

Revista Brasileira de Cartografia (2011) N° 63/5: 649-662
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO RELATIVOS EM NÍVEL ABSOLUTO DE ANTENAS DE RECEPTORES GPS

*Determination of Relative Field Calibrations Parameters in Absolute Level with
GPS Receiving Antennas*

Suelen Cristina Movio Huinca & Cláudia Pereira Krueger

Universidade Federal do Paraná – UFPR
Departamento de Geomática - Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas
Caixa Postal 19001, 81531-990, Curitiba, Paraná, Brasil
suelenhuinca@ufpr.br
ckrueger@ufpr.br

Recebido em 20 Junho, 2011/ Aceito em 27 Outubro, 2011
Received on June 20, 2011/ Accepted on October 27, 2011

RESUMO

As variações do centro de fase das antenas receptoras dos sinais GNSS se tornaram uma fonte importante de erro sistemático para realização de posicionamentos com alta precisão, por exemplo, o monitoramento de uma rede de estações, no qual se devem conhecer as características próprias das antenas envolvidas, o centro de fase dessa antena, de modo com que as coordenadas geodésicas de interesse sejam determinadas no ponto correto que se almeja. Essas características próprias podem ser obtidas realizando a calibração das mesmas. Em face da necessidade em se minimizar esta fonte de erro e da inexistência de um serviço que pudesse realizar a calibração das antenas no Brasil e nos países da América Latina, implantou-se no Campus do Centro Politécnico da UFPR (Universidade Federal do Paraná) a BCAL/UFPR (Base de Calibração de Antenas GNSS na UFPR) onde se aplica o método de calibração relativo em campo em nível absoluto. Estudos realizados nesta base de calibração mostram que há diferenças nas coordenadas geodésicas de um ponto quando obtidas com diferentes valores de centro de fase, sendo as maiores diferenças obtidas na altitude elipsoidal, sendo que os valores variam de 5 a 10 cm nessa componente. Este artigo apresenta o embasamento teórico sobre o tema das calibrações de antenas GNSS e expõem resultados alcançados mediante as observações realizadas ao longo de dois anos, para uma mesma antena. Nesses experimentos constatou-se que os parâmetros de calibração da uma antena diferem entre si quando determinados em épocas distintas e com diferentes condições atmosféricas. Na BCAL/UFPR caminha-se para o aprimoramento da metodologia de calibração de antenas de forma relativa e para a validação destes parâmetros (PCO e PCV) com precisão. Estudos estão sendo desenvolvidos neste sentido e algumas variáveis, as quais podem estar influenciando na determinação desses parâmetros (o efeito do multicaminho e as variáveis ambientais como temperaturas, umidade relativa do ar e precipitação) estão sendo analisadas. Estes estudos e análises irão contribuir para a definição dos parâmetros de calibração de uma antena GNSS relativamente na BCAL/UFPR contribuindo diretamente para os posicionamentos por satélites em que se almeja alta precisão e indiretamente a toda a comunidade geodésica.

Palavras chaves: Centro de Fase, Antenas GNSS, Calibração.

ABSTRACT

The phase center variations of GNSS signal receiving antennas have become an extremely important source of systematic error, in high accuracy positioning such as a network of monitoring stations, where the characteristics of the antennas, in a way that the geodetic coordinates of interest can be defined accurately. The characteristics of the antennas can be obtained by performing its calibration. In order to minimize this source of error and since there is a lack of antenna calibration services in Brazil and south American, has implemented the BCAL/UFPR (Baseline Calibration Station for GNSS Antennas at UFPR), at the campus of the Polytechnic Center, Federal University of Paraná in the city of Curitiba, which applies the field calibration in absolute level method. Studies based on this calibration show that there are differences in geodetic coordinates of a point when these using different values of phase center. The largest variation occurs in the ellipsoidal height, ranging from 5 to 10 centimeters. This paper presents a theoretical basis of the GNSS antenna calibration and results long the observations, along two years for the same antenna. It was verified that the proper parameters of calibration the GNSS antenna differ when determined at different times of the year and with different atmospheric conditions. The objectives with the BCAL/UFPR is to improve the relative field antennas calibration methodology and to the parameters (PCO and PCV) validation with reliability. Studies are developing in this direction and some variables, which can be influence in the determination of these parameters (the multipath effect and environmental variables as temperature, relative humidity, precipitation, wind speed) are being analyzed. These studies and this analysis will contribute to develop the proper value of GNSS relative field calibration antenna in the BCAL/UFPR, directly helping o high precision satellites positioning and, indirectly, the whole geodesic community.

Keywords: Phase Center, GNSS Antennas, Calibration.

1. INTRODUÇÃO

Para obter alta precisão em um posicionamento com GNSS sobre a superfície terrestre é de suma importância a minimização dos erros envolvidos neste processo. O centro de fase das antenas GNSS é uma fonte de erro sistemático que está diretamente ligado a antena de recepção do sinal GNSS.

O centro de fase da antena GNSS é o ponto de recepção do sinal vindo do satélite. Ele não se situa exatamente no eixo central do sistema. Também não coincide necessariamente com o centro geométrico da antena, pode variar de acordo com as características individuais de cada antena e com a alteração da direção do sinal proveniente de um satélite. A sua determinação ocorre mediante o conhecimento dos valores das componentes do PCO (*Phase Center Offset*) e os valores das variações do PCV (*Phase Center Variation*). O PCO é um vetor de deslocamento entre o centro de fase médio e o ARP (*Antenna Reference Point*) e o PCV consiste de um deslocamento adicional do centro de fase, de caráter sistemático, que é função do ângulo do azimute de incidência do sinal GPS. A determinação do PCO e do PCV é realizada através de calibração.

Os métodos de calibração de antenas GNSS existentes são: calibração absoluta em ambientes controlados, também conhecida como calibração

absoluta em câmaras anecóicas, calibração absoluta em campo e calibração relativa em campo. Os primeiros experimentos em câmaras anecóicas foram iniciados em 1987 e realizados por técnicas radiométricas para a detecção e medição da energia do centro de fase e a determinação da amplitude e polarização de antenas GPS geodésicas (GÖRRES et al., 2006). Na sequência, no ano de 1990, iniciou-se o desenvolvimento do método de calibração relativo de antenas no qual se determinou o diagrama de fase de antenas GNSS a partir de características de uma antena de referência (BREUER et al., 2001). Em 1996 foram obtidos os primeiros resultados utilizando o método de calibração absoluto em campo, pelo *Institut für Erdmessung* (IfE) da Universidade de Hannover. Esse método foi aprimorado no ano de 2000, no qual desenvolveu um mecanismo automatizado que permite rotações e inclinações automáticas da antena a ser calibrada absolutamente (WÜBBENA et al., 2000).

