
II – DISTÂNCIAS

Tule César Barcellos

A NBR 13.133/1994, no item 3.12, define *Levantamento Topográfico como sendo o conjunto de métodos e processos que, através de medições de ângulos horizontais e verticais, de distâncias horizontais, verticais e inclinadas, com instrumental adequado à exatidão pretendida ...* Vê-se, então, que, para que possamos atingir os objetivos da Topografia, será necessário ter os conceitos básicos de medição de distâncias e de ângulos.

2.1 - Distância Oblíqua, Horizontal e Esférica

Na mensuração, as medições são realizadas na superfície física da Terra, mas esta não serve como sistema de referência (Datum) para calcular uma posição. Uma alternativa é considerar a superfície de nível, formada pela posição média dos oceanos, assumindo ela livre de todas as forças internas, tais como marés, correntes, ventos. Esta superfície é chamada Geóide e é a superfície equipotencial ao nível médio do mar, onde os instrumentos instalados estão com seu eixo vertical na direção da força da gravidade daquele ponto. Entretanto, o Geóide também é uma superfície irregular, devido a variações na distribuição de massa da Terra, e não pode ser usado para posição e locação matemática de pontos. Na verdade, os pontos levantados na superfície física da Terra são frequentemente reduzidos à sua posição equivalente no Geóide por projeção ao longo dos seus vetores de gravidade, linha de prumo, em um plano ortogonal considerado horizontal (Figura 2.1), de acordo com as alturas medidas acima ou abaixo do Geóide.

Como a maioria dos levantamentos na engenharia são realizados em áreas de extensões reduzidas, a superfície de referência pode ser um plano tangente ao Geóide ou paralelo a este, ou seja, horizontal. Em outras palavras, a curvatura da Terra é ignorada e todos os pontos na superfície física são ortogonalmente projetados em um plano horizontal, como ilustrado na Figura 2.1.

De acordo com a NBR 13133/94, o plano horizontal local é normal à vertical do ponto da superfície terrestre, considerado como de origem do levantamento, sendo seu referencial altimétrico referido ao datum vertical brasileiro. A importância do referencial altimétrico está na necessidade de reduções das distâncias obtidas na superfície terrestre em uma outra superfície.

Os levantamentos topográficos planimétricos, como mencionado anteriormente, têm por objetivo determinar as posições relativas dos pontos que fazem parte da área levantada a um plano horizontal local. Esta representação no plano horizontal de projeção dá-se mediante o cálculo das coordenadas absolutas x e y e posterior representação.

Seja qual for o sistema de coordenadas adotado para o levantamento (polares ou retangulares), sempre haverá necessidade de determinar distâncias entre pontos, sendo, portanto, necessário estudar métodos e instrumentos que permitam obter essas dimensões lineares.

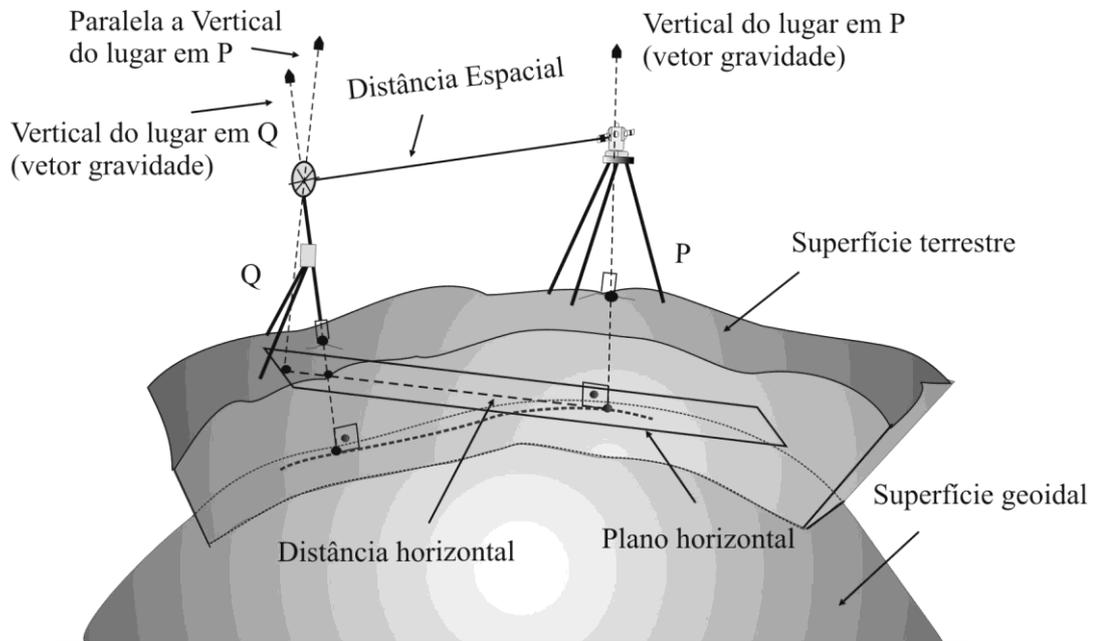


Figura 2.1 - Representação do levantamento na superfície terrestre e plano de referência.

O primeiro conceito que surge ao falar de distância entre pontos é o Alinhamento.

O alinhamento entre dois pontos P e Q é a linha que resulta da interseção do terreno com o plano vertical normal, definido pelas retas verticais que passam por P e Q (Figura 2.2).

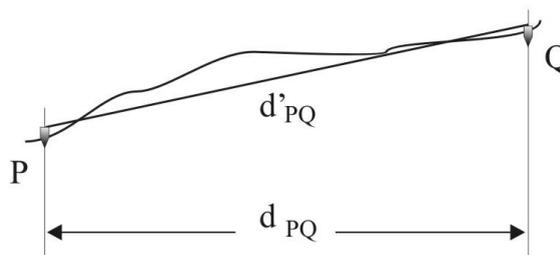


Figura 2.2 - Distância inclinada e horizontal

Assim, pode-se ver que há três distâncias que caracterizam o afastamento entre os pontos P e Q . A primeira corresponde à superfície física da Terra (aquela em que se percorre se fosse a pé de P a Q). A segunda é a distância oblíqua D' entre P e Q ; e a terceira, que interessa particularmente à Topografia para a representação gráfica e para o cálculo que é a distância D entre as projeções dos pontos sobre o plano, denominada distância horizontal PQ (ou QP).

Daqui para frente, quando se fala em distância entre dois pontos, estar-se-à fazendo menção implícita à distância plana (ou horizontal) entre os mesmos.

A situação representada pela Figura 2.2 é válida para pontos suficientemente próximos. A NBR 13.133/94 (Execução de Levantamentos Topográficos) prescreve uma dimensão máxima de 80 km a partir da origem para o plano topográfico local, de maneira a manter os erros relativos, decorrentes da desconsideração da curvatura da Terra, menor que 1/35.000 nessa mesma dimensão.

Sendo a forma da terra curva, adotando uma esfera como superfície de referência (s_0), haverá duas superfícies concêntricas sobre as quais podem ser determinadas as distâncias entre P e Q (s_p e s_q respectivamente), Figura 2.3.

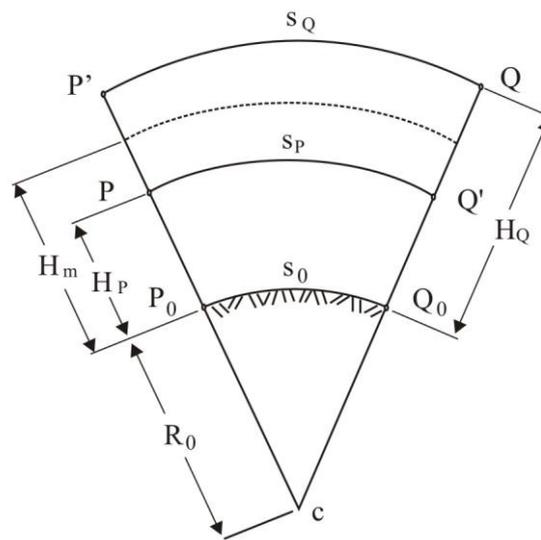


Figura 2.3 - Distância esférica

Da Figura 2.3, podemos deduzir que:

$$\frac{s_0}{R_0} = \frac{s_p}{R_0 + H_p} = \frac{s_q}{R_0 + H_q} \quad [2.1]$$

Para um ponto situado numa altura H qualquer, resulta:

$$s_H = \frac{R_0 + H}{R_0} \cdot s_0 \quad [2.2]$$

Segundo SILVA et al. (1999), para cálculos práticos pode-se operar com valores em ppm (partes por milhão), adotando a altitude média para a região de cálculo. Tem-se assim que a redução e o comprimento do arco ao nível do mar podem ser dados, partindo das equações anteriores, pelas fórmulas [2.3] e [2.4]:

$$\text{Red} = -\frac{H}{R_0 + H} \cdot 10^6 \text{ ppm} \quad [2.3]$$

$$s_0 = s - s \cdot \text{Red} \quad [2.4]$$

Para verificar o acréscimo da distância ao nível do mar em uma altitude qualquer, pode-se utilizar a equação 2.2. A Tabela 2.1 apresenta a variação das distâncias, em relação à variação das altitudes, para diversos valores de H , considerando o raio da Terra $R_0 = 6378,8 \text{ km}$.

Tabela 2.1 - Variação na distância nas diferentes alturas

H (m)	Variação (m)			
	1000	2000	5000	10000
5000	0,78	1,57	3,92	7,84
2000	0,31	0,63	1,57	3,14
1000	0,16	0,31	0,78	1,57
500	0,08	0,16	0,39	0,78
0	0,00	0,00	0,00	0,00

A Tabela 2.1 mostra que à medida que a altitude dos pontos considerados aumenta, a distância esférica entre eles também aumenta, a qual também fica evidente na Figura 2.3.

2.2 - Relação entre distâncias e limitações da Topografia

De acordo com a definição, a Topografia tem como objetivo representar a superfície física da Terra e todos os detalhes existentes, adotando um plano como referência. Conhecendo a forma real da Terra, cabe a pergunta: qual é a extensão máxima dos levantamentos topográficos, de maneira tal que não sejam significativas as diferenças entre a superfície curva da Terra e o plano de referência utilizado para a projeção?

Para elucidar esta questão, é necessário analisar a situação representada pela Figura 2.4, na qual estão representados os pontos p e q pertencentes à superfície terrestre e suas respectivas projeções ortogonais sobre o plano horizontal, P e Q , além da projeção cônica de Q (Q') que passa por P .

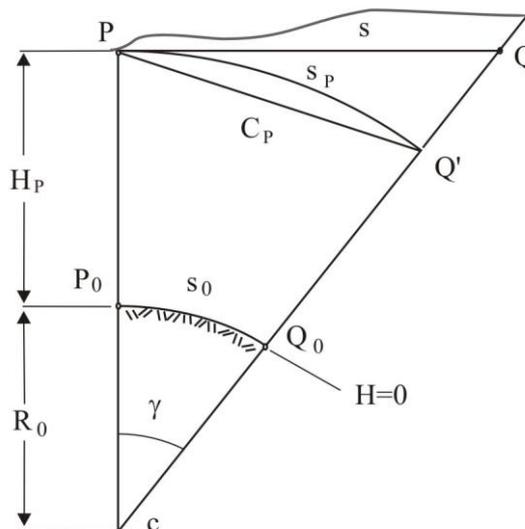


Figura 2.4 - Relacionamento entre arco (distâncias esférica), tangente (distância horizontal) e corda

Considerando a superfície terrestre como esférica, as equações podem ser escritas como a seguir, segundo SILVA (1999):

$$\text{arco } PQ': \quad s_p = (R_0 + H_p) \cdot \gamma \quad (\gamma \text{ em radianos}) \quad [2.5]$$

$$\text{corda } PQ': \quad c_p = 2(R_0 + H_p) \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad [2.6]$$

$$\text{tangente } PQ: \quad s = (R_0 + H_p) \cdot \text{tag}(\gamma) \quad [2.7]$$

Considerando o raio terrestre $R_0 = 6378,8 \text{ km}$ e utilizando as equações anteriores, a diferença entre a corda e o arco e a diferença entre a tangente e o arco em um alinhamento nas diversas alturas são demonstrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Diferença entre corda e arco e diferença entre tangente e arco em um alinhamento

s_p (m)	$c_p - s_p$ (m)	$s - s_p$ (m)
1000	-0,002	0,008
2000	-0,009	0,06
5000	-0,01	1,00
10000	-1,03	8,20

Verifica-se que até 10 Km de afastamento entre os pontos topográficos extremos a diferença é negligenciável. Assim, pode-se afirmar que é lícito considerar como plana a superfície terrestre até aproximadamente 20 Km. A Figura 2.5 mostra de forma clara as distorções que podem ocorrer entre as distâncias nas diferentes superfícies. Nos alinhamentos P-A e B-Q, maiores distorções do que no alinhamento A-B, dado a posição do plano horizontal adotado.

