



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Avaliação do *Global Positioning System* (GPS) na Elaboração de Projetos de Linhas e Redes de Distribuição

Salomão Soares
CEMIG Distribuição S.A.
salomao.soares@cemig.com.br

Palavras-chave

Altitude Ortométrica
Controle de qualidade
GPS
Ondulação Geoidal

Resumo

O GPS beneficiou a maioria das atividades de posicionamento. Com ele é possível obter a latitude, longitude e a altitude geométrica a partir das suas coordenadas cartesianas tridimensionais. Entretanto, para os serviços de engenharia deve-se converter a altitude geométrica (h) em altitude ortométrica (H), pressupondo para isso, o conhecimento da ondulação geoidal (N).

Muitas avaliações sobre o seu uso em elaboração de projetos de linhas e redes de distribuição são fadadas ao fracasso devido às metodologias empregadas, aliadas a falta de conhecimento das relações entre as altitudes. Neste artigo é apresentada uma solução local para determinação de altitudes ortométricas com GPS em substituição ao nivelamento geométrico. Ademais, apresenta-se um programa de interpolação geométrica da ondulação geoidal a partir da ocupação com GPS de estações com altitudes ortométricas conhecidas, visando gerar um mapa geoidal, essencial nas determinações altimétricas com GPS.

Os resultados alcançados apontam a possibilidade de se utilizar o GPS em projetos, entretanto os fatores limitantes especificados no artigo não o tornam a solução mais adequada.

1. Introdução

As atividades relacionadas ao nivelamento de precisão com a utilização do GPS, ainda requer soluções. Isso se deve ao fato do GPS proporcionar altitudes puramente geométricas, e a maioria das atividades práticas, necessitar de altitudes relacionadas ao campo gravitacional, ou seja, altitudes ortométricas, as quais possuem ligação com a realidade física.

Para a determinação da altitude ortométrica (H), a partir da altitude geométrica (h), obtidas por GPS, é indispensável o conhecimento da ondulação geoidal (N). A Figura 1 ilustra esta situação apresentando a equação simplificada, onde:

H é a altitude ortométrica;
 h é a altitude geométrica ou elipsoidal; e
 N é a ondulação geoidal.