No Brasil, no ano de 2007, iniciou-se a construção de uma base de calibração de antenas GNSS, denominada de BCAL/UFPR, baseada em experiência adquirida na Alemanha (FREIBERGER JUNIOR, 2007). Ressalta-se que essa base é pioneira na América Latina e atualmente está em funcionamento. Experimentos estão sendo realizados aplicando a metodologia de calibração Relativa em Campo para determinar parâmetros de calibração de antenas GNSS em nível absoluto, já

que as antenas de referências utilizadas nesse processo são calibradas absolutamente (HUINCA, 2009).

Segundo Leica GeoSystems (2010), o uso de antenas calibradas é de fundamental importância no posicionamento de alta precisão especialmente nas estações de referência. Negligenciar os valores do centro de fase das antenas GNSS na determinação de coordenadas geodésicas precisas de um ponto pode conduzir a erros na coordenada vertical de até 10 cm (MADER, 1999). Em um estudo realizado na BCAL/UFPR visando verificar a precisão de coordenadas geodésicas de um ponto utilizando uma antena calibrada e variando o comprimento da linha de base, observou-se que as maiores diferenças, foram obtidas na altitude elipsoidal. Os valores diferenciam de 5 a 10 cm nessa componente (HUINCA, 2009).

Mediante observações realizadas ao longo de dois anos, para uma mesma antena, constatou-se que os parâmetros de calibração diferem, quando determinados em épocas distintas e com diferentes condições atmosféricas. Objetivando o aprimoramento da metodologia em campo da calibração relativa de antenas e visando a validação destes parâmetros (PCO e PCV) diversos estudos estão sendo realizados na BCAL/UFPR. Analisam-se algumas variáveis que podem estar influenciado na determinação desses parâmetros, sendo elas: o efeito do multicaminho e as variáveis ambientais (temperaturas, umidade relativa do ar e precipitação). As análises dessas variáveis advindas destes estudos irão contribuir para a definição dos valores dos parâmetros de calibração de uma antena GNSS calibrada relativamente em nível absoluto na BCAL/UFPR, contribuindo de maneira significativa para os posicionamentos por satélites em que se almeja alta precisão. Algumas análises estão sendo apresentadas neste artigo, bem como, indica-se as perspectivas futuras.

2. CENTRO DE FASE DA ANTENA GNSS

Chama-se centro de fase eletrônico (ou simplesmente centro de fase) o ponto de recepção do sinal vindo de um satélite (FREIBERGER JUNIOR, 2004) durante o período de observação GNSS. Segundo Mader (1999), para toda a antena, o centro da fase mudará em função do sentido da mudança do sinal de um satélite e em grande parte essa variação depende da elevação

do satélite. Os offsets da antena são afetados pelas variações do centro de fase da antena, eles são a conexão das medidas GNSS com os monumentos físicos.

Conforme Freiburger Junior (2004), o offset do centro de fase é condicionado por uma parte mecânica e outra parte eletrônica. A primeira, denominada offset do centro de fase (PCO) (Fig. 1), consiste no vetor (\vec{p}) com origem no ARP e extremidade no centro de fase; a segunda distância, denominada variação do centro de fase (PCV) (Fig. 2), consiste de um deslocamento adicional do centro de fase, de caráter sistemático, que se comporta conforme o ângulo de incidência do sinal na antena.

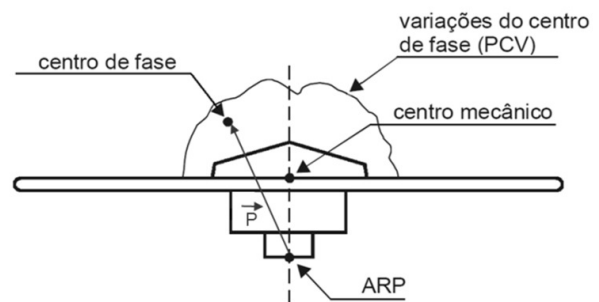


Fig. 1 – Variações do centro de fase. Fonte: adaptado de Freiburger Junior (2004).

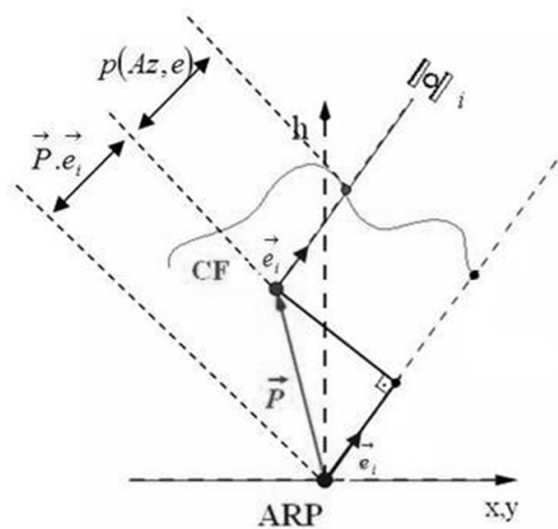


Fig. 2 – Dedução das variações do centro de fase. Fonte: Adaptado de Freiburger Junior (2007)

A variação do centro de fase com relação ao ARP é denominada de offset do centro de fase. As coordenadas tridimensionais dos offsets (norte, leste, vertical) tanto para L1 e quanto para L2 em relação ao ARP são fornecidos pelos fabricantes, para a maioria dos modelos de antenas GNSS, porém as antenas devem ser tratadas de forma individual, visto que devem conduzir para o seu próprio centro de fase. Desta forma faz-se necessário que cada uma delas seja calibrada.

Visando a determinação dos valores do PCV é necessário conhecimento da direção do sinal proveniente do satélite, que é descrita em função do azimute (Az) e da elevação (e) deste satélite (Fig. 2).

As coordenadas tridimensionais do PCO e a variação do PCV em função da elevação dos satélites ou PCV dependente da elevação e dos azimutes dos satélites de uma antena GNSS são determinados aplicando métodos de calibrações.

3. MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE ANTE-NAS GNSS

Os principais métodos de calibração são: Calibração absoluta em ambientes controlados (câmaras anecóicas); Calibração absoluta em campo; e Calibração relativa em campo.

