

CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GPS EM DIFERENTES ESTAÇÕES

GPS antenna calibration at different stations

JAIME FREIBERGER JUNIOR¹
MICHAEL MAYER²
KURT SEITZ²
BERNHARD HECK²
CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER¹

¹Universidade Federal do Paraná
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Departamento de Geomática – Curitiba-PR, Brasil
jaime@gik.uni-karlsruhe.de
ckrueger@ufpr.br

²Universität Karlsruhe (TH)
Geodätisches Institut
Karlsruhe, Alemanha
mmayer@gik.uni-karlsruhe.de
seitz@gik.uni-karlsruhe.de
heck@gik.uni-karlsruhe.de

RESUMO

O objetivo deste trabalho é investigar a modelagem do centro de fase de antenas geodésicas GPS obtida por método relativo de calibração. Dois modelos de antenas GPS geodésicas foram investigados. Medições em dois pilares de calibração foram conduzidas a fim de se determinar as variações do centro de fase dependentes de azimute e elevação. Diferenças significantes entre as modelagens são evidentes em decorrência do intercâmbio entre pilares, e podem estar associadas às diferentes condições de multicaminho nas estações.

ABSTRACT

The goal of this paper is to investigate the modelling of geodetic GPS antenna phase center through the relative field calibration method. Two geodetic GPS

antenna models were investigated. Field measurements were carried out at two calibration pillars in order to estimate azimuth and elevation dependent phase center variations. Significant differences between the modellings due to antenna interchange between the pillars are rather evident and can be attributed to different multipath conditions.

1. INTRODUÇÃO

As variações do centro de fase (PCV) das antenas GPS e o efeito multicaminho são fontes de erros intrínsecos à estação (SEEBER, 2003, p. 299). O efeito multicaminho é causado por refletores situados no entorno da estação, atuando segundo uma função periódica. As PCV assumem um comportamento estático pois dependem das características de recepção da antena e de sua construção (WÜBBENA et al., 2000, p. 2513).

As PCV consistem de uma grandeza geométrica de influência direta na medição de distâncias com emprego da fase da onda portadora. Atualmente, as PCV representam um dos principais fatores limitantes da precisão do posicionamento GPS. A exemplo das redes de estações de referência permanentes do IGS (*International Geodetic Service*), é comum que sejam empregados diferentes tipos de receptores e antenas, implicando na necessidade de se aplicar os valores de calibração das antenas envolvidas (MENGE, 2003, p. 13).

Alguns métodos para a determinação das PCV de antenas GPS geodésicas foram propostos: a calibração absoluta em câmaras anecóicas (SCHUPLER et al., 1995), a calibração relativa (MADER, 1996) e a calibração absoluta em campo, considerada estado-da-arte por empregar alta tecnologia em processos de separação e eliminação de erros intrínsecos à estação (WÜBBENA et al., 2000).

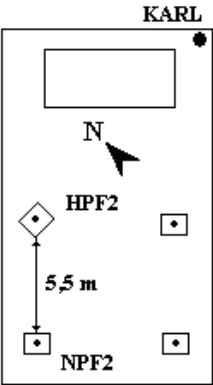
Pelo método relativo de calibração de antenas GPS podem ser obtidas soluções ao nível da calibração absoluta a partir da rotação da antena a ser calibrada e processamento dos dados em relação a uma antena de referência calibrada pelo método absoluto (MENGE, 2003, p. 77). Por esta estratégia, podem ser determinadas as PCV dependentes de azimute e elevação com considerável redução do efeito multicaminho, contudo sem a possibilidade de separação dessas duas influências. Dessa forma, as PCV de uma mesma antena GPS podem apresentar diferenças quando o processo de calibração é conduzido em estações distintas.

Neste trabalho, são analisadas as PCV de antenas GPS geodésicas obtidas pelo método relativo de calibração conduzido em duas estações. São discutidas as alterações associadas às condições de multicaminho no entorno das estações.

2. MATERIAL E METODOLOGIA

As medições para fins de calibração foram realizadas em dois pilares, denominados HPF2 e NPF2. Assim, dados GPS foram coletados nestas estações, situadas no observatório astronômico do Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH) – GIK. A figura 1 ilustra a disposição destas estações.

Figura 1 – Pilares de calibração HPF2 e NPF2 situados no GIK.



As medições foram realizadas com dois modelos de antenas GPS geodésicas. Os instrumentos utilizados, o cronograma de ocupação e os pilares de calibração empregados estão listados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Antenas GPS Leica AT502.

Modelo	Número de série	Semana GPS	Dia GPS	Pilar
LEICA AT502	SN 2816	1297-3	322	NPF2
		1297-4	323	HPF2
	SN 8286	1298-1	327	HPF2
		1298-2	328	NPF2
	SN 2709	1298-1	327	NPF2
		1298-2	328	HPF2
	SN 1325	1298-3	329	NPF2
		1298-4	330	HPF2
	SN 1334	1300-2	342	HPF2
		1300-3	343	NPF2
	SN 4138	1307-4	027	HPF2
		1307-5	028	NPF2

Tabela 2 – Antenas GPS Trimble Compact L1/L2wGP.

