



**Monitoramento Estrutural por GNSS: Análise do PPP
e Posicionamento Relativo na UHE Mauá**
Structural Monitoring by GNSS: Assessment of PPP and Relative
Positioning at Mauá Hydroelectric Power Plant

Gabriel Zehnpfennig Zanetti; Luis Augusto Koenig Veiga & Paulo Sergio Oliveira Júnior

*Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Avenida Coronel
Francisco Heráclito dos Santos, 100, 81531-990, Curitiba, PR, Brasil*
E-mails: zzanetti20@gmail.com; kngveiga@gmail.com; paulo.junior@ufpr.br
Recebido em: 27/03/2020 Aprovado em: 06/06/2020
DOI: http://doi.org/10.11137/2020_3_240_249

Resumo

O monitoramento estrutural pode ser realizado através do controle de deslocamentos de pontos estratégicos em estruturas. Uma vez detectada e devidamente caracterizada uma patologia estrutural, medidas de prevenção podem ser tomadas. Dessa forma, o monitoramento estrutural é uma das ferramentas que ajuda a evitar catástrofes com alto custo material, humano e ambiental, tal como ocorrido em Mariana-MG (nov./2015) e Brumadinho-MG (jan./2019). O presente trabalho tem por objetivo comparar e avaliar os resultados do processamento de dados GNSS da estação de monitoramento da Usina Hidrelétrica de Mauá. Foram processados dados de todo o período de 2016 para séries diárias (24h). Foram utilizados os serviços on-line do IBGE e do NRCan para realização do PPP. O posicionamento relativo estático foi realizado através do *software* Leica Infinity. São empregados os métodos de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) e de posicionamento relativo estático com linhas de base maiores que 140 km. Para fins de comparação de coordenadas obtidas em diferentes épocas, foram realizadas transformações e reduções entre sistemas referenciais. Ambos os métodos apresentaram resultados de acurácia à nível centimétrico para a identificação de deslocamentos. Ressalta-se a necessidade de maior cuidado com análise dos resultados provenientes do PPP. Isso ocorre, pois se trata de um método SSR (*State Space Representation*), no qual todos os erros devem ser apropriadamente modelados. Nesse sentido, o posicionamento relativo ainda se apresenta como uma solução mais prática e com maior segurança para o monitoramento de estruturas.

Palavras-chave: *Monitoramento; GNSS; Posicionamento*

Abstract

Structural Health monitoring can be done by controlling displacements of strategic points in structures. Once a structural pathology is detected and properly characterized, preventive measures can be taken. Thus, structural health monitoring is one of the tools that helps to avoid disasters with high material, human and environmental costs, as occurred in Mariana-MG (Nov./2015) and Brumadinho-MG (Jan./2019). The present paper aims to compare and evaluate the results of GNSS data processing of the monitoring station of the Mauá Hydroelectric Power Plant. The data were processed for the entire period of 2016, using daily series (24h). IBGE and NRCan online services were used to perform the PPP (Precise Point Positioning). Relative Static positioning was performed using Leica Infinity software. Both PPP and static relative positioning methods with baselines greater than 140 km were employed. For the purpose of comparing coordinates obtained at different epochs, transformations and reductions were performed between referential systems. Both methods presented centimeter accuracy results in the identification of displacements. We emphasize the need for greater care with analysis of the results from the PPP. This is because it is a State Space Representation (SSR) method in which all errors must be appropriately modeled. In this sense, relative positioning is still a more practical and safer solution for the monitoring of structures.

Keywords: *Monitoring; GNSS; Positioning*

1 Introdução

Em Geodésia determina-se a posição de um ou mais pontos sobre a superfície terrestre, sendo que tal determinação pode ser feita com uso de diferentes métodos. Monitorar significa determinar coordenadas de pontos em diferentes épocas e realizar comparações para verificar possíveis variações em sua posição. Estas variações podem ser caracterizadas apenas como deslocamentos, caso a forma do objeto monitorado permaneça a mesma após esta variação de posição, ou deformações, quando a forma do objeto é alterada. Diferentes métodos de posicionamento têm sido tradicionalmente empregados para a realização do monitoramento, como a triangulação e a trilateração, chamados de métodos clássicos. E a partir da década de 80 popularizou-se o emprego do posicionamento geodésico por técnicas espaciais, mais notoriamente o uso do GPS (*Global Positioning System*) e hoje do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (Subirana *et al.*, 2013).

Os métodos de posicionamento GNSS podem ser divididos em Posicionamento Absoluto e Posicionamento por Ponto; Posicionamento Relativo; e Posicionamento Diferencial (DGPS). No posicionamento pelo método absoluto utiliza-se um receptor GNSS isoladamente para obtenção das coordenadas requeridas. No posicionamento relativo são utilizados no mínimo dois receptores GNSS, onde suas observáveis são combinadas para aumentar a confiabilidade dos dados (Monico, 2008).

