda portadora, empregada por Monico, Souza e Machado (2009), sendo este um método clássico (SEEBER, 2003). Recentemente, alguns outros métodos foram desenvolvidos para tratar das perdas de ciclos do ponto de vista da multifrequência. Por exemplo, Dai, Knedlik e Loffeld (2009) desenvolveram um algoritmo para detectar, determinar e validar perdas de ciclos em tempo real para dados de tripla frequência GPS, aplicando duas combinações livres de geometria, junto com o método LAMBDA (*Least Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment*) (TEUNISSEN, 1998) para procurar os candidatos a perdas de ciclos. Lacy, Reguzzoni e Sansò (2012) desenvolveram combinações lineares das observáveis GNSS que visam detectar e corrigir perdas de ciclos em tempo real. A detecção é baseada em cinco combinações lineares GF utilizadas em três etapas. Após a detecção, a amplitude é estimada utilizando outras combinações lineares de fase da onda portadora. Chen et al. (2015) desenvolveram um método para detectar e reparar perdas de ciclos para uma rede de monitoramento contínuo, utilizando as coordenadas das estações precisamente pré-determinadas. A abordagem utiliza DD de observações GF e IF-OMC (*ionospheric-free observation corrected for the computed geometrical distance* - combinação livre de ionosfera corrigida da distância geométrica). Em Zhang e Li (2015) a abordagem é baseada na geometria através da integração da pseudodistância e fase diferenciadas no tempo. Já em Teunissen e Bakker (2015) não há distinção entre a detecção da perda de ciclo como valor real e sua correção como valor inteiro.

Nessa abordagem, a perda de ciclo é estimada diretamente como inteiro e sua função de probabilidade é utilizada na avaliação. Em Gu e Zhu (2017) é aplicada uma abordagem baseada em uma sequência de combinações lineares das observáveis de tripla frequência, seguida de diferenciação no tempo.

Por fim, a contribuição desta pesquisa foi investigar e implementar, dentre os métodos de detecção e correção de perdas de ciclos existentes, o mais adequado para dados de dupla e tripla frequência GPS. E com isso, contribuir para o desenvolvimento de um sistema eficiente para posicionamento relativo de linhas de bases longas que considera as condições atmosféricas peculiares brasileiras, principalmente referente aos efeitos ionosféricos.

1.1 Objetivos

O objetivo principal dessa pesquisa foi estudar e implementar os métodos de detecção e correção de perdas de ciclos para o posicionamento relativo GPS com dados de tripla frequência.

Para atender a esse objetivo, comparecem os seguintes objetivos específicos:

- Investigar os métodos de detecção e correção de perdas de ciclos existentes e verificar o mais apropriado para a realidade atmosférica brasileira;
- Implementar o método selecionado no sistema de posicionamento relativo que vem sendo desenvolvido na FCT/UNESP, fazendo as adaptações e melhorias que forem necessárias;
- Verificar a eficiência do método em períodos com alta atividade ionosférica, incluindo cintilação ionosférica¹.

1.2 Justificativa

Uma das principais justificativas dessa pesquisa foi dar continuidade aos estudos relativos ao posicionamento relativo de linhas de bases longas no Brasil. Desde 2004 a orientadora dessa pesquisa investiga, desenvolve e avalia o posicionamento baseado em redes,

¹ As cintilações ionosféricas são mudanças rápidas que ocorrem na fase e amplitude do sinal recebido, as quais são causadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera, podendo enfraquecer o sinal recebido pelos receptores GNSS, fazendo que ocorra em muitos casos a degradação ou até mesmo perda do sinal (CONKER et al., 2003).

inicialmente com a pesquisa de doutorado (Processo FAPESP: 2003/12771-0) e posteriormente pós-doutorado (Processo FAPESP: 2008/06499-9), que finalizou em 12/2011. No decorrer desses projetos foi desenvolvido um sistema que realiza o RTK em rede sem solução das ambiguidades (FCT-RTK-Net). Resultados promissores foram obtidos como descrito em Alves e Monico (2011). Além disso, no projeto de mestrado desenvolvido sob orientação da Profa. Dra. Daniele B. M. Alves (Processo FAPESP: 2013/06325-9) o FCT-RTK-Net foi atualizado para realizar a solução das ambiguidades. Agora, o FCT-RTK-Net vem sendo reconfigurado e transformado em um sistema que realiza o posicionamento relativo de linhas de bases longas para possibilitar novas aplicações e pesquisas. Portanto, para um próximo passo, foi necessário adicionar a esse sistema técnicas de detecção e correção de perdas de ciclos, visando melhorar ainda mais a qualidade do posicionamento relativo de linhas de bases longas no Brasil. Esta reconfiguração faz parte de um projeto de doutorado que vem sendo desenvolvido sob orientação da Profa. Dra. Daniele B. M. Alves, e nele o principal objetivo é a solução das ambiguidades para dados de multisistemas de tripla frequência.

Um dos pontos importantes que também justificam essa pesquisa foi o fato de que o tema desta está associado a diversos outros projetos desenvolvidos com apoio financeiro das agências brasileiras de fomento à pesquisa. Dois projetos que merecem destaque são o projeto regular FAPESP (processo FAPESP 2012/19906-7), e o projeto Universal CNPq (processo 470112/2012-3), ambos coordenados pela orientadora deste projeto. Além disso, essa pesquisa está em consonância ao projeto PQ atual da orientadora (processo 303553/2017-0).

Ademais, o advento da terceira frequência disponibilizada a partir da modernização GPS deve ser explorada no contexto da detecção e correção das perdas de ciclos, uma vez que os resultados já apresentados na literatura foram obtidos apenas a partir de dados simulados. E assim, a eficácia destes métodos deve ser testada e investigada utilizando dados reais de tripla frequência.

1.3 Conteúdo da dissertação

A organização deste trabalho é descrita a seguir, com o conteúdo de cada capítulo.

O capítulo 2 apresenta uma descrição geral sobre o GPS e suas observáveis, bem como a modelagem para diferenciação e combinação das observáveis, além de uma breve explicação sobre o posicionamento relativo. Neste capítulo é dada ênfase sobre a modelagem matemática das observáveis advindas do GNSS.

O capítulo 3 refere-se aos conceitos teóricos sobre a detecção e correção de perdas de ciclos. Assim, são relacionados diversos métodos de detecção e correção de perdas de ciclos, sendo descritos de forma detalhada os métodos selecionados para utilização nesta pesquisa.

No capítulo 4 são apresentadas as metodologias utilizadas nos experimentos realizados durante a pesquisa. O primeiro experimento concentra-se na detecção e correção de perdas de ciclos com dados simulados em dois casos: linha de base curta e linha de base longa. Enquanto o segundo experimento aborda a detecção e correção de perdas de ciclos em condições reais de alta atividade ionosférica, incluindo cintilação ionosférica, também em dois casos: linha de base curta e linha de base longa.

O capítulo 5 apresenta as análises dos resultados obtidos com os experimentos realizados, mostrando as vantagens e desvantagens dos métodos empregados.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais e recomendações acerca da presente pesquisa.

2 VISÃO GERAL SOBRE O GPS

O GNSS é uma tecnologia de posicionamento espacial por satélite que vem sendo amplamente empregada, tanto para fins científicos, como para fins civis e comerciais. Dentre os fins científicos, destacam-se estudos atmosféricos, ionosfera e troposfera, agricultura de precisão, e posicionamento geodésico. No que se refere ao uso civil e/ou comercial, ele pode ser empregado para navegação, aviação, locação, dentre outras inúmeras possibilidades.

Um dos sistemas de posicionamento global mais conhecidos é o GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido pelos Estados Unidos, declarado operacional em 1995, mas desde 1993 já estava sendo empregado no posicionamento geodésico (MONICO, 2008).

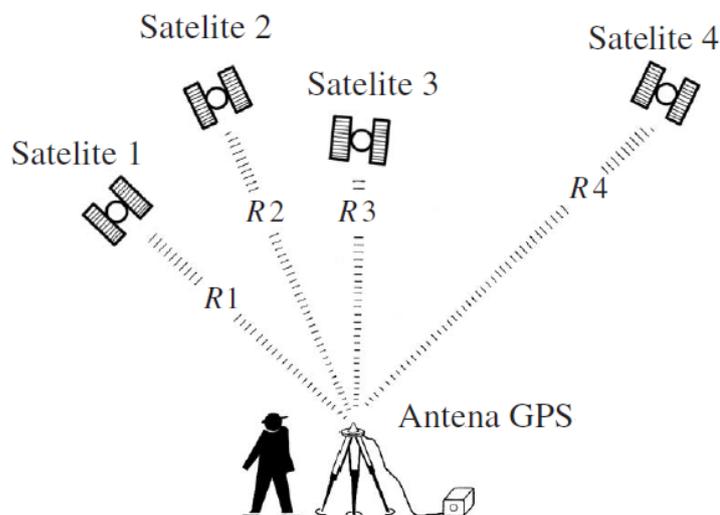
A seguir, é apresentada uma visão geral sobre o GPS, tendo em vista que este é o sistema de posicionamento a ser empregado no desenvolvimento desta pesquisa.

2.1 O GPS

O GPS é um sistema de posicionamento global, desenvolvido e mantido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (DoD – *Department of Defense*) para ser o principal sistema de navegação das forças armadas americanas. O sistema começou a ser desenvolvido na década de 70, sendo declarado operacional em 1995, com uma constelação de 24 satélites, distribuídos em seis planos orbitais com altitude de cerca de 20200 km e inclinação de 55 graus em relação ao Equador. Esta configuração garante que, no mínimo, quatro satélites estejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre, em qualquer hora, independente das condições meteorológicas. O sistema de referência utilizado é o WGS84 (*World Geodetic System* de 1984) (SEEBER, 2003).

O princípio básico do GPS consiste na medida de distância entre o satélite e a antena do receptor do usuário, sendo rastreados, no mínimo, 4 satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites em um sistema de referencial apropriado, é possível determinar as coordenadas da antena do receptor no mesmo sistema de referência dos satélites. De acordo com Seeber (2003), apenas 3 medidas de distância seriam suficientes para o cálculo da posição da antena, entretanto, um quarto satélite faz-se necessário devido ao não-sincronismo entre os relógios dos satélites e do receptor (Figura 1).

Figura 1 - Princípio básico do posicionamento GPS



Fonte: Adaptado de Seeber (2003)

O sistema GPS é composto por três segmentos, o espacial, o de controle e o de usuários, os quais são descritos a seguir.

2.1.1 Segmento espacial

O segmento espacial do GPS refere-se à constelação de satélites, que consiste em no mínimo 24 satélites, mas ultimamente tem-se mantido com 31 satélites. Os satélites são distribuídos em seis planos orbitais, com altitude aproximada de 20200 km. Os planos orbitais encontram-se inclinados a 55° em relação ao Equador e o período orbital é de 12 horas siderais, permitindo que a posição dos satélites se repita 4 minutos antes do dia anterior (SEEBER, 2003).

Na concepção original, quatro tipos de satélites fizeram parte do projeto. Os blocos de satélites I, II, IIA e IIR. Atualmente, o GPS se encontra em fase de modernização. O bloco de satélites IIR-M, com M de *Modernized*, teve como objetivo transmitir o código civil na portadora L2 (L2C). O primeiro satélite modernizado foi lançado em setembro de 2005 (GPS, 2019b). O bloco IIF, com F de *Follow-on*, foi criado para introduzir a nova frequência L5. Estes satélites começaram a ser lançados em 2010.

Além destes blocos de satélites, um novo está em desenvolvimento, bloco denominado de Bloco III, sendo o primeiro satélite lançado em 2018 (GPS, 2019b), transmitindo o quarto sinal civil L1C. A previsão é que os novos sinais, L2C, L5 e L1C, estejam disponíveis em 24 satélites, pelo menos, em 2021, 2024 e no final dos anos 2020s, respectivamente (GPS, 2019b).

Hoje, fevereiro de 2019, tem-se 19 satélites transmitindo L2C, 12 satélites transmitindo L5 e um satélite transmitindo L1C para testes (GPS, 2019c).

Em relação às frequências transmitidas, o GPS utiliza a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), em que todos os satélites transmitem as mesmas frequências e a identificação desses é dada por um código atribuído a cada satélite, o PRN (*Pseudo Random Noise*) (SEEBER, 2003). Cada satélite transmite até três frequências, L1, L2 e L5, dependendo do bloco o qual faz parte, que são geradas da frequência fundamental (f_0) de 10,23 MHz, a qual é multiplicada por 154, 120 e 115, respectivamente. As frequências e comprimentos de onda são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Frequência e comprimento de onda para os sinais GPS

Sinal	Fator (f_0)	Frequência (MHz)	Comprimento de onda (cm)
L1	154	1575,42	19,0
L2	120	1227,60	24,0
L5	115	1176,45	25,5

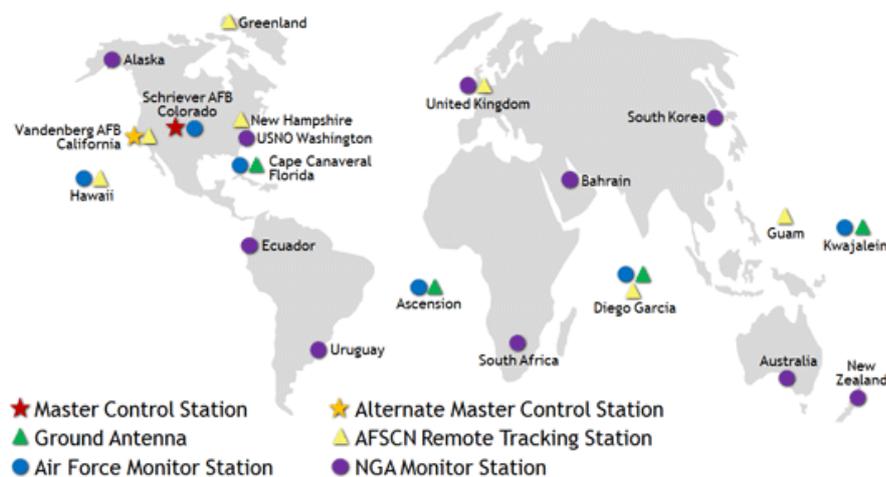
Fonte: Adaptado de Monico (2008)

2.1.2 Segmento de controle

O segmento de controle consiste na rede global de instalações terrestres que rastreiam os satélites GPS, monitoram suas transmissões, realizam análises e enviam comandos e dados para a constelação (GPS, 2019a; SEEBER, 2003). Ademais, é função do segmento de controle determinar o sistema de tempo GPS, prever as efemérides dos satélites e atualizar as mensagens de navegação de cada satélite (SEEBER, 2003).

Atualmente, o segmento de controle inclui uma estação de controle mestre, uma estação de controle mestre alternativa, 11 antenas de comando e controle e 16 locais de monitoramento (GPS, 2019a). A Figura 2 ilustra os locais das instalações do segmento controle.

Figura 2 - Localização das instalações do segmento de controle GPS



Fonte: GPS (2019a)

2.1.3 Segmento de usuários

O segmento de usuários está associado diretamente aos receptores GPS, os quais devem ser apropriados ao propósito ao qual se destina. Este segmento pode ser dividido em civil e militar (MONICO, 2008).

No que se refere a fins militares, os receptores GPS são utilizados para estimar suas posições e deslocamentos quando são realizadas manobras de treinamento ou combate. No que concerne aos fins civis, os receptores GPS são empregados para os mais diversos fins, como navegação, pesca, lazer, agricultura de precisão, entre outros.

2.2 As observáveis GPS

Os satélites GPS são capazes de proporcionar medidas de código, também chamadas de pseudodistância, e fase de batimento da onda portadora, além do sinal Doppler e SNR (*Signal to Noise Ratio* – Razão Sinal Ruído). A pseudodistância é derivada da diferença de tempo entre a transmissão do sinal no satélite (s) e a recepção do sinal no receptor (r), observável que apresenta ruído de 0,3-1 m (SEEBER, 2003). Já a observável fase, a qual é muito mais precisa que a pseudodistância, com ruídos de 1-3 mm, é obtida a partir da diferença de fase gerada pelo receptor (r) no momento da recepção, e a fase gerada no satélite (s) no momento da transmissão (SEEBER, 2003).

Entretanto, estas observáveis estão sujeitas a diferentes efeitos prejudiciais, como erros devido a propagação do sinal através da ionosfera e troposfera, erro do relógio do satélite e receptor, entre outros (KAPLAN; HEGARTY, 2006). As equações para as observáveis, pseudodistância (PD_r^s) e fase (ϕ_r^s), são dadas, respectivamente, por:

$$PD_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + M_{PD_r^s} + \varepsilon_{PD_r^s}, \quad (1)$$

$$\phi_r^s = f \left(\frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + M_{\phi_r^s}}{c} \right) + f(dt_r - dt^s) + N_r^s + \varepsilon_{\phi_r^s}, \quad (2)$$

sendo ρ_r^s a distância geométrica entre o satélite e o receptor, dt_r e dt^s erro de relógio do receptor e satélite, respectivamente, I_r^s o efeito ionosférico, T_r^s o atraso troposférico, $M_{PD_r^s}$ e $M_{\phi_r^s}$ o erro de multicaminho para pseudodistância e para fase, respectivamente, N_r^s a ambiguidade da fase, $\varepsilon_{PD_r^s}$ e $\varepsilon_{\phi_r^s}$ os demais erros não modelados para a pseudodistância e fase, em unidades de distância e ciclos respectivamente, c a velocidade da luz e f a frequência do sinal.

As observáveis, nas diferentes frequências, podem ser utilizadas no processo de estimação dos parâmetros, bem como em combinações lineares entre elas (SEEBER, 2003). Uma infinidade de combinações pode ser realizada, porém, somente algumas combinações são relevantes para o posicionamento. Conforme Seeber (2003), as combinações podem ser classificadas em:

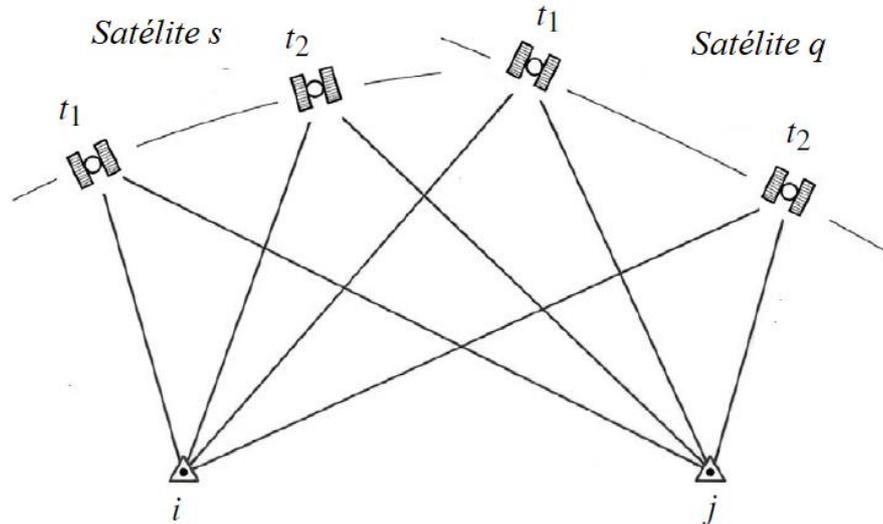
- Entre observações de diferentes estações;
- Entre observações de diferentes satélites;
- Entre observações de diferentes épocas;
- Entre observações do mesmo tipo;
- Entre observações de diferentes tipos.

2.3 Diferenciação entre as observáveis GPS

A utilização de observações combinadas, no que se refere a diferença de observáveis, apresenta como vantagem a eliminação ou redução dos erros que estão presentes nas observações originais (SEEBER, 2003; KAPLAN; HEGARTY, 2006). Considerando dois receptores (i, j), dois satélites (p, q) em duas épocas distintas (t_1, t_2), como apresentado na

Figura 3, sendo realizadas 8 medidas, podendo ser de fase ou de pseudodistância, as medidas realizadas são utilizadas na combinação entre as observações.

Figura 3 - Diferença entre receptores e satélites



Fonte: Adaptado de Seeber (2003)

Por meio da geometria apresentada na Figura 3, pode-se definir: simples diferença (SD) e dupla diferença (DD), que serão apresentadas a seguir.

2.3.1 Simples diferença (SD)

Simple differences can be formed between two receivers, two satellites or two epochs. In positioning GPS, usually they are formed simple differences between two receivers (SEEBER, 2003), or in other words, pseudorange and phase measurements of a station are subtracted from the pseudorange and phase measurements of the same satellite in a second station. The simple differences for pseudorange and phase are given, in units of distance and cycles respectively, by:

$$\Delta PD_{i,j}^s = \Delta \rho_{i,j}^s + c(dt_{r_i} - dt_{r_j}) + \Delta I_{i,j}^s + \Delta T_{i,j}^s + \Delta M_{PD_{i,j}}^s + \varepsilon_{PD_{SD}}, \quad (3)$$

$$\Delta \phi_{i,j}^s = \frac{f}{c} (\Delta \rho_{i,j}^s - \Delta I_{i,j}^s + \Delta T_{i,j}^s + \Delta M_{\phi_{i,j}}^s) + f(dt_{r_i} - dt_{r_j}) + \Delta N_{i,j}^s + \varepsilon_{\phi_{SD}}. \quad (4)$$

where $\varepsilon_{PD_{SD}}$ and $\varepsilon_{\phi_{SD}}$ are the remaining errors not modeled for the simple difference in pseudorange and phase, respectively. It is evident that the satellite clock error (dt^s) is eliminated and the

erros devido ao atraso na propagação do sinal (I_r^s e T_r^s) somente afetam as observáveis com o efeito diferencial remanescente (SEEBER, 2003). Entretanto, se estas estações estiverem próximas, I_r^s e T_r^s podem ser considerados iguais, e consequentemente, $\Delta I_{i,j}^s$ e $\Delta T_{i,j}^s$ são removidos das equações. O mesmo é válido para os efeitos dos erros orbitais.

Entretanto, devido à presença do erro do relógio do receptor, as simples diferenças entre receptores não são de interesse primário (PARKINSON; SPILKER, 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.

2.3.2 Dupla diferença (DD)

Dupla diferença é a diferença entre duas simples diferenças, envolvendo assim dois satélites e dois receptores (SEEBER, 2003; PARKINSON; SPILKER, 1996). As duplas diferenças para o GPS, cujos satélites transmitem em mesma frequência com observações realizadas de forma simultânea (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008), podem ser escritas em relação a pseudodistância e fase, respectivamente, como:

$$\Delta \nabla PD_{i,j}^{s,q} = \Delta \nabla \rho_{i,j}^{s,q} + \Delta \nabla I_{i,j}^{s,q} + \Delta \nabla T_{i,j}^{s,q} + \Delta \nabla M_{PD_{i,j}^{s,q}} + \varepsilon_{PD_{DD}}, \quad (5)$$

$$\Delta \nabla \phi_{i,j}^{s,q} = \frac{f}{c} \left(\Delta \nabla \rho_{i,j}^{s,q} - \Delta \nabla I_{i,j}^{s,q} + \Delta \nabla T_{i,j}^{s,q} + \Delta \nabla M_{\phi_{i,j}^{s,q}} \right) + \Delta \nabla N_{i,j}^{s,q} + \varepsilon_{\phi_{DD}}. \quad (6)$$

sendo $\varepsilon_{PD_{DD}}$ e $\varepsilon_{\phi_{DD}}$ os demais erros não modelados para a dupla diferença em pseudodistância e fase, respectivamente. É possível notar que o termo referente ao erro do relógio do receptor (dt_r) é eliminado. Conforme Seeber (2003), as observáveis de dupla diferença são livres de erros do relógio do satélite e receptor, incluindo apenas pequenos erros de propagação e de órbitas. Assim como para as simples diferenças, se as estações estiverem próximas, $\Delta I_{i,j}^s$ e $\Delta T_{i,j}^s$ podem ser considerados iguais, e consequentemente, $\nabla \Delta I_{i,j}^{s,q}$ e $\nabla \Delta T_{i,j}^{s,q}$ serão removidos das equações. As observáveis de duplas diferenças são então as observáveis básicas para os modelos de ajustamentos das observações GPS para o posicionamento relativo, bem como para as diferentes técnicas de resolução das ambiguidades (SEEBER, 2003).

2.3.3 Tripla diferença (TD)

As equações de observação de tripla diferença para pseudodistância e fase são idênticas, exceto pelo sinal do atraso ionosférico, entretanto não é usual a utilização da observável de TD para dados de pseudodistância. Considerando a equação de dupla diferença de fase dada em (6), uma tripla diferença (TD) é caracterizada como a diferença de duas DD entre duas épocas adjacentes, envolvendo os mesmos satélites e receptores (SEEBER, 2003):

$$\begin{aligned} TD_{\phi}(t) &= \Delta\nabla\phi_{i,j}^{s,q}(t) - \Delta\nabla\phi_{i,j}^{s,q}(t-1) \\ &= \frac{f}{c} \left(\delta\Delta\nabla\rho_{i,j}^{s,q} - \delta\Delta\nabla I_{i,j}^{s,q} + \delta\Delta\nabla T_{i,j}^{s,q} + \delta\Delta\nabla M_{\phi_{i,j}}^{s,q} \right) + \varepsilon_{\phi_{TD}}, \end{aligned} \quad (7)$$

sendo $\varepsilon_{\phi_{TD}}$ os demais erros não modelados para a dupla diferença em fase e δ denota a diferença entre duas épocas. A vantagem da TD é o cancelamento do valor inicial da ambiguidade (N) da equação de observação se não houver perdas de ciclos entre as épocas $(t-1)$ e (t) (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; SEEBER, 2003). Se as estações consideradas estiverem próximas, os termos $\delta\Delta\nabla I_{i,j}^{s,q}$ e $\delta\Delta\nabla T_{i,j}^{s,q}$ podem ser removidos.

2.3.4 Tetra diferença (TT)

Uma tetra diferença (TT) é caracterizada como a diferenças entre duas TDs, envolvendo assim três épocas de dados (MONICO; SOUZA; MACHADO, 2009). Assim, a equação da TT de fase pode ser expressa por:

$$\begin{aligned} TT_{\phi}(t) &= TD_{\phi}(t) - TD_{\phi}(t-1) \\ &= \left(\Delta\nabla\phi_{i,j}^{s,q}(t) - \Delta\nabla\phi_{i,j}^{s,q}(t-1) \right) - \left(\Delta\nabla\phi_{i,j}^{s,q}(t-1) - \Delta\nabla\phi_{i,j}^{s,q}(t-2) \right) \\ &= \Delta\nabla\phi_{i,j}^{s,q}(t) - 2\Delta\nabla\phi_{i,j}^{s,q}(t-1) - \Delta\nabla\phi_{i,j}^{s,q}(t-2), \end{aligned} \quad (8)$$

em que $\Delta\nabla\phi_{i,j}^{s,q}$ denota a DD de fase. Conforme Monico, Souza e Machado (2009), as TTs apresentam de forma mais acentuada as discontinuidades nas séries de dados.

2.4 Combinação linear entre as observáveis GPS

Uma vez disponíveis as observáveis de pseudodistância e fase em diferentes frequências, torna-se possível realizar combinações lineares entre as observáveis. Uma infinidade de combinações pode ser formada, entretanto, é de interesse o uso de combinações lineares que permitam a eliminação dos efeitos do atraso ionosférico e/ou facilite a solução das ambiguidades da fase (SEEBER, 2003; PARKINSON; SPILKER, 1996).

2.4.1 Combinação de dados de dupla frequência

Considerando duas frequências f_1 e f_2 , as respectivas observáveis de fase serão dadas por ϕ_1 e ϕ_2 . Conforme Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008) e Seeber (2003), a combinação linear entre duas medidas de fase é definida por:

$$\phi_c = \omega_1 \phi_1 + \omega_2 \phi_2, \quad (9)$$

sendo ω_1 e ω_2 números arbitrários. Desta relação é possível obter a frequência do sinal combinado, dado por:

$$f_c = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2. \quad (10)$$

Considerando a velocidade da luz c , o comprimento de onda do sinal combinado é dado por:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{c}{\omega_1 f_1 + \omega_2 f_2}. \quad (11)$$

A ambiguidade da combinação linear é dada por:

$$N_c = \omega_1 N_1 + \omega_2 N_2, \quad (12)$$

se ω_1 e ω_2 forem inteiros, logo N_c também será inteiro.

