

POSICIONAMENTO RTK EMPREGANDO DIFERENTES ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA

RTK Positioning Using Different Reference Stations

Jaime Freiburger Junior¹
Cláudia Pereira Krueger²

Universidade Federal do Paraná
Departamento de Geomática

Caixa Postal 19001
Centro Politécnico, Jardim das Américas.
81531-990 Curitiba-PR

¹jaime@ufpr.br ²ckrueger@ufpr.br

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os resultados de medições RTK que visaram a determinação em tempo real das coordenadas geodésicas de uma estação móvel. A partir de um marco de referência, a estação de referência gerou e transmitiu correções diferenciais à estação móvel. Esta estação ocupou marcos geodésicos de coordenadas conhecidas com o objetivo de se analisar a qualidade do posicionamento RTK. Em uma segunda etapa, a estação de referência foi transportada para outro marco de referência e as medições RTK foram repetidas. Os erros planimétricos, o tempo de fixação das ambigüidades e a confiabilidade do posicionamento foram analisados. Comprovou-se que a mudança da estação de referência proporcionou melhores resultados nos marcos situados em um raio de até 10 km da estação de referência.

Palavras chaves: RTK, programa GNRT, tempo de fixação das ambigüidades.

ABSTRACT

In this work we present results from a RTK survey aiming at the real-time estimation of geodetic coordinates of a rover station. From a geodetic reference mark, the reference station generated and broadcasted differential corrections to the rover station. This station was placed on geodetic marks with precisely known coordinates with the aim of analyzing the RTK positioning quality. In a second phase, the reference station was moved to other reference mark and the RTK measurements were repeated. Errors in the horizontal positioning, the time spent to fix ambiguities and the overall reliability of the positioning were all analyzed. It was found that the change of the reference station provided more reliable positioning for the marks situated up to 10 km from the reference station.

Keywords: RTK, GNRT, fixing time of ambiguities.

1. INTRODUÇÃO

O posicionamento geodésico com o Sistema de Posicionamento Global (GPS) tornou-se uma prática comum em diversas aplicações após sua liberação ao uso civil. O advento de receptores GPS para fins geodésicos, no início da década de 80, proporcionou melhor precisão nestes posicionamentos, que atualmente atingem o nível centimétrico e até subcentimétrico dependendo do tipo de equipamento e da técnica utilizada no levantamento.

Até a década de 90, os resultados da maioria dos trabalhos de precisão executados com o GPS só eram disponibilizados após o término das medições e

do pós-processamento dos dados brutos armazenados na memória física dos receptores. Este processo oferece a vantagem de se poder realizar maior número de estimações de pseudodistâncias (distância entre satélite e receptor) assim como a propiciar tratamentos estatísticos mais robustos às informações existentes. Esta prática não sobrepujou, no entanto, a restrição principal do pós-processamento das observações, que é a disponibilização dos resultados em tempo real bem e a exibição desses dados no ato da medição em campo (Lemmon e Gerdan, 1999, p. 64).

Para atender às aplicações que exigem a obtenção de coordenadas de pontos geodésicos com precisão em tempo real, foram concebidas técnicas de

posicionamento diferencial, como por exemplo, o DGPS. O princípio do DGPS consiste em se posicionar uma estação móvel com o uso de correções diferenciais geradas na estação de referência sob a hipótese de existir forte correlação entre os erros calculados na estação de referência e na estação móvel, sendo assim possível minimizá-los ou eliminá-los (Monico, 2000, p. 220). Esta tecnologia foi incorporada em aplicações diversas, e.g. cadastro, hidrografia, monitoramento de veículos e controle de máquinas.

No método diferencial, outra técnica de posicionamento em tempo real pode ser considerada: o RTK (*Real Time Kinematic*), que segue os mesmos fundamentos do DGPS, mas diferindo deste pelo tipo de variável observada (fase da onda portadora) e conseqüentemente pela precisão obtida (Monico, 2000, p. 217).

2. TÉCNICA RTK

A técnica RTK é destinada ao posicionamento de alta precisão em tempo real. A estação de referência deve ser equipada com um receptor GPS e um rádio modem transmissor. Por meio de programas computacionais específicos, ela gera correções diferenciais e as transmite via rádio para uma estação móvel, que se utiliza destas informações para determinar sua posição com precisão.

O formato das correções diferenciais é definido pelos padrões recomendados pela RTCM (*Radio Technical Committee for Maritime Service*). Para efetuar o enlace de comunicação são utilizados rádios transmissores que normalmente operam nas faixas de frequência VHF/UHF para este tipo de aplicação. A grandeza de observação fundamental utilizada no RTK é a medida da fase da onda portadora, que propicia precisão subdecimétrica ou melhor (Krueger 1996, p. 55).