3.1 Calibração absoluta em ambientes controlados

Em 1987 foram iniciadas as experiências de calibração absoluta em ambientes controlados (SCHUPLER e CLARK, 2000). Os ambientes controlados referem-se a câmaras anecóicas, que são ambientes que minimizam a quantidade de reflexão ou reverberação de ondas de diferentes tipos. Suas paredes são feitas com um absorvedor de microondas piramidal composto por um material esponjoso (espuma) impregnado com partículas de carbono e grafite. Qualquer energia estranha, que entra em contato com este material é absorvido e convertido em calor, o qual é dissipado ao longo deste material (CANADIAN SPACE AGENCY, 2008).

A calibração absoluta de antenas em câmaras anecóicas (Fig. 3) emprega sinais GNSS simulados, irradiados por uma fonte fixa (antena transmissora) que incide uniformemente sobre a antena a ser testada. Essa antena é fixada em um suporte capaz de realizar rotações e inclinações da antena em torno de um ponto referenciado ao ARP.

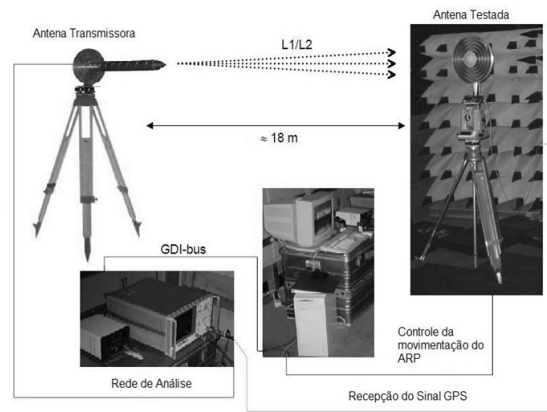


Fig. 3 – Calibração absoluta de antenas em câmaras anecóicas. Fonte: adaptado de Görres et al., (2006).

Esse tipo de calibração fornece, entre outras informações, as coordenadas do centro de fase (PCO) para cada frequência e os correspondentes diagramas de fase da antena (SCHUPLER e CLARK, 2000).

3.2 Calibração absoluta em campo

O *Institut für Erdmessung* (IfE) da Universidade de Hannover foi o idealizador da Calibração absoluta em campo. Inicialmente de forma manual (WÜBBENA et al., 1996) (Figuras 4 e 5) e posteriormente inaugurando a automação dos procedimentos (Fig. 6).

O desenvolvimento da calibração absoluta de campo foi idealizada, principalmente, ao fato de levantamentos de campo serem influenciados pelo efeito do multicaminho (ROTCHACHER et al., 1995a apud MENGE et al., 1998) uma vez que nenhuma estação de observação pode estar totalmente livre deste efeito.

Segundo Schmitz e Wübbena (2001), a descrição deste método consiste em realizar rastreios de satélites GNSS em dois dias siderais médios consecutivos. Em um dos dois dias de rastreio (normalmente, no segundo dia), a antena a ser calibrada é submetida a movimentos de rotação e inclinação em torno de um ponto conhecido, de forma que os PCVs sejam recuperados como observáveis quando se compara os dois conjuntos de dados.

Pressupõe-se que, em condições invariáveis do entorno da estação, o multicaminho se repete nos mesmos períodos, podendo ser detectados e minimizados pela comparação entre os resíduos da



Fig. 4 – Calibração absoluta em campo de forma manual (A). Fonte: Wübbena et al., (1996).



Fig. 6 – Calibração absoluta em campo de forma automatizada. Fonte: Wanninger (2003).



Fig. 5 – Calibração absoluta em campo de forma manual (B). Fonte: Freiberg Junior (2007).

dupla-diferença de fase das observações dos dois dias siderais.

Atualmente, a calibração absoluta pode ser executada em tempo real com emprego de um mecanismo automatizado (Fig. 6) que realiza rotações e inclinações automáticas na antena a ser calibrada (WÜBBENA et al., 2000). Esse mecanismo automatizado foi projetado pela Geo++ (*Gesellschaft für satellitengestützte und navigatorische Technologien mbH*) e IfE (*Institute of Geodesy*). Ele realiza ainda movimentos programados, posicionando a antena em ângulos e azimutes variados para simular alteração da geometria dos satélites. Com isso, é

possível adquirir observações homogêneas ao longo do horizonte da antena incluindo ângulos de elevação abaixo de 0° (BÖDER et al., 2001), e para um número muito grande de posições, ou seja, de 6 a 8 mil (WÜBBENA et al., 2006).

Segundo Menge et al. (1998), as vantagens na calibração absoluta em campo de forma automatizada são:

- ✓ Calibração de uma antena sem a necessidade de uma antena de referência;
- ✓ Efeito do multicaminho é eliminado/reduzido, independente da estação de referência;
- ✓ Coordenadas precisas da estação não são necessárias;
- ✓ Os PCV calculados referem-se a um ponto de referência muito bem conhecido na antena, o *offset* é incorporado, e nenhum *offset* predeterminado é necessário;
- ✓ A antena tem boa cobertura com valores de correção em virtude das rotações e inclinações; e
- ✓ É possível realizar medidas em diferentes azimutes e elevações, podendo observar elevações abaixo de 0° graus

3.3 Calibração relativa em campo

A calibração relativa em campo consiste em posicionar duas antenas em linha de base curta

(alguns metros). Uma antena é a de referência e a outra a ser calibrada (Fig. 7).

Para realizar a calibração relativa são necessárias observações de 24 horas e 4 dias consecutivos. Sendo que 24 horas aplica-se o rotacionamento automático da antena a ser calibrada e de 4 dias consecutivos quando aplica o rotacionamento manual dessas antenas. Essas observações se fazem necessárias a fim de proporcionar cobertura de dados de satélites no horizonte completo da antena e reduzir a influência do efeito de multicaminho.

Esse método pode ser aperfeiçoado quando realiza-se o rotacionamento da antenas a ser calibrada em torno de seu eixo mecânico, inclinações da antena sobre um ponto conhecido ou intercâmbio de antenas (WANNINGER e MAY, 2000).

Na calibração relativa em campo há duas dificuldades principais que são: primeiramente há a necessidade de uma antena calibrada como referência e segundo, o erro do multicaminho deve ser separado das variações do centro de fase. Esse efeito deve ser especialmente considerado (WÜBBENA, 2000).

4. BASE DE CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GNSS NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (BCAL/UFPR)

O interesse em se ter uma base de calibração de antena GNSS na UFPR surgiu pela inexistência do serviço deste serviço nos países da América Latina, inclusive no Brasil.