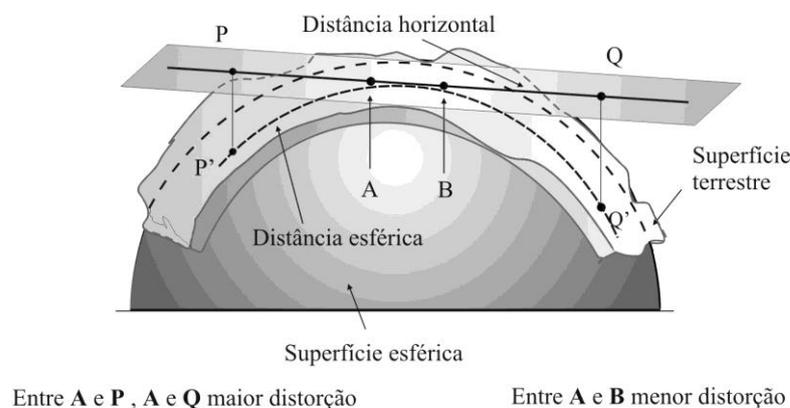


Figura 2.5 - Relacionamento entre plano horizontal e esférico

Adaptado de MAIA, 2001.

À mesma conclusão se chega efetuando uma análise com relação à escala de representação (veja LOCH & CORDINI, 1995).

2.3 - Métodos de obtenção das distâncias

Atualmente, existem várias alternativas que permitem determinar distâncias entre pontos. De acordo com o instrumental utilizado e o método aplicado, diz-se que a medição de distâncias é direta, indireta ou eletrônica.

2.3.1 - Medição direta de distâncias

A medição direta de distâncias se dá mediante a comparação do comprimento do alinhamento com uma medida-padrão conhecida, geralmente uma trena. As trenas de uso freqüente na Topografia possuem comprimentos de 20 m a 50 m e podem ser de fibra de vidro, aço carbono comum, aço inox ou aço invar. As precisões e erros admissíveis para levantamentos com trena são encontrados em JORDAN (1944).

Normalmente, as distâncias a serem medidas variam de metros até quilômetros, o que implica a necessidade de efetuar várias trenadas para percorrer todo o alinhamento. Para ter certeza de que se está medindo sobre a linha que une os pontos inicial e final, é necessário materializar esse alinhamento mediante instrumentos auxiliares como balizas e fichas (Figura 2.6).

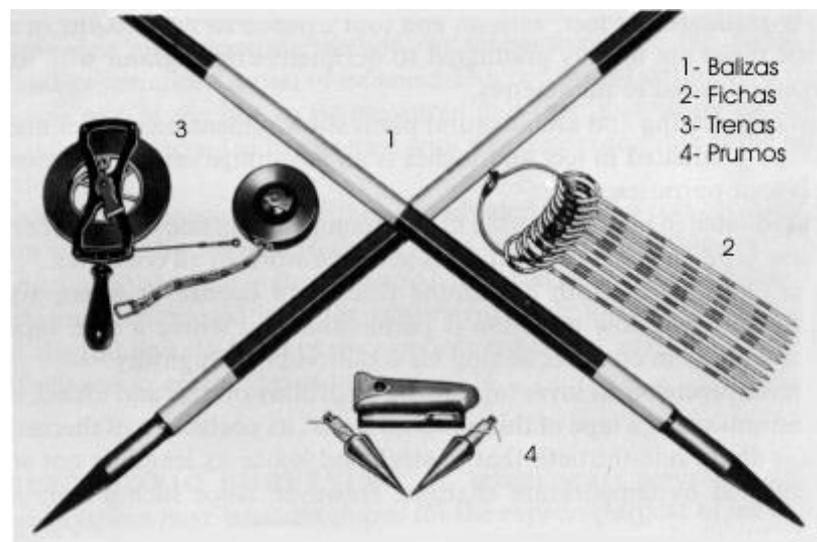


Figura 2.6 - Equipamentos de medição direta

A Figura 2.7 mostra o alinhamento PQ , cujo extremos foram materializados por piquetes. Para materializar as verticais que passam pelos pontos extremos utilizam-se as balizas, que é uma haste reta cilíndrica de metal de comprimento variável, com ponta aguda, para que possa ser cravada no solo ou para centrar no alvo com maior precisão. Para os pontos intermediários, no caso de alinhamentos maiores do que o comprimento da trena, utilizam-se também as balizas orientando-as a olho (ou a teodolito), tomando a direção das duas balizas extremas, colocando as demais no mesmo alinhamento e junto à medida desejada na

trena (geralmente valores de comprimento nominal da trena: 20 m, 30m ou 50m). A operação de medida do alinhamento PQ é descrita iniciando na condição a) seguindo até a condição e) da Figura 2.7.

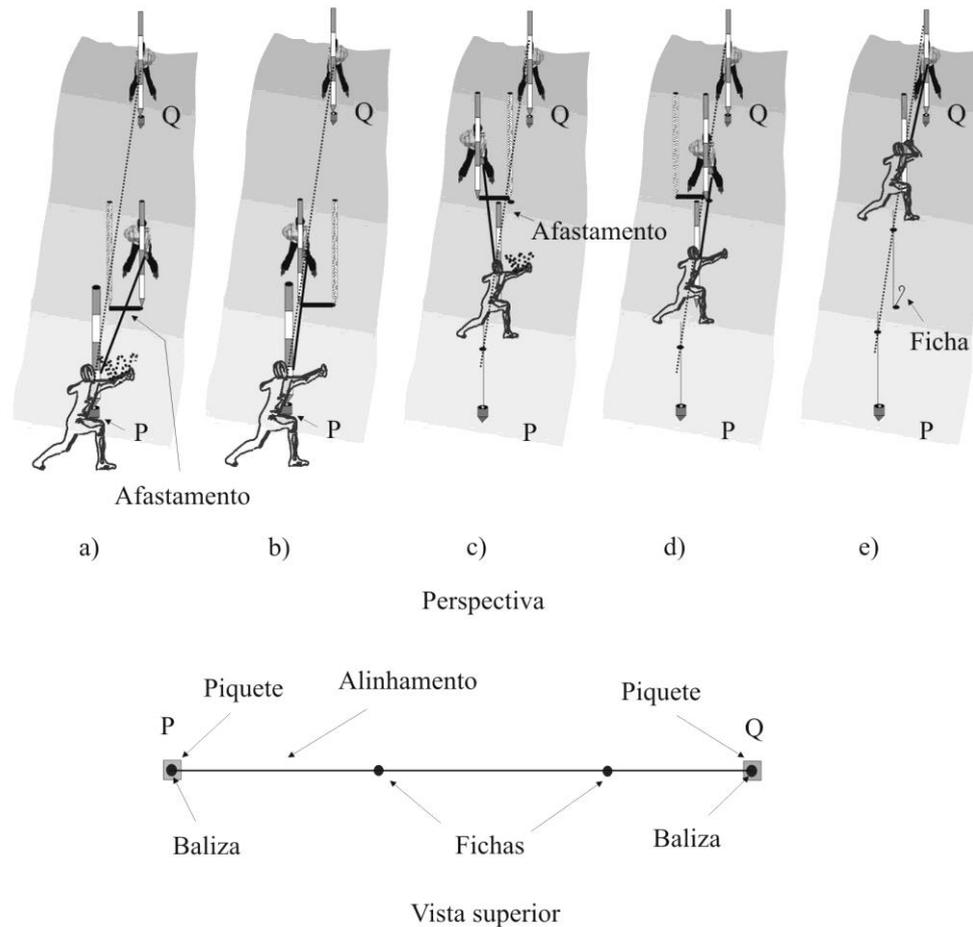


Figura 2.7 - Alinhamento visual das balizas

Para evitar erros grosseiros na contagem das trenadas, utilizam-se as fichas (Figura 2.6), que são hastes de ferro de 5 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento aproximadamente e que no extremo superior apresentam um anel que facilita o transporte, cravadas junto à baliza no ponto onde se efetuou a medida com trena. Um jogo de fichas composto de algumas unidades permite controlar perfeitamente o levantamento, pois ao término das mesmas percorre-se uma distância igual ao número de fichas vezes o comprimento da trena. No caso de alinhamentos diferentes dos múltiplos do comprimento da trena, soma-se ainda a parte residual dada pela última medida.

Esse prolongamento visual do alinhamento e as sucessivas trenadas acarretam erros que influenciam na medição e que, portanto, devem ser minimizados. Por mais cuidado que se tenha, nem sempre o ponto sobre o qual é colocada a baliza está no alinhamento, medindo-se uma distância d_1 entre o ponto ré e o ponto vante, em vez da distância d , que seria correta (Figura 2.8). Neste caso, acontece um desvio horizontal do alinhamento.

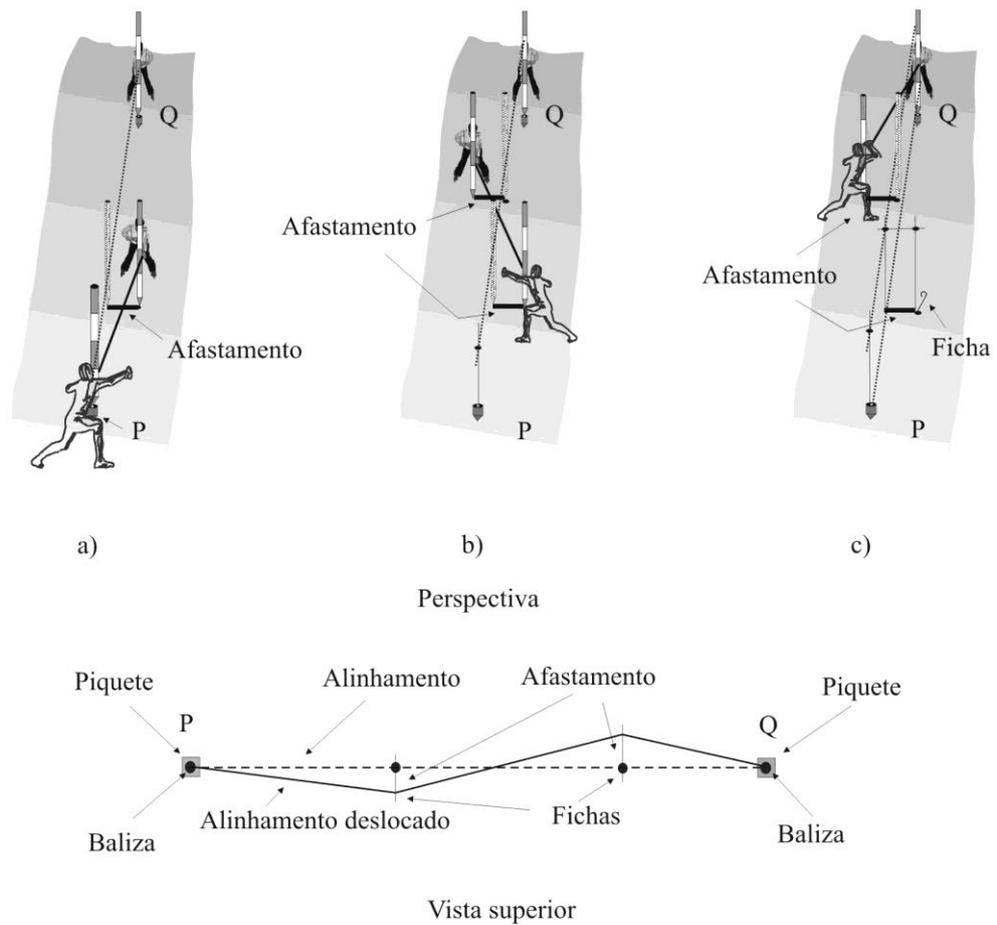


Figura 2.8 - Erro de desvio horizontal da trena

Se o terreno for irregular (o qual ocorre na ampla maioria dos casos), será necessário efetuar as medições escalonadas, de forma a obter a distância horizontal entre os pontos topográficos. Um dos erros que se produz neste caso é o desvio vertical da trena, medindo-se d_2 em vez de d . É importante notar que, como no caso do desvio horizontal, o desvio vertical também pode ser em qualquer sentido, implicando, porém, um erro na distância, de forma a mantê-la sempre maior do que a real (Figura 2.9).

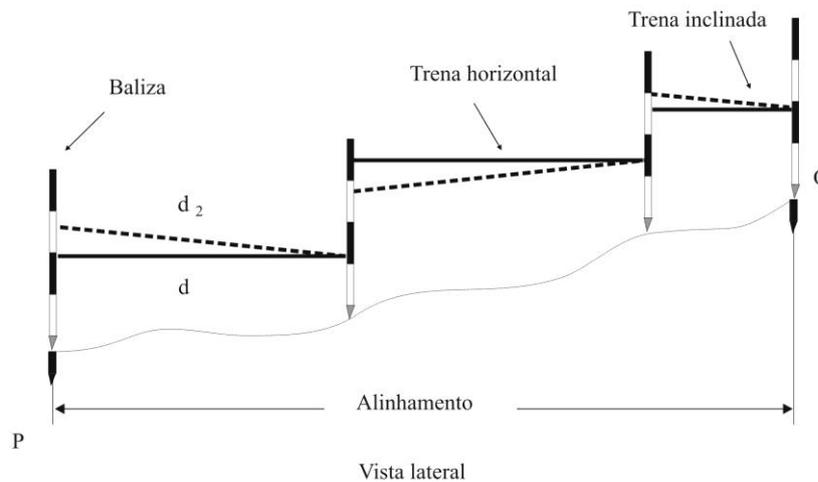


Figura 2.9 - Erro de desvio vertical da trena

Outro cuidado a tomar na medição de distâncias com uso de balizas é a manutenção da verticalidade das mesmas no ato da medição, pois, não sendo assim, a distância medida d_3 pode ser maior ou menor do que a distância d , dependendo da inclinação em cada uma das balizas (Figura 2.10).