O método denominado Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), permite aos usuários de receptores GNSS obterem bons resultados mesmo sem o uso de dois ou mais receptores (Zumberge *et al.*, 1997). Atualmente, podem ser utilizados serviços *on-line* de processamento como, por exemplo, o serviço de PPP disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017a).

A Usina Hidrelétrica de Mauá está localizada na divisa dos municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira, sobre o rio Tibagi no estado do Paraná. Para auxiliar no monitoramento estrutural da Usina, foi instalada uma estação GNSS de monitoramento contínuo (doravante Estação Mauá).

Para processamento dos dados GNSS da Estação Mauá foi empregado o método relativo estático com uso dos pontos da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) dos sistemas GNSS. No entanto, devido à distância da Estação Mauá em relação às estações da RBMC, é necessário realizar o processamento com de linhas de base longas. São utilizadas as estações da RBMC localizadas em Ourinhos, Guarapuava, Maringá e Curitiba. A estação mais próxima está localizada à aproximadamente 145 km (Ourinhos) e a estação mais distante à aproximadamente 210 km (Curitiba).

Devido às dificuldades existentes no posicionamento relativo para linhas de base longas, considerou-se também a

avaliação do desempenho do PPP na estação Mauá. No PPP o processamento independe do uso das bases da RBMC, porém é necessário mitigar o máximo possível os erros sistemáticos que afetam as observações GNSS.

O monitoramento de estruturas pelo método PPP já se mostrou capaz de detectar oscilações nestas estruturas quando submetidas a severas cargas externas (como terremotos e tempestades) de até 13 mm de variação na componente vertical de um ponto, sendo que esta componente teria acurácia menor do que as componentes horizontais (Yigit, 2016).

Para o caso da UHE Mauá, com linhas de base longas, interessa investigar se o processamento PPP poderia resultar em precisões equivalentes às do processamento relativo ou próximas a estas, para o caso da determinação de coordenadas. Vale ressaltar o interesse na comparação dos resultados, principalmente devido à diferença da natureza da modelagem das observações utilizadas no PPP e no posicionamento relativo. Sendo que, no PPP os erros são representados e modelados espacialmente (SSR - *Space State Representation*), por outro lado no posicionamento relativo isso é feito no estado das observações (OSR - *Observation State Representation*) (Wübbena *et al.*, 2005). Nesse sentido, a contribuição deste trabalho também responde a essa questão no contexto do monitoramento estrutural. Portanto, o objetivo principal deste estudo é comparar e avaliar os resultados do processamento de dados da Estação Mauá com uso do método PPP em relação ao método de posicionamento relativo estático para processamentos de bases maiores do que 140 km.

2 Monitoramento de Estruturas por Métodos Geodésicos

Nas seções seguintes é discutida a importância do monitoramento de estruturas por métodos geodésicos bem como as soluções consideradas no presente trabalho.

2.1 Posicionamento Relativo

O posicionamento relativo visa a determinação do vetor entre dois pontos, a chamada linha de base. Conhecendo-se as coordenadas de uma das estações que compõem o vetor (estação base), é possível obter as coordenadas do segundo ponto (*rover*). Assim, para que isso seja feito é necessário o uso de dois receptores GNSS simultaneamente para que combinações lineares possam ser formadas e levem à simples diferença de fase, dupla diferença de fase e tripla diferença de fase. Nessas combinações os principais erros sistemáticos comuns aos receptores são eliminados. Porém, nesse método quanto maior a linha de base, menor a eficiência da redução dos erros espacialmente correlacionados (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

2.2 Posicionamento por Ponto Preciso

No PPP a equação de observação utilizada é a mesma do posicionamento absoluto convencional. Assim, as observações são influenciadas por diversos erros sistemáticos. Destaca-se a influência dos erros devido à órbita e relógios dos satélites, bem como os causados pela propagação do sinal na troposfera e ionosfera (Rizos *et al.*, 2012). No PPP os efeitos da ionosfera são mitigados através da combinação linear livre dos efeitos da ionosfera (*ion-free*) e o efeito da troposfera pode ser estimado ou modelado (Böhm *et al.*, 2011). Para as órbitas e relógios dos satélites são usados produtos acurados fornecidos pelo IGS (*International GNSS Service*) (Kouba & Héroux, 2001).

2.3 Serviços de PPP on-line

O processamento PPP pode ser feito com uso de serviços online disponibilizados por diversas instituições no mundo como o serviço disponibilizado pelo IBGE.

Também tem destaque o serviço chamado CSRS-PPP do NRCan (*Natural Resources of Canada*).