Tomando o sinal na época anterior ($t - 1$) livre de perda de ciclos, se uma perda de ciclos, dada por ΔN_c , ocorrer na época atual (t), esta pode ser obtida calculando a diferença de ambiguidade entre duas épocas consecutivas (GU; ZHU, 2017), e expressa por:

$$\Delta N_c = N_c(t) - N_c(t - 1). \quad (13)$$

Uma vez detectada, esta deve ser corrigida, pois as perdas de ciclos são detectadas e corrigidas época a época.

Conforme Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008) e Seeber (2003), duas combinações lineares entre as observáveis ϕ_1 e ϕ_2 que são amplamente empregadas, fazendo-se $\omega_1 = \omega_2 = 1$, denominada de *narrow-lane* (NL), assim:

$$\phi_{NL} = \phi_1 + \phi_2, \quad (14)$$

e $\omega_1 = 1$ e $\omega_2 = -1$, denominada *wide lane* (WL), assim:

$$\phi_{WL} = \phi_1 - \phi_2. \quad (15)$$

A observável *wide-lane*, comparada com as observáveis originais, permite identificar as perdas de ciclos e resolver a ambiguidade por meio de um sinal com comprimento de onda quatro vezes maior ($\lambda_{WL} = 86,2$ cm), entretanto, o ruído na observação é seis vezes maior (LUTZ; FRIDEZ, 2015; SEEBER, 2003). A observável *narrow-lane* possui menor nível de ruído de todas combinações lineares e assim gera um melhor resultado (SEEBER, 2003), entretanto, a ambiguidade se torna mais difícil de ser solucionada devido ao seu pequeno comprimento de onda ($\lambda_{NL} = 10,7$ cm). As ambiguidades das combinações *narrow-lane* e *wide-lane* são dadas respectivamente por:

$$N_{NL} = N_1 + N_2 \quad \text{e} \quad N_{WL} = N_1 - N_2. \quad (16)$$

De acordo com Seeber (2003) N_{NL} e N_{WL} são dependentes. Quando N_{NL} é ímpar, N_{WL} também é ímpar, e quando N_{NL} é par, N_{WL} também é par.

Além de número inteiros, a combinação linear entre as observáveis pode ser realizada por meio de números reais. Uma combinação linear com números reais de grande importância é a denominada *ionospheric free* (livre da ionosfera) ou *ion-free*. Assumindo as condições propostas por Parkinson e Spilker (1996), de que os efeitos da ionosfera devem ser nulos e que a combinação mantenha o mesmo comprimento de onda da portadora L1, tem-se $\omega_1 = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)$ e $\omega_2 = -f_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2)$, assim:

$$L_0 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_1 - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_2. \quad (17)$$

De acordo com Lutz e Fridez (2015), a observável *ion-free* elimina os efeitos do atraso ionosférico de primeira ordem. Entretanto, Parkinson e Spilker (1996) destacam que ocorre um acréscimo no ruído e, além disto, as ambiguidades não são mais inteiras devido aos coeficientes adotados.

Por fim, a combinação Melbourne-Wübbena é uma combinação linear de ambas observáveis, fase da onda portadora (ϕ_1 e ϕ_2) e pseudodistância (PD_1 e PD_2). Segundo Lutz e Fridez (2015), esta combinação elimina os efeitos da ionosfera, da geometria, dos relógios e da troposfera, sendo dada por:

$$L_6 = \frac{f_1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) - \frac{f_1}{f_1 + f_2} (f_1 PD_1 + f_2 PD_2). \quad (18)$$

sendo L_1 e L_2 as observáveis de fase nas frequências L_1 e L_2 em unidades de distância. O ruído na combinação Melbourne-Wübbena é dado com relação as observáveis PD_1 e PD_2 , uma vez que o nível de ruído é predeterminado exclusivamente pela qualidade dos dados de pseudodistância considerados (LUTZ; FRIDEZ, 2015).

As características das combinações lineares apresentadas anteriormente estão expressas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características das combinações lineares

Observável	ω_1	ω_2	λ_c (cm)	σ (mm)
ϕ_1	1	0	19,0	3,0
ϕ_2	0	1	24,4	3,9
L_0	$\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$	$-\frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2}$	19,0	9,0
ϕ_{NL}	1	1	10,7	2,1
ϕ_{WL}	1	-1	86,2	19,4
L_6	-	-	86,2	-

Fonte: Adaptado de Monico (2008)

2.4.2 Combinação de dados de tripla frequência

Com o objetivo de detectar perdas de ciclos, as combinações lineares são formadas de forma a mitigar os parâmetros geométricos ou alguma fonte de erro, como erro do relógio e atraso troposférico. Em se tratando de perdas de ciclos, busca-se por combinações de tripla frequência caracterizadas por apresentar grandes comprimentos de onda e baixo ruído nas medidas em relação ao comprimento de onda (GU; ZHU, 2017). De forma geral, o modelo matemático para realizar inúmeras combinações lineares é dado por:

$$PD_c = \omega_1 PD_1 + \omega_2 PD_2 + \omega_5 PD_5, \quad (19)$$

$$L_c = \omega_1 L_1 + \omega_2 L_2 + \omega_5 L_5, \quad (20)$$

sendo PD_c e L_c as observáveis de pseudodistância e fase combinadas em unidades de distância, respectivamente, ω_1 , ω_2 e ω_5 são os coeficientes da combinação.

A ambiguidade da fase obtida pela combinação pode ser escrita como:

$$N_c = \omega_1 N_1 + \omega_2 N_2 + \omega_5 N_5. \quad (21)$$

A perda de ciclos, dada por ΔN_c pode ser obtida, segundo Gu e Zhu (2017), calculando a diferença de ambiguidade entre duas épocas consecutivas, e expressa por:

$$\Delta N_c = N_c(t) - N_c(t - 1). \quad (22)$$

O sinal na época anterior ($t - 1$) é considerado livre de perda de ciclos. Assim, se uma perda de ciclos de fato ocorrer na época atual (t), esta deve ser corrigida, pois as perdas de ciclos são detectadas e corrigidas época a época. As equações de fase e pseudodistância obtidas da combinação podem ser expressas por (GU; ZHU, 2017):

$$PD_c = \rho + \mu_c I_1 + \varepsilon_{PD_c}, \quad (23)$$

$$L_c = \rho - \mu_c I_1 - \lambda_c N_c + \varepsilon_{\phi_c}, \quad (24)$$

com μ_c , também denotado de $\mu_{(\omega_1, \omega_2, \omega_5)}$, o fator ionosférico dado por:

$$\mu_{(\omega_1, \omega_2, \omega_5)} = \frac{f_1^2(\omega_1/f_1 + \omega_2/f_2 + \omega_5/f_5)}{\omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \omega_5 f_5}. \quad (25)$$

A frequência e comprimento de onda da observável obtida pela combinação linear são dadas por:

$$f_c = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \omega_5 f_5, \quad (26)$$

$$\lambda_c = \frac{c}{\omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \omega_5 f_5}, \quad (27)$$

onde c representa a velocidade da luz. Consequentemente, a variância das observáveis obtidas pela combinação linear das observáveis originais, assumindo que estas apresentem mesma precisão para fase ($\sigma_{\phi_1} = \sigma_{\phi_2} = \sigma_{\phi_5} = \sigma_{\phi}$) e pseudodistância ($\sigma_{PD_1} = \sigma_{PD_2} = \sigma_{PD_5} = \sigma_{PD}$) nas diferentes portadoras, é dada por (GU; ZHU, 2017):

$$\sigma_{\phi_c}^2 = \sigma'^2_{(\omega_1, \omega_2, \omega_5)} \sigma_{\phi}^2, \quad (28)$$

$$\sigma_{PD_c}^2 = \sigma'^2_{(\omega_1, \omega_2, \omega_5)} \sigma_{PD}^2, \quad (29)$$

sendo $\sigma'_{(\omega_1, \omega_2, \omega_5)}$ definido como o fator de ruído, dado por:

$$\sigma'^2_{(i,j,k)} = \frac{(\omega_1 f_1)^2 + (\omega_2 f_2)^2 + (\omega_5 f_5)^2}{(\omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \omega_5 f_5)^2}. \quad (30)$$

Tendo em vista as inúmeras possibilidades de combinações lineares, na Tabela 3 são listadas as combinações mais usuais conforme Gu e Zhu (2017) juntamente com seus parâmetros característicos, como comprimento de onda, fator ionosférico e fator de ruído.

Tabela 3 - Característica das combinações lineares de dados GPS de tripla frequência

Coeficiente			f_c (GHz)	λ_c (m)	μ_c	$\sigma'_{(\omega_1, \omega_2, \omega_5)}$
ω_1	ω_2	ω_5				
1	0	0	1,5754	0,1903	1	1
0	1	0	1,2276	0,2442	1,6469	1
0	0	1	1,1765	0,2550	1,7933	1
0	1	-1	0,0512	5,8610	-1,7186	33,2415
0	2	-1	1,2788	0,2344	1,5123	2,1290
0	2	-2	0,1023	2,9305	-1,7186	33,2415
0	-1	2	1,1253	0,2664	1,9529	2,3584
1	-1	0	0,3478	0,8619	-1,2833	5,7400
2	-1	0	1,9232	0,1559	0,5871	1,7583
4	-5	0	0,1637	1,8316	-23,2604	53,7448
1	-1	1	1,5243	0,1967	1,0912	1,5207
1	-2	1	0,2967	1,0105	-1,2083	10,6026
1	-4	3	0,1944	1,5424	-0,9397	32,1501
1	-5	4	0,1432	2,0932	-0,6616	55,1119
1	0	-1	0,3990	0,7514	-1,3391	4,9282
2	0	-1	1,9744	0,1518	0,5273	1,7035
0	1	1	2,4041	0,1247	1,7186	0,7073

Fonte: Gu e Zhu (2017)

2.4.3 Construção da equação *Geometry-free*

A equação de observação de fase da onda portadora da i -ésima frequência na época t_0 apresentada na equação (2) pode ser escrita como (DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2008; MONICO, 2008):

$$\lambda_i \phi_i(t_0) = \rho_r^s(t_0) + \lambda_i N_i - \mu_i I_1(t_0) + T(t_0) + dt_r(t_0) - dt^s(t_0) + \varepsilon_i(t_0), \quad (31)$$

em que, t_0 é a época atual, λ_i denota o comprimento de onda, ϕ_i representa a fase da onda portadora em ciclos, ρ_r^s é a distância entre o receptor e o satélite, N_i indica a ambiguidade inteira, $\mu_i = \lambda_i^2 / \lambda_1^2 = f_1^2 / f_i^2$ é o coeficiente ionosférico, I_1 representa o atraso ionosférico com respeito a L1, T representa o atraso troposférico, dt^s e dt_r indicam o erro do relógio do satélite e receptor, respectivamente, e ε_i representa os outros erros não modelados.

Se uma perda de ciclos ΔN_i ocorre no sinal i na época seguinte (t_1), tem-se (DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2008; DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2009):

$$\lambda_i \phi_i(t_1) = \rho_r^s(t_1) + \lambda_i (N_i + \Delta N_i) - \mu_i I_1(t_1) + T(t_1) + dt_r(t_1) + dt^s(t_1) + \varepsilon_i(t_1). \quad (32)$$

Fazendo a diferença entre as equações (32) e (31), obtém-se a seguinte equação de observação entre épocas (DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2008; DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2009):

$$\lambda_i \Delta \phi_i = \Delta \rho_r^s + \lambda_i (\Delta N_i) - \mu_i \Delta I_1 + \Delta T + \Delta dt_r + \Delta dt^s + \Delta \varepsilon_i, \quad (33)$$

em que o Δ representa a diferença entre as épocas t_0 e t_1 . Para tripla frequência, uma combinação linear pode ser expressa por (DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2008; DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2009):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 \omega_i \lambda_i \Delta \phi_i = \sum_{i=1}^3 \omega_i (\Delta \rho_r^s + \Delta T + \Delta dt_r + \Delta dt^s) + \sum_{i=1}^3 \omega_i \lambda_i \Delta N_i + \\ \sum_{i=1}^3 (-\omega_i \mu_i \Delta I_1) + \sum_{i=1}^3 \omega_i \Delta \varepsilon_i, \end{aligned} \quad (34)$$

em que ω_i representa o escalar do i -ésimo sinal para construir a combinação linear. A base da detecção de perdas de ciclos é derivar uma relação entre as medidas de fase ($\Delta \phi_i$) e os valores das perdas de ciclos (ΔN_i). Desta forma, assumindo que a soma dos escalares ω_i é nula, e ignorando os termos ionosféricos e erros remanescentes, tem-se a combinação linear livre de geometria, dada por (DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2008; DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2009; ZHANG; LI, 2015):

$$\sum_{i=1}^3 \omega_i \lambda_i \Delta \phi_i = \sum_{i=1}^3 \omega_i \lambda_i \Delta N_i. \quad (35)$$

2.5 Posicionamento relativo

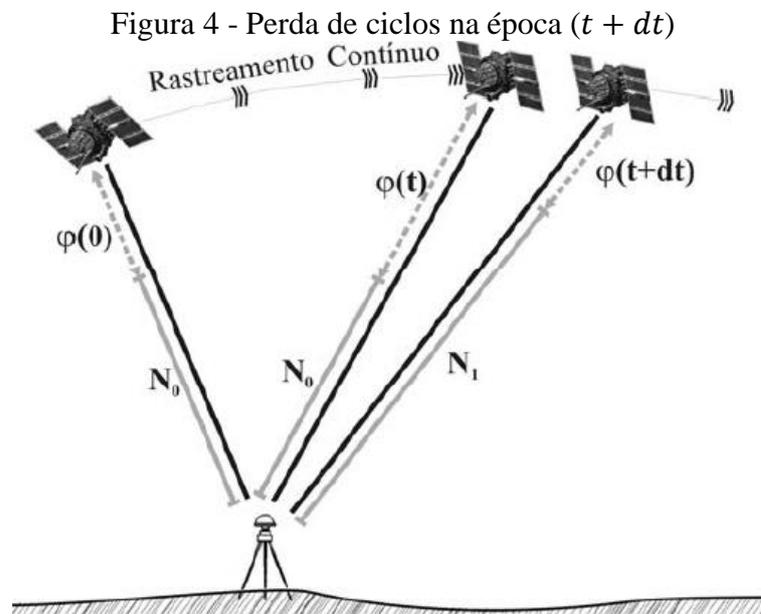
De acordo com Seeber (2003), muitas técnicas foram desenvolvidas para explorar a capacidade do GNSS para obter alta acurácia. Uma delas, que tem sido amplamente utilizada, é o posicionamento relativo. Para realizar essa forma de posicionamento, o usuário deve dispor de dados de dois ou mais receptores coletados simultaneamente. Tal método pode ser subdividido em: estático, estático rápido, semi-cinemático e cinemático. O posicionamento relativo cinemático pode ser realizado em tempo real ou no modo pós-processado. No primeiro caso os dados são processados durante a coleta e no segundo os dados são processados posteriormente no escritório (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2007; TEUNISSEN; KLEUSBERG, 1998; SEEBER, 2003).

O posicionamento relativo pode alcançar acurácia centimétrica e milimétrica, e tem sido desenvolvido consideravelmente nos últimos anos, pois possui várias aplicações em navegação, topografia e geodésia, além de outras possibilidades (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2007; SEEBER, 2003; TEUNISSEN; KLEUSBERG, 1998). Para minimizar os erros envolvidos nas observáveis GNSS, um processo de diferenciação (DD) é realizado. Assim, no posicionamento relativo a DD é a observável empregada no processamento. Para isso, é necessário que no mínimo dois receptores rastreiem simultaneamente os mesmos dois satélites.

Muitos são os tipos de erros que afetam as observáveis GNSS. A maioria deles pode ser eliminada, minimizada ou até mesmo evitada. Existem diferentes fontes de erros, originados no satélite, na propagação do sinal, no receptor e antena, na estação entre outros. Pode-se destacar a refração atmosférica (ionosférica e troposférica), as perdas de ciclos e o multicaminho. Ressalta-se que a refração ionosférica e o multicaminho podem resultar em perdas de ciclos (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2007; TEUNISSEN; KLEUSBERG, 1998; SEEBER, 2003).

3 MÉTODOS DE DETECÇÃO E CORREÇÃO DE PERDAS DE CICLOS

A ocorrência de perdas de ciclos provoca uma mudança (salto) repentina no número inteiro de ciclos (SEBEER, 2003), alterando assim o número de ambiguidades, sendo necessário solucioná-las novamente. Conforme Monico, Souza e Machado (2009), a parte fracionária da fase não é afetada na ocorrência de uma perda de ciclos, apenas o número inteiro. Assim, enquanto o rastreamento ocorre de forma contínua, a ambiguidade $N_{r_0}^s$ permanece a mesma até o momento da ocorrência de uma perda de ciclos na época (t), sendo este alterado então para $N_{r_1}^s$ a partir da época ($t + dt$), conforme Figura 4.



Fonte: Monico, Souza e Machado (2009)

Perdas de ciclos podem ocorrer de forma independente em cada uma das três frequências e em cada satélite GPS e afetam todas as observações subsequentes à sua ocorrência (DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2009). Neste sentido, faz-se necessária a detecção e correção de perdas de ciclos, quando possível, na observável de fase para a realização do posicionamento GPS de alta acurácia. Tendo em vista o cenário atual, com a modernização do GPS, diversos estudos vêm sendo realizados de forma a avaliar os impactos e benefícios de adoção do sinal na terceira frequência na detecção e correção de perdas de ciclos.

No que concerne a detecção e correção, uma vez que as perdas de ciclos são eventos aleatórios, os algoritmos de detecção de perdas de ciclos devem ser aplicados época a época,

rápidos e de baixo custo computacional (DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2009). Atualmente tem-se dado atenção para detecção e correção de perdas de ciclos em dados de tripla frequência GPS. Diferentes técnicas de detecção e correção de perdas de ciclos foram propostas na literatura para este fim.

No decorrer do período de desenvolvimento da presente pesquisa, foram estudados diversos métodos de detecção e correção de perdas de ciclos, dado destaque aos seguintes métodos: *TurboEdit* (BLEWITT, 1990); *TurboEdit* para tripla frequência (HUANG, et. al, 2015); baseado nas triplas diferenças (MONICO; SOUZA; MACHADO, 2009); baseado na observável *geometry-free* (DAI; KNEDLIK; LOFFELD, 2008, 2009); baseado no teste estatístico UMPI (*Uniformly Most Powerful Invariant*) (TEUNISSEN; BAKKER, 2015); baseado na diferenciação das observáveis no tempo (ZHANG, LI, 2015); e baseado em uma sequência de combinações lineares (GU; ZHU, 2017).

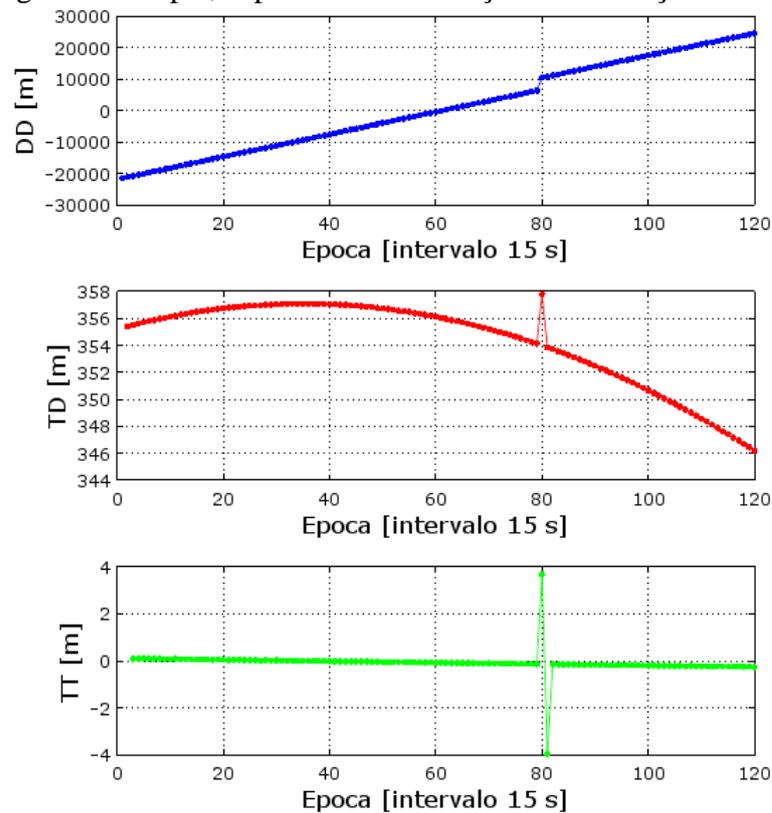
Dentre os métodos disponíveis, foram selecionados o método baseado nas triplas diferenças (MONICO; SOUZA; MACHADO, 2009) e o baseado em uma sequência de combinações lineares (GU; ZHU, 2017) para implementação no sistema de posicionamento relativo que vem sendo desenvolvido na FCT/UNESP, fazendo as adaptações e melhorias necessárias. A escolha destes métodos se deu levando em consideração a aplicabilidade de dados de tripla-frequência do GPS modernizado, além de apresentarem resultados promissores na literatura. Assim, nesta seção serão discutidos os métodos de detecção e correção selecionados para utilização nesta pesquisa.

3.1 Baseado nas triplas diferenças

Considerando a equação de TD dada em (7), na ausência de perdas de ciclos, a série temporal das medidas de fase da onda portadora, bem como suas diferenciações, deve ser contínua, sendo que um salto abrupto na curva é um forte indicativo da ocorrência de perdas de ciclos (MONICO; SOUZA; MACHADO, 2009).

Considerando que uma perda de ciclos na observação de fase na estação i e satélite s tenha ocorrido em uma determinada época t , todas as DDs deste conjunto de observações a partir da época t serão afetados. Entretanto, somente a TD na época t que envolve somente a estação i e o satélite s é afetada pela perda de ciclos. A Figura 5 apresenta o procedimento descrito, apontando a ocorrência de perda de ciclos na época 80. O salto na série temporal da TD indica a ocorrência de perdas de ciclos.

Figura 5 – Dupla, tripla e tetra diferença da observação de fase



Para detecção das perdas de ciclos, ou seja, identificar a ocorrência de saltos, são empregadas TTs dadas pela equação (8), uma vez que um salto na TT, além do indicativo da detecção da perda de ciclos, proporciona um valor aproximado dessa perda. O limiar para aceitar a detecção da ocorrência de uma perda de ciclos pode ser estabelecido em função do comprimento da linha de base empregada no posicionamento relativo. Contudo, conforme Bisnath (2000), a principal desvantagem desse tipo de método está relacionada a definição dos valores específicos do limiar de aceitação na detecção.

Uma vez que uma ou mais perdas tenham sido detectadas, uma estratégia adotada para a correção envolve a alteração dos elementos da Matriz de Variância-Covariância (MVC) dos parâmetros envolvidos com a ocorrência da perda de ciclos (MONICO; SOUZA; MACHADO, 2009). Neste sentido, para realizar a correção, deve-se atribuir um grande valor de variância na MVC para a DD da ambiguidade que envolve o satélite em que ocorreu a perda de ciclos. Segundo Monico, Souza e Machado (2009), para realizar a alteração da MVC, é adotado como valor de desvio padrão da observável o valor aproximado da perda de ciclos obtido na tetra diferença escalonado por três. Além disto, as correlações com os outros parâmetros podem ser negligenciadas, ou seja, tomadas como nulas. Esta abordagem pode ser aplicada em cada uma das três frequências.

Outra forma de realizar a correção das perdas de ciclos é adicionar uma nova DD de ambiguidades na mesma época em que a perda de ciclos for detectada, sendo assim introduzida como outra incógnita no processamento de dados (MONICO; SOUZA; MACHADO, 2009).

Considerando as duas abordagens para correção de perdas de ciclos nas observáveis de dupla diferenças, Monico, Souza e Machado (2009) destacam que o primeiro método é mais simples de ser implementado, uma vez que apenas a MVC dos parâmetros é alterada, enquanto a segunda abordagem requer maior atenção na implementação, principalmente no que se refere as dimensões das matrizes de vetores empregados, principalmente na ocorrência de muitas perdas de ciclos em várias épocas da coleta de dados.

3.2 Baseado em uma sequência de combinações lineares

De modo geral, os algoritmos baseados em ajuste polinomial ou diferenciação de alta ordem no tempo são amplamente empregados. Entretanto, segundo Gu e Zhu (2017), estes apresentam limitações idênticas, uma vez que podem detectar grandes perdas de ciclos, mas são insensíveis a pequenas perdas (1 a 2 ciclos). Detectar e corrigir estas pequenas perdas de ciclos de forma acurada é um grande desafio em função das influências provocadas pelo erro do relógio, refração atmosférica e ruídos devido ao multicaminho.

Considerada a existência do problema de detecção de pequenas perdas de ciclos e da disponibilidade da tripla frequência, Gu e Zhu (2017) propuseram um método baseado em três combinações lineares ótimas, independentes entre si. Para complementar o método, é empregada a diferenciação no tempo para eliminar erros que apresentam poucas variações. Entretanto, o atraso ionosférico deve ser tratado de forma adequada.