O desenvolvimento desta base de calibração no Brasil é inovador e a idéia, com a transferência de tecnologia da Alemanha, é fruto de um processo de cooperação internacional do Programa PROBRAL (CAPES/DAAD) (Brasil/Alemanha).

A BCAL/UFPR (Fig. 8) foi implantada no ano de 2011 (FREIBERGER JUNIOR, 2007) no Campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, na laje do antigo observatório Astronômico Camil Gemael.

Essa base de calibração encontra-se anexo ao auditório e ao lado do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH). Esse laboratório fornece toda a infra-estrutura necessária para a realização da calibração de antenas GNSS, como receptores e antenas.



Fig. 7 – Calibração Relativa em Campo.



Fig. 8 – BCAL/UFPR.

4.1. Estrutura da BCAL/UFPR

A base de calibração é composta por três pilares denominados de: 1000(Oeste), 2000(Norte) e 3000(Sul) (Fig. 9). Esses pilares foram construídos em cima de uma laje de concreto armado.

Cada pilar possui uma base de centragem forçada na superfície superior. O modelo de pilares adotado baseou-se em pilares que constituem parte da rede geodésica do Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (KIT) e também seguiu as instruções prescritas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) para a execução dos marcos e pilares que compõem o Sistema Geodésico Brasileiro. Eles são construídos em concreto armado com altura mínima de 1,30 m da laje e perfil circular para minimizar cantos ou superfícies que possam provocar a ocorrência do efeito de multicaminho.

4.2. Equipamentos utilizados na BCAL/UFPR

Visando determinar parâmetros de calibração (PCO e PCV) em nível absoluto de antena de receptores GNSS aplica-se o método de calibração relativo em campo.

Ocupam-se os pilares: 1000 e 2000, sendo que o pilar 1000 é utilizado para acoplar a antena de referência e o 2000 a antena a ser calibrada. Esses pilares são ocupados por apresentarem menores influências do efeito do multicaminho (HUINCA, 2009), após análises realizadas.

As antenas utilizadas como referência são as antenas *Choke Ring*, modelos: LEIAT 504 (Fig. 10) e LEIAR25 (Fig. 11).

Visando substituir a base de fixação das antenas e ter uma superabundância de dados GNSS em algumas direções, utiliza-se o DRB



Fig. 9 – Pilares da BCAL/UFPR.



Fig. 10 – LEIAT 504 Fonte: Leica Geosystems (2011).



Fig. 11 – LEIAR25 Fonte: Leica Geosystems (2011).

(*Drehrumbum*) (Fig.12). Ele é um mecanismo automático que rotaciona a antena GNSS em azimutes e direções programados. A primeira rotação objetivando medições GNSS é realizada na direção norte, depois de 15 segundos o mecanismo move a antena para a direção sul (norte-sul), mais 15 segundos para direção oeste (sul-oeste), e por fim depois do instante inicial do giro, 45 segundos na direção leste (oeste-leste). Completado 60 segundos (1 minuto) o DRB rotaciona a antena em quatro direções diferentes.

4.3. Metodologia aplicada na BCAL/UFPR

Nessa base de calibração aplica-se o método de calibração relativo em campo em nível absoluto e com o rotacionamento automático da antena a ser calibrada. As antenas são posicionadas em linha de base curta, aproximadamente 5 metros, supondo



Fig. 12 – DRB (*Drehrumbum*).

que as influências dos erros orbitais, da ionosfera, troposfera e efeito do multicaminho se tornem mínimas no processamento relativo.

Antes de se iniciar a calibração realiza-se o nivelamento entre os pilares utilizados durante o procedimento de calibração, visando determinar o desnível entre as antenas. Procedimento este importante na determinação do centro de fase das antenas. São realizadas observações de 24 horas com um intervalo de gravação de 15 segundos.

A partir dos dados GNSS coletados em campo utiliza-se o programa *Wasoft/Kalib* para determinar os parâmetros de calibração (PCO e PCV) (WASOFT,2011). Esse programa permite o processamento de observações geradas a partir de rotações automáticas e manuais da antena a ser calibrada (FREVERT et al., 2006).

O centro de fase das antenas na BCAL/UFPR é obtido em nível absoluto, já que a antena de referência empregada possui seus parâmetros determinados absolutamente pela empresa GEO++ (GEOPP,2011).

Realizou-se a calibração da antena Trimble TRM22020.00+GP utilizando como referência a antena LEIAT504, no qual foram determinados os parâmetros de calibração dessa antena.

5. ALGUNS ESTUDOS REALIZADOS NA BCAL/UFPR

Alguns estudos na BCAL/UFPR, ao longo de dois anos, já foram realizados para uma mesma antena com foco em seus parâmetros de calibração. Os resultados alcançados mostram que estes parâmetros são diferentes quando obtidos em épocas distintas e sob diferentes condições

atmosféricas. Mediante esta constatação surgiu à necessidade de desenvolver uma análise mais criteriosa dos erros advindos do posicionamento por satélites e das variáveis de campo. Uma vez identificados, eles poderão ser controladas visando à determinação com precisão de um único parâmetro de calibração para a antena. Diante deste fato, algumas outras variáveis (observadas e calculadas), as quais podem influenciar no processo, passaram a ser analisadas. As variáveis ambientais observadas são: temperaturas, umidade relativa do ar e precipitação e as calculadas: variações do efeito do multicaminho.

Nesta seção apresentam-se alguns destes estudos, como o efeito do multicaminho na BCAL/UFPR. Também serão indicados os resultados alcançados com a calibração da antena Trimble TRM22020.00+GP utilizando como referência a antena LEIAT504.

5.1. Efeito do multicaminho

O multicaminho pode ser atenuado por técnicas espaciais e de processamento de sinal. As técnicas espaciais baseiam-se na geometria de propagação dos satélites. As técnicas de processamento do sinal são referentes ao “software” no receptor (WELL, 1997 apud BARBIERI et al., 2006). Outra forma de atenuar o efeito do multicaminho é utilizar antenas acopladas com materiais absorventes de microondas. Esses melhoram as características de ganho da antena e também absorvem sinais indiretos que podem chegar até a antena (LÖFGREN et al., 2009).

Para realizar a análise do efeito do multicaminho na BCAL/UFPR coletaram-se dados com os seguintes equipamentos:

- ✓ Receptor geodésico de dupla frequência Leica GPS1200 e antena LEIAT504 (*Choke Ring*);
- ✓ Receptor geodésico de dupla frequência Trimble 4000 SSI e antena TRM 22020.00+GP.