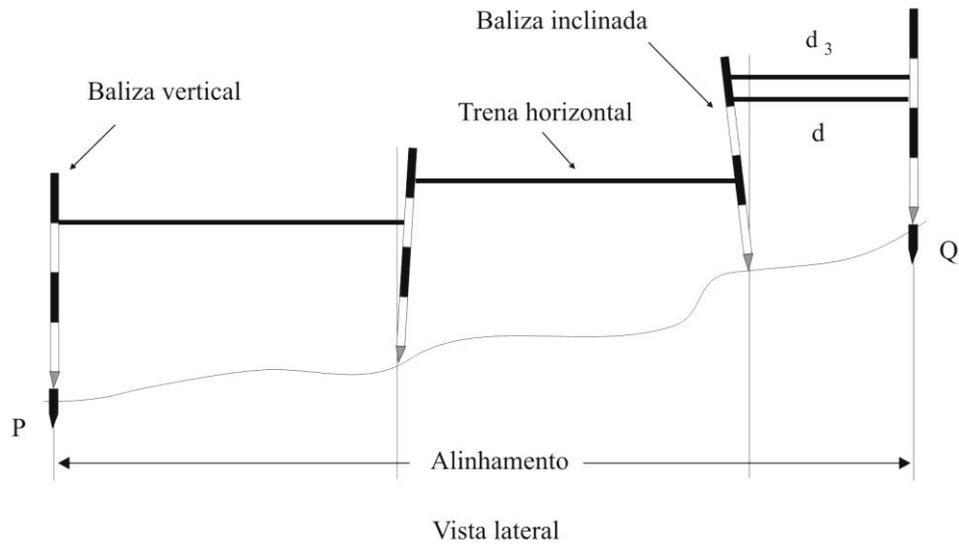


Figura 2.10 - Deslocamento da linha vertical da baliza

Ainda no sentido vertical, o próprio peso da trena descreve uma curva, provocando o erro de catenária ao medir d_4 em vez de d (Figura 2.11).

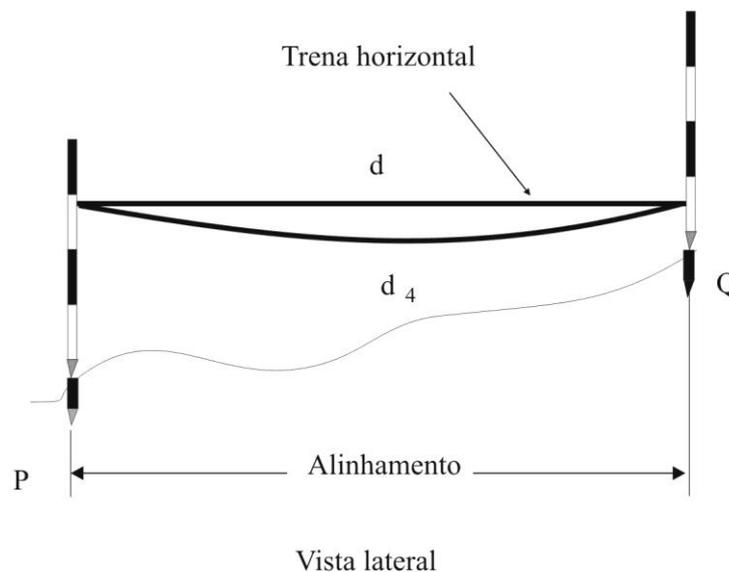


Figura 2.11 - Erro de catenária

A força aplicada para esticar a trena (e diminuir o efeito da catenária) ocasiona uma deformação da mesma, a qual se traduz em um erro de tensão, e deve ser levado em conta nos levantamentos de precisão.

As trenas saem da fábrica calibradas para uma determinada variação de temperatura; se o levantamento for realizado fora desses padrões, ocorrerá o erro de temperatura.

Em terrenos acidentados, a medida direta das distâncias oferece dificuldades e exige inúmeras precauções, tornando a tarefa incômoda, demorada e principalmente eivada de erros.

2.3.2 - Medição indireta de distâncias com instrumentos ópticos mecânicos

Os instrumentos de medição indireta de distância se dividem em três grupos: óticos, mecânicos e eletrônicos.

Os medidores de distância indireta óticos e mecânicos são denominados taquímetros ou taqueômetros, enquanto os medidores de distância indireta eletrônicos são denominados de distanciômetros. Dentro deste grupo, o método mais utilizado é o estadimétrico.

A estadimetria tem como objetivo a medida indireta de distâncias com o uso de instrumentos óticos convencionais (teodolitos óticos mecânicos e níveis).

Rapidez e exatidão são as grandes vantagens que os levantamentos taqueométricos apresentam em relação aos processos de medição direta de distância, visto que todas as medidas são realizadas pelo próprio operador do instrumento. Por outro lado, o operador é dependente de um auxiliar treinado no uso e instalação da estádia, denominada também de mira ou régua. Este, por sua vez, tem que instalar a mira corretamente sobre o ponto, mantê-la sempre na vertical e sem movimentos durante a leitura dos fios estadimétricos. Este método se baseia no princípio estadimétrico apresentado na Figura 2.13.

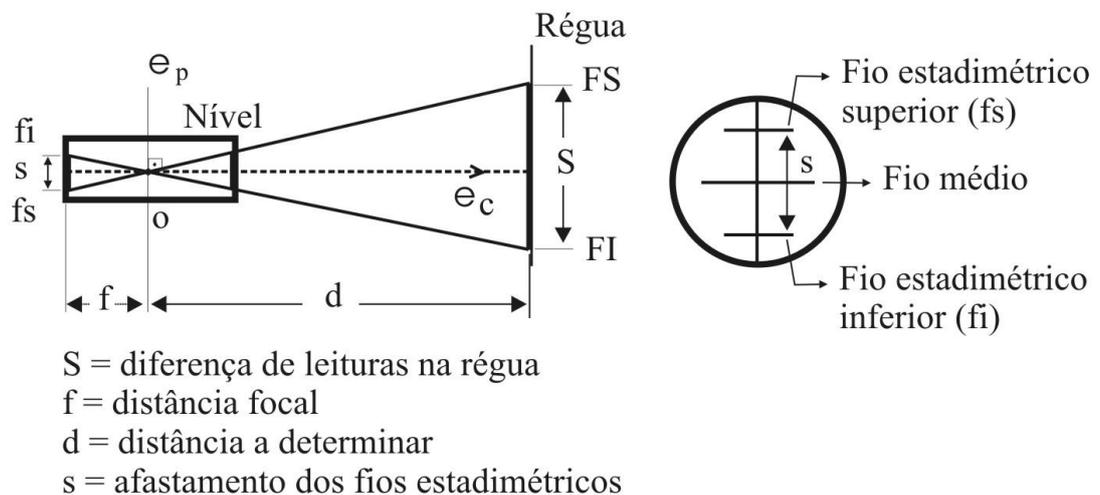


Figura 2.13

Adaptado de ESPARTEL, 1960.

Da relação dos triângulos semelhantes $fiOfs$ e $FI O FS$ resulta:

$$\frac{s}{f} = \frac{S}{d} \rightarrow d = \frac{f}{s} S \quad [2.8]$$

Para facilitar os cálculos topográficos, o fabricante do instrumento faz com que a relação entre a distância focal (f) da ocular e o afastamento dos fios do retículo (s) seja:

$$\frac{f}{s} = 100 \quad [2.9]$$

Finalmente:

$$S = (FS - FI) \quad [2.10]$$

substituindo vem:

$$d = (FS - FI) \cdot 100 \quad [2.11]$$

Para determinar as leituras FI e FS , utiliza-se uma régua centimetrada normalmente de 3 ou 4 m de comprimento, na qual os metros, decímetros e centímetros são lidos de forma direta e estimando-se os milímetros, tal como mostra a Figura 2.14.

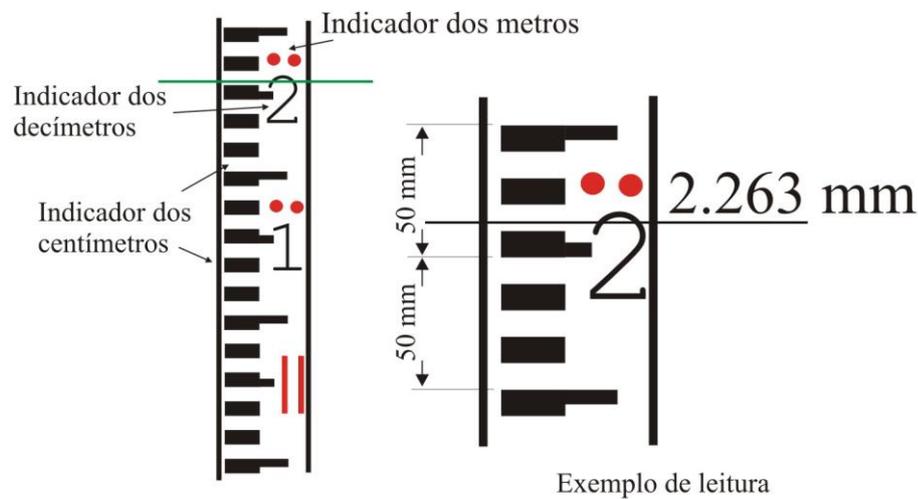


Figura 2.14 - Sistema de leitura na mira

No caso de efetuar a medição da distância entre dois pontos topográficos utilizando uma visada inclinada, a fórmula deve ser modificada em função do ângulo vertical. A situação de campo está representada na Figura 2.15, sem levar em conta a refração do ar, a qual mostra a disposição dos instrumentos utilizados para a medição.

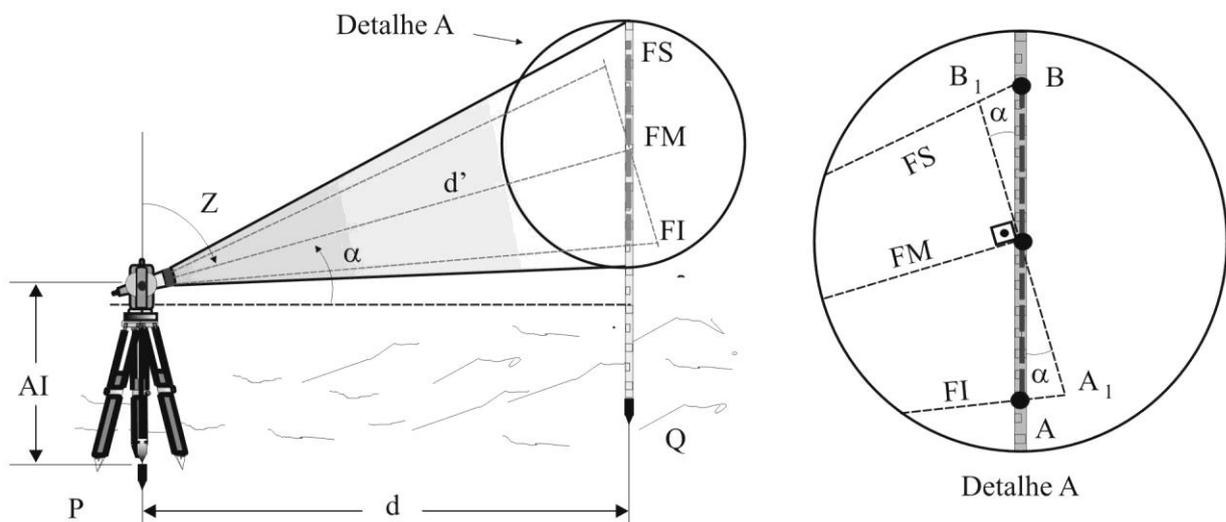


Figura 2.15 - Leitura inclinada da mira

Usando a equação (2.11), a distância d' é como a seguir:

$$d' = A_1 B_1 \cdot 100 \quad [2.12]$$

Da figura 2.15 tem-se:

$$A_1 B_1 = (FS - FI) \cdot \cos \alpha \quad [2.13]$$

$$d = d' \cdot \cos \alpha \quad (2.14)$$

Então, a distância entre o ponto estação e o ponto visado é:

$$d = 100 \cdot (FS - FI) \cdot \cos^2 \alpha \quad [2.15]$$

Se, em vez de medir o ângulo de altura (de inclinação), for medido o ângulo zenital, a fórmula resulta:

$$d = 100 \cdot (FS - FI) \cdot \text{sen}^2 z \quad [2.16]$$

Para levantamentos que exijam maior precisão, com uso de teodolitos e trena, pode-se medir a distância inclinada d' reduzindo-a em distância horizontal d a partir do ângulo vertical Z lido (Figura 2.12).