Modelo	Número de série	Semana GPS	Dia GPS	Pilar
LEICA AT502	SN 6926	1307-1	024	NPF2
		1307-3	026	HPF2
	SN 8413	1307-1	024	HPF2
		1307-3	026	NPF2
	SN 8692	1307-4	027	NPF2
		1307-5	028	HPF2
	SN 5816	1308-1	031	HPF2
		1309-2	039	NPF2
	SN 5817	1308-3	033	HPF2
		1308-4	034	NPF2
	SN 7000	1308-3	033	NPF2
		1308-4	034	HPF2

Foram realizadas sessões de rastreamento de 24 horas. Após este período o sistema era desligado, as antenas eram intercambiadas entre pilares e uma nova seção era iniciada. A estação permanente KARL foi usada como estação de referência para o processamento dos dados. Ela é equipada com uma antena modelo Trimble Dorne Margolin T (*Choke Ring*) que foi calibrada pelo método absoluto. Determinou-se por nivelamento direto a diferença de nível entre o ARP (*antenna reference point*) da antena de referência KARL e o ARP das antenas envolvidas. Este valor é empregado para a determinação do *offset* vertical da antena a ser calibrada.

A modelagem das PCV foi realizada com o emprego do programa WaSoft/Kalib 3.31, destinado ao processamento de observações GPS obtidas via método relativo. Estas observações devem ser tomadas em diferentes orientações da antena, realizadas por meio de movimentos coordenados de rotação que podem ser conduzidos de forma manual ou automática. Na forma automática, a antena a ser calibrada é fixada em um mecanismo cuja finalidade é acelerar os movimentos rotativos da antena, realizando sua orientação precisa em azimutes pré-estabelecidos (WANNINGER E BÖHME, 2000). Nestes experimentos, foram tomadas observações com taxa de 15 segundos de gravação, de forma que no intervalo de um minuto completo pudessem ser obtidas medições com a antena orientada nos sentidos norte, sul, leste e oeste. Esta estratégia visa reduzir os erros provocados pelo efeito multicaminho bem como prover uma maior quantidade de observações ao longo da cobertura azimutal da antena, especialmente nas latitudes médias do hemisfério norte que são afetadas pelo *north hole* (WANNINGER, 2002, p. 56).

O programa Wasoft/Kalib 3.31 realiza a modelagem das PCV por meio de funções esféricas com valores fixos, pré-estabelecidos para grau *n* e ordem *m*. São empregados grau 8 e ordem 5 para a determinação das PCV dependentes de

azimute e elevação e ordem 0 para a determinação das PCV dependentes de elevação. O emprego de uma quantidade reduzida de parâmetros na modelagem das PCV possibilita uma redução das influências provenientes do efeito multicaminho. Da mesma forma, o processamento das observações com máscara de elevação mínima de 5 graus contribui para a redução da presença de sinais refletidos.

As soluções são geradas em arquivos de formato padronizado, contendo os *offsets* do centro de fase e as suas correspondentes variações em azimute e elevação. As PCV das antenas de mesmo modelo foram reduzidas para um valor de *offset* de referência a fim de serem representadas conjuntamente (WÜBBENA et al., 2000, p. 2). Elegeram-se os *offsets* fornecidos pelo NGS, constantes na tabela 3:

Tabela 3 – *offsets* de referência [mm].

Modelo	F	Norte	Leste	Vertical
Leica AT502	L1	0,3	2,0	61,8
	L2	-1,4	1,8	65,4
Trimble Compact	L1	-0,1	-0,6	74,2
	L2	-0,5	2,8	70,5

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Antenas Leica AT502

As variações do centro de fase dependentes de elevação foram extraídas dos arquivos de saída de dados a fim de se gerar as visualizações e análises seguintes.

Os resultados das PCV para as seis antenas Leica no pilar HPF2 são apresentados na figura 2 (portadora L_1), na figura 3 (portadora L_2) e na figura 4 (combinação linear L_3). Os diferentes traçados das curvas indicam que as antenas apresentam respostas eletrônicas distintas embora possuam características técnicas comuns. A mesma análise pode ser aplicada nas curvas de PCV obtidas na portadora L_2 (figura 3) e na combinação linear L_3 (figura 4), em que as diferenças são maiores principalmente nas elevações inferiores a 30° , o que reforça a influência do efeito multicaminho e ruídos no sinal.