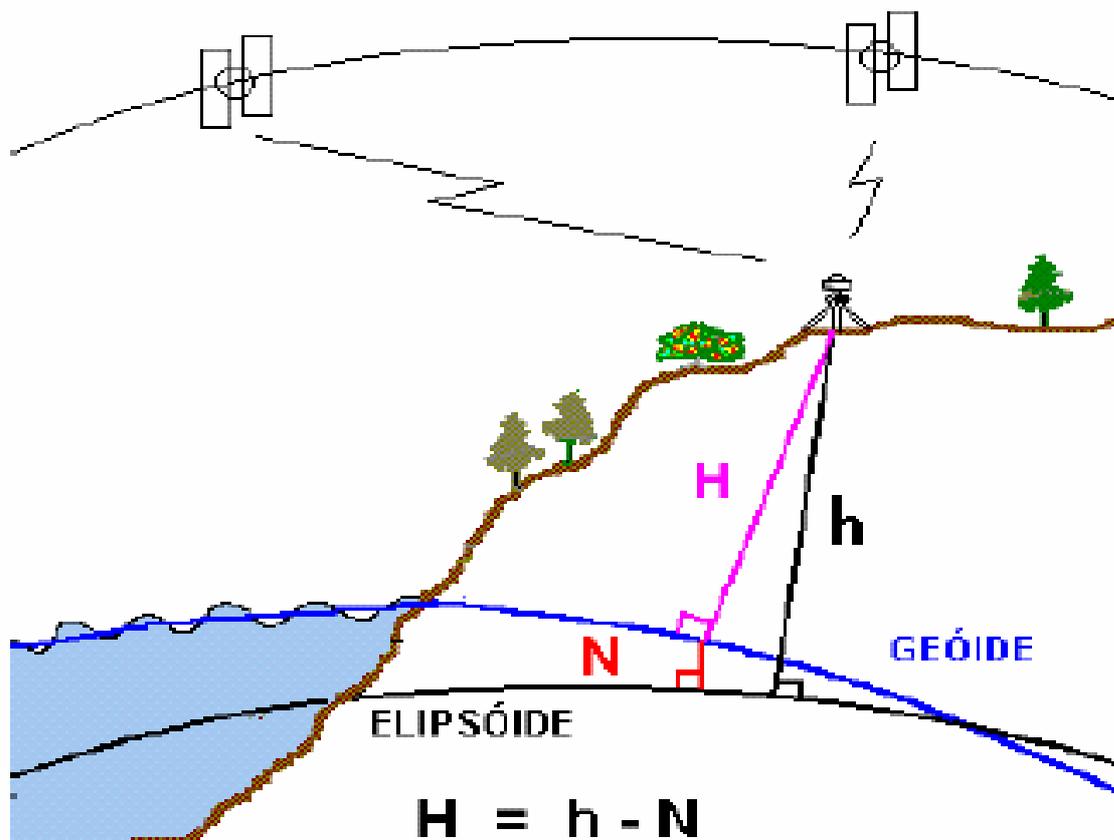


Figura 1: Relação entre as altitudes geométrica e ortométrica

O principal objetivo é avaliar a possibilidade de elaborar projetos de linhas e redes de distribuição utilizando a tecnologia GPS. Para apoiar esse trabalho foi desenvolvido um programa computacional de interpolação do modelo geoidal, que possibilita, dentro de uma certa precisão a ser informada, transformar as altitudes derivadas do sistema GPS – altitudes geométricas – em altitudes com significado físico baseadas no campo gravitacional terrestre – altitudes ortométricas.

2. Metodologia

2.1. Origem de erros que afetam a determinação de altitudes com GPS

Tendo como objetivo a determinação da altitude ortométrica com GPS, as origens de erros que afetam a altitude geométrica devem ser consideradas.

Erros com as altitudes geométricas

Para a utilização do programa, alguns procedimentos básicos deverão ser realizados. Segundo os estudos (2, 5 e 8), a altitude é afetada pela técnica de levantamento e pela observável utilizada. Utilizando-se técnicas de levantamento e de combinações de procedimentos de processamento, espera-se uma precisão altimétrica de 1,5 a 2 vezes menos acurada que as componentes horizontais.

O estudo 5 apresenta um resumo aproximado da acurácia do posicionamento GPS em metros de acordo com a observável para linhas de base entre 20 Km e 30 Km. (Tabela 1). Estes valores são apenas de referência, para escolha do método:

Tabela 1: Resumo aproximado da acurácia do posicionamento GPS em metros

Método de levantamento GPS	Observáveis	Precisão horizontal (m)	Precisão vertical (m)
Ponto Simples	C/A	15	30
Diferencial Estático	C/A	0,5 – 2	1 – 3
Relativo Estático	L1	0,02	0,03
Relativo Estático	L1/L2	0,005	0,02
Estático-rápido	L1/L2	0,02	0,03
Cinemático	C/A	2 – 5	3 – 8
Cinemático	L1	0,03	0,05
Cinemático	L1/L2	0,01	0,02
Semi-Cinemático	L1/L2	0,01	0,02
RT diferencial	C/A	3 – 5	4 – 8
RT cinemático	C/A	2 – 5	3 – 8
RT cinemático	L1	0,1	0,2
RT cinemático	L1/L2	0,05	0,1
RT semi-cinemático	L1	0,03	0,05
RT semi-cinemático	L1/L2	0,02	0,03

Vertical dilution of precision

Segundo os estudos (2, 5, e 7) a geometria GPS influencia na precisão da altitude, devido ao fato que os satélites são observados acima do horizonte da antena e esta fraqueza geométrica é quantificada pelo *Vertical Dilution Of Precision* (VDOP). Para minimizar esse efeito, deve-se realizar a coleta de dados GPS em horário que o VDOP esteja o menor possível.

Efemérides transmitidas e o comprimento da linha de base

Uma outra causa geométrica que afeta a altitude geométrica GPS é a aproximada correlação entre o erro das efemérides e o comprimento da linha de base. Levantamentos onde se pretende obter as altitudes com as efemérides transmitidas, o comprimento deve ser tanto menor quanto possível. Para bases longas recomenda-se o uso de efemérides precisas produzidas pelo *International GPS Service – IGS*.

A atmosfera

Sinais transmitidos pelo GPS atravessam a ionosfera e a troposfera, sendo o atraso atmosférico afetado por ambas as camadas. Para a ionosfera, os efeitos do atraso de sinais podem ser minimizados utilizando rastreadores GPS de dupla frequência – L1/L2. Já o efeito da troposfera não pode ser eliminado com nenhum tipo de rastreador GPS. Para minimizar este efeito utilizam-se modelos atmosféricos disponíveis nos programas de processamento de dados.

