



atualmente tramita no Congresso Nacional e estabelece normas para a elaboração do cadastro territorial dos municípios, sendo que a identificação geométrica das parcelas territoriais deve ser vinculada ao sistema geodésico brasileiro (SGB). O conteúdo de inteiro teor pode ser verificado no seguinte endereço eletrônico: [http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop\\_mostrarintegra?codteor=1422235&filename=PL+3876/2015](http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1422235&filename=PL+3876/2015)

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para a implantação de RRM de baixo custo e grande abrangência, para que qualquer profissional possa executar levantamentos em qualquer região do município. A proposta consiste na escolha de pontos de apoio em locais de grande visibilidade, como topos de prédios e morros, onde as coordenadas dos pontos de apoio são determinadas por posicionamento GNSS; e, após isto, prismas refletivos 360° são instalados nestes pontos, possibilitando o uso do método de estação livre (EL) para realizar levantamentos no sistema de referência do município.

## 2- CONSIDERAÇÕES SOBRE REDES DE REFERÊNCIA MUNICIPAIS (RRM) E O MÉTODO DE ESTAÇÃO LIVRE (EL)

Uma rede de referência consiste em um conjunto de pontos de apoio devidamente materializados no terreno, cujas coordenadas (posições) em relação a um sistema de referência são determinadas por meio de observações terrestres como medidas de ângulos e distâncias entre estes pontos, e/ou por meio de técnicas espaciais como os métodos de posicionamento GNSS (Klein, 2012).

Redes de referência são utilizadas nos mais diversos ramos da Ciência e da Engenharia, como por exemplo, na materialização de sistemas de referência globais (Altamimi *et al.*, 2011); no apoio e controle básico aos projetos de mapeamento topográfico (IBGE, 1993); no cadastro técnico rural e urbano (Amorim, 2004); no monitoramento de deformações de estruturas (Chaves, 2001); na locação de obras de engenharia (Pinto, 2000); no monitoramento de fenômenos dinâmicos sobre a superfície terrestre (Drewes & Heidbach, 2009); na implantação e manutenção de diversos serviços de infraestrutura (IBGE, 1983), etc.

No caso dos municípios, algumas das principais aplicações de uma RRM são na locação e controle de obras de engenharia; em serviços de agrimensura e no cadastro territorial, sendo que, atualmente, os métodos mais empregados na implantação de RRM no país são por meio de tecnologia GNSS (ver Amorim, 2004) ou poligonação eletrônica (PE) utilizando prismas refletivos e estações totais (ver Souza, 2001).

Uma vantagem do uso da tecnologia GNSS é que as coordenadas dos pontos levantados são fornecidas em um sistema de referência global, isto é, o posicionamento é dito georreferenciado, compatível

com o atual sistema de referência oficial do país, o SIRGAS2000 (ver Monico, 2008). Entretanto, o uso da tecnologia GNSS com alto nível de precisão, isto é, centimétrica ou milimétrica, envolve o uso de antenas e receptores que custam dezenas de milhares de reais.

Além disso, para obter resultados precisos em tempo-real, deve-se dispor de equipamento com comunicação por rádio ou *internet*, como pelo protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via internet Protocol*), para a obtenção de dados (correções) de estações GNSS de referência (ver Costa *et al.*, 2008).

O estabelecimento de uma rede GNSS ativa, disponível 24h por dia, com transferência de dados em tempo-real via *internet*, envolve grandes custos e uma logística complexa (ver IBGE, 2016). Ressalta-se que muitas aplicações em áreas urbanas, como a locação e o controle de obras de engenharia, por exemplo, necessitam de posicionamento preciso em tempo-real.

Por fim, o posicionamento GNSS em áreas urbanas pode apresentar limitações, em função do erro de multicaminho e o bloqueio dos sinais pelas edificações (Ben-Moshe *et al.*, 2011). Desta forma, o uso da tecnologia GNSS, por meio de uma rede de estações ativas, na qual o profissional necessita dispor de equipamento GNSS e acesso a *internet* para acessar os dados (correções) das estações de referência e realizar posicionamento com precisão centimétrica em tempo-real, não é uma alternativa ótima para levantamentos vinculados a uma RRM, pois envolve grandes custos, tanto por parte do município quanto por parte do profissional, além do posicionamento GNSS apresentar limitações em áreas urbanas, restringindo a sua aplicação.