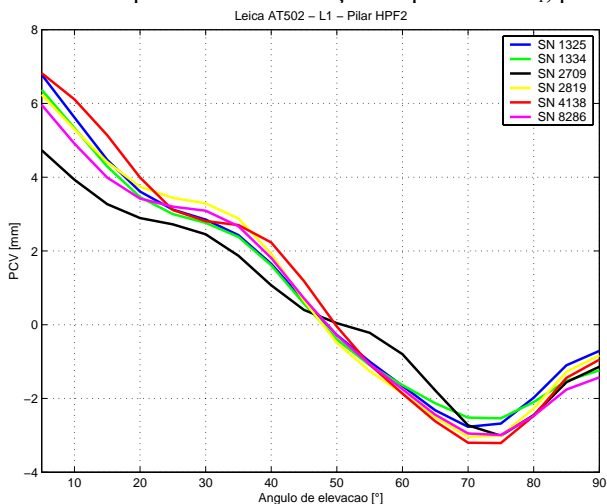
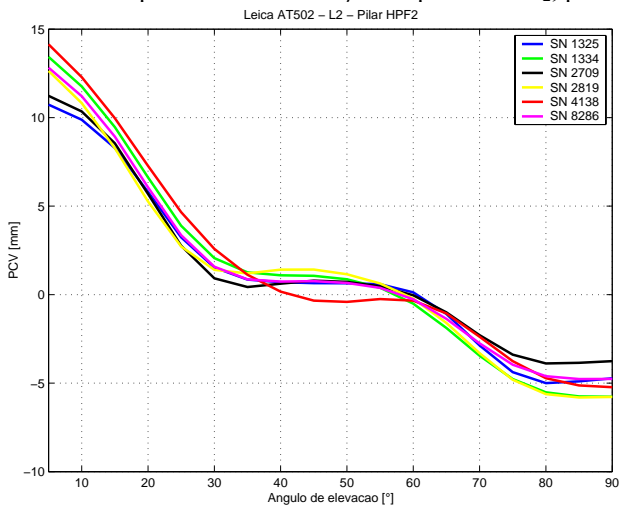
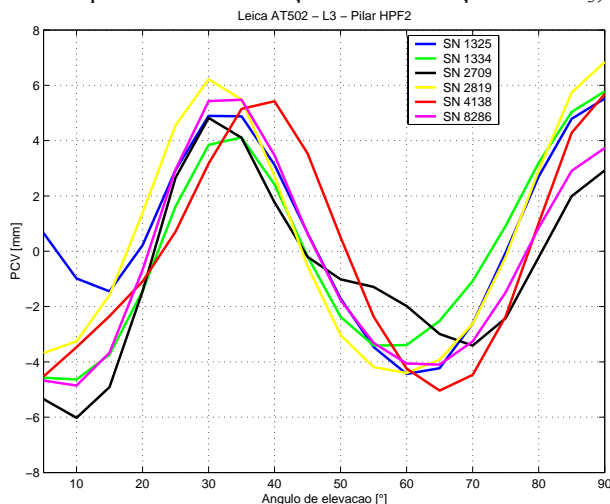
Figura 2 – PCV dependentes de elevação na portadora L_1 , pilar HPF2.Figura 3 – PCV dependentes de elevação na portadora L_2 , pilar HPF2.

Figura 4 – PCV dependentes de elevação na combinação linear L_3 , pilar HPF2.

As figuras 5, 6 e 7 apresentam os resultados das PCV dependentes de elevação provenientes das calibrações desenvolvidas no pilar NPF2, nas frequências L_1 , L_2 e combinação linear L_3 respectivamente. As análises realizadas neste trabalho consideram as PCV correspondentes a ângulos de elevação mínimo de 5° .

Comparando-se os resultados das PCV na portadora L_1 (figuras 2 e 5), nota-se que as curvas possuem traçados semelhantes. No entanto, verificam-se diferenças significativas nas PCV quando analisados os resultados de cada antena isoladamente. Na portadora L_2 (figuras 3 e 6) constata-se diferenças variando de 1 a 3 mm em ângulos de elevação inferiores a 20° . Diferenças nas demais elevações são evidenciadas na combinação linear L_3 (figuras 4 e 7).

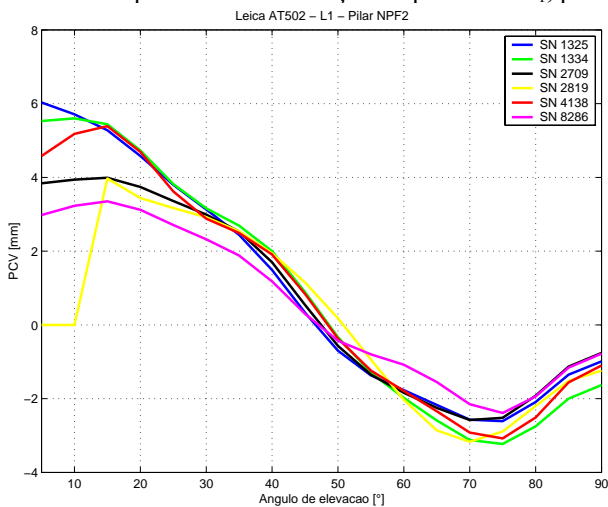
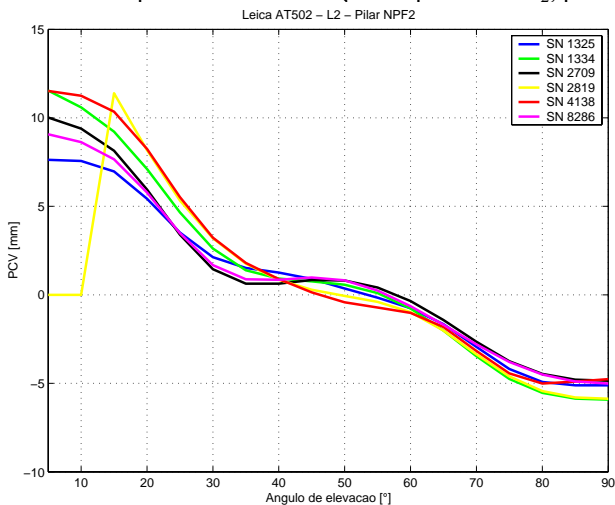
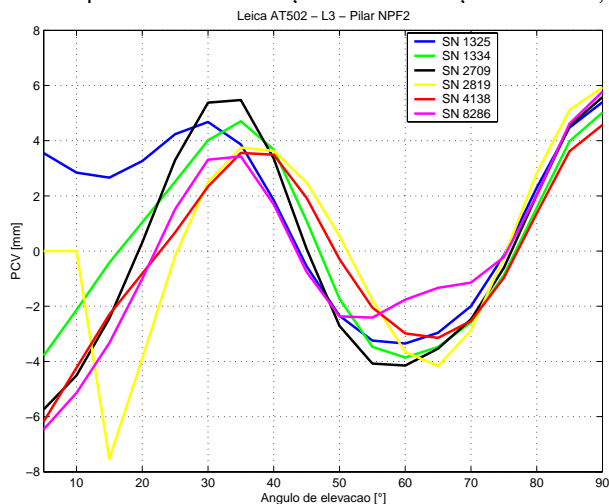
Figura 5 – PCV dependentes de elevação na portadora L_1 , pilar NPF2.Figura 6 – PCV dependentes de elevação na portadora L_2 , pilar NPF2.

