UNIDAD DIDÁCTICA II

5. COORDENADAS CARTESIANAS Y POLARES

5.1.- INTRODUCCIÓN

Los resultados de los trabajos topográficos se van a plasmar, en el caso más general, en un plano, en el que se representan todos los detalles planimétricos y altimétricos que han sido objeto del levantamiento topográfico. El plano irá referido a un sistema de ejes cartesianos, siguiendo el eje *Y* la dirección de la meridiana (dirección Norte-Sur) y el eje *X* la dirección perpendicular a la meridiana (dirección Este-Oeste). Éste es el caso habitual, aunque, en ocasiones, se prefiere orientar los ejes cartesianos de manera distinta. La dimensión *Z*, que corresponde a las alturas de los puntos con relación al plano horizontal de referencia, se suele representar mediante *curvas de nivel* o *planos acotados.*

Llamamos *transporte por coordenadas* a la operación consistente en trazar sobre el plano *XY* los distintos puntos del levantamiento. Para representar un punto del terreno de coordenadas *X* e *Y* conocidas, llevaremos a partir del origen de coordenadas las magnitudes *X* e *Y*, previamente reducidas a la escala del plano, en las dirección de los ejes *X* e *Y* respectivamente. La intersección de las perpendiculares a los ejes levantadas por los puntos así obtenidos nos señala la proyección del punto del terreno. Las coordenadas *X* se denominan *abscisas* y las *Y ordenadas*.

La proyección sobre el plano *XY* de un punto *P* del terreno también puede obtenerse a partir de sus coordenadas polares: distancia, proyectada sobre dicho plano, entre *P* y el origen de coordenadas *O* y ángulo formado por la alineación *OP* con uno de los ejes de coordenadas. En un trabajo topográfico es habitual que se combinen estos dos métodos para la obtención del plano topográfico, como veremos más adelante.

5.2.- COORDENADAS POLARES

Los instrumentos topográficos se limitan a la medida de coordenadas polares, ángulos y distancias, por lo que las coordenadas cartesianas deben deducirse por cálculo a partir de las polares. Estas coordenadas en topografía serán distancia reducida y acimut.

5.2.1.- Distancia natural y distancia reducida

Distancia natural ó geométrica entre dos puntos es la longitud del tramo de recta que los une teniendo en cuenta los tres ejes *X*, *Y* y *Z*, es decir, teniendo en cuenta la inclinación de esa recta. Pero en Topografía no interesa medir distancias naturales, sino proyecciones de éstas respecto a los ejes. Así, llamamos *distancia reducida* entre dos puntos a la longitud del tramo de recta que une sus proyecciones sobre el plano horizontal *XY*. Se trata, por tanto, de una distancia *proyectada* sobre dicho plano (figura

5.1). Con posterioridad estudiaremos su proyección sobre el eje *Z*, que denominaremos *desnivel*.

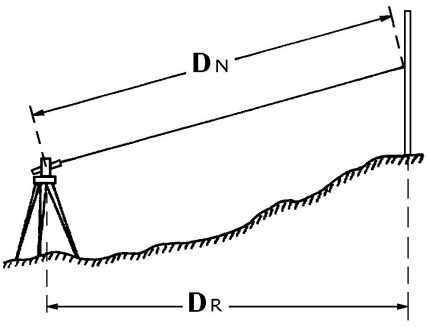


Fig. 5.1. Distancia natural y reducida

Puesto que en Topografía interesa determinar distancias reducidas, los instrumentos de medida de distancias deben disponer de procedimientos para reducir las distancias naturales medidas con ellos. Estos procedimientos consisten en la determinación, junto con la distancia natural, del ángulo vertical o bien del desnivel entre los dos puntos extremos de la alineación cuya distancia medimos.

La distancia reducida entre dos puntos será menor, o como mucho igual, que su distancia natural. Si tenemos dos puntos *A* y *B*, de coordenadas cartesianas X_A, Y_A, Z_A y X_B, Y_B, Z_B, respectivamente, las expresiones para el cálculo de la distancia entre ellos serán:

$$\textit{distancia natural}: \quad D_N = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}$$

$$\textit{distancia reducida}: \quad D_R = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2}$$

5.2.2.- <u>Concepto de acimut</u>

Llamamos *acimut* al ángulo formado por una alineación y la dirección de la meridiana, medido a partir del Norte y en el sentido de avance de las agujas del reloj, por lo que los acimutes estarán referidos a la dirección de la meridiana o a una paralela a la misma.

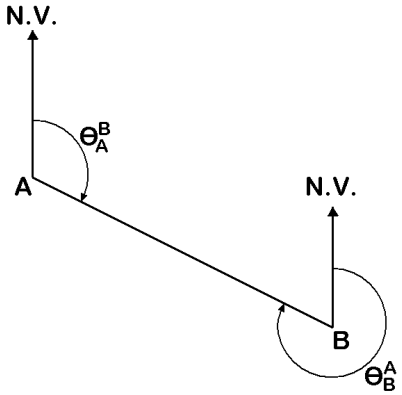


Fig. 5.2. Concepto de acimut

La *orientación* se define de manera similar, pero en este caso la referencia es el Norte de la cuadrícula del sistema de coordenadas empleado (normalmente, UTM) y no la meridiana. La diferencia entre acimut y orientación es la convergencia, cuyo valor depende de la longitud geográfica (véase 3.4.4) del lugar. No obstante, en lo que sigue y dado que en Topografía es habitual hacerlo de esta forma, emplearemos el término *acimut* en el sentido de: *ángulo horizontal que forma una alineación con el Norte de la cuadrícula, medido desde éste y en sentido horario*.

Así, para determinar el acimut de una recta *AB* consideraremos una paralela al eje Norte-Sur trazada por *A* y mediremos el ángulo formado por estas dos rectas, desde el Norte y en sentido horario. Denominaremos θ_A^B a este acimut. Si en vez de considerar el punto A como referencia consideramos el *B*, la paralela al eje Norte-Sur se trazará por *B* y el acimut obtenido, θ_B^A, diferirá del θ_A^B en $\pm 200^g$ (ó $\pm 180^o$), suponiendo que despreciamos la convergencia de meridianos (figura 5.2.). En la notación que empleamos, el subíndice indica el punto de referencia y el superíndice el punto al cual se mide.

Los instrumentos topográficos no pueden medir directamente acimutes, a menos que hayan sido previamente *orientados*, sino ángulos horizontales referidos a una dirección arbitraria. Sin embargo, veremos como resulta posible transformar estas lecturas angulares en acimutes, lo que nos va a permitir trabajar con ángulos medidos siempre desde una misma referencia, con las ventajas que esto conlleva.

5.3.- COORDENADAS CARTESIANAS

El sistema de coordenadas cartesianas consiste en dos ejes perpendiculares, el *Y* siguiendo la dirección de la meridiana y el *X* siguiendo la dirección perpendicular a ella. Los dos ejes se cortan en un punto, que es el origen de coordenadas, al que se asignan coordenadas *X=0*, *Y=0*, u otras en función de las necesidades del trabajo.

Los ejes cartesianos dividen al plano *XY* en cuatro cuadrantes, que se numeran comenzando por el cuadrante superior derecho y en el sentido de las agujas del reloj, siguiendo el mismo sentido en que crecen los acimutes. Los valores de la coordenada *X* son positivos a la derecha del origen, cuadrantes 1º y 2º, es decir al este del origen. Serán negativos en los cuadrantes 3º y 4º, al oeste. Los valores de la coordenada *Y* son positivos por encima del origen, cuadrantes 1º y 4º, al norte. Serán negativos en los cuadrantes 2º y 3º, al sur (figura 5.3.).

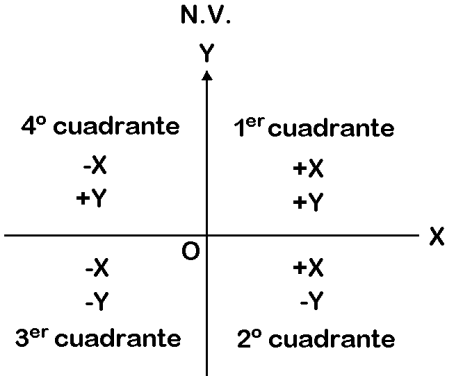


Fig. 5.3. Coordenadas cartesianas

La notación que empleamos para las coordenadas es similar a la que hemos visto para los acimutes. X_A^B es la distancia sobre el eje *X* que separa los puntos *A* y *B*, pero medida desde *A* hacia *B*. X_B^A tendría el mismo valor absoluto, pero signo contrario. Como vimos, el subíndice indica el punto desde el que se mide y el superíndice el punto al que se mide.

5.3.1.- Coordenadas absolutas y relativas

Las coordenadas *absolutas* o *totales* son las que se refieren al origen de coordenadas del sistema utilizado, en nuestro caso la proyección UTM. Las representaremos como X_O^A, Y_O^A o simplemente X_A, Y_A, ya que el origen de coordenadas es conocido.

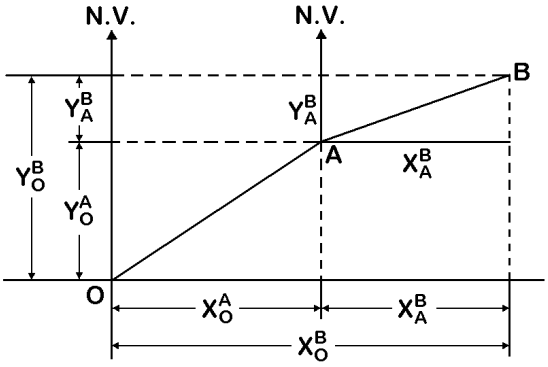


Fig. 5.4. Coordenadas absolutas y relativas

Las coordenadas *relativas* o *parciales* se refieren a otro punto distinto del origen de coordenadas. Las características de los trabajos topográficos impiden medir directamente ángulos y distancias con relación al origen de coordenadas. Las mediciones se hacen con relación a distintos puntos mate-

rializados en el terreno, en los que se sitúan los instrumentos topográficos y que se denominan *estaciones*. Por tanto, las coordenadas que vamos a calcular serán coordenadas relativas, no absolutas y se denotarán X_A^B (figura 5.4).