Alternativamente, a PE também apresenta nível de precisão centimétrica, devendo, para isto, envolver uma série de medições, pois cada ponto da RRM deve ser ocupado com estação total (ET) e visar um ponto de ré e outro de vante em pelo menos duas leituras com controle das medições, o que demanda grande tempo de execução (ver ABNT, 1994).

Além disso, uma vez que a poligonal está implantada, a ocupação de um ponto poligonal com orientação em outro ponto poligonal adiciona o erro de centragem no levantamento, uma das maiores fontes de erros com ET, especialmente em medições angulares (Ghilani & Wolf, 2006).

Outra limitação da implantação de uma RRM por PE é que os pontos de apoio não estarão necessariamente localizados em posições ótimas para cada levantamento, pois a sua distribuição espacial é entre dezenas até centenas de metros (ABNT, 1998). Por exemplo, um ponto de apoio implantado em uma esquina pode ser o único ponto da RRM disponível para realizar o levantamento de uma edificação localizada no meio da quadra, cerca de 50 m desta esquina. Neste caso, deverão ser utilizados mais pontos

de estação auxiliares, o que demanda maior tempo de execução e mais fontes de erros ao levantamento.

Além disso, o levantamento georreferenciado com ET apoiado em pontos previamente determinados requer informações adicionais como o fator de escala a ser aplicado nas medições lineares (ver França *et al.*, 2016). Desta forma, o uso de PE em uma RRM também não é uma alternativa ótima, pois a sua implantação envolve uma grande série de medições, isto é, custos de execução; e, além disso, o espaçamento dos pontos de apoio, de pelo menos dezenas de metros, não garante uma distribuição espacial ótima para todos os levantamentos a serem desenvolvidos no município; além de outros fatores como o erro de centragem e a correta aplicação de fatores de escala lineares nos levantamentos com ET apoiados em pontos poligonais.

Embora atualmente o GNSS e a PE sejam os dois métodos mais empregados na implantação de RRM no país, ressalta-se que a grande maioria dos municípios ainda não dispõe de uma RRM densificada ao longo de toda a sua extensão. Países com maior investimento em redes de referência como Alemanha, Áustria e Suíça, apresentam RRM com precisão centimétrica e pontos de apoio espaçados entre dezenas e centenas de metros (Hasenack, 2013).

Nestes países, ao se realizar um levantamento com ET, o profissional não necessariamente ocupa um ponto da RRM, podendo utilizar três pontos da RRM para empregar um método denominado estação livre (EL). O método de EL, como o termo sugere, permite ao profissional escolher o melhor local para posicionar a ET, e, determinando a sua distância e direção em relação a três pontos da RRM, possibilita obter as coordenadas do ponto de EL e suas respectivas precisões no sistema de referência da RRM. Ressalta-se que o método de EL já é largamente difundido entre os diversos fabricantes de ET, com diferentes denominações como intersecção a ré; ressecção espacial; estação livre e etc. (Alves *et al.*, 2012).

É importante mencionar que o método de EL não se restringe a levantamentos com ET, podendo também ser aplicado no posicionamento GNSS, como por exemplo, na locação de obras em um sistema de coordenadas locais (Hasenack & Cabral, 2013).

Matematicamente, o método de EL pode ser resolvido por diversos modelos, como por exemplo, por meio de alguma transformação geométrica. Neste caso, determinam-se as coordenadas do ponto de EL no sistema de referência da RRM por meio de uma transformação geométrica entre o sistema de referência local da estação e o sistema de referência da RRM, aplicando, por exemplo, um fator de escala para as distâncias; um ângulo de rotação para as direções angulares; e duas translações nas coordenadas planimétricas dos pontos (ver Zhu *et al.*, 2009 e a Figura 1). Após a obtenção dos parâmetros de transformação, todos os pontos levantados a partir do

ponto de EL também estarão vinculados ao sistema de referência da RRM.

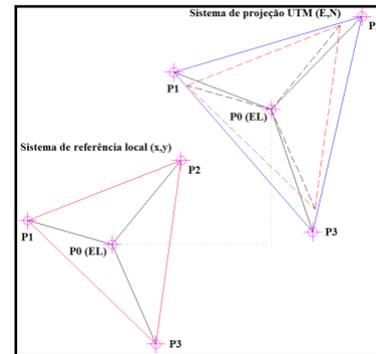


Fig 1 – Transformação de local (x, y) para UTM (E, N)

As transformações geométricas são largamente aplicadas nas ciências geodésicas, sendo uma das mais empregadas denominada “transformação de Helmert” (ver Monico, 2008). A transformação de Helmert 3D envolve sete parâmetros: três translações (uma em cada eixo cartesiano); três rotações (uma em cada plano cartesiano); e um fator de escala único para as três dimensões. Levantamentos topográficos e geodésicos em geral são realizados em um sistema de coordenadas planialtimétricas, desta forma, somente um ângulo de rotação, no plano horizontal, é necessário. Além disso, muitas vezes o fator de escala planimétrico será diferente do fator de escala altimétrico, por exemplo, em função do sistema de projeção cartográfica adotada (França *et al.*, 2016).