O serviço de PPP disponibilizado pelo IBGE é gratuito, e também faz uso do programa CSRS-PPP (*GPS Precise Point Positioning*) desenvolvido pelo NRCan. Tal serviço proporciona aos usuários, providos de receptores GPS e/ou GLONASS, a obtenção de coordenadas em SIRGAS2000 e em ITRF, através do processamento de dados GNSS coletados por receptores de uma ou duas frequências através de métodos de rastreamento estáticos ou cinemáticos.

Como pode ser visto na Figura 1 o processamento é feito quando o usuário envia ao sistema, via internet, todas as informações e arquivos referentes ao rastreamento. O servidor processa os dados pelo CSRS-PPP com uso de produtos de alta acurácia de órbita, relógio dos satélites, orientação terrestre e tendência instrumental dos satélites. Além disso, também podem ser utilizados mapas ionosféricos e outros produtos que possam auxiliar na modelagem dos erros sistemáticos.

A estimativa de precisão para o serviço de processamento PPP disponibilizado é apresentada na Tabela 1.

Estimativa de precisão para Posicionamento por ponto preciso (PPP)						
Tempo de rastreamento	Precisão L1			Precisão L1 +L2		
	Latitude	Longitude	Altitude	Latitude	Longitude	Altitude
1 h	10 cm	20 cm	20 cm	2 cm	4 cm	4 cm
2 h	5 cm	12 cm	12 cm	1 cm	2 cm	2 cm
4 h	3 cm	7 cm	8 cm	5 mm	1 cm	2 cm
6 h	3 cm	6 cm	7 cm	5 mm	1 cm	1 cm

Tabela 1 Precisão estimada para o serviço de processamento PPP disponibilizado pelo IBGE (IBGE, 2017b).

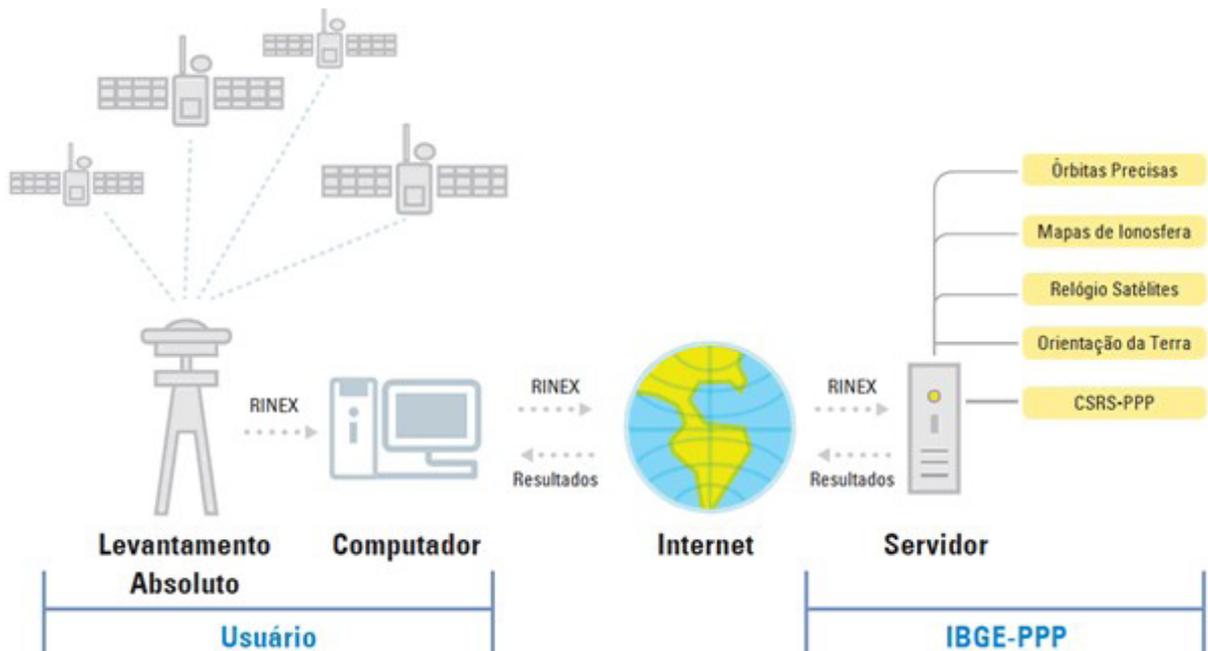


Figura 1 Diagrama de Processamento PPP dos Arquivos Submetidos ao Serviço do IBGE (IBGE, 2017a).

3 Materiais e Métodos

Nessa seção, são apresentados os materiais e métodos empregados para o estudo do PPP e do Posicionamento relativo na Estação Mauá.

3.1 A Usina Hidrelétrica de Mauá

A Usina Hidrelétrica de Mauá está localizada sobre o rio Tibagi na divisa dos municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira (Figura 2). A barragem da hidrelétrica Mauá tem 745 m de comprimento na crista e altura máxima de 85 m.