O papel das correções diferenciais é minimizar a influência dos erros atuantes na estação móvel, os quais dependem do comprimento das linhas de base, i.e. da distância entre a estação móvel e a estação de referência. Dentre estes erros citam-se: os erros do relógio do satélite, os erros das efemérides e os erros da propagação do sinal na atmosfera, que limitam a precisão do posicionamento planimétrico de 1 a 10 ppm (Wübbena et al. 1996, p. 1846).

O emprego da técnica RTK é limitado em linhas de base de 5 a 10 km em virtude do alcance do enlace UHF. Ademais, a determinação da posição nesta técnica utiliza somente a solução da onda portadora L_1 ainda que a onda portadora L_2 esteja presente para acelerar a resolução das ambigüidades (Willgalis et al. 2002, p. 3).

As medidas da fase da onda portadora contêm o termo ambíguo "N", correspondente ao número inteiro de comprimentos de onda existente entre a antena do satélite e a antena do receptor. A alta precisão oferecida pela técnica RTK só é alcançada após a determinação destas ambigüidades, enquanto a estação móvel estiver em movimento (Mônico, 1990, p. 219). A fixação das

ambigüidades é uma função do tempo de ocupação, denominado tempo de fixação das ambigüidades, o qual aumenta em proporção ao comprimento da linha de base (Wübbena e Bagge, 1995 p. 10).

3. PROGRAMA GNRT

O GNRT (*Geodetic Navstar Real Time*) é um programa destinado às atividades de posicionamento que exigem o processamento e cálculo de coordenadas geográficas em tempo real. Ele é constituído de um conjunto de módulos concebidos como programas independentes que funcionam em um ambiente operacional multitarefa, podendo ser configurado para gerar e transmitir dados de correção de código e da fase da portadora a partir de dados brutos de medições fornecidos por receptores GPS ou GLONASS (Wübbena et al., 1996, p. 1846). As correções diferenciais são codificadas no formato otimizado RTCM++ e transferidas da estação de referência para a estação móvel, a qual as introduz em suas próprias observações para calcular sua posição em tempo real (Wübbena e Bagge, 1995, p. 8).

O GNRT pode receber configurações próprias, conforme a precisão requerida. Na configuração mais simples (emprego do código) o GNRT fornece precisão aproximada de 1 metro. Precisão melhor que 0,5 m pode ser alcançada via processo de suavização do código com a fase da onda portadora e transmissão dos dados de correção no formato RTCM++ (Geopp, 2002). O emprego do GNRT em levantamentos pela técnica RTK é a utilização do módulo denominado GNRT-K, que processa observações de fase da onda portadora.

O GNRT possui uma estrutura flexível, ou seja, seu funcionamento independe da marca fabricante dos receptores. Ele permite que ambas as estações trabalhem com a fase das ondas portadoras L_1 e L_2 , resolvendo as ambigüidades em tempo real (OTW) com recurso de aviso sonoro quando estas são resolvidas (Wübbena e Bagge, 1995, p. 8). Alguns campos de emprego do GNRT e as precisões obtidas estão indicados no quadro 1.

QUADRO 1 – PRECISÃO DO PROGRAMA GNRT EM APLICAÇÕES RTK E DGPS

Atividade	Aplicação	Precisão
Navegação	Terrestre, marítima e aérea.	0,1 – 5m
Hidrografia	Levantamento de perfis.	1 – 5 m
Posicionamento e monitoramento	Máquinas. Embarcações.	1 cm 1 – 5 m
Medições	Cadastro, locação. Deformações.	1 cm 0,1 – 1cm

4. LEVANTAMENTOS RTK

4.1 Definição do Campo de Testes

Os levantamentos foram realizados na cidade de Curitiba, em uma área circunscrita ao Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Foram selecionados 16 marcos cujas coordenadas geodésicas foram determinadas por método relativo estático em uma campanha realizada em julho de 2001. Estas coordenadas foram assumidas como referência para comparar os resultados das medições RTK. A figura 1 ilustra a distribuição desses marcos. Observa-se que as linhas de base variam de 0,2 a 15 km em relação ao Centro Politécnico, onde foram instaladas as estações de referência.

