

DENSIFICAÇÃO DE REDES DE REFERÊNCIA HORIZONTAIS POR MÚLTIPLAS ESTAÇÕES LIVRES

ROVANE MARCOS DE FRANÇA¹

IVANDRO KLEIN²

LUIS AUGUSTO KOENIG VEIGA³

¹ Instituto Federal de Santa Catarina, Universidade Federal do Paraná— rovane@ifsc.edu.br

² Instituto Federal de Santa Catarina, Universidade Federal do Paraná— ivandro.klein@ifsc.edu.br

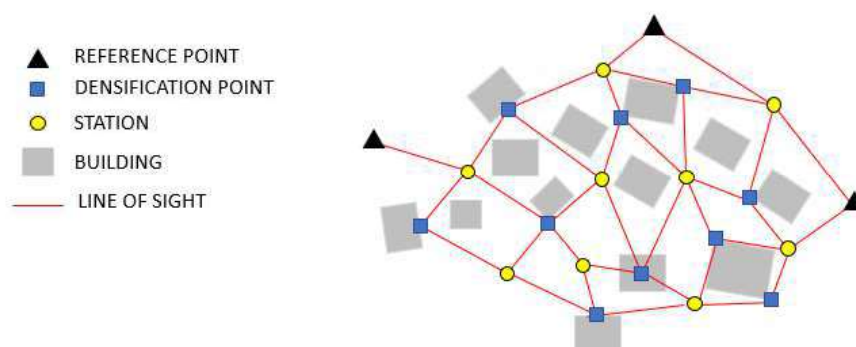
³ Universidade Federal do Paraná— kngveiga@gmail.com

Uma rede de referência (RR) destina-se para várias finalidades, como projetos de engenharia, locações de obras e levantamentos de imóveis [1-4]. Com o posicionamento GNSS (Global Navigation Satellite System), a densificação das RRs ganhou em qualidade posicional e redução de custo, porém em áreas urbanas críticas à recepção de sinais dos satélites, a solução para a densificação continua sendo por meio de observações com estação total (ET). O planejamento da densificação com ET passa a ser importante para garantir que os erros aleatórios tenham propagação controlada de forma a não prejudicar a qualidade posicional dos levantamentos realizados a partir dela [5]. Com a popularização das ETs, os tradicionais métodos geodésicos denominados triangulação e trilateração, foram substituídos pela triangulateração, que possui grande confiabilidade devido à redundância das observações, mas é extremamente onerosa devido à quantidade de ocupações (estações e pontos visados). Já a poligonação se popularizou trazendo alta produtividade, mas possui baixa redundância e alta propagação de erros, além de não ser possível a obtenção de covariâncias entre pontos de diferentes poligonais. A análise da qualidade da rede *a priori* permite que a sua geometria e redundância sejam otimizadas antes de sua realização [6]. Esta análise pode ser realizada por meio das elipses de erros, que são regiões de incerteza posicional dos vértices, determinada em função da variância e da covariância das suas coordenadas, permitindo analisar a qualidade do posicionamento dos vértices da rede não somente de forma absoluta, mas também relativa [5]. Adotando o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados é possível fazer uma simulação da propagação dos erros aleatórios antes das medições de campo. Em geral, as elipses de erro padrão obtidas diretamente a partir da matriz de variância e covariância das coordenadas, possuem um baixo nível de probabilidade associado, podendo elas serem escaladas para obter as chamadas elipses de confiança, sendo o fator de escala em função dos graus de liberdade do ajustamento e do nível de significância desejado [7]. A materialização de vértices ao nível do solo exige a elevação da ET e do refletor para realizar as observações, o que acaba sendo incorporado o erro de centragem, afirmado por [7] como uma das fontes de erros mais significativas em medições angulares. Sua minimização é de alto custo operacional por meio de repetições de ocupações em diversas posições da alidade da ET e prismas. Já o método de estação livre ajusta o vértice ocupado em relação aos vértices observados, mas também não existem covariâncias entre 2 estações livres, visto que serão ajustamentos independentes. Com a análise da qualidade da rede *a priori*, esta pesquisa propõe um novo método de densificação de RRs horizontais fazendo uso de múltiplas estações livres (MEL), minimizando a propagação de erros (menores elipses de confiança) e aumentando a produtividade em campo em relação aos métodos de poligonação e triangulateração, por não exigir a ocupação dos pontos visados e eliminando o erro de centragem. O uso da estação livre traz a versatilidade em ocupar com uma ET um ponto temporário que sequer é materializado, não produzindo o erro de centragem em sua ocupação (Figura 1). A ocupação pode desta forma ser escolhida estrategicamente para as medições, ao invés de estar condicionado a um ponto materializado pré-existente. Os vértices de densificação da rede (Figura 1) por sua vez, são materializados com prismas 360° fixos de forma permanente, e, portanto, também não possuem erros de centragem em sua determinação. Estes vértices é que representarão efetivamente a densificação da rede. Ressalta-se que com o método proposto de MEL, sequer são necessários profissionais auxiliares para ocupar os vértices de densificação para as observações, pois nestes vértices já estarão prismas 360° fixados permitindo as observações de forma muito produtiva. Com a rede densificada e devidamente documentada com monografia pública, a facilidade de uso é notória, pois não há necessidade de ocupar um vértice físico com a ET e nem de um profissional auxiliar para ocupar outros vértices como referência para orientação, permitindo que sejam feitas ocupações com estação livre em locais estratégicos para então realizar o levantamento da área objeto (Figura 2). Para efeito comparativo da qualidade da densificação de uma rede adotando o método proposto de MEL, considerou-se o método de triangulateração (por ser o mais rigoroso geometricamente) e o método de poligonação (por ser o mais produtivo). A simulação da qualidade *a priori* entre os métodos se dará mantendo a geometria dos vértices a serem densificados na rede, independentemente do método adotado. Para isso foi simulada uma geometria irregular para a rede, típica de áreas urbanizadas, com distâncias variando de 59 a 241 metros. Na tabela 1 pode-se consultar os parâmetros necessários e como eles foram definidos para realizar o

