



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

Lucas Lacerda Paixão

**Plataforma de posicionamento, de elevada
precisão e de baixo custo, baseada em GPS
diferencial.**

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro, 2015

Lucas Lacerda Paixão

Plataforma de posicionamento, de elevada precisão e de baixo custo, baseada em GPS diferencial.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Ricardo Alcântara Morais

Convidado: Prof. Dr. Antônio Marcus Nogueira Lima

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro, 2015

Lucas Lacerda Paixão

Plataforma de posicionamento, de elevada precisão e baixo custo, baseada em GPS diferencial.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Marcos Ricardo Alcântara Morais
Orientador

Prof. Dr. Antônio Marcus Nogueira Lima
Convidado

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro, 2015

Resumo

Sistemas de posicionamento são cada vez mais utilizados em aplicações civis e militares. Existem uma série de limitações e fontes de erros que comprometem a precisão e a exatidão das posições. Neste trabalho, discorre-se sobre esses pontos a partir de uma fundamentação teórica contemplando sistemas globais de navegação, especificamente, o NAVSTAR GPS. Ademais, propõe-se uma solução baseada em GPS diferencial, utilizando uma biblioteca de código aberto, a RTKLIB, e um receptor u-blox EVK-6T. Para avaliar essa plataforma em condições reais, foram realizados uma série de experimentos e observações, sob diferentes circunstâncias, na cidade de Lovaina, na Bélgica, em parceria com a empresa Essensium, que disponibilizou a infraestrutura necessária. Ao final dos ensaios, fatores como a precisão das medidas, resolução de ambiguidade, tempo de resposta, de convergência e distância da estação base foram analisados. Dependendo das condições, precisão a nível de centímetros foi alcançada, quando soluções mais elementares de GPS atingiram desvios de metros.

Palavras-chave: sistemas globais de posicionamento, GPS diferencial, RTKLIB, u-blox EVK-6T.

Abstract

Positioning systems are increasingly used in military and civil applications. There are several limitations and source of errors that compromise the precision and accuracy of positions. In this work these issues are addressed in a theoretical discussion about global navigation systems, specially, the NAVSTAR GPS. Based on that scenario, a differential GPS solution is proposed and it consists of an open source library called RTKLIB jointly with a u-blox EVK-6T receiver. To evaluate that platform on real conditions, a series of experiments and observations were performed, in distinct environments, at Leuven – Belgium in a partnership with Essensium company that provided the necessary infrastructure. By the end of the tests, factors as precision of measurements, ambiguity resolution, response and converge time, baseline distance, as well, were analysed. Depending on the conditions, precision in the level of centimeters were achieved, when simple GPS solutions result in deviation of meters.

Keywords: global navigation systems, differential GPS, RTKLIB, u-blox EVK-6T.

Lista de figuras

• Figura 1: posição do receptor em um plano bidimensional.....	13
• Figura 2: posição do receptor em 3D.....	14
• Figura 3: pelos menos 4 satélites GPS são necessários na determinação da posição.	15
• Figura 4: princípio do GPS diferencial baseado em fase da portadora.	20
• Figura 5: kit receptor GPS u-blox EVK-6T.....	26
• Figura 6: dimensões da antena 1.	26
• Figura 7: dimensão da antena 2.	27
• Figura 8: estação de referência BRUX0.	27
• Figura 9: estação de referência DENT0.	28
• Figura 10: localização 1 dos experimentos.....	29
• Figura 11: localização 2 dos experimentos.....	29
• Figura 12: localização 3 dos experimentos.....	30
• Figura 13: setup experimental para GPS diferencial.	31
• Figura 14: setup experimental para GPS com receptor único.	31
• Figura 15: caminhos para os experimentos com receptor em movimento.....	32
• Figura 16: posição de referência para experimentos na localização 1. Fonte: Google Maps.	34
• Figura 17: posição de referência para os experimentos na localização 2. Fonte: Google Maps.	35
• Figura 18: posição de referência para os experimentos na localização 3. Fonte: Google Maps.	36
• Figura 19: GPS com receptor único versus GPS diferencial baseado em fase.	38
• Figura 20: GPS diferencial baseado em código versus GPS diferencial baseado em fase.	39
• Figura 21: pontos vermelhos indicam perda de ciclo na resolução de ambiguidade.	40
• Figura 22: solução de posicionamento com GPS diferencial com resolução de ambiguidade. Observação 3, localização 1.	41
• Figura 23: solução de posicionamento com GPS diferencial sem resolução de ambiguidade. Observação 3, localização 1.	41
• Figura 24: número de satélites válidos e DOP para observação 1, localização 3.....	42
• Figura 25: soluções de posicionamento para duas estações de referência diferentes: BRUX0 e DENT0.	44
• Figura 26: tempo de convergência para o modo estático da RTKLIB.	46
• Figura 27: modo estático versus modo cinemático da RTKLIB para receptor parado na localização 2.....	50
• Figura 28: modo estático versus modo cinemático da RTKLIB para receptor parado na localização 3.....	51
• Figura 29: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 1, localização 2, antena 1.	52

- Figura 30: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 4, localização 2, antena 1.52
- Figura 31: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 3, localização 2, antena 1.52
- Figura 32: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 1, localização 2, antena 2.53
- Figura 34: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 3, localização 2, antena 2.53
- Figura 33: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 4, localização 2, antena 2.53
- Figura 35: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 1, localização 3, antena 1.54
- Figura 36: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 2, localização 3, antena 1.54
- Figura 37: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 3, localização 3, antena 1.54
- Figura 38: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 1, localização 3, antena 2.55
- Figura 39: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 2, localização 3, antena 2.55
- Figura 40: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 3, localização 3, antena 2.55
- Figura 41: tempo de convergência para modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade.....56
- Figura 42: tempo de resposta no modo cinemático da RTKLIB. Caminho 1, localização 3, antena 1.57
- Figura 43: tempo de resposta no modo cinemático da RTKLIB. Caminho 1, localização 3, antena 2.57
- Figura 44: modo cinemático da RTKLIB com e sem resolução de ambiguidade.58

Lista de tabelas

- Tabela 1: desvios de posição para localização 1 com receptor parado e modo de posicionamento estático em tempo real.34
- Tabela 2: desvios de posição para localização 1 com receptor parado e modo de posicionamento estático pós-processado.....34
- Tabela 3: desvios de posição para localização 2 com receptor parado e modo de posicionamento estático em tempo real.35
- Tabela 4: desvios de posição para localização 2 com receptor parado e modo de posicionamento estático pós-processado.....35
- Tabela 5: desvios de posição para localização 3 com receptor parado e modo de posicionamento estático em tempo real.36
- Tabela 6: desvios de posição para localização 3 com receptor parado e modo de posicionamento estático pós-processado.....37
- Tabela 7: desvios de posição para GPS com receptor único.37
- Tabela 8: desvios de posição para DGPS baseado em código.....38
- Tabela 9: desvios de posição pós-processados para observação 1 na localização 3.....42
- Tabela 10: desvios de posição em tempo real para observação 1 na localização 3.....43
- Tabela 11: desvios de posição pós-processados, na localização 1, para as estações de referência BRUX0 e DENT0.....44
- Tabela 12: desvios de posição em tempo real, na localização 1, para as estações BRUX0 e DENT0.....44
- Tabela 13: desvios de posição pós-processados, na localização 2, para as estações de referência BRUX0 e DENT0.....45
- Tabela 14: desvios de posição em tempo real, na localização 2, para as estações BRUX0 e DENT0.....45
- Tabela 15: desvios de posição pós-processados, na localização 3, para as estações de referência BRUX0 e DENT0.....45
- Tabela 16: desvios de posição em tempo real, na localização 3, para as estações BRUX0 e DENT0.....45
- Tabela 17: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade. Localização 2, antena 1.....47
- Tabela 18: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade. Localização 2, antena 1.....47
- Tabela 19: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade. Localização 2, antena 2.....48
- Tabela 20: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade. Localização 2, antena 2.....48
- Tabela 21: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade. Localização 3, antena 1.....48
- Tabela 22: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade. Localização 3, antena 1.....49
- Tabela 23: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade. Localização 3, antena 2.....49

- Tabela 24: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade. Localização 3, antena 2.....49
- Tabela 25: desvios de posição no modo estático e cinemático da RTKLIB na localização 2.....50
- Tabela 26: desvios de posição no modo estático e cinemático da RTKLIB na localização 3.....50
- Tabela 27: desvios de posição para o modo cinemático da RTKLIB com e sem resolução de ambiguidade.....58

Sumário

1. Introdução.....	10
2. Revisão bibliográfica	12
2.1. Sistema Global de Navegação por Satélite	12
2.2. Introdução ao GPS	12
2.3. Segmentos do GPS	16
2.4. Fontes de erros no GPS	17
2.5. GPS diferencial - DGPS.....	19
2.5.1. DGPS baseado em código	19
2.5.2. DGPS baseado em fase da portadora	20
2.6. Estações base ou de referência	21
2.7. RTKLIB	22
3. Materiais e métodos.....	25
3.1. Equipamentos utilizados	25
3.2. Estações de referência utilizadas	27
3.3. Locais de teste.....	28
3.4. Procedimento experimental	30
3.4.1. Receptor estático	31
3.4.2. Receptor em movimento	32
4. Resultados e discussões.....	33
4.1. Receptor estático (modo estático da RTKLIB).....	33
4.1.1. Precisão das medidas.....	37
4.1.2. Resolução de ambiguidade.....	39
4.1.3. Distância da estação base	43
4.1.4. Tempo de convergência.....	46
4.2. Receptor estático (modo cinemático da RTKLIB)	47
4.3. Receptor em movimento (modo cinemático da RTKLIB).....	51
4.3.1. Trajetória experimental.....	56
4.3.2. Tempo de resposta e de convergência	56
5. Considerações finais	59
6. Referências bibliográficas.....	61

1 INTRODUÇÃO

Frequentemente, aplicações militares ou civis empregam uma infraestrutura de satélites que se comunicam com dispositivos receptores, em solo terrestre, a fim de se determinar posição em um dado instante: latitude, longitude e altitude. Com essas informações, também é possível calcular a velocidade, a direção e o sentido de deslocamento. Além de serem comumente encontrados em navios, aviões, automóveis, os sistemas de posicionamento e de navegação aparecem também em domínios como a arqueologia, auxílio humanitário, estudos atmosféricos, gestão de recursos naturais, proteção do ambiente, exploração de zonas remotas da superfície terrestre, entre outros.

Até 2009, o Sistema de Posicionamento Global conhecido pela sigla GPS (*Global Positioning System*), concebido e mantido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, era o único completamente operacional. Hoje em dia, além do GPS norte-americano, existem outros análogos como o russo GLONASS, o europeu GALILEO, o chinês BEIDOU/COMPASS ou o indiano IRNSS, muitos ainda em fase de desenvolvimento. Utiliza-se a designação GNSS (acrônimo, em língua inglesa, para sistemas globais de navegação por satélite) para abranger a totalidade dessas infraestruturas. Como o GPS é o mais consolidado e utilizado mundialmente, ele foi o escolhido para ser abordado neste relatório.

Acompanhando a evolução tecnológica global e a complexidade das aplicações, existe um esforço cada vez maior para refinar e aprimorar os sistemas de posicionamento, tornando-os mais robustos, precisos, acurados, atenuando a influência de certos erros causados por assincronismo de relógios, efeitos da troposfera e ionosfera, ruído no receptor, constelação de satélites, multicaminho, entre outros. Nesse contexto, foram desenvolvidas novas técnicas baseadas em modelos geofísicos de correção, receptores em dupla frequência, GPS assistido e GPS diferencial. Este especificamente usa uma ou mais estações base como referência, em posições conhecidas, para corrigir em tempo real, ou não, medições distorcidas em outros receptores fixos ou em movimento. Dependendo das técnicas utilizadas e das condições externas do ambiente, atinge-se uma acurácia a nível de centímetros

na determinação da posição, bem superior se comparado ao GPS elementar, com apenas um receptor e baseado em frequência única, em que distorções a nível de dezenas de metros são verificadas.

Este trabalho tem como objetivo propor, estudar e avaliar uma plataforma de posicionamento de elevada precisão/acurácia e de baixo custo (se comparada a maioria dos sistemas de alta precisão no mercado), baseada em GPS diferencial, usando um computador, uma biblioteca de algoritmos de posicionamento *open source*, RTKLIB, e um kit receptor u-blox EVK-6T, largamente comercializado. Na seção 2, denominada de revisão bibliográfica, é feita uma contextualização desse esforço e são apresentados conceitos importantes sobre GNSS, GPS e RTKLIB. Na seção 3, chamada de materiais e métodos, são apresentados os equipamentos, estações de referência, locais de teste e procedimentos experimentais. Na seção 4, os resultados são discutidos e categorizados segundo ensaios com receptor estático e receptor em movimento. Na seção 5, encontram-se as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema Global de Navegação por Satélite

Um Sistema Global de Navegação por Satélite ou *Global Navigation Satellite System (GNSS)*, em inglês, compreende uma infraestrutura de satélites dispostos no espaço, a partir dos quais é possível determinar, em qualquer lugar do planeta, a posição (latitude, longitude e altitude) de um objeto ou indivíduo em um dado instante. Baseado nessas informações, podem-se determinar ainda a velocidade, o sentido e a direção de deslocamento. Atualmente, destacam-se cinco sistemas de navegação: o norte-americano NAVSTAR GPS, o europeu GALILEO, o russo GLONASS, o chinês BEIDOU/COMPASS e o indiano IRNSS.

O GPS, objeto de estudo deste trabalho, foi lançado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos na década de 1970, inicialmente, para investidas militares. Com o passar do tempo, consolidou-se como o mais utilizado em aplicações civis com cerca de 30 satélites orbitando a Terra a 20200 km de distância (*Space Segment*, 2015). O GLONASS começou a ser concebido também na década de 1970, pela extinta União Soviética, e hoje é considerado uma alternativa completamente operacional ao GPS. O GALILEO, o BEIDOU e o IRNSS ainda não são utilizados em escala global; eles seguem em fase de implantação e testes.

2.2 Introdução ao GPS

O Sistema de Posicionamento Global norte-americano (*NAVSTAR Global Positioning System – GPS*) dispõe de pelo menos 24 satélites plenamente funcionais capazes de se comunicarem com receptores em qualquer lugar do planeta Terra.

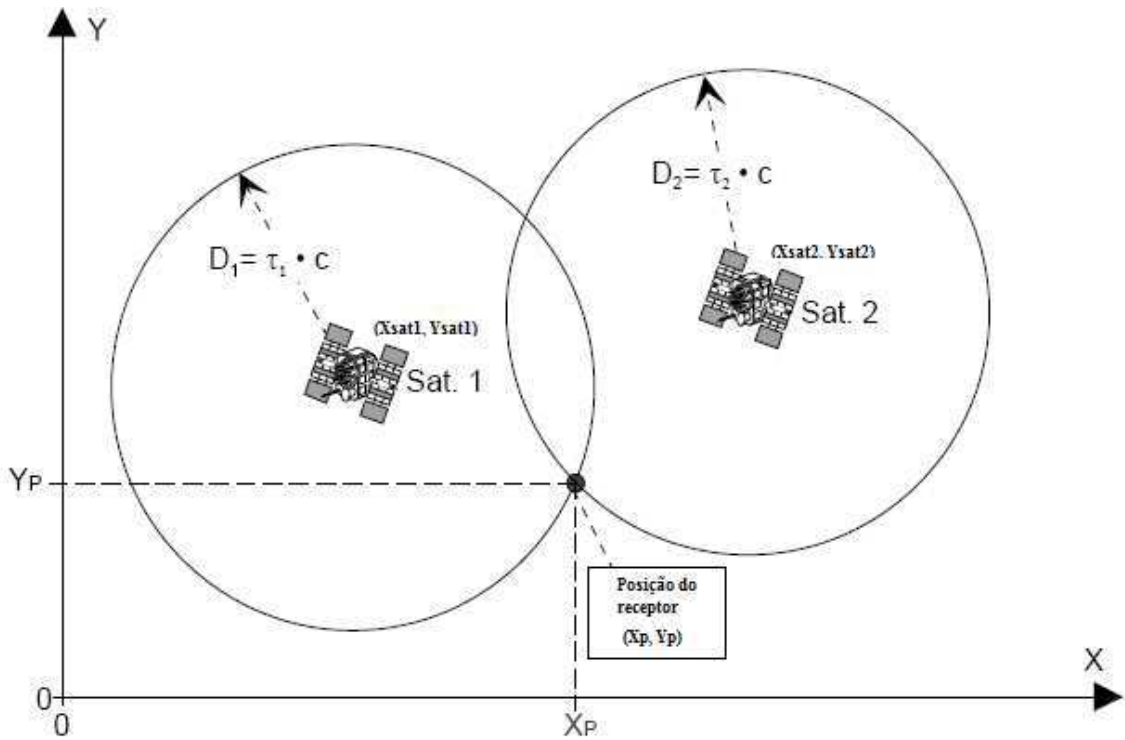


Figura 1: posição do receptor em um plano bidimensional.