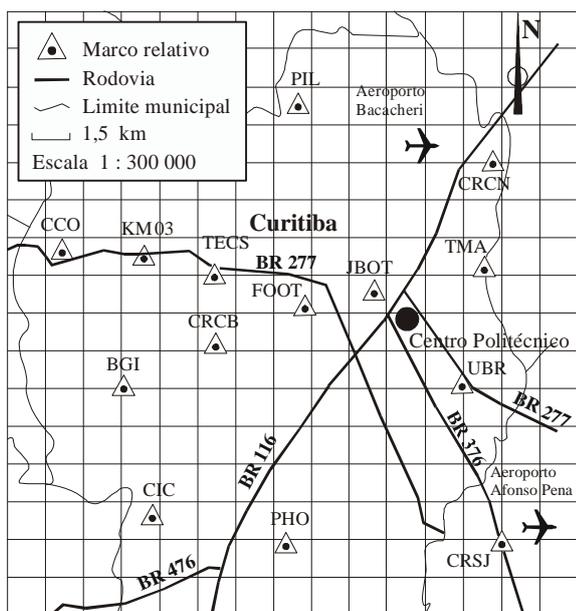


Figura 1 – Distribuição dos marcos relativos

As coordenadas geodésicas dos marcos RM3 e ADMN foram definidas como coordenadas de referência dos levantamentos RTK, os quais foram realizados em duas etapas consecutivas.

O marco RM3 é constituinte da rede SIRGAS e excêntrico ao marco PARA, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). O marco ADMN consiste de um ponto materializado por uma haste metálica, fixada sobre a laje de cobertura do edifício da administração do Centro Politécnico. Estes marcos estão separados por uma distância horizontal de aproximadamente 275 metros e uma diferença altimétrica de 15 metros, conforme ilustra a figura 2. No

quadro 2 estão indicadas a identificação dos marcos de referência e suas coordenadas geodésicas referenciadas no datum WGS 84.

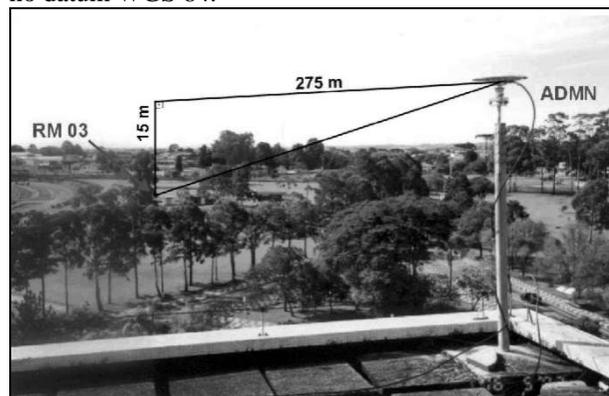


Figura 2 – Marcos de referência RM3 e ADMN

QUADRO 2 – MARCOS DE REFERÊNCIA (WGS 84)

Marco	Latitude ϕ	Longitude λ	h (m)
RM3	-25° 26' 54,5685"	-49° 13' 52,2108"	923,785
ADMN	-25° 27' 02,2239"	-49° 13' 55,5740"	939,490

4.2 Levantamentos de Campo

As estações de referência e móvel foram compostas pelos seguintes equipamentos:

- receptor Ashtech Z-XII (L_1, L_2);
- antena Ashtech geodésica III (estação de referência);
- antena Ashtech marine geodésica (estação móvel);
- rádio de comunicação;
- computador PC.

Os computadores foram providos do programa GNRT, cujos módulos podem ser configurados para operar conforme a função especificada, no caso a operação no modo RTK. A estrutura funcional em cada estação está esquematizada na figura 3.

Observa-se que o programa GNRT gera as correções diferenciais no formato RTCM++ a partir das coordenadas precisas do marco de referência (X_{ref}) e dos dados brutos fornecidos pelo receptor GPS. Por meio de um enlace de rádio, estas correções são transmitidas à estação móvel que recebe estas correções e as adiciona em suas próprias observações a fim de se obter as coordenadas precisas (X).

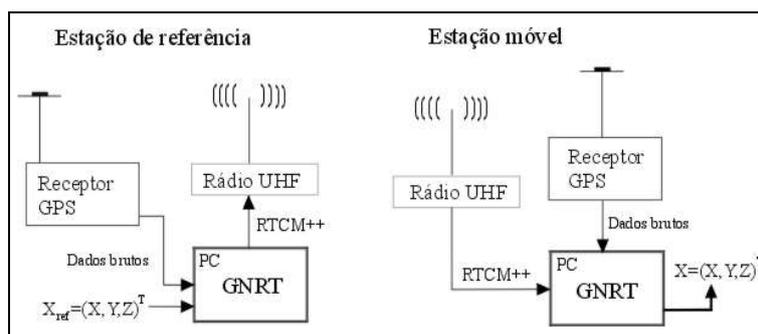


Figura 3 – Estrutura de funcionamento do RTK

A primeira etapa dos trabalhos consistiu no emprego do marco RM3 como marco de referência para os levantamentos RTK. O módulo GNRT-K gerou e transmitiu continuamente as correções no formato RTCM++ para a estação móvel, que ocupou os marcos relativos indicados na figura 1. As medições foram executadas com a antena GPS estacionada sobre o marco, a qual foi fixada em uma base nivelante sobre um tripé de alumínio. Foram tomadas as medidas de altura inclinada da antena visando a obtenção da altura vertical, que foi inserida no programa.