Desde 2011 professores do Departamento de Geomática da UFPR realizam projetos de pesquisa na área de monitoramento na UHE Mauá. A Estação Mauá

possui um receptor GNSS de dupla frequência com antena LEIAT504. A estação foi instalada na margem esquerda da barragem (Figura 3). Essa localização foi escolhida devido à configuração geológica do local, sendo de interesse do projeto o acompanhamento com mais detalhes desta face lateral.

A Figura 4 apresenta a disposição dos equipamentos que compõem a Estação Mauá na crista da barragem. A antena que aparece nesta figura foi posteriormente substituída por um modelo *chock ring*.

3.2 Estratégias de Processamento

Para o posicionamento relativo estático selecionou-se o programa Leica Infinity. As configurações de processamento são apresentadas na Tabela 2.



Figura 2 Usina Hidrelétrica de Mauá (COPEL, 2013).

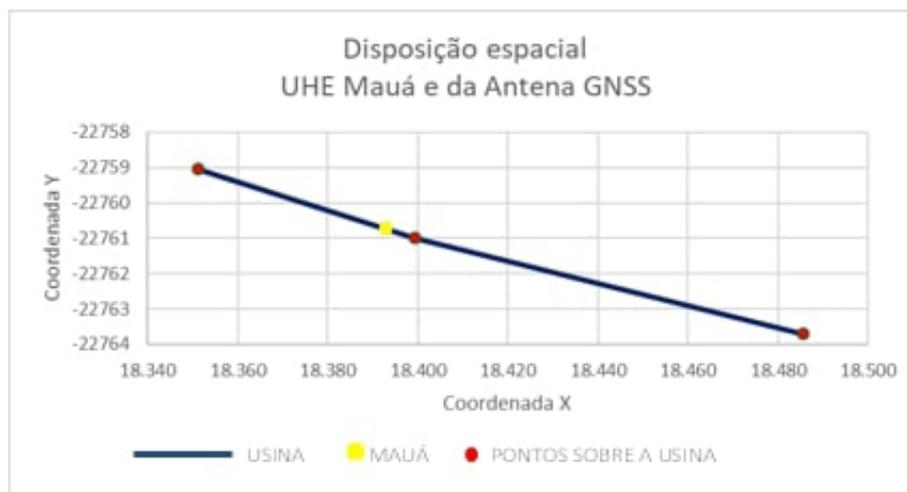


Figura 3 Representação aproximada da posição da UHE Mauá (linha em azul e pontos sobre a usina em vermelho) e da antena GNSS (em amarelo).

Monitoramento Estrutural por GNSS: Análise do PPP e Posicionamento Relativo na UHE Mauá
Gabriel Zehnpfennig Zanetti; Luis Augusto Koenig Veiga & Paulo Sergio Oliveira Júnior

Estratégia de processamento	
Parâmetro	Opção adotada
Tipo de solução	Fase fixa
Modelo troposférico	Saastamoinen
Modelo Ionosférico	Klobuchar
Frequência	L1/E1/B1
	L2/B2
	L5/E5a
	B3/E6
	E5b
	E5ab
Fixar Ambiguidades até	500 km
Mínima duração para solução flutuante (Estático)	5'
Máscara de elevação	15°
Tipo de efemérides	Precisas
Calibração da antena	Geo++ GmbH Absoluto
Constelação GNSS	GPS

Tabela 2 Estratégia de processamento no software Leica Infinity.



Figura 4 Estação de monitoramento contínuo da UHE Mauá (Muguio, 2012).

Como explicitado, devido à distância da Estação Mauá em relação às estações da RBMC, é necessário realizar o processamento com linhas de base longas. São utilizadas as estações da RBMC localizadas em Ourinhos, Guarapuava, Maringá e Curitiba. A estação mais próxima está localizada a aproximadamente 145 km (Ourinhos) e a estação mais distante a aproximadamente 210 km (Curitiba).

Foram processadas linhas de base independentes (Figura 5) com uso dos arquivos diários. O programa gera um relatório após o processamento contendo informações detalhadas sobre as linhas de base, seus desvios-padrão e sobre a fixação das ambiguidades, para cada conjunto de arquivos de observação. Como o processamento é feito com o uso de mais de uma estação base ao mesmo tempo (4 estações base para 1 estação móvel) este relatório contém além dos detalhes dos parâmetros de processamento e dos detalhes do projeto, os resultados obtidos para cada linha de base.

Após o processamento das linhas de base, foi realizado o ajustamento da rede. Foram injuncionadas as coordenadas das estações de referência da RBMC. Para a injunção considerou-se o valor da precisão das coordenadas fornecidas nos arquivos descritivos das estações. Vale

ressaltar que as coordenadas obtidas no posicionamento relativo estão no mesmo sistema e época das estações base, ou seja, em SIRGAS 2000, época 2000.4.