Em um plano bidimensional, conforme ilustrado na Figura 1, a posição do receptor (X_p, Y_p) pode ser determinada pelo seguinte sistema de equações:

$$D_1 = \sqrt{(X_p - X_{sat1})^2 + (Y_p - Y_{sat1})^2} \quad (I)$$

$$D_2 = \sqrt{(X_p - X_{sat2})^2 + (Y_p - Y_{sat2})^2} \quad (II)$$

Em um espaço tridimensional, como no caso real, tem-se:

$$D_1 = \sqrt{(X_p - X_{sat1})^2 + (Y_p - Y_{sat1})^2 + (Z_p - Z_{sat1})^2} \quad (III)$$

$$D_2 = \sqrt{(X_p - X_{sat2})^2 + (Y_p - Y_{sat2})^2 + (Z_p - Z_{sat2})^2} \quad (IV)$$

$$D_3 = \sqrt{(X_p - X_{sat3})^2 + (Y_p - Y_{sat3})^2 + (Z_p - Z_{sat3})^2} \quad (V)$$

Conhecendo a posição exata de três satélites e a distância D_n ($n = 1,2,3$) entre cada um deles e o receptor, a solução do sistema define a sua localização (X_P, Y_P, Z_P) , que é o ponto de intersecção de três esferas de raio D_n .

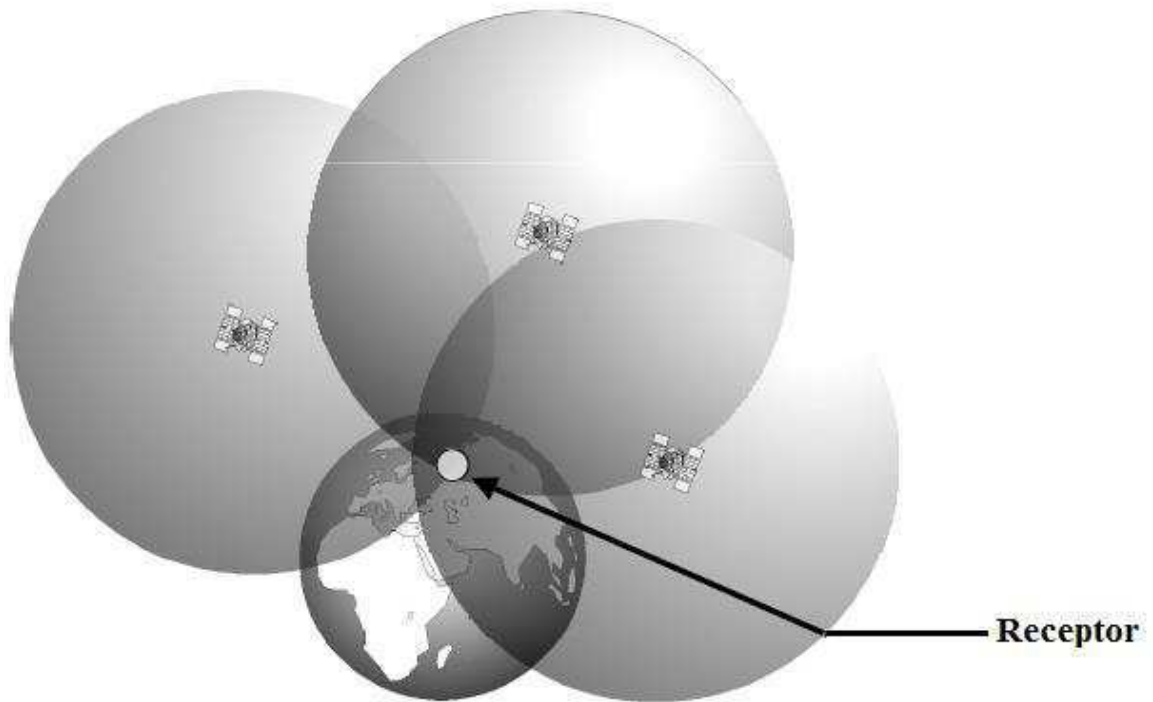


Figura 2: posição do receptor em 3D.

A posição dos satélites no espaço é conhecida com exatidão. No entanto, erros na determinação da distância D_n fazem com que, no caso prático real, o cálculo da localização do receptor seja mais complexo do que o apresentado anteriormente.

Os satélites emitem ondas de rádio regularmente com frequências definidas. A distância (D_n) é determinada pela multiplicação do tempo pela velocidade de propagação dessas ondas até o receptor. Assim,

$$D_n = \tau_n * c \quad (VI)$$

Em que:

D_n = distância entre o receptor e o satélite n.

τ_n = tempo de propagação da onda de rádio do satélite n ao receptor.

c = velocidade de propagação da onda de rádio no vácuo (velocidade da luz = 3×10^8 m/s).

Para medir o tempo de propagação da onda de rádio, registra-se o instante de emissão e o de recepção. A diferença entre eles fornece a variação temporal desejada. Para isso, os satélites possuem relógios atômicos, extremamente precisos, e enviam constantemente informações para a Terra. Os receptores por sua vez não apresentam relógios perfeitamente sincronizados com os satélites. Um desvio de apenas $1 \mu\text{s}$, por exemplo, ocasiona uma discrepância de 300 metros no cálculo da distância D_n .

É preciso fazer um ajuste na equação VI de modo a incluir o desvio temporal (Δt) causado pela diferença de relógios. Assim,

$$PsdD_n = (\tau_n + \Delta t) * c = \tau_n * c + \Delta t * c \quad (VII)$$

Em que $PsdD_n$ é a “falsa (*pseudo*) distância” entre o receptor e o satélite. Com a inclusão de uma nova variável (Δt), existem quatro incógnitas a serem determinadas:

- Longitude (X_P)
- Latitude (Y_P)
- Altitude (Z_P)
- Desvio de tempo (Δt)

Para encontrar essa solução, quatro equações são necessárias. Assim, a constelação de satélites GPS é disposta de maneira a assegurar que pelo menos 4 satélites estejam sempre acessíveis ou “visíveis”.

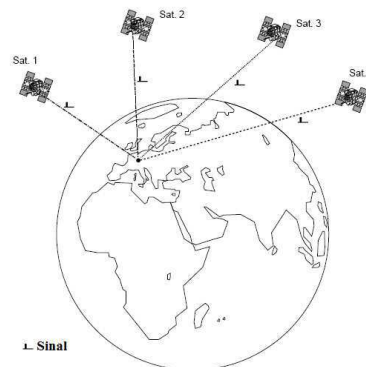


Figura 3: pelos menos 4 satélites GPS são necessários na determinação da posição.

2.3 Segmentos do GPS

Conforme descrito em sua página web oficial (GPS, 2015), o GPS pode ser subdividido em três segmentos:

- **Segmento espacial:** os satélites na constelação GPS ocupam seis planos orbitais, com 55 graus de inclinação, igualmente espaçados em volta da Terra, a aproximadamente 20200 km de distância do solo. Cada plano comporta de quatro a cinco satélites base, que levam 12 horas para completar sua órbita. Essa disposição assegura que no mínimo quatro deles estejam visíveis em qualquer ponto do globo terrestre. Ainda existem os satélites extras que não fazem parte do grupo principal utilizado na determinação da posição. Em 2011, houve um reagrupamento, e três desses satélites extras foram inseridos na constelação principal, melhorando a cobertura com pelo menos 27 unidades (de segunda geração - *Block II*) plenamente operacionais. Dados são transmitidos em diferentes frequências. A maioria dos receptores utiliza os sinais na frequência L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,6 MHz). A portadora L1 transmite, dentre outros sinais, alguns códigos pseudoaleatórios como o C/A (sigla em inglês para *Coarse/Acquisition*) com 1023 bits e o de Precisão (P). O primeiro é bastante utilizado em aplicações civis e empregado no cálculo da “falsa distância” entre satélite e receptor. O segundo é usado em aplicações que requerem elevada precisão, como em investidas militares, por exemplo. Esses códigos modulam dados a 50 bits por segundo, que incluem informações de órbita, relógio, sinais de sincronização, estado do satélite, entre outros.
- **Segmento de controle:** contempla as diversas estações base (de comando, de controle, de monitoramento, antenas) em solo terrestre que mantém comunicação com todos os satélites em órbita. São trocadas informações sobre relógio, movimento dos satélites, dados de órbita, entre outros. A estação de controle mestre está situada no Colorado, nos Estados Unidos.

- **Segmento do usuário:** envolve os receptores GPS de usuários finais. A partir do código C/A e da fase da portadora, determina-se a “falsa distância” satélite-receptor que, junto à posição já conhecida dos satélites, viabiliza o cálculo da localização. Dispositivos mais simples utilizam apenas os sinais na frequência L1. Os mais sofisticados usam a frequência L2 para atenuação de erros e melhora na precisão dos dados. Em síntese, a função de um receptor GPS é localizar quatro ou mais satélites, determinar a distância para cada um deles e empregar essa informação para deduzir a sua própria posição.

2.4 Fontes de erros no GPS

Além do assincronismo de relógios discutido anteriormente, diversas outras fontes de erros comprometem o resultado do GPS em diferentes níveis. Um desvio de 10 a 15 metros é verificado nas melhores soluções elementares de GPS, que utilizam apenas um receptor e os satélites no cálculo da posição (R. SABATINI, 2008). Abaixo são listadas as principais fontes de erro:

- **Disponibilidade seletiva:** consistia em erros (na posição dos satélites e na temporização, por exemplo) propositalmente inseridos pelo Governo dos Estados Unidos de maneira a piorar a qualidade das soluções GPS em aplicações civis sem acesso liberado à tecnologia mais aprimorada de alta precisão. Desvios de 50 a 100 metros eram verificados. Desde 2010, a disponibilidade seletiva foi desligada, deixando de ser uma fonte de erro (GPS-SYSTEM, 2015).
- **Ionosfera:** essa camada, de 60 a 1000 km acima do solo terrestre, é repleta de partículas ionizadas principalmente pela radiação solar, que influenciam a propagação de ondas eletromagnéticas atrasando os sinais. Logo, a velocidade não é sempre constante e igual a da luz ($c = 300.000 \text{ km/s}$) como assumido anteriormente. O efeito da ionização varia com a localização, bem como com o período do dia, e pode ser compensado com modelos geofísicos ou com receptores que trabalham em dupla frequência (L1 e L2).

Desvios de até 3 metros são geralmente verificados na posição, podendo se acentuar de acordo com as circunstâncias (*GPS Compendium, 2009*).

- **Troposfera:** a variação de densidade das moléculas de gás e a humidade do ar (vapor de água) nessa camada, situada de zero a 15 km acima da superfície terrestre, também provocam atrasos de propagação que podem ser estimados. O aumento da densidade (inversamente proporcional à altitude) e da humidade retarda o sinal de GPS. Desvios de até 1 metro são geralmente verificados na posição, podendo também se acentuar de acordo com as circunstâncias (*GPS Compendium, 2009*).
- **Efemérides:** a posição do satélite não é perfeitamente exata. Erros nas informações de órbita e de localização se acumulam afetando o resultado final do GPS. Desvios de até 2 metros são usualmente verificados (*Corvallis Microtechnology, 1996*).
- **Relógio:** apesar dos satélites possuírem relógios atômicos a bordo, extremamente acurados, desvios temporais são acumulados ao longo do tempo e acarretam imprecisões ao cálculo de posições. Estações base transmitem algumas correções com certa frequência, mas ainda assim existe susceptibilidade a erros. Desvios de até 2 metros são normalmente verificados (*Corvallis Microtechnology, 1996*).
- **Multicaminho:** o sinal enviado pelos satélites podem sofrer reflexões em certos obstáculos, como construções, árvores, montanhas, e provocar interferências e atrasos na medição de tempo. Desvios na posição de 1 a 2 metros são geralmente constatados (*GPS Compendium, 2009*).
- **Receptor:** dependendo da qualidade do receptor GPS, erros de arredondamento, ruído de medição ou atrasos podem afetar os resultados. Desvios na posição de 1 a 2 metros podem ser verificados (*GPS-SYSTEM, 2015*).

- **Constelação de satélites – diluição de precisão:** a geometria da disposição dos satélites, no espaço, também afeta o resultado dos cálculos, além da “falsa distância”. Quanto mais afastados estiverem, melhores são as soluções. Essa configuração espacial é expressa em termos de um valor escalar conhecido como DOP, em inglês *Dilution of Precision*. Se o DOP é elevado, ou seja, os satélites estão muito próximos, a imprecisão será maior. Há diferentes tipos de DOP calculados por receptores GPS: geométrico (GDOP), horizontal (HDOP), vertical (VDOP), de posição (PDOP), de tempo (TDOP). O DOP geométrico, por exemplo, determina a influência da geometria da constelação de satélites na posição em 3D e na medição de tempo. O vertical por sua vez está relacionado ao efeito da configuração no cálculo da altitude. Quando mais de quatro satélites estão visíveis, receptores GPS utilizam aqueles com o menor DOP.

2.5 GPS diferencial - DGPS

Se considerarmos dois receptores GPS próximos (um fixo e outro móvel), boa parte dos efeitos causados pelas fontes de erros (ionosfera, troposfera, efemérides, relógio) serão basicamente repetidos para ambos os dispositivos. Em posse dos dados do receptor fixo (estação base com posição conhecida) e do móvel, é possível quase que totalmente eliminar as distorções através de operações de subtração entre eles. Nesse cálculo, o GPS diferencial (em inglês *Differential GPS - DGPS*) emprega, na maioria dos casos, dupla diferença, envolvendo pelo menos dois receptores (fixo e móvel) e dois satélites. Já na determinação da “falsa distância”, existem duas técnicas comumente utilizadas: DGPS baseado em código e o DGPS baseado em fase da portadora.

2.5.1 DGPS baseado em código

Neste método, o código C/A é utilizado na determinação do tempo de propagação do sinal emitido pelo satélite ao receptor, viabilizando o cálculo da “falsa distância”. Como a estação base está situada em uma posição conhecida e rigorosamente exata,

é possível corrigir as medições distorcidas advindas do GPS. A partir da comparação do valor verdadeiro com o valor medido da “falsa distância”, determina-se uma correção para cada satélite visível, e essa é enviada aos receptores móveis, que a aplicam em seus cálculos de distância. Quanto mais próximos os receptores fixo e móvel estiverem, mais semelhantes são as condições externas, e melhores são os resultados de posição. A transmissão dos fatores de correção segue um protocolo definido e pode ocorrer via rádio, internet, entre outros meios, em tempo real ou não. Com o DGPS baseado em código, quaisquer erros que não estejam relacionados à ruído no receptor e a multicaminho podem ser desprezados, atingindo-se precisões de 1 a 3 metros na posição nos melhores casos. É importante destacar que apenas sinais dos satélites visíveis pela estação base podem ser corrigidos (R. SABATINI, 2008).

2.5.2 DGPS baseado em fase da portadora

Diferentemente do DGPS baseado em código, neste método a “falsa distância” é calculada a partir do número de comprimentos de onda do sinal GPS (do receptor ao satélite) e de sua fase. Para o sinal de frequência L1 igual a 1575,42 MHz, seu comprimento de onda vale aproximadamente 19 cm, o que resulta em cálculos de distância com precisão também a nível de centímetros. Vide figura abaixo.

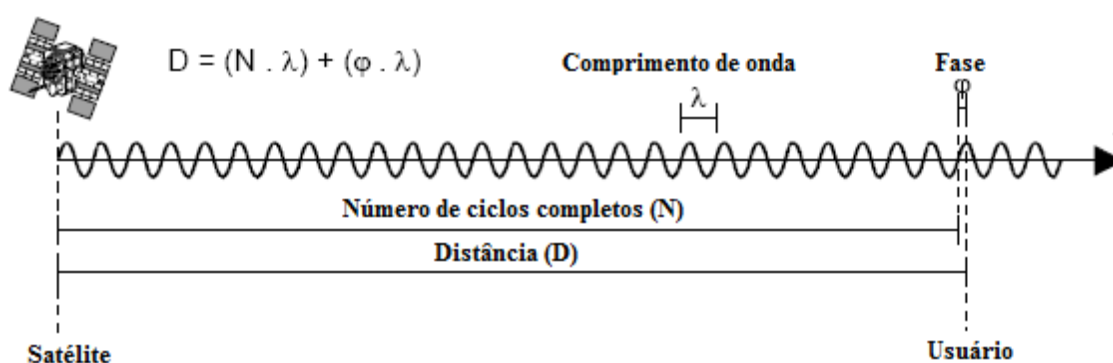


Figura 4: princípio do GPS diferencial baseado em fase da portadora.

Determinar o valor da fase da portadora (ϕ) é algo relativamente simples e facilmente confrontado com as medições feitas pelas estações de referência (receptor fixo). No entanto, isso não é suficiente para calcular a distância (D). É preciso

determinar o número de ciclos completos (N) do satélite ao usuário (receptor móvel). Esse é o maior desafio, comumente chamando de problema de resolução de ambiguidade ou AR (*Ambiguity Resolution*). Existem diferentes métodos de se determinar esse valor. Quando se consegue calcular um número inteiro, resultados de posição bastante precisos e exatos são atingidos. Posicionar o receptor móvel em uma posição previamente conhecida, posicioná-lo a menos de 1 comprimento de onda da estação base ou ainda determinar N em tempo real, enquanto o receptor se move, consistem em alguns desses métodos. Esta última solução é chamada de GPS Cinemático em Tempo Real ou *Real-Time Kinematic - RTK GPS* em inglês. Com a ambiguidade resolvida (ou seja, N inteiro, solução fixa), uma exatidão na ordem de 2 cm ou menos pode ser atingida (R. SABATINI, 2008). Caso contrário, verifica-se de 10 a 30 cm de desvio na posição, nos melhores casos. Até o primeiro número de ciclos N ser resolvido para cada satélite, leva-se um tempo de 30 a 40 minutos (*Corvallis Microtechnology, 1996*). Toda vez que o receptor perde o vínculo com um dado satélite, N precisa ser recalculado e um fenômeno chamando de “perda de ciclo” acontece, isto é, N salta para um novo valor, diferente do calculado instantes antes.