Figura 7 – PCV dependentes de elevação na combinação linear L3, pilar NPF2.



As figuras 8 e 9 reúnem todos os resultados até aqui mostrados para os dois pilares conjuntamente, nas portadoras L_1 e L_2 respectivamente. Para facilitar a comparação entre os resultados, as curvas das PCV plotadas em azul relacionam-se ao pilar HPF2 e em vermelho ao pilar NPF2.

Pela análise visual das curvas observa-se que os resultados de cada antena são diferentes quando da mudança do pilar de calibração. As diferenças de PCV entre pilares foram calculadas para cada frequência separadamente conforme a equação

$$\Delta = PCV_{HPF2} - PCV_{NPF2} \quad (1)$$

e representadas nas figuras 10 e 11. Consta-se que as maiores diferenças ocorreram em ângulos de elevação inferiores a 30° , nas duas frequências.

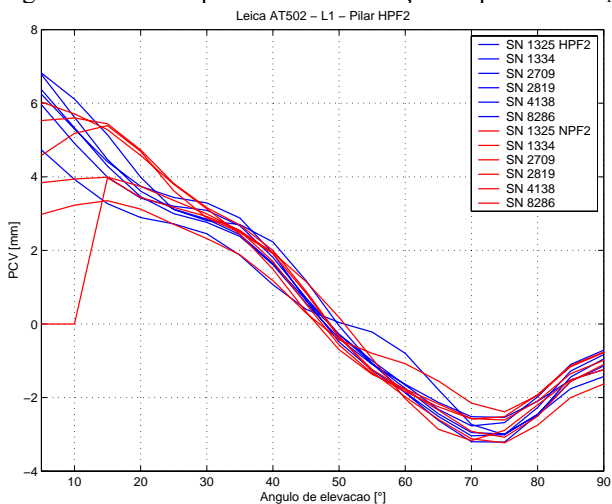
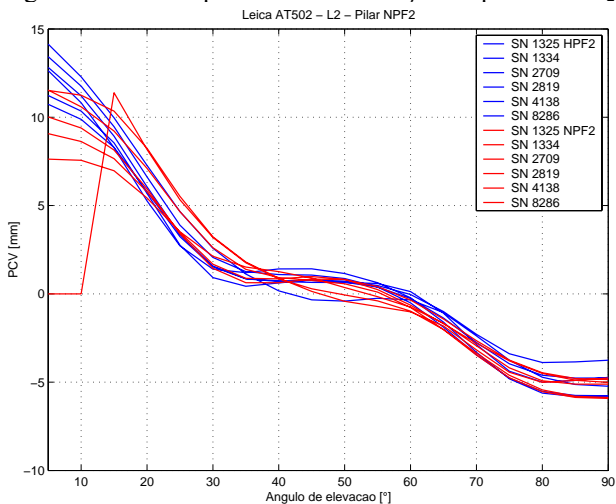
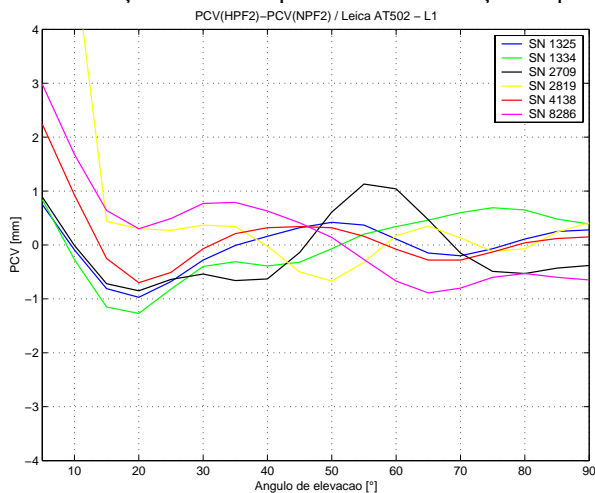
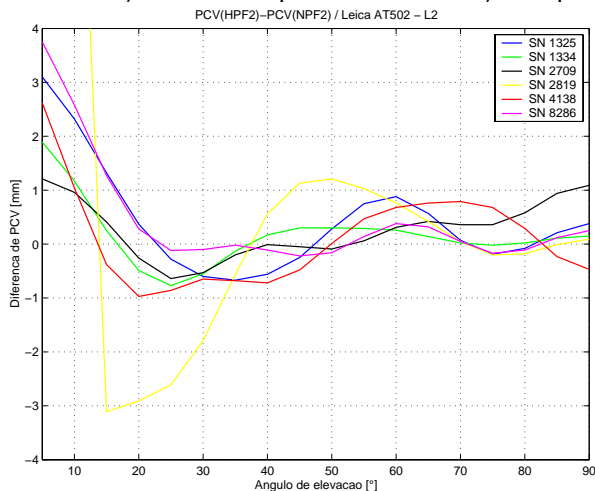
Figura 8 – PCV dependentes de elevação na portadora L_1 .Figura 9 – PCV dependentes de elevação na portadora L_2 .