A primeira combinação de fase empregada é a combinação *extra-wide-lane* (EWL - $\phi_{(0,1,-1)}$), uma vez que apresenta grande comprimento de onda ($\lambda_{(0,1,-1)} = 5,8610$ m) e valores de coeficiente ionosférico e ruído relativamente baixos. Esta combinação é aplicada juntamente com a observável de pseudodistância para remover os parâmetros geométricos, erros de relógio e atraso troposférico, ou seja, a combinação livre de geometria (*geometry-free*) dada pela combinação Hatch-Melbourne-Wübbena (HMW). A ambiguidade da ϕ_{EWL} obtida pela combinação HMW é dada por (GU; ZHU, 2017):

$$N_{EWL} = \frac{\frac{f_2 PD_2 + f_5 PD_5}{f_2 + f_5} - \frac{f_2 \phi_2 + f_5 \phi_5}{f_2 - f_5} - (\mu_{(0,1,1)} + \mu_{(0,1,-1)}) \delta I_1}{\lambda_{EWL}}. \quad (36)$$

Pela diferenciação das ambiguidades entre duas épocas adjacentes, tem-se a seguinte equação para obtenção das perdas de ciclos:

$$\Delta\hat{N}_{EWL} = \frac{\frac{f_2\Delta PD_2 + f_5\Delta PD_5}{f_2 + f_5} - \frac{f_2\Delta\phi_2 + f_5\Delta\phi_5}{f_2 - f_5} - (\mu_{(0,1,1)} + \mu_{(0,1,-1)})\Delta\delta I_1}{\lambda_{EWL}}. \quad (37)$$

Tem-se que o valor de $\mu_{(0,1,1)} + \mu_{(0,1,-1)} = 0$, anulando as variações de primeira ordem do efeito ionosférico. Os atrasos instrumentais e erros remanescentes podem ser considerados nulos (GU; ZHU, 2017), permitindo a obtenção das perdas de ciclos de forma direta. Quando o valor de $\Delta\hat{N}_{EWL}$ for maior que 0,5 ciclo, considera-se que uma perda de ciclo ocorreu e a magnitude da perda pode ser estimada pelo inteiro mais próximo.

$$\Delta\tilde{N}_{EWL} = \text{round}[\Delta\hat{N}_{EWL}]. \quad (38)$$

Uma vez que a perda de ciclo da EWL foi detectada e corrigida, esta observável é empregada então para a detecção de perdas de ciclos no segundo passo, a qual é baseada na combinação de fase *wide-lane* (WL). Uma vez que a observável de fase é muito mais acurada do que a observável de pseudodistância devido ao baixo nível de ruído, o modelo livre de geometria nesse passo é de alta acurácia. A ambiguidade da combinação WL corrigida pela combinação EWL é dada por:

$$N_{WL} = \frac{(\phi_{EWL} - \phi_{WL}) + (\mu_{EWL} + \mu_{WL})\delta I_1 + \lambda_{EWL}N_{EWL}}{\lambda_{WL}}. \quad (39)$$

Pela diferenciação das ambiguidades entre duas épocas adjacentes, tem-se a seguinte equação para determinação da perda de ciclo na ϕ_{EWL} :

$$\Delta\hat{N}_{WL} = \frac{(\Delta\phi_{EWL} - \Delta\phi_{WL}) + (\mu_{EWL} + \mu_{WL})\Delta\delta I_1 + \lambda_{EWL}\Delta\tilde{N}_{EWL}}{\lambda_{WL}}. \quad (40)$$

Os coeficientes para esta segunda combinação são dados por $\omega_1 = 1$, $\omega_2 = -1$ e $\omega_5 = 0$. Na equação (39), faz-se necessário a determinação do efeito ionosférico, podendo ser calculado com base no modelo de Klobuchar ou de um mapa ionosférico global (do inglês *Global Ionospheric Mapping* – GIM). Se o valor de $\Delta\hat{N}_{WL}$ for maior que 0,5 ciclo, considera-

se que uma perda de ciclo ocorreu na ϕ_{WL} e a magnitude da perda pode ser estimada pelo inteiro mais próximo.

$$\Delta\tilde{N}_{WL} = \text{round}[\Delta\hat{N}_{WL}]. \quad (41)$$

De forma similar a equação (39), a combinação WL corrigida é usada para construir a combinação livre de geometria no passo seguinte. No terceiro passo emprega-se então a combinação *narrow-lane* (NL). A ambiguidade da combinação NL corrigida pela combinação WL é dada por:

$$N_{NL} = \frac{(\phi_{WL} - \phi_{NL}) + (\mu_{WL} + \mu_{NL})\delta I_1 + \lambda_{WL}N_{WL}}{\lambda_{NL}}. \quad (42)$$

Pela diferenciação das ambiguidades entre duas épocas adjacentes, tem-se a seguinte equação para determinação da perda de ciclo na ϕ_{NL} :

$$\Delta\hat{N}_{NL} = \frac{(\Delta\phi_{WL} - \Delta\phi_{NL}) + (\mu_{WL} + \mu_{NL})\Delta\delta I_1 + \lambda_{WL}\Delta\tilde{N}_{WL}}{\lambda_{NL}}. \quad (43)$$

Os coeficientes para esta segunda combinação são dados por $\omega_1 = 0$, $\omega_2 = 0$ e $\omega_5 = 1$. Então, quando o valor de $\Delta\hat{N}_{NL}$ for maior que 0,5 ciclo, considera-se que uma perda de ciclo ocorreu na ϕ_{NL} e a magnitude da perda pode ser estimada pelo inteiro mais próximo.

$$\Delta\tilde{N}_{NL} = \text{round}[\Delta\hat{N}_{NL}] \quad (44)$$

Segundo Gu e Zhu (2017), na maioria dos casos, as combinações $\phi_{(0,1,-1)}$, $\phi_{(1,-1,0)}$ e $\phi_{(0,0,1)}$ apresentam boas propriedades para a determinação de perdas de ciclo na época atual e podem determinar este valor. Entretanto, ocorrem casos especiais em que as perdas podem não ser identificadas, quando $\Delta N_1 = \Delta N_2 = \Delta N_5$, ou quando $\Delta N_1 = \Delta N_2 = \Delta N_5 = 1$. Neste caso, as combinações EWL e WL são insensíveis a esse tipo de perda. A fim de lidar com esta situação, uma quarta combinação é proposta, denominada $N_{NLAlter}$ (GU; ZHU, 2017), cujos coeficientes são (4,-5,0), devendo verificar se $\Delta\hat{N}_{NLAlter} > 0,5$ ciclo. Para determinação dos valores de $N_{NLAlter}$ e $\Delta\hat{N}_{NLAlter}$ basta aplicar as equações (42) e (43), respectivamente.

Finalizada a detecção por meio das combinações lineares, se a ionosfera não estiver ativa, as perdas de ciclos originais em cada portadora podem ser recuperadas pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \\ \Delta N_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \tilde{N}_{(0,1,-1)} \\ \Delta \tilde{N}_{(1,-1,0)} \\ \Delta \tilde{N}_{(0,0,1)} \end{bmatrix}. \quad (45)$$

Entretanto, se a ionosfera estiver ativa, a combinação alternativa deve ser usada juntamente com as combinações EWL e WL para detecção de perdas de ciclos, levando a:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 4 & -5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \\ \Delta N_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \tilde{N}_{(0,1,-1)} \\ \Delta \tilde{N}_{(1,-1,0)} \\ \Delta \tilde{N}_{(4,-5,0)} \end{bmatrix}. \quad (46)$$

Uma vez que as perdas de ciclos foram detectadas, as mesmas devem ser corrigidas. Ao considerar a observável original, sem diferenciação ou combinação dos sinais, para sua utilização no posicionamento, deve-se fazer uma pequena modificação no modelo matemático da observável de fase dado pela equação (2), resultando, de acordo com Banville (2012) em:

$$\phi_r^s = f \left(\frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + M_{PD_r}^s}{c} \right) + f(dt_r - dt^s) + (N_r^s + \Delta N_r^s) + \varepsilon_{\phi_r^s}, \quad (47)$$

em que o termo ΔN_r^s representa a mudança no parâmetro da ambiguidade, ou seja, o tamanho da perda de ciclo identificada. Desta forma, o parâmetro referente a correção da perda de ciclo passar a fazer parte da equação de observação original, permitindo o uso de informações não diferenciadas (BANVILLE; LANGLEY, 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Na FCT/UNESP está em desenvolvimento um sistema científico para realizar o posicionamento relativo com a adição da tripla frequência GPS no modo pós-processado (SILVA, 2015), *software* este denominado FCT-RTK-Net. Este sistema foi utilizado como ponto de partida para a pesquisa proposta nessa pesquisa, pois é nesse sistema que está sendo implementado o método de detecção e correção de perdas de ciclos para dados de tripla frequência.

No que concerne a detecção de perdas de ciclos para dados GPS de tripla frequência, foram implementados dois métodos. O primeiro método de detecção implementado foi aquele que realiza TD, como descrito em Monico, Souza e Machado (2009), seção 3.1, o qual pode ser aplicado para dados de simples, dupla e tripla frequência. O segundo método implementado foi o que utiliza sequências de combinações lineares entre as observáveis (*extra-wide-lane*, *wide-lane* e *narrow-lane*) seguida de sua diferenciação época a época, descrito por Gu e Zhu (2017), seção 3.2, empregado somente para dados de tripla frequência.

O método baseado na sequência de combinações lineares (*extra-wide-lane*, *wide-lane* e *narrow-lane*) emprega as observáveis originais, devendo ser aplicados para cada satélite em uma dada estação. O método das triplas diferenças é aplicado considerando as observáveis empregadas no posicionamento relativo (DDs), devendo considerar o par de estações que formam a linha de base e o par de satélites (satélite base e satélite não base) que formam a DD. Algo importante na implementação das DDs é a escolha do satélite base; nessa pesquisa o satélite com maior ângulo de elevação foi selecionado como base, uma vez que este permanecerá mais tempo visível. Além disto, foi proposta uma metodologia para melhoria no limiar de detecção de perdas de ciclos para o método das triplas diferenças, apresentada na seção 4.1.

Uma vez realizada a detecção das perdas de ciclos, o próximo passo foi realizar a correção destas. No que concerne a correção, foram adotadas duas metodologias, referentes a cada método de detecção. Considerando o método baseado na sequência de combinações, foi adotado o procedimento proposto em Gu e Zhu (2017) – seção 3.2 –, bastando somar o valor das perdas de ciclo fornecido pela solução do método as observáveis afetadas, corrigindo assim as perdas de ciclos. Considerando o procedimento descrito em Monico, Souza e Machado (2009) – seção 3.1 –, para realizar a correção foi utilizado o valor obtido na TT para relaxar a MVC dos parâmetros durante o ajustamento.

Apesar de não ser o objetivo principal desta pesquisa, foi realizado o posicionamento relativo estático, permitindo assim avaliar o impacto da ocorrência de perdas de ciclos no posicionamento, bem como a influência da correção das perdas detectadas. Para a realização do posicionamento relativo, foi utilizada a versão inicial do *software* FCT-RTK-Net que vem sendo implementado por SILVA (2019) em seu doutorado. O *software* utilizado faz uso da estimativa de mínimos quadrados recursiva (Filtragem de Kalman), permitindo atualizar a solução do ajustamento com a introdução de novas observações, sem necessidade de salvar aquelas até então utilizadas (MONICO, 2008).

O posicionamento relativo foi realizado com observações de dupla e tripla frequência para dados de fase e pseudodistância, quando disponíveis. Foram utilizadas efemérides precisas e máscara de elevação de 10°. No entanto, não foram consideradas correções de erros atmosféricos (ionosfera e troposfera), nem dos demais erros que afetam o posicionamento.

Uma vez realizado o posicionamento relativo, foram determinadas as coordenadas cartesianas (X,Y,Z) e respectivos desvios-padrão (σ_X , σ_Y , σ_Z) para a estação de interesse época a época, as quais foram comparadas com as coordenadas de referência, de forma a obter o erro no posicionamento. Para facilitar as análises, o erro foi transformado para um Sistema de Coordenadas Local (STL), permitindo avaliar os resultados em termos de componente horizontal e vertical. Na sequência, foi calculada uma medida de acurácia denominada raiz quadrada do erro quadrático médio (REMQ) época a época, dada por (MONICO et. al, 2009):

$$REMQ = \sqrt{s^2 + t^2} \quad (48)$$

sendo s^2 a dispersão das medidas (variância) e t a tendência ou vício do estimador (discrepância em relação ao valor verdadeiro). Ademais, foi considerado o valor da média do REMQ e seu respectivo desvio padrão.

Foram conduzidos dois experimentos principais. O primeiro experimento concentra-se na detecção e correção de perdas de ciclos com dados simulados com diferentes valores de perdas de ciclos em dois casos: linha de base curta e linha de base longa. Já o segundo experimento aborda a detecção e correção de perdas de ciclos em condições reais de alta atividade ionosférica, incluindo cintilação ionosférica, em dois casos: linha de base curta e linha de base longa. A execução de tais experimentos permitiu avaliar o desempenho dos métodos implementados em diversas situações.

4.1 Metodologia para melhoria do limiar para o método das triplas diferenças

O método das TD é clássico, sendo o limiar para aceitar a detecção da ocorrência de uma perda de ciclos em função do comprimento da linha de base empregada no posicionamento relativo (MONICO; SOUZA; MACHADO, 2009). Conforme Bisnath (2000), a principal desvantagem desse método está relacionada a definição dos valores específicos do limiar de aceitação para a detecção.

Em estudos preliminares (ver APÊNDICE A – Estudo de caso: avaliação do limiar para o método das triplas diferenças clássico), foi verificado que o método das TD não apresentou grande eficácia na detecção de perdas de poucos ciclos em linhas de base longas. Assim, foram realizados estudos visando a reavaliação dos valores de limiares de aceitação de ocorrência de perdas de ciclos para o método. Nesta pesquisa foi proposto um novo limiar levando em consideração os valores de média e desvio padrão da série de dados de TD, conforme a ideia proposta por Blewitt (1990).

Por meio das observáveis de TD, dadas pela Equação (7), as quais são calculadas época por época em cada frequência e assumindo-se um desvio padrão *a priori* (s_0), o algoritmo atualiza sequencialmente o valor de \overline{TD} , média dos valores de TD em cada frequência, e seu desvio padrão (s_{TD}) pelas seguintes equações, adaptado de Blewitt (1990):

$$\overline{TD}_i = \overline{TD}_{i-1} + \frac{1}{i} (TD_i - \overline{TD}_{i-1}), \quad (49)$$

$$s_{TD_i}^2 = s_{TD_{i-1}}^2 + \frac{1}{i} [(TD_i - \overline{TD}_{i-1})^2 - s_{TD_{i-1}}^2], \quad (50)$$

sendo i o número atual de épocas em um conjunto de dados sem perdas de ciclos.

Para utilização desta metodologia, tornou-se necessária a determinação de um valor de desvio padrão *a priori* (s_0), o qual é influenciado pelo comprimento da linha de base. Neste sentido, foram selecionadas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) formando diferentes comprimentos de linhas de base (Tabela 4), a fim de estabelecer o valor de s_0 adequado.

Para cada linha de base selecionada foi considerado um conjunto de dados com 50 épocas, com intervalo amostral 15 segundos, para o dia 20 de julho de 2018. Os dados da amostra passaram, inicialmente, por verificação por outros métodos de detecção, a fim de garantir a não ocorrência de perdas de ciclos e desta forma, validar os resultados obtidos.

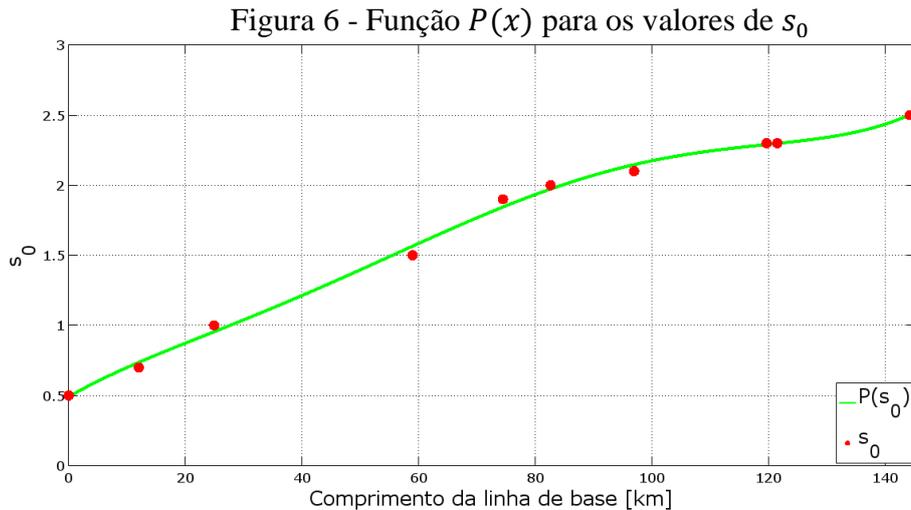
Na sequência, foram simuladas perdas de ciclos em uma estação do par, sendo a outra tomada como base, iniciando na época 3 com a inserção de uma perda de 1 ciclo, e sendo inserida a cada 3 épocas uma perda de ciclo incrementada por 1 ciclo para as três frequências (L1, L2 e L5). Em seguida, foram testados diferentes valores de s_0 até determinar empiricamente qual valor proporcionaria maior porcentagem de acerto na detecção de perda com menor número de ciclos possível, evitando as falsas detecções. Este procedimento foi repetido para os 10 pares de estações selecionados, sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valor do desvio padrão a priori obtido em função do comprimento da linha de base

Linha de base	Comprimento (Km)	s_0
PPTE – PRU4	0,020	0,5
RIOD – ONRJ	12,044	0,7
POLI – EACH	24,944	1,0
SPC1 – SPPI	58,963	1,5
PPTE – SPDR	74,438	1,9
SPAR – SPTU	82,614	2,0
PPTE – SPTU	96,925	2,1
SPAR – SPDR	119,623	2,3
SPDR – SPTU	121,474	2,3
PPTE – SPAR	144,155	2,5

Desta maneira foi possível determinar o valor de s_0 . É importante ressaltar que tais resultados foram obtidos para um período de baixa atividade ionosférica, sendo recomendado a realização de novos estudos para avaliar o impacto nos resultados com períodos distintos de atividade ionosférica.

Definido o valor de s_0 para o conjunto de dados apresentados na Tabela 4, foi ajustada uma função polinomial ($P(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$) para determinar o valor de s_0 em comprimentos de linha de base distintos. Para tanto, utilizou-se um polinômio de grau 5, uma vez que esta foi a função que melhor se ajustou aos dados empregados. A Figura 6 representa a função $P(x)$ ajustada com base nos valores de s_0 estabelecidos.



O polinômio ajustado foi aplicado de modo a obter o valor de s_0 para diferentes comprimentos de linhas de base. De acordo com os estudos realizados, verificou-se que o valor mínimo de s_0 que pode ser adotado é de 0,5, o valor máximo de s_0 que pode ser adotado é de 2,5 e que s_0 pode ser aplicado variando de 0,1 sem afetar a qualidade dos resultados na detecção.

Uma vez estabelecidos os valores de s_0 , as equações (49) e (50) podem ser aplicadas para calcular sequencialmente os valores de média e desvio padrão da série de TD. A fim de determinar se uma perda de ciclos na série de TD ocorreu, deve-se testar se houve um salto no *bias* (b_{TD}) da série. Assumindo distribuição gaussiana (WOLF; GHILANI, 1997), é possível estabelecer o seguinte intervalo de confiança de 95%, nível de significância $\alpha = 0,05$:

$$P\left(b_{TD_{i-1}} - 1,96 \frac{S_{TD_i}}{\sqrt{i}} < b_{TD_i} < b_{TD_{i-1}} + 1,96 \frac{S_{TD_i}}{\sqrt{i}}\right), \quad (51)$$

em que $b_{TD_i} = TD_i - \overline{TD}_{i-1}$ e $b_{TD_{i-1}} = TD_{i-1} - \overline{TD}_{i-2}$. Na inicialização dos cálculos, toma-se $b_{TD_{i-1}} = b_{TD_i}$. Caso o valor de b_{TD_i} se encontre fora do intervalo de confiança estabelecido, assume-se que uma perda de ciclo ocorreu e um novo cálculo da média é iniciado até a ocorrência de outra perda de ciclos.

4.2 Primeiro experimento: dados simulados

O primeiro experimento realizado refere-se a perdas de ciclos simuladas. Para condução do mesmo, foi considerado período de baixa atividade ionosférica, visando minimizar os efeitos da mesma sobre os dados. Foram considerados dois cenários neste experimento, sendo no

primeiro cenário adotada linha de base curta, enquanto no segundo cenário considerou-se linha de base longa. Os dados empregados na condução deste experimento, em ambos cenários, foram coletados no dia 20 de julho de 2018.

4.2.1 Primeiro cenário: linha de base curta

Neste cenário foram utilizados dados de uma linha de base curta, com distância aproximada de 263,3 metros, considerando as estações PRU4 e PRU2, ambas pertencentes a rede CIGALA/CALIBRA, localizadas nas dependências da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente – SP, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Localização das estações da rede CIGALA/CALIBRA utilizadas na pesquisa



Fonte: Adaptado de Google Maps² (2019)

Estudo nestas condições é importante pois os erros devido a ionosfera e troposfera podem ser considerados nulos no posicionamento relativo. Os dados de observação empregados formam uma amostra de 30 minutos de observação, com intervalo amostral entre épocas de 15 segundos, com início as 7h TU.

Inicialmente, o conjunto de dados selecionados passou por uma verificação, a fim de garantir a não ocorrência de perdas de ciclos. A verificação da ocorrência de perdas de ciclos

² Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.121056,-51.4065908,17.75z?hl=pt-BR>>. Acesso em: 21 jan. 2017.

foi realizada nos dados dos satélites com os dois métodos implementados. Caso encontradas possíveis perdas de ciclo nas observáveis de algum satélite, as mesmas foram descartadas.

Na estação PRU4 foram rastreados 11 satélites para o conjunto de dados e aplicando os métodos de detecção de perdas de ciclos, constatou-se que 1 satélite possivelmente sofreu perdas de ciclos, sendo seus dados excluídos. Em relação a estação PRU2, foram rastreados dados de 10 satélites e aplicando os métodos de detecção de perdas de ciclos, constatou-se que as observáveis de nenhum satélite necessitavam ser excluídas. Deste modo, foram empregadas observações de 10 satélites em cada uma das estações (PRU4 e PRU2).

Na sequência foram simuladas perdas de ciclos nas observáveis de fase coletadas na estação PRU2 para o satélite GPS G26, que transmite dados de tripla frequência. As perdas de ciclos foram inseridas (somadas) nos dados originais em diferentes épocas, variando de poucos a muitos ciclos (1 a 20 ciclos). As perdas de ciclos foram inseridas de forma que ocorressem perdas com mesmo número de ciclos em mais de uma frequência simultaneamente. As seguintes perdas de ciclos foram inseridas nos dados de entrada do satélite G26 (Tabela 5).

Tabela 5 - Perdas de ciclos simuladas no satélite G26 para linha de base curta

Época	Número de ciclos		
	L1	L2	L5
10	5	3	0
20	2	4	7
30	0	1	1
40	0	17	0
50	1	0	0
52	2	1	1
55	1	2	2
57	4	3	3
60	7	5	5
70	1	1	1
80	20	16	14
90	4	0	0
92	8	7	6
95	11	5	12
97	17	14	10
100	2	10	19
110	8	8	8

As perdas com maior número de ciclos (3 a 20 ciclos) são mais fáceis de serem detectadas. Entretanto, as perdas de poucos ciclos (1 e 2 ciclos) podem ser facilmente confundidas com erros nas observáveis, devido a influência dos erros atmosféricos e multicaminho. Em se tratando do posicionamento relativo, este foi realizado tomando a estação PRU4 como base, estimando as coordenadas cartesianas (X,Y,Z) da estação PRU2. As coordenadas estimadas foram comparadas com as coordenadas de referência, obtendo-se assim a acurácia na estimativa das coordenadas da estação de interesse no STL.

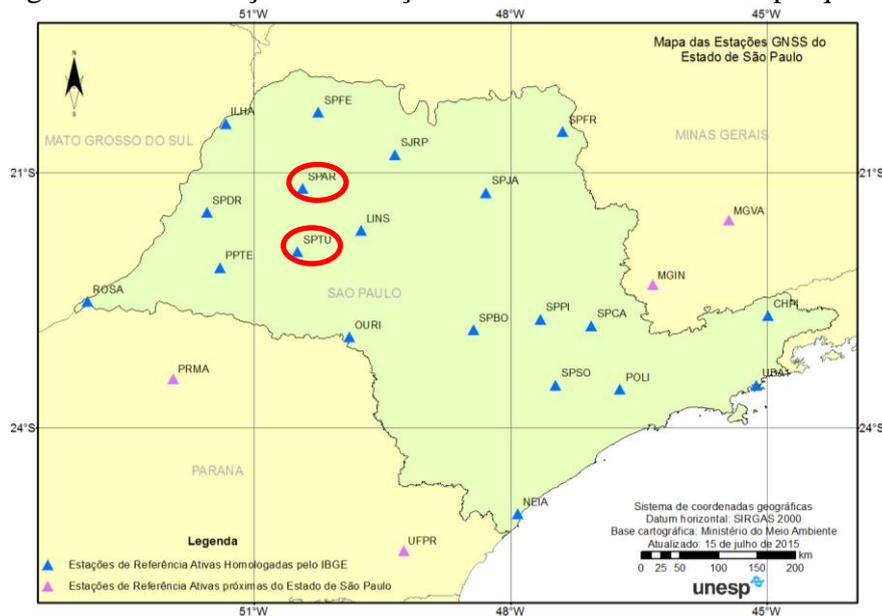
Assim, o experimento executado neste cenário foi realizado para avaliar se os métodos de detecção e correção de perdas de ciclos implementados identificam corretamente diferentes valores de perdas de ciclos para uma linha de base curta, bem como os resultados da correção das perdas detectadas.

4.2.2 Segundo cenário: linha de base longa

Na condução deste experimento neste segundo cenário foi considerada uma linha de base longa, com distância aproximada de 82,6 km, formada pelas estações SPAR e SPTU, ambas pertencentes a RBMC, localizadas em Araçatuba – SP e Tupã – SP, respectivamente, como pode ser visto na Figura 8.

Os dados de observação empregados formam uma amostra de 30 minutos de observação, com intervalo amostral entre épocas de 15 segundos, sendo este coletado no dia 20 de julho de 2018, tendo início as 06h TU. Assim como na seção 4.2.1, o conjunto de dados selecionados passou por uma verificação, sendo estes processados a fim de garantir a não ocorrência de perdas de ciclos.

Figura 8 - Localização das estações da RBMC utilizadas na pesquisa



Fonte: GEGE³ (2019)

Na estação SPAR foram rastreados 13 satélites para o conjunto de dados e aplicando os métodos de detecção de perdas de ciclos, constatou-se que 05 satélites possivelmente sofreram perdas de ciclos, sendo os dados de observações excluídos. Em relação a estação SPTU, foram rastreados dados de 13 satélites e aplicando os métodos de detecção de perdas de ciclos, obteve-se que 05 satélites continuam possíveis perdas de ciclos, sendo os dados de observações excluídos. Deste modo, foram empregadas observações de 08 satélites em cada uma das estações (SPAR e SPTU).

De forma similar ao experimento da seção 4.2.1, para verificar o desempenho dos métodos de detecção e correção de perdas de ciclo implementados em uma linha de base longa, foram simuladas perdas de ciclos nas observáveis de fase coletadas na estação SPTU para os dados do satélite GPS G26, que transmite dados de tripla frequência. As perdas de ciclos foram inseridas (somadas) nos dados originais em diferentes épocas, variando de poucos a muitos ciclos (1 a 20 ciclos), seguindo o mesmo esquema utilizado na Tabela 5.

As mesmas considerações realizadas na seção 4.2.1 em relação ao número de ciclos em cada perda simulada podem ser tomadas aqui. Na realização do posicionamento relativo, considerando a linha de base SPAR-SPTU, tomou-se a estação SPAR como base, estimando as

³ Grupo de Estudo em Geodésia Espacial (GEGE). Disponível em: <<http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/rede-gnss-sp2089/>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

coordenadas cartesianas (X,Y,Z) da estação SPTU, sendo estas comparadas com as coordenadas de referência, obtendo-se assim o erro na estimativa das coordenadas no STL

Portanto, o experimento executado neste cenário foi realizado para avaliar se os métodos de detecção e correção de perdas de ciclos implementados identificam corretamente diferentes valores de perdas de ciclos para uma linha de base longa, bem como os resultados da correção das perdas detectadas.

4.3 Segundo experimento: dados reais

Na execução deste segundo experimento foi considerado um período de alta atividade ionosférica. De forma similar ao realizado na seção 4.2, foram considerados dois cenários neste experimento, sendo no primeiro cenário adotada linha de base curta, enquanto no segundo cenário considerou-se linha de base longa. Os dados empregados na condução deste experimento, em ambos cenários, foram coletados no dia 24 de outubro de 2014 entre as 4h e 5h TU, durante o ciclo solar 24.

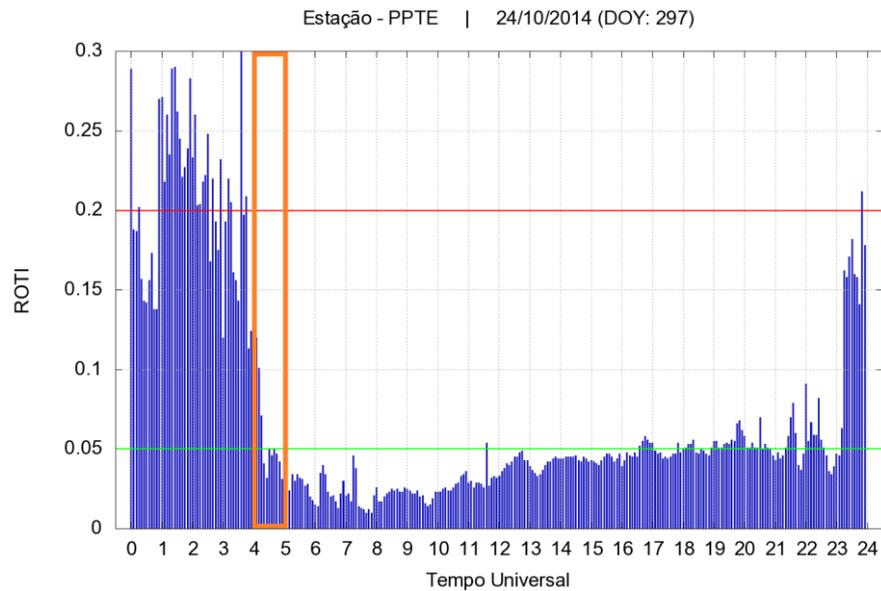
Para a análise da atividade ionosférica, fez-se uso de dois *softwares*: o Ion_Index⁴ (PEREIRA, 2015), que permite o monitoramento das irregularidades ionosféricas, e o ISMR Query Tool⁵ (VANI, SHIMABOKURO, MONICO, 2017), uma ferramenta *web* que possibilita a análise de cintilação dos sinais GNSS devido a ionosfera.

