

MÁQUINAS E SENSORES: UMA ANÁLISE DOS INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO ELETRÔNICA DE DISTÂNCIA (MED)

M.A BARROS¹

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil.

Comissão II – Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura

RESUMO

A presente pesquisa investiga e analisa os princípios físicos-eletrônicos dos atuais equipamentos e dos instrumentos de Medição Eletrônica de Distância (MED) que são usados nos levantamentos topográficos e altimétricos no que tange sua precisão e margem de erro. Isso porque desde o geodímetro e Telurômetro, passando pelo Distânciômetro óptico-eletrônico até as modernas Estações Totais e Receptores GPS geodésico, a precisão é um grande desafio para a humanidade, já que toda medida de distância possui erro (GEMAEL, 1984). A MED se constitui atualmente como sendo muito precisa, porém mesmo em condições ideais de pressão, umidade relativa do ar e temperatura ela pode apresentar erros de várias naturezas (sistemáticos, grosseiros ou aleatórios), mas por que isso ocorre? Por que o erro permanece nas medidas mesmo como um avançado aparato tecnológico e instrumental disponível usados atualmente na mensuração e representação da superfície da Terra? Essas e outras questões são objetos dessa pesquisa.

Palavras chave: Máquinas, Sensores, Medição Eletrônica de Distância (MED).

ABSTRACT

The present research investigates and analyzes the physical-electronic principles of the current equipment and Electronic Distance Measurement (MED) instruments that are used in topographic and altimetric surveys with respect to their accuracy and margin of error. This is because since the Geodimeters and Telurômetro, through the Optical-Electronic Distancimetro until the modern Total Stations and GPS receivers geodesic, the precision is a great challenge for the humanity, since all measure of distance has error (GEMAEL, 1984). The MED is considered very accurate, but even under ideal conditions of pressure, relative humidity and temperature, it may present errors of many kinds (systematic, coarse or random), but why does this occur? Why does error remain in measurements even as an advanced technological and instrumental apparatus available and currently used in the measurement and representation of the Earth's surface? These and other questions are answered throughout the text.

Keywords: Machinery, Sensors, Electronic Distance Measurement.

1- INTRODUÇÃO

A humanidade desde seu surgimento na Terra tem a necessidade de se orientar e se posicionar no espaço, por isso, a construção de mapas e desenhos topográficos sempre estiveram presentes na vida do ser humano.

Desse modo, o ser humano sempre buscou conhecer, mensurar e representar o meio em que vive, seja por questões de sobrevivência, de orientação no tempo e no espaço, de construção de seu habitat, dentre outras demandas que lhe são impostas pela relação entre

a sociedade e as condições naturais do Planeta. Assim, a história da humanidade se confunde com a da evolução das técnicas, instrumentos e equipamentos elaborados para os fins de confecção de mapas, cartas e plantas da superfície terrestre. Com efeito, ao observar a história constata-se, portanto, que há desde o surgimento dos primeiros mapas - cujos registros apontam para o mapa babilônico Gar-Sur feito em argila cozida no de 2.500 a.C como sendo o primeiro da história (FITZ, 2008) - até a atualidade as grandes mudanças e avanços nessa área estão atreladas aos eventos históricos importantes

de cada período. Em outras palavras, a evolução das técnicas de mapeamento está associada às demandas exigidas pela sociedade, que é dinâmica e mutável ao longo da história.