Figura 10 – Diferenças de PCV dependentes de elevação na portadora L₁.Figura 11 – Diferenças de PCV dependentes de elevação na portadora L₂.

Na portadora L₁, a maior diferença observada foi de até 3 mm em ângulos de elevação de 5° para a antena SN8286. Na portadora L₂ esta diferença é de aproximadamente 4 mm.

3.2 Antenas Trimble Compact

De forma análoga, as PCV dependentes de elevação das antenas Trimble Compact L1/L2 WGP foram representadas. As PCV das seis antenas Trimble Compact são apresentadas na figura 12 (portadora L_1) e na figura 13 (portadora L_2) para o pilar HPF2 e na figura 14 (portadora L_1) e figura 15 (portadora L_2) para o pilar NPF2.

Diferenças máximas entre as curvas ocorrem em ângulos de elevação inferiores a 30° e superiores a 70° , em ambas as portadoras. Observa-se que as curvas são uniformes entre si. Esta característica pode indicar propriedades importantes como a homogeneidade e a estabilidade destes instrumentos.

Figura 12 – PCV dependentes de elevação na portadora L_1 , pilar HPF2.

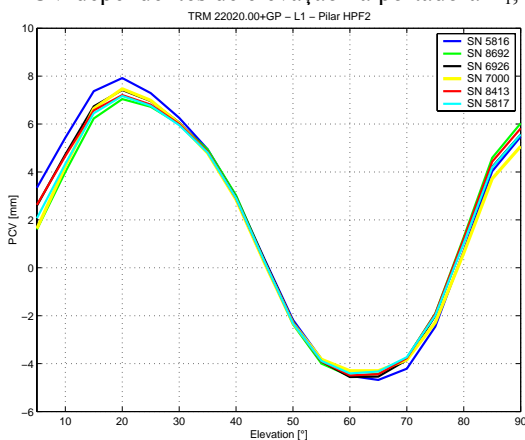
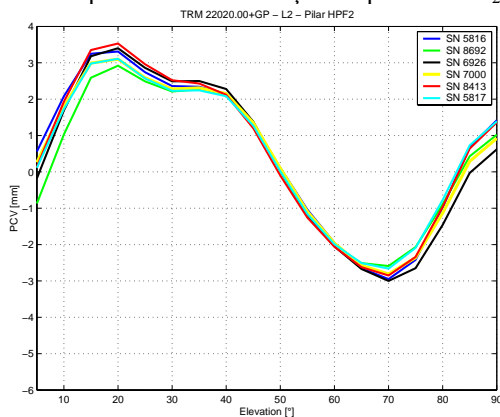


Figura 13 – PCV dependentes de elevação na portadora L₂, pilar HPF2.

As PCV provenientes das calibrações nos pilares HPF2 e NPF2 foram reunidas nas figuras 16 e 17 (portadoras L₁ e L₂, respectivamente). As linhas contínuas e as linhas interrompidas relacionam-se aos pilares HPF2 e NPF2, respectivamente. Observa-se que as curvas tendem a se agrupar de acordo com o pilar empregado, indicando que os resultados estão correlacionados com a estação de calibração.

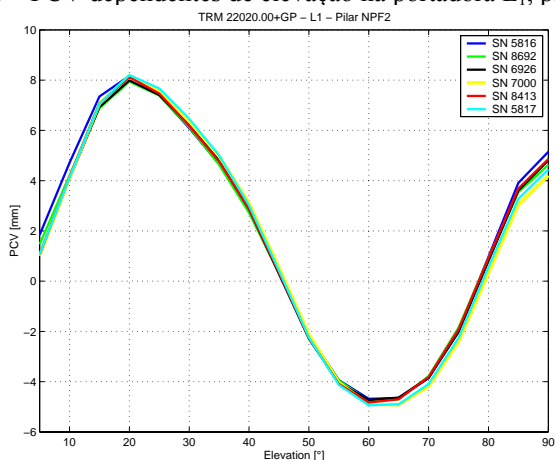
Figura 14 – PCV dependentes de elevação na portadora L₁, pilar NPF2.