Inicialmente foi utilizado o *software* Ion_Index para análise das irregularidades ionosféricas por meio do índice ROTI, que permite estudar a taxa de variação do TEC (*Total Electron Content*) em pequena escala, sendo classificado como (PEREIRA, 2015): baixo nível de irregularidade ($ROTI \leq 0,05$), irregularidade moderada ($0,05 < ROTI \leq 0,2$) e forte nível de irregularidade ($ROTI > 0,2$). Na Figura 9 são apresentados os valores de ROTI obtidos para a estação PPTE pertencente a RBMC, localizada em Presidente Prudente, obtido com máscara de elevação de 10°, com destaque para o período considerado.

⁴ Disponível em: <<http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/software/>>. Acesso em: 28 jan. 2019.

⁵ Disponível em: <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/index.php>>. Acesso em: 28 jan. 2019.

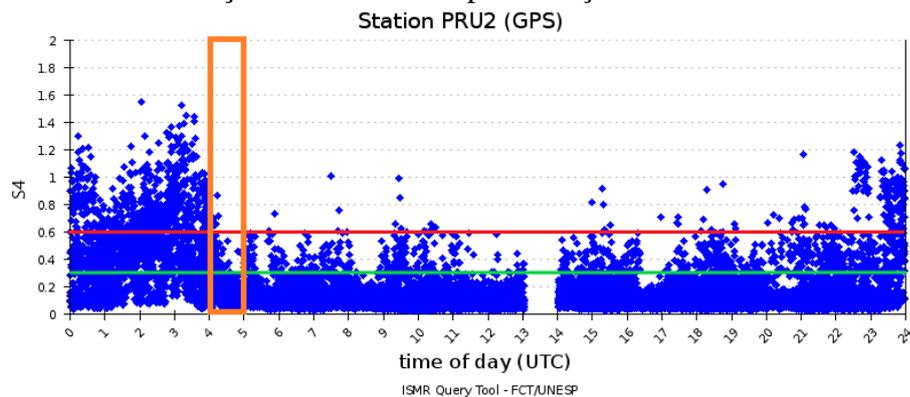
Figura 9 - Índice de irregularidade ionosférica ROTI para estação PPTE em 24 de outubro de 2014



Fonte: Ion_Index (PEREIRA, 2015)

A análise de cintilação ionosférica utilizando o ISMR Query Tool se deu por meio da avaliação do índice S4, o qual indica ocorrência de cintilação em amplitude do sinal, sendo classificado como (VANI, SHIMABOKURO, MONICO, 2017): cintilação forte ($S4 > 0,6$), cintilação moderada ($0,3 \leq S4 \leq 0,6$) e cintilação fraca ($0 \leq S4 < 0,3$). Na Figura 10 são apresentados os valores de S4 obtidos no dia 24 de outubro de 2014 para a estação PRU2, obtido com máscara de elevação de 10° , com destaque para o período considerado.

Figura 10 - Índice de cintilação ionosférica S4 para estação PRU2 em 24 de outubro de 2014



Fonte: Adaptado de ISMR Query Tool (VANI, SHIMABOKURO, MONICO, 2017)

A Figura 9 e Figura 10 apesar de terem sido obtidas para estações específicas, mostram o comportamento geral da ionosfera para a região de Presidente Prudente, tendo em vista que não são esperadas grandes mudanças nas proximidades da estação. Apesar dos índices ROTI e

S4 se mostrarem mais elevados entre 0h e 4h TU, esta janela não foi utilizada devido à indisponibilidade de dados para realização do posicionamento. Assim, tem-se um cenário complexo causado pelas influências dos erros devido à alta atividade ionosférica, principalmente devido a ocorrência de cintilação ionosférica, o que afeta consideravelmente o posicionamento com GNSS em território brasileiro.

4.3.1 Primeiro cenário: linha de base curta

Neste cenário foram utilizados dados de uma linha de base curta, com distância aproximada de 275,2 metros, formada pelas estações PRU1 (atual PRU4) e PRU2, ambas pertencentes a rede CIGALA/CALIBRA, conforme ilustrado na Figura 7. Os dados de observação empregados formam uma amostra de 30 minutos de observação, com intervalo amostral entre épocas de 15 segundos, com início as 4h TU.

Analisando a Figura 9 e a Figura 10 é possível verificar a ocorrência de irregularidades ionosféricas moderadas ($ROTI > 0,05$) e ocorrência de cintilação ionosférica moderada a forte ($0,3 < S4 \leq 0,6$) as 4h TU, condições estas que degradam o posicionamento.

De forma similar a seção 4.2, foi realizado o posicionamento para linha de base curta, estimando as coordenadas cartesianas (X,Y,Z) da estação de interesse. As coordenadas estimadas foram comparadas com as coordenadas de referência, obtendo-se assim o erro na estimativa das coordenadas da estação de interesse no STL. Desta forma, foi possível avaliar o desempenho dos métodos de detecção e correção de perdas de ciclos implementados com dados não simulados em um período de alta atividade ionosférica, incluindo cintilação ionosférica, para linha de base curta.

4.3.2 Segundo cenário: linha de base longa

O experimento realizado neste segundo cenário adotou linha de base longa, de aproximadamente 121,5 km, formada pelas estações SPTU e SPDR, ambas pertencentes a RBMC (Figura 8). Não foram utilizadas as mesmas estações da seção 4.2.2 devido à falta de dados na estação SPAR para a data considerada. Os dados de observação empregados formam uma amostra de 30 minutos de observação, com intervalo amostral entre épocas de 15 segundos, com início as 4h TU, período este com atividade ionosférica, como destacado na seção 4.3.1.

Seguindo o apresentado na seção 4.2.2, foi realizado o posicionamento, estimando as coordenadas cartesianas (X,Y,Z) da estação de interesse. As coordenadas estimadas foram comparadas com as coordenadas de referência, obtendo-se assim o erro na estimativa das coordenadas da estação de interesse no STL. Desta forma, foi possível avaliar o desempenho dos métodos de detecção e correção de perdas de ciclos implementados com dados não simulados em um período de alta atividade ionosférica, incluindo cintilação ionosférica, para linha de base longa.

5 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e respectivas análises para cada experimento descrito no capítulo 4.

5.1 Primeiro experimento: dados simulados

Nesta seção são apresentados os resultados considerando o experimento realizado com perdas de ciclos simuladas (seção 4.2).

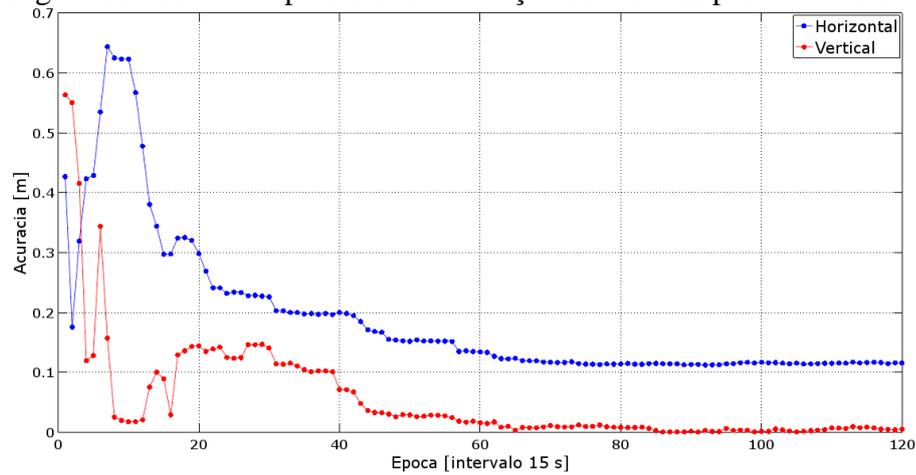
5.1.1 Primeiro cenário: linha de base curta

O experimento realizado nesse cenário considerou uma linha de base curta (seção 4.2.1), formada pelas estações PRU4 e PRU2, de aproximadamente 263,3 metros. Neste caso, os erros devido a ionosfera e troposfera podem ser considerados nulos no posicionamento relativo.

5.1.1.1 Influência das perdas de ciclos no posicionamento

Partindo dos dados sem a presença de perdas de ciclos, após verificação apresentada na seção 4.2.1, foi realizado o posicionamento relativo, tomando como base a estação PRU4. Foram obtidas as coordenadas cartesianas da estação PRU2, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, conforme apresentada na Figura 11 em termos de componente horizontal e vertical.

Figura 11 - Acurácia posicional da estação PRU2 sem perdas de ciclos



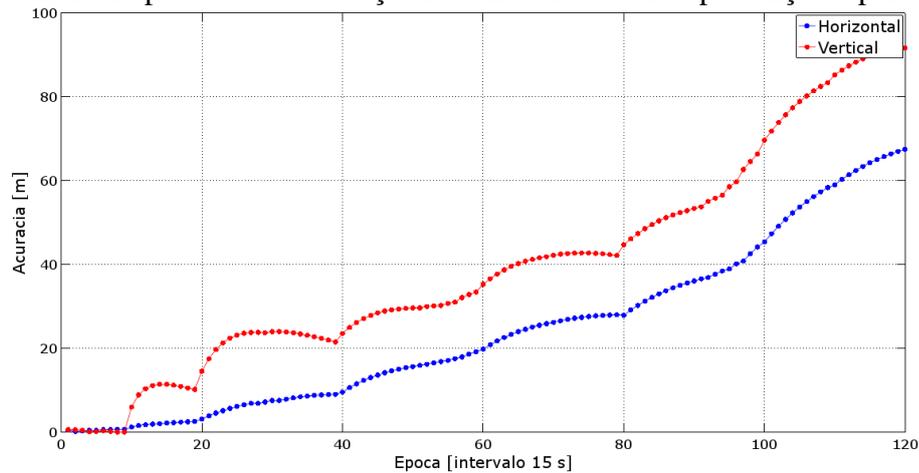
Calculou-se então a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ em cada componente, sendo estes apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 sem perdas de ciclos

Componente	\bar{y}_{REMQ} (m)	s_{REMQ} (m)
Horizontal	0,190	$\pm 0,011$
Vertical	0,055	$\pm 0,008$
Tridimensional	0,206	$\pm 0,013$

Deste resultado, tem-se que a acurácia tridimensional na estimativa das coordenadas da estação PRU2 foi de $0,206 \pm 0,013$ metros. Para dar sequência ao experimento, foram inseridas perdas de ciclos em conformidade com a Tabela 5 nos dados do satélite G26. Realizando o posicionamento, foram estimadas as coordenadas da estação PRU2, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, a qual é apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Acurácia posicional da estação PRU2 obtidas com a presença de perdas de ciclos



Nestas condições, fica evidente que a presença de perdas de ciclos nas observáveis de fase do satélite degrada consideravelmente a qualidade do posicionamento. Calculou-se a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com a presença de perdas de ciclos

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	24,643	$\pm 1,826$
Vertical	40,335	$\pm 2,352$
Tridimensional	47,945	$\pm 2,945$

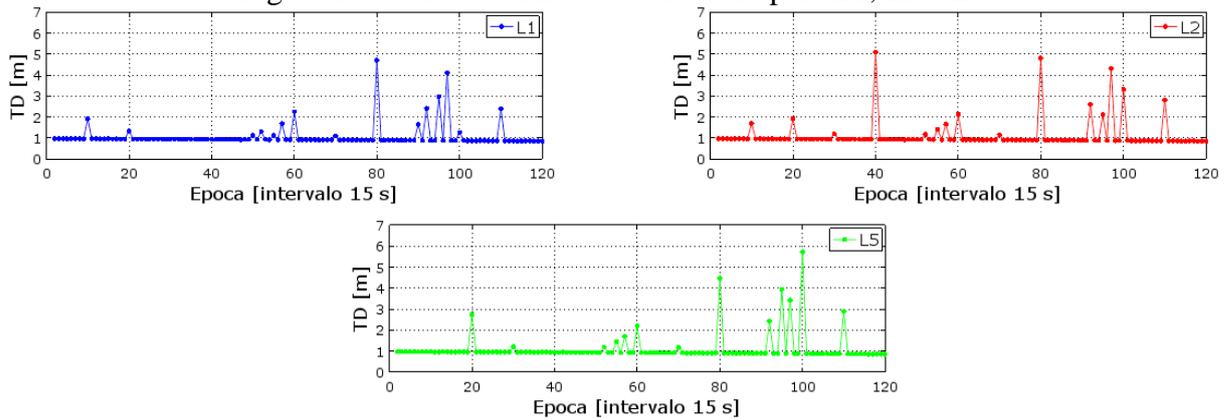
Por meio da Tabela 7, tem-se que a componente mais degrada na ocorrência de perdas de ciclo é a componente vertical, com acurácia média de $40,335 \pm 2,352$ metros. Diante destes resultados, comprova-se a necessidade do desenvolvimento da presente pesquisa.

Os resultados obtidos após a detecção e correção de perdas de ciclos, para uma linha de base curta, pelos métodos implementados são apresentados a seguir.

5.1.1.2 Triplas diferenças clássico

Inicialmente foram calculadas as TD considerando o par de estações PRU4-PRU2. Os valores das séries de TDs para o satélite G26 nas três frequências são apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Séries de TD do satélite G26 para L1, L2 e L5



Como observado na Figura 13, são encontradas descontinuidades evidentes nas séries de TDs para as três frequências, as quais são forte indicativo da ocorrência de perdas de ciclos. Nota-se que os saltos são proporcionais as perdas simuladas (Tabela 5), quanto maior o salto, maior o número de ciclos na perda.

Cabe destacar que na fase de detecção, o método permite identificar somente a ocorrência ou não de perda de ciclos em uma dada época. Um valor aproximado para o número de ciclos da perda pode ser obtido por meio da TT escalonado por 3 (MONICO; SOUZA; MACHADO, 2009).

O resultado da detecção obtido pelo método das triplas diferenças clássico, cujo limiar de detecção é baseado no comprimento da linha de base, é apresentado na Tabela 8, trazendo um comparativo entre as perdas de ciclos simuladas (a esquerda), com aquelas detectadas pelo método empregado (a direita), bem como o valor aproximado das perdas escalonando o valor das TTs por 3.

Tabela 8 - Detecção e valores aproximados das perdas de ciclos para o satélite G26

Época	Número de simuladas (ciclos)			Perdas de ciclos detectadas (ciclos)					
	L1	L2	L5	L1		L2		L5	
				Status	Valor	Status	Valor	Status	Valor
10	5	3	0	✓	2,85	✓	2,20	✓	0
20	2	4	7	✓	1,15	✓	2,93	✓	5,35
30	0	1	1	✓	0	✓	0,74	✓	0,74
40	0	17	0	✓	0	✓	12,4	✓	0
50	1	0	0	✓	0,57	✓	0	✓	0
52	2	1	1	✓	1,13	✓	0,72	✓	0,76
55	1	2	2	✓	0,57	✓	1,46	✓	1,53
57	4	3	3	✓	2,27	✓	2,18	✓	2,30
60	7	5	5	✓	3,99	✓	3,65	✓	3,82
70	1	1	1	✓	0,56	✓	0,73	✓	0,77
80	20	16	14	✓	11,41	✓	11,71	✓	10,70
90	4	0	0	✓	2,28	✓	0	✓	0
92	8	7	6	✓	4,58	✓	5,14	✓	4,59
95	11	5	12	✓	6,27	✓	3,67	✓	9,17
97	17	14	10	✓	9,70	✓	10,25	✓	7,64
100	2	10	19	✓	1,13	✓	7,32	✓	14,51
110	8	8	8	✓	4,57	✓	5,87	✓	6,10

Os símbolos nas colunas *status* (a direita) devem ser entendidos como: “✓” perdas de ciclos corretamente detectadas, “✗” falsas detecções e “∅” perdas de ciclos não detectadas.

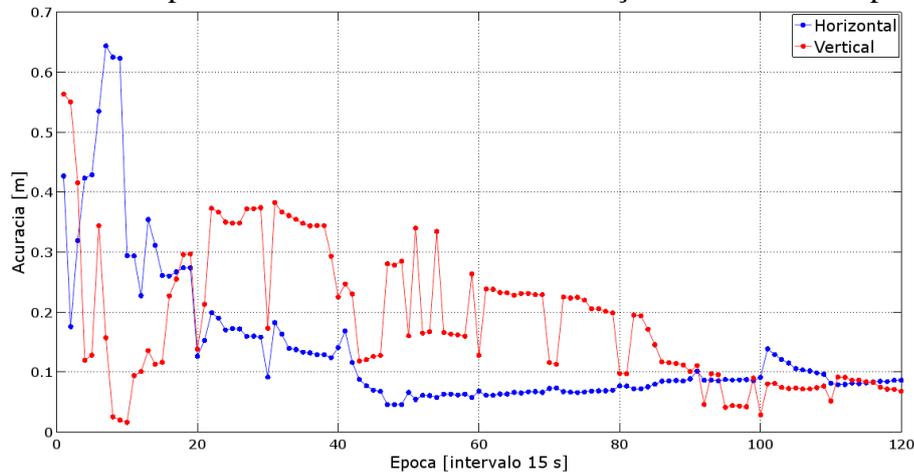
Dos resultados apresentados na Tabela 8, tem-se que a utilização do método das triplas diferenças clássico, considerando uma linha de base curta, apresentou bons resultados, detectando corretamente todas as perdas de ciclo inseridas, tanto aquelas de muitos ciclos, quanto as de 1 ciclo. Deste modo, o método das triplas diferenças clássico apresentou 100% de acerto na detecção das perdas de ciclos em uma linha de base curta.

Ressalta-se também que foram detectadas corretamente as perdas que ocorrem sequencialmente, tanto para aquelas de poucos ciclos, entre as épocas 50 e 60, quanto para aquela de muitos ciclos, entre as épocas 90 e 100. Entretanto, os valores aproximados do número de ciclos obtidos diferem consideravelmente das perdas de ciclo inseridas. Logo, escalonar o valor das TT por 3 não se mostrou uma boa aproximação, principalmente para as perdas de muitos ciclos.

Na realização da correção das perdas de ciclos por este método, o valor aproximado destas foi utilizado para relaxar a MVC dos parâmetros durante o ajustamento. Aplicando este procedimento e realizando o posicionamento relativo, foram estimadas as coordenadas da estação PRU2, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada

época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, a qual é apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção



Da Figura 14, tem-se que o erro no posicionamento diminuiu consideravelmente, quando comparado aos resultados atingidos com uso dos dados com presença de perdas de ciclos (Figura 12 – seção 5.1.1.1). Ainda, após a correção, os resultados atingiram valores próximos aos obtidos com dados originais (Figura 11 – seção 5.1.1.1). No entanto, nota-se que as perdas de ciclos não foram totalmente corrigidas e que efeitos residuais destas ainda persistiram, afetando o posicionamento, principalmente na componente vertical (Figura 14). Calculou-se ainda a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 após correção

Componente	\bar{y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	0,137	$\pm 0,011$
Vertical	0,186	$\pm 0,011$
Tridimensional	0,249	$\pm 0,012$

Ao compararmos os resultados obtidos sem a correção das perdas de ciclos (Tabela 7) com os obtidos após a correção ser aplicada (Tabela 9), foi possível constatar que houve melhoria na estimativa tridimensional das coordenadas da estação PRU2 de 99,91%. Comparando os resultados obtidos para os dados originais (Tabela 6) com os obtidos após a correção ser aplicada (Tabela 9), constatou-se que houve uma piora de 20,87% na estimativa tridimensional, mostrando que o método ainda apresenta certa deficiência.

5.1.1.3 Triplas diferenças proposto

Empregando o método das TD com a modificação proposta, da mesma forma que na seção anterior, inicialmente foram calculadas as TD considerando o par de estações PRU4-PRU2. Os valores das séries de TDs para o satélite G26 nas três frequências são os mesmos apresentados na seção 5.1.1.2 (Figura 13). Para a detecção, fez-se uso da metodologia proposta para melhoria do limiar de aceitação da ocorrência de perdas, dado em função do intervalo de confiança dos valores de média da série de dados de TD. O resultado da detecção com a metodologia proposta é apresentado na Tabela 10, a qual traz um comparativo entre as perdas simuladas (a esquerda) com aquelas detectadas pelo método proposto (a direita), bem como o valor aproximado da perda de ciclo obtido escalonando o valor da TT por 3, assim como na seção 5.1.1.2.

Tabela 10 - Detecção com limiar proposto e valores aproximado das perdas de ciclos para o satélite G26

Época	Número de simuladas (ciclos)			Perdas de ciclos detectadas (ciclos)					
	L1	L2	L5	L1		L2		L5	
				Status	Valor	Status	Valor	Status	Valor
10	5	3	0	✓	2,85	✓	2,20	✓	0
20	2	4	7	✓	1,15	✓	2,93	✓	5,35
30	0	1	1	✓	0	✓	0,74	✓	0,74
40	0	17	0	✓	0,00	✓	12,46	✓	0
47	-	-	-	✗	0,03	-	0	-	0
50	1	0	0	✓	0,57	✓	0	✓	0
52	2	1	1	✓	1,13	✓	0,72	✓	0,76
53	-	-	-	✗	1,14	-	0	-	0
55	1	2	2	✓	0,57	✓	1,46	✓	1,53
56	-	-	-	✗	0,56	-	0	-	0
57	4	3	3	∅	0	✓	2,18	✓	2,30
58	-	-	-	✗	2,28	-	0	-	0
60	7	5	5	✓	3,99	✓	3,65	✓	3,82
70	1	1	1	✓	0,56	✓	0,73	✓	0,77
80	20	16	14	✓	11,4	✓	11,71	✓	10,70
90	4	0	0	✓	2,28	✓	0	✓	0
92	8	7	6	✓	4,58	✓	5,14	✓	4,59
95	11	5	12	✓	6,27	✓	3,67	✓	9,17
97	17	14	10	✓	9,70	✓	10,25	✓	7,64
100	2	10	19	✓	1,13	✓	7,32	✓	14,51
110	8	8	8	✓	4,57	✓	5,87	✓	6,10

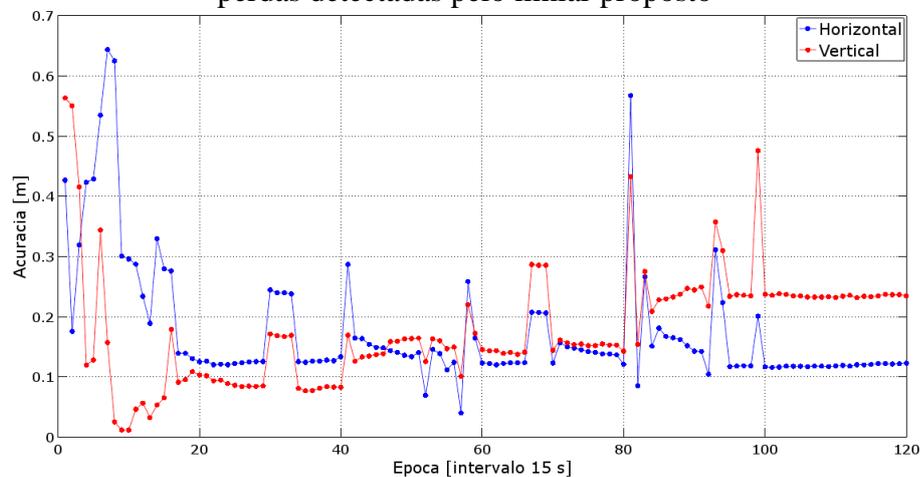
Na Tabela 10, foi possível verificar que as perdas de ciclos inseridas foram detectadas pelo limiar proposto em quase sua totalidade, com exceção da perda de 4 ciclos em L1 na época 57 (“ø”). Tem-se também que foram encontradas 4 falsas detecções (“✖”) em L1 nas épocas 47, 53, 56 e 58, as quais se deram principalmente na ocorrência de perdas de poucos ciclos em épocas subsequentes, entre as épocas 50 e 60.

Destaca-se que a utilização do método proposto, considerando uma linha de base curta, foi capaz de detectar tanto as de muitos ciclos, quanto aquelas de 1 ciclo. Foram detectadas corretamente as perdas de muitos ciclos que ocorrem entre as épocas 90 e 100 consecutivamente, bem como as perdas de poucos ciclos que ocorreram sequencialmente entre as épocas 50 e 60, sendo a única ressalva feita as falsas detecções em L1.

De modo geral, o método das TD proposto apresentou índice de 90,91% de acerto na detecção das perdas de ciclos em uma linha de base curta. Comparando com o método clássico (seção 5.1.1.2) que apresentou índice de 100% na detecção, nota-se que o método proposto apresentou resultados inferiores na detecção. Entretanto, o método proposto pode ser considerado satisfatório, detectando mais de 90% das perdas simuladas.

Assim como no método clássico, observou-se que escalonar o valor das TT não forneceu uma boa aproximação para o número de ciclos da perda detectada. Foi aplicada a correção das perdas de ciclos relaxando a MVC dos parâmetros no ajustamento e realizou-se o posicionamento relativo, estimando as coordenadas da estação PRU2, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, conforme apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto



Da Figura 15, observa-se que o erro no posicionamento foi consideravelmente minimizado após a correção das perdas de ciclos, atingindo valores próximos aos obtidos com dados originais. De forma similar ao ocorrido na seção 5.1.1.2, nota-se que efeitos residuais das perdas de ciclos ainda persistiram, principalmente na ocorrência de perdas de muitos ciclos, tanto na componente horizontal, quanto na vertical. A média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 11 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto

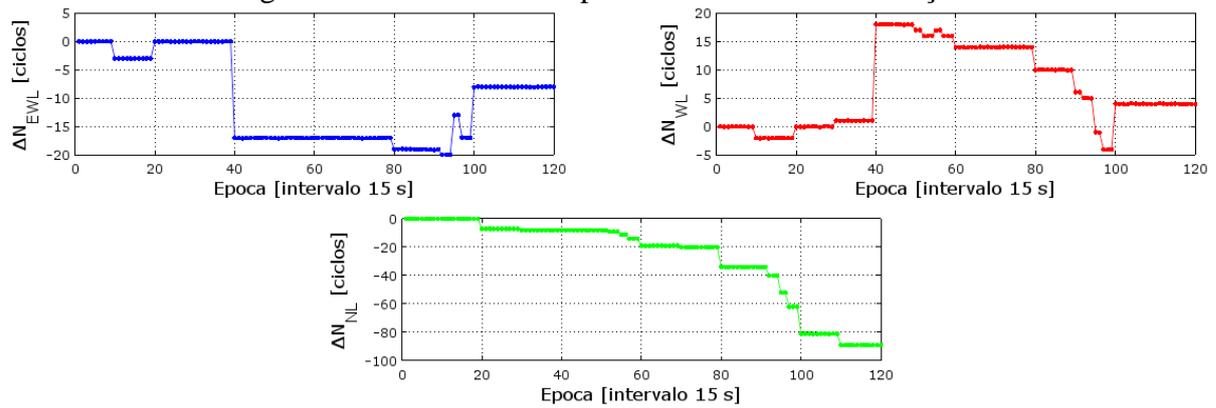
Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	0,175	$\pm 0,009$
Vertical	0,180	$\pm 0,009$
Tridimensional	0,263	$\pm 0,011$

Ao compararmos os resultados obtidos sem correção das perdas de ciclos (Tabela 7) com os obtidos após a correção detectadas pelo limiar proposto ser aplicada (Tabela 11), foi constatado melhoria na estimativa tridimensional das coordenadas da estação PRU2 de 99,88%. Comparando os resultados obtidos com dados originais (Tabela 6) com os obtidos após a correção ser aplicada (Tabela 11), constatou-se que houve uma piora de 27,67% na estimativa tridimensional, sendo esta valor 6,8% pior em relação ao método clássico. Por fim, comparando a acurácia posicional tridimensional média obtida pelo método clássico (Tabela 9) com a obtida pelo método proposto (Tabela 11), tem-se que estes se encontram muito próximos, com diferença de 0,014 metros.