Las coordenadas absolutas se deducen fácilmente de las relativas, realizando la operación conocida como *arrastre de coordenadas*. En el ejemplo de la figura, las coordenadas absolutas X_O^B (X_B), Y_O^B (Y_B) de un punto *B* se obtienen a partir de sus coordenadas relativas X_A^B, Y_A^B respecto a otro punto *A* y de las coordenadas absolutas X_O^A (X_A), Y_O^A (Y_A) de éste, por las expresiones:

$$X_O^B = X_O^A + X_A^B \quad o \quad X_B = X_A + X_A^B$$
$$Y_O^B = Y_O^A + Y_A^B \quad o \quad Y_B = Y_A + Y_A^B$$

tal como se deduce de la figura 5.4. A partir de ahora denotaremos siempre las coordenadas absolutas con este segundo formato, con el punto en el subíndice.

Los puntos de un levantamiento se apoyan unos en otros y, por consiguiente, el arrastre de coordenadas se hará de una forma escalonada hasta determinar las coordenadas absolutas de todos los puntos de interés.

5.4.- TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS

5.4.1.- Paso de coordenadas polares a coordenadas cartesianas

Si se dispone de las coordenadas polares, distancia reducida y acimut, de un punto *A* con relación a un origen de coordenadas *O*, las expresiones para el cálculo de coordenadas cartesianas se deducen fácilmente de la figura 5.5:

$$X_A = X_O^A = D_{OA} \ sen\ \theta_O^A$$
$$Y_A = Y_O^A = D_{OA} \ cos\ \theta_O^A$$

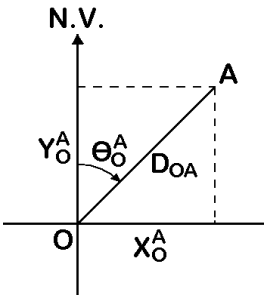


Fig. 5.5. Coordenadas polares y coordenadas cartesianas

siendo D_{OA} la distancia reducida de *A* al origen y θ_O^A el acimut de la recta *OA*.

Estas expresiones son aplicables en todos los cuadrantes, pues nos dan en cada caso las coordenadas con su signo, ya que, como sabemos, el seno es positivo de 0^g a 200^g y negativo de 200^g a 400^g y a su vez el coseno es positivo de 300^g a 100^g y negativo para el resto del círculo, por lo que los signos de las coordenadas coinciden con las indicadas anteriormente e inmediatamente se deduce la posición de *A* respecto al origen de coordenadas.

También podemos determinar las *coordenadas relativas* de un punto *B* con relación a otro punto *A*, que no es el origen de coordenadas. Para ello necesitamos conocer la distancia reducida *AB* y el acimut de la recta *AB*. Las expresiones son:

$$X_A^B = D_{AB} \ sen\ \theta_A^B$$
$$Y_A^B = D_{AB} \ cos\ \theta_A^B$$

semejantes a las anteriores.

5.4.2.- Paso de coordenadas cartesianas a coordenadas polares

La distancia reducida de un punto al origen de coordenadas *O* se calcula:

$$D_{OA} = \sqrt{(X_A)^2 + (Y_A)^2}$$

siendo X_A, Y_A las coordenadas cartesianas absolutas de *A*.

El cálculo de la distancia reducida entre dos puntos *A* y *B,* de los cuales se dispone de coordenadas absolutas , será:

$$D_A^B = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2}$$

como hemos visto. Si se dispone de las coordenadas parciales, la expresión será semejante:

$$D_A^B = \sqrt{(X_A^B)^2 + (Y_A^B)^2}$$

Para el cálculo del acimut a partir de las coordenadas cartesianas pueden darse cuatro casos, según el punto se encuentre en uno u otro cuadrante (figura 5.6):

***1er cuadrante*:** El acimut θ_O^A de la alineación *OA* se determina:

$$\theta_O^A = arco\ tg \frac{|X_O^A|}{|Y_O^A|}$$

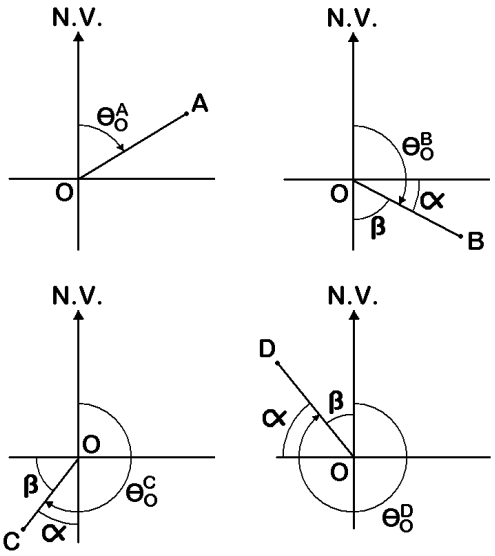


Fig. 5.6. Cálculo de acimutes

Todas las coordenadas que aparecen en estas expresiones las pondremos en valor absoluto.

***2° cuadrante*:** El acimut θ_O^B se puede calcular con cualquiera de las expresiones siguientes:

$$\theta_O^B = 100^g + \alpha = 100^g + arco\ tg \frac{|Y_O^B|}{|X_O^B|}$$

$$\theta_O^B = 200^g - \beta = 200^g - arco\ tg \frac{|X_O^B|}{|Y_O^B|}$$

***3er cuadrante*:** El acimut θ_O^C se puede calcular con cualquiera de las expresiones siguientes:

$$\theta_O^C = 200^g + \alpha = 200^g + arco\ tg \frac{|X_O^C|}{|Y_O^C|}$$

$$\theta_O^C = 300^g - \beta = 300^g - arco\ tg \frac{|Y_O^C|}{|X_O^C|}$$

***4º cuadrante*:** El acimut θ_O^D se puede calcular con cualquiera de las expresiones siguientes:

$$\theta_O^D = 300^g + \alpha = 300^g + arco\ tg\ \frac{|Y_O^D|}{|X_O^D|}$$

$$\theta_O^D = 400^g - \beta = 400^g - arco\ tg\ \frac{|X_O^D|}{|Y_O^D|}$$

Con frecuencia interesa determinar el acimut de la alineación formada por dos puntos *A* y *B* cualesquiera, en lugar del de la formada por un punto y el origen. Las expresiones son semejantes, sustituyendo en cada caso las coordenadas respecto al origen por la diferencia, en valor absoluto, de las coordenadas de los dos puntos. Se aplicarán unas expresiones u otras dependiendo de la posición del segundo punto respecto al primero, tal y como si éste fuese el origen de coordenadas. Por ejemplo, la expresión correspondiente al primer cuadrante quedaría:

$$\theta_A^B = arco\ tg\ \frac{|X_B - X_A|}{|Y_B - Y_A|}$$

Esta expresión se aplicará cuando el punto *B* se sitúe en el primer cuadrante respecto al *A*, es decir, cuando: $X_B > X_A$; $Y_B > Y_A$. Cuando el punto *B* esta en segundo cuadrante respecto a *A* será: $X_B > X_A$; $Y_B < Y_A$. Para el tercer cuadrante será: $X_B < X_A$; $Y_B < Y_A$. Y finalmente en el cuarto cuadrante: $X_B < X_A$; $Y_B < Y_A$.

6. ELEMENTOS DE LOS INSTRUMENTOS TOPOGRÁFICOS

6.1.- INTRODUCCIÓN

Antes de comenzar el estudio de los instrumentos topográficos es necesario conocer una serie de elementos que, formando parte o siendo independientes del instrumento propiamente dicho, son imprescindibles para la medida de ángulos y distancias.

Las lecturas realizadas con un instrumento topográfico estarán siempre referidas a su centro de medidas pero, al ser éste distinto en cada nuevo posicionamiento, las lecturas deberán referirse a puntos marcados en el terreno. Esto se consigue situando el centro de medidas del instrumento en la vertical del punto señalado en el terreno, denominándose este proceso *estacionamiento* o *puesta en estación*.

El estacionamiento o puesta en estación supone, por tanto, que el instrumento topográfico esté perfectamente nivelado, es decir, que el *eje principal* (véase 7.1.1) se coloque en posición vertical. Además, este eje debe pasar por el punto al que vamos a referir las medidas, o *punto de estación*. Llamamos eje principal a aquel en torno al cual el instrumento puede describir un giro horizontal.

6.2.- ELEMENTOS DE SEÑALIZACIÓN DE PUNTOS

Por norma general, en los trabajos topográficos será necesario marcar puntos sobre el terreno, respecto a los cuales se obtendrán coordenadas de otros. Estos puntos deben estar señalizados el tiempo necesario para concluir los trabajos y, a veces, permanecer disponibles para trabajos posteriores.

Las características que puede requerir un punto materializado en el terreno son:

- Ser duradero, no moverse ni deformarse
- Señalar de forma precisa el punto al que se refieren las medidas
- Facilitar el estacionamiento y la medida a él
- Presentar una visibilidad adecuada de la zona
- Ser localizable y permitir la reposición en caso de pérdida

Fig. 6.1. Estacas

No es condición imprescindible que los puntos señalizados en el terreno cumplan todos los requisitos anteriores, que cumplan varios o todos dependerá de la utilización que se le asigne a cada uno.

Algunos de los tipos de señales que se pueden emplear son:

- Estacas de madera (figura 6.1). Muy utilizadas por su bajo coste y facilidad de colocación.
- Clavos metálicos (figura 6.2). De distintos tamaños y tipos de cabeza, en función de que sirvan de referencia planimétrica o altimétrica.
- Hitos y mojones (figuras 6.3 a 6.5). Son bloques en forma de prisma o de paralelepípedo, de distintas dimensiones y materiales. Pueden ser construidos in situ o prefabricados y anclados al terreno mediante una cimentación o mediante elementos metálicos.