Em cada marco foram realizadas duas ocupações com intervalo de 1 hora entre elas. Efetuou-se em média 10 inicializações para a determinação das ambigüidades inteiras. Em uma segunda etapa dos trabalhos, a estação de referência foi transportada para o vértice ADMN e os procedimentos de ocupação nos marcos relativos foram repetidos conforme descrito.

4.3 RESULTADOS E ANÁLISES

As coordenadas geodésicas calculadas em tempo real, o tempo GPS de referência e os respectivos desvios padrão foram extraídos de arquivos de texto gerados pelo próprio módulo GNRT-K.

Procedeu-se ao cálculo da diferença entre as coordenadas conhecidas e as coordenadas RTK obtidas para cada fixação de ambigüidade. Esta diferença caracteriza o erro em posição. Na figura 4 são mostrados os erros em latitude e longitude nas 10 seções efetuadas durante a segunda ocupação no marco UBR, distante 3,5 km da estação de referência.

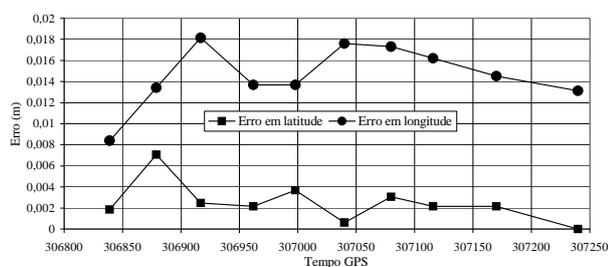


Figura 4 – Erros em latitude e longitude (marco UBR)

Verifica-se que o erro nas coordenadas planas está compreendido entre zero e 7,0 mm em latitude e entre 8,0 e 18,0 mm em longitude, mostrando que o sistema possibilita soluções de posicionamento com erros abaixo do centímetro. Também foram analisados os erros planimétricos e altimétricos correspondentes a cada fixação de ambigüidade. Os erros na componente planimétrica não foram superiores a 2,0 cm. Os erros altimétricos foram inferiores a 8,0 cm, conforme ilustra a figura 5.

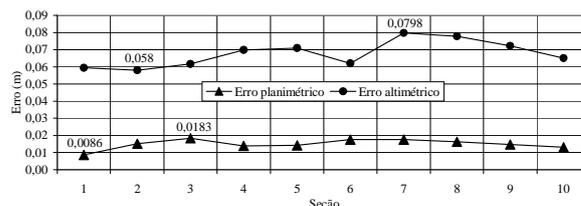


Figura 5 – Erros planimétricos e altimétricos

Neste trabalho, estabeleu-se a componente planimétrica como foco de estudo. A porcentagem das soluções consideradas corretas, i.e. as soluções cujos erros planimétricos ocasionados em virtude de uma falsa resolução de ambigüidades foram iguais ou inferiores a 1cm+10ppm é aqui denominado confiabilidade do posicionamento, dada pela quantidade de soluções corretas em relação à quantidade total de seções realizadas.

Na figura 6 são apresentados os erros planimétricos médios calculados a partir das duas ocupações realizadas em cada estação relativa com o emprego da estação de referência RM3. Verifica-se que há uma tendência de aumento dos erros planimétricos conforme aumenta o comprimento da linha de base. O marco CIC não recebeu sinal de rádio, de forma que não foram fixadas ambigüidades para obtenção da posição precisa em tempo real.

Na figura 7 é feita uma análise da confiabilidade, onde são apresentadas as porcentagens de soluções válidas das duas ocupações com emprego da estação de referência RM3. As soluções consideradas válidas são aquelas cujos erros planimétricos resultaram inferiores a 1cm + 10ppm.

Constata-se que 40% das soluções obtidas no marco PIL2 foram aceitas dentro do limite de 1cm+10ppm. Houve também maior dificuldade na fixação das ambigüidades, representada por um pico de 267 segundos (figura 8). A ocorrência do efeito multicaminho dos sinais GPS pode ter contribuído para a diminuição da qualidade das medições, porquanto o marco PIL2 está localizado próximo a construções de grande porte, constituídas de cobertura de telhas de cimento-amianto. Conforme Krueger (1996, p. 78), o efeito multicaminho também afeta a confiabilidade dos sistemas que trabalham na faixa de frequência UHF/VHF, empregada na técnica RTK para a transmissão das correções diferenciais.