Desta forma, neste trabalho, optou-se por considerar uma transformação geométrica 3D de seis parâmetros: três translações (uma em cada eixo cartesiano); dois fatores de escala (um no plano horizontal e outro no eixo vertical); e um ângulo de rotação (no plano horizontal). Neste caso, a relação matemática entre as coordenadas de um mesmo ponto em dois sistemas de referência é dada por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{X,Y} \cdot \cos \theta & \lambda_{X,Y} \cdot \sin \theta & 0 \\ -\lambda_{X,Y} \cdot \sin \theta & \lambda_{X,Y} \cdot \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde na expressão acima, (X, Y, Z) são as coordenadas 3D do ponto no sistema da RRM; (x, y, z) são as coordenadas do mesmo ponto no sistema local da estação; ( $\lambda_{X,Y}$ ,  $\lambda_Z$ ,  $\theta$ ,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) são os seis parâmetros de transformação entre os dois sistemas, respectivamente: fator de escala horizontal, fator de escala vertical, ângulo de rotação horizontal, translação no eixo horizontal este, translação no eixo horizontal norte e translação no eixo vertical.

As coordenadas (X, Y, Z) dos pontos de apoio no sistema da RRM são conhecidas, como por exemplo, coordenadas UTM (este – E, e norte – N) e altitude geométrica (h) em SIRGAS2000; enquanto as coordenadas (x, y, z) no sistema local da estação são determinadas por medições, isto é, visadas aos pontos de apoio, considerando o referencial arbitrário da estação, dado pela origem, escala e orientação da ET.

Desta forma, visando dois pontos de apoio da RRM, têm-se um sistema de  $n = 2 \times 3 = 6$  equações a  $u = 6$  incógnitas, o que possibilita uma solução única e exata, isto é, sem controle de erros. Com três ou mais pontos de apoio, é possível realizar um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ) para obter os seis parâmetros de transformação por meio da seguinte expressão (Ghilani & Wolf, 2006):

$$\hat{x} = (A^T W A)^{-1} A^T W y \quad (2)$$

onde na Expressão (2),  $\hat{x}$  é um vetor contendo os seis parâmetros de transformação ajustados ( $\lambda_{xy}$ ,  $\lambda_z$ ,  $\theta$ ,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ );  $A$  é uma matriz de coeficientes contendo as coordenadas dos pontos de apoio no sistema de referência local da estação, “zeros” ou “um”;  $W$  é a matriz peso contendo o inverso das variâncias das coordenadas dos pontos de apoio em sua diagonal; e  $y$  é um vetor contendo as coordenadas dos pontos de apoio no sistema da RRM.

A precisão (desvio-padrão) dos seis parâmetros de transformação é obtida por meio da propagação de variâncias e covariâncias na forma matricial, resultando em (Gemael, 1994):

$$\Sigma_{\hat{x}} = (A^T W A)^{-1} \quad (3)$$

onde na Expressão (3),  $\Sigma_{\hat{x}}$  corresponde a matriz de covariância dos parâmetros ajustados. As expressões (2) e (3) referem-se ao ajustamento pelo método paramétrico ou modelo de Gauss-Markov. Uma maneira mais rigorosa é considerar a precisão (desvio-padrão) das coordenadas dos pontos de apoio tanto no sistema da RRM ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), quanto no sistema local da estação ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), estas últimas obtidas em função das medições do ponto de EL aos pontos da RRM. Tal procedimento pode ser realizado pelo método combinado de ajustamento ou modelo de Gauss-Helmert. Por fugir do escopo deste trabalho, o mesmo não será aqui apresentado. Detalhes sobre o MMQ podem ser obtidos em Gemael (1994).

Uma vez que os seis parâmetros de transformação estão determinados, as coordenadas dos pontos levantados a partir da EL serão obtidas no sistema de referência da RRM, isto é, o levantamento estará georreferenciado em tempo-real, sem necessidade do uso do GNSS com protocolo NTRIP.