Fig. 6.2. Clavos

Fig. 6.3. In situ

Fig. 6.4. Prefabricado

Fig. 6.5. Hito feno

La elección de un tipo u otro de señal dependerá de la naturaleza y duración del trabajo topográfico, de las características del terreno, de la necesidad de reocupación, del tiempo de permanencia de la señal, etc.

6.3.- ELEMENTOS DE PUESTA EN ESTACIÓN

6.3.1.- Trípode

Los instrumentos topográficos se montan sobre elementos que permitan situarlos a la altura del operador y mantenerlos en una posición fija. Para ello se utilizan *trípodes*, dotados de tres patas de madera o metal, terminadas en unos regatones metálicos que permiten clavarlas en el suelo y asegurar su estabilidad (figura 6.6).

Fig. 6.6. Trípode

Los más usuales son los *trípodes de meseta*. Disponen de una plataforma circular o triangular sobre la que se apoya el aparato. De ella parten las tres patas, sujetas mediante articulaciones que permiten su giro. Cada pata está formada por dos largueros unidos por travesaños. Normalmente son extensibles, pudiendo deslizar la parte inferior de la pata por el interior de la superior, variando con ello su longitud y facilitando la puesta en estación del aparato, incluso en terrenos no llanos.

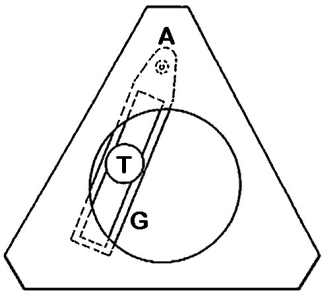


Fig. 6.7. Meseta de trípode

Los trípodes de meseta llevan, en la plataforma donde se apoya el instrumento topográfico

(figura 6.7), una guía metálica *G* sujeta a la meseta por uno de sus extremos *A*. La guía puede girar alrededor de *A* y sobre ella se desliza un tornillo *T* que sujeta al instrumento. De esta forma, el tornillo puede adoptar cualquier posición en el interior de un amplio orificio circular en el centro de la meseta.

Una vez sujeto el instrumento al trípode mediante el tornillo *T*, si éste no está apretado, podemos moverlo sobre la meseta, hasta conseguir que el eje principal del instrumento coincida con el punto de estación.

La plataforma del trípode es normalmente plana, pero también existen *trípodes de meseta curva*, especialmente destinados a facilitar la nivelación de ciertos instrumentos topográficos.

Cuando el lugar donde se debe estacionar es una superficie lisa, que no permite clavar los regatones, se utilizan bases para trípodes denominadas *estrellas* (figura 6.8). Estos dispositivos están constituidos por listones metálicos unidos por un extremo y formando los extremos opuestos un triángulo equilátero, en cuyos vértices se disponen orificios o elementos para retener los extremos de las patas del trípode.

Fig. 6.8. Estrella

Si es necesario estacionar el instrumento sobre un vértice geodésico no se suelen utilizar trípodes, sino *basadas* situadas directamente sobre el vértice (figura 6.9). Cuando se trata de un vértice de la Red Regente estas basadas disponen de un dispositivo para centrarlas en el clavo del que dispone el vértice (figura 6.10).

Fig. 6.9. Basada

Fig. 6.10. Basada Regente

Fig. 6.11. Estacionamiento forzado

En determinados trabajos de alta precisión se debe estacionar repetidamente sobre un punto, para lo que se instalan sistemas de estacionamiento forzado (figura 6.11). Estos sistemas hacen innecesario el trípode puesto que permiten la unión directa con el instrumento topográfico.

6.3.2.- <u>Plomada óptica y láser</u>

Para poner el instrumento en estación, además de nivelarlo es preciso que el eje principal del mismo pase por el punto de estación. Para comprobarlo se utilizan las plomadas.

En los instrumentos que no disponen de ningún sistema de plomada se utiliza una *plomada física* (figura 6.12), que consiste en un peso unido a una cuerda. Dicha plomada se suspende del tornillo *T* del trípode mediante un gancho o un dispositivo de anclaje, y, por efecto de la gravedad, nos marca la vertical en dicho punto. Otra utilidad es la de facilitar la colocación del orificio de la meseta del trípode lo más centrado posible con la vertical del punto, facilitando así la puesta en estación.

Fig. 6.12. Plomada física

Este sistema no garantiza la precisión necesaria en la mayoría de los trabajos topográficos, por lo que, normalmente, los instrumentos disponen de un sistema de plomada incorporado.

Existen instrumentos que van provistos de *plomada óptica* (figura 6.13), compuesta por un pequeño ocular y un prisma que refleja la visual horizontal dirigida por un ocular, desviándola en la dirección del eje principal del instrumento. La colocación del prisma es tal que, una vez desviada la visual, coincida con el eje principal del instrumento.

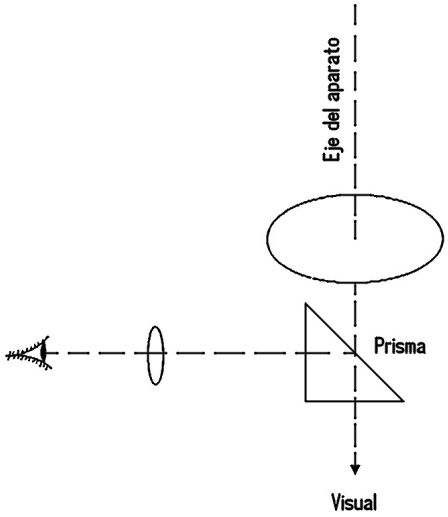


Fig. 6.13. Plomada óptica

De este modo, si miramos por el ocular de la plomada óptica podremos observar inmediatamente si el eje del aparato está centrado sobre la señal (clavo, estaca, etc.) que nos marca el punto de estación.

En la actualidad, muchos instrumentos topográficos disponen de *plomadas láser* (figura 6.14). En este caso, es un emisor láser el que se instala de manera que, una vez activado, señale la posición del eje principal del instrumento. Este dispositivo tiene la ventaja de permitir el centrado a simple vista, aunque sin los aumentos que proporciona la plomada óptica.

Fig. 6.14. Plomada láser

Fig. 6.15. Plataforma nivelante con plomada óptica

Fig. 6.16. Plomada óptica

Fig. 6.17. Plomada láser

Para permitir el uso de la plomada óptica ó láser, el tornillo *T*, al que nos referimos anteriormente, es hueco de forma que la visual reflejada o el láser pueda pasar a través de él.

Existen plataformas nivelantes (véase 6.4.1.) dotadas de plomadas ópticas y plomadas independientes, ópticas o láser, que permiten la puesta en estación de portadores de reflectores, sensores, antenas GPS, etc.

6.3.3.- Tornillos de presión y coincidencia

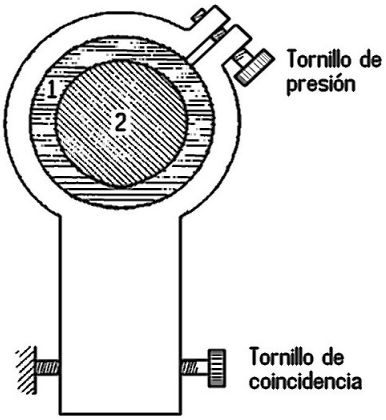


Fig. 6.18. Tornillos de presión y coincidencia

Para facilitar el trabajo, a cada posible movimiento de los elementos de un instrumento topográfico en torno a cada uno de sus ejes corresponde un tornillo que, una vez apretado, impide el movimiento, mientras que al estar suelto permite el giro libremente. Estos tornillos se llaman *de presión*.

Además, cada tornillo de presión va acompañado de un segundo tornillo que, una vez apretado el primero, permite imprimir pequeños giros en ambos sentidos a los elementos móviles del instrumento. Estos tornillos se denominan *de coincidencia.*

Fig. 6.19. Tornillos coaxiales

Cuando queramos visar un punto soltaremos el tornillo de presión del movimiento correspondiente y giraremos el instrumento hasta aproximarnos lo más posible a la alineación del punto. Entonces fijaremos el tornillo de presión y completaremos la operación girando el tornillo de coincidencia hasta que el punto quede perfectamente centrado. Como el recorrido de los tornillos de coincidencia es limitado, si no conseguimos visar perfectamente el punto porque finaliza el recorrido del tornillo, se debe soltar el tornillo de presión y volver a centrar el punto, pero nunca forzar los tornillos del instrumento topográfico.

Estos tornillos pueden ser de varios tipos. En la figura 6.18., con el tornillo de presión suelto, el eje exterior (*1*) puede girar libremente alrededor del eje interior (*2*). Si lo apretamos, todavía es posible imprimir ciertos giros al conjunto de los ejes (*1* y *2*) con el tornillo de coincidencia.

Fig. 6.20. Instrumento con sistema de fricción

Actualmente, los tornillos de presión y coincidencia suelen ser coaxiales (figura 6.19) para facilitar la localización cuando deben ser manipulados al tiempo que se visa un punto a través del anteojo. También existen instrumentos en los que no aparece esta pareja de tornillos, siendo sustituida por un mecanismo sin fin para la coincidencia y con un sistema de

fricción que sustituye al tornillo de presión (figura 6.20).

La opción más avanzada es la que representan los instrumentos servomotorizados, que utilizan la tecnología de servomotores para el giro vertical y horizontal, prescindiendo por lo tanto de los clásicos tornillos de presión y coincidencia.

6.4.- ELEMENTOS DE NIVELACIÓN

Los niveles son órganos fundamentales en cualquier instrumento topográfico y de la precisión y exactitud con que se construyan va a depender en gran medida la del instrumento.

En Topografía se emplean *niveles de aire o de burbuja*, consistentes en una ampolla de vidrio cerrada y casi llena de un líquido de poca viscosidad, dejando una burbuja de aire que siempre ocupará la zona más alta de la ampolla.