Na figura 8 é analisada a influência do comprimento da linha de base na confiabilidade do posicionamento e no tempo de fixação das ambigüidades – TTFA. Observa-se que os marcos relativos estão dispostos em ordem crescente de comprimento de linha de base. Estão relacionados os valores médios do erro planimétrico e do TTFA nas observações realizadas (duas ocupações com 10 seções) empregando-se a estação de referência no marco RM03.

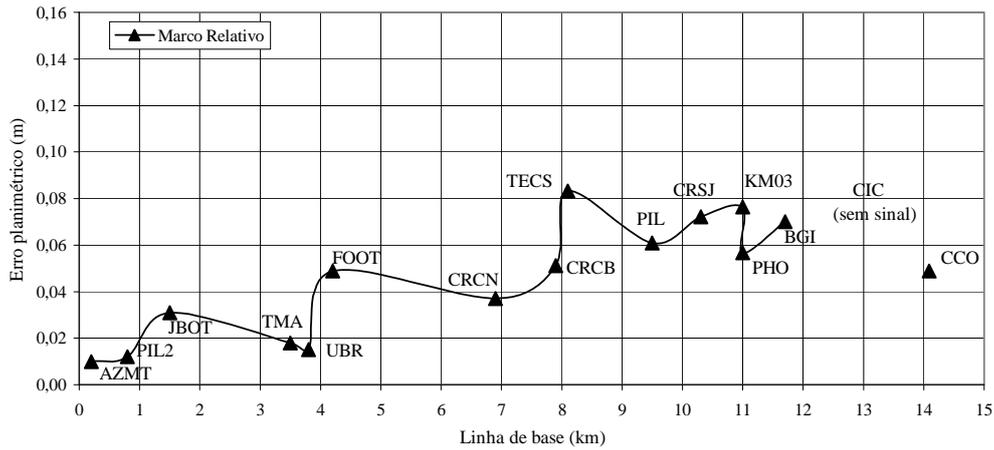


Figura 6 – Erros planimétricos (emprego da estação de referência RM3)

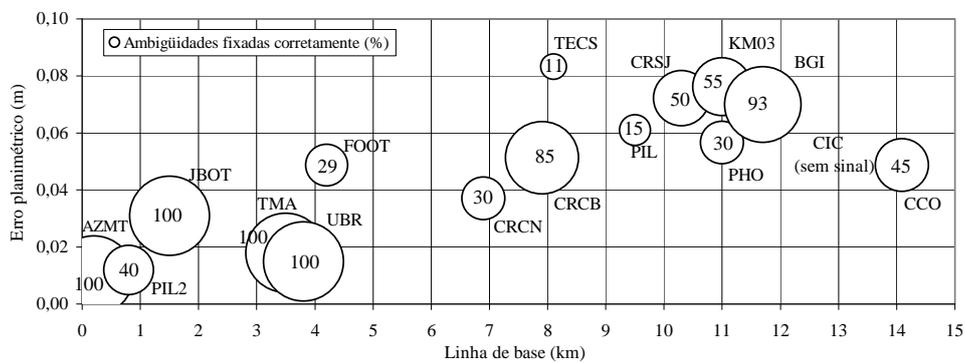


Figura 7 – Porcentagem de soluções aceitas (emprego da estação de referência RM3)

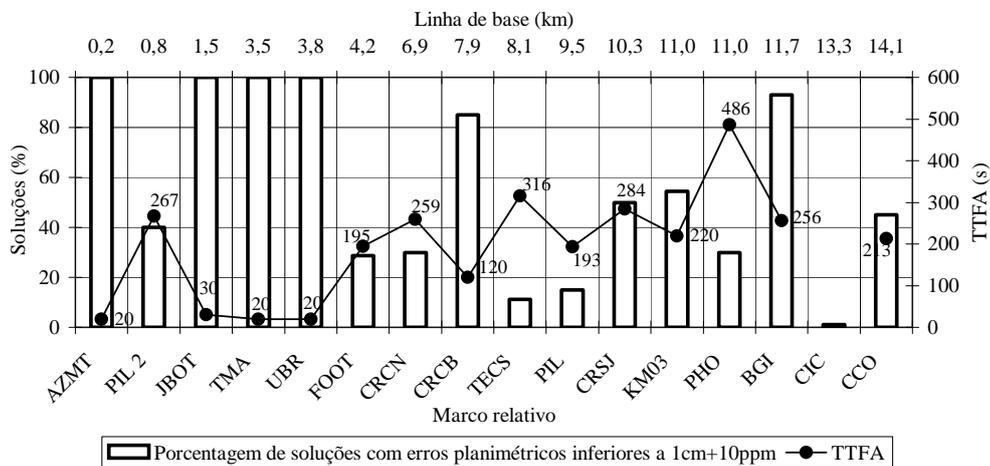


Figura 8 – Soluções aceitas e TTFA (estação de referência RM3)