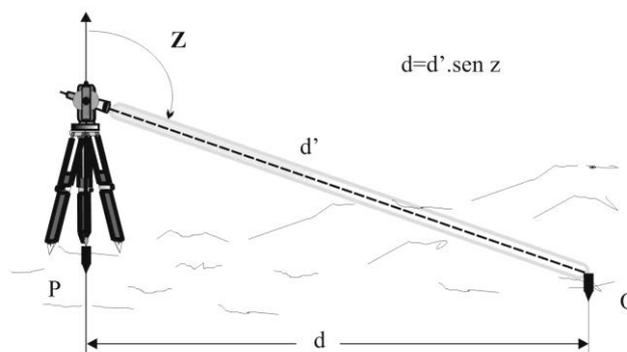


Figura 2.12 - Visada inclinada com uso do teodolito e trena

Nas medições de poligonais topográficas de precisão (destinadas a projetos de loteamentos, entre outros) com estaqueamento prévio, reduzindo ao horizonte a distância inclinada com o ângulo vertical determinado por teodolito, com medidas a ré e a vante e adotando o valor médio, pode-se chegar a uma precisão de 1:5.000 a 1:10.000 (Schofield, 1993).

A precisão conseguida nas melhores condições técnicas realizando as devidas correções se pode chegar a 1:50.000 com trena de aço (Schofield, 1993), o que é suficiente até para medidas de bases topográficas e montagem industrial.

Nem sempre é simples ou possível medir a distância inclinada d' por isso foi criado um instrumento que permite determinar essa dimensão sem utilizar a trena e será descrito no item 2.3.3.

2.3.3 - Medição eletrônica de distância

Embasados na teoria eletromagnética, surgiram os Medidores Eletrônicos de Distâncias (MED), instrumentos que permitem medir distâncias utilizando como unidade básica de medida a metade do comprimento de uma onda utilizada como portadora. Como os instrumentos eletrônicos utilizam uma variedade de comprimentos de onda, a maneira de propagação difere entre si. Na Tabela 2.3, apresenta-se a classificação das ondas eletromagnéticas de acordo com suas frequências.

Tabela 2.3 - Espectro de frequências das ondas eletromagnéticas

Espectro de frequência das ondas eletromagnéticas			
Frequência (Hz)	Comprimento de Onda (λ)	Faixa	Utilização
30	10.000 km	VLF Very Low Frequency	
300	1.000 km		
3 k	100 km		
30 k	10 km		
300 k	1 km	LF Low Frequency	Rádio
3 M	100 m	MF Mean Frequency	Rádio e Televisão
30 M	10 m	HF High Frequency	Microondas
300 M	1 m	VHF Very High Frequency	
3 G	10 cm	UHF Ultra High Frequency	
30 G	1 cm	SHF Super High Frequency	
300 G	1 mm	EHF Extremely High Frequency	
3 T	100 μ	Infravermelho Luz Ultravioleta	
30 T	10 μ		
300 T	1 μ		
$3 \cdot 10^{15}$	$1.000 \overset{\circ}{\text{Å}}$	Raios X e Raios γ	
$3 \cdot 10^{16}$	$100 \overset{\circ}{\text{Å}}$		
$3 \cdot 10^{21}$	1 χ		

Adaptada de DOUBEK, 1974.

No vácuo, todas as ondas eletromagnéticas propagam-se na mesma velocidade. Esta velocidade, em alguns casos denominada celeridade (c), é uma constante da física e foi objeto de estudo em inúmeras experiências. A primeira determinação do valor de c foi feita pelo astrônomo Roemer em 1676, sendo seguida por muitas outras, como indicado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Valores determinados para a celeridade

ANO	OBSERVADOR	MÉTODO	VELOCIDADE (km/s)	PRECISÃO (km/s)
1676	Roemer	Astronômico	214.300	
1725	Bradley	Astronômico	295.000	± 5000
1849	Fizeau	Roda dentada	305.300	± 500
1862	Foucault	Espelho rotativo	298.600	± 500
1882	Michelson	Espelho rotativo	299.910	± 50
1950	Bergstrand	Célula de Kerr	299.793	± 2
1958	Froome	Interferometria	299.792,5	$\pm 0,1$

Adaptada de DOUBEK, 1974.

Segundo as pesquisas mais recentes, $c = 299.792,457 \text{ km/s}$ com uma incerteza da ordem de ± 2 a 3 m/s , ou seja, com um erro relativo da ordem de 1.10^{-8} . Na atmosfera terrestre, a velocidade de propagação das ondas é diminuída, e devido às implicações que isso traz na mensuração, será tratada em capítulo específico.

Os MED utilizam as ondas de alta frequência e com sinal direto para a determinação da distância. Sendo assim, esses equipamentos estão limitados a 100 km de alcance, de acordo com o comprimento de onda utilizado (normalmente microondas), e podem cair diante do relevo existente na direção do ponto de visada.

Como se trata de medições eletrônicas baseadas em ondas eletromagnéticas e estas se propagam no vácuo, a velocidade da luz a distância é dada pela medida do tempo que uma onda eletromagnética leva para percorrer duas vezes a distância a determinar (Figura 2.16).

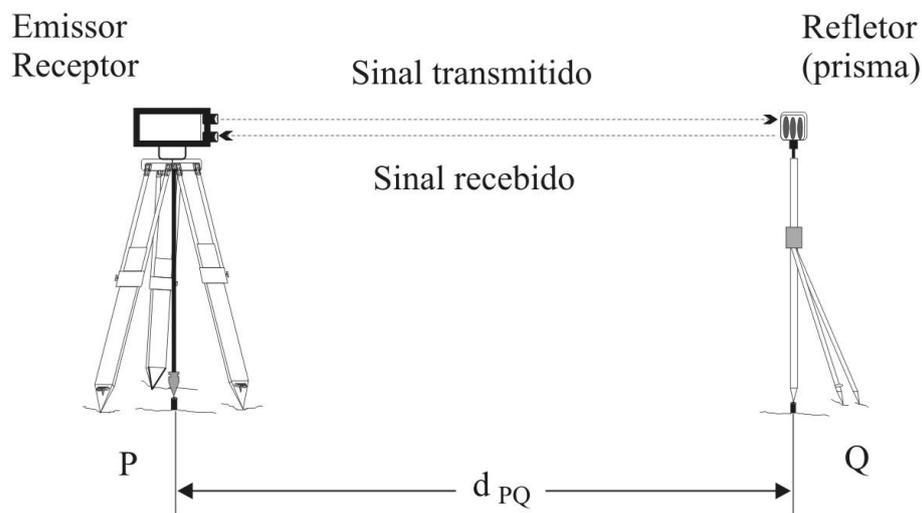


Figura 2.16 - Transmissão e recepção de sinal eletromagnético

Um emissor estacionado em P envia uma onda eletromagnética em direção ao refletor instalado em Q , o qual reflete e devolve a onda para ser captada pelo emissor em P . Assim, se a velocidade v de propagação da onda eletromagnética for conhecida e o tempo de propagação t for medido, a distância d pode ser calculada pela equação 2.17.

$$d = \frac{t \cdot v}{2} \quad [2.17]$$

Entretanto, ocorre que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética é igual a aproximadamente 300.000 km/s , e um erro de ± 1 nanossegundo (10^{-9}s) sobre o tempo de propagação da onda acarreta um erro de 15 cm na medida da distância. Portanto, esse princípio de medição do tempo não pode por isso ser aplicado dessa forma simples para a mensuração.

Para a medida de distâncias em mensuração, utiliza-se o método de comparações de fase ou a medida da defasagem entre a onda emitida e a onda de retorno. Dessa maneira, uma onda eletromagnética de alta

freqüência, denominada onda portadora, é modulada em amplitude com um sinal de comprimento de onda muito maior e emitida de maneira contínua. Modular uma onda significa modificar a amplitude, a freqüência ou a fase de uma onda de alta freqüência em função do sinal de baixa freqüência de uma onda auxiliar. Estes princípios serão melhor detalhados no item 2.3.3.1 *Princípios e métodos de medições com Ondas Eletromagnéticas*.

Entre a celeridade (c), o comprimento (λ) e a freqüência (f) de uma onda existem as seguintes relações:

$$c = \lambda \cdot f \quad [2.18]$$

Para que o comprimento do sinal tenha um valor inteiro e prático para a medição de distâncias, é necessário modular a portadora com uma freqüência de 14,985 MHz, para que seja $\lambda = 20 \text{ m}$.

Para simplificar a apresentação, os valores adotados serão aproximados e valem:

$$c = v = 300.000 \text{ km/s}$$

índice de refração atmosférica = 1, o que dá: $f = 15 \text{ MHz}$ para $\lambda = 20 \text{ m}$

2.3.3.1 - Princípios e métodos de medições com Ondas Eletromagnéticas

Atualmente, existe uma grande variedade de instrumentos MED disponíveis no mercado e há basicamente dois métodos de medição de comprimento de ondas: método do pulso e método de diferença de fase; este último é considerado o mais popular (SCHOFIELD, 1993).

No denominado método do pulso, um curto e intenso pulso de radiação é emitido pelo transmissor ao refletor, que reflete o sinal de volta, em um caminho paralelo, até o receptor (Figura 2.17). A distância é calculada pela velocidade do sinal multiplicado pelo tempo que este fez para completar o percurso.

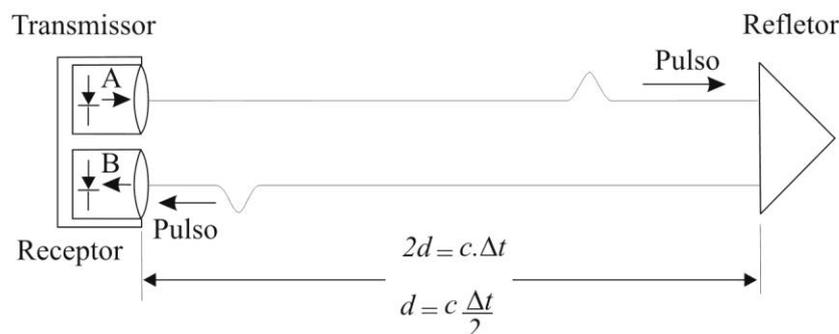


Figura 2.17 - Princípio da técnica do contador de pulso (Timed-pulse) para medidor de distâncias

Fonte: SCHOFIELD, 1993.

Pode-se deduzir que:

$$2d = c \cdot \Delta t \quad [2.19]$$

$$d = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad [2.20]$$

Sendo:

- t tempo de propagação da onda entre o transmissor e o refletor, considerando o caminho de ida e volta do sinal;
- c velocidade da luz no meio em que se propaga;
- d distância entre o instrumento e o alvo.

Esta técnica surgiu em instrumentos hidrográficos, usando microondas. Mas, com o passar dos anos, tornou-se disponível para os sistemas que utilizam sistemas laser de propagação de ondas eletromagnéticas.

A determinação da distância pelo Método da Diferença de Fase é aplicada na maioria dos instrumentos que usam infravermelho, luz visível ou microondas. A diferença de fase entre os sinais transmitidos e recebidos pelo MED é uma parte fracional do comprimento total da onda modulada, e portanto esse valor é menor que o comprimento da onda. Os instrumentos eletrônicos possuem, além dos dispositivos para emissão e recepção das ondas eletromagnéticas, um dispositivo para medir a diferença de fase entre as mesmas. A comparação da fase entre os dois sinais é difícil de ser realizada quando as frequências dos sinais são da ordem de algumas dezenas de MHz (ruído eletrônico, refração do ar). Assim, para evitar esse problema e aumentar a precisão, antes da medição da fase, transformam-se os sinais de modulação para uma frequência muito mais baixa (entre 1,5 e 150 KHz), porém sem mudar a fase.

Seja, por exemplo, um aparelho cuja frequência de medida fina é de 15 MHz. Se a frequência para a medida de defasagem for reduzida a 1,5 KHz pelo processo de mistura de frequências e o contador a impulsos trabalhar também a uma frequência de 15 MHz, ter-se-ão 10.000 impulsos para uma unidade de medida (diferença de fase igual a 2π). Contudo, o valor de 20 m é equivalente a duas vezes o comprimento da distância (ida e volta do sinal), porém todos os instrumentos têm medida efetiva de meio comprimento de onda (PRICE & UREN, 1989). Assim, um pulso contado seria equivalente a 1 mm. Nestas condições, a resolução desse instrumento será de 1 mm, pois uma medida efetiva correspondente a 10 m ($\lambda/2$), representada por um pulso, é, portanto, discriminada por 10.000 impulsos, correspondendo a 1 mm.