También se utilizan distintos dispositivos que permiten calcular la desviación sobre la horizontal o la vertical y que pueden presentan esta información en la pantalla del instrumento topográfico. Estos se conocen como *niveles electrónicos* o *digitales*.

El nivel de burbuja o el digital se emplea, en combinación con los tornillos de la plataforma nivelante, para conseguir la horizontalidad de una recta en la que se apoya o la verticalidad de un eje alrededor del cual gira.

Fig. 6.21. Plataforma nivelante

6.4.1.- Plataforma nivelante

La base de los instrumentos topográficos, que apoya sobre la meseta del trípode, es la *plataforma nivelante* (figura 6.21).

Esta plataforma consta de tres brazos horizontales, en forma de triángulo equilátero, atravesados en sus extremos por tornillos nivelantes verticales. Girando estos tornillos se puede variar la inclinación de la plataforma.

Si además adaptamos a ésta uno o más niveles de burbuja, o ésta está unida a un instrumento topográfico dotado de niveles de burbuja o digitales, podemos emplear los tornillos para nivelar el instrumento, es decir, situar la plataforma en posición horizontal, lo que equivale a situar en posición vertical el eje principal del instrumento.

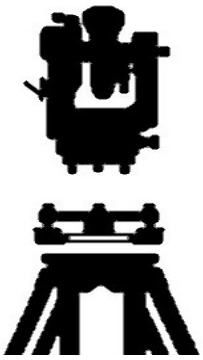


Fig. 6.22. Situación de plataforma nivelante

Frecuentemente la plataforma nivelante se puede desacoplar del instrumento topográfico, quedando unida al trípode por el tornillo *T* de éste, permitiendo la colocación de elementos de puntería, otros instrumentos topográficos, receptores GPS, etc.

6.4.2.- Nivel tórico ó tubular

Consiste en un tubo de forma tórica, cerrado por sus extremos, que contiene el líquido y una burbuja de aire. Su cara superior lleva una serie de divisiones separadas *2mm*. El radio de curvatura puede llegar a medir *50* ó *60m* y está directamente relacionado con la sensibilidad del nivel (figura 6.23).

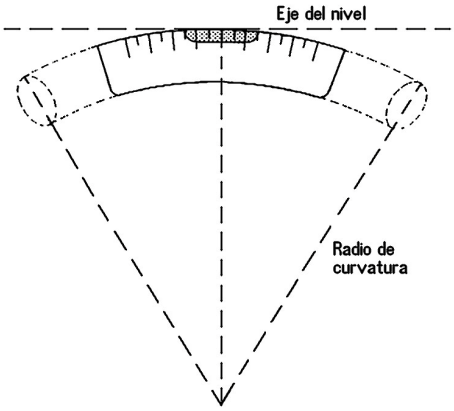


Fig. 6.23. Nivel tórico

Se denomina *eje del nivel* a la tangente a su cara superior en el centro de ésta. Cuando situamos el centro de la burbuja en coincidencia con el centro del nivel se dice que la burbuja está calada. En esta situación, el eje del nivel ocupará una posición horizontal.

Como este tipo de nivel es el más preciso de los que montan buena parte de los instrumentos topográficos, los niveles electrónicos suelen corresponder, en su diseño y utilización, a este tipo.

6.4.2.1.- Sensibilidad del nivel

Llamamos *sensibilidad* de un nivel de burbuja al ángulo de giro, expresado en segundos, que corresponde a una división del nivel (figura 6.24).

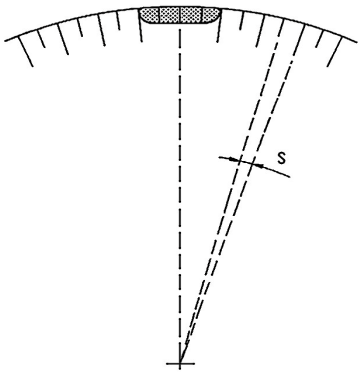


Fig. 6.24. Sensibilidad nivel tórico

Como la longitud de una división es *2mm*, el ángulo *α* correspondiente será:

$$\begin{array}{ccc} 2\ \pi\ r & \text{———} & 2mm \\ 360^{o} & \text{———} & \alpha \end{array}$$

siendo *r* el radio de curvatura del nivel, expresado en *mm*. De aquí:

$$\alpha = \frac{2\ \ 360^{o}}{2\ \ \pi\ \ r}$$

La sensibilidad es este mismo ángulo expresado en segundos, es decir:

$$s'' = \frac{2\ \ 360^{o}\ \ 60\ \ 60}{2\ \ \pi\ \ r} = \frac{2\ \ 206265}{r}$$

Como se ve, la sensibilidad es inversamente proporcional al radio de curvatura. En principio, cuanto mayor sea éste, tanto más sensible será el nivel. No obstante hay que evitar los radios de curvatura excesivos, con los cuales sería muy difícil mantener calada la burbuja. La sensibilidad de estos niveles dependerá de la finalidad y precisión del instrumento topográfico en el que están montados, pero suele oscilar entre *1'* y *20"*.

En el caso de los niveles electrónicos su sensibilidad será semejante a los de burbuja y dependerá del tipo de dispositivo que utilicen. Su valor se incluye en los datos técnicos del instrumento.

6.4.2.2.- <u>Empleo del nivel</u>

Se pretende situar vertical el eje principal del instrumento, lo que equivale a situar horizontalmente la plataforma nivelante, que, por construcción, debe ser perpendicular a dicho eje. Para ello se sitúa el eje del nivel sensiblemente paralelo a la dirección formada por dos tornillos nivelantes y actuando únicamente sobre ellos, girándolos siempre en sentidos contrarios (éste movimiento se conoce como *uñas adentro–uñas afuera*), se cala la burbuja. Con ello habremos conseguido que la línea que pasa por esos dos tornillos ocupe una posición horizontal (figura 6.25).

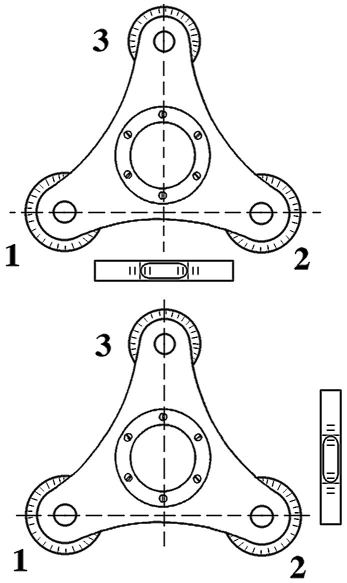


Fig. 6.25. Empleo del nivel tórico

A continuación giramos *90º* (*100ᵍ*) el nivel y lo ponemos en la dirección del tercer tornillo nivelante. Si actuando únicamente sobre ese tercer tornillo calamos la burbuja en esta nueva posición, habremos conseguido horizontalizar una línea perpendicular a la primera, por lo que toda la plataforma nivelante ocupará una posición horizontal y el eje principal del instrumento unido a ésta se habrá situado en posición vertical.

Esta operación se debe repetir hasta que comprobemos, con un giro lento del instrumento, que se encuentra nivelado en todas las posiciones.

Existen instrumentos que montan dos niveles tóricos, dispuestos en posiciones perpendiculares, que permiten la nivelación sin el giro de *90º* (*100ᵍ*). Esta disposición de dos niveles tóricos también puede aparecer en pantalla del instrumento topográfico, de manera que el calado de los niveles se hace de la forma ya indicada con los tornillos pero observando los niveles electrónicos que aparecen en pantalla (figura 6.26).

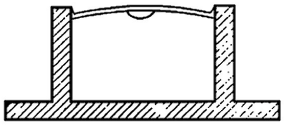
Fig. 6.26. Nivel tórico en pantalla

6.4.3.- Nivel esférico

Es un nivel de menor precisión, en el que se sustituye el tubo de vidrio por una caja metálica de forma cilíndrica y cerrada en su parte superior por una tapa de cristal que tiene la cara interior esférica. En el centro de la tapa de vidrio lleva grabada una circunferencia. Para calar la burbuja basta situarla en el interior de la circunferencia.

Fig. 6.27. Nivel esférico

En el ejemplo de la figura 6.28, la burbuja se encuentra en la posición *A*. Actuando sobre los tornillos de la plataforma nivelante (T_1 y T_2) la llevaremos a la posición *B*. A continuación, actuamos sobre el tercer tornillo (T_3), llevando la burbuja a la posición *C*, en la que ya se encuentra calada. Repetiremos la operación cuantas veces sea necesario, hasta calar la burbuja perfectamente.



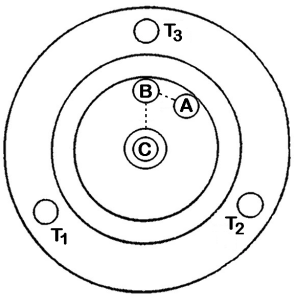


Fig. 6.28. Empleo del nivel esférico

Los niveles esféricos son mucho menos precisos que los tóricos, con una sensibilidad que normalmente está entre *3´* y *20´*, y solo se emplean para nivelaciones groseras y rápidas. Si un instrumento dispone de un nivel tórico y otro esférico, ambos corregidos, al calar la burbuja del primero quedará calada la del segundo.

6.4.4.- Nivel reversible de doble cara

Estos niveles son reversibles, pueden girar en torno a un eje que es paralelo al del nivel. En ellos, la superficie tórica se sustituye por otra en forma de huso y que debe ir graduada por ambos lados.

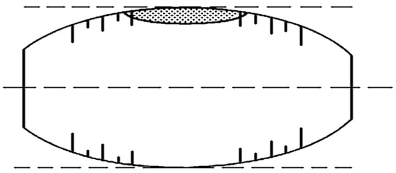


Fig. 6.29. Nivel reversible

Se utilizan con aparatos cuyo anteojo en reversible, es decir, puede girar *180º* en torno a un eje paralelo al anteojo. Se utiliza normalmente en niveles o equialtímetros.