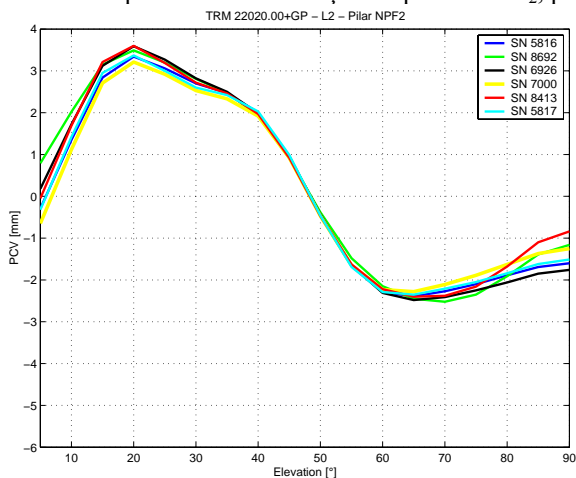
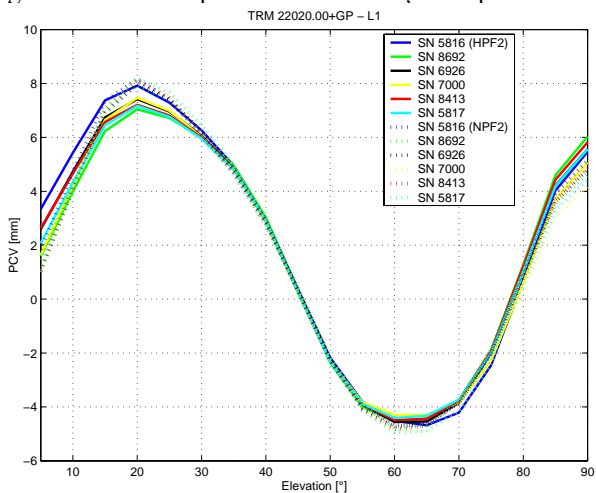
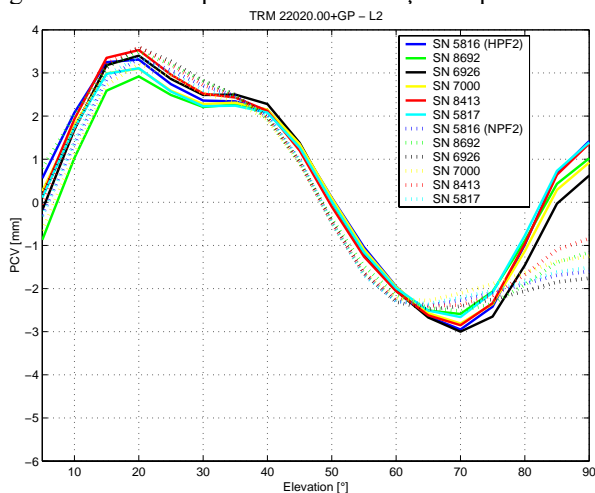
Figura 15 – PCV dependentes de elevação na portadora L_2 , pilar NPF2.Figura 16 – PCV dependentes de elevação na portadora L_1 .

Figura 17 – PCV dependentes de elevação na portadora L₂.

Esta tendência é evidenciada na portadora L₂ (figura 17) para as PCV em ângulos de elevação superiores a 60° em que as diferenças alcançam até 3 mm (antenas SN 5816 e SN 5817).

3.3 PCV em Azimute e Elevação

As variações do centro de fase dependentes de azimute e elevação também foram determinadas. Estas grandezas podem ser apresentadas em gráficos de superfície que representam o horizonte da antenna GPS em suas variações do centro de fase em distribuição azimutal de 0 a 360° e em elevação de 0 a 90°.

As figuras 18 e 20 mostram as PCV em azimute e elevação na portadora L₁ da antenna Leica AT502 SN2709 quando da ocupação nos pilares HPF2 e NPF2, respectivamente. Observa-se que as maiores variações ocorreram na direção aproximada Norte-Sul em ângulos de elevação inferiores a 30° (até 6 mm) e próximos a 70° (até 4 mm).

Comparando-se os resultados nos dois pilares, nota-se que as PCV apresentam diferenças consideráveis em determinadas regiões dos gráficos. A distribuição e uniformidade das PCV podem indicar qual o pilar mais adequado para a realização da calibração. Esta questão deve ser investigada com base nos fenômenos que influenciam as medições GPS, tais como o multicaminho dos sinais e o efeito do campo próximo da antenna (SCHMITZ, 2001, p.111).

Figura 18 – PCV dependentes de azimute e elevação na portadora L_1 , pilar HPF2.

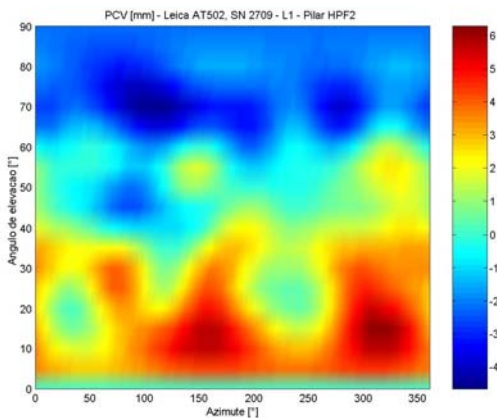
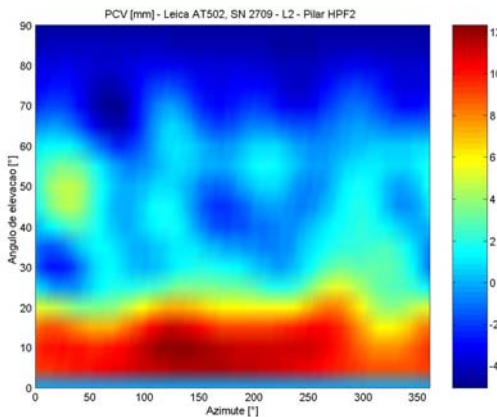


Figura 19 – PCV dependentes de azimute e elevação na portadora L_2 , pilar HPF2.