2.6 Estações base ou de referência

As estações bases ou de referência podem se apresentar em diversas formas:

- **Local:** estações de referência locais são interessantes do ponto de vista da proximidade com o receptor móvel. Conforme já foi dito anteriormente, deseja-se que as condições atmosféricas (efeitos de ionosfera e troposfera) e efemérides, por exemplo, sejam as mais correlacionadas possíveis para os dois receptores. Consequentemente, esses erros são praticamente anulados pelas operações de diferença. Para distâncias maiores de 250 km, soluções de DGPS podem deixar de ser interessantes no tocante à exatidão e à precisão, abrindo espaço para outras técnicas de GPS. A desvantagem de usar uma estação base local própria é a necessidade de se conhecer com exatidão a posição onde ela está fixada, o que nem sempre é uma tarefa simples.

- **Regional:** trata-se de uma opção alternativa à instalação de um receptor local próprio. Informações de correção podem ser obtidas, através da internet, de estações base administradas por certas instituições e governos. Por exemplo, a *EUREF Permanent Network* é uma rede europeia com mais de 250 estações de referência espalhadas por diversas regiões em posições fixas precisamente determinadas (*EUREF Permanent Network, 2015*). Dados provenientes dessas estações são concentrados em servidores e disponibilizados para usuários pela rede mundial de computadores através do protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). Receptores móveis podem usá-los em tempo real no cálculo de posição.
- **Área ampla:** uma terceira opção é utilizar DGPS de Área Ampla (*Wide Area DGPS - WADGPS*) ou Sistemas de Reforço Baseado em Satélite (*Satellite Based Augmentation Systems - SBAS*) como o WAAS, nos EUA, e o EGNOS na Europa. Correções e outras informações complementares advindas de grandes redes com várias estações de referência, dispersas em uma área extensa, são transmitidas por satélites atingindo um alcance elevado sem a necessidade do receptor móvel estar próximo de uma determinada estação base. Não é preciso também conexão com a internet ou receptores de ondas de rádio dedicados apenas para receber esses dados de correção, que, vale salientar, não podem ser usados em DGPS baseado em fase da portadora. Essa é uma desvantagem relevante do WADGPS.

2.7 RTKLIB

A RTKLIB é uma biblioteca *open source* de algoritmos de posicionamento para serem utilizados com sistemas globais de navegação por satélite, como o GPS, GLONASS, Galileo, etc. O software foi desenvolvido por Tomoji Takasu e Akio Yasuda da *Tokyo University of Marine Science and Technology* e é voltado principalmente para posicionamento padrão e preciso. O pacote de programas de código aberto suporta diversos protocolos GNSS (RINEX, OBS/NAV/GNAV/HNAV/LNAV/QNAV,

BINEX, NTRIP, NMEA, entre outros), mensagens proprietárias de diversos fabricantes de receptores (NovAtel, u-blox, SkyTraq), comunicação externa (Serial, TCP/IP, NTRIP, FTP/HTTP, etc), uma interface de programação com inúmeras funções, uma interface gráfica para Windows e de comando para Linux e, finalmente, vários modos de posicionamento com GNSS para aplicações em tempo real ou para pós-processamento. Esses modos estão listados a seguir:

- **Único:** dados adquiridos por um único receptor são utilizados no cálculo de posição. Pode ser com ou sem Serviço de Reforço Baseado em Satélite - SBAS. Sem SBAS, trata-se do modo de posicionamento mais elementar, isto é, não envolve nenhuma técnica refinada visando precisão e exatidão como o GPS diferencial, por exemplo.
- **Fixo:** neste modo, assume-se que a posição do receptor é estacionária. Ao longo do tempo, é calculada uma média das medições até se determinar a sua posição fixa. Não é utilizada técnica diferencial.
- **DGPS:** neste modo, a solução de DGPS baseado em código é usada na determinação da posição. É necessária a presença de uma estação base ou de referência.
- **Cinemático:** este modo está relacionado com GPS Cinemático em Tempo Real (RTK-GPS), que usa DGPS baseado em fase da portadora para calcular a posição, tendo como referência uma estação base.
- **Estático:** este modo também emprega DGPS diferencial baseado em fase da portadora, mas assume-se que o receptor GPS está parado.
- **PPP Cinemático:** O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é uma técnica de posicionamento pós-processado que utiliza correções nos dados de relógio dos satélites, contidos nas mensagens de navegação, assim como efemérides precisas. Não é necessária uma estação de referência. Usualmente se deve esperar algum tempo para que esses dados estejam disponíveis. Essa técnica

nos permite obter posicionamento de ordem inferior ao metro. A acurácia da posição fornecida varia com o tempo de observação além do tipo de receptor utilizado, de uma ou duas frequências. O modo PPP cinemático foi desenvolvido para o caso de receptores em movimento.

- **PPP estático** – um modo análogo ao anterior, mas assume-se que o receptor está imóvel.
- **Base em movimento:** como o próprio nome já sugere, este modo é voltado para GPS Cinemático em Tempo Real em um caso atípico de estação base em movimento.

Tutoriais, casos de uso, testes, manuais e outras informações sobre a RTKLIB, assim como a implementação matemática de cada modo e algoritmo, podem ser encontradas na página web do projeto para *download* (RTKLIB, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresentada a fundamentação teórica, serão descritos a partir desta seção experimentos realizados com o objetivo de observar, na prática, o funcionamento da RTKLIB com GPS, especialmente, em sua versão diferencial. Uma tarefa importante é mensurar a exatidão e a precisão das posições encontradas, conhecendo a localização verdadeira. Para se determinar o valor verdadeiro, são necessários equipamentos profissionais e sofisticados de mapeamento de terreno, bastante utilizados na Engenharia Civil, mas que não estiveram acessíveis para este trabalho. Logo, as soluções encontradas não dizem respeito à exatidão absoluta, e sim, à precisão das medidas.

Uma vez que o receptor está parado, espera-se que os valores difiram, mas dentro de uma faixa nominal pequena, em torno de um valor quase verdadeiro. Ao se medir desvios em relação a esse valor, é possível avaliar a qualidade dos resultados. No caso do receptor em movimento, uma outra técnica precisa ser empregada. Caminhos foram planejados e, a partir dos experimentos com GPS nessas rotas, os resultados obtidos foram confrontados com os esperados. A seguir, listam-se os equipamentos utilizados e os procedimentos experimentais realizados na cidade de Lovaina, na Bélgica, utilizando estações de referência em outras cidades: Bruxelas e Dentergem.

3.1 Equipamentos utilizados

Os seguintes equipamentos foram utilizados nos experimentos:

- **Receptor u-blox EVK-6T-0-001**: kit de teste vendido pelo fabricante u-blox com conexão USB/UART/DDC, um módulo GPS LEA-6T (50 canais, GPS L1) interno e uma antena ativa com cabo de 5 metros. Para soluções com DGPS baseado em fase da portadora, é fundamental que o receptor forneça dados não processados, chamados de *raw measurement data*, em inglês, assim como dados de navegação. No EVK-6T essas informações são obtidas através das mensagens RXM-RAW e RXM-SFRMB, respectivamente, de acordo com o protocolo binário UBX. Avaliação positiva

no mercado, tamanho reduzido, baixo consumo e preço compatível com os concorrentes são algumas características que fazem deste kit uma excelente opção. Folha de dados, manuais e outras informações estão disponíveis na página web do fabricante (*LEA-6T module*, 2015).

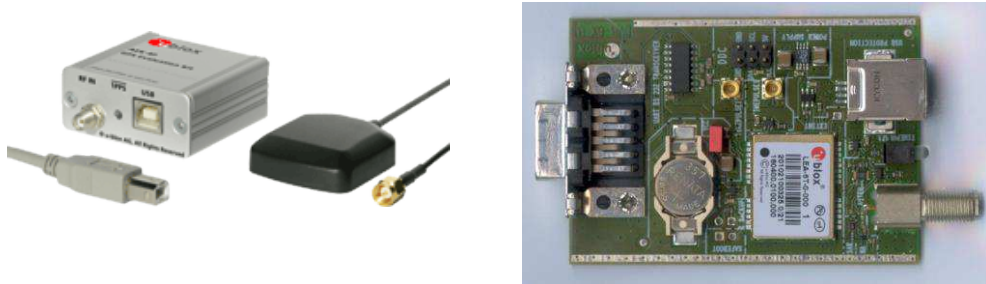


Figura 5: kit receptor GPS u-blox EVK-6T.

- **Computador:** PC rodando Windows com RTKLIB v2.4.2 (biblioteca de algoritmos de posicionamento), Lefebure NTRIP Caster (utilizado para replicar mensagens de correção advindas das estações de referência, permitindo que dois modos de posicionamento rodem em paralelo) e u-center 6.0 (software de configuração parte do kit EVK-6T).
- **Tripés:** dois suportes para a antena do kit GPS EVK-6T.

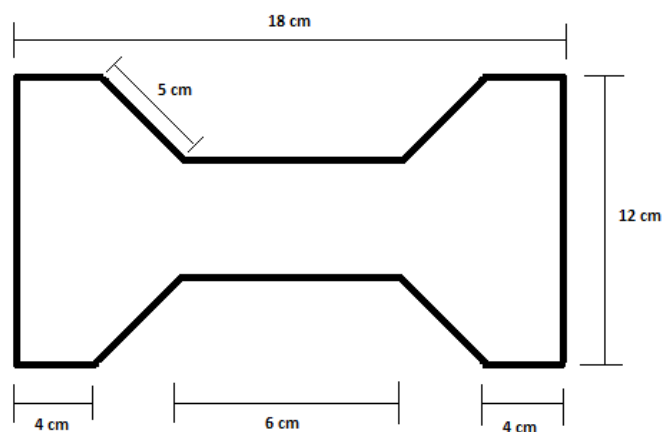


Figura 6: dimensões da antena 1.

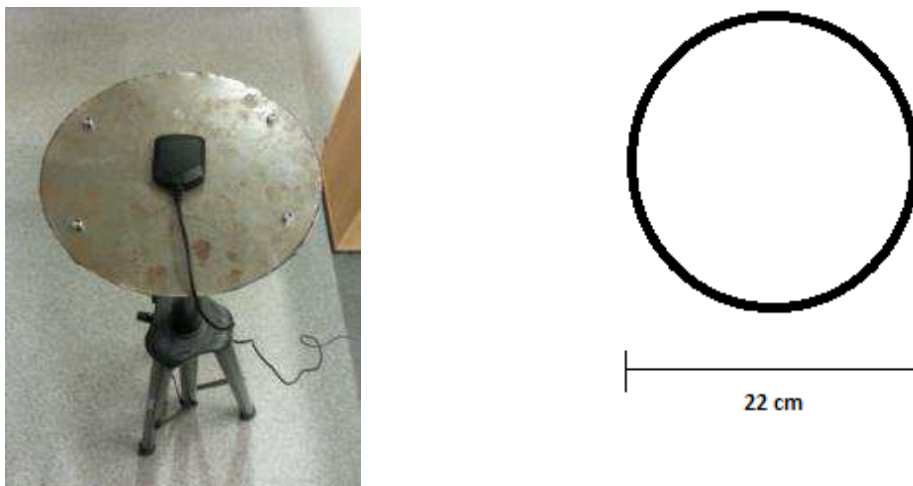


Figura 7: dimensão da antena 2.

3.2 Estações de referência utilizadas

Em posse de apenas um dispositivo GPS u-blox EVK-6T como receptor móvel, o que inviabilizou a instalação de uma base própria local, foram utilizadas as estações bases regionais mais próximas da cidade de Lovaina, na Bélgica, com dados de correção acessíveis via NTRIP. As estações de referência fazem parte da *EUREF Permanent Network – EPN* (*EUREF Permanent Network*, 2015).

- **EUREF BRUX0** situada em Bruxelas, na Bélgica. Mais informações podem ser conferidas na página web do EUREF (*EUREF Permanent Network*, 2015).

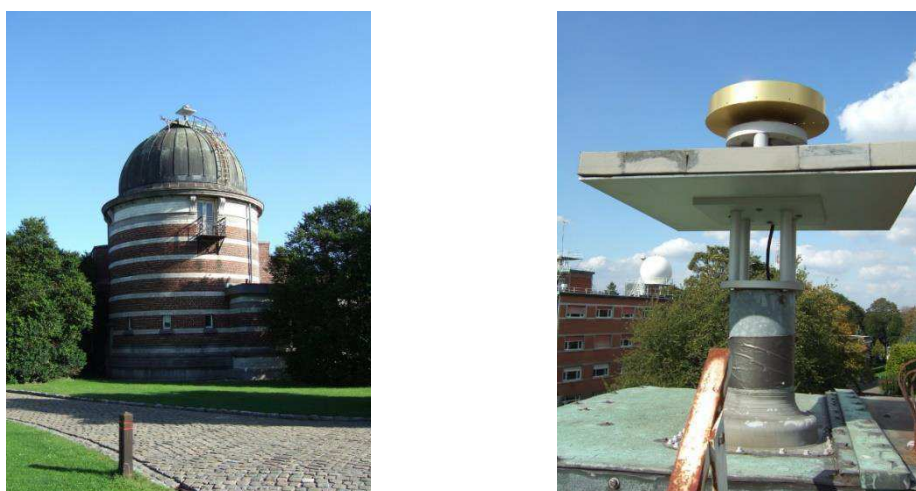


Figura 8: estação de referência BRUX0.

- **EUREF DENT0** situada em Dentergem, na Bélgica. Mais informações também podem ser conferidas na página web do EUREF (*EUREF Permanent Network*, 2015).



Figura 9: estação de referência DENT0.

3.3 Locais de teste

Os experimentos foram conduzidos em três lugares com características distintas na cidade de Lovaina, na Bélgica:

- **Localização 1:** prédio da empresa Essensium (Essensium, 2015) na rua *Gaston Geenslaan 9, 3001*, Lovaina, Bélgica.

Características: céu com baixa visibilidade, obstruções ao redor e piso de concreto, favorecendo a ocorrência de efeitos de multicaminho.

Distância aproximada até as estações de referência:

- BRUX0: 23,094 km.
- DENT0: 89,603 km.



Figura 10: localização 1 dos experimentos.

- **Localização 2:** prédio da empresa Essensium na rua *Gaston Geenslaan 9, 3001*, Lovaina, Bélgica.

Características: céu com boa visibilidade, construções ao redor, mas afastadas da antena GPS.

Distância aproximada até as estações de referência:

- BRUX0: 23,079 km.
- DENT0: 89,598 km.



Figura 11: localização 2 dos experimentos.

- **Localização 3:** campus da *Katholieke Universiteit Leuven* na rua Celestijnenlaan, Lovaina, Bélgica.

Características: céu com excelente visibilidade sem obstruções ao redor.

Distância aproximada até as estações de referência:

- BRUX0: 23,431 km.
- DENT0: 90,107 km.



Figura 12: localização 3 dos experimentos.

3.4 Procedimento experimental

Os experimentos se dividem em duas categorias: receptor estático e receptor em movimento. Para cada uma delas, foram feitas diversas medições, levando em consideração: os diferentes modos de posicionamento da RTKLIB e as três localizações mencionadas anteriormente.

São ilustrados nos diagramas abaixo os ambientes da RTKLIB para o caso de GPS com receptor único e GPS diferencial.

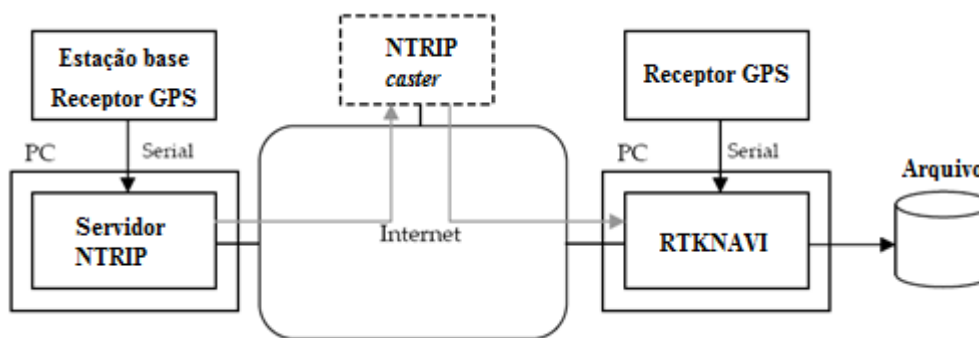


Figura 13: setup experimental para GPS diferencial.

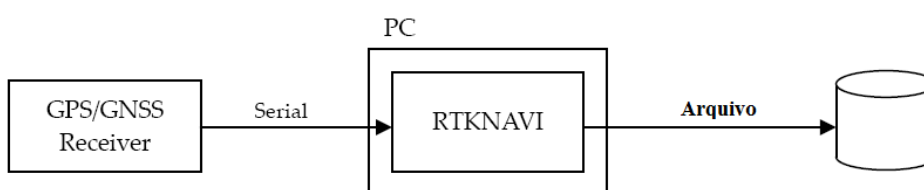


Figura 14: setup experimental para GPS com receptor único.