Constata-se que há uma tendência de aumento do TTFA à proporção que as linhas de base aumentam. Conforme Stewart (2001, p. 9), o afastamento entre a estação móvel e a estação de referência implica em dificuldades para a resolução das ambigüidades, porquanto as condições de rastreamento nas duas estações começam a diferir. Os erros atmosféricos se acumulam, aumentando o tempo de processamento.

Os mesmos procedimentos de análise foram repetidos na série de levantamentos realizados com a

estação de referência instalada no vértice ADMN (figura 1, seção 3.1). Na seqüência (figura 9) apresentam-se os erros planimétricos médios calculados entre as duas ocupações para o emprego da estação de referência ADMN. Na figura 10 estão indicados os erros planimétricos médios e a confiabilidade do posicionamento – soluções com erros planimétricos inferiores a 1cm + 10ppm – e na figura 11 estão representados os correspondentes valores do TTFA.

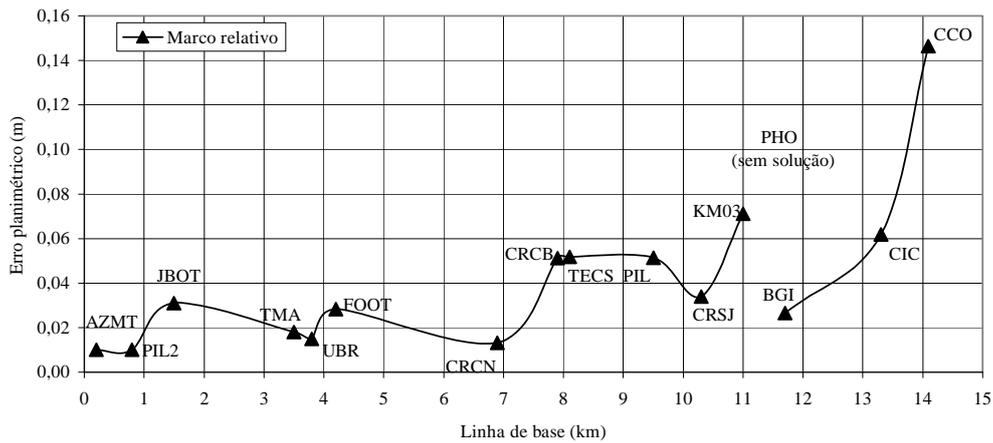


Figura 9 – Erros planimétricos (estação de referência ADMN)

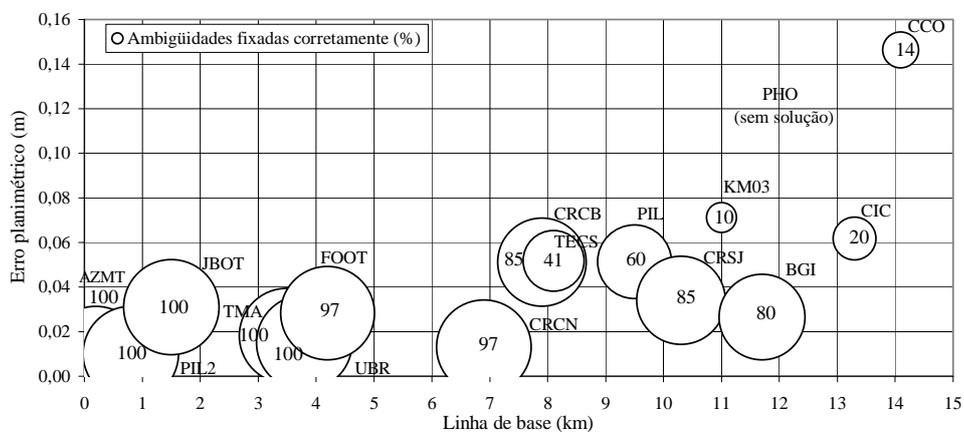


Figura 10 – Porcentagem de soluções aceitas (estação de referência ADMN)