Aplicou-se o método de posicionamento geodésico absoluto estático. Visando atender o objetivo de quantificar o efeito do multicaminho nos pilares utilizados na calibração, a qualidade dos dados foi analisada para ambas portadoras (L1 e L2) com o programa TEQC e o *Wasoft/Multipath* (Wanninger e May, 2000).

Tabela 1. Variação média do efeito do multicaminho dos pilares da BCAL/UFPR.

PILAR 1000 (Oeste)		
Receptor	L1	L2
Leica GPS1200	0,33890 m	0,36623 m
Trimble 4000 SSI	0,24882 m	1,49647 m
PILAR 2000 (Norte)		
Receptor	L1	L2
Leica GPS1200	0,36983 m	0,38283 m
Trimble 4000 SSI	0,25721 m	1,61554 m
PILAR 3000 (Sul)		
Receptor	L1	L2
Leica GPS1200	0,62013 m	0,53309 m
Trimble 4000 SSI	0,33949 m	1,49675 m

Na Tabela 1 verifica-se a variação média do efeito do multicaminho calculadas com o programa TEQC para os três pilares de calibração da BCAL/UFPR. Observa-se que o pilar mais afetado pelo efeito do multicaminho é o Pilar 3000 (Sul), pois apresenta a maior variação média do efeito para ambos os receptores, exceto na onda portadora L2 para os dados coletados com o receptor Trimble 4000 SSI.

Atribui-se que exista uma contribuição maior desse efeito nos valores da onda portadora L2, pois nessa observável GNSS existe a necessidade de aplicar a técnica de reconstrução do sinal para se obter o completo comprimento da onda. Outra atribuição deve-se a idade dos receptores, Trimble 11 anos e Leica 3 anos.

Para a realização da análise da variação do efeito do multicaminho na dupla-diferenças de fase com o programa *Wasoft/Multipath* nos pilares da BCAL/UFPR, realizaram-se os processamentos dos dados GNSS obtidos com o conjunto de equipamentos, antena LEIAT504 (*Choke Ring*) e receptor GPS 1200. A intensidade desse efeito pode ser observada através de símbolos indicados no QUADRO 1.

Na Fig. 13 observa-se a intensidade do efeito do multicaminho do Pilar 1000 (Oeste), na Fig. 14 para o Pilar 2000(Norte) e na Fig. 15 para o Pilar 3000 (Sul). A variação da intensidade desse efeito pode ser analisada em função da elevação (eixo y) e do azimute (eixo x) dos satélites observados. Analisando essas figuras pode-se observar que o pilar 2000 (Norte) é o menos afetado pelo efeito

Quadro 1. Visualização da variação do efeito do multicaminho com o programa *WASOFT/MULTIPATH*.

Símbolo	Significado	Variação do efeito do multicaminho
Espaço vazio	Dados não disponíveis	-
▪	Influência baixa	< 5mm
▣	Influência média	< 15mm
■	Influência alta	>15mm

do multicaminho, portanto pode ser utilizado na calibração de antenas GNSS.

Verificou-se que para ambos os programas (TEQC e *Wasoft/Multipath*) utilizados para análise do efeito do multicaminho na BCAL/UFPR o pilar 3000 (Sul) é o mais afetado por esse efeito. Através do diagrama de obstruções gerado para o Pilar 3000 (Sul) (Fig. 16), para este pilar, percebem-se os elementos que podem estar influenciando para que a intensidade desse efeito seja maior nele.

Mediante a análise da variação média do efeito do multicaminho e dos objetos que podem estar contribuindo para essa variação optou-se pela elaboração de um material que possibilitasse a minimização do efeito do multicaminho. Foi então desenvolvido no LAGE um material, que minimiza o efeito do multicaminho em estações, denominado de AEM-LAGE (Fig. 17).

Esse material é acoplado às antenas e o sinal indireto que poderia chegar até elas é dissipado. Testado anteriormente comprovando que é eficiente na minimização do efeito do multicaminho (VISKI et al, 2010) esse material foi utilizado em um experimento visando verificar alguma minimização do efeito do multicaminho nas observações GNSS advindas da aplicação da metodologia relativa em campo de calibração de antenas. Esse experimento consistiu-se em dois levantamentos, sendo que no primeiro não se utilizou nenhum material atenuador e no segundo utilizou-se o AEM-LAGE. Os dados foram processados com o programa TEQC e analisou-se a variação média do efeito do multicaminho.

Observa-se na Tabela 2 a variação do efeito do multicaminho para a onda portadora L1 (MP1) e L2 (MP2) dos dois levantamentos. Avaliando esses valores pode-se verificar que o AEM-LAGE atenuou o efeito do multicaminho tanto na portadora L1 e L2. Pode-se verificar que foram observados

os mesmos satélites nos dois experimentos e que eles foram feitos em situações ambientais similares já que a variação da temperatura média é de 3,6 (°Celsius) e a variação da umidade relativa do ar foi de 10%.

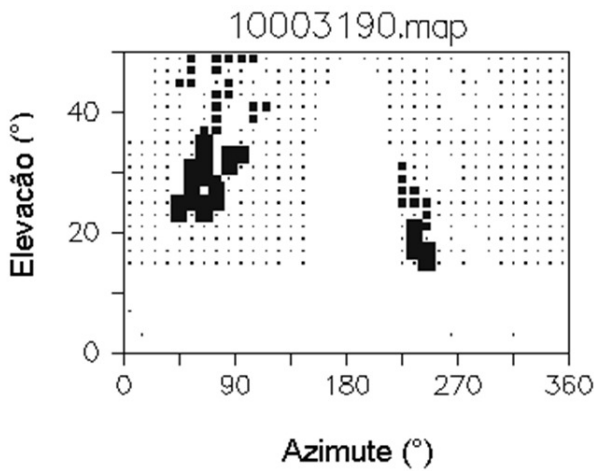


Fig. 13 – Efeito do multicaminho- Pilar 1000 (Oeste).

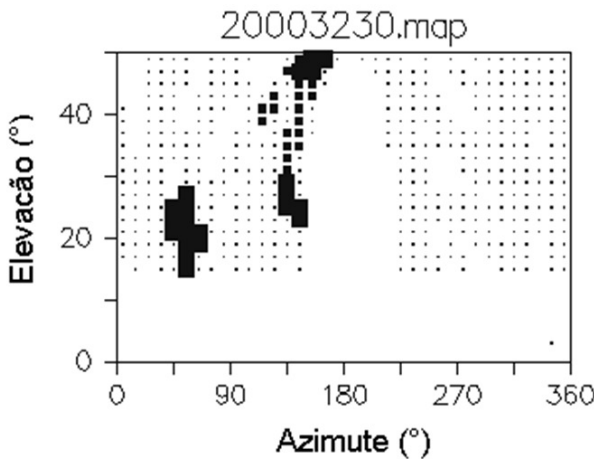


Fig. 14 – Efeito do multicaminho - Pilar 2000 (Norte).