processamento computacional no software Adjust [8]. Nas figuras 3, 4 e 5 temos a representação gráfica da rede e suas elipses absolutas de confiança nos métodos simulados. Na Figura 6 estão as elipses agrupadas para um comparativo direto entre os três métodos. Na Tabela 1, estão as dimensões da elipse absoluta de confiança do vértice com pior propagação. Também é possível produzir as elipses relativas de confiança dos alinhamentos (Figura 7), que é um importante parâmetro para a orientação aos novos levantamentos apoiados na rede. Analisando as elipses absolutas de confiança, é possível observar que a poligonação gerou propagação muito maior dos erros em toda a rede quando comparado aos outros métodos tanto na análise posicional dos vértices (Figura 6) como na análise relativa entre os vértices (Figura 7). Quando comparado à triangulação, considerada como referência neste estudo, o método proposto de MEL se mostrou ligeiramente melhor em todos os vértices e alinhamentos, devido à ausência do erro de centragem tanto do ponto de estação quanto dos pontos visados. No vértice de pior propagação de erros (Tabela 2), no método proposto a área da elipse absoluta chegou a ser 18 vezes menor e com menor achatamento quando comparado com a poligonação, método mais utilizado em áreas urbanizadas. Já quando comparado à triangulação, a área foi 2,3 vezes menor com achatamento similar. Em termos de custos (trabalho necessário em campo), a quantidade de ocupações com a ET na poligonação e na triangulação é idêntica (20), pois correspondem aos vértices da rede (Figura 8). Já no método de MEL a quantidade de ocupações com ET pode ser otimizada (neste caso foram simuladas 12 ocupações). A quantidade de visadas na triangulação é bastante elevada (83) devido à alta redundância, enquanto a menor quantidade de visadas na poligonação (42) ocorre pela baixa redundância de observações. Conclui-se que o método de MEL proposto apresenta melhor precisão em relação à triangulação e a poligonação (em função da eliminação do erro de centragem), bem como, maior produtividade (em função da não necessidade de ocupação dos vértices de visada). Entretanto, em termos de confiabilidade, a triangulação apresenta melhor controle de erros devido ao alto número de observações redundantes. A densificação de RRs horizontais por múltiplas estações livres se apresenta uma alternativa atraente aos métodos usualmente mais adotados com ET. Recomenda-se a aplicação do método em uma área teste, uma vez que conceitualmente está validado por meio dos experimentos simulados e a comparação com os métodos convencionais de poligonação e triangulação em termos de precisão, confiabilidade e produtividade.