Multi-caminho ou reflexão espúria de sinais

Trata-se de sinais GPS refletidos por objetos próximos, ou mesmo da superfície, antes de atingir antena do receptor. O multi-caminho pode causar erros na altitude geométrica de poucos metros, quando se utiliza as observações do código, e de poucos centímetros quando se utiliza a fase da portadora. Entretanto, o valor exato do erro provocado pelo multi-caminho não pode ser determinado, pois este depende de fatores específicos do local. Para evitar o possível multi-caminho, deve-se buscar locais de rastreamento longe de objetos, como construções civis, árvores, etc.

Orientação e centro de fase da antena

O centro de fase da antena não coincide, necessariamente, com o seu centro geométrico. O centro de fase pode variar de acordo com a posição de cada satélite (elevação e azimute). A maioria dos programas computacionais corrige este efeito. Entretanto, com a finalidade de minimizar o efeito do centro de fase da antena em um levantamento, procedimentos especiais devem ser tomados, tais como: preferencialmente, utilizar antenas de um mesmo fabricante e mesmo modelo; e nas coletas de dados GPS todas as antenas devem ser orientadas na mesma direção.

Medição da altura da antena

O erro na medida da altura da antena, cuja distância deve ser contada sobre a vertical acima do marco de coleta de dados, é provavelmente, o mais comum erro humano cometido durante o levantamento GPS. Este erro é crítico para o levantamento de altitude, pois no processamento dos dados, este não é detectado. Assim, sugerem-se procedimentos específicos nas realizações das medidas das antenas, tais como:

- . múltiplas medidas em mais de um sistema de unidades;
- . medidas realizadas em diferentes partes da antena; e
- . calcular a altura (vertical) e verificar no campo.

Solução da ambigüidade

Para levantamentos GPS utilizando a portadora é essencial o processo de obtenção dos valores inteiros de ambigüidades, conhecido como solução das ambigüidades. Nos processamentos em que se soluciona as ambigüidades, obtém-se melhor precisão.

2.2. Procedimento de campo

Para os testes, foi necessário realizar o rastreamento de satélites do sistema GPS em locais onde se conhecia a altitude ortométrica, normalmente sobre referências de nível (RRNN) ou pontos de nivelamento geométrico, a fim de se determinar a ondulação geoidal. A seleção das estações foi, sempre que possível, nos extremos da região de estudo, em posições adequadas à determinação da superfície.

A partir deste levantamento, têm-se os dados necessários para o programa de interpolação que são as coordenadas do Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM) de cada estação e sua ondulação geoidal. Com isso, pôde-se realizar dentro da área de estudo os serviços de campo com GPS, pois o programa gerou um Mapa Geoidal Local acurado essencial para o andamento do projeto.

Funcionamento do programa

Com a equação (1) se determina um plano e com as equações (2,3 e 4) uma poli-superfície. Assim conhecendo pelo menos 4 RRNN, não colineares, com altitudes geométricas determinadas por GPS, pode-se determinar a ondulação geoidal destes pontos, e a partir destas ondulações, determinar um plano, ou poli-superfície, que represente a forma aproximada do geóide na região. Vale lembrar, que quanto mais RRNN levantadas por GPS melhor será a representação da ondulação local. Neste programa com 7 RRNN é possível avaliar os 4 tipos de interpolação através da estimativa da precisão. Caso não tenha número suficiente para a realização da estimativa da precisão, o programa informa ao usuário a impossibilidade de cálculo da estimativa da precisão antes de realizar a interpolação.

(1) $Z_i = aE_i + bN_i + c \rightarrow$ Mínimo de 4 RRNN para realizar a estimativa da precisão.

(2) $Z_i = aE_i + bN_i + cE_iN_i + d \rightarrow$ Mínimo de 5 RRNN para realizar a estimativa da precisão.

(3) $Z_i = aE_i + bN_i + cE_i^2 + dN_i^2 + e \rightarrow$ Mínimo de 6 RRNN para realizar a estimativa da precisão.

(4) $Z_i = aE_i + bN_i + cN_iE_i + dE_i^2 + eN_i^2 + f \rightarrow$ Mínimo de 7 RRNN para realizar a estimativa da precisão.