3.4.1 Receptor estático

Os experimentos desta categoria têm o objetivo de avaliar a qualidade das soluções propostas pela RTKLIB, levando em consideração os diferentes modos de posicionamento e processamento, resolução de ambiguidade, influência da distância até a estação de referência, assim como o tempo de convergência. Tudo com receptor parado. Para isso:

1. O conjunto tripé-antena foi posicionado na localização 1, 2 e 3;
2. O kit EVK-6T foi conectado a um computador Windows via porta USB;
3. Através do software u-center, o receptor foi configurado para exportar as mensagens UBX->RXM->RAW e UBX->RXM->SFRB. Mensagens NMEA foram desabilitadas.
4. A RTKLIB foi configurada por meio de sua interface gráfica intuitiva RTKNAVI. Dados não processados da estação base e do receptor estático foram salvos para posterior processamento.
5. A aquisição de dados foi iniciada. Pelo menos 1h depois, o experimento foi encerrado e repetido para diversas configurações da RTKLIB.

3.4.2 Receptor em movimento

Os experimentos desta categoria foram feitos para avaliar os resultados da RTKLIB com o receptor em movimento percorrendo os seguintes caminhos demarcados no solo:

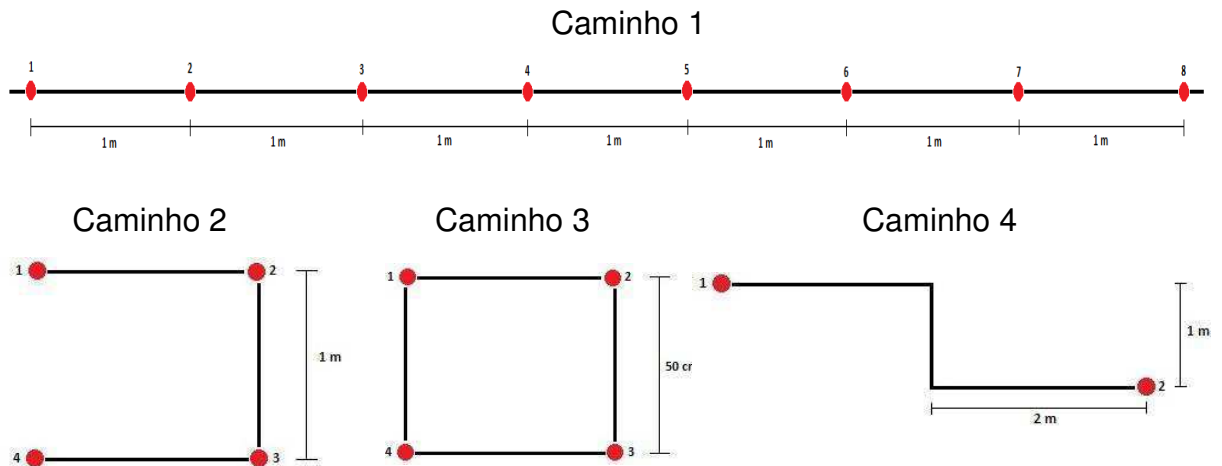


Figura 15: caminhos para os experimentos com receptor em movimento.

Excetuando-se a movimentação do receptor, o procedimento experimental foi o mesmo descrito na seção anterior.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante os experimentos, dados relativos à posição do receptor GPS foram adquiridos durante aproximadamente uma hora a partir de várias observações em dias e em horários diferentes. Eles foram processados durante (tempo real) e após esse processo; em seguida, plotados em relação a um certo ponto de referência, resultando em desvios Leste-Oeste, Norte-Sul, acima-abaxo. O desvio padrão, o valor RMS e a média aritmética desses valores foram calculados. A porcentagem de soluções fixas (N inteiro) e flutuantes, relacionada à resolução de ambiguidade (AR), também foi computada.

No caso do receptor estático, o ponto de referência é a própria posição da antena fixa, que foi determinada a partir de um conjunto de observações no modo de posicionamento estático da RTKLIB. A posição de referência foi extraída daquela com melhor visibilidade de céu, maior porcentagem de soluções fixas (com ambiguidade resolvida: N igual a um número inteiro) e maior precisão. Todos esses fatores estão relacionados à qualidade da solução. No caso do receptor em movimento, o caminho plotado a partir das medições foi comparado visualmente com a rota verdadeira.

Os resultados, mostrados em seguida, foram agrupados em três categorias de experimentos: receptor estático (modo estático da RTKLIB), receptor estático (modo cinemático da RTKLIB) e receptor em movimento (modo cinemático da RTKLIB).

4.1 Receptor estático (modo estático da RTKLIB)

Os resultados para cada observação, no modo estático da RTKLIB (método GPS diferencial baseado em fase da portadora para receptor parado), com a antena 1, são apresentados abaixo, divididos por localização. Foram listados os valores processados em tempo real e após os experimentos (valores pós-processados). Percebe-se ainda que os pontos de referência estão bem próximos da posição verdadeira através do Google Maps.

- **Localização 1:**

Posição de referência:

Latitude: 50,865187443° Longitude: 4,668751024° Altitude: 76,6774 m.



Figura 16: posição de referência para experimentos na localização 1. Fonte: Google Maps.

Valores calculados a partir do processamento em tempo real com resolução de ambiguidade:

Tabela 1: desvios de posição para localização 1 com receptor parado e modo de posicionamento estático em tempo real.

	AR (%)		Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
	Fixa	Flutu ante	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	31,9	68	-0,2313	1,1287	1,1520	-0,3160	0,7607	0,8236	1,4583	3,6345	3,9158
Obs 2	21,5	74,2	-0,0611	0,6996	0,7022	-1,1400	3,1512	3,3506	2,4501	6,2285	6,6923
Obs 3	19,7	77,5	-0,0917	0,2372	0,2543	-0,2566	0,7894	0,8300	1,2556	0,7785	1,4773
Obs 4	18	81,8	-2,7109	1,8635	3,2895	-2,4027	0,7641	2,5212	3,5930	2,3212	4,2773
Obs 5	23,8	75,2	-0,2106	0,5120	0,5536	-0,2238	-0,2238	0,4434	0,9628	1,0648	1,4355
Obs 6	22,9	76,9	-0,7361	0,9183	1,1768	0,1487	1,1716	1,1809	0,8000	0,8386	1,1590

Valores calculados a partir das soluções de localização pós-processadas com resolução de ambiguidade e **considerando apenas soluções fixas:**

Tabela 2: desvios de posição para localização 1 com receptor parado e modo de posicionamento estático pós-processado.

	AR (%)		Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
	Fixa	Flutu ante	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	39,6	60,4	-0,2053	0,7976	0,8234	-0,0395	0,4153	0,4170	0,5226	2,2705	2,3293
Obs 2	44,3	53,9	1,9995	1,0161	2,2427	-2,1815	0,2671	2,1978	2,9338	0,6009	2,9947
Obs 3	31,1	67,5	4,2397	2,4181	4,8803	-5,2475	2,6211	5,8653	6,0399	3,3733	6,9174
Obs 4	25	75	-2,7566	1,1027	2,9687	0,2792	2,1560	2,1728	1,1254	2,1358	2,4131
Obs 5	30,8	69,1	-0,0525	0,6474	0,6494	-0,4241	0,5893	0,7259	0,7084	0,5946	0,9247
Obs 6	86,1	13,9	-0,0005	0,0036	0,0036	0,0009	0,0045	0,0046	-0,0250	0,0164	0,0299

- **Localização 2:**

Posição de referência:

Latitude: 50,864936439° Longitude: 4,668663963° Altitude: 76,7851 m.



Figura 17: posição de referência para os experimentos na localização 2. Fonte: Google Maps.

Valores calculados a partir do processamento em tempo real com resolução de ambiguidade:

Tabela 3: desvios de posição para localização 2 com receptor parado e modo de posicionamento estático em tempo real.

	AR (%)		Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
	Fixa	Flutuante	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	23,2	76,5	0,6861	0,2627	0,7347	0,7131	0,4067	0,8208	1,0654	0,9083	1,3999
Obs 2	20,6	79,2	-0,6677	0,3593	0,7582	0,4949	0,7171	0,8713	2,7540	0,7410	2,8519
Obs 3	13,5	86,4	-1,1022	0,3698	1,2625	1,1441	0,5215	1,2574	0,8227	1,5470	1,7520
Obs 4	19,2	80,3	0,0230	0,5242	0,5246	-1,6297	0,3498	1,6668	2,5951	0,8891	2,7432
Obs 5	74,6	25,3	-0,0098	0,0956	0,0961	0,0674	0,2623	0,2708	0,0674	0,3388	0,2708
Obs 6	10,7	88,9	-1,8603	1,8923	1,8923	1,4841	0,3980	1,5365	-0,7452	1,0406	1,2798

Valores calculados a partir das soluções de localização pós-processadas com resolução de ambiguidade e **considerando apenas soluções fixas:**

Tabela 4: desvios de posição para localização 2 com receptor parado e modo de posicionamento estático pós-processado.

	AR (%)		Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
	Fixa	Flutuante	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	66,4	33,6	-0,9877	0,3796	1,0581	0,9197	0,1931	0,9397	-0,8580	0,6338	1,0665
Obs 2	46,4	53,6	0,0598	0,0594	0,0843	0,0471	0,1377	0,1455	0,2015	0,1812	0,2710
Obs 3	76,2	23,8	0,0003	0,2364	0,2364	0,1379	0,2979	0,3282	-0,1419	0,5712	0,5885
Obs 4	30,6	69,3	-7,7261	4,6607	9,0217	-3,9029	6,6650	7,7207	8,0383	8,5986	11,7675
Obs 5	89,0	11,0	0,0123	0,0039	0,0129	0,0863	0,0318	0,0920	-0,1567	0,0568	0,1666
Obs 6	19,8	80,2	-2,0293	0,2085	2,0400	0,6663	0,7888	1,0322	-0,4665	0,9270	1,0372

- **Localização 3:**

Posição de referência:

Latitude: 50,861937272° Longitude: 4,675467583° Altitude: 67,6769 m.

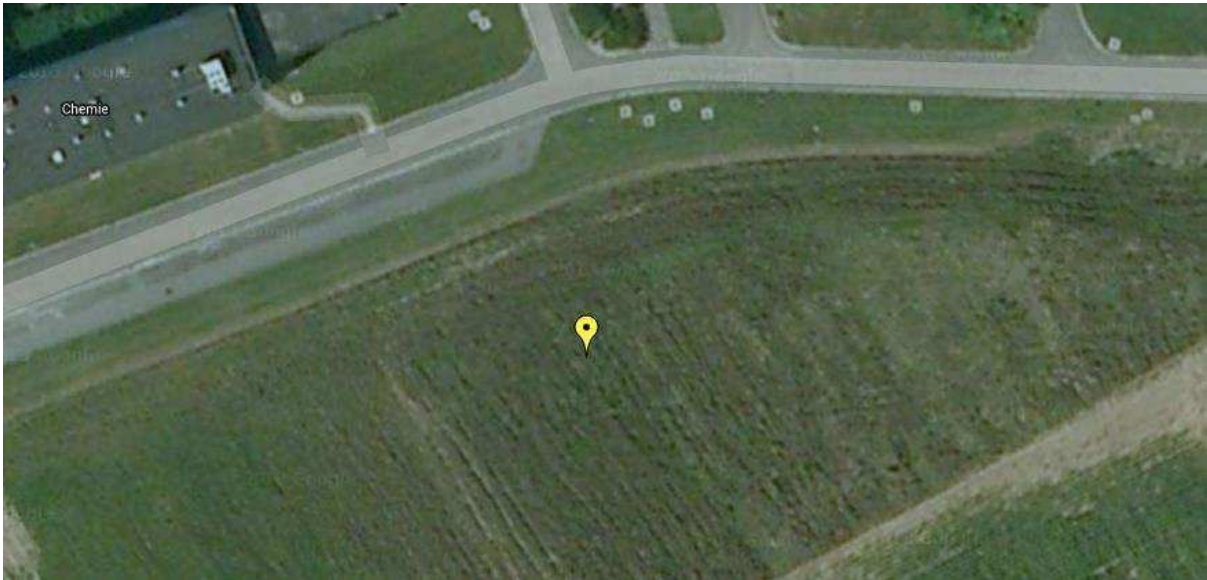


Figura 18: posição de referência para os experimentos na localização 3. Fonte: Google Maps.

Valores calculados a partir do processamento em tempo real com resolução de ambiguidade:

Tabela 5: desvios de posição para localização 3 com receptor parado e modo de posicionamento estático em tempo real.

	AR (%)		Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
	Fixa	Flutuante	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	84,1	15,6	-0,0015	0,0918	0,0917	0,1291	0,3405	0,3640	0,3412	0,3219	0,4689
Obs 2	50,7	49,1	0,0227	0,0922	0,0949	0,1003	0,1498	0,1803	0,1820	0,6780	0,7019
Obs 3	76,5	23,4	0,0942	0,2608	0,2773	-0,0043	0,1711	0,1712	0,4237	0,1655	0,4549
Obs 4	42,4	57,1	0,7793	0,0722	0,7826	0,2569	0,0992	0,2754	-2,0007	0,1862	2,0093
Obs 5	39,2	60,7	-0,0873	0,0513	0,1013	0,3428	0,1807	0,3875	0,3402	0,3304	0,4742
Obs 6	90,2	9,7	0,0438	0,0748	0,0867	-0,0050	0,1198	0,1198	0,3501	0,4621	0,5797
Obs 7	18,6	81,3	0,7295	0,0879	0,7348	0,8132	0,0576	0,8152	-1,5712	0,2691	1,5941
Obs 8	88,2	11,8	0,1089	0,1795	0,2099	0,0176	0,1564	0,1573	0,2500	0,9943	1,0252

Valores calculados a partir das soluções de localização pós-processadas com resolução de ambiguidade e **considerando apenas soluções fixas**:

Tabela 6: desvios de posição para localização 3 com receptor parado e modo de posicionamento estático pós-processado.

	AR (%)		Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
	Fixa	Flutuante	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	100	0	-0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0003	-0,0004	0,0004	0,0005
Obs 2	69,3	30,7	-0,0276	0,1367	0,1394	0,1157	0,2561	0,2810	-0,8118	1,3577	1,5816
Obs 3	77,3	22,7	0,0247	0,0513	0,0569	-0,1150	0,0724	0,1359	0,0668	0,1031	0,1228
Obs 4	68,9	31,1	0,0521	0,2076	0,2140	0,2965	0,2829	0,4097	-0,3704	0,3040	0,4792
Obs 5	89,2	10,8	-0,0087	0,0103	0,0135	0,0496	0,0893	0,1021	-0,0184	0,0627	0,0653
Obs 6	83,8	16,2	0,7530	0,6160	0,9729	0,0166	0,4288	0,4291	0,4630	1,2171	1,3021
Obs 7	86,5	13,5	0,0902	0,0716	0,1152	-0,1238	0,0675	0,1410	-0,1452	0,0993	0,1759
Obs 8	32,9	67,1	0,4321	0,1768	0,4668	0,4534	0,0975	0,4637	-2,4639	0,6939	2,5597

4.1.1 Precisão das medidas

É esperado que os modos que envolvem GPS diferencial baseado em fase da portadora apresentem os resultados mais precisos, até a nível de centímetros conforme demonstrado por alguns valores dispostos nas tabelas acima. Com o intuito de perceber essa diferença de qualidade, as posições obtidas em tempo real foram plotadas para dois outros modos de posicionamento da RTKLIB: DGPS (GPS diferencial baseado em código) e Único (GPS com receptor único).

Para observação 3, localização 1, em tempo real, os resultados para GPS com receptor único estão plotados abaixo em vermelho. É claramente perceptível a diferença para a solução com GPS diferencial baseado em fase da portadora em cor verde/azul. O desvio padrão Norte-Sul, por exemplo, foi calculado em aproximadamente 26,70 metros para a primeira solução e 79 centímetros para a segunda.

Tabela 7: desvios de posição para GPS com receptor único.

	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 3	0,7266	6,0128	6,0558	-7,7968	26,6926	27,8047	22,3273	32,1982	39,1787



Figura 19: GPS com receptor único versus GPS diferencial baseado em fase.

Para observação 1, localização 1, os resultados no método de GPS diferencial baseado em código foram plotados em cor azul. A média, o desvio padrão e o valor RMS foram calculados (vide Tabela 8). Mais uma vez, percebe-se a superioridade do modo estático da RTKLIB com receptor parado. Enquanto o desvio padrão Norte-Sul foi de aproximadamente 76 centímetros para esse método (representado pela cor verde/amarela), foi de 12 metros para o DGPS com código.

Tabela 8: desvios de posição para DGPS baseado em código.