O processamento empregando o aplicativo on-line do IBGE é simples e não requer muitas configurações por parte do usuário. Foi necessário informar apenas o modo de processamento (Estático), o tipo de antena e altura da antena (extraído do RINEX).

No PPP, as coordenadas são calculadas no sistema de referência das efemérides e vinculadas à época do levantamento. Porém o serviço do IBGE realiza as transformações necessárias para gerar coordenadas em SIRGAS 2000 na época 2000.4 e na também época do rastreo. O relatório do serviço PPP contém um resumo do processamento, as coordenadas geodésicas finais em SIRGAS 2000 na época 2000.4 e também na época do rastreo.

No serviço on-line de PPP do NRCan (*Natural Resources Canada*), CSRS-PPP, deve-se indicar o sistema de referência a ser usado, no caso ITRF, que irá fazer com que os dados processados retornem com coordenadas da época em que eles foram coletados; o datum vertical (CGVD2013); e o modo de processamento (estático).

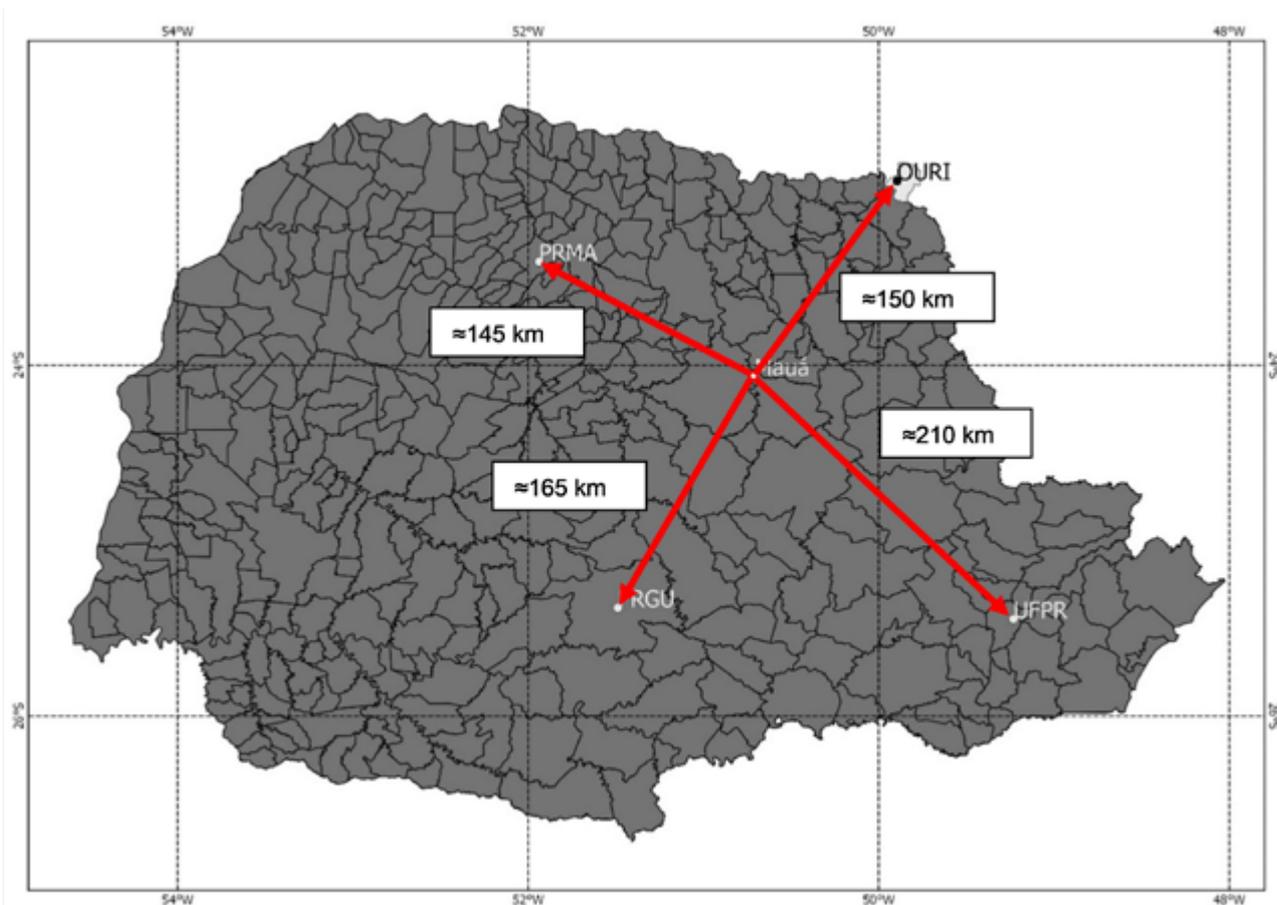


Figura 5 Localização das redes experimentais de processamento.