6.4.5.- Nivel de coincidencia o de burbuja partida

Este método constructivo suprime las divisiones del nivel tórico ó de doble cara. Utiliza un sistema óptico de prismas de reflexión total que, al mirar por el ocular, nos muestra una burbuja dividida longitudinalmente en dos partes que se mueven en sentidos contrarios; en realidad se trata de la mitad de cada uno de los extremos de la misma burbuja. Para calar el nivel

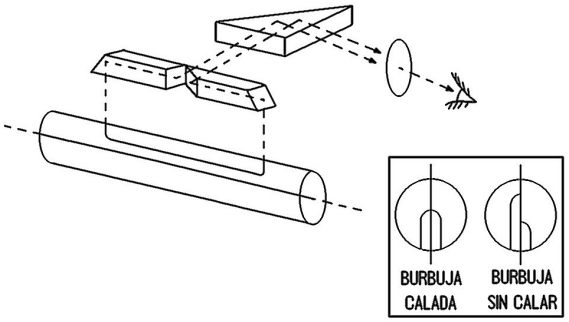


Fig. 6.30. Nivel de coincidencia

basta que las dos partes se vean una a continuación de la otra.

Debido al funcionamiento descrito, el desplazamiento que se observa en la burbuja es el doble del real, por lo que cuando se consiga hacer coincidir ambos extremos de la burbuja, como el límite de la apreciación visual es *0,2mm*, el desplazamiento real en el nivel es de *0,1mm*, lo que permite conseguir un calado de la burbuja mucho más preciso que con niveles de burbuja no dotados de este sistema. Se utiliza normalmente en niveles o equialtímetros.

6.5.- ANTEOJO

El anteojo de que va provisto todo goniómetro facilita la visión precisa de los puntos que vamos a levantar o que nos van a servir de referencia. Los anteojos disponen de lentes que facilitan el trabajo al aumentar el tamaño aparente de los objetos observados a través de ellos.

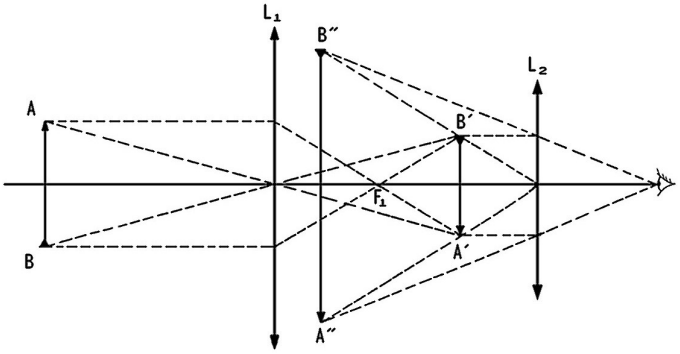


Fig. 6.31. Anteojo astronómico

6.5.1.- Anteojo astronómico y topográfico

El anteojo astronómico consta de dos lentes convergentes, una se dirige hacia el objeto a visar y se llama *objetivo* (L_1) y la otra, donde aplica el ojo el observador, se llama *ocular* (L_2). Un objeto lejano *AB* produce una imagen *A´B´* real e invertida. Si se coloca el ocular (L_2) de forma que la imagen *A´B´* que situada entre su foco (F_1) y el ocular, se formará una segunda imagen real e invertida y de mayor tamaño *A"B"* (figura 6.31.).

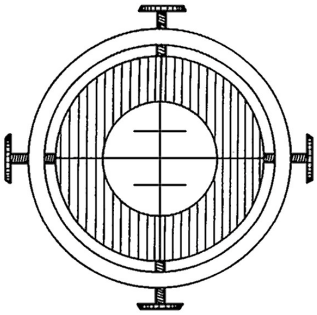


Fig. 6.32. Retículo

El anteojo topográfico responde al mismo esquema básico. Se diferencia del astronómico en que entre ambas lentes se interpone un *retículo*. El retículo está formado por un disco de vidrio plano donde se han grabado, como mínimo, dos finas líneas ortogonales denominadas hilos, uno vertical y otro horizontal, y que constituyen la cruz filar, superponiéndose su imagen sobre la del objeto observado. Estos retículos pueden ser de distintos tipos y sirven para colimar el punto o puntos que corresponden a las visuales de interés.

Fig. 6.33. Colimación

Cuando en el retículo aparecen grabadas dos líneas horizontales, por encima y por debajo de la línea central o axial y a la misma distancia de ésta, se

denomina *retículo estadimétrico*, porque permite la determinación de distancias mediante estadimetría.

Se denomina *colimar* un punto, objeto o señal (figura 6.33) a la operación de hacer coincidir dicho punto con el centro de la cruz filar del retículo. Para realizar éste proceso correctamente se debe, en primer lugar, enfocar el retículo con el movimiento del ocular y posteriormente enfocar cada uno de los puntos a colimar solamente con el enfoque del anteojo. A veces, para facilitar la colimación de elementos verticales u horizontales se suele desdoblar la mitad del hilo horizontal y/o vertical del retículo.

Las lentes van montadas sobre un tubo que consta de dos piezas, una de las cuales se introduce dentro de la otra; esto permite variar la distancia entre las lentes y por tanto el enfoque del anteojo. En la actualidad, este enfoque se realiza desplazando sólo la lente dentro del tubo portaobjetivo. En cualquier caso, el movimiento de ambas piezas debe ser tal que no se produzcan variaciones en el eje de colimación, que atraviesa longitudinalmente el anteojo, cuando se enfoca la imagen a distintas distancias. Existe una distancia mínima de enfoque, que suele estar entre *0,5* y *2,0m*.

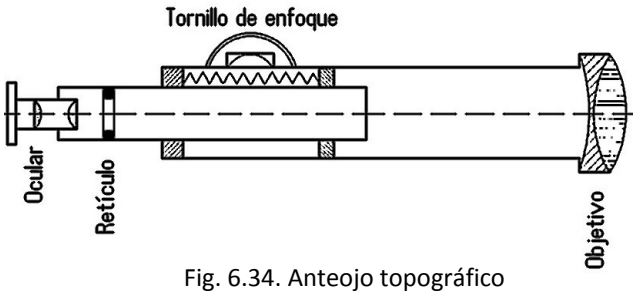


Fig. 6.34. Anteojo topográfico

Para el correcto funcionamiento del anteojo, en el citado eje de colimación deben coincidir perfectamente, y para cualquier distancia de enfoque, los tres ejes que se definen a continuación:

- *Eje óptico*: Une los centros ópticos del objetivo y del ocular.
- *Eje de colimación*: Une el centro óptico del objetivo con el centro de la cruz filar.
- *Eje mecánico*: Pasa por el centro del objetivo y es paralelo al movimiento del tubo porta-ocular.

6.5.2.- <u>Características de los anteojos</u>

Aumentos: Es la relación entre la magnitud aparente de un objeto a través del anteojo y su magnitud aparente a simple vista. El aumento nominal de un anteojo viene dado por $A = f_1/f_2$ siendo f_1 y f_2 las distancias focales de objetivo y ocular, respectivamente. Los anteojos topográficos suelen tener alrededor de *30* aumentos.

Claridad: Es la relación entre el brillo de un objeto observado a simple vista y el brillo del mismo objeto observado a través del anteojo.

Campo: Es la porción de espacio que puede observarse a través del anteojo. Éste aumenta con la distancia en un ángulo determinado respecto

al eje de colimación y tiene un valor en torno a *1°30´*. Por esto, la búsqueda de puntos a colimar mirando sólo a través del anteojo es muy lenta, debido a que la zona observada es pequeña y se debe enfocar para tener imágenes nítidas a distintas distancias. Para agilizar el proceso todos los anteojos montan dispositivos de puntería rápida para una colimación aproximada del punto.

Aberraciones: Son distorsiones de la imagen debidas a que los rayos luminosos no se comportan en la práctica siguiendo exactamente las leyes teóricas.

6.5.3.- Anteojos de analatismo central

En el anteojo de la figura 6.35, los rayos luminosos que parten de los hilos *a* y *b* se refractan al llegar al objetivo *L*, pasando por el foco *F*. En estos anteojos, la distancia (*d*) se mide a partir de *F*, lo que nos obliga a introducir una constante aditiva *K´* para referir la distancia al centro del anteojo:

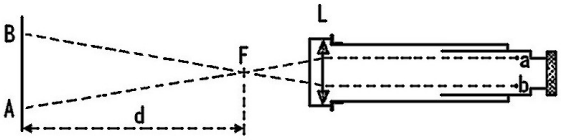


Fig. 6.35. Anteojo convencional

$$D = d + K´$$

Para eliminar esta constante se incorpora a los anteojos un sistema óptico que traslada el punto *F* o punto analático, al centro del anteojo. Estos anteojos se denominan de *analatismo central* (figura 6.36), o también anteojos estadimétricos de Porro, y en ellos queda eliminada la constante aditiva.

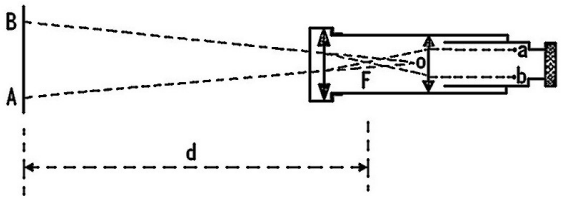


Fig. 6.36. Anteojo de analatismo central

6.6.- LECTURA DE ÁNGULOS

Sabemos que las magnitudes que un instrumento topográfico puede medir en campo son ángulos y distancias. Por esto, una vez estacionado el instrumento topográfico y colimado un punto, necesitamos disponer en el instrumento de dispositivos que nos permitan medir los ángulos con la precisión requerida. Estos dispositivos son círculos graduados que se denominan *limbos*.

Fig. 6.37. Medida angular

En los instrumentos topográficos de menor precisión angular se montan limbos en el exterior (figura 6.37) y en los que el valor angular se obtiene por coincidencia con un índice de lectura y a simple vista. Los valores angulares así obtenidos sirven para determinados instrumentos topográficos pero carecen de la precisión necesaria para la mayoría de los cálculos en topografía.