	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	0,8352	3,4727	3,5714	3,7228	11,9698	12,5342	7,5238	17,5022	19,0493

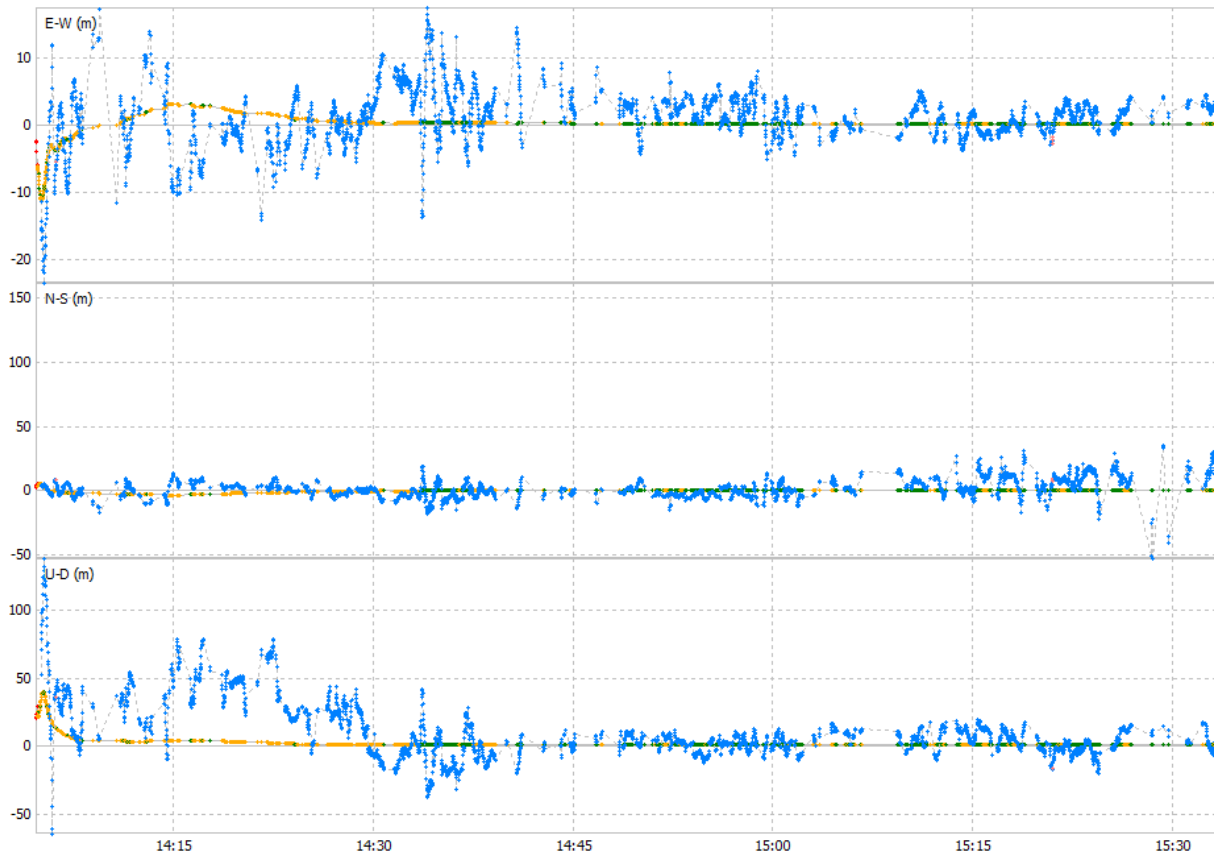


Figura 20: GPS diferencial baseado em código versus GPS diferencial baseado em fase.

O modo estático da RTKLIB é uma alternativa viável para determinação da posição de um receptor fixo, quando não se dispõe de um equipamento profissional de mapeamento. Um exemplo de aplicação seria na instalação de uma estação de referência local, em que é necessário calcular com boa exatidão a sua localização.

4.1.2 Resolução de ambiguidade

Já foi dito que, no método de GPS diferencial baseado em fase da portadora, é necessário determinar, além de fase, o número inteiro de ciclos N (comprimentos de onda do sinal GPS) do receptor a cada satélite visível, o que é chamado de resolução de ambiguidade (AR). Toda vez que o vínculo com um dado satélite é perdido, acontece uma perda de ciclo, que acarreta uma acentuada descontinuidade na posição, e N precisa ser recalculado. Conclui-se que em condições propícias à perda de ciclo, como lugares muito obstruídos, GPS baseado em fase com resolução de

ambiguidade pode não ser a melhor solução, ainda que o percentual de N inteiro seja elevado.

Considerando novamente a observação 3, na localização 1, com antena 1, é possível verificar a ocorrência de perda de ciclos, que está associada aos pontos em cor vermelha, no gráfico abaixo.

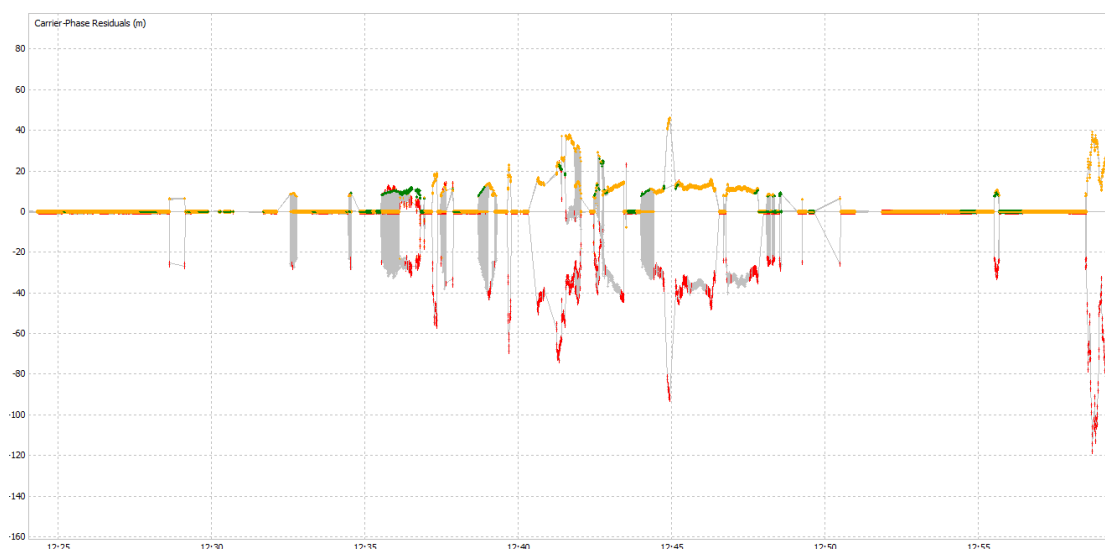


Figura 21: pontos vermelhos indicam perda de ciclo na resolução de ambiguidade.

Conseqüentemente, saltos na determinação da posição são observados com frequência, o que degrada os resultados. Pontos em cor verde correspondem à solução com ambiguidade resolvida (N inteiro), e pontos em cor amarela a um N flutuante na Figura 22.

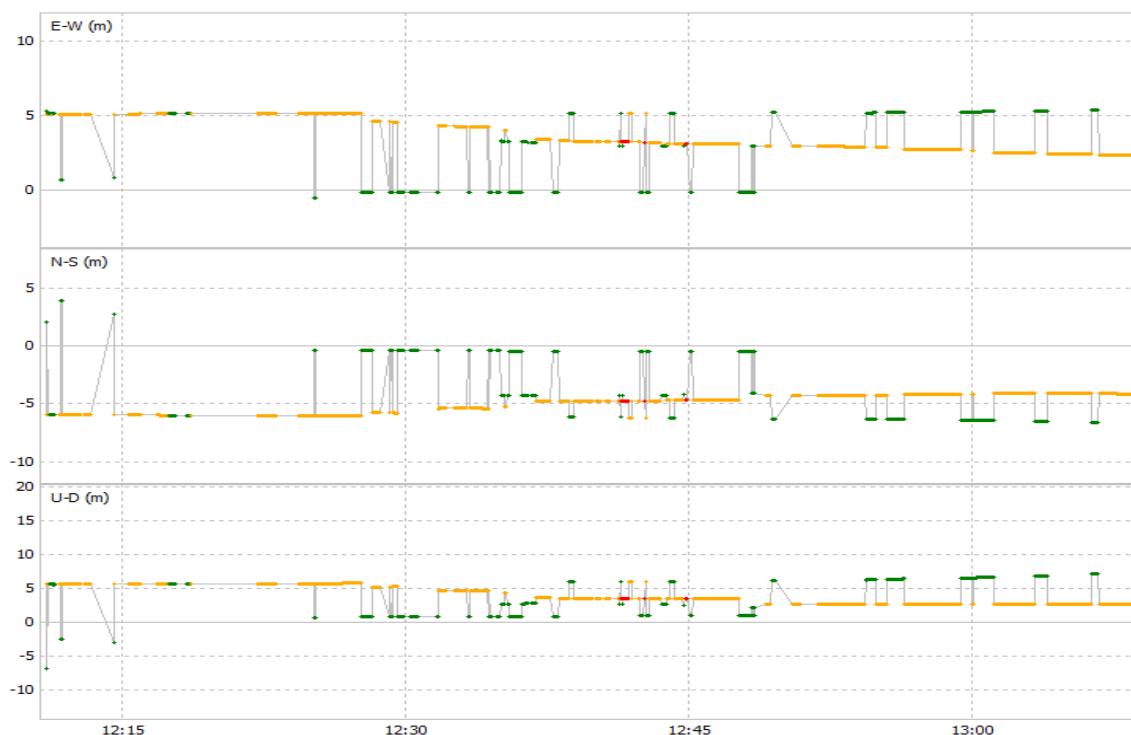


Figura 22: solução de posicionamento com GPS diferencial com resolução de ambiguidade. Observação 3, localização 1.

Nesses casos, a solução sem resolução de ambiguidade (vide gráfico abaixo) é mais recomendada. Percebe-se claramente que os resultados são bem mais comportados.

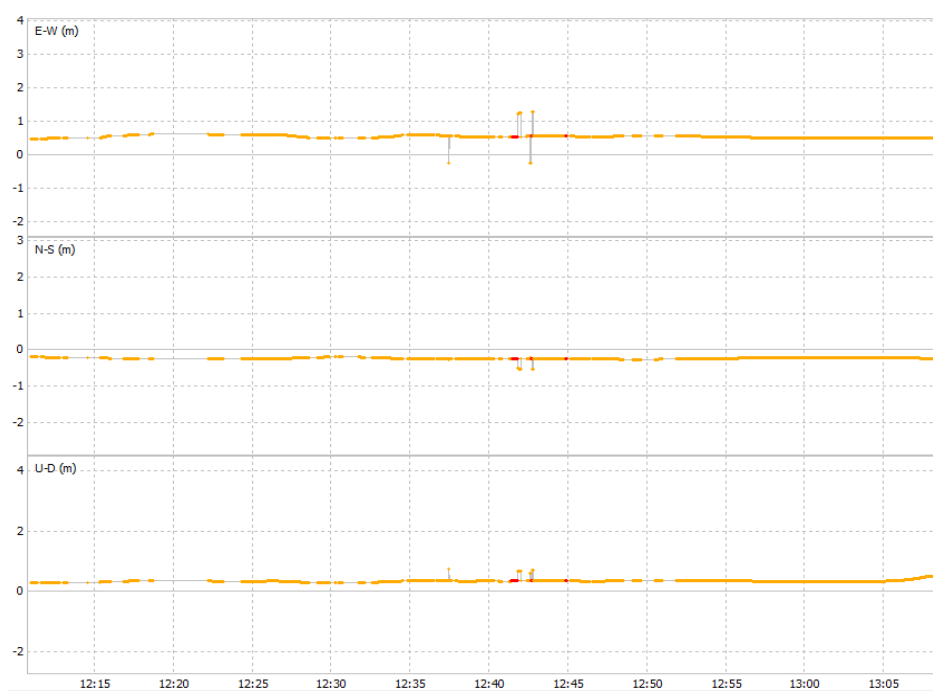


Figura 23: solução de posicionamento com GPS diferencial sem resolução de ambiguidade. Observação 3, localização 1.

É importante destacar que não apenas obstáculos no ambiente causam perda de ciclos, mas acelerações acentuadas do receptor, efeitos de multicaminho, distúrbios no sinal GPS causados por atividades na ionosfera, ruído, enfim.

Para que se atinja elevadas precisões, um conjunto de fatores precisam ser favoráveis, como visibilidade do céu, porcentagem de soluções fixas, diluição de precisão (DOP), entre outros. A observação 1, na localização 3, é um bom exemplo.

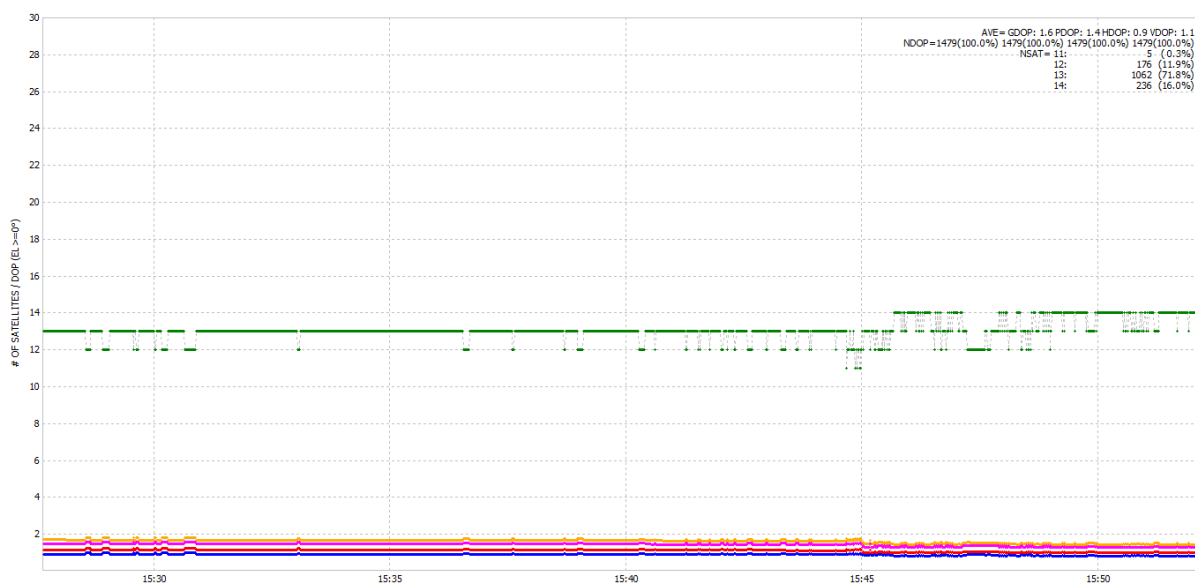


Figura 24: número de satélites válidos e DOP para observação 1, localização 3.

O elevado número de satélites válidos (13 em 71,8% das posições), somado a um alto percentual de soluções fixas (maior que 84%) mais uma boa diluição de precisão (menor que 1,7), resultaram em precisões Leste – Oeste, Norte – Sul, na ordem de milímetros:

Dados pós-processados:

Tabela 9: desvios de posição pós-processados para observação 1 na localização 3.

	AR (%)		Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
	Fixa	Flutuante	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	100	0	-0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0003	-0,0004	0,0004	0,0005

Dados em tempo real:

Tabela 10: desvios de posição em tempo real para observação 1 na localização 3.

	AR (%)		Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
	Fixa	Flutuante	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	84,1	15,6	-0,0015	0,0918	0,0917	0,1291	0,3405	0,3640	0,3412	0,3219	0,4689

De acordo com a severidade das condições ambientais, o percentual de soluções fixas aumenta ou diminui. Na localização 3, verificam-se as maiores taxas. Na localização 2, encontra-se um valor intermediário. Na localização 1, percebe-se os menores percentuais. Espera-se também que as soluções pós-processadas apresentem maiores taxas se comparadas com as calculadas em tempo real.

Finalmente, a resolução de ambiguidade na RTKLIB pode ser configurada de três formas diferentes de acordo com o perfil da aplicação:

- **Fixa:** a ambiguidade é continuamente resolvida até ser determinado e validado um número inteiro de ciclos.
- **Contínua:** como o próprio nome já sugere, a ambiguidade é constantemente resolvida.
- **Instantânea:** a ambiguidade é resolvida em instantes definidos, especificamente, no momento em que o receptor faz uma medição (*epoch*).

4.1.3 Distância da estação base

Foram feitos experimentos, em paralelo, utilizando correções provenientes das estações de referência BRUX0 e DENT0. O objetivo foi avaliar os resultados considerando a influência da distância até o receptor, situado na cidade de Lovaina. As diferenças encontradas ficaram na faixa dos 20 centímetros para o desvio padrão. O modo de posicionamento foi o estático da RTKLIB. Vide tabelas e gráfico abaixo.

- **Localização 1:**

Valores pós-processados:

Tabela 11: desvios de posição pós-processados, na localização 1, para as estações de referência BRUX0 e DENT0.

	AR (%)	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
BRUX0	N/A	-0,2701	0,0233	0,2711	-0,2456	0,0252	0,2469	0,2380	0,0207	0,2389
DENT0	N/A	-0,4669	0,0359	0,4681	-0,5573	0,0280	0,5580	0,0497	0,0246	0,0555

Valores em tempo real:

Tabela 12: desvios de posição em tempo real, na localização 1, para as estações BRUX0 e DENT0.