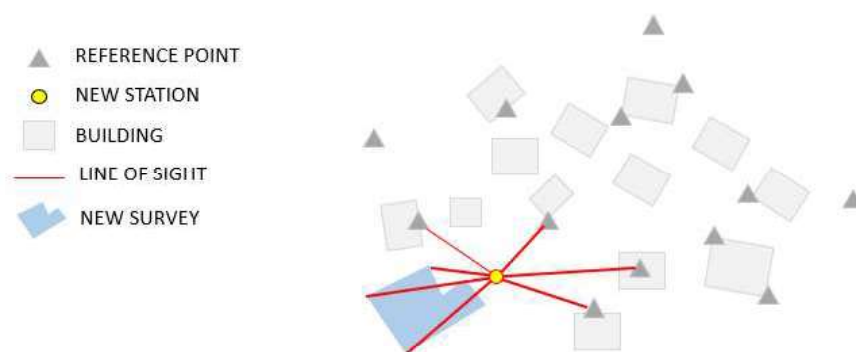
Figuras

Figura 1 – Disposição dos vértices e pontos de ocupação no método de múltiplas estações livres.



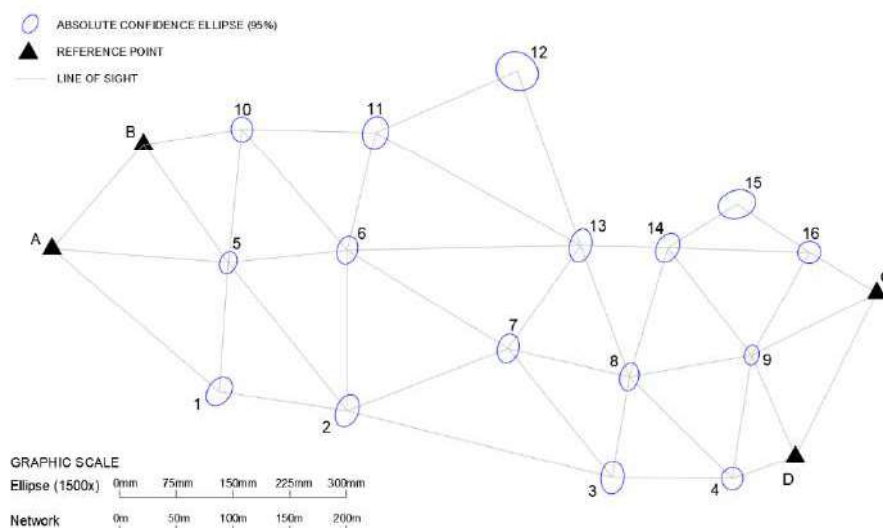
Fonte: Autores (2022).

Figura 2 – Estação livre para iniciar um levantamento usando a rede densificada.