6.6.1.- Medida óptico-mecánica de ángulos. Micrómetros

En los *micrómetros*, la lectura del limbo se hace a través de un ocular asociado a un sistema de prismas y microscopios que llevan la lectura aumentada del limbo al ocular. Existen distintos tipos de micrómetros:

- **De observación directa:** Es un sistema óptico de aumento que nos muestra el valor grabado en el limbo y una señal que se mueve solidariamente con la alidada. La lectura angular se realiza directamente por la posición de la señal respecto a los valores del limbo. Se pueden realizar simultáneamente las lecturas sobre los limbos horizontal y vertical, porque pueden visualizarse en un solo ocular las imágenes correspondientes a ambos limbos.

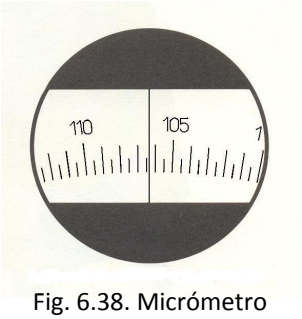


Fig. 6.38. Micrómetro de observación directa. Lectura: 106,4^g

- **De escala o estima:** En este caso, a la imagen del limbo se superpone una escala grabada que equivale a la menor división del limbo, normalmente un grado. La escala se mueve solidaria a la alidada y la lectura angular se realiza estimando la posición de la señal que acompaña al valor del limbo y que se sitúa dentro de la escala. Generalmente sólo se podrá leer un valor angular, excepto en el caso que dos valores del limbo coincidan exactamente con los extremos de la escala, también en este caso será sólo un ángulo el medido. Se pueden realizar simultáneamente lecturas en ambos limbos.

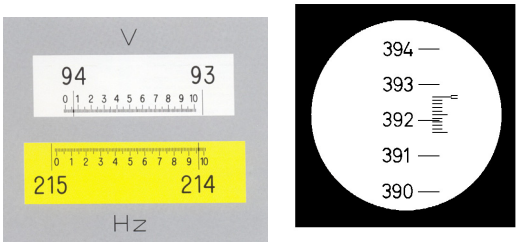


Fig. 6. 39 y 6.40. Micrómetros de escala o estima. Lecturas: (6.39) V: 94,06^g; Hz: 214,96^g; (6.40) 392,65^g

- **Encuadrado:** En este tipo de micrómetro al limbo se le superpone una doble señal que funciona como índice de lectura. La diferencia con los tipos anteriores es que en este caso el valor angular inferior al grabado en el limbo se obtiene, no por estima, sino leyéndolo en una escala auxiliar. Para leer el ángulo se centra, en la doble señal del índice, un valor del limbo mediante un tornillo denominado *micrométrico*. Este tornillo acciona un dispositivo de placa plano-paralela que mide el valor angular entre la posición en que

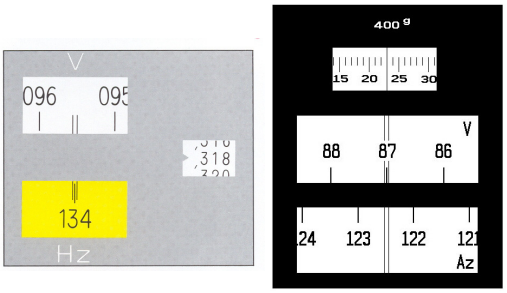


Fig. 6.41 y 6.42. Micrómetros encuadrados. Lecturas: (6.41) Hz: 134,318^g; (6.42) V: 87,23^g

quedó el limbo y una posición con una división del limbo centrada en la doble marca. Cuando se actúa sobre el tornillo micrométrico se observa un movimiento que no es real, sino que es producido por el dispositivo indicado. No se pueden realizar al mismo tiempo las lecturas sobre los dos limbos, se debe actuar sobre el tornillo micrométrico para centrar el valor del limbo sobre el que se desee leer y posteriormente volver a accionar el tornillo para centrar el valor del otro limbo. La lectura angular será el valor centrado del limbo más el que indique la escala auxiliar.

Existen otros tipos de micrómetros que permiten la lectura simultánea de los ángulos situados diametralmente opuestos del limbo para eliminar errores de excentricidad del limbo,

6.6.1.1.- Sensibilidad y apreciación de micrómetros

La *sensibilidad del micrómetro* se define como la décima parte de la menor división del mismo. La *apreciación* coincide con la sensibilidad, siempre que la menor división se vea con magnitud aparente superior o igual a *2mm*, al ser *0,2mm* el límite de la apreciación visual. En caso contrario, la apreciación será aquella fracción de la menor división con tamaño aparente igual a *0,2mm*.

La menor división será la del limbo en micrómetros de observación directa y la división más pequeña de la escala auxiliar en los de escala o estima y en los encuadrados.

6.6.2.- Medida electrónica de ángulos

Actualmente la mayoría de los instrumentos topográficos no montan los micrómetros descritos anteriormente, sino que utilizan dispositivos que transforman un valor angular analógico en valor digital que puede ser utilizado por un procesador en cálculos, presentado en pantalla o almacenado para descarga posterior.

Estos limbos, al igual que los ópticos tradicionales, suelen ser de vidrio, sobre los que se han grabado líneas trasparentes y opacas, por lo que para leer sobre ellos se utiliza un sistema formado por un diodo emisor de luz (L.E.D) y un fotodetector. En función del paso o no la luz a través de ellas, producirá la generación o no en el fotodetector de una corriente que permita transformar un giro del limbo en un valor digital.

Vamos a estudiar a continuación los distintos tipos de limbos.

6.6.2.1.- Limbos incrementales

Estos limbos (figura 6.43) no tienen ningún tipo de valor grabado en su superficie por lo que no pueden realizar lecturas aisladas de ángulos, tan sólo cuantifican variaciones angulares. Por ello, el operador debe introducir un valor inicial al que el microprocesador sumará algebraicamente los valores calculados. En la

mayoría de los instrumentos que utilizan estos limbos, si no se le indica otro valor, utiliza el último que utilizó en la sesión anterior.

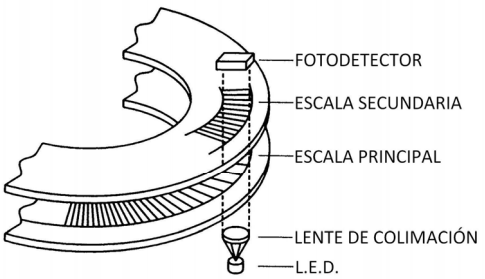


Fig. 6.43. Limbo incremental

Para medir los ángulos se utilizan dos limbos en los que se han grabado zonas transparentes y opacas y se ha dispuesto un L.E.D. y un fotodetector opuesto a éste. Un limbo se mueve con la alidada y el otro está fijo. El giro relativo de ambos limbos genera una interferencia en la señal luminosa emitida por el L.E.D. y que es recibida por el fotodetector y reconocida como una onda senoidal. A continuación esta onda se convierte en forma digital o cuadrada, lo que permite el recuento de pasos de onda o impulsos y, a partir de ellos, el cálculo del valor angular girado. A este sistema se le denomina "patrón muaré".

6.6.2.2.- <u>Limbos absolutos</u>

Disponen de información grabada en su superficie que permite determinar un punto único en ésta. Dentro de ésta clase se distinguen dos tipos:

- **Limbo absoluto estático.** El limbo no se mueve al realizar la medición, lleva grabadas una serie de líneas en código binario (figura 6.44) que representan cada una un determinado valor angular, por lo que los valores de ángulo se obtienen por diferencia entre lecturas angulares, de modo semejante a los limbos ópticos tradicionales. Para aumentar la precisión llevan grabado sobre el propio limbo un micrómetro de coincidencia.

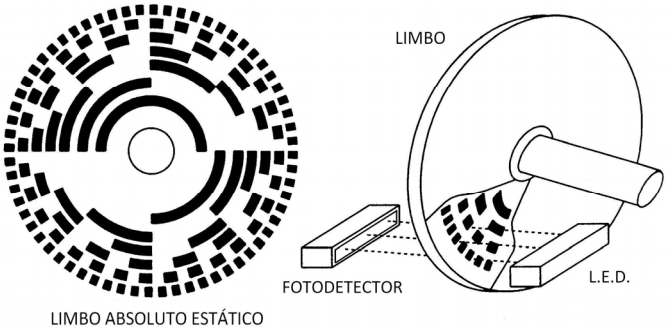


Fig. 6.44. Limbo absoluto estático

- **Limbo absoluto dinámico.** El limbo está dividido en una serie de sectores transparentes y opacos (figura 6.45). Existen dos conjuntos de lectura, uno que gira solidariamente con la alidada y otro que permanece fijo y que establece el origen de lecturas. Cuando se desea medir un ángulo, se pone en marcha un motor síncrono que mueve el disco, de manera que los sensores determinan la lectura

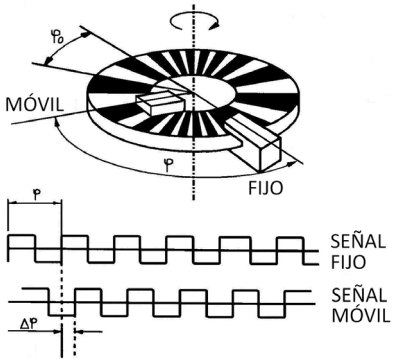


Fig. 6.45. Limbo absoluto dinámico

angular con ayuda de los sectores en que está dividido el limbo y que generan señales senoidales en los fotosensores. El valor del ángulo se obtiene contando el número de períodos completos entre ambos fotosensores (n) y el desfase del periodo incompleto ($\Delta\varphi$)

$$L = n\,\varphi + \Delta\varphi$$

En los limbos verticales, o *eclímetros*, se utilizan los mismos sistemas, pero la necesidad de situar sin error el cenit y la línea de horizonte hace que estén dotados de dispositivos compensadores, en principio semejantes a los utilizados en los teodolitos y taquímetros convencionales, pero adaptados para transformar cualquier desviación en información que entienda el microprocesador del que disponen y poder introducir las correcciones necesarias. Estos dispositivos pueden ser de distintos tipos: péndulo, por reflexión o refracción en un líquido, etc.