3.3 Transformação e Redução de Coordenadas

A comparação entre as coordenadas e a determinação dos deslocamentos relativos implica em que todos os pontos calculados estejam no mesmo sistema de referência e época.

No processamento relativo estático, as coordenadas obtidas estão em ITRF2000 época 2000.4 (ITRF2000_{2004,4}). Para o processamento PPP-IBGE as coordenadas são apresentadas em ITRF2000_{2004,4} e ITRF2000_{2016,n}; sendo 2016.n a época de rastreamento do ponto. No caso do

PPP-CSRS, as coordenadas são apresentadas em ITRF2008_{2016,n}. Assim, as coordenadas resultantes do processamento PPP-CSRS foram transformadas do ITRF2008 para o ITRF2000 e posteriormente reduzidas a época 2016.0. As coordenadas obtidas através do processamento relativo estático que estavam inicialmente no ITRF2000_{2004,4} foram reduzidas para a época do rastreamento (ITRF2000_{2016,n}) e para a época ITRF2000_{2016,0}.

Para uma melhor compreensão destes mesmos deslocamentos também foi realizada a transformação de coordenadas para o sistema geodésico cartesiano local e posteriormente para um sistema da barragem, onde segundo Cruz (2015) o primeiro possui eixo “Zl” coincidente com a normal contendo o ponto de origem do local, o eixo “Yl” é ortogonal a “Zl” sendo positivo em direção ao norte, o eixo “Xl” é ortogonal aos demais e é positivo em direção ao leste. Já o sistema de barragem é um referencial cartesiano local cujo eixo longitudinal “XB” possui orientação positiva no sentido da margem direita, o eixo “YB” é perpendicular a este e possui orientação positiva seguindo a direção do rio, o eixo “ZB” completa um sistema dextrogiro.

Essa transformação foi feita com uso de um programa de computador descrito por Cruz (2015). Tal programa usa cinco pontos com coordenadas conhecidas da barragem (três pilares e dois pontos homólogos sobre a barragem que definem o eixo x) e as fórmulas de transformação entre referenciais. Assim são obtidas as coordenadas em sistema geodésico cartesiano local e que posteriormente se obtém as coordenadas no sistema de barragem.

4 Resultados e Análises

Os resultados trazidos pelas Figura 6, 7 e 8 explicitam o deslocamento absoluto obtido através dos três métodos de processamento realizados neste trabalho (relativo, PPP-IBGE e PPP-NRCan). Neles é possível notar uma separação gradual entre as soluções de posicionamento relativo e PPP. Isso é mais evidente na componente YL e principalmente na componente ZL. Além disso, houve um salto nas soluções PPP para a componente altimétrica no dia 20 de abril. Como ambos os serviços se utilizam do mesmo programa PPP, presume-se que houve atualização ou alteração na estratégia interna adotada.

Nas Tabela 3, 4 e 5 estão explicitados os valores máximo, médio e mínimo dos deslocamentos obtidos para os métodos relativo estático, PPP-IBGE e PPP-NRCan respectivamente.

Quando são analisados os deslocamentos médios nas coordenadas no SGCL a tendência descrita acima se mantém, com os valores menores sendo os provenientes dos processamentos pelo método relativo estático, com valores de 0,7mm em X; 0,9mm em Y; e -2,4mm em Z. Tais valores médios, como já dito, distanciam-se dos valores