Atualmente, essas técnicas se encontram submersas à um contexto de grandes avanços tecnológicos ocorridos nas áreas da informática e das geotecnologias, sobretudo, no que tange a aquisição de dados, imagens e informações da superfície do Planeta para posterior representação gráfica. Destacam-se, ainda, as recentes produções de softwares voltados para análise espacial, a incorporação de avançadas técnicas de modelagem tridimensional e os avanços tecnológicos dos Sistemas de Posicionamento Global (GPS) como o DGPS, por exemplo, que corrigem erros de um a três metros cometidos pelo GPS aumentando a precisão das medidas eletrônicas de distância para ordem do milímetro. Além disso, as inovações nas técnicas e nos equipamentos de medição eletrônica de distância em campo apresentam também avanços significativos, pois se considerar os últimos 30 anos observa-se uma evolução que se inicia como o surgimento dos primeiros equipamentos de medição eletrônica, como os geodímetros e Telurômetros de 1957 (Medida Indireta das Distâncias) e o Distânciometro óptico-eletrônico de 1968 (determinação do tempo t que a onda eletromagnética leva para percorrer a distância, de ida e volta, entre o equipamento de medição e o refletor) e vai até as atuais Estações Totais, como a GPT7500/GTS-750 da empresa TOPCON que mede até 2km sem uso do prisma, considerada o modelo mais preciso. Apesar disso, o ser humano ainda encontra grandes obstáculos no que se refere a precisão nas medidas de distâncias e a superação dos erros que podem ser de várias naturezas (sistemáticos, grosseiros ou aleatórios), mas por que isso ocorre? Por que o erro permanece nas medidas mesmo com um avançado aparato tecnológico e instrumental usados na mensuração e representação da superfície da Terra? Essas e outras questões se constituem como sendo o grande desafio desse artigo que é resultado, ainda que parcial, de uma pesquisa de iniciação científica cujo objetivo é o de investigar e analisar os princípios físicos-eletrônicos dos atuais equipamentos e dos instrumentos de Medição Eletrônica de Distância (MED) que são usados nos levantamentos topográficos e altimétricos no que tange sua precisão e margem de erro.

2- ERROS NAS OBSERVAÇÕES: CLASSIFICAÇÃO E NATUREZA.

O verdadeiro valor das grandezas medidas com os instrumentos eletrônicos atuais, mesmo que obtidas em medições repetidas várias vezes e em condições idênticas sempre apresentará erro (McCORMAC, 2010). Esses erros são, segundo Gonçalves (2012), oriundos de três fontes principais, a saber: (i) falha humana; (ii) imperfeição ou descalibração do equipamento; (iii) influência das condições ambientais. De acordo com Gemael (1984), a classificação

tradicional se refere a essas fontes de erros, respectivamente, como (a) grosseiros, (b) sistemáticos e (c) acidentais.

O primeiro, os **grosseiros**, são aqueles cometidos, em geral, pelos observadores, como, por exemplo, a inversão de dígitos numa leitura, a troca do bordo visado na medida da distância zenital do sol (DALMOLIN, 2009). Nos equipamentos eletrônicos esses erros podem ocorrer na transmissão de dígitos. Nesse caso, informação transmitida pelo equipamento é diferente do valor coletado em campo. Um exemplo ocorre na Geodésia Celeste quando do posicionamento pelo rastreamento de satélites explorando o efeito Doppler. Isso porque certas “palavras”, irradiadas em código pelo satélite e gravadas eletronicamente no receptor, podem ter dígitos alterados pelo ruído comum nas transmissões (DALMOLIN, 2009). Esse tipo de erro é detectado e eliminado pela técnica “*majority voting*” (McCORMAC, 2010), porém nem sempre são detectados o que, em última análise, pode ser um problema quando a detecção desses erros torna-se difícil e possível somente através da realização de um teste estatístico (GONLÇALVES, 2012). Desse modo, cabe ao observador se munir de precauções e cuidados para evitar sua incidência ou para identificar sua presença.