5.1.1.4 Sequência de combinações lineares

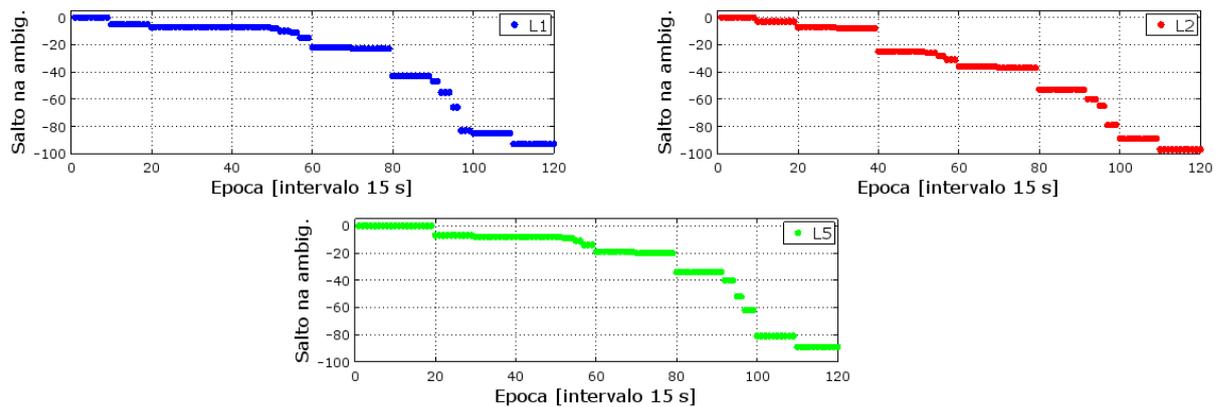
Aplicando o método baseado na sequência de combinações lineares, foram calculadas as séries de diferenças de ambiguidades entre épocas adjacentes da observável *extra-wide-lane* (ΔN_{EWL}), *wide-lane* (ΔN_{WL}) e *narrow-lane* (ΔN_{NL}) para o satélite G26, conforme Figura 16.

Figura 16 - Série de dados para as diferentes combinações



Pela Figura 16 verifica-se a presença de discontinuidades nas séries, o que indica a ocorrência de perdas de ciclos nos dados de entrada. Aplicando a equação (45), foi possível obter os valores das perdas de ciclos nas observáveis originais, sendo o resultado da detecção apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequências de combinações



Analisando os resultados obtidos na Figura 17, são encontrados os saltos provocados pela mudança do valor das ambiguidades, ou seja, as perdas de ciclos. Comparando numericamente os valores dos saltos (a direita) com as perdas de ciclos simuladas na Tabela 5 (a esquerda), tem-se que estes correspondem exatamente a perda inserida, segundo mostrado na Tabela 12.

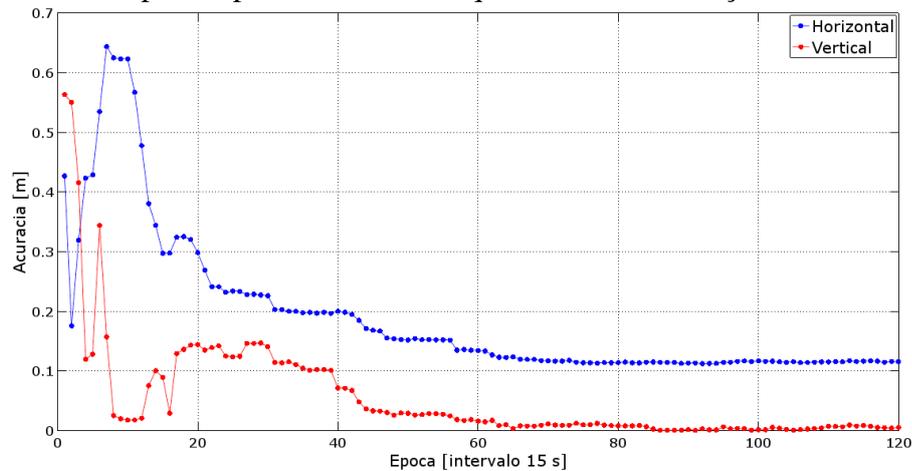
Tabela 12 - Detecção das perdas de ciclos para o satélite G26

Época	Número de simuladas (ciclos)			Perdas de ciclos detectadas (ciclos)					
	L1	L2	L5	L1		L2		L5	
				Status	Valor	Status	Valor	Status	Valor
10	5	3	0	✓	-5	✓	-3	✓	0
20	2	4	7	✓	-2	✓	-4	✓	-7
30	0	1	1	✓	0	✓	-1	✓	-1
40	0	17	0	✓	0	✓	-17	✓	0
50	1	0	0	✓	-1	✓	0	✓	0
52	2	1	1	✓	-2	✓	-1	✓	-1
55	1	2	2	✓	-1	✓	-2	✓	-2
57	4	3	3	✓	-4	✓	-3	✓	-3
60	7	5	5	✓	-7	✓	-5	✓	-5
70	1	1	1	✓	-1	✓	-1	✓	-1
80	20	16	14	✓	-20	✓	-16	✓	-14
90	4	0	0	✓	-4	✓	0	✓	0
92	8	7	6	✓	-8	✓	-7	✓	-6
95	11	5	12	✓	-11	✓	-5	✓	-12
97	17	14	10	✓	-17	✓	-14	✓	-10
100	2	10	19	✓	-2	✓	-10	✓	-19
110	8	8	8	✓	-8	✓	-8	✓	-8

O valor negativo das perdas detectadas refere-se ao número de ciclos que deve ser removido das observáveis originais para que estas sejam corrigidas. Por meio da Tabela 12, observa-se que o método detectou corretamente todas as perdas de ciclos simuladas em suas respectivas portadoras em todos os casos considerados, apresentando 100% de acerto na detecção das perdas de ciclos em uma linha de base curta.

Para a correção das perdas de ciclo detectadas, foi somado o valor das perdas encontradas as observáveis afetadas. Realizou-se o posicionamento relativo, estimando as coordenadas da estação PRU2, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, a qual é ilustrada na Figura 18.

Figura 18 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção das perdas pelo método de sequência de combinações



Da Figura 18 observa-se, assim como nas seções 5.1.1.2 e 5.1.1.3, que o erro no posicionamento diminuiu notavelmente após a correção das perdas de ciclos. Nota-se na Figura 18 que não foram encontrados efeitos residuais das perdas de ciclos, indicando que os dados foram totalmente corrigidos das perdas de ciclos.

Comparando o resultado aqui obtido com aquele fornecido pelos dados originais (Figura 11, seção 5.1.1.1), tem-se que os valores obtidos são exatamente iguais, comprovando que os dados foram totalmente corrigidos das perdas de ciclos. Para reforçar esse fato, foi calculada a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical (Tabela 13).

Tabela 13 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 após correção das perdas de ciclo pelo método de sequência de combinações

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	0,190	$\pm 0,011$
Vertical	0,055	$\pm 0,008$
Tridimensional	0,206	$\pm 0,013$

Ao compararmos os resultados obtidos sem correção das perdas de ciclos (Tabela 7) com os obtidos após a correção pelo método de sequência de combinações (Tabela 13), foi constatado uma melhoria tridimensional de 100% na estimativa das coordenadas da estação PRU2 no que concerne a ocorrência de perdas de ciclos. Portanto, os resultados obtidos no posicionamento após a correção das perdas de ciclos foram exatamente iguais aos resultados obtidos com os dados originais.

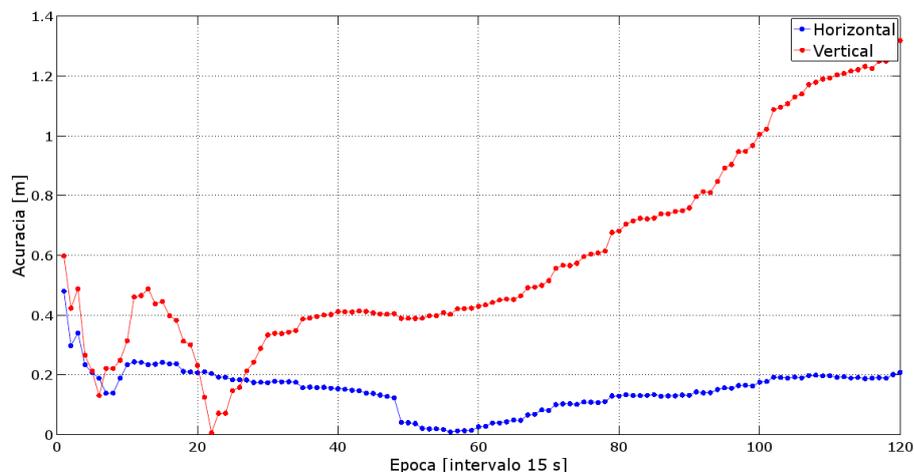
5.1.2 Segundo cenário: linha de base longa

O experimento realizado nesse cenário considerou uma linha de base longa (seção 4.2.2), de aproximadamente 82,6 km, formada pelas estações SPAR e SPTU.

5.1.2.1 Influência das perdas de ciclos no posicionamento

Tomando os dados isentos de perdas de ciclos, após verificação apresentada na seção 4.2.2, foi realizado o posicionamento relativo, tomando a estação SPAR como base. Obteve-se as coordenadas cartesianas da estação SPTU, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, conforme apresentada na Figura 19 em termos de componente horizontal e vertical.

Figura 19 - Acurácia posicional na estimativa das coordenadas da estação SPTU em perdas de ciclos



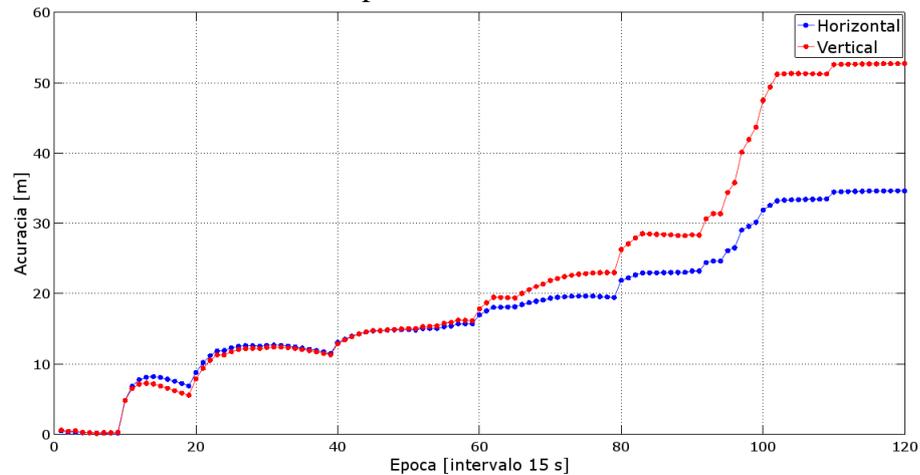
Calculou-se então a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ em cada componente, sendo estes apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU sem perdas de ciclos

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	0,150	$\pm 0,006$
Vertical	0,600	$\pm 0,031$
Tridimensional	0,631	$\pm 0,029$

Deste resultado, tem-se que a acurácia tridimensional na estimativa das coordenadas da estação SPTU foi de $0,631 \pm 0,029$ metros. Para dar sequência ao experimento, foram inseridas as perdas de ciclos nos dados do satélite G26 conforme Tabela 5. Realizando o posicionamento, foram estimadas as coordenadas da estação SPTU, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, a qual é apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas com a presença de perdas de ciclos



Nestas condições, a qualidade do posicionamento foi degradada pela presença de perdas de ciclos nas observáveis. Pela Figura 20, percebe-se que o erro na componente horizontal e vertical se deu de forma similar até a época 60, onde se concentram as perdas de poucos ciclos. Entretanto, a partir desta época, onde foram inseridas as perdas de muitos ciclos, observa-se que a componente vertical passa a ser mais afetada. Calculou-se a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU com a presença de perdas de ciclos

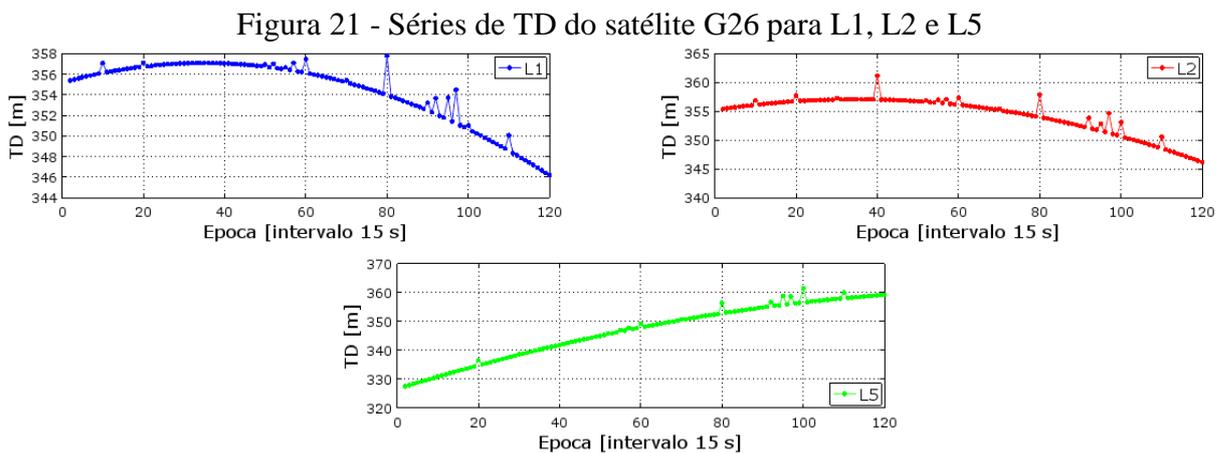
Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	18,370	$\pm 0,890$
Vertical	23,021	$\pm 1,475$
Tridimensional	29,567	$\pm 1,706$

Por meio da Tabela 15, tem-se que a componente mais degradada na ocorrência de perdas de ciclo é a componente vertical, apresentando acurácia média de $23,021 \pm 1,475$ metros. Novamente, comprovou-se a relevância do desenvolvimento da presente pesquisa.

Os resultados obtidos após a detecção e correção de perdas de ciclos, para uma linha de base longa, pelos métodos implementados, são apresentados a seguir.

5.1.2.2 Triplas diferenças clássico

Para utilização do método das triplas diferenças clássico, foram calculadas as séries de TDs para o par de estações SPAR-SPTU, sendo os valores das séries para o satélite G26 nas três frequências ilustrados na Figura 21.



Na Figura 21 foram encontradas descontinuidades nas séries de TDs nas três frequências, as quais são forte indicativo da ocorrência de perdas de ciclos. Diferentemente do ocorrido na seção 5.1.1, tem-se que os saltos nas séries de TDs para uma linha de base longa são mais sutis, o que dificulta a detecção das perdas de ciclos.

O resultado da detecção obtido pelo método das triplas diferenças clássico é apresentado na Tabela 16. Para quantificar os resultados da detecção, a Tabela 16 traz um comparativo entre as perdas de ciclos simuladas (a esquerda), com aquelas detectadas pelo método empregado (a direita), bem como o valor aproximado das perdas.

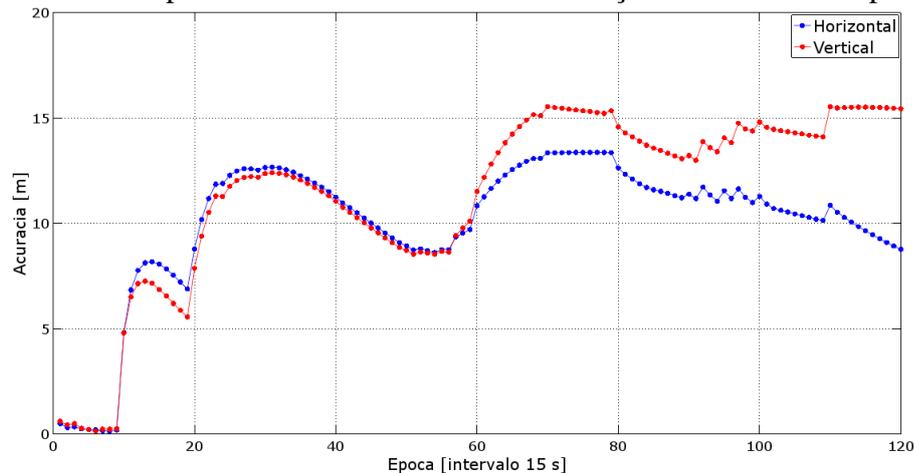
Tabela 16 - Detecção e valores aproximado das perdas de ciclos para o satélite G26

Época	Número de simuladas (ciclos)			Perdas de ciclos detectadas (ciclos)					
	L1	L2	L5	L1		L2		L5	
				Status	Valor	Status	Valor	Status	Valor
10	5	3	0	∅	0	∅	0	✓	0
20	2	4	7	∅	0	∅	0	∅	0
30	0	1	1	✓	0	∅	0	∅	0
40	0	17	0	✓	0	✓	12,40	✓	0
50	1	0	0	∅	0	✓	0	✓	0
52	2	1	1	∅	0	∅	0	∅	0
55	1	2	2	∅	0	∅	0	∅	0
57	4	3	3	∅	0	∅	0	∅	0
60	7	5	5	∅	0	∅	0	∅	0
70	1	1	1	∅	0	∅	0	∅	0
80	20	16	14	✓	11,02	✓	11,33	✓	11,36
90	4	0	0	∅	0	✓	0	✓	0
92	8	7	6	∅	0	∅	0	∅	0
95	11	5	12	∅	0	∅	0	✓	9,72
97	17	14	10	∅	0	✓	9,71	∅	0
100	2	10	19	∅	0	∅	0	✓	15,00
110	8	8	8	∅	0	∅	0	∅	0

Do resultado obtido na Tabela 16, tem-se que o limiar para detecção com base no comprimento da linha de base não se mostrou eficaz em linha de base longa. Ficou evidente que o método das TD clássico deixou de detectar (“∅”) a grande maioria das perdas de ciclos, totalizando 35 perdas não detectadas, sendo detectadas somente as perdas com valor maior ou igual a 12 ciclos, as quais equivalem aos maiores picos das séries de TDs (Figura 21). De modo geral, o método apresentou índice de 31,37% de acerto na detecção de perdas de ciclo em uma linha de base longa, o que representa 16 acertos, não sendo este um resultado satisfatório.

Novamente, o valor aproximado das perdas obtido por meio das TTs se mostrou notavelmente diferente das perdas simuladas. Foi aplicada a correção relaxando a MVC dos parâmetros no ajustamento para as perdas de ciclos detectadas e realizou-se o posicionamento relativo, estimando as coordenadas da estação SPTU e o erro do posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, conforme Figura 22.

Figura 22 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas após correção



Comparando o resultado Figura 22 com o da Figura 20 (seção 5.1.2.1), tem-se que o erro obtido no posicionamento se manteve elevado mesmo após a correção das perdas de ciclos, apresentando uma atenuação a partir da época 80. Entretanto, devido ao baixo índice de acerto na detecção, as perdas de ciclo não corrigidas ainda degradaram fortemente o posicionamento, principalmente no que concerne a componente vertical. Calculou-se ainda a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU após correção

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	10,025	$\pm 0,297$
Vertical	11,427	$\pm 0,381$
Tridimensional	15,257	$\pm 0,469$

Ao se comparar os resultados obtidos sem a correção (Tabela 15) com os obtidos após a correção ser aplicada (Tabela 17), constatou-se que a correção das perdas de ciclos proporcionou uma melhoria na estimativa tridimensional de 49,45%. Contudo, ao considerar o valor da média da REMQ tridimensional, tem-se que este foi da ordem de 15 metros, sendo este um resultado ruim ao posicionamento relativo. Comparando os resultados obtidos com dados originais (Tabela 14) com os obtidos após a correção ser aplicada (Tabela 17), constatou-se que houve uma piora de 24 vezes na estimativa tridimensional.

Deste modo, ficou evidente que o método das TD clássico não apresentou resultados satisfatórios em linha de base longa, justificando a necessidade do estabelecimento de um novo critério para aceitação da ocorrência de perdas de ciclos.

5.1.2.3 Triplas diferenças proposto

Para empregar o método das TD proposto, novamente fez-se uso das séries de TDs para o satélite G26, considerando o par de estações SPAR-SPTU, sendo estas as mesmas apresentadas na Figura 21 (seção 5.1.2.2). Aplicou-se então o limiar proposto para detecção em função da estatística das séries de dados de TD, sendo o resultado obtido apresentado na Tabela 18. Assim como na seção 5.1.2.2, a Tabela 18 traz um resumo comparativo entre as perdas de ciclos simuladas (a esquerda) com aquelas detectadas pelo método proposto (a direita), bem como o valor aproximado da perda obtido em função das TTs, o qual é utilizado para relaxar a MVC dos parâmetros na etapa da correção.

Tabela 18 - Detecção com limiar proposto e valores aproximado das perdas de ciclos para o satélite G26

Época	Número de simuladas (ciclos)			Perdas de ciclos detectadas (ciclos)					
	L1	L2	L5	L1		L2		L5	
				Status	Valor	Status	Valor	Status	Valor
10	5	3	0	✓	3,09	✓	2,45	✓	0
20	2	4	7	✓	1,28	✓	3,08	✓	6,50
30	0	1	1	✓	0	✓	0,80	∅	0
40	0	17	0	✓	0	✓	12,40	✓	0
50	1	0	0	✓	0,43	✓	0	✓	0
52	2	1	1	∅	0	✓	0,58	∅	0
53	-	-	-	✗	1,30	-	0	-	0
55	1	2	2	∅	0	✓	1,28	∅	0
57	4	3	3	✓	2,10	∅	0	∅	0
58	-	-	-	-	0	✗	2,41	-	0
60	7	5	5	✓	3,74	∅	0	✓	4,67
61	-	-	-	-	0	✗	-3,88	-	0
70	1	1	1	∅	0	∅	0	∅	0
71	-	-	-	✗	0,94	✗	1,10	-	0
80	20	16	14	✓	11,02	✓	11,33	✓	11,36
90	4	0	0	✓	1,80	✓	0	✓	0
92	8	7	6	∅	0	✓	4,62	✓	5,16
93	-	-	-	✗	5,11	-	0	-	0
95	11	5	12	✓	5,77	✓	3,14	✓	9,72
97	17	14	10	✓	9,16	✓	9,71	✓	8,17
100	2	10	19	∅	0	∅	0	✓	15,00
101	-	-	-	✗	1,72	-	0	-	0
110	8	8	8	✓	3,89	✓	5,19	✓	6,51

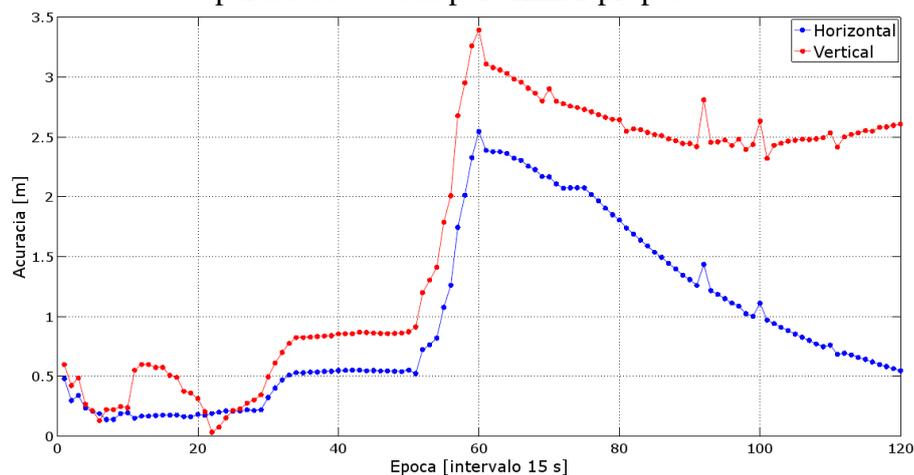
De início, nota-se no resultado da detecção pelo método proposto (Tabela 18) que um maior número de descontinuidades nas séries de TDs foram classificadas como ocorrência de

perdas de ciclos. Destaca-se ainda que o método proposto foi capaz de detectar corretamente as perdas de muitos ciclos em sua grande maioria, bem como algumas das perdas de poucos ciclos (1 e 2 ciclos) considerando uma linha de base longa. Constata-se também que parte das perdas de ciclos não foram detectadas (“ø”), totalizando 14 perda de ciclos não detectadas, as quais se deram na ocorrência de perdas de poucos ciclos, principalmente em perdas consecutivas entre as épocas 50 e 60. Ademais, foram encontradas 7 falsas detecções, as quais se deram na ocorrência de perdas em épocas subsequentes.

De modo geral, o método das TD proposto apresentou índice de 63,79% de acerto na detecção das perdas de ciclos em uma linha de base longa. Comparando com o método clássico (seção 5.1.2.2) que apresentou índice de 31,37% na detecção, nota-se que o método proposto apresentou uma melhoria de 2 vezes no que se refere a detecção.

Assim como no método clássico, observou-se que escalonar o valor das TT não forneceu uma boa aproximação para número de ciclos da perda detectada. Posteriormente foi aplicada a correção das perdas de ciclos relaxando a MVC dos parâmetros no ajustamento. Realizou-se o posicionamento relativo, estimando as coordenadas da estação SPTU e erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, a qual é apresentada na Figura 23.

Figura 23 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto



Da Figura 23, observa-se que o erro no posicionamento diminuiu consideravelmente após a correção das perdas de ciclos, quando comparado aos resultados apresentados na Figura 20 (seção 5.1.2.1). As perdas de ciclos não detectadas degradaram o resultado do posicionamento, principalmente no que concerne a componente vertical, entretanto, uma vez

que houve uma melhoria na detecção pelo método proposto, fica evidente que foram obtidos melhores resultados no posicionamento do que aqueles obtidos pelo método clássico (Figura 22). Calculou-se ainda a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	0,955	$\pm 0,065$
Vertical	1,713	$\pm 0,096$
Tridimensional	1,984	$\pm 0,113$

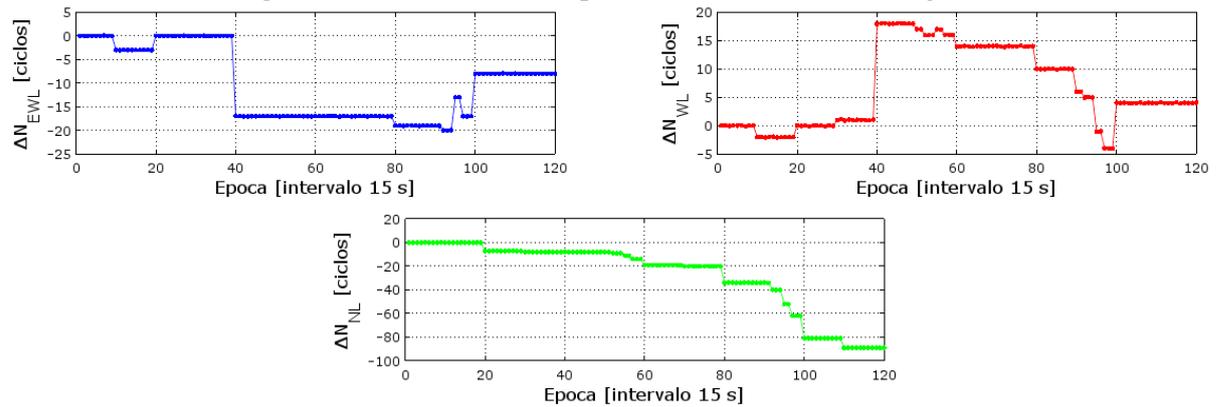
Ao se comparar os resultados obtidos sem correção das perdas de ciclos (Tabela 15) com os obtidos após a correção das perdas de ciclos detectadas pelo limiar proposto ser aplicada (Tabela 19), foi constatada uma melhoria na estimativa tridimensional das coordenadas da estação SPTU de 95,32%. Comparando os resultados obtidos para os dados originais (Tabela 14) com os obtidos após a correção ser aplicada (Tabela 19), constatou-se que houve uma piora de 3 vezes na estimativa tridimensional.