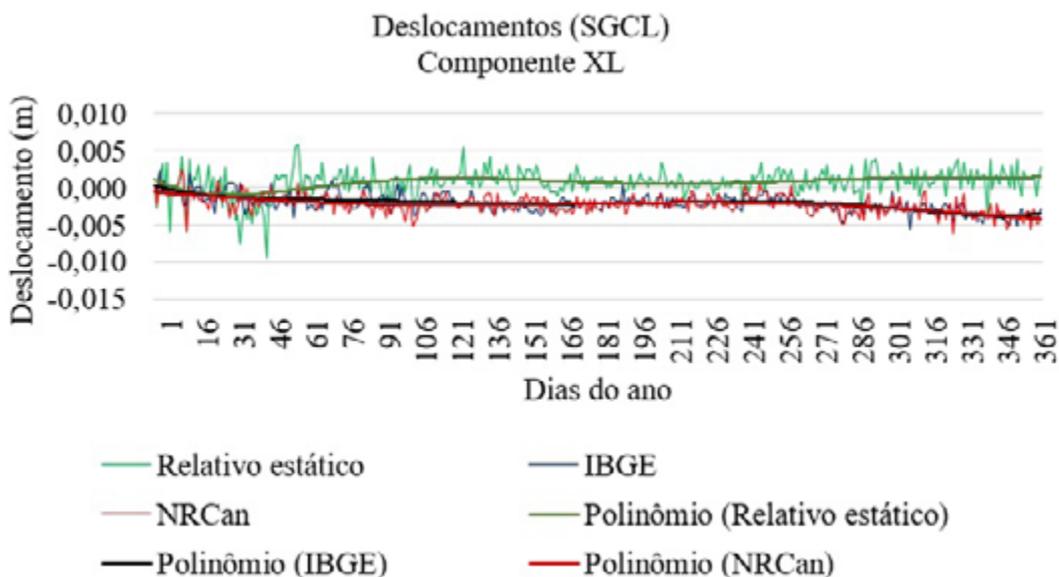


Figura 6 Deslocamento das Componentes Cartesianas XL no SGCL.

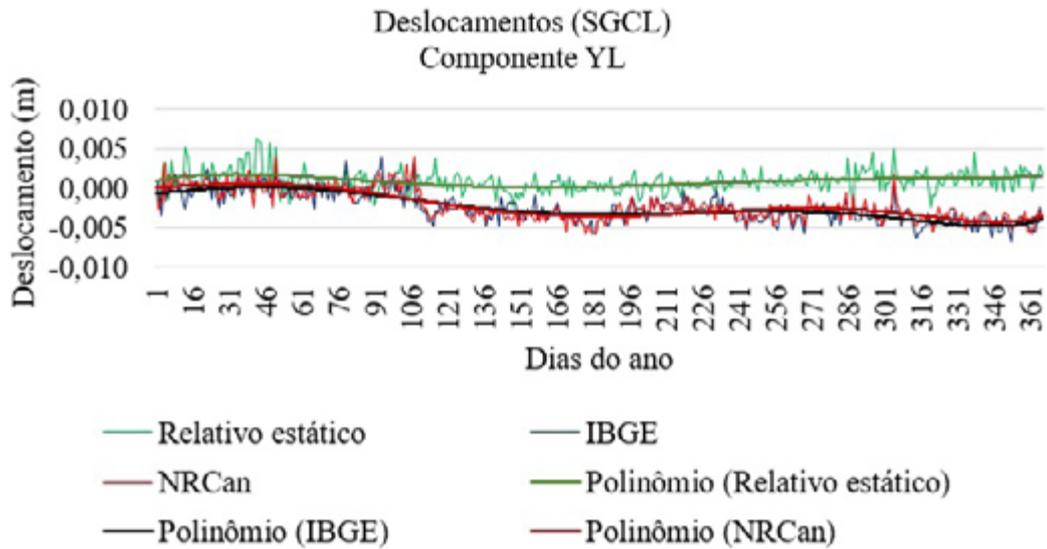


Figura 7 Deslocamento das Componentes Cartesianas YL no SGCL.

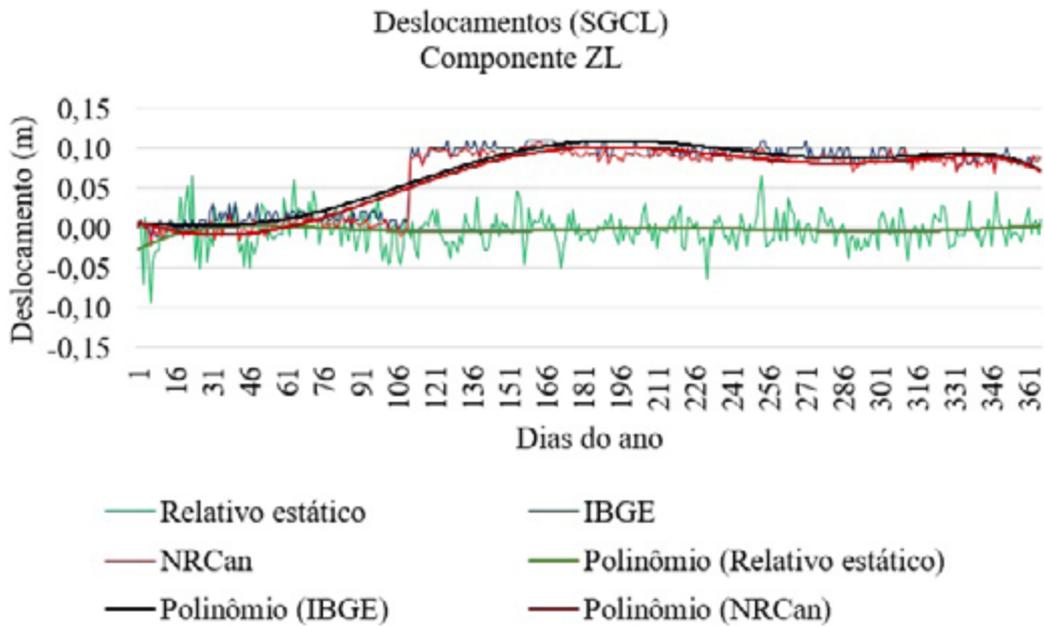


Figura 8 Deslocamento das Componentes Cartesianas YL no SGCL.