O segundo, **os sistemáticos**, são aqueles erros causados por fontes conhecidas, em geral, por descalibração, problemas mecânicos ou eletrônicos dos equipamentos e das condições ambientais (GEMAE, 1984). Nesse sentido, esse tipo de erro pode ser evitado através de técnicas especiais de observação e/ou corrigido posteriormente mediante fórmulas matemáticas específicas (DALMOLIN, 2010). Consta-se, portanto, que não se trata de “erros”, mas antes, de influências das condições ambientais e de defeitos nos equipamentos. Desse modo, a medida eletrônica de uma distância deve ser filtrada para eliminar o efeito da refração, assim como a leitura do gravímetro “*expurgada da influência da atração luni-solar*” ((FAGGION, 2001, p. 47). No nivelamento geométrico, o uso do método de visadas iguais - que consiste em posicionar o nível a igual distância das miras - promove, segundo Gemael (1987), a minimização do efeito da curvatura terrestre e a falta de paralelismo entre a linha de visada e o eixo tubular. Outra técnica para evitar esse tipo de erro, de acordo com Dalmolin (2009), é a reiteração e pontaria nas posições direta e inversa da luneta do equipamento nas observações.

O terceiro e último, o **aleatório ou acidental**, é classificado como sendo aquele que permanece após os dois primeiros erros serem eliminados. Pode ser definido, ainda, como aquele que “*não segue nenhum tipo de lei ou princípio que ora ocorre num sentido ora no outro, tendendo a neutralizar-se quando o número de observações é grande*” (FAGGION, 2001). Nesse sentido, pode-se afirmar que quando o tamanho da amostra é grande, os erros aleatórios apresentam uma distribuição que muito se aproxima da distribuição normal (GEMAE, 1984). Desse modo, antes de iniciar

um ajustamento é necessário excluir qualquer possibilidade de erros sistemáticos e grosseiros para se concentrar na ocorrência dos erros aleatórios ou acidentais. Além disso, a análise deve considerar que esse tipo de erro possui peculiaridades se comparado aos demais tipos de erros. São elas: 1) erros pequenos se manifestam com mais frequência do que os grandes; 2) erros positivos e negativos do mesmo tamanho ocorrem com igual frequência, ou são igualmente prováveis; 3) a média dos resíduos é aproximadamente nula; 4) o aumento das observações, aumenta a probabilidade de se chegar próximo ao valor real (FAGGION, 1999). Um exemplo de erro aleatório é a falta de verticalidade no posicionamento da baliza no momento da medição direta da distância usando trena e a técnica do balizamento.

3 – PRECISÃO E ACURACIA

Os termos precisão e acurácia são usados, às vezes, erroneamente como sendo sinônimos. Para Dalmolin (2010), o termo **Precisão** está relacionada com os efeitos aleatórios enquanto que **Acurácia** se vincula aos efeitos aleatórios e sistemáticos. Faggion (2001), define precisão como sendo a repetibilidade de medidas sucessivas feitas em condições semelhantes, estando ligada somente aos efeitos aleatórios. Em outras, a precisão está diretamente relacionada com o número de repetição da mesma medida realizada em condições semelhantes, pelo mesmo observador, sobre a mesma quantidade física, ou seja, uma média de concordância entre as medidas coletadas. Para Gemael (1987), no caso da variável aleatória unidimensional, a precisão será indicada pela variância estimada σ^2 ou pelo desvio padrão $\sigma = +\sqrt{\sigma^2}$, isto é, pelo erro médio quadrático $m = +\sqrt{\sigma^2}$. Para os casos de variável n-dimensional a precisão será estimada pelo traço da matriz variância-covariância. A Figura 1 ilustra a diferença entre precisão e acurácia.

	ACURADO	INACURADO (ERRO SISTEMÁTICO)
PRECISO		
IMPRECISO (ERRO DE REPRODUTIBILIDADE)		

Fig. 1- Precisão e Acurácia. **Fonte:** McCORMAC (2010).