	AR (%)	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
BRUX0	N/A	-0,8470	0,7447	1,1278	-0,4187	0,7335	0,8445	1,2577	1,5729	2,0138
DENT0	N/A	-1,1045	0,8568	1,3978	-0,7350	0,7923	1,0806	1,3908	1,9228	2,3730

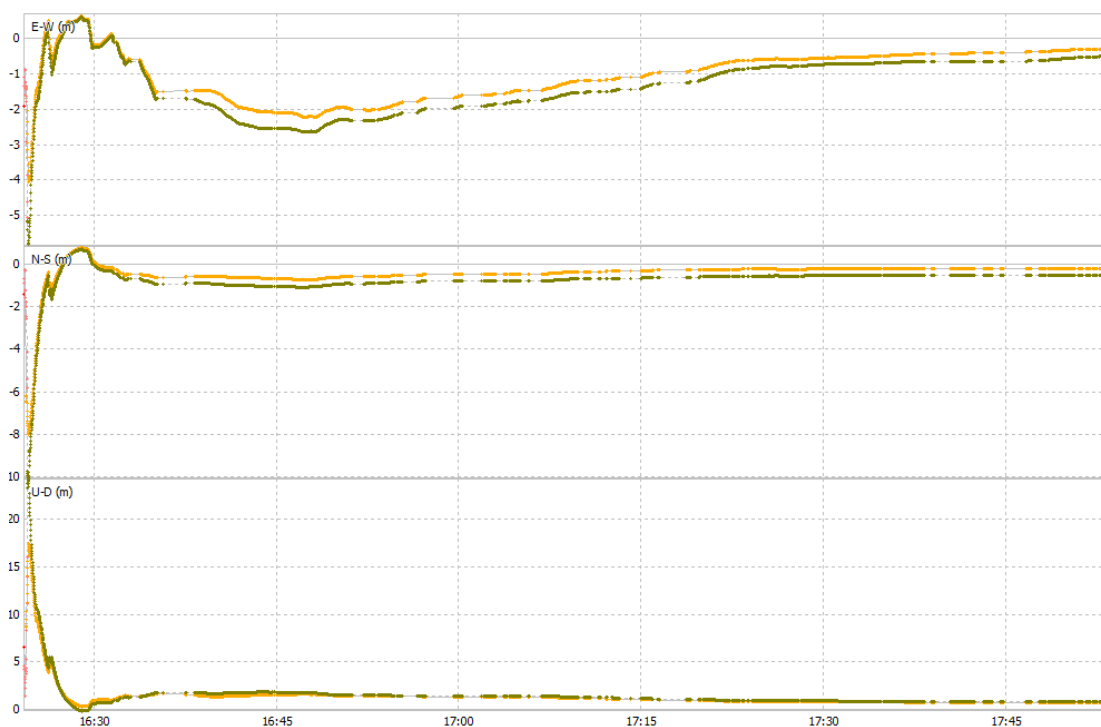


Figura 25: soluções de posicionamento para duas estações de referência diferentes: BRUX0 e DENT0.

- **Localização 2:**

Valores pós-processados:

Tabela 13: desvios de posição pós-processados, na localização 2, para as estações de referência BRUX0 e DENT0.

	AR (%)	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
BRUX0	N/A	-0,7089	2,0405	2,1599	-2,0809	6,4952	6,8195	3,0706	10,4396	10,8804
DENT0	N/A	-1,0576	2,0939	2,3456	-2,6537	6,4655	6,9881	3,1503	10,4695	10,9318

Valores em tempo real:

Tabela 14: desvios de posição em tempo real, na localização 2, para as estações BRUX0 e DENT0.

	AR (%)	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
BRUX0	N/A	-1,9528	2,3503	3,0554	-3,0474	7,4055	8,0069	5,2296	11,7085	12,8215
DENT0	N/A	-2,0569	2,4176	3,1739	-3,6243	7,4410	8,2756	5,5812	11,8421	13,0897

- **Localização 3:**

Valores pós-processados:

Tabela 15: desvios de posição pós-processados, na localização 3, para as estações de referência BRUX0 e DENT0.

	AR (%)	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
BRUX0	N/A	0,0412	0,0326	0,0525	-0,0494	0,0128	0,0510	0,0149	0,0213	0,0260
DENT0	N/A	-0,4751	0,1170	0,4893	-0,2982	0,0463	0,3018	-0,3086	0,0607	0,3145

Valores em tempo real:

Tabela 16: desvios de posição em tempo real, na localização 3, para as estações BRUX0 e DENT0.

	AR (%)	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
BRUX0	N/A	0,1541	0,1968	0,2499	-0,0106	0,1900	0,1902	0,3016	0,3465	0,4593
DENT0	N/A	-0,3893	0,3472	0,5216	-0,2933	0,1696	0,3387	0,2435	0,4131	0,4795

Em outros experimentos com resolução de ambiguidade, observou-se também que o percentual de soluções fixas foi maior para estação mais próxima, a BRUX0, do que para DENT0. Isso se deve, em parte, ao fato de o número de satélites visíveis

pelo receptor local e pela estação base, ao mesmo tempo, ser maior para BRUX0 na maioria das vezes.

4.1.4 Tempo de convergência

Tendo em vista que o método estático da RTKLIB apresenta os melhores resultados de posicionamento para um receptor parado, é importante mensurar o tempo de convergência da solução, ou seja, a partir de quantos minutos a localização calculada se estabiliza e atinge um valor confiável; ou ainda o tempo decorrido desde que o receptor inicia o recebimento das correções até se chegar à solução fixa. Isso é particularmente importante no caso de uma estação de referência local, quando o modo estático da RTKLIB pode ser utilizado para encontrar a sua posição fixa.

Os experimentos levaram à conclusão que após 40 minutos, na maioria das vezes, o tempo de convergência já foi atingido, dependendo da qualidade da observação. Por exemplo, resultados obtidos a partir da observação 3, na localização 3, ratificam essa hipótese.

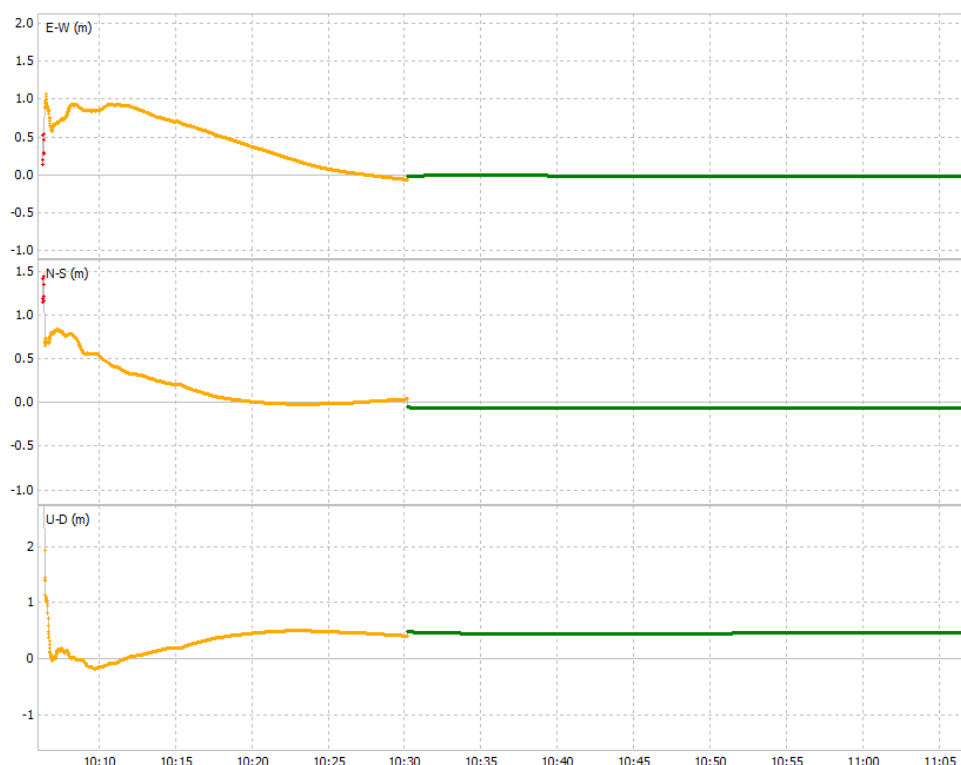


Figura 26: tempo de convergência para o modo estático da RTKLIB.

4.2 Receptor estático (modo cinemático da RTKLIB)

Os resultados apresentados anteriormente no método GPS diferencial baseado em fase da portadora foram obtidos a partir de experimentos no modo de posicionamento estático da RTKLIB, especialmente, desenvolvido para receptores permanentemente imóveis. Quando existe a possibilidade de movimentação, o modo mais apropriado é o cinemático ou RTK-GPS, que também utiliza a técnica do GPS diferencial baseado em fase. Os desvios de posição calculados para um receptor parado nesse modo de posicionamento podem ser vistos a seguir para a antena 1 e antena 2, na localização 2 e 3.

- **Localização 2**
 - **Antena 1**

Resultados no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade:

Tabela 17: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade. Localização 2, antena 1.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	SIM	-0,8062	1,7377	1,9153	-0,8822	4,1857	4,2768	1,8877	3,9042	4,3359
Obs 2	SIM	0,0764	0,3705	0,3782	-1,3362	0,5680	1,4518	1,4548	1,3128	1,9592
Obs 3	SIM	0,3752	0,4005	0,5487	0,2196	0,6958	0,7294	0,8526	1,1299	1,4153
Obs 4	SIM	0,9198	0,9115	1,2949	0,5784	0,5171	0,7758	1,1198	2,1429	2,4175
Obs 5	SIM	0,0693	0,1934	0,2054	-0,0280	0,4177	0,4186	0,4201	1,1342	1,2094
Obs 6	SIM	0,2592	0,4504	0,5195	-0,5156	0,7144	0,8809	1,3762	1,8075	2,2714

Resultados no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade:

Tabela 18: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade. Localização 2, antena 1.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	N/A	-0,6686	1,4894	1,6323	-0,7060	3,5911	3,6592	1,2664	3,6392	3,8526
Obs 2	N/A	0,0751	0,4283	0,4347	-1,3547	0,6466	1,5010	1,4610	1,0923	1,8240
Obs 3	N/A	0,3742	0,3554	0,5160	0,1961	0,6598	0,6881	0,8303	1,1105	1,3864
Obs 4	N/A	0,9573	0,8485	1,2791	0,5659	0,4839	0,7445	1,1043	2,1506	2,4172
Obs 5	N/A	0,1957	0,2163	0,2917	-0,0575	0,4453	0,4490	0,3556	1,2378	1,2877
Obs 6	N/A	0,2700	0,4469	0,5221	-0,7785	0,4862	0,9177	1,4954	1,6557	2,2308

- **Antena 2**

Resultados no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade:

Tabela 19: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade. Localização 2, antena 2.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	SIM	0,0526	0,1250	0,1356	-0,0823	0,4050	0,4132	0,4645	0,3088	0,5578
Obs 2	SIM	0,0258	0,1091	0,1121	0,0740	0,1142	0,1361	0,3887	0,3065	0,4950
Obs 3	SIM	0,0103	0,0901	0,0907	0,2522	0,5907	0,6422	1,5039	2,0690	2,5575
Obs 4	SIM	-0,2957	0,4597	0,5465	-0,0715	0,3052	0,3134	0,8287	0,4650	0,9502
Obs 5	SIM	0,0294	0,0529	0,0605	0,0385	0,1203	0,1263	0,3570	0,1974	0,4080

Resultados no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade:

Tabela 20: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade. Localização 2, antena 2.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	N/A	0,0991	0,1836	0,2086	-0,2064	0,3667	0,4207	0,6108	0,2647	0,6657
Obs 2	N/A	-0,0612	0,1460	0,1583	-0,0779	0,1349	0,1557	0,6950	0,2987	0,7565
Obs 3	N/A	0,1794	0,2173	0,2818	0,3289	0,7612	0,8291	1,8081	2,1636	2,8194
Obs 4	N/A	-0,2945	0,4586	0,5450	-0,0743	0,2932	0,3025	0,8210	0,3967	0,9118
Obs 5	N/A	-0,1930	0,1525	0,2460	-0,4757	0,2139	0,5216	0,7655	0,2047	0,7924

- **Localização 3**

- **Antena 1**

Resultados no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade:

Tabela 21: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade. Localização 3, antena 1.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	SIM	0,2199	0,2091	0,3034	-0,1163	0,4298	0,4452	-0,0094	0,2741	0,2742
Obs 2	SIM	-0,5770	0,3987	0,7013	0,7630	0,2929	0,8172	-3,8938	0,2278	3,0004
Obs 3	SIM	0,6497	0,1032	0,6578	0,1083	0,2442	0,2671	0,3173	0,4976	0,5901
Obs 4	SIM	0,0089	0,0701	0,0706	0,5501	0,1753	0,5773	-0,0853	0,1693	0,1896
Obs 5	SIM	0,0594	0,1570	0,1679	0,1233	0,2285	0,2596	-0,1924	0,6975	0,7234
Obs 6	SIM	0,0226	0,0632	0,0671	0,0234	0,2077	0,2090	0,2639	0,5484	0,6085
Obs 7	SIM	-0,0143	0,0977	0,1007	0,5810	0,2886	0,6487	-0,4013	0,6058	0,7266

Resultados no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade:

Tabela 22: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade. Localização 3, antena 1.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	N/A	0,2257	0,2060	0,3055	-0,1272	0,4295	0,4478	-0,0419	0,2311	0,2349
Obs 2	N/A	0,2680	0,1843	0,3252	0,3247	0,1532	0,3590	-1,2301	0,4530	1,3108
Obs 3	N/A	0,6483	0,0884	0,6543	0,1076	0,2424	0,2652	0,3167	0,4994	0,5913
Obs 4	N/A	0,0311	0,0704	0,0769	0,1462	0,2108	0,2565	0,1427	0,2848	0,3185
Obs 5	N/A	0,1988	0,1692	0,2610	0,2747	0,1457	0,3110	-0,5570	0,3749	0,6714
Obs 6	N/A	0,1972	0,0844	0,2145	0,0266	0,2111	0,2127	0,3238	0,5685	0,6541
Obs 7	N/A	0,0182	0,8553	0,8553	0,5697	0,3550	0,6712	-0,3225	0,9679	1,0200

○ **Antena 2**

Resultados no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade:

Tabela 23: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB com resolução de ambiguidade. Localização 3, antena 2.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	SIM	0,0335	0,0399	0,0521	-0,0036	0,1957	0,1957	0,1500	0,7401	0,7550
Obs 2	SIM	0,0184	0,0409	0,0449	-0,0126	0,0770	0,0780	0,4649	0,1035	0,4762
Obs 3	SIM	0,0650	0,1012	0,1202	-0,0500	0,1433	0,1518	0,5108	0,1146	0,5234
Obs 4	SIM	-0,0292	0,0706	0,0764	0,0786	0,1275	0,1498	0,3841	0,1337	0,4067
Obs 5	SIM	0,0471	0,1129	0,1223	-0,1079	0,2048	0,2315	0,5818	0,2828	0,6469

Resultados no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade:

Tabela 24: desvios de posição com receptor parado no modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade. Localização 3, antena 2.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 1	N/A	-0,0318	0,0773	0,0836	-0,0142	0,2045	0,2049	0,1618	0,7725	0,7892
Obs 2	N/A	0,0187	0,0643	0,0670	-0,0943	0,1578	0,1838	0,5474	0,1375	0,5644
Obs 3	N/A	0,1220	0,0853	0,1488	-0,0415	0,1406	0,1466	0,5057	0,1165	0,5190
Obs 4	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Obs 5	N/A	0,0366	0,1186	0,1241	-0,2215	0,2183	0,3110	0,6521	0,2701	0,7058

Conforme esperado, a precisão das medidas foi melhor para localização 3 (boa visibilidade do céu) do que para localização 2 (visibilidade do céu moderada). A antena 2 por apresentar uma base mais simétrica e uniforme do que a antena 1, resultou em soluções de maior qualidade em termos de precisão e porcentagem de soluções fixas.

Se comparado ao modo de posicionamento estático da RTKLIB (em cor verde/amarela), o cinemático (em cor azul) apresenta resultados de qualidade levemente inferior para um receptor parado. Abaixo são apresentados resultados de duas observações feitas na localização 2 e 3, com a antena 2, rodando os dois métodos em paralelo.

- **Localização 2:**

Tabela 25: desvios de posição no modo estático e cinemático da RTKLIB na localização 2.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Modo Estático	SIM	0,0060	0,0370	0,0374	-0,0337	0,0288	0,0443	0,4716	0,1186	0,4863
Modo Cinemático	SIM	0,0344	0,1067	0,1121	-0,0389	0,0424	0,0575	0,4774	0,1546	0,5018

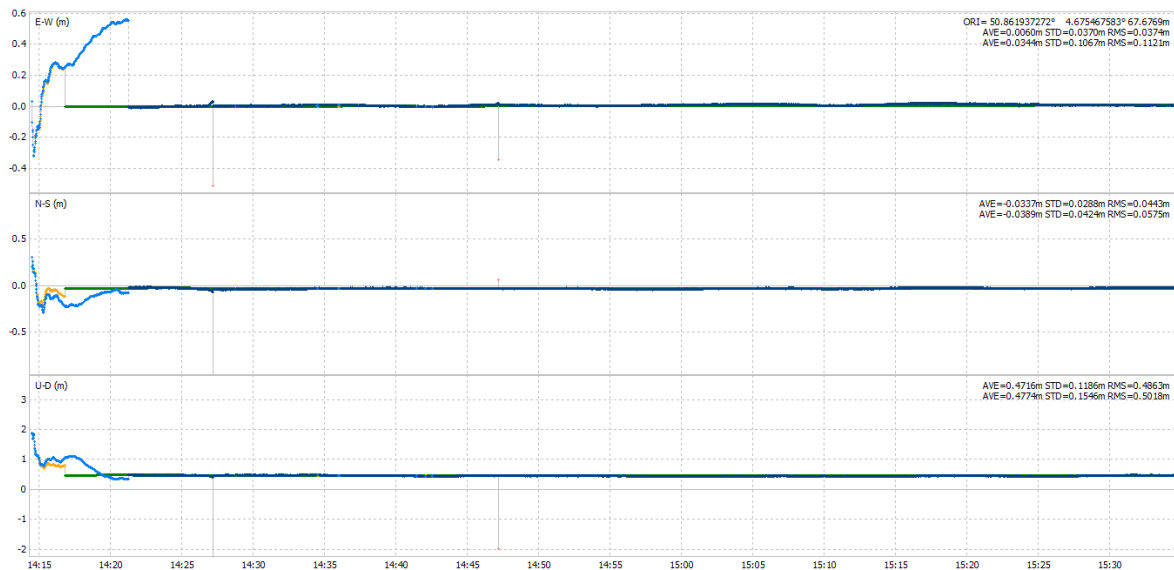


Figura 27: modo estático versus modo cinemático da RTKLIB para receptor parado na localização 2.