Onde:

Z_i representa a ondulação do geóide na RN;

E_i, N_i são as coordenadas UTM das RRNN $_i$; e

a, b, c, d, e, f são os parâmetros a serem determinados no ajustamento.

O cálculo utilizado pelo programa é baseado no modelo matemático do ajustamento paramétrico, conhecido também como modelo explícito ou modelo das observações indiretas ou ainda método das equações de observações.

A seguir, a modelagem utilizada pelo programa:

Matriz A^* com as coordenadas E e N das RRNN: $A = \begin{matrix} E1 & N1 & N1E1 & E1^2 & N1^2 & 1 \\ E2 & N2 & N2E2 & E2^2 & N2^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Ei & Ni & NiEi & Ei^2 & Ni^2 & 1 \end{matrix}$

Matriz L com as ondulações geoidais das RRNN:

$$L = \begin{matrix} \eta 1 \\ \eta 2 \\ \vdots \\ \eta i \end{matrix}$$

A partir do sistema de equações normais, tem-se:

$$\begin{aligned} N &= A^T A \\ U &= A^T L \end{aligned}$$

E assim se determina os coeficientes **a**, **b**, **c**, **d**, **e** e **f** utilizados na interpolação da ondulação geoidal:

$$Xa = (N)^{-1} U$$

Quando se faz estimativa de um valor ou de um conjunto de valores (parâmetros), deve-se também estimar a qualidade dos mesmos. Para o método paramétrico a estimativa da precisão é realizada da seguinte forma:

$$V = AX - L$$

$$\sigma^2 = \frac{V^T V}{n - u}$$

Onde:

n é o número de equações linearmente independentes;

e, u é o número de parâmetros incógnitos;

n-u é o número de graus de liberdade.

Precisão de Xa :

$$\sum Xa = \sigma^2 (N)^{-1}$$

O programa desenvolvido apresentou-se confiável após testes de campo e testes de consistência. O mesmo possibilita o acompanhamento de todo o cálculo das matrizes, oferecendo ao fim do processo a ondulação geoidal de cada ponto levantado e a estimativa de precisão do método adotado.

* Neste exemplo, utilizou-se a equação 4 para compor a matriz A.

Trata-se de um programa experimental para serviços de determinação da altura com GPS em substituição ao nivelamento geométrico, com precisão e confiabilidade compatível com o método clássico.

A seguir, na Figura 02, a tela do programa de interpolação geométrica da ondulação geoidal criado para subsidiar a determinação da altura ortométrica, altura essa ligada com a realidade física e necessária na maioria das atividades práticas de engenharia.