4 - MEDIDA ELETRÔNICA DE DISTÂNCIA (MED)

Em condições ideais (controladas em laboratório) a MED é descrita matematicamente pela seguinte equação: $2D = c \cdot \Delta t$, onde c é velocidade de propagação da luz no meio, D é a distância entre o

emissor e o refletor (A-B) e Δt é o tempo de percurso do sinal (ida e volta). Essa equação se desdobra numa outra, na qual a velocidade de propagação da luz é considerada no vácuo (C_0) e o índice de refração no meio de propagação (n). Assim, tem-se que $C = C_0 / n$ e, por fim, chega-se na equação $t = 2D / c$. Esses índices foram determinados em ensaios de laboratórios sob condições de pressão atmosférica, temperatura e comprimento de onda pré-determinadas e controladas. Desse modo, temos que a velocidade da luz no vácuo é de 300.000 km/s (no vácuo) e aplicado a equação anterior e considerando uma distância de 1 km, obtém-se que $t = (2 \cdot 1 \text{ km}) / (3 \cdot 10^5 \text{ km/s})$, logo $t = (2 / 3) \cdot 10^{-5}$, portanto, $t = 6 \cdot 10^{-6}$. A partir desse exemplo poder-se-ia afirmar que um 1km de distância possui um tempo de percurso do sinal (luz, onda eletromagnética) de $6 \cdot 10^{-6}$. Pode-se concluir, aqui, que a distância de um ponto a outro (de A à B) é mensurada pelo tempo gasto para que a luz percorra um intervalo espacial (geográfico) da superfície da Terra e volta ao ponto de origem. Com efeito, a própria definição da unidade de medida de distância, o metro, é descrita pelo Sistema Internacional de Unidades (SIU) como sendo “o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299792458$ de segundos” (BRASIL, 2002, p. 57). Esses testes, porém, só podem ser realizados em laboratórios com instrumentos muito precisos, como, por exemplo, relógios e cronômetros atômicos que registram grandezas muito altas e nano pequenas. Devido ao custo financeiro e a inviabilidade tecnológica para realização desses testes em campo, a alternativa encontrada foi a de relacionar a variação do tempo com a variação da fase do sinal de medida. Desse modo, para fins práticos a MED é descrita pela relação entre o tempo de deslocamento de um sinal e o ângulo de fase deste mesmo sinal, numa relação trigonométrica envolvendo coordenadas polares e retangulares, como pode ser observado na Figura 2. Nela

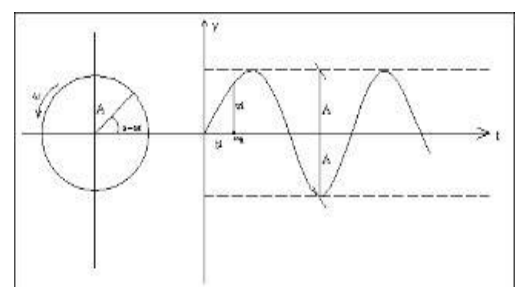


Fig.2 – Representação da função trigonométrica em um sistema de coordenadas polares e retangulares. **Fonte:** FAGGION (2001).

os elementos que caracterizam a onda eletromagnética (Figura 3) são a amplitude (A), a velocidade angular (ω), a frequência (φ), o ângulo de fase (ϕ) e o tempo de percurso do sinal (t). A relação entre o tempo de deslocamento de um sinal e o ângulo de fase deste mesmo sinal é apresentada com base na figura 3 e nas equações que serão desenvolvidas a seguir.

$$y = A \times \text{sen}(\phi) \quad (1)$$

$$y = A \times \text{sen}(\omega t), \quad (2)$$

$$\text{Como } \phi = \omega \times t \quad (3)$$

$$\text{e } \omega = 2\pi \times f. \quad (4)$$

Então a equação (4) é reescrita como:

$$y = A \text{ sen}(2\pi f t). \quad (5)$$

Desse modo, o efeito de uma variação de fase ($\Delta\phi$) é igual a uma variação de tempo (Δt), para o mesmo sinal. Utilizando as equações (1) e (2) estas variações ficam assim expressas:

$$y = A \times \text{sen}[\omega(\Delta t + t)] \quad (6)$$

ou

$$y = A \times \text{sen}(\Delta\phi + \phi), \quad (7)$$

Onde:

Δt = Variação do tempo;

$\Delta\phi$ = Variação de fase.