- **Localização 3:**

Tabela 26: desvios de posição no modo estático e cinemático da RTKLIB na localização 3.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Modo Estático	SIM	0,1554	0,2058	0,2578	-0,0572	0,1704	0,1797	2,5399	0,8931	2,6922
Modo Cinemático	SIM	-0,2707	0,3276	0,4249	-0,0977	0,1898	0,2134	2,8562	0,9120	2,9982

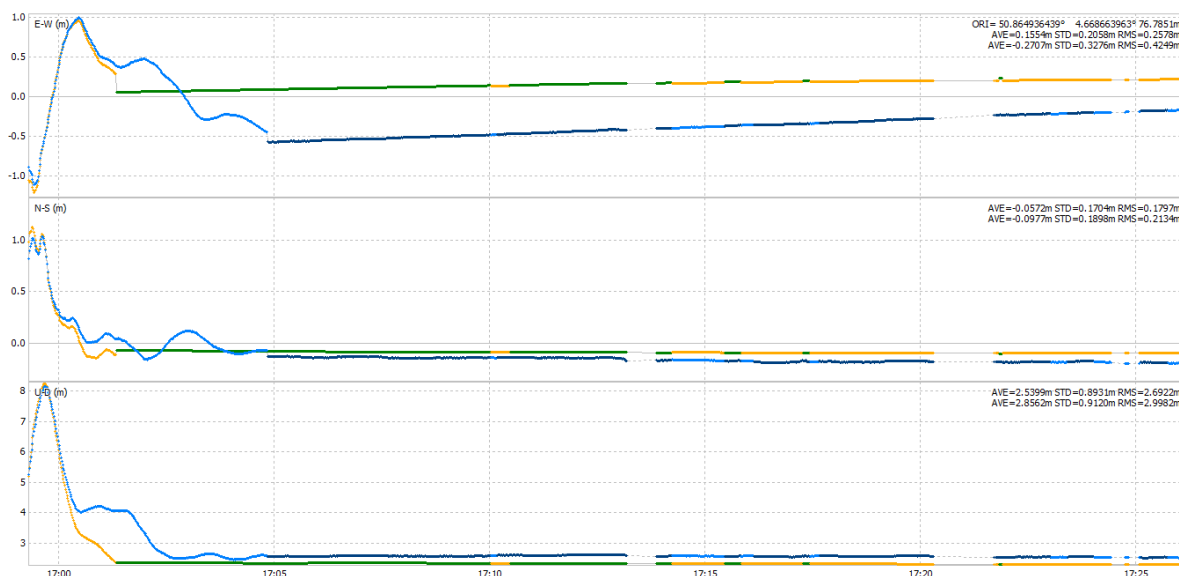


Figura 28: modo estático versus modo cinemático da RTKLIB para receptor parado na localização 3.

4.3 Receptor em movimento (modo cinemático da RTKLIB)

O objetivo dos experimentos com receptor em movimento é avaliar as soluções de posição ao longo de uma rota pré-estabelecida. Neste trabalho, a dificuldade associada a esses experimentos está relacionada à aquisição dos dados provenientes da estação de referência, já que foi utilizada uma rede wireless de alcance limitado. Devido a essa restrição, os caminhos experimentados foram curtos e concentrados nas localizações 2 e 3 apenas, onde se tinha acesso estável à internet.

Para análise do tempo de convergência e tempo de resposta, o receptor foi deslocado manualmente ao longo do caminho 1, permanecendo aproximadamente 4 segundos em cada posição (vide Figura 15). Completado o movimento em um sentido, iniciou-se o mesmo deslocamento, mas em sentido oposto. O caminho 3 foi utilizado para observar o comportamento da RTKLIB em uma situação crítica com rápida movimentação. O receptor foi acelerado de um vértice a outro do quadrado, permanecendo por cerca de 3 segundos em cada um deles. Finalmente, a antena foi também deslocada ao longo dos caminhos 2 e 4.

- **Localização 2**
 - **Antena 1**

Caminho 1

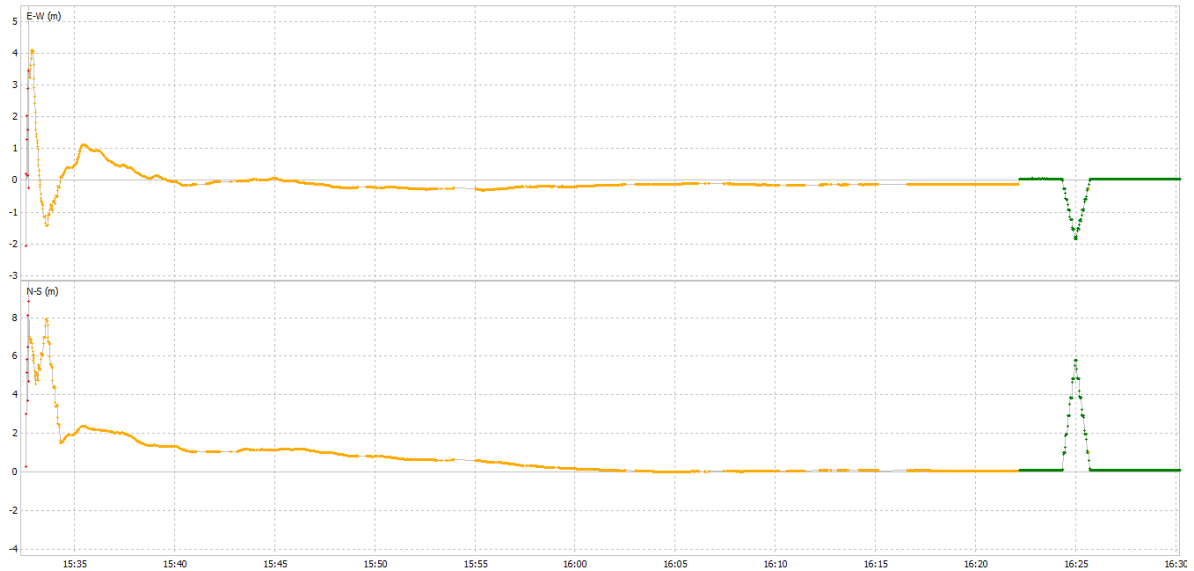


Figura 29: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 1, localização 2, antena 1.

Caminho 3

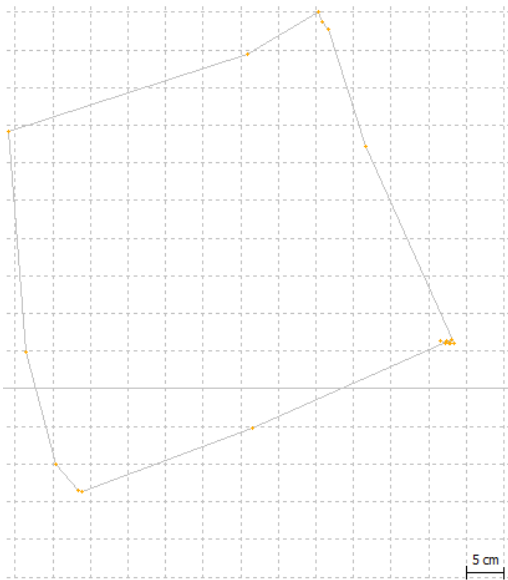


Figura 31: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 3, localização 2, antena 1.

Caminho 4

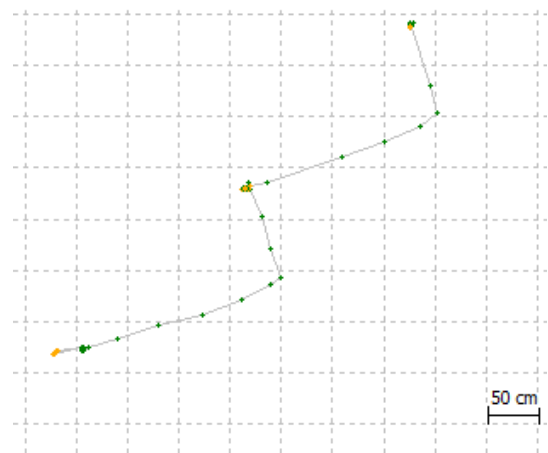


Figura 30: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 4, localização 2, antena 1.

○ **Antena 2**

Caminho 1

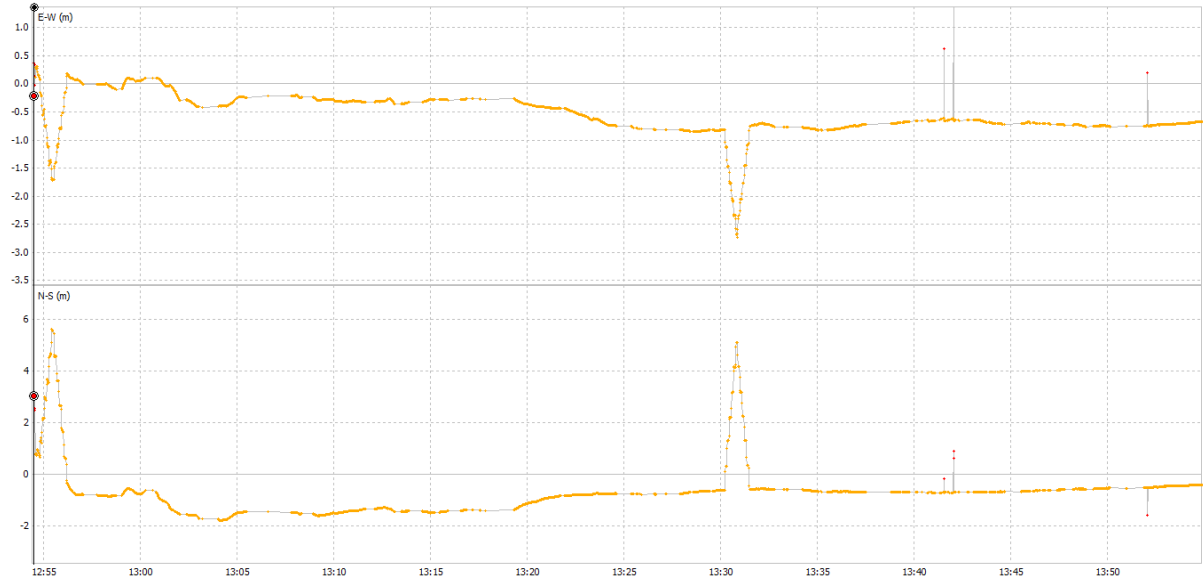


Figura 32: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 1, localização 2, antena 2.

Caminho 3

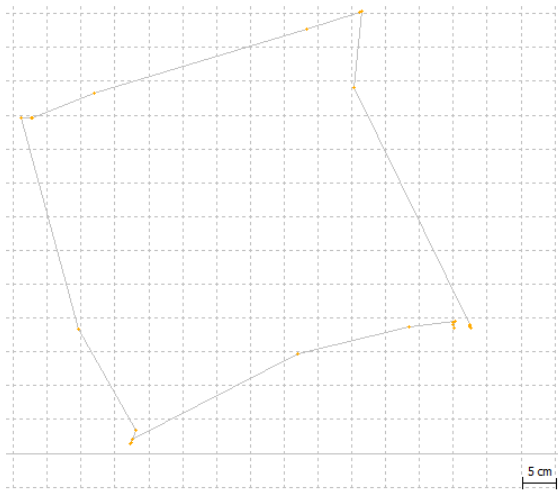


Figura 34: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 3, localização 2, antena 2.

Caminho 4

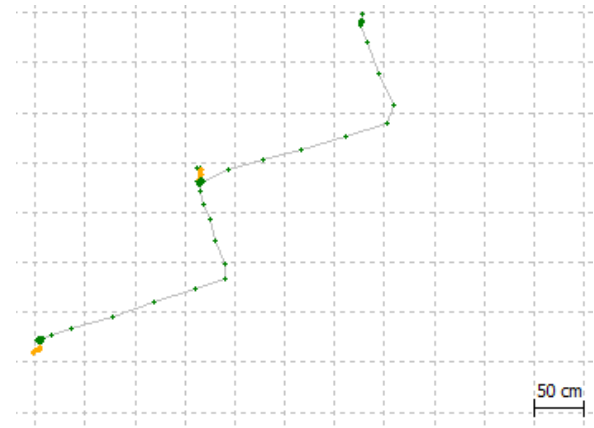


Figura 33: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 4, localização 2, antena 2.

- **Localização 3**
 - **Antena 1**

Caminho 1

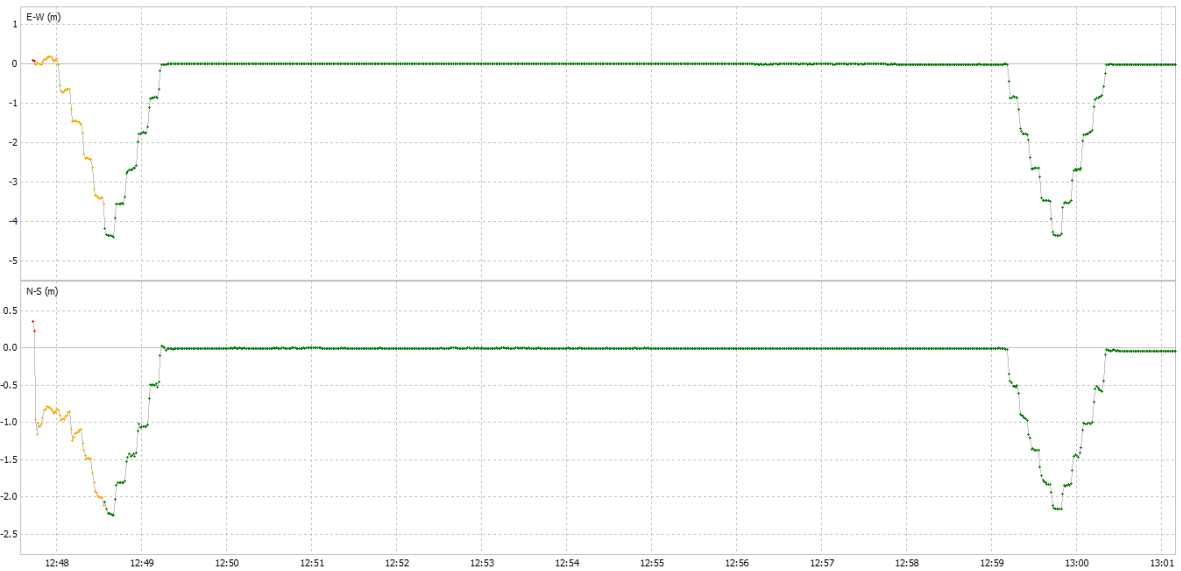


Figura 35: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 1, localização 3, antena 1.

Caminho 2

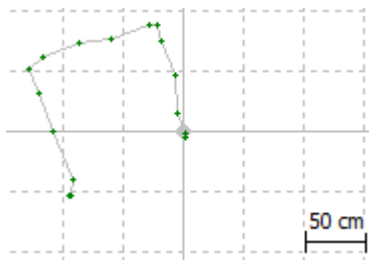


Figura 36: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 2, localização 3, antena 1.

Caminho 3

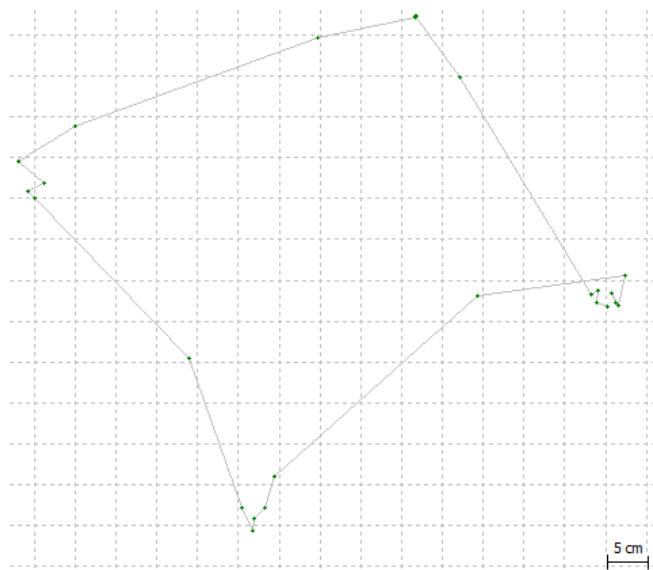


Figura 37: solução de posicionamento para receptor em movimento no caminho 3, localização 3, antena 1.

4.3.1 Trajetória experimental

Ao se observar as trajetórias nas figuras acima, percebe-se que as formas seguem os caminhos verdadeiros com relativa fidelidade. As discrepâncias são esperadas primeiramente pelos erros inerentes à tecnologia e segundo pela imprecisão do deslocamento manual.