A figuras 19 e 21 apresentam as variações do centro de fase em azimute e elevação na portadora L_2 do mesmo instrumento para os pilares HPF2 e NPF2, respectivamente. Constata-se que os valores máximos das PCV ocorrem em uma faixa azimutal entre 100° e 250° , equivalendo aproximadamente ao dobro dos valores máximos das PCV verificados na portadora L_1 .

Figura 20 – PCV dependentes de azimute e elevação na portadora L_1 , pilar NPF2.

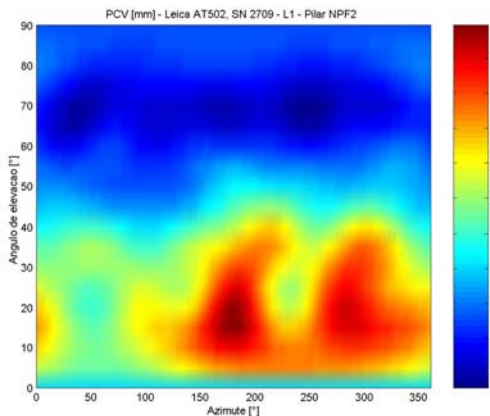
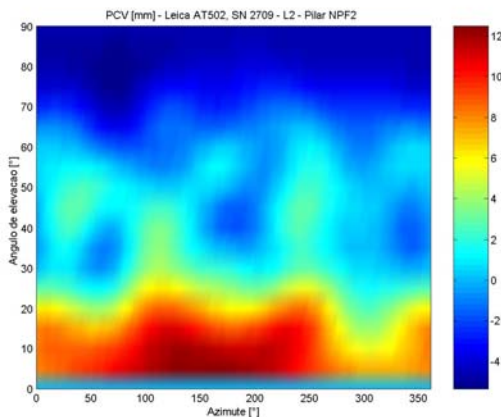


Figura 21 – PCV dependentes de azimute e elevação na portadora L_2 , pilar NPF2.



As mesmas análises podem ser aplicadas aos resultados das antenas Trimble. As figuras 22 e 24 mostram as PCV em azimute e elevação da antena Trimble Compact SN7000 na portadora L_1 para os pilares HPF2 e NPF2, respectivamente. Observa-se que as PCV são constantes no intervalo entre 55° e

80° de elevação. Esta distribuição homogênea pode ser atribuída à estabilidade azimutal deste modelo de antena.

Comparando-se as figuras 22 e 24 (portadora L_1) nota-se a similaridade dos resultados frente a mudança da estação de calibração. Este tipo de antena é dotado de um disco de proteção contra o efeito multicaminho (ingl. *ground plane*) o qual pode ter contribuído para reduzir estas influências.

Na portadora L_2 verificam-se variações de até 7 mm para o pilar HPF2 e de até 9 mm para o pilar NPF2. Estas variações, representadas nas figuras 23 e 25 pela mancha vermelha central, estão compreendidas em um intervalo azimutal de 100° a 250°. Observa-se que esta mancha sofre uma aparente diluição para o pilar HPF2 (figura 23) quando comparada com o pilar NPF2 (figura 25), indicando que a dependência azimutal da PCV naquele pilar pode ser menor.

Neste caso, pode-se supor que o pilar HPF2 é mais confiável que o pilar NPF2 para a execução do processo da calibração pelo método proposto, embora as diferenças entre PCV ocorridas sejam uma função das características eletrônicas das antenas.

Figura 22 – PCV dependentes de azimute e elevação na portadora L_1 , pilar HPF2.

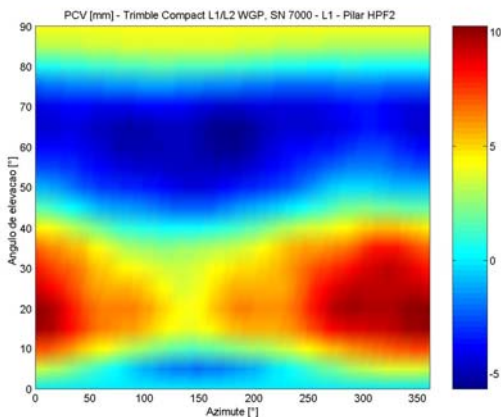


Figura 23 – PCV dependentes de azimute e elevação na portadora L₂, pilar HPF2.

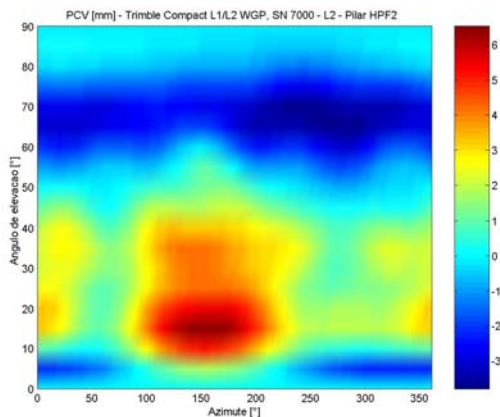


Figura 24 – PCV dependentes de azimute e elevação na portadora L₁, pilar NPF2.