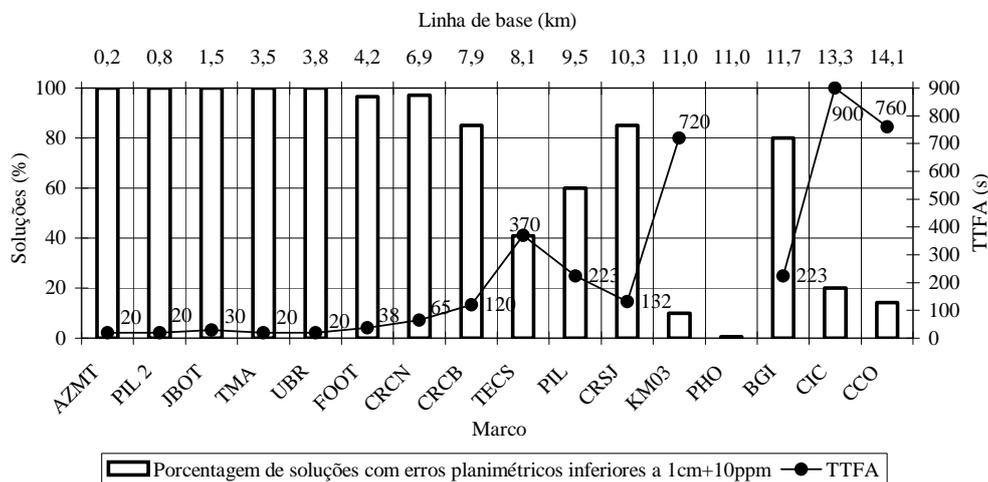


Figura 11 – Soluções aceitas e TTFA (estação de referência ADMN)

A partir destas informações, calcularam-se as médias aritméticas do erro planimétrico e do TTFA em 3 intervalos de comprimento de linha de base conforme apresentado no quadro 3. Constatou-se que o aumento da linha de base influenciou na precisão do posicionamento planimétrico e no TTFA. Observa-se que a transferência da estação de referência para o marco ADMN foi favorável para as linhas de base de até 10 km. Nestes marcos, verifica-se aumento da porcenta-

gem de observações com erros planimétricos inferiores a 1cm+10ppm e redução considerável do TTFA. A elevação da estação de referência podem ter contribuído para melhorar a transmissão do sinal de rádio para a estação móvel. No marco CIC (13,3 km), as correções diferenciais começaram a ser recebidas somente após a mudança da estação de referência para o marco ADMN, de maior elevação.

QUADRO 3 – TTFA E ERRO PLANIMÉTRICO

CLB (km)	RM3		ADMN	
	TTFA (s)	Erro (m)	TTFA (s)	Erro (m)
até 5	92	0,023	24	0,020
5 – 10	222	0,058	194	0,040
10 – 15	292	0,066	547	0,068

5. ANÁLISE RADIAL

Pelas análises anteriores, constatou-se que alguns marcos relativos apresentaram resultados diferentes, embora as correspondentes linhas de base tenham comprimentos aproximados. Uma análise radial foi feita para examinar a influência da direção das linhas de base, considerando-se a orientação azimutal do marcos e a precisão do posicionamento frente a mudança da estação de referência do marco RM3 para o marco ADMN. A figura 12 ilustra o plano radial do campo de testes, onde o centro do círculo representa o campus do Centro Politécnico da UFPR, onde estão situados os marco de referência RM3 e ADMN.

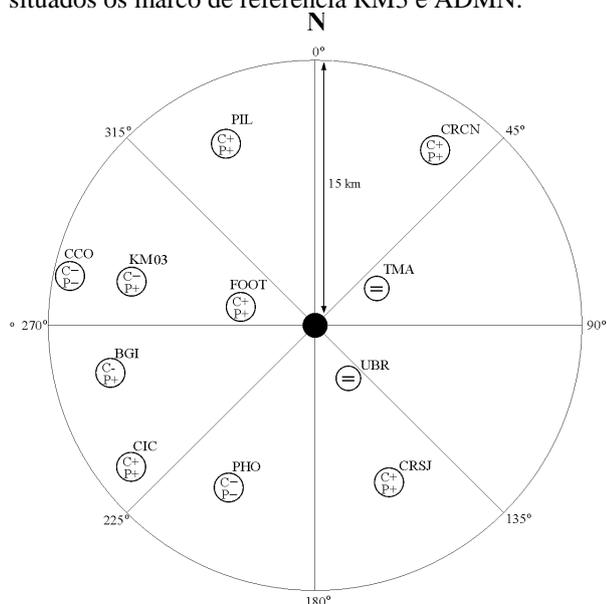


Figura 12 – Análise radial dos marcos relativos

São indicados os marcos relativos que apresentaram perda (sinal negativo) ou ganho (sinal positivo) em confiabilidade (letra C) ou precisão (letra P), bem como os marcos que não sofreram alteração significativa (sinal de igual) após a mudança da estação de referência do marco RM3 para o marco ADMN.