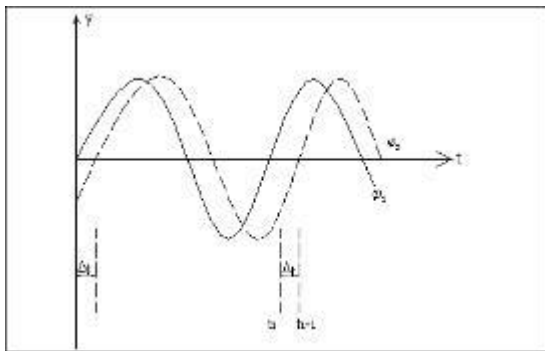


Fig. 3 - Dois sinais senoidais com a mesma amplitude e fases diferentes. Fonte: Adaptado de FAGGION (1999).

Na figura 3 apresenta-se uma variação de tempo Δt , a qual percebe-se que é igual à variação de fase $\Delta\phi$, para uma onda de período T . Esta variação também pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\Delta\phi = \Delta t \times \omega \quad (8)$$

$$\text{ou } \Delta t = \Delta\phi / 2\pi f \quad (9)$$

ainda considerando a figura 3 e admitindo que $i = 1$, a equação (6) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$t_2 - t_1 = (\phi_2 - \phi_1) / 2\pi f \quad (10)$$

Substituindo as equações $C = C_0/n$ e $t_2 - t_1 = (\phi_2 - \phi_1) / 2\pi f$ na equação $2D = c \cdot t$ obtém-se $D = C_0 \cdot (\phi_2 - \phi_1) / 4\pi f$ com a qual se calcula a distância.

4- MÁQUINAS E SENSORES: UMA ANÁLISE DOS EQUIPAMENTOS DE MED DO LABORATÓRIO DE GEODÉSIA DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO (IT/UFRRJ).

A estação total é um instrumento eletrônico utilizado na medida de ângulos e distâncias amplamente usado na área das engenharias para levantamentos planialtimétricos para confecção de plantas e cartas topográficas. A evolução dos instrumentos de medida de ângulos e distâncias trouxe como consequência o surgimento deste novo instrumento, que pode ser explicado como a junção do teodolito eletrônico digital com o distanciômetro eletrônico, montados num só bloco. A estação total é capaz de inclusive armazenar os dados recolhidos e executar alguns cálculos mesmo em

acampo. Com uma estação total é possível determinar ângulos e distâncias do instrumento até pontos a serem examinados. Com o auxílio de trigonometria, os ângulos e distâncias podem ser usados para calcular as coordenadas das posições atuais (X, Y e Z) dos pontos examinados, ou a posição dos instrumentos com relação a pontos conhecidos, em termos absolutos. A informação pode ser enviada do teodolito para um computador e um software aplicativo irá gerar um mapa da área estudada. Algumas estações totais também tem uma interface de GPS que combina essas duas tecnologias para fazer uso das vantagens de ambas (GPS - não necessita que os pontos a serem estudados estejam na linha de visão; Estação Total tradicional - medição de alta precisão especialmente no eixo vertical comparado ao GPS) e reduz as consequências das desvantagens de cada tecnologia (GPS - baixa precisão no eixo vertical e menor precisão sem longos períodos de ocupação; Estação Total - requer observações no campo de visão e deve ser feita sobre um ponto conhecido ou dentro do campo de visão de 2 ou mais pontos conhecidos). A maioria dos instrumentos das Estações Totais medem ângulos através de scanner eletro-óptico de extrema precisão de códigos de barra digitais atados em cilindros ou discos de vidro rotativos dentro do instrumento.