Relativo Estático			
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Máximo	5,77	6,35	65,99
Média	0,72	0,90	-24,83
Mínimo	-9,40	-2,87	-94,00

Tabela 3 Valores máximos, médios e mínimos dos deslocamentos encontrados para o método relativo estático no SGCL.

PPP-IBGE			
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Máximo	2,14	4,04	110,00
Média	-2,05	-2,45	70,19
Mínimo	-5,64	-6,68	-10,00

Tabela 4 Valores máximos, médios e mínimos dos deslocamentos encontrados para o método ppp-IBGE no SCGL.

PPP-NRCan			
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Máximo	2,41	4,04	108,00
Média	-2,22	-2,21	63,51
Mínimo	-6,18	-5,81	-21,99

Tabela 5 Valores máximos, médios e mínimos dos deslocamentos encontrados para o método PPP-NRCan no SGCL.

médios dos deslocamentos para o PPP-IBGE em 2,78mm na componente X; 3,35mm na componente Y; e 72,67mm na componente Z; e para o PPP-NRCan os valores foram de 2,95mm em X; 3,11mm em Y; e 66,00mm em Z.

5 Considerações Finais

Ambos os métodos apresentaram resultados de nível centimétrico para a identificação de deslocamentos. Porém, em virtude dos aspectos teóricos bem como dos resultados observados nesse estudo, ressalta-se a necessidade de maior cuidado com análise dos resultados provenientes do PPP. Isso ocorre, pois se trata de um método SSR, no qual todos os erros devem ser apropriadamente modelados. Nesse sentido, o posicionamento relativo ainda se apresenta como uma solução mais prática e segura para o monitoramento de estruturas. Para trabalhos futuros, recomenda-se o aumento do período das análises, no intuito de verificar o impacto do movimento litosférico nas coordenadas e maior atenção para as correções dos efeitos devido à propagação dos sinais GNSS na atmosfera.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo suporte financeiro através de uma bolsa de pesquisa de mestrado. Também é externada gratidão à Copel, ao IBGE e ao NRCan pelos dados, programas e serviços disponibilizados.

7 Referências

- Böhm, J.; Schuh, H.; Urquhart, L.; Steigenberger, P. & Santos, M. 2011. Troposphere Delay Modeling Based On Numerical Weather Models. *In: PROCEEDINGS OF THE 3RD INTERNATIONAL COLLOQUIUM SCIENTIFIC AND FUNDAMENTAL ASPECTS OF THE GALILEO PROGRAMME*, Copenhagen, Denmark, 2011.
- COPEL. 2013. Companhia Paranaense de Energia. Disponível em: <https://www.copel.com/ci/_edicoes/301/inauguracao-maua.jsp>. Acesso em: 18jul. 2017.
- Cruz, W. 2015. *Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas. Estudo de caso: UHE Mauá*. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Tese de Doutorado, 145p.
- Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H. & Wasle, E. 2008. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. New York, Springer Wien New York, 516p.
- IBGE, 2017a. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=processar-os-dados>>. Acesso em: 18 jul. 2017.
- IBGE, 2017b. *Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro*. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 56p.
- Kouba, J. & Héroux, P. 2001. Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, 5(2): 12–28.

Monitoramento Estrutural por GNSS: Análise do PPP e Posicionamento Relativo na UHE Mauá

Gabriel Zehnpfennig Zanetti; Luis Augusto Koenig Veiga & Paulo Sergio Oliveira Júnior

- Monico, J.F.G. 2008. *Posicionamento pelo GNSS descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo, Editora UNESP, 480p.
- Muguio, M.R. 2012. *Implantação e Análise da Estação da Estação GNSS para o Monitoramento Contínuo da Barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá*. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, 96p.
- Rizos, C.; Janssen, V.; Roberts, C. & Grinter, T. 2012. PPP versus DGNS. *Geomatics World*, 20(6): 18-20.
- Subirana, J.S.; Zornoza, J.M.J. & Hernández-Pajares, M. 2013. *GNSS Data Processing Volume I: Fundamentals and Algorithms*. Noordwijk, ESA Communications, 233p.
- Wübbena, G.; Schmitz, M. & Bagge, A. 2005. PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks. *In: PROCEEDINGS OF ION GNSS*, Long Beach, California, 2005.
- Yigit, C.O. 2016. Experimental assessment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7: 360-383.
- Zumberge, J.F.; Heflin, M.B.; Jefferson, D.C.; Watkins, M.M. & Webb, F.H. 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3): 5005-5017.