4.3.2 Tempo de resposta e de convergência

As soluções no modo cinemático da RTKLIB, assim como no estático, levam um certo para convergir e se estabilizar. Isso pode ser constatado nas Figuras 29, 32, 35 e 38, em que aproximadamente 20 minutos após iniciado o experimento, os desvios de posição se concentram em uma faixa pequena de valores. Isso ocorre para os modos com e sem resolução de ambiguidade.

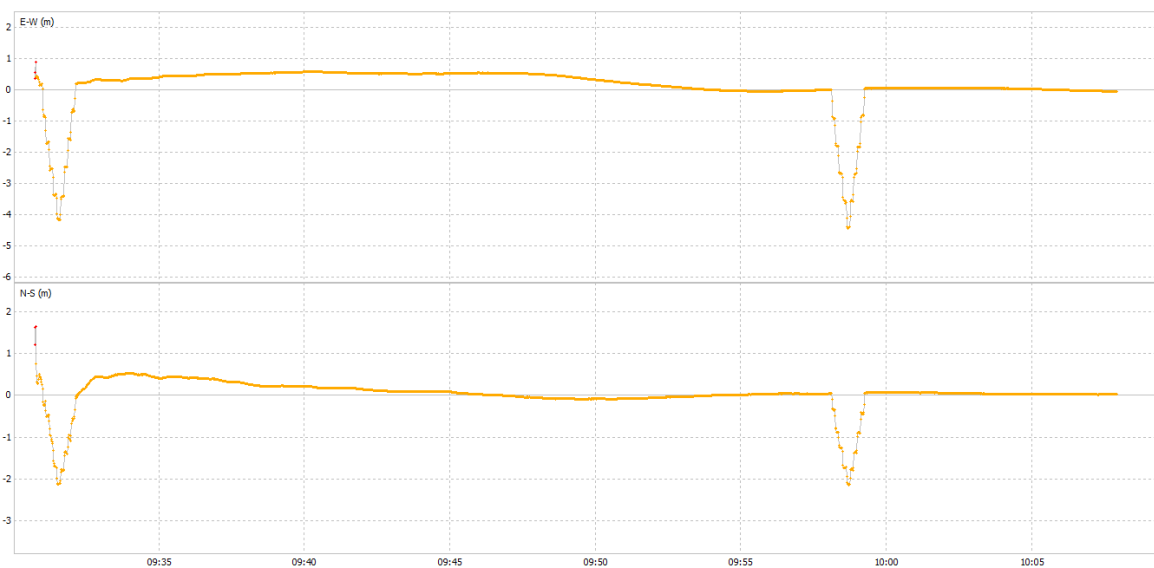


Figura 41: tempo de convergência para modo cinemático da RTKLIB sem resolução de ambiguidade.

O tempo de resposta no modo cinemático da RTKLIB pode ser analisado com a partir das Figuras 42 e 43 aproximadas.

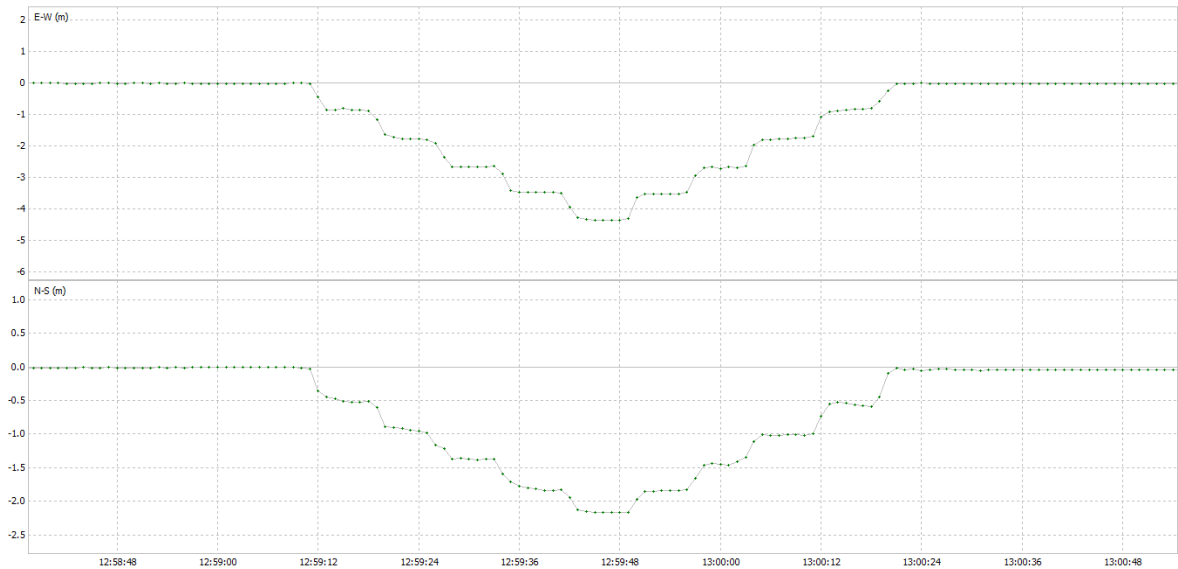


Figura 42: tempo de resposta no modo cinemático da RTKLIB. Caminho 1, localização 3, antena 1.

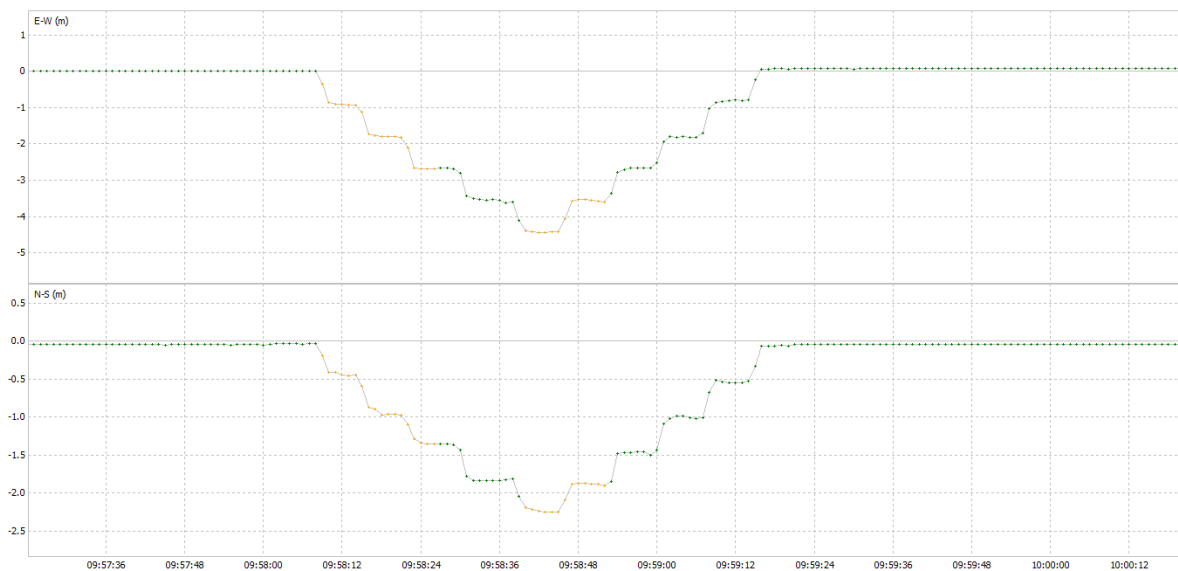


Figura 43: tempo de resposta no modo cinemático da RTKLIB. Caminho 1, localização 3, antena 2.

Conforme descrito anteriormente, o receptor móvel foi deslocado ao longo do caminho 1, permanecendo por cerca de 4 segundos em cada posição indicada pelos pontos vermelhos (vide Figura 15). As Figuras 42 e 43 foram obtidas a partir desse experimento. É perceptível o rápido tempo de resposta, pelo menos, para aplicações em que a antena não se move expressivamente em intervalos muito menores do que

um segundo (é importante destacar que 1Hz foi a frequência de medição utilizada no EVK-6T).

Para confirmar a qualidade das medições, experimentos foram realizados tendo como base o caminho 3, um quadrado de 50 cm de lado. O receptor foi posicionado por 3 segundos em um vértice e deslocado rapidamente ao adjacente. Ainda assim, a trajetória observada se aproximou da esperada, conforme ilustrado nas Figuras 30, 33, 37 e 40.

Finalmente, observou-se a diferença entre o modo cinemático com e sem resolução de ambiguidade. Como foi verificado nos experimentos nos modo estático da RTKLIB, as soluções fixas (com N inteiro) são mais precisas de acordo com as condições do ambiente. O ideal é que não haja interrupções na comunicação satélite-receptor para que não aconteça perdas de ciclo. A observação 2, na localização 3, com a antena 2, foi utilizada como referência.

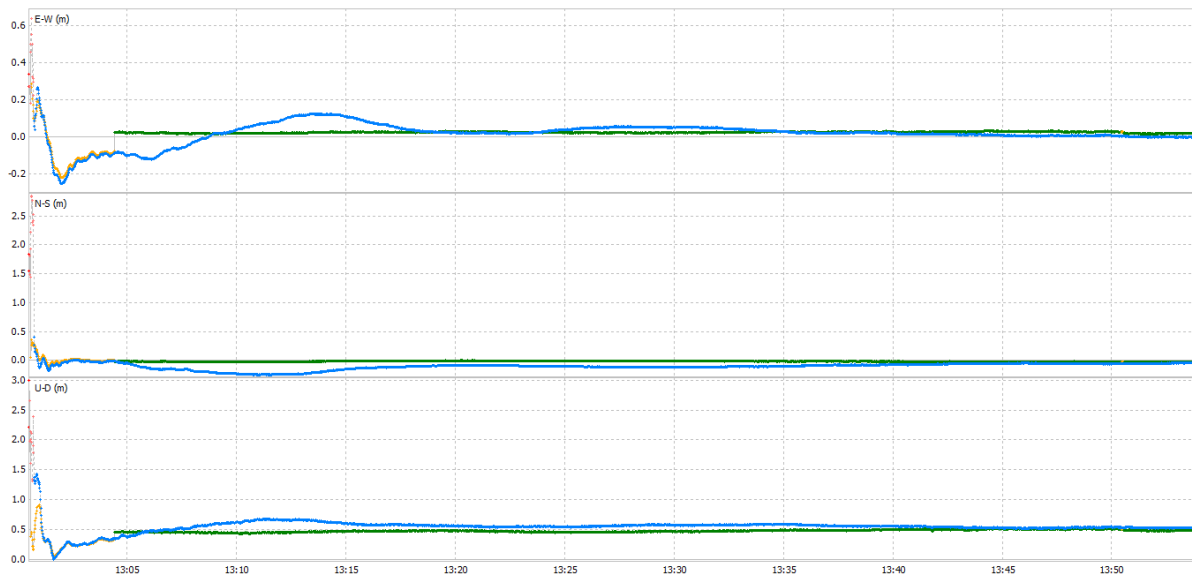


Figura 44: modo cinemático da RTKLIB com e sem resolução de ambiguidade.

Tabela 27: desvios de posição para o modo cinemático da RTKLIB com e sem resolução de ambiguidade.

	AR	Leste – Oeste (m)			Norte - Sul (m)			Acima – abaixo (m)		
		Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS	Média	Desvio padrão	RMS
Obs 2	SIM	0,0184	0,0409	0,0449	-0,0126	0,0770	0,0780	0,4649	0,1035	0,4762
Obs 2	N/A	0,0187	0,0643	0,0670	-0,0943	0,1578	0,1838	0,5474	0,1375	0,5644

5 Considerações finais

Neste trabalho, foram apresentados inicialmente conceitos sobre sistemas globais de posicionamento por satélite, especialmente, o norte-americano GPS. Tendo em vista os segmentos envolvidos, as fontes de erro e as limitações, propôs-se uma solução baseada em GPS diferencial utilizando algoritmos de código aberto de uma biblioteca chamada RTKLIB. Com o objetivo de avaliar os seus resultados, uma série de ensaios com um receptor comercial u-blox EVK-6T foi realizada sob diferentes condições na cidade de Lovaina, na Bélgica, em parceria com a empresa Essensium, que disponibilizou a infraestrutura necessária.

Ao final dos experimentos para um receptor estático e em movimento, concluiu-se que soluções de posicionamento em tempo real e pós-processadas resultam em precisão e exatidão diferentes. Dependendo da aplicação, um método pode ser mais apropriado do que outro. Em casos em que há a necessidade de uma acurácia bastante elevada, geralmente se emprega métodos de pós-processamento de dados.

Conforme esperado, os resultados com GPS diferencial (necessita de uma estação base) foram bem superiores ao GPS com único receptor, uma vez que a influência de diversos erros são atenuadas ao se confrontar os dados de um receptor móvel com aqueles provenientes de uma estação de referência fixa em uma posição conhecida. Para uma precisão a nível de poucos centímetros, recomenda-se a utilização do DGPS baseado em fase da portadora em detrimento do DGPS baseado em código. Isso porque o cálculo da distância satélite-receptor envolve o número de ciclos de comprimento de onda do sinal emitido, que é na ordem de centímetros. Não se utiliza a técnica fundamentada na fase da portadora para GPS com único receptor, porque os erros causados por fatores atmosféricos se sobrepõem aos melhoramentos obtidos com medição de fase.

Dentre os modos de posicionamento oferecidos pela RTKLIB, o estático é o mais recomendado para se determinar a localização de um receptor parado, e o cinemático para aplicações com a antena em movimento. Já que ambos são baseados em GPS diferencial baseado em fase, existe uma questão de resolução de ambiguidade associada ao processo, que resulta em duas abordagens: número de

ciclos inteiro (ou fixo) e flutuante. Em condições favoráveis, em que a comunicação receptor-satélite permaneça estável na maior parte do tempo, sem perdas de ciclo frequentes, o primeiro caso, com N inteiro, acarreta as soluções mais precisas.

Ainda foram investigados alguns pontos como porcentagem de soluções fixas, o tempo de convergência (encontraram-se intervalos de 20 a 40 minutos) e de reposta das posições, além dos efeitos da distância com base em duas estações base, uma delas em Bruxelas e a outra em Dentergem, nos resultados de posicionamento com GPS diferencial. Nenhuma diferença expressiva, na ordem de metros, por exemplo, foi percebida até porque ambas estavam em um raio de 250 km do receptor em teste, mas é certo que quanto menor a distância estação base-usuário, melhores são as soluções. As antenas do receptor também foram dispostas em duas estruturas, resultando em planos de terra diferentes, antena 1 e antena 2. Alguns ensaios com a antena 2, em plano circular uniforme, apresentaram resultados mais precisos.

Finalmente, observou-se que as medições variaram consideravelmente ao longo de várias observações nas três localizações pré-estabelecidas, o que pode estar relacionado a efeitos de multicaminho, obstruções no ambiente, ruídos no receptor, visibilidade do céu, estrutura da antena, entre outros fatores. Ainda assim foi possível obter precisões a nível de centímetros com GPS diferencial baseado em fase da portadora nos experimentos realizados em campo aberto, com excelente visibilidade, demonstrando que a solução proposta com a biblioteca RTKLIB mais o receptor u-blox pode ser utilizada como uma plataforma de posicionamento, de elevada precisão e baixo custo, dependendo inevitavelmente das condições ambientais, como acontece com qualquer plataforma que utiliza o GPS.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Corvallis Microtechnology. Introduction to the Global Positioning System for GIS and TRAVERSE. CMTInc., 1996. Disponível em: <http://www.cmtinc.com/gpsbook/>. Acessado em: 20 de dezembro de 2014.

Essensium. Disponível em: <http://www.essensium.com/>. Acessado em: 31 de dezembro de 2014.

EUREF Permanent Network. Disponível em: <http://www.epncb.oma.be/>. Acesso em 01 de fevereiro de 2015.

GPS. Disponível em: <http://www.gps.gov/>. Acesso em 25 de janeiro de 2015.

Geomatics Canada. GPS Positioning Guide (1995). Disponível em: http://luna.csrns.nrcan.gc.ca/GPS_Guide_e/GPS_Guide_e.pdf. Acessado em: 25 de dezembro de 2014.

GPS-SYSTEM. Disponível em <http://www.kowoma.de/en/gps/errors.html>. Acessado em: 20 de janeiro de 2015.

u-blox. EVK-6 User Guide (2012). Disponível em: http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/EVK-6_UserGuide_%28GPS.G6-EK-10040%29.pdf. Acessado em: 05 de janeiro de 2015.

u-blox. GPS Compendium (2009). Disponível em: http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/GPS_Compndium%28GPS-X-02007%29.pdf. Acessado em: 01 de fevereiro de 2015.

u-blox. LEA-6T module. Disponível em: <http://www.u-blox.com/en/gps-modules/u-blox-6-timing-module/lea-6t.html>. Acessado em 01 de fevereiro de 2015.

R. SABATINI, G. B. PALMERINI. Differential Global Positioning System (DGPS) for Flight Testing. *RTO-AG-160 AC/323(SCI-135)TP/189 Volume 21, NATO Research and Technology Organization*, 2008.

RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning. Disponível em: <http://www.rtklib.com/>. Acesso em 01 de fevereiro de 2015.

Space Segment. Disponível em: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>. Acesso em 28 de janeiro de 2015.

Takasu, T. (2011). RTKLIB version 2.4.2 manual. Disponível em: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.2.0.pdf. Acessado em 10 de janeiro de 2015.