A Figura 2.18 representa graficamente a medida da distância PQ .

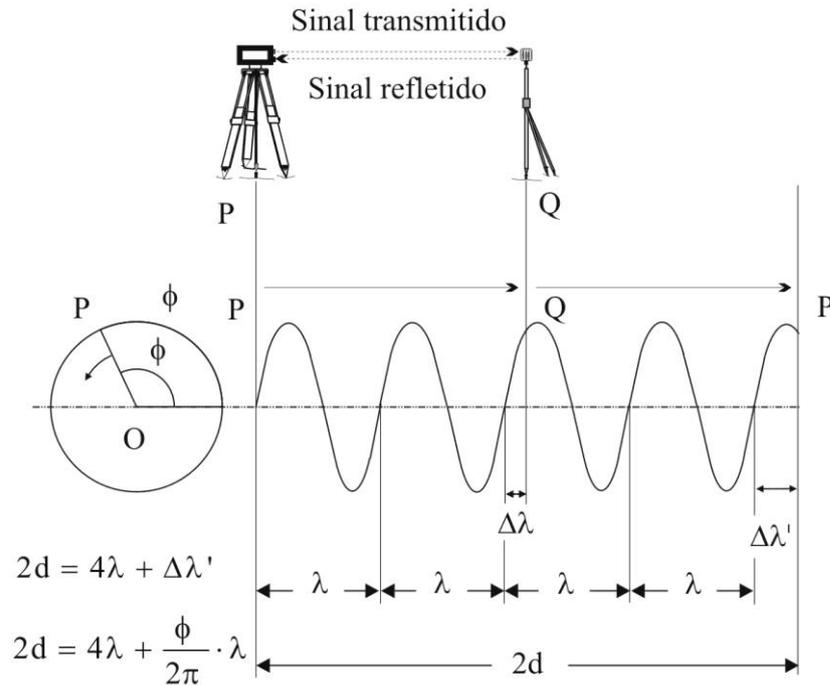


Figura 2.18 - Determinação de distâncias usando MED, por caminho duplo, método da diferença de fase Adaptado de KENNIE et al., 1993.

$$d = M\lambda + \Delta\lambda \quad [2.21]$$

Sendo:

M é o número inteiro de comprimento de onda (neste caso igual a 2);

$\Delta\lambda$ é a parte fracional do comprimento de onda.

Como o sinal é refletido de volta ao instrumento (transmissor), a distância entre os pontos é dada por:

$$2d = N\lambda + \Delta\lambda' \quad [2.22]$$

Sendo:

N é o número inteiro de revoluções do vetor OA (4 neste caso);

$\Delta\lambda'$ é a parte fracional dada pelo ângulo de fase.

Na Figura 2.18, tem-se que $\Delta\lambda' = \frac{\phi}{2\pi} \cdot \lambda$; substituindo esta expressão em [2.22], obtém-se:

$$2d = N\lambda + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \lambda \quad [2.23]$$

$$d = N \frac{\lambda}{2} + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad [2.24]$$

A diferença de fase $\Delta\lambda$ pode ser medida por métodos analógicos ou digitais. A Figura 2.19 ilustra a medida digital de diferença de fase $\Delta\lambda$.

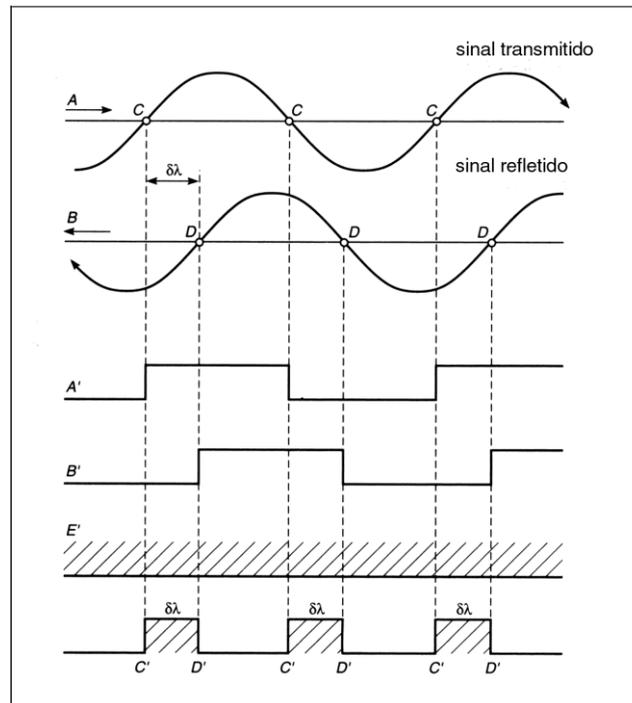


Figura 2.19 - Esquema de um medidor digital de fase
Fonte: SCHOFIELD, 1993.

Para resolver a ambigüidade N , pode-se utilizar um comprimento de onda maior do que duas vezes a distância, tornando N igual a zero, e medir apenas a diferença de fase ou introduzir método de determinar N , variando a frequência com valores pequenos, de forma a manter o valor de N constante na equação 2.24 para cada uma das frequências utilizadas. Exemplos são demonstrados no item 2.3.3.2 *Ondas Portadoras Utilizadas*. De acordo com o exposto, pode-se idealizar uma equação que descreve a situação de maneira mais adequada.

$$d = N \frac{C}{2fn_a} + \left[\frac{\phi}{2\pi} \times \frac{C}{2fn_a} \right] + k_2 + k_3 \quad [2.25]$$

Sendo:

- C é a velocidade do sinal eletromagnético (EM) no vácuo;
- f é a frequência modulada (assumida sem erros);
- n_a é o índice de refração da atmosfera;
- k_2 é o erro de zero do instrumento, ou constante aditiva;
- k_3 é o erro cíclico do instrumento.

Os erros do instrumento mencionados nas equações anteriores serão melhor detalhados no item 2.3.4 *Erros Sistemáticos em Medições com MED*.

2.3.3.2 - Ondas Portadoras Utilizadas

Dependendo da frequência da onda portadora, podemos ter um maior ou menor alcance e, paralelamente, limitações de precisão das medidas. As frequências podem ser agrupadas em três classes, que dão origem a três tipos de equipamentos:

- a) Microondas, com comprimento de onda $1 < \lambda < 10$ cm;

- b) Luz visível, com comprimento de onda médio de $0,5 \mu\text{m}$;
- c) Infravermelho, com comprimento de onda entre $0,72 < \lambda < 0,94 \mu\text{m}$.

Os equipamentos descritos nos itens b e c estão inclusos no LASER (*Light Amplification by Stimulation Emission of Radiation*), que, segundo PRICE & UREN (1989), se estende do infravermelho, passando pela luz visível, até a região do ultravioleta.

Ainda existe a possibilidade do uso de ondas de rádio com comprimento entre $150 \text{ m} < \lambda < 2 \text{ km}$. Estes tipos são usados principalmente na navegação.

Os instrumentos que utilizam microondas usam o percurso direto devido ao curto comprimento de onda. Como o sinal é direto, o alcance do instrumento é limitado para linhas de visada com distâncias menores do que 100 km. Podem ser utilizadas em satélites artificiais ou em aeronaves, mas estes são casos especiais. O equipamento pode ser operado durante o dia e a noite, mesmo com fraca visibilidade, uma vez que a pontaria não é crítica. As medições são bastante afetadas pelas condições atmosféricas.

Os instrumentos com microondas utilizam a modulação em frequência da onda portadora e geram diversas frequências para resolver a ambigüidade. A frequência mais alta define o limite de precisão. Como é possível medir 1/1.000 partes do ciclo, temos uma resolução do comprimento da onda entre 1 mm e 1 cm.

Nas medições de distâncias com tais equipamentos, os erros instrumentais estão mais presentes e com maior peso em linhas bases curtas. Todavia, em bases longas, as condições atmosféricas têm maior influência. Esses instrumentos foram concebidos para medidas geodésicas, em bases de triangulações, poligonações de precisão ou trilateração de lados curtos, com necessidades de precisão da ordem de 1/10.000 a 1/20.000.

Os instrumentos microondas são chamados MED ativos, em que o sinal que retorna é gerado por um segundo instrumento. O sinal é transmitido pela estação principal, chamada Master, até um segundo instrumento, dito remoto, instalado no ponto final da linha, que o retransmite a estação Master. O sinal refletido é enfraquecido durante o percurso de retorno. Desse modo, o sinal é amplificado (dentro da estação Master) e comparado em fase com a onda transmitida. A diferença de fase entre os dois sinais, segundo BURNSIDE (1991), é obtido usando um ponto de zero aproximado, em que a diferença de fase entre os dois sinais é levada a zero, ao introduzir uma diferença de fase adicional usando as seguintes maneiras:

Um circuito de indutância – atraso de linha;

Um circuito eletromecânico – discriminador de fase.

A solução da equação da distância (Equação 2.24) não pode ser resolvida por uma simples medição devido à não-resolução da ambigüidade (N). Para a solução da ambigüidade, é necessário introduzir sucessivas mudanças de comprimento de onda (λ). Nos instrumentos que utilizam microondas, a solução da mencionada equação é obtida por medição de $\Delta\lambda$, usando cinco valores de comprimento de onda (λ), que é incrementado progressivamente por um fator de 10, e esta operação de troca é feita manualmente. O exemplo na Tabela 2.5 ilustra esse princípio.

Tabela 2.5 - Princípio de resolução da distância por mudança de comprimento de onda

λ	$\frac{\lambda}{2}$	$\Delta\lambda = \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}$
2	1	,1243
20	10	6,124
200	100	76,12
2.000	1.000	376,1
20.000	10.000	2376,0
Distância = 2.376,1243 m		

Fonte: KENNIE et al. 1993.

Tabela 2.6 - Características técnicas dos instrumentos que utilizam microondas

Nome	Comprimento da onda portadora	Alcance		Sistema de leitura	Precisão	Peso	Observações
		min	máx				
Tellurometer MRA-101	3 cm feixe 20°	100 m	50 km	Medidor de nulo com 100 divisões e vernier	±(1,5 cm + 3 ppm)	12,5 kg	Medida em um tubo de raios catódicos
Tellurometer MRA-4	9 mm feixe 2°	0 m	50 km	Medidor de nulo 3 dígitos	±(3 mm + 3 ppm)	8 kg	Trabalha nas temperaturas - 55° até +55°
Tellurometer MRA-7	18 mm feixe 6° a 23°	20 m	50 km	Medidor de nulo 3 dígitos	±(15 mm + 3 ppm)	4,65 kg	Trabalha nas temperaturas - 55° até +55°
Cubic Eletrotape DM-20	30 cm feixe 6°	10 m	50 km	Medidor de nulo 3 dígitos	±(1 cm + 3.10 ⁻⁵ m)	15 kg	Similar ao MRA-3
Wild Distomat DI 50	3 cm feixe 6°	100 m	50 km	Semi-automático 7 dígitos (cm)	±(2 cm + 0.5.10 ⁻⁵ m)	25 kg	Medida automática de fase
Tellurometer MRB-2 Hydrodist	10 cm feixe 20°		40 km	TRC com 100 divisões	±1,5 m	15 kg	Antena pode ficar 5 m separada do instrumento
Tellurometer CA 1000	feixe 6° a 20°	50 m	60 km		±(15 mm + 5 ppm)	1,7 kg	Trabalha nas temperaturas - 50° até 50°

Fonte: DOUBEK, 1984 e BURNISIDE 1991.

A Figura 2.20 mostra instrumentos que medem distâncias com a tecnologia descrita.



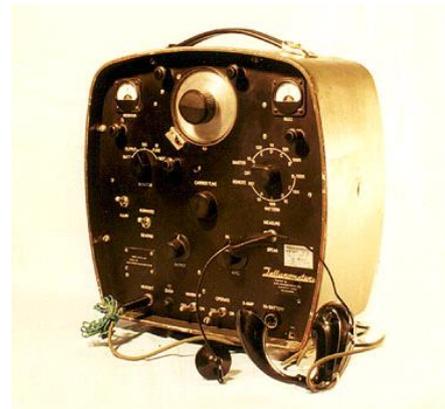
MRA-6 (BANNISTER & RAYMOND, 1984)



MRA-7



CA-1000



MRA 101

Figura 2.20 - Telurômetros

Os instrumentos que usam luz visível como portadora (por exemplo, o geodímetro) tem um comprimento de onda da ordem de 5600 \AA (isto é, $0,56 \times 10^{-6} \text{ m}$). O modo de propagação é na forma de raio direto, reflexões são incomuns, devido ao fato de que na natureza não se encontram muitas superfícies que produzem fortes reflexões para esse tipo de onda. Por outro lado, durante parte do dia, sempre há a possibilidade de entrada de luz no sistema ótico, aumentando o ruído, que reduz a sensibilidade do instrumento no processo de medição. O feixe de luz é altamente colimado, com uma divergência de apenas frações de grau, razão pela qual o receptor ótico tem um diâmetro bastante pequeno, e portanto pequeno ângulo de recepção. Devido à pequena divergência do feixe, o alinhamento de visada torna-se crítico.