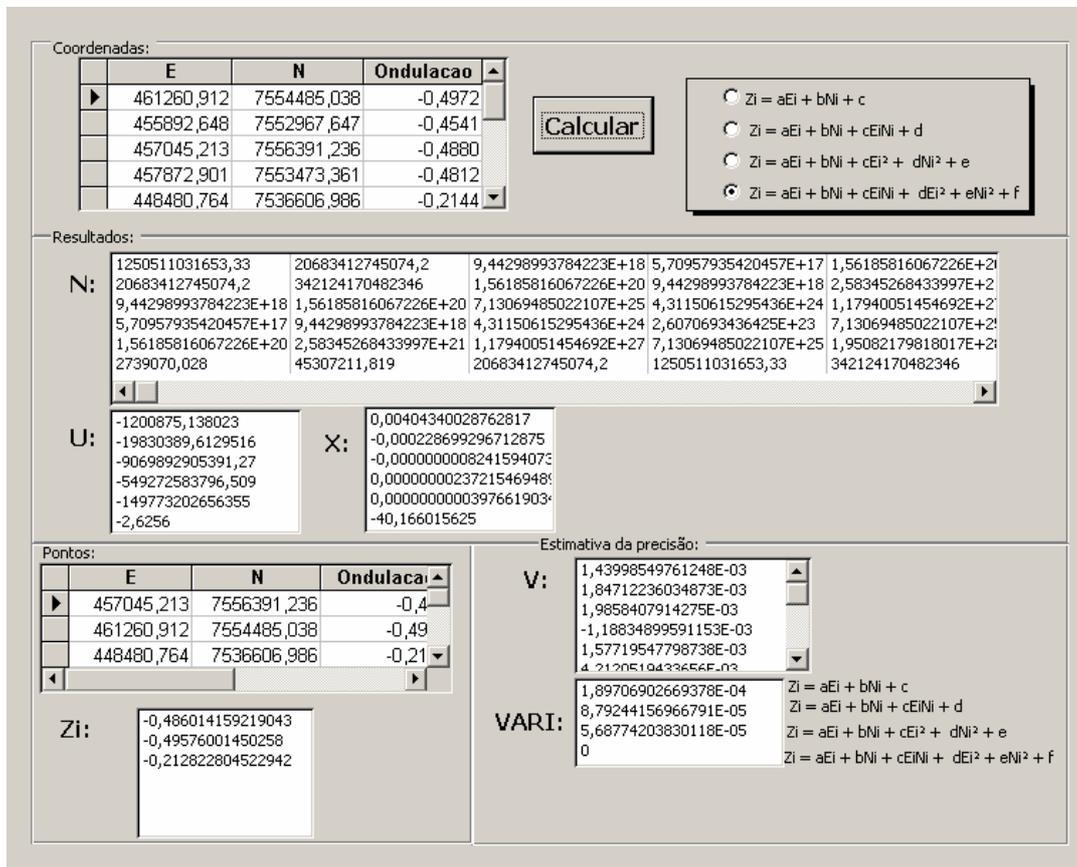


Figura 2: Tela do programa de interpolação geométrica da ondulação geoidal

Levantamento de pontos para fins de projeto

De posse do modelo geoidal local foram levantados pontos dentro da área de estudo para fins de avaliação da possibilidade de realizar projetos de linhas e redes com GPS.

O método de levantamento foi o relativo estático com o tempo de rastreamento de 10 minutos e 30 minutos, com intervalo de amostragem de 3 segundos, ângulo de elevação mínimo de 10° e modelo de troposfera Hopfield. As estratégias utilizadas foram as seguintes:

- base simples utilizando a mono frequência;
- base simples utilizando a dupla frequência.

Foram levantados pontos de 30 em 30 quilômetros da base até atingir uma distância máxima de 300 quilômetros conforme pode ser visto na Figura 3. A distância máxima foi baseado na área de cobertura das 4 estações de monitoramento contínuo da CEMIG, cobrindo assim toda sua área de concessão.