Uma vantagem do método de EL em relação a levantamentos com ET ocupando pontos previamente conhecidos é que a precisão posicional de cada ponto levantado não depende da precisão posicional do ponto de estação; dependendo somente da medição do ponto de EL ao ponto visado e da precisão dos parâmetros de transformação previamente estimados, conforme demonstra a Expressão (1).

É importante destacar que o método de EL apresenta outras vantagens, pois a determinação do ponto de estação é relativamente rápida em comparação com a PE; o ponto de EL não necessita ser materializado e pode ser escolhido livremente (em

função das condições do levantamento); além de não apresentar o erro de centragem.

Além disso, o método de EL pode ser utilizado com ET, equipamento de alta precisão e menor custo que receptores GNSS de multi-frequência com coletora de dados para posicionamento centimétrico em tempo-real. Havendo três ou mais pontos de apoio visíveis da RRM, pode-se realizar um ajustamento pelo MMQ e determinar as coordenadas do ponto de EL e suas respectivas precisões, bem como, os resíduos dos pontos de apoio, o que garante um controle de qualidade fundamental do posicionamento (Klein, 2012); enquanto o posicionamento GNSS em rede no Brasil, em geral, só pode ser realizado em modo pós-processado ou por meio de serviços comerciais.

Em contrapartida, pontos poligonais permitem o levantamento tanto por ET quanto por GNSS; sendo que o profissional necessita de somente um (GNSS) ou dois (ET) pontos de apoio para executar o levantamento. Por sua vez, uma rede GNSS ativa necessita menor densidade de pontos, pois cada estação deve abranger um raio com cerca de 20 km; além do profissional não necessitar de um ponto de estação (base) para realizar o levantamento GNSS/NTRIP.

A principal desvantagem do método de EL é que este necessita de uma RRM com alta densidade de pontos, pois cada ponto de estação necessita de visibilidade a, pelo menos, dois pontos da RRM (ou a três pontos quando se requer o controle de qualidade), o que atualmente inviabiliza a sua utilização nos municípios do Brasil.

Uma alternativa de baixo custo, proposta neste trabalho, é a adoção de uma RRM formada por pontos de apoio em locais de grande visibilidade do município, como morros e topos de prédios, utilizando prismas refletivos 360° que garantem a visada não importa a direção do ponto de EL. As coordenadas destes pontos de apoio devem ser determinadas por posicionamento GNSS, garantindo um sistema de referência único para o município e o nível de precisão centimétrica das RRM atualmente adotadas a nível mundial. O fato dos pontos de apoio da RRM estarem localizados em locais altos como morros e topos de prédios reduz os efeitos de multicaminho e obstruções dos sinais GNSS, isto é, as maiores limitações do posicionamento GNSS em áreas urbanas.

Desta forma, por se situarem em locais de grande visibilidade e utilizarem prismas refletivos 360°, a principal vantagem desta proposta é que os pontos de apoio da RRM não necessitam estarem espaçados algumas dezenas de metros como no caso de PE. Além disso, os pontos da RRM não necessitam de intervisibilidade entre si, uma vez que as suas coordenadas são determinadas por posicionamento GNSS. Ressalta-se que tal metodologia é inédita e não é empregada em nenhum município do país até o presente momento.

A Tabela 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos três métodos de levantamentos apoiados em redes aqui considerados: levantamento apoiado em pontos poligonais; rede GNSS/NTRIP ativa e rede com prismas refletores 360° para EL.

TABELA 1 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DE ALGUNS MÉTODOS DE LEVANTAMENTOS APOIADOS EM REDES.

RRM	Vantagens	Desvantagens
<b>Poligonal</b>	Levantamento com ET ou com GNSS;  Requer somente 1 ponto (GNSS) ou 2 pontos base (ET).	Requer estação auxiliar (para ET);  RRM necessita de alta densidade de pontos.
<b>Rede GNSS ativa</b>	RRM com menor densidade de pontos;  Não requer ponto de estação por parte do profissional.	Equipamento GNSS NTRIP possui maior custo que ET;  Limitação de aplicação em áreas urbanas.
<b>Prismas 360°</b>	Ponto de estação escolhido em função do levantamento;  Pontos da RRM não necessitam intervisibilidade.	Ponto de EL requer visibilidade a três pontos da RRM;  Pontos da RRM restritos a locais de grande visibilidade.