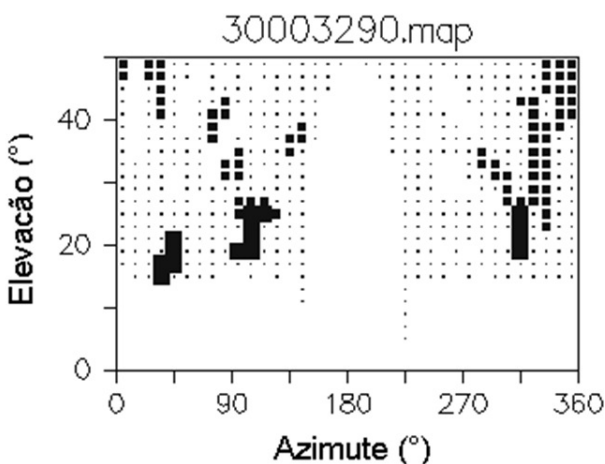


Fig. 15 – Efeito do multicaminho - Pilar 3000 (Sul).

5.2. Parâmetros de calibração (PCO e PCV dependente de azimute e elevação dos satélites) das antenas GNSS

Nessa seção serão apresentados os parâmetros de calibração da antena Trimble TRM22020.00+GP em nível absoluto. Os valores do PCO (componente norte, componente leste e componente vertical) e PCV dependente do azimute

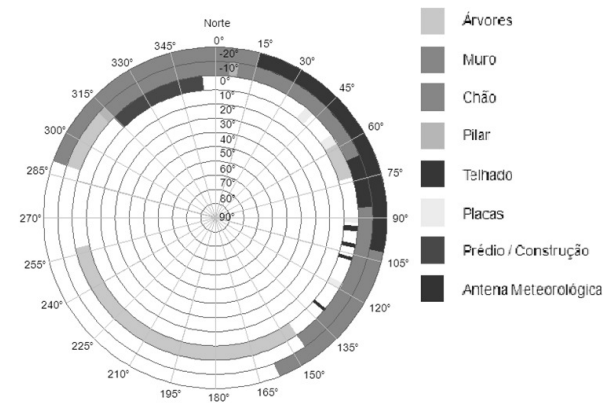


Fig. 16 – Diagrama de obstrução do pilar 3000 (Sul).

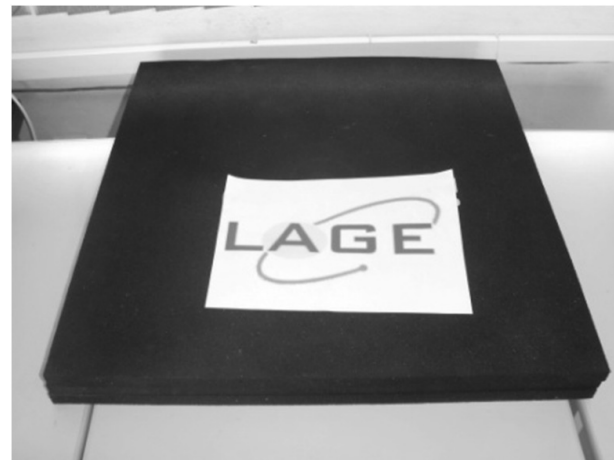


Fig. 17 – AEM-LAGE.

Tabela 2. Variação média do efeito do multicaminho.

	LEV 1	LEV2
MP1	0,071051	0,067767
MP2	1,364624	1,336596
Satélites Observados	1, 5, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 22, 25, 26 e 27	1, 5, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 22, 25, 26 e 27
Temperatura Média (°Celsius)	31,6	28
Umidade Relativa do Ar Média %	30%	40%

e da elevação dos satélites para portadora L1 e L2 foram obtidos através do método de calibração relativo em campo, na BCAL/UFPR, em diferentes dias e em dois anos diferentes. Na tabela 1 indica-se os três experimentos realizados no ano de 2008 (Experimentos 1 a 3) e os quatro experimentos realizados no ano de 2009 (Experimentos 4 a 7).

5.2.1 PCO

Observam-se na Tabela 3 e na Tabela 4 os valores do PCO (componente norte, leste e vertical) para a onda portadora L1 e L2, respectivamente, em milímetros. Apresenta-se também os valores médios e os desvio padrão calculado.

Analisando a Tabela 3 verifica-se que para o componente norte os valores ora são positivos e ora negativos. Observa-se também o valor médio alcançado para os experimentos realizado, bem como o desvio padrão calculado. Verifica-se que a variação para os componentes: norte e leste são menores que o milímetro e para a componente vertical essa é de 2,5 mm (experimentos: 1-6, 2-6).

Observando a Tabela 4 verifica-se que a componente norte para o experimento 5 é a que apresenta maior discrepância em relação aos demais valores alcançados para esta componente. Na componente leste os valores variam menos que 0,1 mm e para a componente vertical a maior variação é de 1,1 mm (experimento 4-6).

Comparando as componentes: norte, leste e vertical para ambas as ondas portadoras verificam-se que as maiores variações encontram-se na componente vertical. Observou-se que, a mesma antena, para dias distintos apresenta valores de PCO diferentes tanto para L1 quanto para L2, contudo as maiores variações são verificadas para a portadora L1.

Os valores da componente norte, leste e vertical, são os vetores que determinam o PCO da antena, isso é o ponto médio no qual essa antena recebe sinais GNSS. Os valores destes vetores são de extrema importância para os levantamentos geodésicos, neles as coordenadas devem ser determinadas de forma precisa. Observou-se que o valor da componente vertical nesses experimentos está na ordem 50 mm. Negligenciar esses valores no processamento dos dados GNSS pode produzir erros principalmente na coordenada altimétrica dos pontos.

Tabela 3. PCO (Norte, Leste e Vertical) - L1.

Dia GPS/ Ano	Experimentos	PCO (L1)-mm		
		Norte	Leste	Vertical
245_08	1	0,1	-2,1	51,9
247_08	2	0,2	-2	51,9
248_08	3	0,3	-2	51,8
079_09	4	0,2	-2	51,2
108_09	5	-0,1	-2,1	49,7
109_09	6	-0,1	-2,1	49,4
112_09	7	-0,1	-2,1	50,6
	Média	0,1	-2,1	50,9
	Desvio Padrão	0,2	0	1

Tabela 4. PCO (Norte, Leste e Vertical) – L2.