Considerando o valor da média da REMQ tridimensional após utilização do método proposto, tem-se que este foi da ordem de 2,0 metros, sendo este um resultado não esperado ao posicionamento relativo. Contudo, levando em conta que a média da REMQ tridimensional obtido com utilização do método clássico foi da ordem de 15 metros, ficou evidente que o estabelecimento de um novo critério para aceitação da ocorrência de perdas de ciclos trouxe grande avanço para utilização do método das triplas diferenças em linhas de base longa.

5.1.2.4 Sequência de combinações lineares

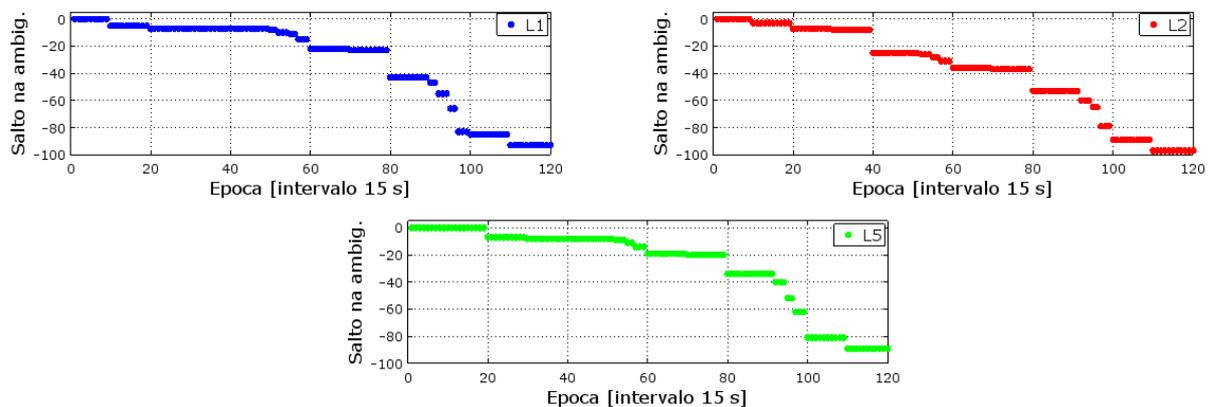
Aplicando o método baseado na sequência de combinações, foram calculadas as séries de diferenças de ambiguidades entre épocas adjacentes da observável *extra-wide-lane* (ΔN_{EWL}), *wide-lane* (ΔN_{WL}) e *narrow-lane* (ΔN_{NL}) para o satélite G26 na estação SPTU, conforme mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Série de dados para as diferentes combinações



Da Figura 24 verifica-se a presença de discontinuidades nas séries, o que indica a ocorrência de perdas de ciclos nos dados de entrada. Aplicando a equação (45), foi possível obter os valores das perdas de ciclos nas observáveis originais, sendo o resultado da detecção apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequencias de combinações



Analisando os resultados obtidos na Figura 25, foram encontrados os saltos provocados pela ocorrência de perdas de ciclos, confirmando as suposições feitas sobre a Figura 24. Comparando numericamente os valores dos saltos (a direita) com as perdas de ciclos simuladas na Tabela 5 (a esquerda), tem-se que estes correspondem exatamente a perda inserida, segundo mostrado na Tabela 20.

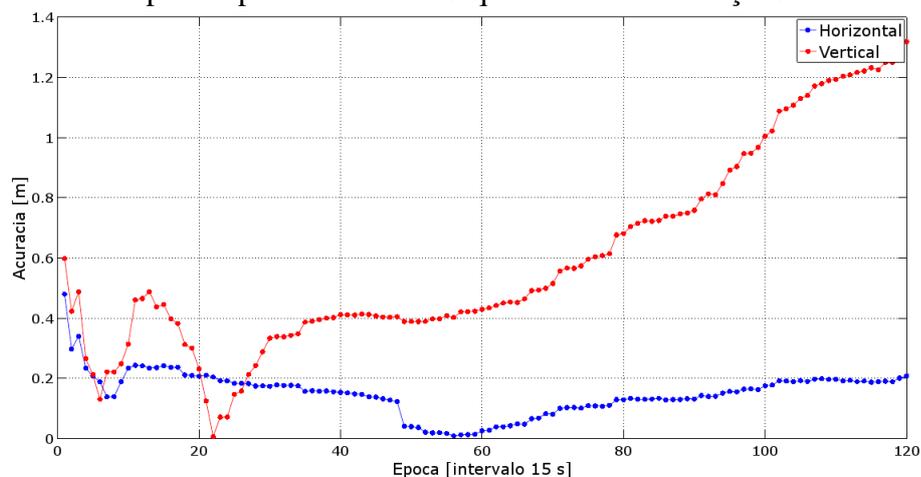
Tabela 20 - Detecção das perdas de ciclos para o satélite G26

Época	Número de simuladas (ciclos)			Perdas de ciclos detectadas (ciclos)					
	L1	L2	L5	L1		L2		L5	
				Status	Valor	Status	Valor	Status	Valor
10	5	3	0	✓	-5	✓	-3	✓	0
20	2	4	7	✓	-2	✓	-4	✓	-7
30	0	1	1	✓	0	✓	-1	✓	-1
40	0	17	0	✓	0	✓	-17	✓	0
50	1	0	0	✓	-1	✓	0	✓	0
52	2	1	1	✓	-2	✓	-1	✓	-1
55	1	2	2	✓	-1	✓	-2	✓	-2
57	4	3	3	✓	-4	✓	-3	✓	-3
60	7	5	5	✓	-7	✓	-5	✓	-5
70	1	1	1	✓	-1	✓	-1	✓	-1
80	20	16	14	✓	-20	✓	-16	✓	-14
90	4	0	0	✓	-4	✓	0	✓	0
92	8	7	6	✓	-8	✓	-7	✓	-6
95	11	5	12	✓	-11	✓	-5	✓	-12
97	17	14	10	✓	-17	✓	-14	✓	-10
100	2	10	19	✓	-2	✓	-10	✓	-19
110	8	8	8	✓	-8	✓	-8	✓	-8

Por meio da Tabela 20, observa-se que o método detectou corretamente todas as perdas de ciclos simuladas em suas respectivas portadoras em todos os casos considerados, apresentando índice de 100% de acerto na detecção das perdas de ciclos em uma linha de base longa. Da mesma forma que na seção 5.1.1.4, o valor negativo das perdas detectadas refere-se ao número de ciclos que deve ser removido das observáveis originais para que estas sejam corrigidas.

Para a correção das perdas de ciclo detectadas, foi somado o valor das perdas de ciclos encontradas as observáveis afetadas e na sequência realizou-se o posicionamento relativo, estimando as coordenadas da estação SPTU e erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, a qual é apresentada na Figura 26.

Figura 26 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas após correção das perdas pelo método de sequência de combinações



Da Figura 26 observa-se, diferentemente do ocorrido com a utilização do método das TD (seções 5.1.2.2 e 5.1.2.3), que o erro no posicionamento diminuiu notavelmente após a correção das perdas de ciclos. Nota-se também na Figura 26 que não foram encontrados efeitos residuais das perdas de ciclos, indicando que os dados foram totalmente corrigidos.

Comparando o resultado aqui obtido com aquele fornecido pelos dados originais (Figura 19, seção 5.1.2.1), tem-se que os valores obtidos são iguais, comprovando que os dados foram totalmente corrigidos das perdas de ciclos. O mesmo pode ser dito comparando o valor da média da REMQ nos componentes horizontal e vertical (Tabela 21), sendo este idêntico aos os resultados obtidos sem correção das perdas de ciclos (Tabela 14).

Tabela 21 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU após correção das perdas de ciclo pelo método de sequência de combinações

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	0,150	$\pm 0,006$
Vertical	0,600	$\pm 0,031$
Tridimensional	0,631	$\pm 0,029$

Portanto, foi constatada melhoria tridimensional de 100% na estimativa das coordenadas da estação SPTU no que concerne a ocorrência de perdas de ciclos, sendo os resultados obtidos no posicionamento após a correção das perdas de ciclos exatamente iguais aos resultados obtidos com os dados originais.

5.2 Segundo experimento: dados reais

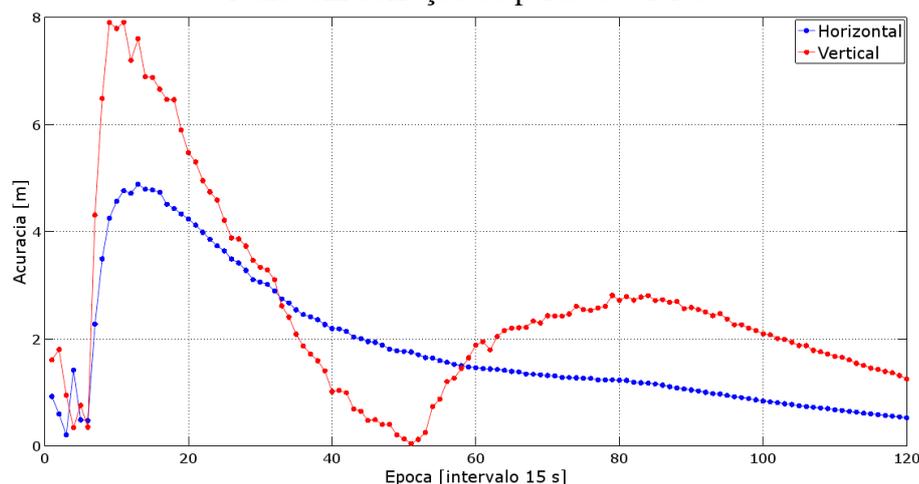
Nesta seção serão apresentados os resultados considerando o experimento realizado com dados reais em período de alta atividade ionosférica, incluindo a ocorrência de cintilação ionosférica (seção 4.3), em dois cenários: linha de base curta e linha de base longa.

5.2.1 Primeiro cenário: linha de base curta

Tomando os dados das estações PRU1 e PRU2, os quais formam uma linha de base de 275,2 metros, inicialmente foi realizado o posicionamento relativo sem realizar nenhum tipo de correção em relação a perdas de ciclos, adotando a estação PRU1 como base. Como dito anteriormente, considerar uma linha de base curta é interessante devido ao fato de os erros atmosféricos serem minimizados nestas condições.

Foram estimadas as coordenadas cartesianas da estação PRU2, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, ilustrada em termos de componente horizontal e vertical pela Figura 27.

Figura 27 - Acurácia posicional na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com dados reais sem correção de perda de ciclos



Como pode ser observado na Figura 27, o posicionamento foi degradado sob condições de alta atividade ionosférica (Figura 9), principalmente devido a ocorrência de cintilação ionosférica (Figura 10). Calculou-se então a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ em cada componente, sendo estes mostrados na Tabela 22.

Tabela 22 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com dados reais sem correção de perda de ciclos

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	1,836	$\pm 0,114$
Vertical	2,560	$\pm 0,167$
Tridimensional	3,253	$\pm 0,188$

Deste resultado, tem-se que a componente mais afetada foi a componente vertical, sendo o valor da média do REMQ tridimensional de $3,253 \pm 0,188$ metros. Na sequência, foram aplicados os métodos de detecção e correção de perdas de ciclos implementados e realizado o posicionamento novamente, permitindo avaliar os resultados após correção para uma linha de base curta em condições de alta atividade ionosférica.

5.2.1.1 Triplas diferenças clássico

Inicialmente, para utilização do método das TD clássico, foram calculadas as séries de TDs para o par de estações PRU1-PRU2. Os valores obtidos para as séries de TD em L1 e L2 são apresentados nas Figura 28 e Figura 29, respectivamente. Nota-se que no caso considerado não foram formadas séries de TDs em L5, visto que, na época o número de satélites transmitindo dados de tripla frequência era reduzido e só se dispunha de 1 satélite com L5 no conjunto de dados empregados.

Figura 28 - Série de dados de tripla diferença para L1

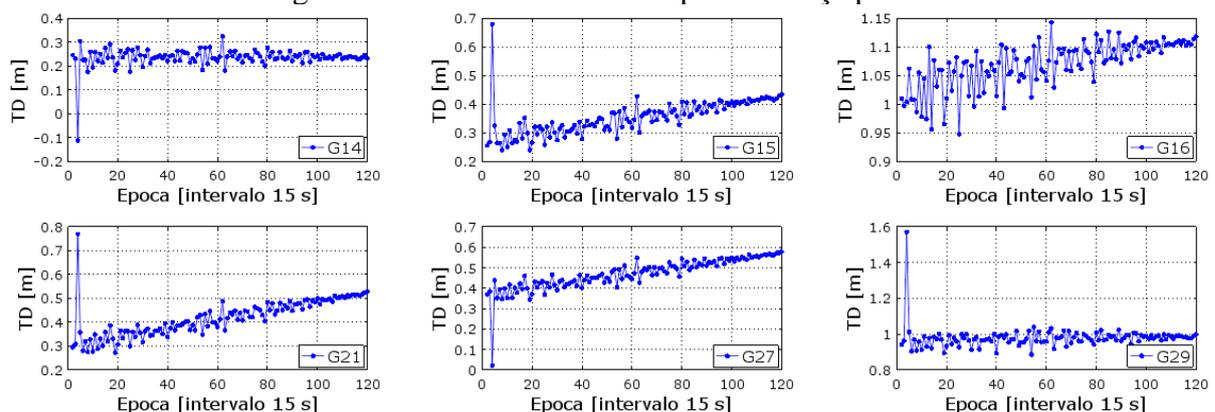
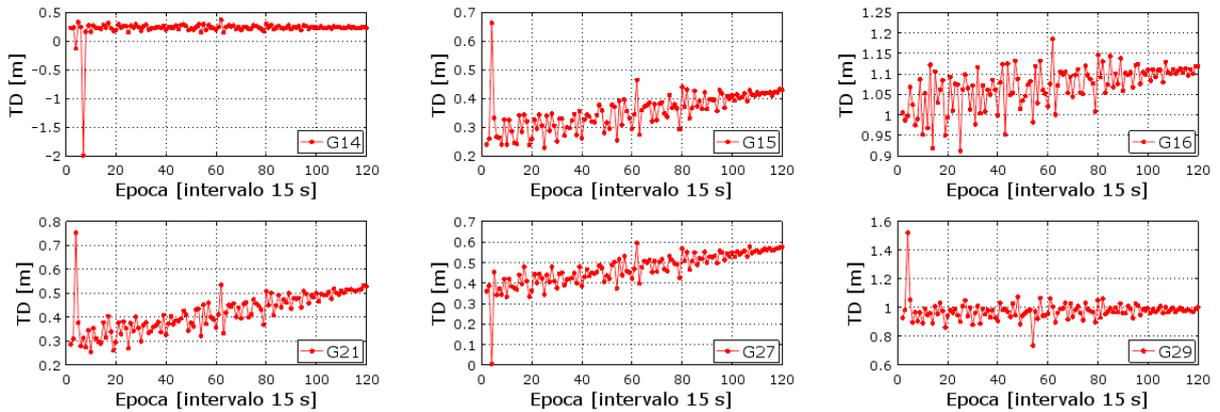


Figura 29 - Série de dados de tripla diferença para L2



De modo geral, são encontradas descontinuidades nas séries de TDs, as quais são forte indicativo da ocorrência de perdas de ciclos. Foi aplicado então o limiar de detecção em função do comprimento da linha de base, sendo o resultado obtido apresentado graficamente na Figura 30 e Figura 31.

Figura 30 - Detecção de perdas de ciclos em L1 pelo método clássico

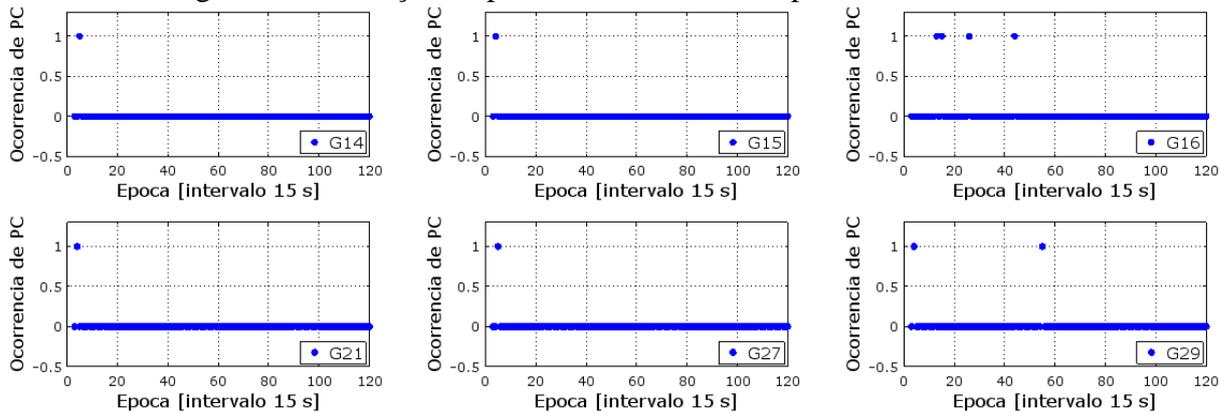
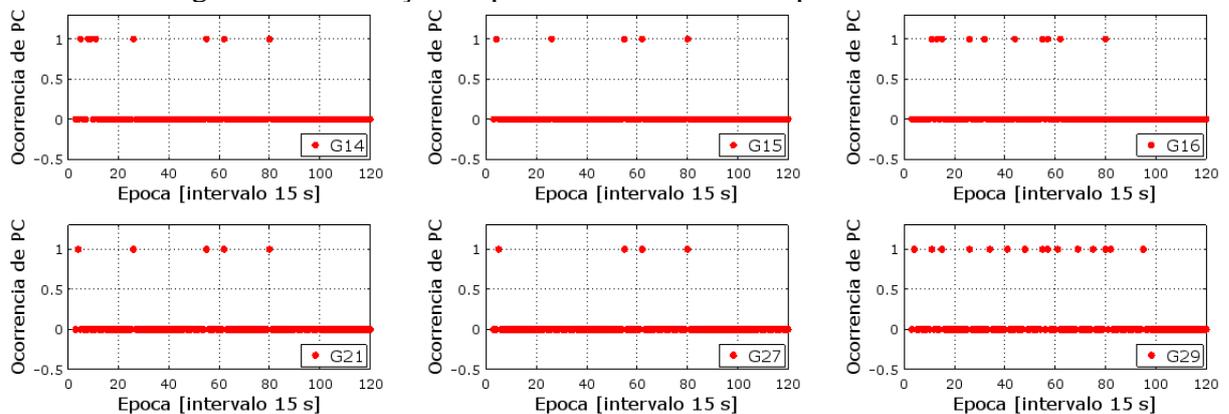


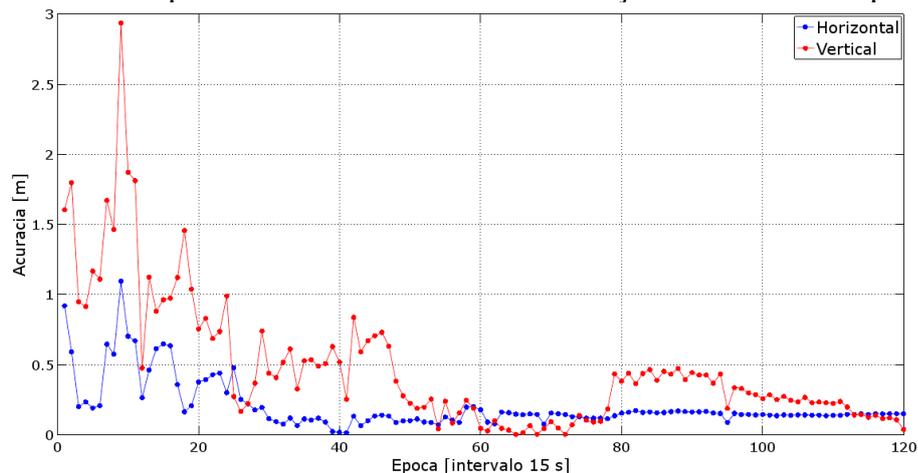
Figura 31 - Detecção de perdas de ciclos em L2 pelo método clássico



Nestas condições, com emprego de dados reais, não é possível avaliar a porcentagem de acertos na detecção, uma vez que não se tem informação *a priori* da ocorrência de perdas de ciclos. De modo geral, pela Figura 30, tem-se que foram detectadas 10 perdas de ciclos em L1, sendo o satélite G16 o que apresentou o maior número de ocorrência de perdas. Em relação a L2, pela Figura 31, foram detectadas 47 perdas de ciclos, sendo no satélite G29 encontrado o maior número de detecções. Assim, foram totalizadas 57 perdas de ciclos detectadas para o método das triplas diferenças clássico.

Foi realizada na sequência a correção das perdas de ciclos detectadas relaxando a MVC dos parâmetros no ajustamento. Realizou-se o posicionamento relativo com observações somente de dupla frequência, estimando as coordenadas da estação PRU2, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pelo REMQ, a qual é apresentada na Figura 32.

Figura 32 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção



Comparando o resultado da Figura 32 após a correção, com aquele obtido na Figura 27 sem correção, nota-se que o erro no posicionamento foi reduzido consideravelmente após a correção das perdas de ciclos, entretanto este ainda se mostrou elevado nas primeiras épocas processadas. Calculou-se ainda a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical, conforme Tabela 24.

Tabela 23 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com dados reais após correção de perda de ciclos pelo método clássico

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	0,203	$\pm 0,016$
Vertical	0,472	$\pm 0,043$
Tridimensional	0,530	$\pm 0,044$

Comparando os resultados obtidos na Tabela 23 após a correção, com aqueles obtidos inicialmente sem correção (Tabela 22), nota-se uma melhoria de 88,94% na estimativa planimétrica das coordenadas de PRU2, enquanto observou-se melhoria de 81,56% na estimativa altimétrica. Deste modo, constatou-se melhoria na média da REMQ tridimensional de 83,71% quando empregado o método das TD clássico.

5.2.1.2 Triplas diferenças proposto

Para empregar método das TD proposto, novamente fez-se uso das séries de TDs para o par de estações PRU1-PRU2, sendo estas as mesmas apresentadas na Figura 28 para L1 e Figura 29 para L2 (seção 5.2.1.1). Foi aplicado então o limiar de detecção proposto em função da estatística das séries de dados de TD, sendo o resultado obtido apresentado graficamente nas Figura 33 e Figura 34.

Figura 33 - Detecção com limiar proposto em L1

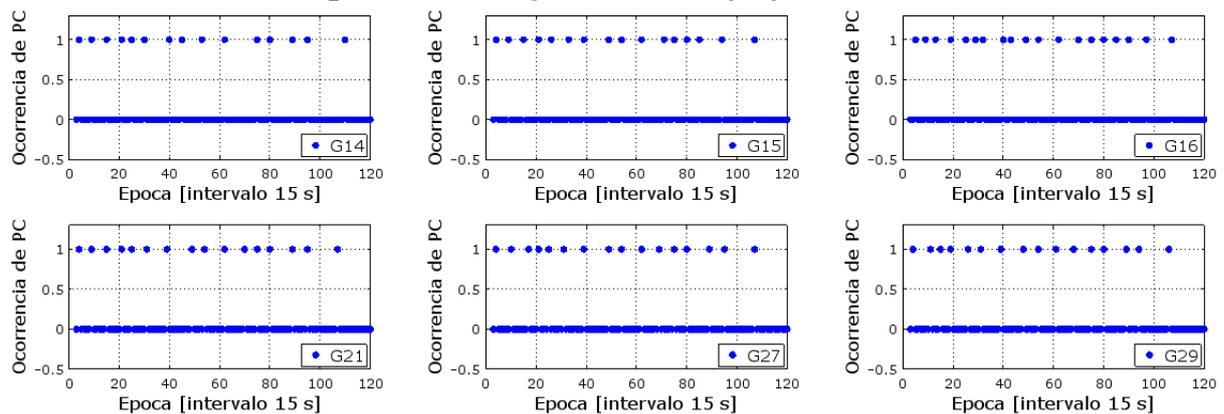
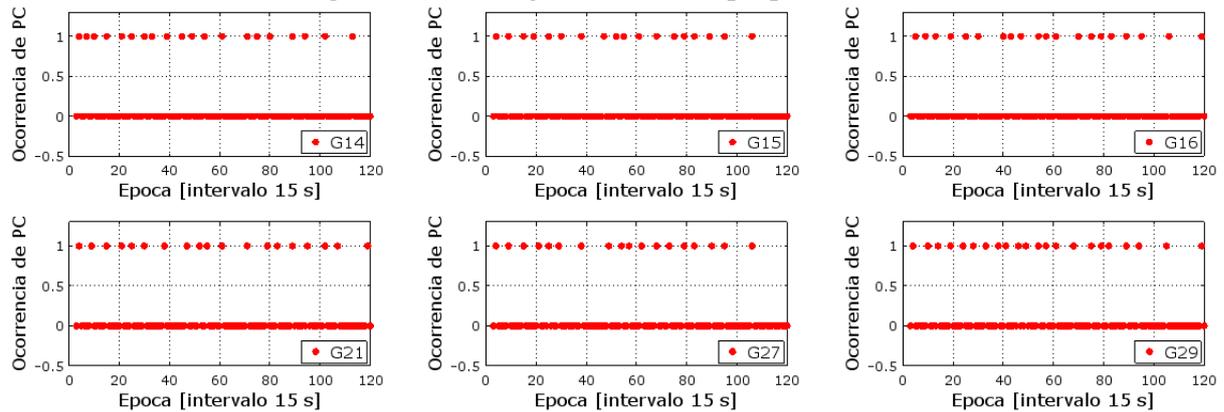


Figura 34 - Detecção com limiar proposto em L2

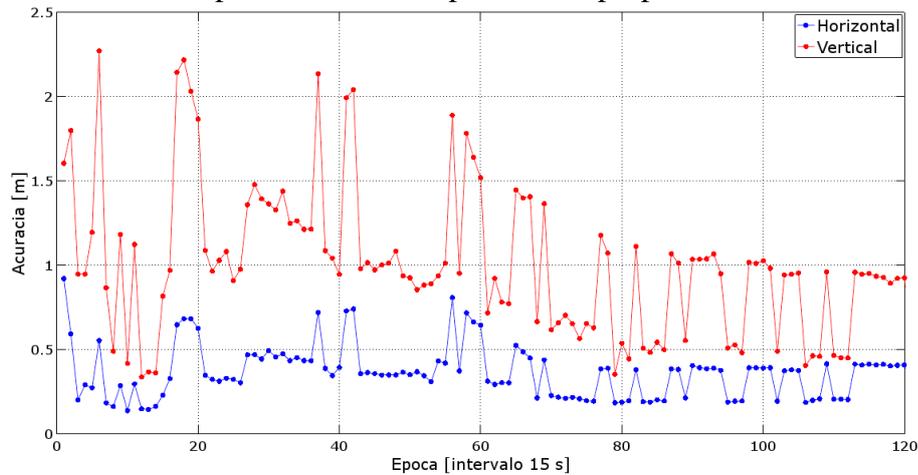


Pela Figura 33, tem-se que foram detectadas 100 perdas em L1, sendo o satélite G16 o que apresenta maior número de perdas de ciclos. Em relação a L2, pela Figura 34, foram detectadas 117 perdas de ciclos, sendo no satélite G29 encontrado o maior número de detecções. Assim, foram totalizadas 217 perdas de ciclos detectadas para o método proposto.

Tendo em vista os resultados obtidos na detecção de perdas de ciclos pelo método das TD clássico (seção 5.2.1.1), o qual se se mostrou melhor para linha de base curta com dados simulados, é possível pressupor que o número elevado de perdas de ciclos detectados pelo método proposto esteja associado a ruídos nas observáveis devido a ocorrência de cintilação ionosférica (Figura 10), uma vez que o cálculo da média se mostrou sensível a dados com alta variabilidade.