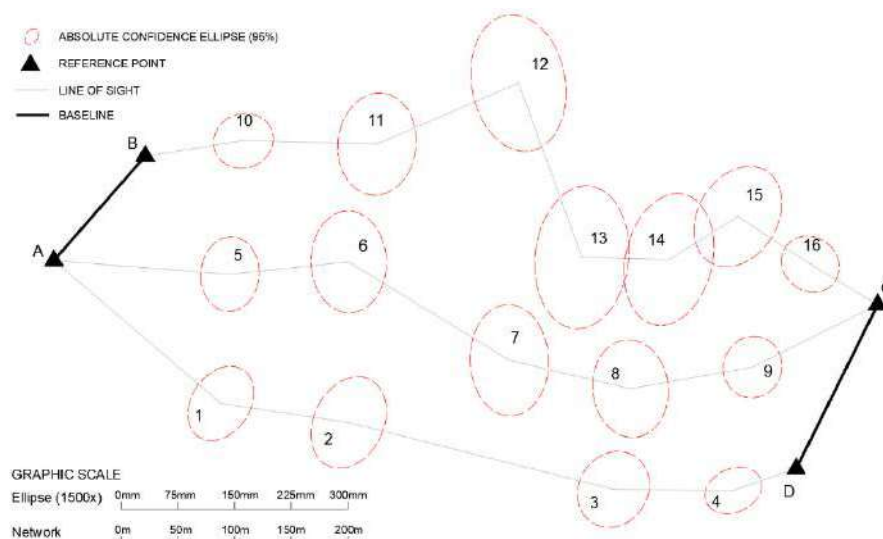
Fonte: Autores (2022).

Figura 3 – Elipses absolutas de confiança *a priori* com triangulação.



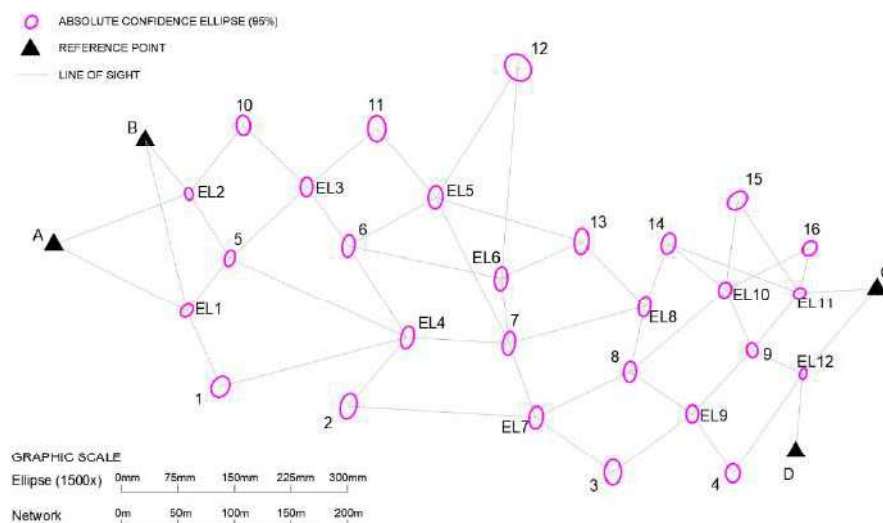
Fonte: Autores (2022).

Figura 4 – Elipses absolutas de confiança *a priori* com poligonação.