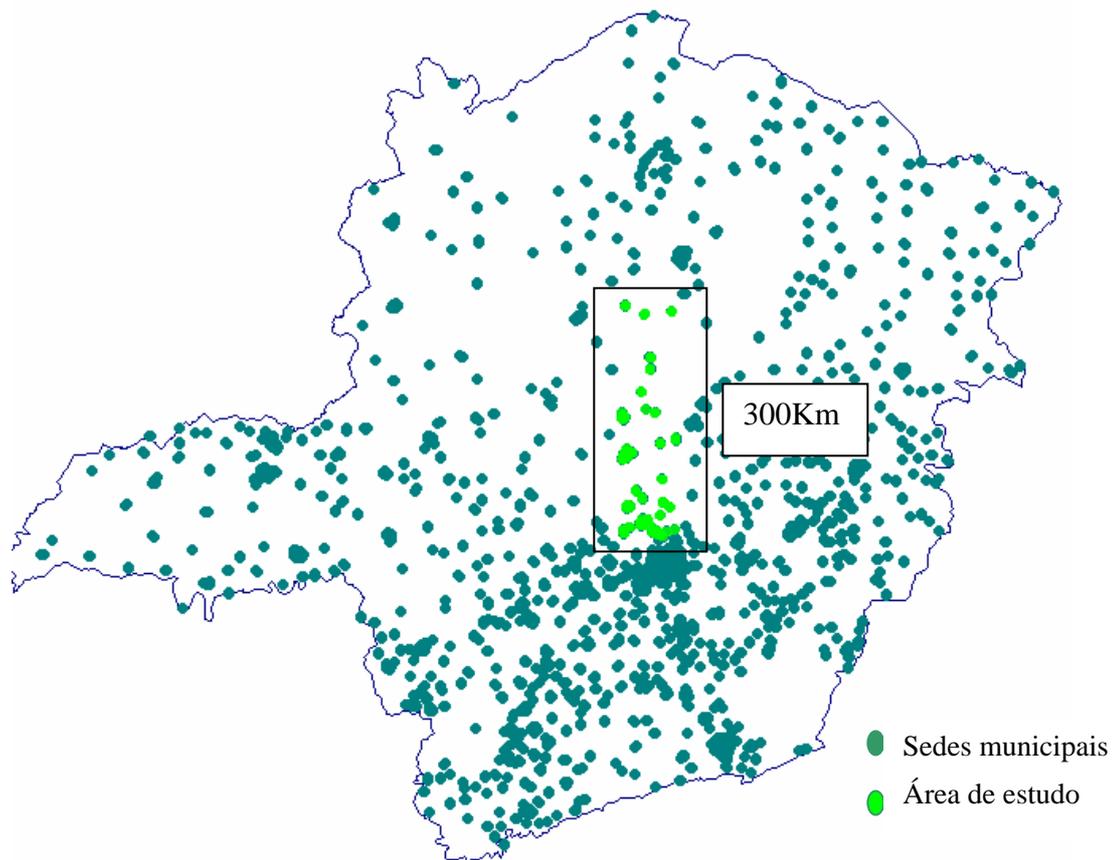


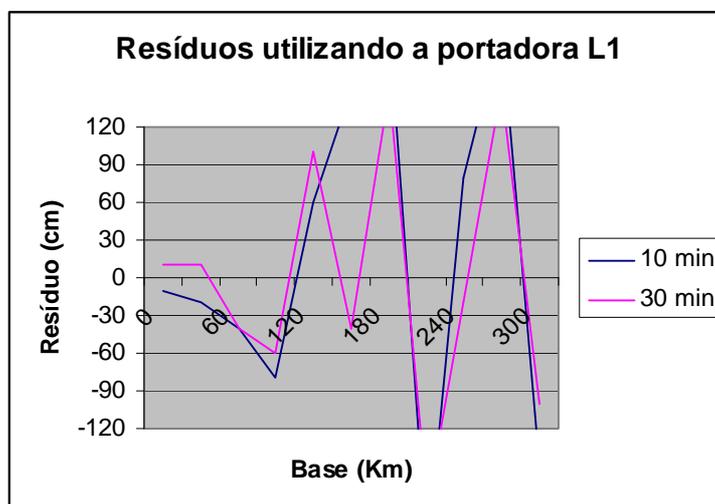
Figura 3: Área de estudo.

4. Resultados

O programa para geração do modelo geoidal local, apesar de limitado a regiões onde existam RRNN com distribuição geográfica regular, apresentou-se muito satisfatória. Um mínimo de 7 RRNN é aconselhável, para permitir além da interpolação, o controle de qualidade, tendo em vista que, quanto mais denso o apoio de campo, melhores serão os resultados obtidos.

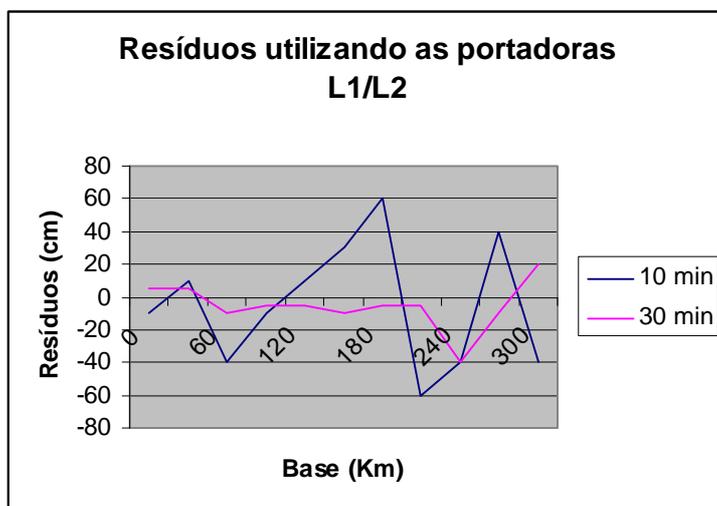
O levantamento dos pontos ao longo da área de estudo apresentou resultados diferentes para cada método adotado. O serviço de campo utilizando apenas a portadora L1 apresentou uma acurácia de 10 cm pra um tempo de rastreamento de 30 minutos e 20 cm para um tempo de rastreamento de 10 minutos para uma distância inferior a 30 Km da base. Acima disso, a propagação de erros foram muito altas conforme pode ser visto no Gráfico 1.

Gráfico 1



Para o levantamento utilizando as portadoras L1 e L2 a acurácia de 10 cm foi apresentada quase ao longo de todo o trajeto com tempo de rastreamento de 30 minutos. Para os levantamentos de 10 minutos houve uma variação maior ao longo do trajeto atingindo um pico de 60 cm, conforme pode ser visto no Gráfico 2.