As Estações Totais de melhor qualidade são capazes de medir ângulos abaixo de 0,5". A típica Estação Total EDM pode medir distâncias com precisão de cerca de 0,1 milímetros, mas a maioria das aplicações requer precisão de 1,0 milímetro. Essas estações totais usam um prisma de vidro como refletor para o sinal EDM, e pode medir distâncias de até quilômetros, mas alguns instrumentos não possuem refletores e podem medir distâncias de objetos que estão distintos por cor, limitando-se a poucas centenas de metros. Alguns modelos modernos são robotizados permitindo ao operador controlar a máquina à distância via controle remoto. Isso elimina a necessidade de um assistente a segurar o prisma refletor sobre o ponto a ser estudado. O próprio operador segura o refletor e controla a máquina a partir do ponto observado diminuindo com isso a incidência de erros e aumentando, portanto, a precisão das medidas.

Como referencial empírico dessa pesquisa foram realizados alguns testes de calibração e aferição da precisão (e outros ainda serão realizados) num conjunto de Estações Totais da marca FOIF modelo TS 680 cuja data de fabricação é de 2010 e de Níveis do modelo NI003 pertencentes ao Laboratório de Geodesia e Topografia do departamento de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica do Instituto de Tecnologia Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (IT/UFRRJ). A calibração foi feita através de testes no *software* que cada equipamento possui internamente, aferindo o *laser*, ângulos e eixo central, no caso das estações totais.

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos até o momento são parciais e passíveis de reanálise, mas apontam para um complexo conjunto de causas e efeitos dos erros ocorridos nas medidas eletrônicas de distâncias. Apontam, também, para o fato de que o conhecimento aprofundado dos operadores acerca das *máquinas e dos sensores* com os quais realizam os levantamentos podem minimizar a incidência de erros. No que tange aos testes de calibração feito nos equipamentos selecionados demonstrou-se que é possível resolver alguns problemas de natureza de calibração podem ser resolvidos pelos próprios operadores, porém é necessário conhecimento aprofundado de tais procedimentos. Constatou-se, também, que aferições e calibrações mais complexas devem ser feitas em laboratórios especializados e em consonância com os requisitos normatizados pela NBR ISO/ IEC 17025, de 2005. Como se trata de uma pesquisa em andamento tais ensaios e teste mais complexos ainda serão realizados com os referidos equipamentos de medição eletrônica de distância e de nivelamento. Para tanto, busca-se realizar parceria do IT/UFRRJ com outros institutos de pesquisas e de outras universidades brasileiras, como, por exemplo, a Universidade Federal do Paraná e, também, com empresas especializadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FITZ, Paulo Roberto. Cartografia básica. São Paulo. Oficina de Textos, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Noções básicas de cartografia. Diretoria de Geociências – DGC. Rio de Janeiro. 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Programa CEBERS. Disponível em www.inpe.br. Acessado em 21/08/2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13133: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, 1994. 35p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. O que é Normalização. Disponível em: <> acesso em: 17 nov. 2003.

BARBOSA, L. G. Proposta de unificação do sistema altimétrico da Grande São Paulo. São Paulo, 1996. 107p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. BIBVIRT – Biblioteca virtual do estudante brasileiro. Aula 3 Normalização no Brasil. Disponível em: Acesso em: 20/08/2017.

BRASIL, Ministério do Exército, Estado Maior do Exército, Manual Técnico – Serviço Geográfico. Nivelamento Geométrico. 1975.

_____. Ministério do Planejamento e Orçamento, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Departamento de Geodésia.

DALMOLIN, Q. Ajustamento por mínimos quadrados. Departamento de Geomática-UFPR. Curitiba, 2002.

FAGGION, P.L. Determinação do Fator de Escala em Estações Totais e MED Utilizando Observações de Campo e Laboratório, Curitiba, 1999. 45f. Seminário apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

_____. Obtenção dos Elementos de Calibração e Certificação de Medidores Eletrônicos de Distância em Campo e Laboratório. Curitiba, 2001. 134f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná

GEMAEL, C. Introdução à Geodesia Física. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1981.

_____. Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas. Curitiba: Ed. UFPR, 1984. 319p.

_____. Introdução à Geodésia Geométrica. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1987.