Dia GPS/ Ano	Experimentos	PCO (L1)-mm		
		Norte	Leste	Vertical
245_08	1	-0,3	2,7	60,8
247_08	2	-0,5	2,5	60,6
248_08	3	-0,6	2,6	60,4
079_09	4	-0,6	2,6	61,1
108_09	5	-0,1	2,6	60,4
109_09	6	-0,4	2,6	60
112_09	7	-0,4	2,7	60,8
	Média	-0,4	2,6	60,6
	Desvio Padrão	0,2	0,1	0,3

5.2.2 PCV dependente de azimute e elevação dos satélites

O PCV consiste de um deslocamento adicional do centro de fase, de caráter sistemático, que é função do ângulo de incidência do sinal GNSS. Neste trabalho foram determinados os valores do PCV dependentes não somente de elevação dos satélites, mas também em função do azimute dos mesmos. Os valores do PCV de um experimento para ambas as portadoras estão representados em gráficos de superfície. Neles apresenta-se o horizonte da antena GPS em suas variações do centro de fase dadas em função da distribuição dos satélites em azimutes de 0° a 360° e em elevação de 0° a 90°.

Percebe-se na Fig. 18 a variação do PCV em milímetros para a portadora L1. Observa-se com a escala de cinza que esses valores não diferem muito entre si. Constata-se também que os maiores picos do valor da PCV encontram-se na elevação de 90° e os menores encontram-se no intervalo de: 0° a 40° e de 60° a 70° (elevação).

Visualiza-se na Fig. 19 o comportamento da superfície deste PCV em milímetros para a portadora L2. A superfície ideal de uma antena GNSS é uma superfície regular, porém esse fato não ocorre para a portadora L2 para esta antena. Percebe-se que há picos e depressões nessa superfície. Observam-se alguns picos nos experimentos na elevação acima de 80° entre os azimutes superiores a 250°. Nota-se também que os menores valores encontram-se aproximadamente nos intervalos de: 0° a 150° e 250° a 350° de azimute, elevação de 50° a 70°.

Mediante análise das Figuras 18 e 19, observa-se que para a portadora L1 a superfície encontrada é regular, já para a onda portadora L2 a superfície é irregular, com a presença de muitos picos e depressões.

Os valores dos PCVs em função de azimute e elevação indicam um modelo completo das características do recebimento dos sinais GNSS na antena (GEO++, 2011).

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

Caminha-se para calibração relativa em nível absoluto com o controle das variáveis ambientais (temperatura e umidade). Também será realizada a validação dos parâmetros de calibração de antenas na BCAL/UFPR. Essa validação será realizada comparando parâmetros de calibração obtidos na BCAL/UFPR (Brasil) com parâmetros obtidos pela empresa WaSoft (Alemanha) aplicando a mesma metodologia.

Os estudos estão sendo realizados aplicando a metodologia mencionada na seção 4.3.

Os valores do PCO e PCV dependente de elevação e dependente de azimute e elevação serão determinados de modo relativo, porém em nível absoluto, visto que, a antena de referência empregada (*Choke Ring 3D* modelo Leica AR25) já possui seus parâmetros de calibração absoluto determinados pela empresa Geo++ com o dispositivo automatizado (Fig. 20).

Visando a validação dos parâmetros de calibração (PCO e PCV) e a verificação da precisão dos valores obtidos, os parâmetros de calibração, em níveis absoluto e relativo calculados nesta base (BCAL/UFPR) para as antenas Trimble TRM220.00+GP e Leica ATX1202 GG serão comparados com os parâmetros produzidas por duas empresas (Geo++ (*Gesellschaft für*

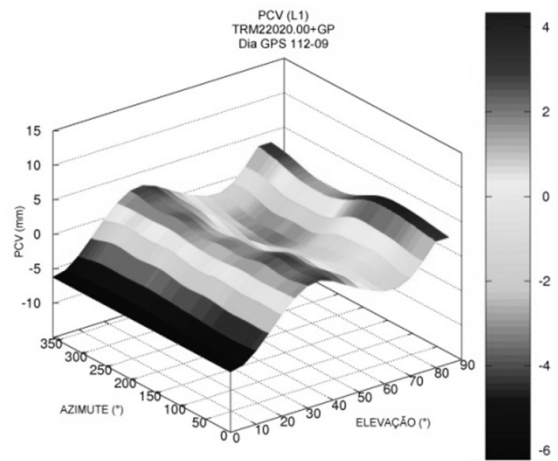


Fig. 18 – PCV dependente de azimute e elevação para a portadora L1 – antena TRM 22020.00+GP.

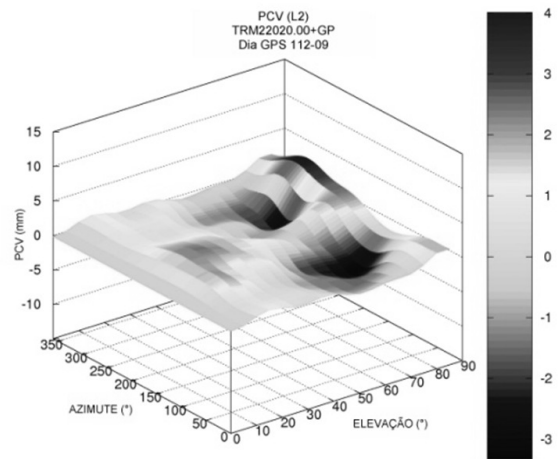


Fig. 19 – PCV dependente de azimute e elevação para a portadora L2 – antena TRM 22020.00+GP.



Fig. 20 – Calibração absoluta com dispositivo automatizada da antena Leica AR25. Fonte: IFE (2011).

satellitengestützte und navigatorische Technologien mbH e WaSoft) de calibração de antenas.

Pretende-se ainda verificar a minimização do efeito do multicaminho no pilar aonde as antenas serão calibradas empregando o AEM-LAGE durante o procedimento de calibração destas antenas (Fig. 21).

7. CONCLUSÃO

O erro advindo do desconhecimento do centro de fase das antenas pode variar de milímetros a centímetros. Uma forma de minimizá-lo é através da calibração dessas antenas. O procedimento de calibração de antena visa à determinação do PCO e PCV das antenas.