6.7.- MIRAS Y REFLECTORES

6.7.1.- Miras topográficas parlantes

Las *miras* se emplean en los sistemas clásicos de medida de distancias por métodos indirectos y para el cálculo de desniveles. Son reglas graduadas, que suelen ir divididas en metros, decímetros y centímetros y, en algún caso, hasta en milímetros o dobles milímetros. Normalmente su longitud es de cuatro metros y, para facilitar su transporte, pueden ser telescópicas o dividirse en tramos.

Fig. 6.46 y 6.47. Miras topográficas parlantes

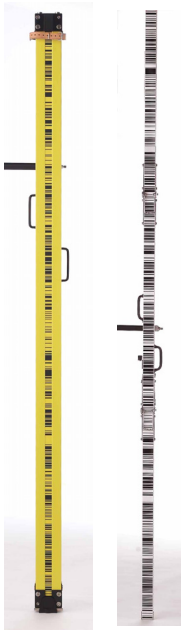


Fig. 6.48 y 6.49. Miras de código de barras

La lectura de mira se realiza en el punto en el que se superpone sobre ésta el hilo horizontal del retículo. Cuando el retículo es estadimétrico debe realizarse la lectura de los tres hilos horizontales (lectura superior, central e inferior) para, además de utilizarlas en las expresiones en las que intervienen, comprobar que no existe equivocación en ellas.

Las miras son de madera o aluminio, pintadas en colores vivos para hacerlas más visibles a grandes distancias. En algunos casos se les incorporan niveles de burbuja para garantizar su correcto posicionamiento, reduciendo así los errores que se derivan de la falta de verticalidad de las mismas. Las casas constructoras emplean distintos sistemas para indicar las divisiones y facilitar la lectura de la mira.

Las miras utilizadas en planimetría suelen ir divididas en centímetros, mientras que para trabajos altimétricos se utilizan, normalmente, miras divididas en milímetros o dobles milímetros.

6.7.2.- Miras topográficas de código de barras

Con el fin de reducir el tiempo de trabajo y mejorar la precisión de las lecturas se utilizan miras con código de barras.

Para ello se equipa al instrumento con un procesador digital electrónico de imágenes que permite determinar la altura de mira y la distancia del instrumento a ésta. La lectura del código de barras de la mira se hace en forma electrónica y automáticamente y puede ser utilizada por el procesador del instrumento.

Las miras suelen ser de aluminio, telescópicas o desmontables. Las más precisas son de una pieza y llevan el código de barras grabado sobre una pletina de INVAR, aleación que conserva prácticamente inalterable su longitud ante la variación de la temperatura. Esta pletina va unida al armazón metálico mediante un dispositivo que hace que la dilatación del armazón no afecte a la banda de código de barras. Suelen montar niveles esféricos, para facilitar su colocación vertical, y asas de sujeción.

Fig. 6.50. Placa de apoyo

Para mejorar la precisión de las nivelaciones, en los puntos intermedios que no estén materializados mediante señales, se pueden utilizar placas para apoyar la mira, tanto las de código de barras como las parlantes antes comentadas (figura 6.50).

6.7.3.- Reflectores

El *reflector* es necesario en la medida de distancias mediante ondas ya que devuelve la señal enviada por el distanciómetro. Esta devolución puede realizarse mediante reflexión pura o por reflexión-refracción.

La señal emitida puede ser devuelta por placas reflectantes en cortas distancias, pero en la mayoría de los casos es necesaria la utilización de *prismas* de reflexión total.

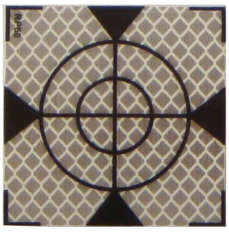


Fig. 6.51. Placas reflectantes

Fig. 6.52. Prisma direccional

Fig. 6.53. Prisma 360º

Fig. 6.54. Bastón porta prisma

Los prismas pueden ser de distintos tipos; el más usual es el resultado de truncar el vértice de un cubo de vidrio, de manera que presente una base equilátera y lados isósceles y con las caras recubiertas de una capa reflectante, de manera que devuelva la onda incidente paralela a la dirección

inicial y después de sufrir tres reflexiones. Otro tipo de prisma es un triedro trirrectángulo de paredes especulares.

Existen prismas direccionales que, para que devuelvan la señal, deben estar dirigidos hacia el instrumento topográfico que la emite, y otros se construyen para que devuelvan la señal sea cual sea la dirección desde la que la reciban; son los prismas de *360º*.

Los reflectores o prismas se suelen montar en bastones portaprismas, que son telescópicos y están dotados de nivel esférico.

6.7.2.- Jalones

Son parecidos a los bastones portaprismas. Los jalones suelen estar construidos de metal y tienen una punta de acero. Su longitud suele ser de *2* o *3m* y de algunos centímetros de diámetro. Son de una pieza o desmontables y normalmente están pintados a franjas rojas y blancas para que faciliten su visibilidad. Sirven para indicar la localización de puntos o la dirección de alineaciones.

Fig. 6.55. Jalones

6.8.- TIPOS DE INSTRUMENTOS TOPOGRÁFICOS

Podemos clasificar los instrumentos topográficos en tres grandes grupos, según su objetivo sea la determinación de ángulos, de distancias o de desniveles.

- **Medida de ángulos: goniómetros**.- Los instrumentos topográficos para la medida de ángulos se denominan *goniómetros*. Los goniómetros completos, como el *teodolito*, miden ángulos acimutales y verticales. Otros, además de la medida de ángulos, permiten también la determinación de distancias, como el *taquímetro* y la *estación total*.

- **Medida de distancias**.- La medida de distancias se puede realizar por métodos directos, con instrumentos como el *rodete*, la *cinta metálica* o los *hilos invar*. Los taquímetros y las estaciones totales emplean métodos indirectos.

- **Medida de desniveles**.- Los instrumentos más especializados para la medida de desniveles son los *niveles* o *equialtímetros*, de visual horizontal. Los taquímetros y las estaciones totales permiten determinar el desnivel mediante visuales inclinadas.

7. MEDIDA Y REPRESENTACIÓN DE ÁNGULOS Y DISTANCIAS

Todo levantamiento topográfico consta de tres etapas bien diferenciadas. La primera es la planificación del trabajo, atendiendo a las características del terreno a levantar, a la escala del plano a obtener, etc., siempre con el objetivo de que los errores que se cometan no superen la tolerancia fijada. La segunda es el *trabajo de campo* y va a consistir en la realización, sobre el terreno, de todas las mediciones necesarias para la obtención de un plano topográfico. Esta toma de datos se reduce, en todos los casos, a la medida de ángulos y de distancias. En la tercera etapa, *trabajo de gabinete*, se realizarán los cálculos necesarios para la determinación de las coordenadas de los puntos y, finalmente, el trazado del plano.

Los *instrumentos topográficos* nos van a permitir acometer los trabajos propios de la segunda etapa. Con ayuda de estos instrumentos se realizarán las mediciones que sea preciso para determinar las coordenadas de los puntos de interés. Los instrumentos topográficos se emplean también para los trabajos de replanteo, de los que nos ocuparemos más adelante.

7.1.- MEDIDA DE ÁNGULOS

Los ángulos a medir pueden ser de dos tipos: para planimetría se necesitan ángulos medidos sobre el plano horizontal, que se llaman *ángulos acimutales*; para altimetría se miden ángulos sobre un plano vertical, o *ángulos cenitales*. Los ángulos verticales se utilizan también para el cálculo de distancias por métodos indirectos, como se verá más adelante.

Los aparatos topográficos empleados para la medida de ángulos reciben el nombre genérico de *goniómetros*. Los goniómetros que leen ángulos horizontales se denominan *acimutales* y los que leen ángulos verticales, *eclímetros*. Es frecuente que los goniómetros puedan medir ambos tipos de ángulos y que además permitan medir distancias por métodos indirectos.

7.1.1.- Definición de ejes, limbos y movimientos

El esquema general de un goniómetro responde a la figura 7.1.

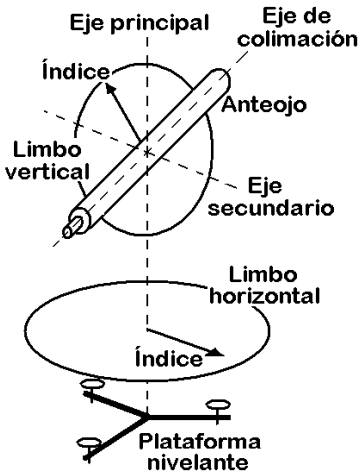


Fig. 7.1. Esquema general de un goniómetro

En primer lugar encontramos un anteojo que puede girar alrededor de un *eje horizontal*, llamado *eje secundario*. El eje que atraviesa el anteojo, llamado *eje de colimación*, debe ser perpendicular al eje secundario en todas las posiciones del anteojo.

El giro del anteojo en torno al eje secundario arrastra un índice que permite efectuar lecturas sobre un *círculo vertical graduado*, o limbo vertical. Así se pueden leer ángulos cenitales.

El conjunto puede girar a su vez en torno a un *eje vertical*, que se llama *eje principal* del aparato. Este giro arrastra un índice que permite efectuar lecturas sobre un *círculo horizontal graduado*, o limbo horizontal, que es fijo, pudiendo medir así ángulos horizontales. El eje secundario debe ser perpendicular al eje principal en todas las posiciones del aparato.

El mismo efecto puede conseguirse si son los limbos los que giran y los índices los que permanecen fijos y, de hecho, así sucede en algunos goniómetros. Nosotros vamos a referirnos a los goniómetros que emplean el primer sistema: limbos fijos e índices móviles.