É importante mencionar que os três métodos considerados possuem limitações em áreas rurais afastadas: a PE requer um grande número de medições no transporte de coordenadas até estas regiões; levantamentos por GNSS/NTRIP ficam limitados em função da distância às estações ativas e/ou o acesso à internet; enquanto uma rede com prismas refletores 360° fica restringida as imediações de locais com grande visibilidade como morros e vilarejos rurais.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Santa Catarina pelo fornecimento de recursos financeiros para o projeto de pesquisa (Edital N° 03/2016/PROPI), e a empresa Alezi Teodolini pela agilidade e preço acessível no fornecimento dos prismas refletores 360°, indispensáveis para a realização deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altamimi, Z.; Collilieux, X.; Métivier, L. ITRF2008: An improved solution of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geodesy*, v. 85, n. 8, p. 457-473, 2011.

Alves, J. L. F. G.; Silva, D. J. N.; Gonçalves, M. L. A. M.; Nero, M. A. Metodologia de ensino para Topografia: Proposta didática para o método de estação livre. In: *Anais do IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*. Recife, 2012.

Amorim, G. P. *Confiabilidade de rede GPS de referência cadastral municipal - estudo de caso: rede do município de Vitória (ES)*. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos. 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 13.133: Execução de levantamento topográfico*. Rio de Janeiro, 1994.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 14.166: Rede de referência cadastral municipal – Procedimento*. 1998.

Ben-Moshe, B.; Elkin, E.; Levi, H.; Weissman, A. Improving Accuracy of GNSS Devices in Urban Canyons. In: *23d Canadian Conference On Computational Geometry*. Toronto, 2011.

Chaves, J. C. *Uso da tecnologia GPS na monitoração de deformação: sistemas, etapas e experimentos*. Tese (Doutorado em Transportes) – USP, São Carlos. 2001.

Costa, S. M. A.; Lima, M. A. A.; Moura Junior, N. J. De; Abreu, M. A.; Da Silva, A. L.; Fortes, L. P. S. RBMC em tempo real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. In: *II Simpósio Brasileiro De Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*. Recife, 2008.

De Paula Neto, L. E. *Contribuição para o parcelamento do solo urbano baseado no cadastro territorial multifinalitário*. 155p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis, 2014.

Drewes, H.; Heidbach, O. The 2009 horizontal velocity model for South America and the Caribbean. Submitted to C. Pacino et al. (Eds.). *IAG Scientific Assembly “Geodesy For Planet Earth”*. IAG Symposia, Buenos Aires, August 31 to September 4, 2009.

França, R. M.; Cabral, C. R.; Hasenack, M. Implantação de obras em sistemas TMs com estação total. In: *Anais do COBRAC 2016*. Florianópolis, 2016.

Gemael, C. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. Curitiba: Editora UFPR, 1994.

Ghilani, C. D.; Wolf, P. R. *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2006.

Hasenack, M. *A Cartografia Cadastral no Brasil*. 201p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis, 2013.

Hasenack, M.; Cabral, C. R. Estação livre com transformação de Helmert utilizando GNSS-RTK. In: *Anais do VIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas*. Curitiba, 2013.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *RBMC-IP - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real*. Acesso: 27/03/16.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Resolução PR, n° 22, de 21 de julho de 1983*. Dispõe sobre as Especificações e Normas para Levantamento Geodésicos em Território Brasileiro.

Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (IBGE). *Manual de normas, especificações e procedimentos técnicos para a carta internacional do Mundo ao Milionésimo – CIM 1:1 000 000*. 1993.

Klein, I. *Controle de Qualidade no Ajustamento de Observações Geodésicas*. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – UFRGS, Porto Alegre, 2012.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

PINTO, J. R. M. *Potencialidade do uso do GPS em obras de Engenharia*. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – UNESP, Presidente Prudente, 2000.

Prefeitura Municipal de Porto Alegre. 2013. *Sistema cartográfico do município de Porto Alegre: Manual de informações e orientações*.

SOUZA, G. C. *Análise de metodologias no levantamento de dados espaciais para cadastro urbano*. Dissertação (Mestrado em Transportes) – USP, São Carlos, 2001.

Universidade Estadual Paulista. *Rede GNSS ativa do estado de São Paulo*. Acesso em 27/03/16.

Zhu, H.; Wu, W.; Wang, Z. Study on the Free-positioning of ETS in the PDL Track Surveying System. *Modern Applied Science*. v. 3, n. 3, p. 128–131, 2009.