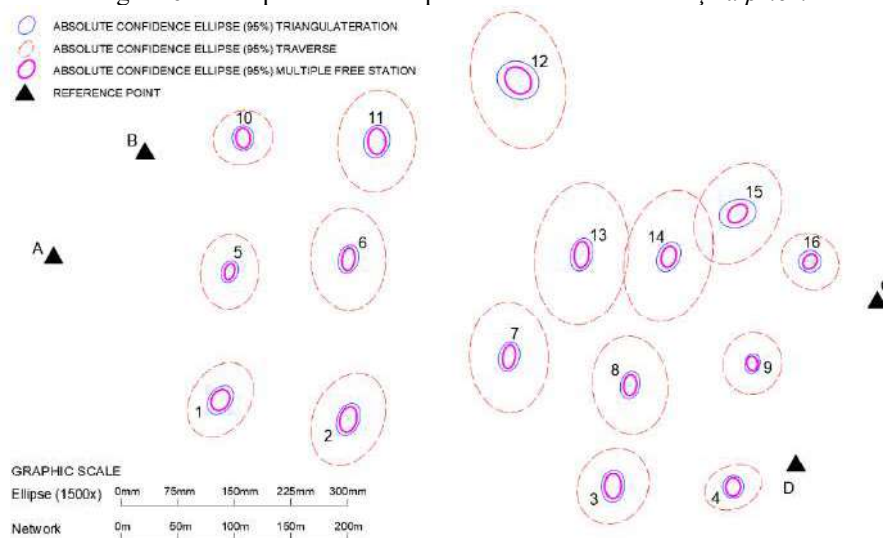
Fonte: Autores (2022).

Figura 5 – Elipses absolutas de confiança *a priori* com múltiplas estações livres.



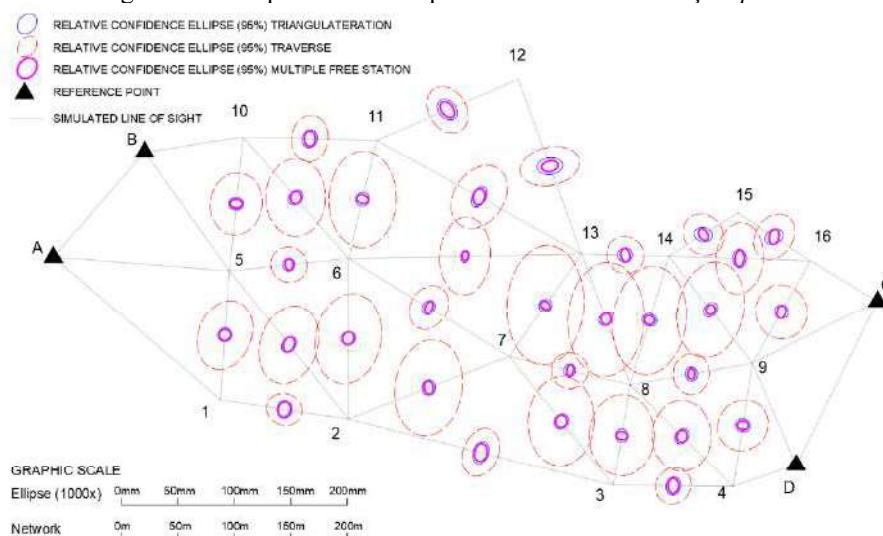
Fonte: Autores (2022).

Figura 6 – Comparativo das elipses absolutas de confiança *a priori*.



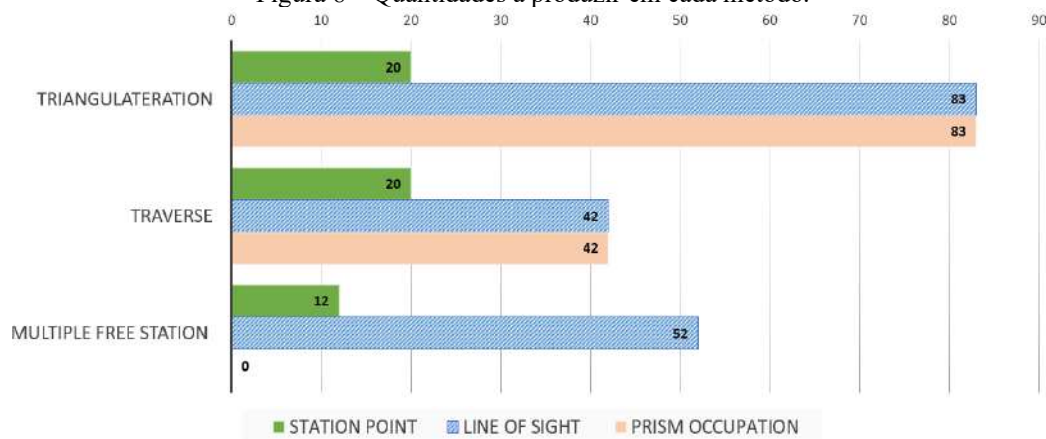
Fonte: Autores (2022).