Foi realizada na sequência a correção das perdas de ciclos detectadas relaxando a MVC dos parâmetros no ajustamento. Realizou-se o posicionamento relativo com observações de dupla frequência, estimando as coordenadas da estação PRU2, bem como o erro no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo a determinação da acurácia posicional pela REMQ (Figura 35).

Figura 35 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto



Comparando o resultado da Figura 35 após a correção, com aquele obtido na Figura 27 sem correção, nota-se que houve uma melhoria na acurácia posicional, porém esta não foi tão relevante quando comparado aos resultados obtidos pelo método clássico (Figura 32 – seção 5.2.1.1). Observa-se na Figura 35 que relaxar a MVC excessivamente devido as falsas detecções provocou a correção inadequada das perdas de ciclos. Na sequência calculou-se a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical, conforme Tabela 24.

Tabela 24 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com dados reais após correção de perda de ciclos pelo método proposto

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	0,364	$\pm 0,014$
Vertical	1,005	$\pm 0,040$
Tridimensional	1,071	$\pm 0,042$

Comparando os resultados obtidos na Tabela 24 após a correção, com aqueles obtidos inicialmente sem correção (Tabela 22), nota-se uma melhoria de 67,08% na acurácia posicional média tridimensional. Agora, comparando a acurácia posicional tridimensional média obtida pelo método clássico (Tabela 23) com a obtida pelo método proposto (Tabela 24), tem-se que o método clássico se mostrou 50,51% mais eficiente que o método proposto quando utilizado em uma linha de base curta.

5.2.1.3 Sequência de combinações lineares

Aplicando o método baseado na sequência de combinações, foram calculadas as séries de diferenças de ambiguidades entre épocas adjacentes da observável *extra-wide-lane* (ΔN_{EWL}), *wide-lane* (ΔN_{WL}) e *narrow-lane* (ΔN_{NL}) para o satélite G27, único satélite de tripla frequência disponível, para as estações PRU1 e PRU2, sendo estas ilustradas na Figura 36 e Figura 37, respectivamente. Cabe destacar que, devido à alta atividade ionosférica, foi utilizada a *narrow-lane* (ΔN_{NL}) alternativa (GU; ZHU, 2017), cujos coeficientes são dados por (4,-5,0).

Figura 36 - Série de dados para as diferentes combinações para estação PRU1

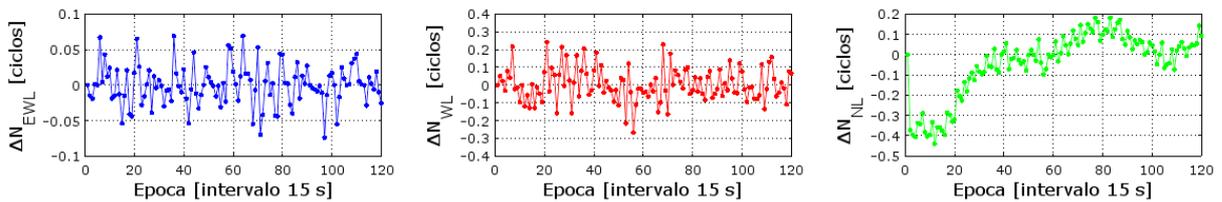
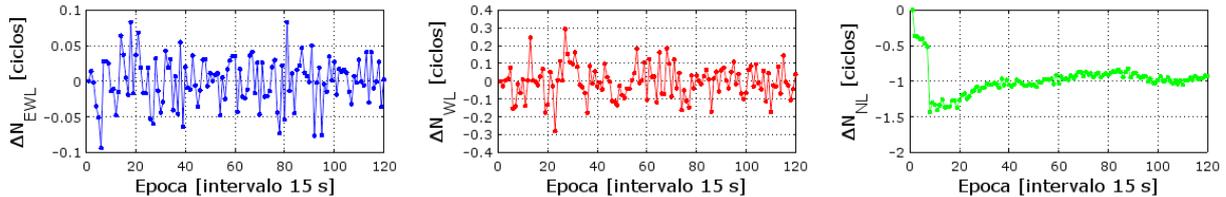


Figura 37 - Série de dados para as diferentes combinações para estação PRU2



Da Figura 36 e Figura 37 verifica-se a presença de descontinuidade somente na série de ΔN_{NL} para os dados da estação PRU2, o que indica a ocorrência de perdas de ciclos. Aplicando a equação (46) foi possível obter os valores das perdas de ciclos nas observáveis originais, sendo o resultado da detecção apresentado na Figura 38 e Figura 39 para as estações PRU1 e PRU2, respectivamente.

Figura 38 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequencias de combinações na estação PRU1

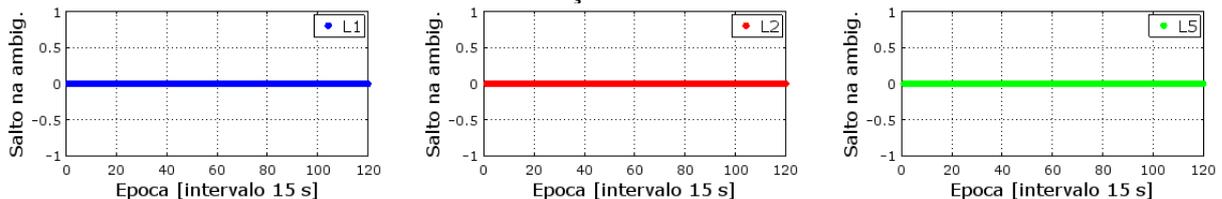
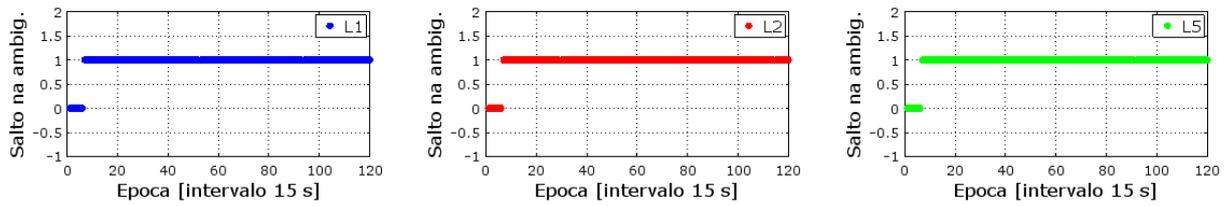
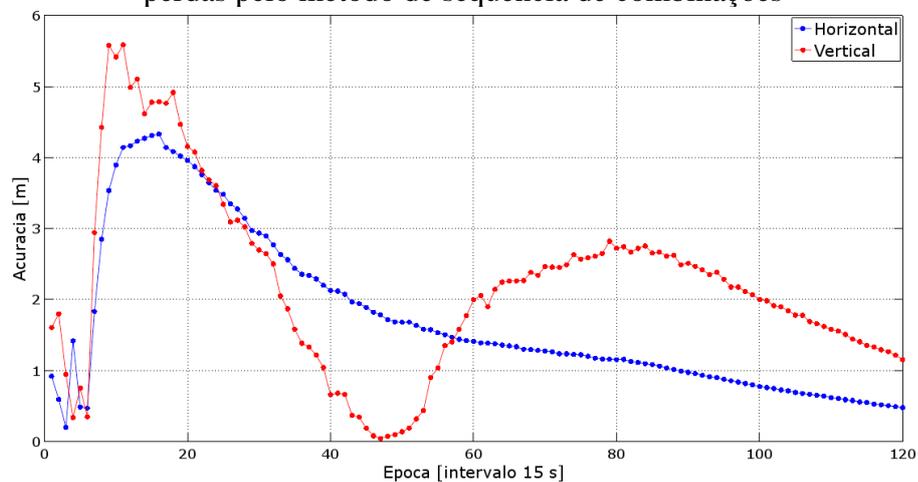


Figura 39 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequencias de combinações na estação PRU2



Do resultado apresentado na Figura 38, tem-se que o método não detectou a ocorrência de perdas de ciclos para o satélite G27 na estação PRU1. Do resultado mostrado na Figura 39, foi encontrada uma perda de um ciclo nos dados do satélite G27 na estação PRU2 para as três frequências (L1, L2 e L5) na época 7. Para a correção das perdas de ciclo detectadas, foi somado o valor das diferenças de ambiguidades encontradas as observáveis afetadas. Realizou-se o posicionamento relativo com observações de dupla frequência, tendo e vista a disponibilidade de um único satélite com L5, estimando as coordenadas da estação PRU2 bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, a qual é apresentada na Figura 40.

Figura 40 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação PRU2 obtidas após correção das perdas pelo método de sequência de combinações



Comparando o resultado obtido na Figura 40 após correção das perdas de ciclos com aquele obtido na Figura 27 sem correção, observa-se que houve uma pequena melhoria na acurácia posicional. Essa melhoria pouco expressiva se deu devido a apenas dados de um único satélite terem sido corrigidos, uma vez que o método empregado só pode ser utilizado para satélites que transmitem dados de tripla frequência. Na sequência calculou-se a média e

respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical, conforme Tabela 25.

Tabela 25 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação PRU2 com dados reais após correção de perda de ciclos pelo método de sequência de combinações

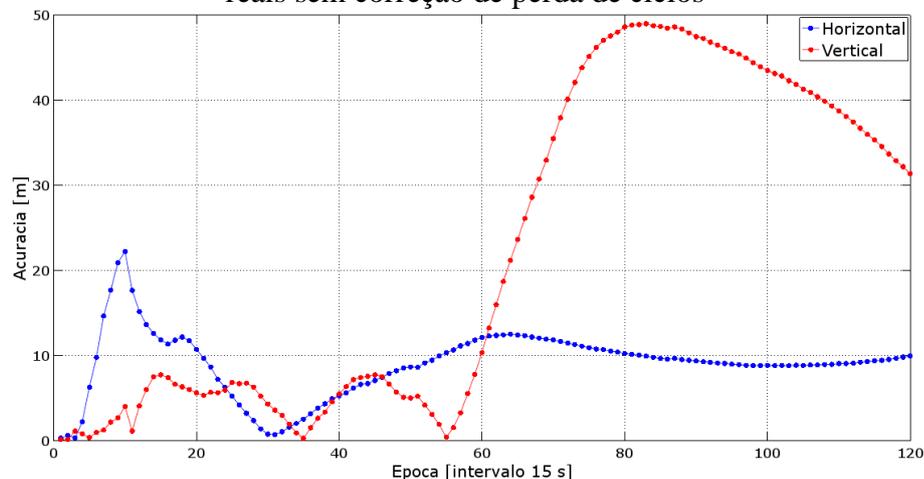
Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	1,717	$\pm 0,103$
Vertical	2,190	$\pm 0,117$
Tridimensional	2,902	$\pm 0,136$

Comparando os resultados obtidos na Tabela 25 após a correção, com aqueles obtidos inicialmente sem correção (Tabela 22), nota-se uma melhoria de 10,79% na acurácia posicional média tridimensional, a qual é resultado da correção das perdas de ciclo somente nos dados de um único satélite, o G27.

5.2.2 Linha de base longa

Tomando os dados das estações SPDR e SPTU, as quais formam uma linha de base de 121,5 km, foi realizado o posicionamento relativo sem correção de perdas de ciclos, tomando a estação SPDR como base. Foram estimadas então as coordenadas cartesianas da estação SPTU, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ, apresentada em termos de componente horizontal e vertical na Figura 41.

Figura 41 - Acurácia posicional na estimativa das coordenadas da estação SPTU com dados reais sem correção de perda de ciclos



De forma similar ao ocorrido na seção 5.2.1, nota-se que o posicionamento foi degradado sob condições de alta atividade ionosférica, principalmente na ocorrência de cintilação ionosférica, conforme Figura 41. Foram calculados na sequência a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componentes horizontal e vertical, sendo estes mostrados na Tabela 26.

Tabela 26 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU com dados reais sem correção de perda de ciclos

Componente	\bar{y}_{REMQ} (m)	s_{REMQ} (m)
Horizontal	9,021	$\pm 0,348$
Vertical	22,232	$\pm 1,713$
Tridimensional	25,501	$\pm 1,560$

Deste resultado, tem-se que a componente mais afetada foi a componente vertical, assim como ocorrido na linha de base curta. Tem-se ainda que o valor da média do REMQ tridimensional obtido foi de $25,501 \pm 1,560$ metros, uma vez que no posicionamento em linha de base longa e sob cintilação ionosférica, no processo de formação das DDs os erros ionosféricos não são minimizados devido a um alto valor associado de TEC (Conteúdo Total de Elétrons, do inglês, *Total Electron Content*). Ademais, as perdas de ciclos nos dados não foram corrigidas, o que corrobora na degradação do posicionamento.

Na sequência, foram aplicados os métodos de detecção e correção de perdas de ciclos implementados e realizado o posicionamento novamente, permitindo avaliar os resultados após correção para uma linha de base longa.

5.2.2.1 Triplas diferenças clássico

Foram calculadas, inicialmente, as séries de TDs para o par de estações SPDR-SPTU para utilização do método das TD clássico. Os valores obtidos para as séries de TD em L1 e L2 são apresentados na Figura 42 e Figura 43, respectivamente. Novamente, não foram formadas séries de TDs em L5, devido ao reduzido número de satélites transmitindo dados de tripla frequência na época e só se dispunha de 1 satélite com L5 no conjunto de dados empregado.

Figura 42 - Série de dados de tripla diferença para L1

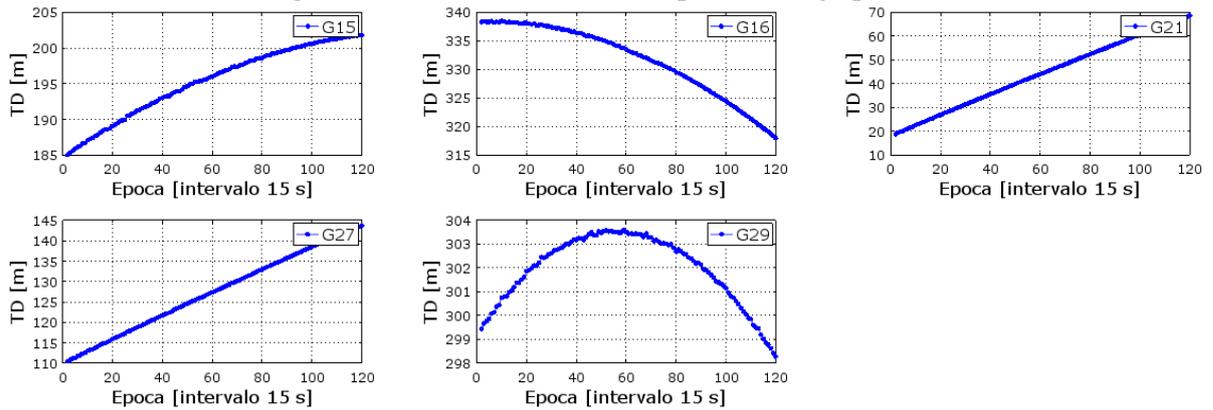
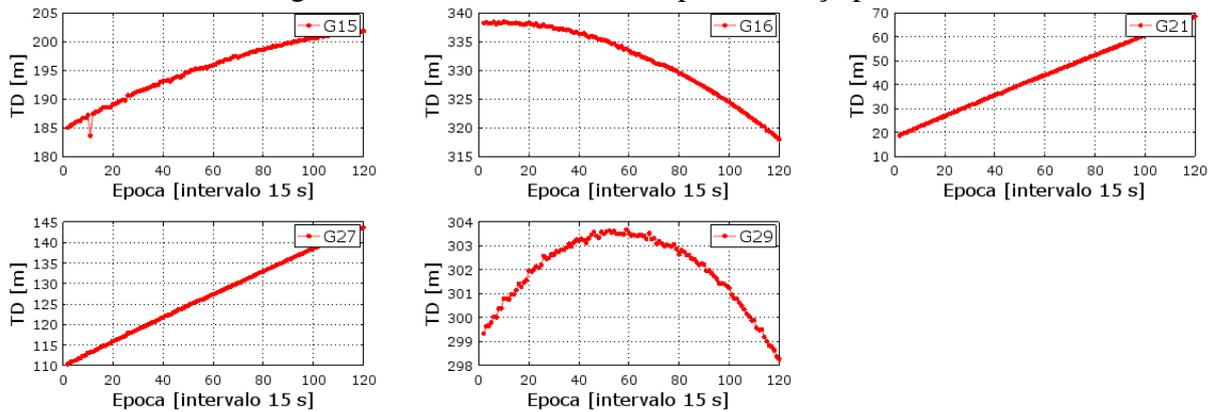


Figura 43 - Série de dados de tripla diferença para L2



De modo geral, não são encontradas grandes discontinuidades nas séries de TDs, com exceção das séries de TD do satélite G15 em L2. Ademais, foi possível perceber séries de TDs ruidosas em ambas frequências, principalmente para os dados do satélite G29. Foi aplicando então o limiar de detecção baseado no comprimento da linha de base, sendo o resultado obtido apresentado graficamente nas Figura 47 e Figura 48.

Figura 44 - Detecção com limiar proposto em L1

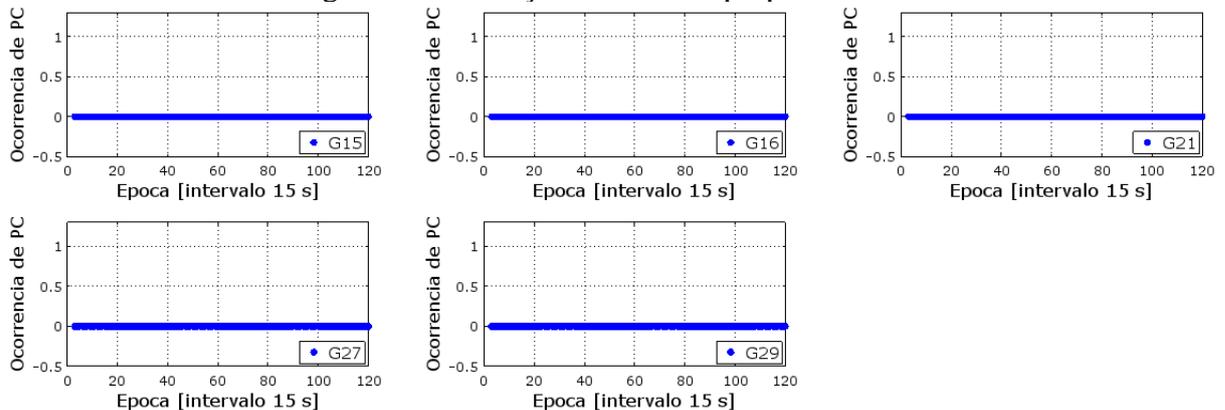
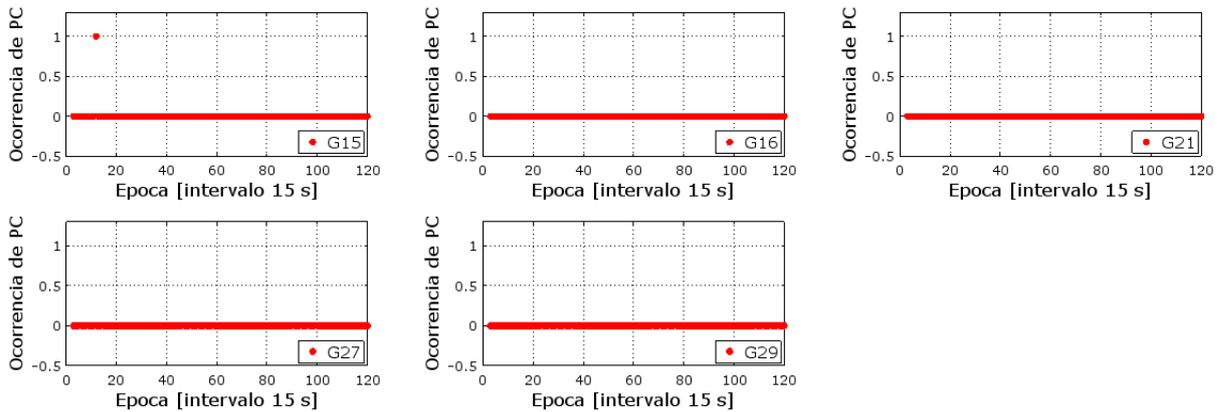
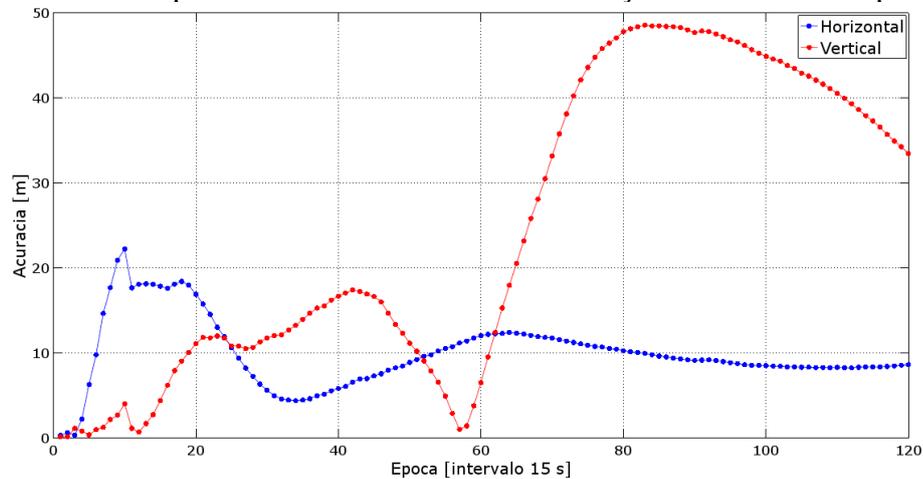


Figura 45 - Detecção com limiar proposto em L2



Da Figura 47 e Figura 48, tem-se que não foram detectadas perdas de ciclos em L1 e somente 1 perda de ciclos em L2 (satélite G15). Uma vez que as perdas de ciclos foram detectadas, foi aplicada a correção relaxando a MVC dos parâmetros no ajustamento. Realizou-se o posicionamento relativo com observações de dupla frequência, estimando as coordenadas da estação PRU2, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ (Figura 46).

Figura 46 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas após correção



Comparando o resultado da Figura 46 após a correção, com aquela obtida na Figura 41 sem correção, não foi possível notar melhoria no posicionamento após a aplicação da correção pelo método TD clássico. Para quantificar a melhoria obtida, foi calculada a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componente horizontal e vertical, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU com dados reais após correção de perda de ciclos pelo método clássico

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	9,825	$\pm 0,362$
Vertical	24,428	$\pm 1,582$
Tridimensional	28,068	$\pm 1,363$

Comparando os resultados sem correção (Tabela 26) com aqueles obtidos após a correção (Tabela 27), foi observada piora na média da REMQ tridimensional de 12,18% quando aplicado o método das TD clássico. Assim, verificou-se que o método clássico apresenta deficiências nesse tipo de cenário.

5.2.2.2 Triplas diferenças proposto

Para empregar o método das TD proposto, novamente fez-se uso das séries de TDs para o par de estações SPDR-SPTU, sendo estas as mesmas apresentadas na Figura 42 para L1 e Figura 43 para L2 (seção 5.2.2.1). Foi aplicado então o limiar de detecção proposto em função da estatística das séries de dados de TD, sendo o resultado obtido apresentado graficamente nas Figura 47 e Figura 48.

Figura 47 - Detecção com limiar proposto em L1

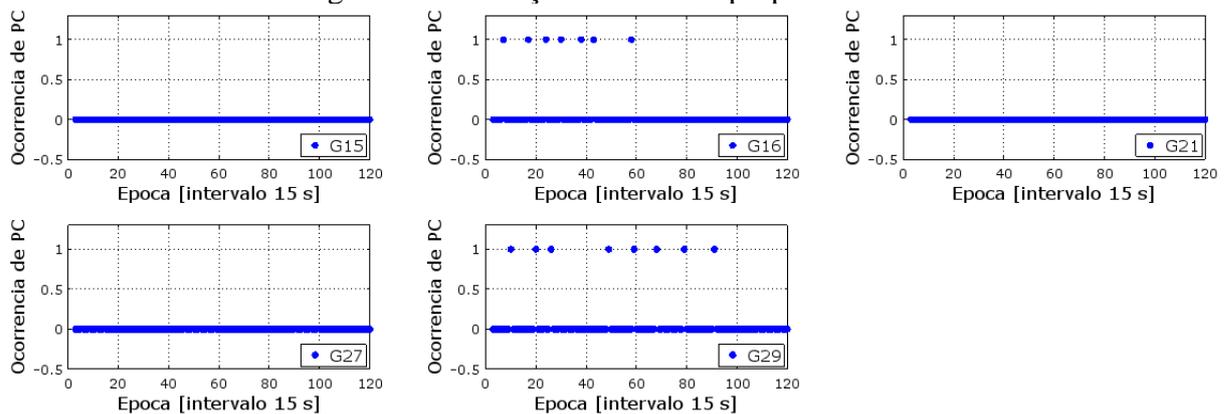
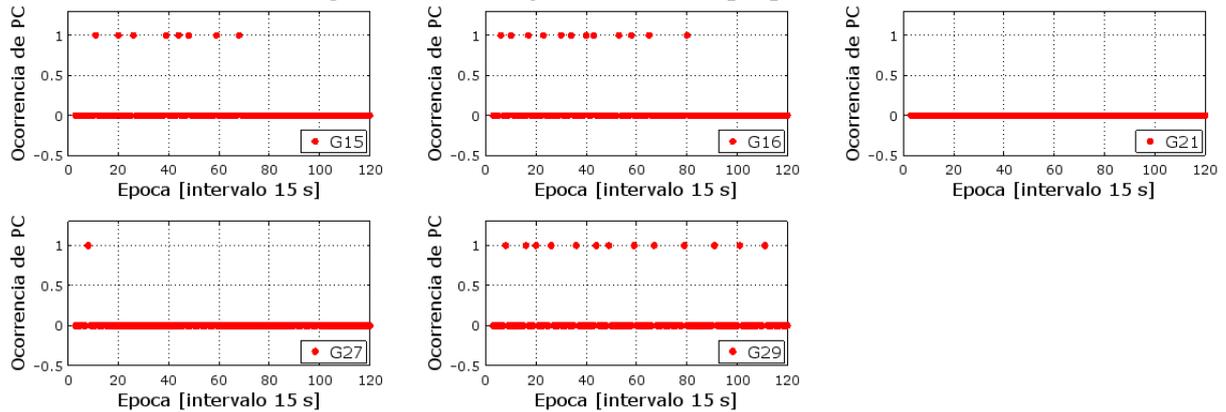
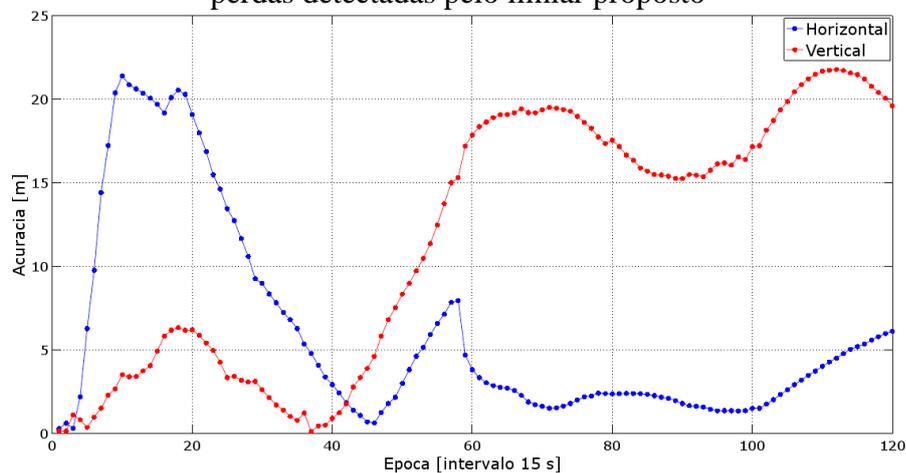


Figura 48 - Detecção com limiar proposto em L2



Da Figura 47 e Figura 48, tem-se que foram detectadas 15 perdas em L1 e 34 perdas em L2, totalizando 49 perdas de ciclos detectadas para o conjunto de dados empregado. Uma vez que as perdas de ciclos foram detectadas, foi aplicada a correção relaxando a MVC dos parâmetros no ajustamento. Realizou-se o posicionamento relativo com observações de dupla frequência, estimando as coordenadas da estação PRU2, bem como o erro no posicionamento no STL e respectivo desvio padrão em cada época, permitindo assim a determinação da acurácia posicional pela REMQ (Figura 49).