O alcance é, em geral, menor do que os instrumentos que usam microondas, sendo que à noite o alcance é maior e as condições atmosféricas, tais como chuviscos ou neblina, diminuem consideravelmente o alcance. O índice de refração é pouco afetado pelas condições atmosféricas para o curto comprimento de onda usado, e a umidade relativa causa pequena influência nesses instrumentos, o que não ocorre com os instrumentos com microondas. Por essas razões, o erro externo é considerado com um valor da ordem de 1 ppm (parte por milhão).

Em geral, os instrumentos eletroóticos são mais apropriados para medir distâncias curtas, obtendo-se alta precisão, sendo o erro de zero o fator mais importante de limitação de sua precisão.

Alguns dos modelos dessa categoria utilizam a frequência básica $f_1 = 29\,970\,000\text{ MHz}$, com índice de refração igual a 1,0003086, de forma a obter um comprimento de onda igual a 10 m ($\lambda/2 = 5\text{ m}$). Para resolver a ambigüidade em distâncias na faixa de 2.000 m, duas outras frequências são usadas, e estas são relacionadas à primeira como a seguir de acordo com BURNSIDE 1991:

$$f_2 = 30\,044\,920\text{ MHz} = 401/400 \cdot f_1 \text{ e } f_3 = 31\,468\,500\text{ MHz} = 21/20 \cdot f_1 \quad [2.26]$$

$$f_3 - f_1 = f_1/20 \text{ com } \lambda/2 = 100\text{ m e } f_2 - f_1 = f_1/400 \text{ com } \lambda/2 = 2.000\text{ m} \quad [2.27]$$

Neste caso, a ambigüidade N_1 é igual à ambigüidade N_3 para distâncias menores do que 100 m, ou seja, 20 vezes $\lambda/2$. Igualando as equações da distância para as duas frequências e reduzindo, tem-se:

$$d = [21(\Delta d_3 - \Delta d_1)] + \Delta d_1 \quad [2.28]$$

Sendo:

d distância do alinhamento;

Δd_1 distância dada pela diferença de fase da frequência f_1 ;

Δd_3 distância dada pela diferença de fase da frequência f_3 .

Os valores entre colchetes são múltiplos de 5, desprezando os pequenos erros que podem ocorrer. Para resolver a ambigüidade em uma distância maior do que 100 m, é necessário uma frequência que produza um comprimento de onda maior do que a distância a determinar e encontrar a quantidade de comprimentos de 100 m que ocorrem nesse intervalo. Utilizando a frequência que produz meio comprimento de onda igual 2 km e fazendo a mesma operação anterior, tem-se:

$$d = [401(\Delta d_2 - \Delta d_1)] + \Delta d_1 \quad [2.29]$$

Sendo:

d distância do alinhamento;

Δd_1 distância dada pela diferença de fase da frequência f_1 ;

Δd_3 distância dada pela diferença de fase da frequência f_3 .

Este último valor encontrado serve apenas para determinar a quantidade de 100 m que ocorre na distância medida, porque os pequenos erros do processo de medição são multiplicados por um alto fator e o resultado torna-se pouco confiável pela baixa precisão. Diante do exposto, a distância é estimada pela quantidade de 100 m presentes na distância, dada pelo maior comprimento de onda, mais a parte da distância encontrada através da onda de menor comprimento. Para distâncias maiores, os fabricantes alteram as frequências, de forma a atingir a distância a ser medida. Alguns modelos têm alcance até 50 km.

O uso desses instrumentos é bastante amplo, sendo que na engenharia eles têm sido usados na abertura de túneis ou minas, barragens, pontes, instalação de máquinas, no levantamento de bases de triangulação, poligonais de precisão ou trilateração de lados curtos. Porém, equipamentos que usam esse tipo

de onda para longo alcance foram abandonados por ser de difícil modulação; apenas são fabricados para alcance em torno de 300 m. Existem numerosos equipamentos que usam essa tecnologia (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 - Características técnicas dos instrumentos que utilizam luz visível

Nome	Comprimento da onda portadora	Alcance		Sistema de leitura	Precisão	Peso
		min	máx			
AGA 8	632,8 nm		60 km	Medidor de nulo leitura digital	$\pm(5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$	23 kg
AGA 6BL	632,8 nm		25 km	Medidor de nulo leitura digital	$\pm(5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$	16 kg
AGA 600	632,8 nm		40 km	Medidor de nulo leitura digital	$\pm(5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$	15 kg
Kern Mekometer 5000	632,8 nm	20 m	8 km	Leitura automática 8 dígitos	$\pm(0,2 \text{ mm} + 0.1 \text{ ppm})$	11 kg
COM-RAD Geomensor 204	480 nm	10 m	5 km	Medidor de nulo leitura 8 dígitos	$\pm(0,1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ ppm}) \pm 0,5 \text{ ppm}$	
Georan I Two-Color	514 nm 458 nm		30 km	Medidor de nulo	$\pm 0,5 \text{ ppm}$	
Terrameter LDM 2	632,8 nm 441,4 nm		20 km		$\pm 0,1 \text{ mm}$ ou $\pm 0,1 \text{ ppm}$	
Leica Disto Pro	635 nm	0.3 m	100 m	Leitura automática unidade visualizada 1mm	$\pm 1,5 \text{ mm}$	0,67 kg

A Figura 2.21 apresenta exemplos desses instrumentos.

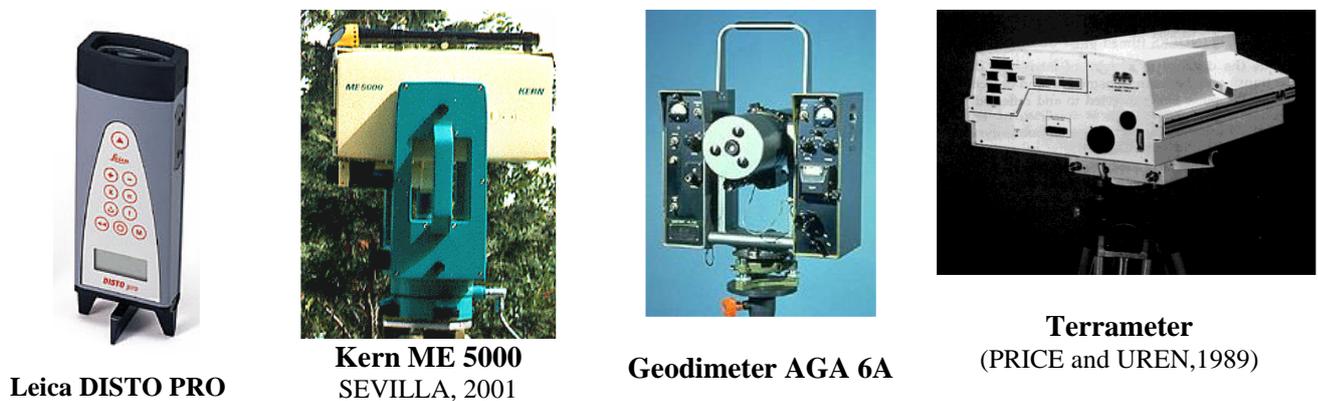


Figura 2.21 - Distanciômetros que utilizam luz visível

Os instrumentos que usam radiação infravermelha como portadora têm comprimento de onda em torno de $0,9 \mu\text{m}$. Nessa região do espectro, a atmosfera tem uma grande absorção com exceção da região $0,72 - 0,94 \mu\text{m}$, que é chamada de “janela do I.V.”. Isto implica o uso dessa região para todos os equipamentos, para evitar a perda por dispersão. Em condições de alta umidade e alta temperatura, o vapor d’água presente na atmosfera causa mais absorção. Com o feixe estreito e o curto comprimento de onda

usado, existem poucos problemas com ondas refletidas. Assim, a pontaria é crítica, pois o feixe de luz é de $\frac{1}{4}$ do grau, sendo a precisão da ordem de milímetros.

O processo de modulação da frequência é usado nesses instrumentos para que se possa usar como unidade de medida um comprimento de onda em torno de 10 m e transmitir o sinal na atmosfera de forma eficiente. À primeira vista poderia se pensar em diminuir o comprimento da onda para que se possa utilizar antenas de transmissão, já que as mesmas devem ter o tamanho da ordem de 10λ (comprimento da onda de medição). Porém, sabe-se que não é recomendado esse procedimento de diminuição do comprimento de onda pela dificuldade de resolver a ambigüidade para uma medida longa, onde os ciclos são muito próximos e o processo de medição de fase é extremamente instável para altas frequências. Assim sendo, as antenas seriam muito grandes, já que o comprimento de onda λ é em torno de 10 m, inviabilizando seu uso no processo de medição topográfica.

O tipo de modulação utilizado nos instrumentos infravermelhos com sistemas eletroópticos, segundo PRICE & UREN (1989), é a modulação em amplitude na qual a onda de medição é usada para variar a onda portadora (Figura 2.22). O raio infravermelho pode ser controlado usando pequenos componentes, tais como lentes, de modo que um raio transmitido pelo instrumento seja altamente colimado.

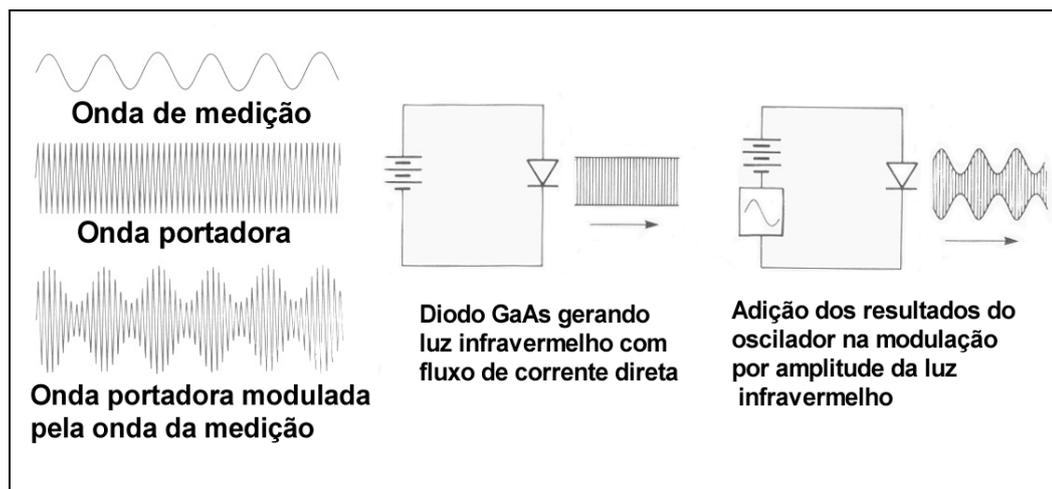


Figura 2.22 - Modulação por amplitude do diodo GaAs.

Adaptado de PRICE & UREN, 1989.

O diodo de arseniato de gálio (GaAs) é a fonte de onda utilizada na maioria dos instrumentos dessa categoria, sendo que sua principal vantagem é que a saída pode ser modulada diretamente em intensidade. A saída de radiação é sempre linearmente relacionada a estimulada corrente aplicada e o tempo de resposta é, na verdade, muito pequeno.

A precisão de um medidor de distâncias é diretamente dependente da qualidade do oscilador (contador de frequência). Alguma diferença na frequência fixada resultará em um erro ppm proporcional.

Para o instrumento DI-1600/TC-1600, por exemplo, o raio de luz infravermelho transmitido é modulado com a frequência de 50 MHz, o que resulta em um comprimento de onda de 6 m e uma resolução de ambigüidade de 3 m ($\lambda/2$). O sinal HF recebido é misturado com 49.993.896 Hz no receptor, caindo a

um sinal LF resultante de 6104 Hz, igual à diferença das duas frequências. Este sinal é obtido com a mesma diferença de fase do sinal HF, relacionado à frequência de referência do instrumento, no caso 50 MHz (Figura 2.23). O sinal de baixa frequência facilita a medição do comprimento de onda pelos componentes eletrônicos pelo fato de ser mais estável.

De acordo com a Figura 2.23, 16 vezes por período a forma senoidal do sinal LF é digitada em um conversor AD em configuração com um circuito de controle. A posição real de fase é avaliada matematicamente e convertida em uma distância fina.

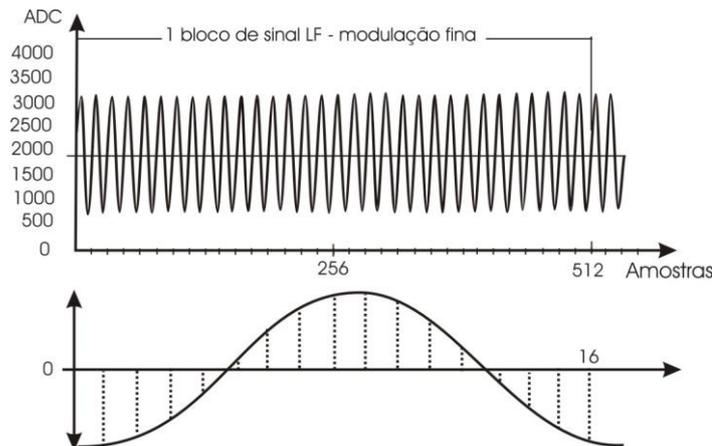


Figura 2.23- Representação do sinal misturado no receptor

Fonte: MANUAL DE SERVIÇO DI 1600/ TC 1600.