Gráfico 2



4. Considerações finais

Com os dados obtidos, conclui-se que para se obter acurácia de 10 cm, com bases maiores que 30 km, devem-se usar receptores de dupla frequência e sessões de no mínimo 30 minutos. Com bases menores que 30 km podem ser usados receptores de dupla ou mono frequência e sessões de 30 minutos.

Apesar da possibilidade de se obter uma altimetria acurada com o uso do GPS, existem algumas questões que não o tornam a solução mais adequada, entre elas:

1. Não existe um mapa geoidal acurado para o Estado de Minas Gerais, o que torna necessário criar modelos locais;
2. Para a aquisição de pontos com acurácia de 10 cm foi necessário um tempo de rastreamento de 30 minutos por ponto, tempo esse superior ao nivelamento geométrico;
3. O planejamento da missão e o pós-processamento dos dados requerem um especialista para informar as melhores horas para aquisição de dados e qual base utilizar como referência;
4. Áreas com cobertura vegetal ou urbana densas impossibilitam o uso do receptor GPS, pois a antena não capta os sinais enviados, ou captam com erros de multicaminho.

Para continuidade deste trabalho deveriam ser realizados testes utilizando o método estático rápido para avaliação da acurácia dos resultados, tendo em vista que, a escolha do procedimento deve ser compatível com a precisão desejada, levando-se em consideração os aspectos econômicos, tempo necessário e informações disponíveis.

A possibilidade futura de geração de modelos numéricos do terreno (MNT) com qualidade submétrica agregará grande ganho aos levantamentos com GPS pelo método DGPS, pois resolvido o problema da altimetria, a aquisição da planimetria pelo método oferece rapidez e qualidade necessária para a elaboração de projetos de linhas e redes de distribuição.

5. Referências Bibliográficas

ANTUNES, Carlos. Método seqüencial de ajustamento no tratamento de observações GPS. Conferência de Cartografia e geodésia. FCUL- Setembro, 1996. Acesso em: 18/10/2007, disponível em: <http://correio.cc.fc.ul.pt/~mcarlos/art96.pdf>

ARANA, J. M. Determinação da ondulação geoidal com uso do GPS/nivelamento. Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte – MG. 2003. Acesso em: 18/10/2007, disponível em: <http://www2.fct.unesp.br/dcartog/arana/cbc2003.pdf>.

DALMOLIN, Quintino. Ajustamento por Mínimos Quadrados – Editora UFPR. 2ª Edição. Curitiba. 2004.

EROL, B; ÇELIK, R.N. Precise local geoid determination to make GPS technique more effective in practical applications of Geodesy. FIG Working Week 2004. Athens, Greece, May 22-27, 2004. Acesso em: 18/10/2007, disponível em: http://www.fig.net/pub/athens/papers/ts07/ts07_3_erol_celik.pdf

FEATHERSTONE, W. E; DENTITH, M. C; KIRBY, J.F. Strategies for the accurate determination of orthometric heights from GPS. Survey Review, 34, 267. January, 1998. Acesso em: 18/10/2007, disponível em: <http://espace.lis.curtin.edu.au/archive/00000029/>

GEMAEL, C. Introdução ao Ajustamento de Observações: aplicações geodésicas. Editora UFPR, Curitiba: 319 p.,1994

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações. Editora UNESP. São Paulo, 2000.

MONICO, J. F. G; CHAVES, J. C; ISHIKAWA, M.I. Nivelamento de precisão usando o GPS e interpolação geométrica do geóide. Congresso Nacional de Engenharia de Agrimensura. 1996. Acesso em: 18/10/2007, disponível em: <http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/Conea7/591.PDF>

SOYCAN, M; SOYCAN, A. Surface modeling for GPS-levelling geoid determination. Acesso em: 18/10/2007, disponível em: <http://bgi.cnes.fr:8110/soycan.pdf>

YILMAZ, M; ARSLAN, E. Effect of increasing degree of polynomial coefficients to geoid height determination. International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields. Sofia, November, 2005. Acesso em: 18/10/2007, disponível em: [http://geodesy.fnts-bg.org/symp2005/docs/papers/Mehmet%20Yilmaz_Ersoy%20Arslan\(TR\)_EffectIncreasingDegree.pdf](http://geodesy.fnts-bg.org/symp2005/docs/papers/Mehmet%20Yilmaz_Ersoy%20Arslan(TR)_EffectIncreasingDegree.pdf)