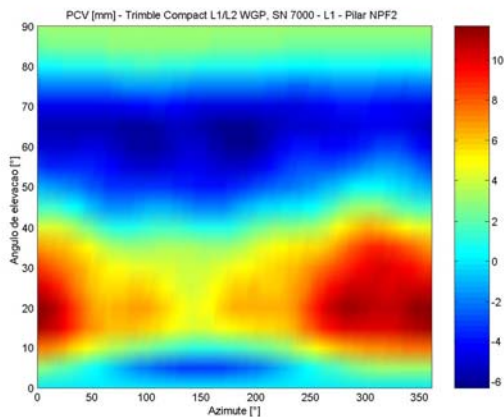
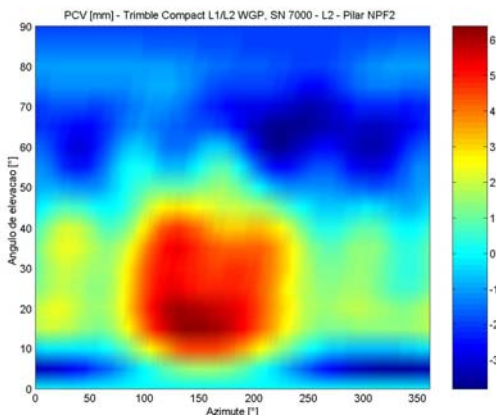


Figura 25 – PCV dependentes de azimute e elevação na portadora L_2 , pilar NPF2.



6. CONCLUSÕES

As PCV dependentes de elevação para as antenas de mesmo modelo apresentaram diferentes traçados, indicando que antenas com mesmas propriedades e características técnicas podem apresentar respostas eletrônicas distintas e com isso diferentes modelagens do centro de fase.

A comparação entre as PCV obtidas nos pilares de calibração HPF2 e NPF2 resultou em diferenças de até 4 mm. Constatou-se que as curvas tendem a se agrupar de acordo com o pilar de calibração, revelando uma correlação das PCV com as características do entorno da estação. Diferenças de 1 a 3 mm na portadora L_2 em ângulos de elevação inferiores a 20° evidenciaram a ocorrência do efeito multicaminho nas baixas elevações.

As antenas modelo Trimble Compact são dotadas de um disco de proteção (ingl. *ground plane*) contra o efeito multicaminho. Isto pode ter contribuído para a similaridade das soluções frente a mudança da estação de calibração, principalmente para as PCV dependentes de azimute e elevação. As maiores diferenças são evidenciadas na combinação linear L_3 , que apresenta a maior quantidade de ruídos nas observações (SEEBER, 2003, p. 263).

As antenas de receptores GPS são instrumentos sensíveis às modificações físicas ou falhas ocasionadas durante o processo de fabricação. Portanto, é necessário que sejam tratadas individualmente, especialmente em relação aos aspectos eletrônicos que influenciam as soluções do posicionamento geodésico. Estas características podem ser determinadas via calibração. Contudo, uma atenção especial deve ser despendida nas influências do entorno da estação que promovem o efeito multicaminho e ruídos nas observações.

AGRADECIMENTOS

Os autores externam seus agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O suporte técnico-científico foi provido pelo Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH) para o desenvolvimento e transferência de tecnologia no âmbito da calibração de antenas de receptores GPS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MADER, G.; MACKAY, J. R. *Calibration of GPS Antennas*. Geoscience Laboratory, Office of Ocean and Earth Sciences, NOS, NOAA, Silver Spring, Maryland, 1996.
- MADER, G. L. *GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey*. Documento eletrônico disponível em <<http://www.grdl.noaa.gov>> 1999.
- MENGE, F. *Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung*. Dissertation. Hannover, 2003.
- SCHMITZ, M. *Spezielle Untersuchungen und Ergebnisse zum PCV von GPS-Antennen*. Wiss. Arb. Nr. 239 p. 101-112. Hannover, 2001.
- SCHUPLER, B. R., CLARK, T. A., ALLSHOUSE, R. L. *Characterizations of GPS user antennas: reanalysis and new results*. In: Beutler, et al. (Eds). *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne and Spaceborne Applications*. IAG Symposium, n.113, Boulder, Colorado, USA, July 3-4, 1995.
- SEEBER, G. *Satellite Geodesy*. 2nd edition. De Gruyter: Berlin, 2003.
- WANNINGER, L.; BÖHME, J. *GPS-Antennenkalibrierungen am Geodätischen Institut der TU Dresden*. In: Seeber, G.; Menge, F.; Böder, V.: *Proceedings of GPS-Antennenworkshop*. Hannover, 2000.
- WANNINGER, L. *Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung*. Zeitschrift für Vermessungswesen. N. 1/2002, p.51-58, 2002.
- WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; MENGE, F.; BÖDER, V.; SEEBER, G. *Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real Time*. In: *ION GPS*, 2000.

(Recebido em setembro/05. Aceito em dezembro/05.)