Salvo o marco FOOT (4,2 km), os marcos relativos que apresentaram perdas em confiabilidade e precisão localizam-se entre os azimutes 270° e 315°. É provável que estejam localizados em áreas ou regiões de sombra, i.e., locais com obstáculos ou com presença de ruído que causam interferência no sinal de rádio. Neste setor está a área central de Curitiba, de forma que torres e edifícios podem afetar a integridade ou até mesmo a recepção dos sinais UHF/VHF, produzindo

interferência ou ruído. Compreendido entre os azimutes 180° e 225° o marco relativo PHO também apresentou degradação em confiabilidade e precisão.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nas análises, a mudança da estação de referência resultou, nas linhas de base de até 5 km, redução de 75% no TTFA e acréscimo de 13% na precisão do posicionamento planimétrico. Nas linhas de base de 5 a 10 km houve redução de 15% no TTFA e acréscimo de 30% na precisão do posicionamento planimétrico.

A estratégia adotada foi ineficaz nas linhas de base superiores a 10 km. A confiabilidade do posicionamento foi reduzida, porquanto a quantidade média de soluções com erro planimétrico igual ou inferior a 1cm+10ppm baixou de 54% para 42%.

Em alguns casos, a realização de apenas uma seção de observação não garantiu a confiabilidade do posicionamento dada a possibilidade de ocorrer falsa fixação de ambigüidades. Nestes casos, foram obtidas coordenadas fora da precisão nominal aceita para levantamentos cadastrais.

Tanto as soluções de posicionamento geradas com o emprego do marco RM3 como do marco ADMN estiveram conformes às especificações de levantamentos cadastrais e medições RTK. Os resultados desta pesquisa mostraram que marcos geodésicos situados em diferentes locais podem ser empregados para a instalação da estação de referência, proporcionando observações precisas em linhas de base de até 10 km.

Todavia, especial atenção deve ser dispensada à correlação espacial, i.e., ao aumento progressivo dos erros planimétricos e do tempo de fixação das ambigüidades à razão que aumenta o comprimento da linha de base. Estes erros podem ser minimizados por meio de técnicas de modelagem em redes tais como o VRS (*Virtual Reference Station*) e o ACP (*Area Correction Concept*), as quais permitem que os usuários se afastem da estação de referência em distâncias maiores se comparadas ao método RTK. Mais experimentos com outros programas e equipamentos são necessários para esclarecer o comportamento deste método frente às influências sistemáticas cujas causas permanecem obscuras.

AGRADECIMENTOS

Os resultados apresentados neste artigo constituem parte da dissertação de mestrado desenvolvida pelo primeiro autor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR sob a orientação da segunda autora. Externam-se agradecimentos à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos. Parte dos marcos geodésicos integra a rede geodésica GPS da COPEL (Companhia Paranaense de Energia).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FREIBERGER JUNIOR, J.: *Análise da degradação do posicionamento em tempo real com o emprego do GNRT. Dissertação* (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- GEOPP: *GPS Positionierung in Echtzeit*, Geo++ GmbH, Garbsen, 2001, p. 1-7. Disponível em <<http://www.geopp.de>>. Acesso em maio/2002.
- KRUEGER, C.P.: *Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho*. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.
- LEICK, A.: *GPS: Satellite surveying*, 2. Ed, J.Wiley, New York, 1995.
- LEMMON, T. R.; GERDAN, G.P.: *The influence of the number of satellites on the accuracy of the RTK GPS positions*. *The Australian Surveyor*, Sydney, v.44, n.1, p.64-70, jun. 1999.
- MONICO, J. F. G.: *Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações*, UNESP, São Paulo, 2000.
- STEWART, M.: *Quality control for RTK GPS surveying*. Academic Lecture (GPS/Geodesy) – Department of Spatial Sciences, Curtin University, Perth, 2001, 30 f.
- WILLGALIS, S.; SEEGER, G.; KRUEGER, C.P.; ROMÃO, V.M.C.: *A real time reference network for Recife, Brazil, enabling precise and reliable cadastral surveys*. In: FIG XXII International Congress, Washington, D.C. USA, 2002, p. 1-14.
- WÜBBENA, G.; BAGGE, A.: *Präzises DGPS in Echtzeit für Vermessung und GIS-Anwendungen*. In: DVW-Praxisseminar DGPS-Anwendungen, Hamburg, 1995, p.01 a 16.
- WÜBBENA, G.; BAGGE, A.; SEEGER, G.; BÖDER, V.; HANKEMEIER, P.: *Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks*. In: ION GPS-96, Kansas City, Missouri, 1996, p. 1845-1852.