Uma resolução de 3 m é obtida com a medição fina; assim a medição grosseira tem que ter uma acurácia de $\pm 1,5$ m (metade da resolução da ambigüidade) no mínimo. De maneira a executar uma medição grosseira, as três frequências podem ser selecionadas:

$$f_{96m} \quad 1.562.500 \text{ HZ} \quad \Rightarrow \quad \lambda / 2 = 96 \text{ m}$$

$$f_{3Km} \quad 48.170 \text{ HZ} \quad \Rightarrow \quad \lambda / 2 = 3072 \text{ m}$$

$$f_{6Km} \quad 24.319 \text{ HZ} \quad \Rightarrow \quad \lambda / 2 = 6.104 \text{ m}$$

Contudo somente duas, f_{96m} e f_{6Km} , são usadas para obter a acurácia da medição.

Da mesma forma como durante a medição fina, o raio de luz infravermelho é modulado pela frequência de referência de 50 MHz. Porém, a frequência grosseira modula a frequência de referência por 180° em fase. O raio infravermelho transmitido é modulado com este sinal HF. O sinal HF recebido é também misturado no receptor com 49.993.896 Hz, mas esta frequência gerada pela mistura é modulada em fase com a frequência locada de 191 Hz, a partir da frequência grosseira transmitida. O produto da mistura é um sinal LF de 6104 Hz, modulado em amplitude com bandas de 191 Hz. A curva da modulação em amplitude tem a forma triangular com 191 Hz. Da mesma forma como durante a medida fina, os períodos do sinal de baixa frequência de 6104 Hz são digitalizados em 32 períodos. A posição real de fase do sinal de 191 Hz de forma triangular é avaliada matematicamente e convertida em distância grosseira (ZEISK, 1990).

Cada uma das três medições, a fina e as grosseiras de 96 m e 6 km, são produzidas por meio de um processo de medição interno, que primeiramente avalia a rotação de fase interna. Esta rotação de fase interna é devido a várias influências físicas e eletrônicas como temperatura, resposta de frequência, ação e tolerâncias de componentes tão bem como dos parâmetros óticos. As distâncias brutas encontradas pelas medições externas são corrigidas pela distância medida por meio da rotação de fase, avaliada pelo procedimento de medição interna e que representa assim o 0 (Zero) de referência do instrumento.

Para as Estações Totais de última geração são incorporados dois distanciômetros de medição coaxiais: um para distâncias com uso do refletor e outro sem o uso do refletor. Ambos operam no princípio da medição de fase, descrito anteriormente.

O raio laser infravermelho para a medição com o uso de refletores (prismas) tem um comprimento de onda de 780 nm, mede distâncias de cerca de 3.000 m com um único prisma, com acurácia de 2 mm + 2 ppm.

A luz visível do raio laser vermelho tem um comprimento de onda de 670 nm e mede distâncias até 80 m com uma acurácia de 3 mm + 2 ppm, sem uso do refletor.

Essa combinação de dois distanciômetros em uma única Estação Total oferece grandes vantagens onde, os pontos a serem medidos alternam entre pontos de fácil e difícil acesso, e inacessíveis, como em controles de estruturas metálicas, determinação de comprimento de condutos e outros.

Para prevenir a saturação do receptor, causada por um forte sinal de retorno (distância próxima), o raio infravermelho pode ser atenuado variavelmente por meio de um disco de filtro, que é posicionado por um motor e controlado por um processador por meio de uma interface. Dois filtros cobrem o disco e atenuam os sinais transmitidos e recebidos, cada um 50% de toda a atenuação. No fim da trilha do disco, uma parada mecânica limita o movimento do motor do disco. Um detector de posição é usado para uma rápida configuração da amplitude dos sinais recebidos e também para o sistema antibumerangue, de maneira a fixar a atenuação desejada.

O detector de posição é uma barreira de luz consistindo de um IR-Diodo (LED) e um fotodiodo. A luz ilumina o fotodiodo através de um diafragma em forma de cunha, que é locado na borda da circunferência do disco de filtro, conforme Figura 2.24, e a corrente causada por essa luz é convertida em corrente contínua a uma magnitude proporcional à posição real no disco de filtro. Por meio de um conversor AD a voltagem é lida pela CPU. Essa barreira de luz é variável de instrumento para instrumento.

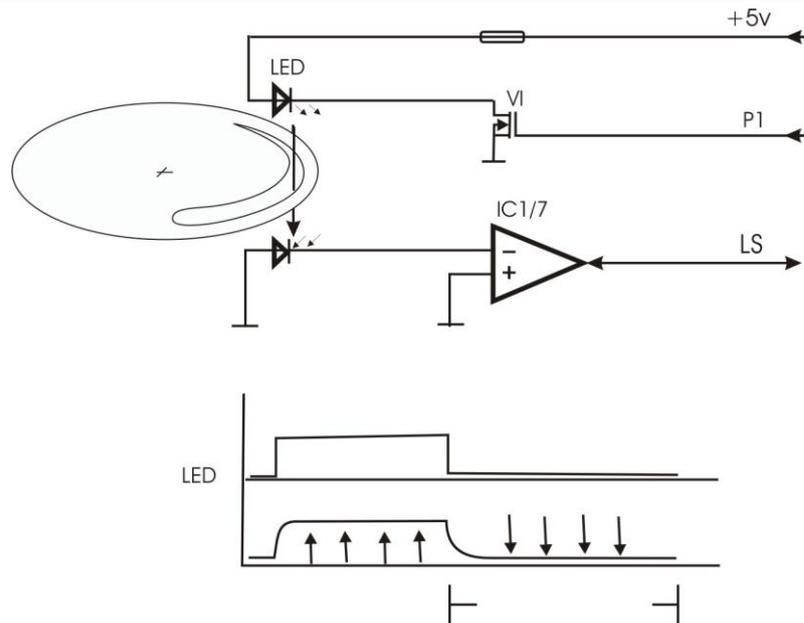


Figura 2.24 - Esquema do sistema de filtro

Fonte: Manual de serviço DI 1600/DI2002 (ZEISK, 1990).

Quando o sistema de filtro é inicializado, a CPU lê os valores limites e aloca a faixa de atenuação para uma área de posição de 0-255 (Figura 2.25). Esta padronização é feita de forma a compensar as tolerâncias da barreira de luz se um dos valores-limite desviar por mais do que ± 7 de 0 a 255, e é feita automaticamente sendo seus valores escritos em uma EPROM do microprocessador. Logo em seguida, é verificada a acurácia do local de posição do filtro, comparando alguma posição preestabelecida com a real; a diferença deve ser ± 6 ou menor. Se esta é maior, o motor e barreira de luz devem ser inicializados novamente.

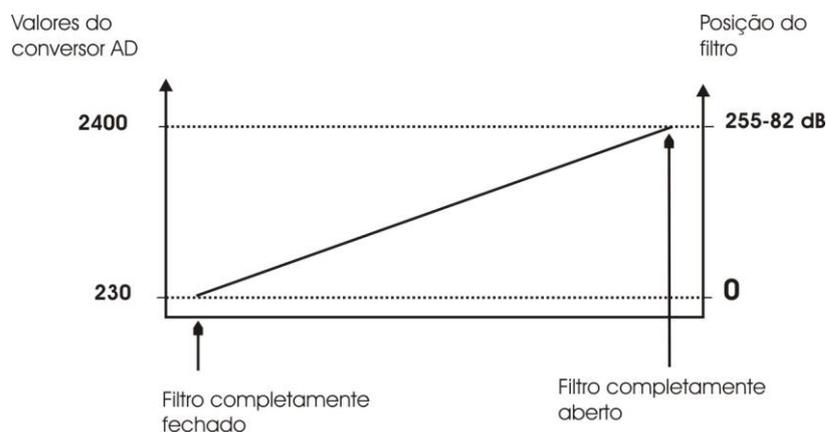


Figura 2.25 - Esquema da posição de filtro

Manual de serviço DI 1600/DI2002 (1990).

Quando um sinal percorre mais do que uma vez o percurso entre o transmissor ótico, refletor e receptor ótico, este é chamado de sinal bumerangue e pode ser adicionado ao sinal de medição, resultando em um erro de distância. Para limitar o sinal bumerangue, o raio infravermelho é atenuado por um filtro graduado, que é selecionado de acordo com o nível de ruído e o sinal é reduzido possivelmente pelo mesmo

fator de nível de ruído. Para os modelos DI 1600 e DI 2002, o sistema antibumerangue é ativado na faixa de 0 a 100 m.

Os sistemas antibumerangues são ineficazes contra reflexos dos componentes óticos dos teodolitos. Especialmente tipos mais antigos, que não são equipados com filtros de absorção, podem produzir fortes reflexos. Se tal problema é detectado, é recomendado cobrir a objetiva do teodolito durante a medição de distâncias. As menores distâncias e a maior imprecisão de pontaria no prisma proporcionarão uma maior probabilidade de ocorrer o efeito bumerangue.

Tabela 2.8 - Características técnicas dos equipamentos que utilizam o infravermelho

Nome	Comprimento da onda portadora	Alcance max.	Sistema de leitura	Precisão	Peso	Observações
Kern DM502	0,960 μm	2 km	Sistema digital de 6 dígitos	$\pm(5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$	1,3 kg	
Sokkisha RED1		2,0 km	Sistema digital de 7 dígitos	$\pm(5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$	3,5 kg	
AGA Geodimeter 140	0,910 μm	4,0 km	Sistema digital de 8 dígitos	$\pm(5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$	20,5 kg	Trabalha nas temperaturas - 20° até +50°
Nikon ND-21F	0,950 μm	2 km	Sistema digital cristal líquido 7 dígitos	$\pm(5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$	1,9 kg	Trabalha nas temperaturas - 20° até +50°
Zeiss Jena EOK-2000	0,910 μm	2,5 km	Leitura automática de 6 dígitos	$\pm(1 \text{ cm} + 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m})$	12 kg	
Zeiss Eldi-4	0,860 μm	4 km	Leitura automática de 7 dígitos	$\pm(5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$	0,8 kg	Trabalha nas temperaturas - 20° até +60
Wild Distomat DI-10	0,875 μm	2 km	Leitura automática 4 dígitos	$\pm 1 \text{ cm}$	20 kg	Trabalha nas temperaturas - 25° até +50°
Leica DI-1600	0,850 μm	7 km	Sistema digital cristal líquido 8 dígitos	$\pm(3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$	0,6 kg	Trabalha nas temperaturas - 20° até +50°
Leica DI-2002	0,850 μm	7 km	Sistema digital cristal líquido 8 dígitos	$\pm(1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$	0,6 kg	temperaturas - 20° até +50°
Leica DI-3000	0,865 μm	14 km	Sistema digital cristal líquido 8 dígitos	$\pm(5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$	1,7 kg	temperaturas - 20° até +50°
Leica DIOR-3002S	0,865 μm e laser classe 2 (Disto)	6 km 300 m (sem prisma)	Sistema digital cristal líquido 8 dígitos	$(\pm 3 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$ $\pm 5-10 \text{ mm}$		

A Figura 2.26 mostra equipamentos que utilizam esta tecnologia.



Figura 2.26 - Distanciômetros que utilizam o infravermelho

2.3.3.3 - Acessórios para medição eletrônica de distâncias

Para a medida da distância com uso de distanciômetro, é necessário que um refletor esteja instalado na outra extremidade do alinhamento, exceto para distâncias curtas e distanciômetros de última geração. Um refletor é composto de vários prismas de vidro, normalmente com três faces perpendiculares duas a duas e que têm função de refletir a onda emitida pelo instrumento.

A quantidade de prismas em um refletor depende do comprimento da distância a determinar e da intensidade do raio emitido. As distâncias máximas alcançadas pelos instrumentos e a quantidade de prismas necessários para a medição estão indicadas no manual do fabricante que acompanha cada instrumento. Em geral, a capacidade de medição da distância por instrumentos eletrônicos diante das dificuldades, mencionadas anteriormente, varia entre 500 m e 2000 m.

A Figura 2.27 mostra alguns modelos de refletores.



Leica GPH1



Leica GRZ 4 360°



CST Mini-prisma



Prisma CST



Prisma ADS109



Prisma Topcon



Prisma Sokkisha



Prisma Kern

Figura 2.27 – Refletores

O perfeito funcionamento de um refletor depende de alguns cuidados especiais que devem ser dispensados a eles. A poeira, marcas de gordura, impressões digitais, gotas de água e outras sujeiras diminuem a capacidade de reflexão dos prismas. Uma forte diferença de temperatura entre os prismas e o ar em torno do refletor pode produzir uma curvatura côncava ou convexa sobre a face do prisma, que é plana quando a temperatura é equilibrada, e produz nessas condições divergência do sinal recebido pelo prisma, o que diminui a sua capacidade de reflexão.