Figura 49 - Acurácia posicional nas coordenadas da estação SPTU obtidas após correção das perdas detectadas pelo limiar proposto



Comparando o resultado da Figura 49 após a correção, com aquela obtida na Figura 41 sem correção, nota-se a melhoria no posicionamento após a aplicação da correção pelo método proposto. Para quantificar a melhoria obtida, foi calculada a média e respectivo desvio padrão dos valores da REMQ nos componente horizontal e vertical, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Média e desvio padrão da REMQ na estimativa das coordenadas da estação SPTU com dados reais após correção de perda de ciclos pelo método proposto

Componente	\bar{Y}_{REMQ} (m)	S_{REMQ} (m)
Horizontal	5,987	$\pm 0,548$
Vertical	11,704	$\pm 0,694$
Tridimensional	15,140	$\pm 0,558$

Comparando os resultados sem correção (Tabela 26) com aqueles obtidos após a correção (Tabela 28), foi observada melhoria de 39,25% no que concerne a componente horizontal e melhoria de 47,36% no que concerne a componente vertical. Desse modo, para linha de base longa utilizando de dados reais (não simulados), o método das TD proposto proporcionou melhora na média da RMEQ tridimensional de 40,63%. É importante ressaltar que as condições atmosféricas sobre a qual o experimento foi conduzido corroboraram fortemente na degradação do posicionamento.

5.2.2.3 Sequência de combinações lineares

Aplicando o método baseado na sequência de combinações, assim como realizado na seção 5.2.1, foram calculadas as séries de diferenças de ambiguidades entre épocas adjacentes da observável *extra-wide-lane* (ΔN_{EWL}), *wide-lane* (ΔN_{WL}) e *narrow-lane* (ΔN_{NL}) alternativa para o satélite G27, único satélite de tripla frequência disponível para as estações SPAR e SPTU, sendo estas ilustradas na Figura 50 e Figura 51, respectivamente.

Figura 50 - Série de dados para as diferentes combinações para estação SPDR

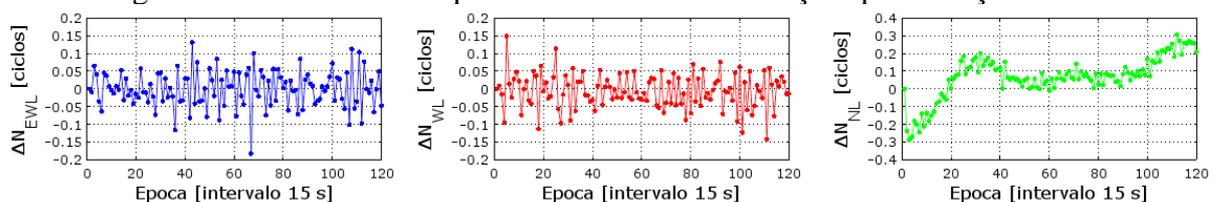
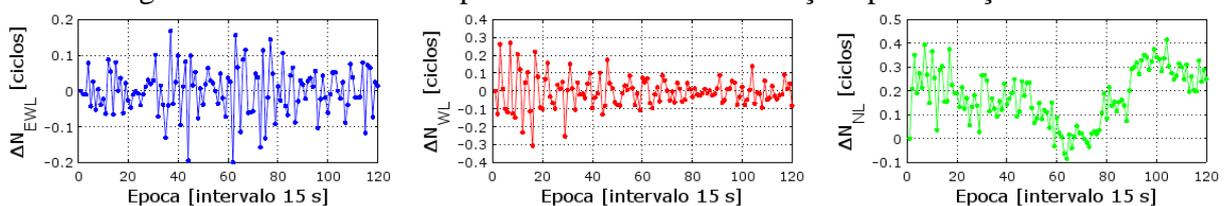


Figura 51 - Série de dados para as diferentes combinações para estação SPTU



Em ambos os casos (Figura 50 e Figura 51) não foi observada a presença de saltos nas séries, o que indica a não ocorrência de perdas de ciclos. Aplicando a equação (46), foi possível obter os valores das perdas de ciclos nas observáveis originais, sendo o resultado da detecção apresentado na Figura 52 e Figura 53 para as estações SPDR e SPTU, respectivamente.

Figura 52 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequencias de combinações na estação SPDR

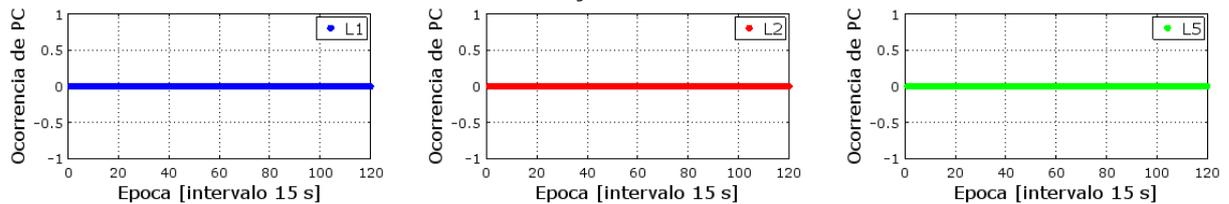
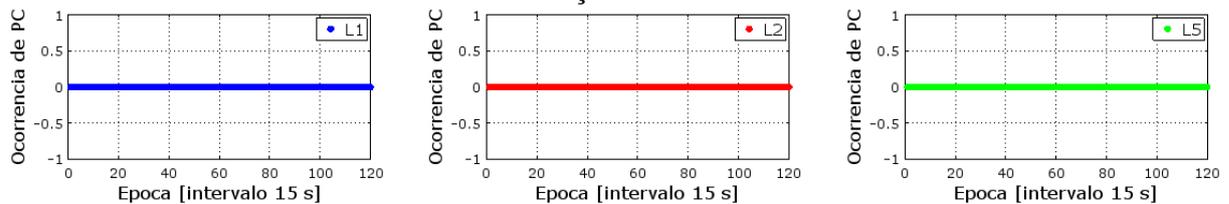


Figura 53 - Detecção de perdas de ciclo pelo método das sequencias de combinações na estação SPTU



Como pode ser observado da Figura 52 e Figura 53, o método empregado não detectou a ocorrência de perdas de ciclos nos dados dos satélites de tripla frequência em ambas as estações. Como visto na seção 3.2, para utilização do método faz-se necessária a utilização de uma informação do atraso ionosférico. Nesta pesquisa foi empregado o modelo de Klobuchar, baseado nas mensagens de navegação provindas do IGS, o qual estima cerca de 50% do atraso ionosférico (SEEBER, 2003). Assim, para casos de ionosfera não ativa, o método proporcionou excelentes resultados, uma vez que o modelo é suficiente para estimar a ionosfera. Entretanto, para período de ionosfera ativa, o modelo de Klobuchar parece não ser eficiente o suficiente, e espera-se que, ao se tratar o atraso ionosférico de forma adequada, o método das sequências de combinações lineares possa fornecer melhores resultados na detecção e correção de perdas de ciclos em períodos de alta atividade ionosférica. Ademais, é importante ressaltar que estes resultados foram obtidos sob influência de forte cintilação ionosférica, o que também corroborou para estes resultados. Além disso, o método pôde ser aplicado somente em um único satélite que dispunha da terceira frequência (L5), o qual pode não ter sofrido perdas de ciclos, o que dificulta a avaliação de seu desempenho.

Uma vez que perdas de ciclos não foram detectadas, não foi realizada a correção nos dados originais. Deste modo, ao realizar o posicionamento e estimar as coordenadas de SPTU e calcular a acurácia posicional pela REMQ, foram obtidos resultados idênticos aqueles apresentados na Figura 41 e, conseqüentemente, aos valores mostrados na Tabela 22.

6 CONCLUSÃO

Durante a realização da presente pesquisa, foi discutida a importância da problemática das perdas de ciclos no posicionamento GPS de alta acurácia. Discutiu-se ainda diferentes métodos de detecção e correção das perdas de ciclos considerando a modernização do sistema GPS e a adoção da terceira frequência.

Nos experimentos realizados, os quais foram descritos na seção 4, foram empregados tantos dados simulados, necessários para permitir a análise dos resultados da detecção considerando situações diversas e controladas, quanto dados reais em período de atividade ionosférica, incluindo cintilação ionosférica, permitindo avaliar o desempenho dos métodos nesta situação. Em ambas situações, ficou evidente por meio dos resultados apresentados no capítulo 5, que a ocorrência de perdas de ciclos nas observáveis de fase dos satélites GPS degrada consideravelmente a qualidade do posicionamento, justificando a necessidade da realização da presente pesquisa.

No desenvolvimento desta pesquisa foram empregados essencialmente três métodos: o método das TD clássico, proposto em Monico, Souza e Machado (2009); o método das sequências de combinações lineares, proposto por Gu e Zhu (2017); e o método das triplas diferenças proposto pelo autor, que visa trazer melhoria para o limiar de aceitação da ocorrência de perdas de ciclos, quando comparado ao métodos da TD clássico.

Em relação ao método baseado em TD clássico, é importante ressaltar que o mesmo faz uso das observáveis básicas do posicionamento relativo (DD) e que pode ser aplicado para simples, dupla ou tripla frequência. Dos resultados obtidos na seção 5.1, verificou-se que o método apresenta bons resultados para linha de base curta, considerando o limiar de aceitação de perda em função do comprimento da linha de base, detectando perdas de 1 ciclo (seção 5.1.1.2). Nesta situação, o método obteve índice de 100% de acerto na detecção das perdas simuladas, e após correção das mesmas, proporcionou melhoria de 99,91% no posicionamento tridimensional. Entretanto, em linha de base longa, considerando o mesmo limiar de aceitação, o método foi capaz de identificar apenas perdas maiores de 12 ciclos, conforme constatado na seção 5.1.2.2. Com isto, o método apresentou índice de 31,37% de acerto na detecção de perdas de ciclo em uma linha de base longa, o que resultou em uma melhoria de 49,45% no resultado do posicionamento. Destes resultados, foi possível concluir que o método das TD clássico se mostra eficaz para o posicionamento relativo em linha de base curta, porém deficiente ao considerar linha de base longa.

Considerando o método das TD proposto, tem-se que o mesmo é similar ao método clássico, o qual também faz uso das observáveis básicas do posicionamento relativos (DD) e pode ser aplicado para simples, dupla ou tripla frequência. O diferencial do método proposto está no limiar de aceitação da ocorrência de perdas de ciclos, o qual é baseado na estatística dos valores de média e desvio padrão da série de dados de TD. Dos resultados obtidos na seção 5.1, constatou-se que o método proposto apresentou resultados satisfatórios em linha de base curta, detectando perdas de 1 ciclo (seção 5.1.1.3). No que concerne a detecção nesta situação, o método proposto apresentou algumas falsas detecções, porém, ainda assim obteve índice de acerto na detecção superior a 90%, e após a correção das perdas de ciclo e realização do posicionamento, foi constatada melhoria tridimensional de 99,88%, resultado este muito próximo ao método clássico. Em se tratando de linha de base longa, o método proposto foi capaz de detectar corretamente perdas de muitos ciclos em sua grande maioria, bem como algumas perdas de poucos ciclos (seção 5.1.2.3). Nesta situação, o método proposto apresentou índice de 63,79% de acerto na detecção em linha de base curta, sendo este percentual 2 vezes melhor do que o obtido com o método clássico. Entretanto, faz-se a ressalva da ocorrência de algumas falsas detecções. Realizando a correção das perdas de ciclos pelo método proposto e o posicionamento, obteve-se uma melhoria de 95,32% na estimativa tridimensional das coordenadas da estação de interesse, mostrando assim que a metodologia proposta é relevante, trazendo avanço para utilização do método das triplas diferenças.

Em relação ao método baseado na sequência de combinações lineares foi o que apresentou melhores resultados para os dados simulados, identificando 100% das perdas e estimando o valor exato das perdas de ciclos em todas as condições testadas, como por exemplo, perdas de 1 ciclo e perdas iguais nas diferentes portadoras, tanto para linha de base curta (seção 5.1.1.4), quanto para linha de base longa (seção 5.1.2.4). Desta forma, o método proporcionou melhoria de 100% no posicionamento tridimensional, mostrando-se assim um método promissor de ser aplicado. A ressalva ao método é que este só pode ser utilizado quando dados de tripla frequência estão disponíveis, o que não será problema em um futuro próximo, tendo em vista que a modernização da constelação GPS já é uma realidade.

Os resultados obtidos para dados simulados, conforme apresentado na seção 5.1, podem ser sintetizados pela Tabela 29.

Tabela 29 - Síntese dos resultados obtidos com dados simulados

	Linha de base curta		Linha de base longa	
	REMQ médio tridimensional (m)	Melhoria com correção	REMQ médio tridimensional (m)	Melhoria com correção
Sem perdas de ciclos	0,206	--	0,631	--
Perdas de ciclos simuladas	47,954	--	29,567	--
Triplas Diferenças Clássico	0,249	99,91%	15,265	49,45%
Triplas Diferenças Proposto	0,263	99,88%	1,984	95,32%
Sequência de Combinações Lineares	0,206	100,00%	0,631	100,00%

Por fim, foi considerado o período de atividade ionosférica moderada ($ROTI \approx 0,05$), incluindo ocorrência de cintilação ionosférica moderada ($S4 > 0,3$), onde foram utilizados dados não simulados, período esse que representa uma condição adversa no posicionamento GPS.

Nesta condição, considerando o método das TD clássico, o qual proporcionou melhores resultados para linha de base curta em dados simulados, detectou a ocorrência de 57 perdas de ciclos em linha de base curta (seção 5.2.1.1) e, após correção das mesmas, proporcionou melhoria de 83,71% no posicionamento tridimensional. Ao empregar o método para linha de base longa, foi obtida uma piora no posicionamento de 12,18%, mostrando assim que o método apresentou deficiências nesse cenário, o que corrobora com os resultados obtidos na seção 5.1.2.2 com dados simulados.

Tomando o método das TD proposto, tem-se que este detectou a ocorrência de 217 perdas de ciclos em linha de base curta (seção 5.2.1.2) porém, ao realizar o posicionamento, a melhoria tridimensional obtida foi de 67,08%. Assim, tem-se que o número elevado de perdas de ciclo pode estar associado a falsas detecções em virtude do cálculo da média das séries de TD se mostrar sensível a dados com alta variabilidade. Assim, o método clássico se mostrou 50,51% mais eficiente que o método proposto quando utilizado em uma linha de base curta. Para uma linha de base longa (seção 5.2.2.2) o método detectou a ocorrência de 49 perdas de ciclos e, após a correção foi obtida uma melhoria tridimensional no posicionamento de 40,63%. Apesar do índice de melhoria não ser elevado, é importante ressaltar que as condições atmosféricas sobre a qual o experimento foi conduzido corroboraram fortemente na degradação do posicionamento.

Em relação ao método das sequências de combinações lineares, para linha de base curta (seção 5.2.1.3), o mesmo detectou a ocorrência de uma perda de ciclo para as duas estações

consideradas, o que produziu uma melhoria de 10,79% no posicionamento tridimensional, o qual é resultado da correção das perdas de ciclos em um único satélite. Em relação a linha de base longa (seção 5.2.2.3), o método não detectou a ocorrência de nenhuma perda de ciclo para ambas estações empregadas, não trazendo melhorias ao posicionamento. Fato este que pode estar associado a utilização do modelo ionosférico de Klobuchar, uma vez que, para a utilização do método faz-se necessária a utilização de uma informação do atraso ionosférico. Ademais, destaca-se que o método só pode ser aplicado a um número limitado de satélites, uma vez que este somente pode ser usado quando dados de tripla frequência estão disponíveis.

Os resultados obtidos para dados reais, conforme apresentado na seção 5.2, podem ser sintetizados pela Tabela 30.

Tabela 30 - Síntese dos resultados obtidos com dados reais

	Linha de base curta		Linha de base longa	
	REMQ médio tridimensional (m)	Melhoria com correção	REMQ médio tridimensional (m)	Melhoria com correção
Dados reais	3,253	--	25,501	--
Triplas Diferenças Clássico	0,530	83,71%	28,068	-12,18%
Triplas Diferenças Proposto	1,071	67,08%	15,140	40,63%
Sequência de Combinações Lineares	2,902	10,79%	25,501	0,00%

Considerando todos os resultados obtidos com a presente pesquisa, pode-se classificar o desempenho dos métodos de detecção e correção de perdas de ciclos para cada experimento de acordo com a Tabela 31

Tabela 31 - Desempenho dos métodos de detecção e correção de perdas de ciclos

Método	Dados Simulados		Dados reais	
	Linha de base curta	Linha de base longa	Linha de base curta	Linha de base longa
Triplas Diferenças Clássico	Eficaz	Deficiente	Eficaz	Ineficaz
Triplas Diferenças Proposto	Eficaz	Relevante	Relevante	Relevante
Sequência de Combinações Lineares	Excelente	Excelente	Ineficaz	-

Os termos apresentados na Tabela 31 apresentam o seguinte significado: excelente: o método detectou e corrigiu corretamente todas as perdas de ciclos; eficaz: o método detectou e corrigiu corretamente a maior parte das perdas de ciclo, apresentando bons resultados;

relevante: o método apresentou resultados promissores, porém com algumas ressalvas; ineficaz: o método se mostrou ineficiente para detecção e correção de perdas de ciclos.

Como recomendações para trabalhos futuros, fica a melhoria do limiar do método das triplas diferenças proposto, a fim de evitar a ocorrência de falsas detecções de perdas de ciclos, o que deve proporcionar maior percentual de melhoria no posicionamento, principalmente no que concerne a linhas de base curtas. Em relação ao método das sequências de combinações lineares, recomenda-se métodos mais sofisticados da modelagem ionosférica, bem como a utilização de mapas ionosféricos globais e/ou regionais, uma vez que a qualidade do método depende do tratamento do atraso ionosférico de forma adequada, permitindo que este forneça resultados aceitáveis na detecção e correção de perdas de ciclos em períodos de alta atividade ionosférica. Recomenda-se também testar o método da sequência de combinações lineares em mais cenários com dados reais, incluindo período de alta atividade ionosférica, ocorrência de cintilação ionosférica, uma vez que, nos dias atuais há maior disponibilidade de satélites GPS de tripla frequência.

Finalizando, foi possível concluir que a presente pesquisa cumpriu com previsto, sendo investigados os diferentes métodos de detecção e correção de perdas de ciclos para o posicionamento relativo GPS com dados de tripla frequência e implementando os dois métodos selecionados no sistema de posicionamento que vem sendo desenvolvido na FCT/UNESP. Ademais, foi testada e verificada a eficiência destes métodos tanto em dados simulados, quanto em período de atividade ionosférica moderada. Portanto, indica-se usar o método das triplas diferenças clássico para linhas de base curtas, o método das triplas diferenças proposto para linhas de base longas e o método da sequência de combinações lineares para linhas de base curtas e longas em períodos de baixa atividade ionosférica quando dados de tripla frequência estiverem disponíveis.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. B. M.; MONICO, J. a. 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>>.
- BANVILLE, S.; LANGLEY, R. B. Cycle-slip correction for single-frequency PPP. In: **Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012)**. Nashville: Nashville Convention Center, Nashville, 2012. p. 3753–3761.
- 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.
- BANVILLE, S.; LANGLEY, R. B. Mitigating the impact of ionospheric cycle slips in GNSS observations. **Journal of Geodesy**, Springer, v. 87, n. 2, p. 179–193, 2013.
- 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. An automatic editing algorithm for GPS data. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 17, n. 3, p. 199–202, 1990.
- CEDERHOLM, P.; PLAUSINAITIS, D. Cycle slip detection in single frequency GPS carrier phase observations using expected Doppler shift. **Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research**, v. 10, n. 1, p. 63-79, 2014
- CHEN, D. et al. A double-differenced cycle slip detection and repair method for GNSS cors network. **GPS Solutions**, Springer, p. 1–12, 2015.
- 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, Z.; KNEDLIK, S.; LOFFELD, O. Real-time cycle-slip detection and determination for multiple frequency GNSS. In: IEEE. **Positioning, Navigation and Communication**, 2008. WPNC 2008. 5th Workshop on. [S.l.], 2008. p. 37–43.
- DAI, Z.; KNEDLIK, S.; LOFFELD, O. Instantaneous triple-frequency GPS cycle-slip detection and repair. **International Journal of Navigation and Observation**, Hindawi Publishing Corporation, v. 2009, 2009.
- DU, S.; GAO, Y. Inertial aided cycle slip detection and identification for integrated PPP GPS and ins. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 11, p. 14344–14362, 2012.

- 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: 16 abr. 2018.
- GPS. **Control Segment**. 2019a. Disponível em: <<https://www.gps.gov/systems/gps/control/>>. Acesso em: 14 fev. 2019.
- GPS. **New Civil Signals**. 2019b. Disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>>. Acesso em: 14 fev. 2019.
- GPS. **Space Segment: Current and future satellite generations**. 2018c. Disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Acesso em: 14 fev. 2019.
- GU, X. ZHU. B. Detection and correction of cycle slip in triple-frequency GNSS positioning. **IEEE Access**. v. 5, 2017. p.12584-12595.
- HUANG, L. et al. Triple-frequency TurboEdit cycle-slip processing method of weakening ionospheric activity. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica.**, v. 44, n. 8, p. 840-847, 2015.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global navigation satellite system: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. Morlenbach: Springer Science & Business Media, 2008.
- KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. **Understanding GNSS: principles and applications**. 2. Ed. Norwood: 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.
- LACY, M. C. D.; REGUZZONI, M.; SANSÒ, F. Real-time cycle slip detection in triple-frequency GNSS. **GPS solutions**, Springer, v. 16, n. 3, p. 353–362, 2012.
- 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.
- LUTZ, S.; FRIDEZ, P. **Bernese GNSS software: version 5.2**. Astronomical Institute, University of Bern. 2015.
- MONICO, J. F. G. et al. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, p. 469-483, 2009. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/15513/10363>>. Acesso em: 27 mar. 2019.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

MONICO, J. F. G.; SOUZA, E. M.; MACHADO, C. W. Avaliação de estratégias de detecção e correção de perdas de ciclos na portadora GPS 11. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 2, p. 178–193, 2009. ISSN 1982-2170. Disponível em:

<<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/bcg/article/view/14605/9803>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

PARKINSON, B. W.; SPILKER Jr., J. J. **Global positioning system: theory and applications**. Vol. 1. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.

PEREIRA, V. A. S. **Monitoramento das Irregularidades e Cintilação da Ionosfera em Tempo Real: Integração dos Dados GNSS das Redes CALIBRA, GNSS-SP e RBMC**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

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

SILVA, C. M. **Solução das ambiguidades para linhas de bases longas com o uso combinado dos sistemas GPS e Galileo**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. Em andamento.

SILVA, C. M. **Solução das ambiguidades de linhas de bases médias e longas: aplicação no posicionamento baseado em redes**. 2015. 136 f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada e Computacional) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

TEUNISSEN, P.; BAKKER, P. de. **Multivariate integer cycle-slip resolution: A single-channel analysis**. Springer, 2015.

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.; KLEUSBERG, A. (Ed.). **GPS for Geodesy**. Berlin: Springer Berlin, 1998. 271-318 p.

VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: The ISMR Query Tool. **Computers & Geosciences** (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.022>.

VERHAGEN, S. **The GNSS integer ambiguities: estimation and validation**. Delft: NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie, Netherlands Geodetic Commission, 2005. (Publications on geodesy). ISBN 9789061322900.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. **Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

ZHANG, X.; LI, P. Benefits of the third frequency signal on cycle slip correction. **GPS Solutions**, Springer, p. 1–10, 2015.

APÊNDICE A – Estudo de caso: avaliação do limiar para o método das triplas diferenças clássico

Como descrito previamente, o método das TD clássico adota como o limiar para aceitar a detecção da ocorrência de uma perda de ciclos em função do comprimento da linha de base empregada no posicionamento relativo. Considerando linha de base curta, este método mostrou bons resultados, como pode ser visto em Monico, Souza e Machado (2009).

Contudo, de acordo com Bisnath (2000), a principal desvantagem do método está relacionada à definição dos valores específicos do limiar de aceitação. Neste sentido, o presente estudo de caso visou avaliar o desempenho do método das TDs clássico em linha de base longa. O estudo realizado objetivou identificar qual número mínimo de ciclos na ocorrência de uma perda de ciclos que o método é capaz de identificar.

Na execução deste experimento, foi levado em consideração uma linha de base longa (82,6 km) e perdas de ciclos simuladas na observável de fase de um satélite de tripla frequência. Nesta simulação, a primeira perda de ciclo foi simulada na época 3 com valor de 1 ciclo; na sequência foi inserida a cada 3 épocas uma perda de ciclo incrementada por 1 ciclo para as três frequências (L1, L2 e L5), conforme esquematizado na Tabela 32.

Tabela 32 - Diferentes perdas de ciclos simuladas no satélite de tripla frequência

Época	Número de ciclos			Época	Número de ciclos		
	L1	L2	L5		L1	L2	L5
3	1	1	1	27	9	9	9
6	2	2	2	30	10	10	10
9	3	3	3	33	11	11	11
12	4	4	4	36	12	12	12
15	5	5	5	39	13	13	13
18	6	6	6	42	14	14	14
21	7	7	7	45	15	15	15
24	8	8	8	48	16	16	16

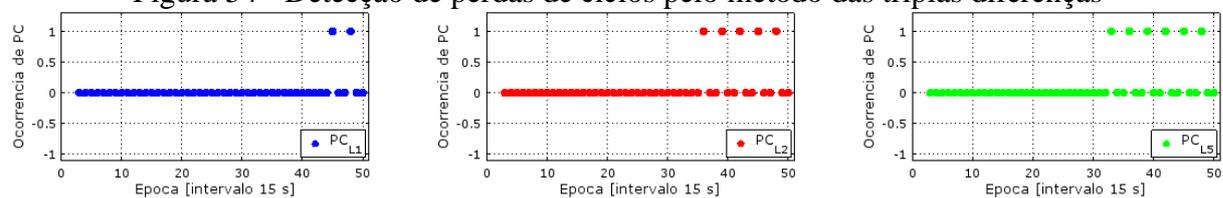
As séries de TDs geradas após execução do método são apresentadas na Figura 54. Como pode ser observado, fica evidente os saltos, ou descontinuidades, nas séries de TDs, sendo estes proporcionais ao número de ciclos das perdas de ciclos simuladas. Logo, as descontinuidades são maiores no final das séries de TDs, onde foram simuladas perdas com maior número de ciclos.

Figura 54 - Série de dados de tripla diferença para L1, L2 e L5



Na sequência, aplicando o critério de detecção em função do comprimento da linha de base para a série de dados empregadas, os seguintes resultados foram gerados, conforme Figura 55

Figura 54 - Detecção de perdas de ciclos pelo método das triplas diferenças



Como pode ser observado, foi identificada a primeira perda de ciclos em L1 na época 45, a qual corresponde a uma perda de 15 ciclos. Para a portadora L2, a primeira perda de ciclos foi identificada na época 36, correspondendo a uma perda de 12 ciclos. Por fim, na portadora L5 a primeira perda de ciclo foi detectada na época 33, correspondendo a 11 ciclos.

Assim, para linha de base longa, aproximadamente 80 km, tem-se que somente as perdas de ciclos com maior número de ciclos foram detectadas pelo método das TDs clássico, sendo que o valor (número de ciclos na ocorrência de uma perda) muda de acordo com portadora considerada. Portanto, faz-se necessário reavaliar o limiar de aceitação de ocorrência de perdas de ciclos para o método das TDs para linhas de base longa.