A existência de uma base de calibração de antenas GNSS consolidada no Brasil é de suma importância, pois possibilitará a determinação parâmetros de calibração dessas antenas e disponibilizar esse serviço a usuários do sistema GNSS. Os usuários contarão com antenas com parâmetros individuais da calibração que poderão ser inseridos nos processamentos de dados GNSS visando à obtenção de precisão milimétrica na determinação das coordenadas geodésicas dos pontos de interesse. Vislumbra-se ainda como uma contribuição para o Brasil à possibilidade de futura calibração de antenas GNSS das redes existentes no Brasil, por exemplo, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), a qual poderá disponibilizar os arquivos no formato antex para a comunidade usuária.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as pessoas de Andreas Knöpfler e Michael Mayer do KIT (*Karlsruhe Institute of Technology*) pelos ensinamentos no âmbito de calibração de antenas. Ao professor Doutor Lambert Wanninger da empresa *WaSoft.de* pela concessão de licença de alguns programas que foram utilizados durante essa pesquisa e pela calibração relativa das antenas que estão sendo testadas. Agradecemos também a empresa GEO++ pela colaboração com a Calibração Absoluta das Antenas usadas como estação de referência na BCAL/UFPR. À CAPES e ao CNPQ pelo auxílio financeiro.

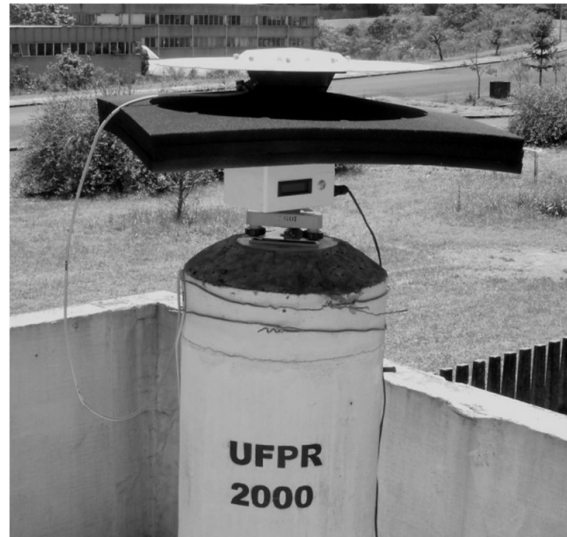


Fig. 21 – Calibração da antena TRM22020.00+GP acoplada ao AEM-LAGE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBIERI, M. J.; FARRET, J. C.; MORAES, C. V.; CARNEIRO, M (2006). Ruído, Multicaminho e Ângulo de Elevação: Qual a Melhor Máscara para Trabalhos com Gps?. In: **Revista Geomática**, Santa Maria, v.1, n.1 – 2006.
- BÖDER, V.; MENGE, F.; SEEBER, G.; WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. How To Deal With Station Dependent Errors – New Developments Of The Absolute Field Calibration Of PCV And Phase-Multipath With A Precise Robot. In: **ION GPS**, 2001.
- FREIBERGER JUNIOR, J (2004). **Antenas de Receptores GPS: Características Gerais**. Material teórico de apoio ao Curso de Extensão Error Sources in Highly Precise GPS Positioning, 2004. Disponível em < http://www.geomatica.ufpr.br/docentes/ckrueger/pessoal/D_antenas.pdf>. Acesso em: 29 de setembro de 2008.
- FREIBERGER JUNIOR, J (2007). **Investigações Da Calibração Relativa de Antenas GNSS**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2007.
- FREVERT, V.; BLUMENBACH, T.; WANNINGER, L. **Beschleunigung der Antennen-Feldkalibrierung durch**

- automatisierte Drehung.** 6. Antennenworkshop, Bonn, 21.09.2006.
- GEOPP (2011). **Gesellschaft für satellitengestützte und navigatorische Technologien mbH.** Disponível em <<http://www.geopp.de>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2011.
- GÖRRES, B.; CAMPBELL, J.; SIEMES, M. **New Anechoic Chamber Results and Comparison with Field and Robot Techniques.** IGS Meeting Bern, 2006.
- HUINCA, S.C.M. **Calibração Relativa de Antenas GNSS na BCAL/UFPR.** Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2009.
- LEICA GEOSYSTEMS.** The Leica NRS Technical Newsletter from Leica Geosystems. Four Your Reference. Issue 02. November 2010.
- MADER, G. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. **GPS Solutions**, Vol. 3, N°1, p.50-58, 1999.
- MENGE, F.; SEEGER, G.; VÖLKSEN, C. WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. Results of absolute field calibration of GPS antenna PCV. In: Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, **ION GPS-98**, September 15-18, Nashville, Tennessee.
- MENGE, F. **Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung.** 198 f. Genehmigte Dissertation. Hannover, 2003.
- ROTHACHER, M. Comparisons of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. **GPS Solution**, 4 (4), 2000.
- SCHMITZ, M.; WÜBBENA, G. **Remarks on Effects of the SCIS Radome on PCV.** Garbsen, Germany, 2001.
- SCHUPLER, B. R.; CLARK, T. A. (2000). High Accuracy Characterization of Geodetic GPS Antennas Using Anechoic Chamber and Field Tests. **Proceedings of the ION GPS 2000**, 19-22 September, Satl Lake City, UT.
- VISKIA, R.; KRUEGER, C.P.; HUINCA, S.C.M. Investigaç o de Material Isolante para Dissipaç o de Efeito de Multicaminho em Antenas GNSS. **Livro de Resumos do 18° Evinci - 3° Einti.** Ci ncias Exatas e da Terra. Outubro de 2010.
- WÜBBENA, G.; MENGE, F.; SCHMITZ, M.; SEEGER, G.; VÖLKSEN, C. A new approach for field calibration of antenna phase center variations. In: Proceedings of the 9th. International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation **ION GPS-96**. 1996
- WANNINGER, L.; MAY, M. Carrier phase multipath calibration of GPS reference stations. In: Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, **ION GPS 2000**, Salt Lake City, UT, USA, September 19-22, 2000.
- WASOFT. **Programm WaSoft/Kalib.** Disponível em <<http://www.wasoft.de>>. Acesso realizado em 20 de Junho de 2009.
- WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; MENGE, F.; BÖDER, V.; SEEGER, G. Automated absolute field calibration of GPS-Antennas in real time. In: Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation **ION GPS 2000**, Salt Lake City, UT, USA, September 19-22, 2000.
- WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; BOETTCHER, G. Absolute GNSS antenna calibration with a robot: repeatability, GLONASS and carrier-to-noise pattern. In: **10th EUPOS ICS**, 21-24 November 2006a. Budapeste, Hungria.