Outro acessório dos aparelhos para medida eletrônica de distâncias são as baterias de corrente contínua de 12 volts, secas de cádmio-níquel. Os tipos de baterias utilizadas (Figura 2.28) variam desde as minibaterias (0,5Kg) até grandes baterias (5Kg). Com carga plena, uma minibateria permite medir uma centena de vezes uma distância. As baterias atuais podem ser recarregadas milhares de vezes e possuem uma duração de carga de 12 a 15 horas. Para operarem eficientemente, as baterias devem ser descarregadas primeiramente e depois recarregadas até sua capacidade máxima, sempre em um período adequado anterior ao trabalho.



Bateria Leica GEB 71



Bateria interna Leica

Figura 2.28 - Baterias

2.3.4 - Erros Sistemáticos em Medições com MED

Os erros que afetam os MED são de natureza randômica e sistemática e podem ser evitados ou fortemente reduzidos por meio de boas técnicas de medição. Porém, se alguns erros sistemáticos permanecem, há o processo de calibração com o propósito de avaliá-los e corrigi-los.

Segundo KENNIE et al. (1993), são várias as fontes de erros sistemáticos que podem afetar os instrumentos MED, incluindo aqueles causados pelo operador do instrumento, a atmosfera e o instrumento mal ajustado. Para diminuir as influências dos erros do operador do instrumento, é importante:

- regular com precisão o centro com o eixo principal do instrumento verificando, o prumo ótico do teodolito (se o MED é montado no teodolito) ou por um prumo ótico integral;
- fazer uma pontaria de forma cuidadosa ao ponto da posição do alvo refletor. É importante pelo fato das facilidades para a redução automática da distância inclinada; a não-observância do ponto do alvo a ser colimado pode evidenciar erros na leitura do ângulo vertical;
- verificar as configurações automáticas de valores da correção (umidade, pressão, temperatura e outros). É essencial entrar com esses valores corretos para prevalecer as condições em que os instrumentos estão sendo usados.

Normalmente, o efeito da atmosfera é definido pela mudança no índice de refração (n), onde n é definido como:

$$n = \frac{c}{v} \quad [2.30]$$

Sendo:

c é a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo ($c=299.792,5$ km/s);

v é a velocidade média (atmosfera).

O valor de n é normalmente próximo da unidade e é assumido por muitos instrumentos MED como sendo igual a 1,000320. No espectro de onda eletromagnética de luz visível e infravermelha, n é calculado usando a fórmula de Barrel e Sears:

$$(n_t - 1) = (n_s - 1) \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{P}{760} - \frac{15,02 \cdot E}{273 + t} \times 10^{-6} \quad [2.31]$$

Sendo:

$$(n_s - 1) \times 10^{-6} = 287,604 + \frac{1,6288}{\lambda_0^2} + \frac{0,0136}{\lambda_0^4} \quad [2.32]$$

n_t índice de refração corrente;

n_s índice de refração do ar a 0° C e 760 mmHg de pressão, contendo 0,03% de CO2;

t temperatura durante a observação (° C);

P pressão durante a observação (mmHg);

E pressão do vapor de água (mmHg);

λ_0 comprimento de onda do sinal no vácuo.

Tabela 2.9 - Precisões em medições da temperatura, pressão e umidade entre os diversos MED para obter um 1 ppm de precisão no índice de refração

Onda Portadora	Precisões das medidas		
	T (°C)	P (mm Hg)	Umidade (mm Hg)
Microondas	0,8	± 2,9	± 0,17
Luz visível/infravermelho	1,0	± 2,7	± 20

Fonte: KENNIE et al. (1993).

Os dispositivos MED, como outros instrumentos topográficos, requerem cuidados no uso e uma regular calibração para fornecer segurança e acurácia às medições. Porém, ainda podem acontecer erros de natureza não-instrumentais, que é a instalação do MED no teodolito de forma a deixá-lo não-paralelo ao eixo da luneta e conseqüentemente não-paralelo à linha de visada. Entretanto apenas serão comentados os erros sistemáticos mais comuns causados pelo instrumento mal ajustado, que são: erro de escala (k_1) ou constante de multiplicação, erro de índice (k_2); erro cíclico (k_3).

O erro de escala (k_1) ou constante de multiplicação ocorre se a frequência modulada dos instrumentos MED não corresponde exatamente o valor da frequência projetada para o instrumento. É um erro linear proporcional à distância a ser medida e pode surgir de fontes internas ou externas. Este erro pode ser freqüentemente expresso em partes por milhão (ppm) da distância medida. Se o oscilador não gera a frequência de medida requerida, então o erro de escala poderá ser introduzido. Os osciladores controlados por um cristal são influenciados pelas condições de temperatura ambiente e estão expostos a um processo de envelhecimento lento. Devem ser calibrados anualmente, sempre que possível. Os instrumentos que trabalham com alcance mais longo, como os equipamentos de microondas, têm maiores riscos de apresentar esses tipos de erros do que os equipamentos de alcance curto, tais como os instrumentos infravermelhos (IR).

A temperatura característica do oscilador de quartzo referente é expressa por uma função polinomial, conforme Figura 2.29. Esses coeficientes são armazenados em uma EPROM do microprocessador em alguns instrumentos fabricados em torno de 1990.

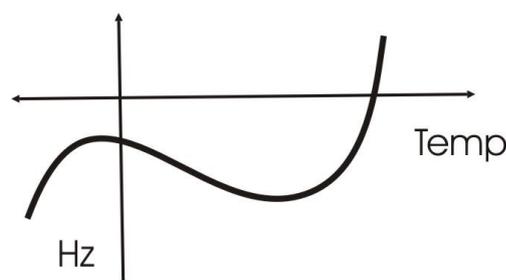


Figura 2.29 - Gráfico demonstrando a temperatura em função da frequência

Fonte: MANUAL DE SERVIÇO DI 1600/TC 1600 (1990).

A medição da temperatura do quartzo e o cálculo da frequência real são realizados por conta do instrumento, quando a distância é estimada. Assim a frequência do sinal HF transmitido altera com a temperatura interior do instrumento e pode ser comparada à calculada usando informações armazenadas nos instrumentos em funções específicas. Os desvios permitidos devem ser:

± 5 ppm	± 250 Hz
± 2 ppm	± 100 Hz
± 1 ppm	± 50 Hz

Com o exposto acima torna-se desnecessário preocupar-se com a constante de multiplicação, que é usada para definir a frequência de referência, já que os desvios são testados pelo próprio instrumento.

O contador de frequência usado para verificação tem que ter, na verdade, uma precisão que não pode ser menor do que 1×10^{-7} Hz. Esta estabilidade e precisão requerida são somente obtidas com contadores de frequência equipados com quartzo estabilizado a altas temperaturas. O desvio de frequência de tais contadores é especificado em 1 ppm/ano, que é justamente o envelhecimento. Portanto, o contador de frequência tem que ser calibrado anualmente.

Segundo SILVA et al.(1999), erro de zero ou de índice é também chamado de erro de constante de Adição. Este erro representa a diferença entre a distância medida pelo instrumento MED entre os dois pontos e a distância conhecida dos mesmos, sem erros de escala, cíclico e atmosférico. É causado quando o centro interno de medida do instrumento e o refletor não coincidem com o centro físico do instrumento/refletor, que é colocado verticalmente sobre o ponto a ser medido. A constante de adição varia de acordo com a combinação instrumento/prisma. Na maioria dos casos, ela é igual a zero.

Tal como o nome indica, os erros cíclicos (k_3) são erros periódicos e podem ter um efeito sistemático, particularmente em pequenas distâncias. É caracterizado por ser uma função periódica do comprimento de onda medido e a diferença de fase entre medida e sinal de referência. Esse efeito é cíclico sobre o comprimento de onda modulada.

Estes são os menores das três fontes de erros instrumental e são causados por “contaminação” eletrônica interna entre o transmissor e o receptor (circuito elétrico). O efeito dessa fonte de erro é reduzido pelos fabricantes de instrumentos por isolantes elétricos e proteção dos componentes dentro do equipamento.

2.3.5 - *Precisão*

A precisão indica qual o desvio das medidas em relação ao valor real e não pode ser confundida com resolução, que é o menor valor que o instrumento pode ler. A precisão que se obtém com um distanciômetro depende principalmente dos seguintes parâmetros:

- resolução do indicador de fase (capacidade do aparelho em medir a defasagem);
- frequência da medida fina;
- estabilidade da frequência da medida fina.

A diferença de fase pode ser determinada com um erro relativo compreendido entre 1:100 e 1:10.000, e as unidades de medidas finas utilizadas em mensuração variam entre 3 m e 30 m.

Um aparelho cuja frequência de medida fina é de 15MHz (unidade da medida $\lambda = 10 \text{ m}$) e que mede a defasagem com um erro de ± 0.0005 permite, portanto, a obtenção de uma precisão teórica de $\pm 5\text{mm}$ sobre uma medida de distância.

Os equipamentos comuns, disponíveis no mercado, possuem alcances até 14 Km e precisão variando entre $5\text{mm} \pm 5\text{ppm}$ a $3\text{mm} \pm 2\text{ppm}$. Incluem-se neste grupo, por exemplo, os distanciômetros DI 1001 e DI 1600 da empresa Leica (Tabela 2.8).

Os equipamentos de alta precisão, como, por exemplo, o distanciômetro DI 2002, da empresa Leica, possuem resolução de 0,1mm e precisão de $1\text{mm} \pm 1\text{ppm}$.

A mais recente inovação ocorreu com a introdução, no mercado, dos distanciômetros eletrônicos para medir sem refletor. Trata-se do DISTOMAT DIOR 3002S, da empresa Wild, que alcança até 300 m com uma precisão de ± 5 a 10 mm.

2.4 - Referências Bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR13133 – Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, 1994.
- BURNSIDE, C.D. (1991). Electromagnetic Distance Measurement, 3ª edição, BSP Professional Books.
- CARDÃO, Celso – TOPOGRAFIA
- CARL ZEISS JENA, catálogo de instrumentos geodésicos.
- DAVIS – FOOTE – KELLY – TRATADO DE TOPOGRAFIA
- DOMÉNECH, Francisco Valdés – TOPOGRAFIA
- DOUBEK, A. (1974). CG-160 Levantamentos Eletrônicos (1ª parte), Curso de pós-graduação em ciências geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia.
- ESPARTEL, L. (1960). Curso de Topografia, 8ª edição, Editora Globo S.A.
- JORDAN, D.W. (1944). Tratado General de Topografia V. I. Barcelona, Editorial Gustavo Gili, S.A.
- KAHMEN, H., FAIG, W. (1988). Surveying, Walter de Gruyter – Berlin-New York.
- KENNIE, T. J. M, PETRIE, G. (1993). Engineering Surveying Technology, 1ª edição, Blackie Academic & Professional – USA, Halsted Press.
- LOCH, Carlos e CORDINI, Jucilei – TOPOGRAFIA CONTEMPORÂNEA – Planimetria.
- MAIA, T.C.B. (1999). Estudo e análise de poligonais segundo a NR 13.133 e o Sistema Posicionamento Global. São Carlos, 1999. 176p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

-
- MAIA, T. C. B., (2001). Ajustamento e correção de poligonais I PRC levantadas por GPS e Estação Total segundo a NBR 13.133 e comparação entre as diferentes distâncias obtidas nos diversos planos de referência, XX Congresso Brasileiro de Cartografia, IX Congresso de Engenharia de Agrimensura, VII Conferência Íbero-Americana de SIG, Porto Alegre - RS.
- MOFFIT, F.H., BOUCHARD, H. (1987). Surveying, 8ª edição, Harper & Row, New York.
- PRICE, W.F., UREN, J. (1989). Laser Surveying, 1ª edição, Van Nostrand Reinold (International) Co. Ltd, Londres.
- SEVILLA, M. J., Instituto de Astronomía e Geodesia.
- http://www.mat.ucm.es/deptos/iag/lineas/texto01_131.htm#2. (Dia 26/11/2001).
- SCHOFIELD, W. (1993). Engineering Surveying, 4ª edição, Butterworth-Heinemann Ltd.
- SILVA, I., ERWES, H. (1999). Apostila do IV Curso de Atualização em Topografia e GPS (segundo a NBR 13.133). apostila não publicada, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SOKKISHA, Catálogo RED 1 The New electronic distance meter.
- TOPCON, Catálogo High technology surveying instruments, accessories and supplies.
- WILD HEERBRUGG, Catálogos de instrumentos topográficos de precisão.
- ZEISS WEST GERMANY, catálogo Eldi 4 distanciômetro eletro-ótico.
- UNSW Surneying Instrument Collection.
- http://www.gmat.unsw.edu.au/final_year_thesis/f_pall/html/edm.html.
- TELLUMAT. http://www.tellumat.com/products/product_view.asp?ID=48.