Figura 7 – Comparativo das elipses relativas de confiança *a priori*.



Fonte: Autores (2022).

Figura 8 – Quantidades a produzir em cada método.



Fonte: Autores (2022).

Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros para as simulações dos métodos.

PARÂMETRO	DEFINIÇÃO
coordenadas dos vértices de junção	Simuladas em CAD
coordenadas aproximadas dos vértices da rede densificada	Simuladas em CAD
observáveis angulares e lineares	Simuladas em CAD
precisão linear e angular da estação total	$\pm 5''$ e $\pm (2\text{mm} + 2\text{ppm})$
erros de centragem da estação total e do prisma refletor	1,5mm para estação [9] 3,5mm para o prisma [10]
nível de significância das elipses de erros	0,05
quantidade de séries de leituras	2 séries de leituras conjugadas [11]

Fonte: Autores (2022).

Tabela 2 – Parâmetros para as simulações dos métodos.

DIMENSÃO DA ELIPSE	Su (mm)	Sv (mm)	Área (mm ²)	Achatamento
POLIGONAÇÃO	40.62	27.60	3.522.08	1.5
TRIANGULATERAÇÃO	12.77	10.87	436.08	1.2
MULTIPLAS ESTAÇÕES LIBRES	8.59	7.03	189.71	1.2

Fonte: Autores (2022).

Palavras-chaves: estação livre; poligonação; triangulateração; erro de centragem; elipses de erros.

Referências

- [1] TORGE, W.; MÜLLER, J. **Geodesy**. 4. ed. Berlim: De Gruyter, 2012. 433 p.
- [2] BLACHUT, T. J.; SAASTAMOINEN, J. H.; CHRZANOWSKI, A. **Urban Surveying and Mapping**. Nova Iorque: Springer-Verlag, 1979, 372 p.
- [3] ABDALLAH, A. A. G.; WANG, Z. Optimizing the geodetic networks based on the distances between the net points and the project border. **Scientific Reports**, v. 12, n. 647, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04566-0>.
- [4] Fok, H. S.; Baki Iz, H.; SCHAFFRIN, B. Comparison of Four Geodetic Network Densification Solutions. **Survey Review**, v. 41, n. 311, p. 44–56, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1179/003962608X389997>.
- [5] KUANG, S. **Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications**. Chelsea: Ann Arbor Press, 1996, 368 p.
- [6] ALSADIK, B. **Adjustment Models in 3D Geomatics and Computational Geophysics**. Amsterdam: Elsevier, 2019, 415 p.
- [7] GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: Spatial Data Analysis**. 6. ed. New York: John Wiley & Sons, 2017. 695 p.
- [8] CG CONSULTING. **Adjust versão 7.1.1**. 1995. Disponível em: <http://www.personal.psu.edu/cdg3/free.htm>. Acesso em 10 de dezembro de 2020.
- [9] LEICA. **Leica TPS1200 Series Brochure**. 2005. 12p. Disponível em <https://secure.fltgeosystems.com/uploads/tips/documents/39.pdf>. Acesso em 1 outubro de 2022.
- [10] KLEIN, I.; LIMA, A. P. B. Estudos iniciais sobre a incerteza posicional dos vértices de imóveis urbanos a luz do SINTER. 2018. **13º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial - COBRAC 2018**. Disponível em: <https://ocs.cobrac.ufsc.br/index.php/cobrac/cobrac2018/paper/view/532>. Acesso em 4 de outubro de 2022.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13133:2021 Execução de Levantamento Topográfico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.