Mediante el giro en torno a los ejes principal y secundario, el anteojo puede adoptar cualquier posición y visar (*colimar*) cualquier punto en el espacio.

Las partes móviles del aparato, que giran en torno a cada eje, se denominan *alidadas*. La alidada horizontal estará formada por los elementos que giran en torno al eje vertical: anteojo, limbo vertical con su índice y el índice del limbo horizontal. La alidada vertical está constituida por los elementos que giran en torno al eje secundario: anteojo e índice del limbo vertical.

El conjunto se apoya sobre una plataforma con tres *tornillos nivelantes*, que permiten situarla en posición horizontal (nivelarla).

A este esquema corresponden los siguientes aparatos topográficos: teodolito, taquímetro, estación total y brújula taquimétrica.

7.1.2.- <u>Orígenes de ángulos</u>

Los ángulos se miden en topografía con ayuda de círculos graduados, que se denominan *limbos*, y de índices o sistemas de lectura. Los limbos pueden ser de graduación sexagesimal o centesimal, siendo más habitual este segundo caso. La apreciación en la medida de ángulos dependerá de las prestaciones del instrumento que se emplee.

7.1.2.1.- <u>Ángulos horizontales</u>

Si desde un punto *A* (figura 7.2) lanzamos visuales a dos puntos *P* y *Q*, el ángulo que interesa en topografía no es el *PAQ*, sino el rectilíneo del diedro formado por los planos verticales que contienen respectivamente a las visuales *aP* y *aQ* y que se cortan en la recta vertical que pasa por *A*. Este ángulo es el formado

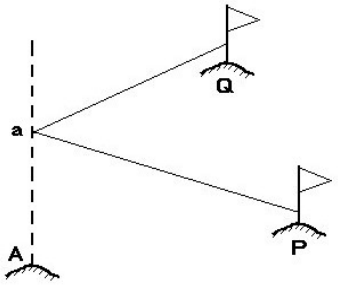


Fig. 7.2. Ángulos horizontales

por las proyecciones de las dos visuales sobre el plano horizontal.

Los planos verticales que contienen a las distintas visuales se cortan en el eje principal del aparato. Los ángulos horizontales se miden sobre el círculo horizontal o limbo horizontal. Los ángulos medidos sobre este limbo corresponderán siempre a las proyecciones horizontales de las visuales, como es fácil apreciar al observar el esquema del goniómetro.

La graduación de los limbos puede ser sexagesimal (0^0-360^0) o centesimal (0^g-400^g). Si las lecturas crecen en el sentido de avance de las agujas del reloj, la graduación es directa y en caso contrario, inversa.

Los instrumentos topográficos no pueden medir directamente acimutes, a menos que hayan sido previamente *orientados*, sino ángulos horizontales referidos a una dirección arbitraria. Sin embargo, veremos como resulta posible transformar estas lecturas angulares en acimutes, lo que nos va a permitir trabajar con ángulos medidos siempre desde una misma referencia, con las ventajas que esto conlleva.

El hecho que permite utilizar distintas referencias en el limbo horizontal es la posibilidad que presenta éste para modificar su posición, es decir, la posibilidad de girar el limbo cambiando la posición del origen de la graduación, del cero. Pueden darse tres casos (figura 7.3):

• **Referencia al Norte verdadero: acimutes**.- Cuando la graduación del limbo es directa y su cero se sitúa en la dirección de la meridiana decimos que el instrumento está orientado. Entonces, las lecturas acimutales estarán referidas al Norte verdadero y serán, por tanto, acimutes.

• **Referencia al Norte magnético: rumbos**.- Con determinados instrumentos topográficos es posible orientar al Norte magnético, determinando ángulos acimutales referidos a la meridiana magnética, que se denominan rumbos. Para transformar un rumbo en acimut, debemos conocer la declinación magnética en el momento y lugar de la medición.

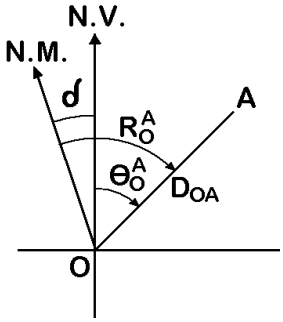


Fig. 7.3. Norte verdadero y norte magnético

• **Referencia arbitraria**.- Con frecuencia se miden ángulos acimutales sin haber orientado previamente el instrumento topográfico. La referencia de estos ángulos será, por tanto, arbitraria y tendremos que realizar determinados cálculos si deseamos transformarlos en acimutes.

7.1.2.2.- <u>Ángulos verticales</u>

Los ángulos verticales se miden con limbos situados en posición vertical, que se denominan *eclímetros*, y al igual que en el caso de ángulos horizontales, los eclímetros pueden llevar graduación sexagesimal o centesimal, siendo más frecuente este segundo caso.

La diferencia fundamental en la medida de ángulos horizontales y verticales consiste en que en estos últimos no se puede girar el limbo como en los horizontales, sino que el origen de la graduación debe estar obligatoriamente en unas posiciones concretas, que pueden ser:

• **En la recta cenit-nadir**.- En este caso la graduación cero del eclímetro se situará en la parte superior del mismo. Las lecturas se realizarán con referencia a la recta vertical y los ángulos así medidos se denominan *distancias cenitales* φ. Es el caso más habitual.

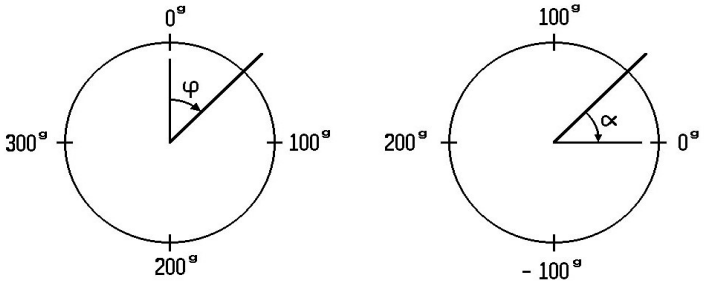


Fig. 7.4. Limbos verticales

• **En el plano horizontal**.- Las lecturas realizadas con eclímetros cuya graduación cero ocupa la posición horizontal, se denominan *alturas de horizonte* α. Para un determinado ángulo vertical, los valores φ y α son complementarios: $\varphi + \alpha = \pi/2$.

7.2.- CAUSAS DE ERROR EN LA MEDIDA DE ÁNGULOS

7.2.1.- Errores sistemáticos

Como ya sabemos, en Topografía podemos cometer errores de dos tipos: sistemáticos y accidentales. Los errores sistemáticos son los debidos a descorrecciones del propio instrumento y actúan siempre en el mismo sentido, por ejemplo, errores de construcción, de ajuste, etc. Los errores de este tipo se reducen a valores despreciables con las verificaciones y correcciones, que debemos aplicar a todo instrumento topográfico antes de emplearlo y que estudiaremos en capítulos posteriores.

7.2.2.- Errores aleatorios o accidentales

Los errores aleatorios o accidentales dependen de nuestros sentidos y de las limitaciones de los instrumentos empleados, por lo que varían en magnitud y signo; por ello, es este tipo de errores el que debemos estudiar en profundidad para poder reducirlos a valores tales que el error total nunca supere la tolerancia fijada en cada trabajo topográfico.

Los errores aleatorios que se cometen en medida de ángulos son:

- Error de verticalidad del eje principal.
- Error de dirección.
- Error de puntería.
- Error de lectura.

Cada uno de estos tipos de error actúa independientemente, de manera que el conjunto de ellos generará el error angular total, que será el valor que debemos tener en cuenta para un trabajo topográfico en particular.

7.2.2.1.- <u>Error de verticalidad del eje principal</u>

Es el error que se comete cuando, al estacionar el instrumento topográfico, el eje principal no queda en una posición perfectamente vertical. Este error toma valores distintos si se realizan lecturas de ángulos cenitales o acimutales, por lo que a continuación estudiamos ambos casos:

• **Observaciones cenitales**.- En la figura 7.5 vemos que el instrumento topográfico se estaciona en el punto *O*. *OV* es la vertical del lugar o posición exacta que debería ocupar el eje principal y *OE* es la posición que ocupa realmente el eje principal en una determinada observación. Al realizar una lectura cenital respecto a un punto *A*, se obtiene un ángulo φ', distinto del que se obtendría de estar el eje principal perfectamente vertical φ. Por tanto, cometemos un determinado error, que sería: $e = \varphi - \varphi'$.

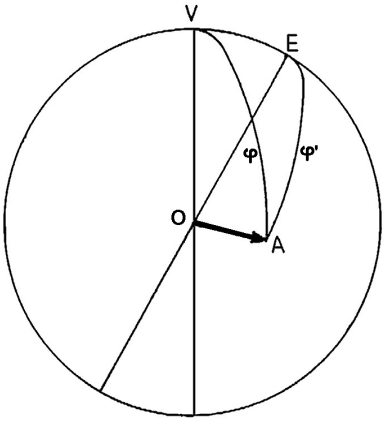


Fig. 7.5. Error de verticalidad del eje principal. Observaciones cenitales

Se calcula como error máximo en la medida de distancias cenitales o alturas de horizonte el valor de 1/3 de la sensibilidad del nivel de burbuja (como sabemos, expresado en segundos sexagesimales), pues sólo en función de éste podemos situar perfectamente vertical el eje principal. Así, el máximo error que podemos cometer será:

$$e_{vc} = \frac{1}{3}\ S''$$

Cuando el instrumento topográfico dispone de nivel electrónico se utiliza como error el valor de la precisión del estabilizador del compensador P_e.

• **Observaciones acimutales**.- En este caso, debido a la posición del eje principal, al leer un ángulo acimutal obtenemos una lectura h', cuando lo que deberíamos medir, si el eje principal fuese vertical, sería h. Por tanto, el error cometido en esa lectura será: $e = h - h'$

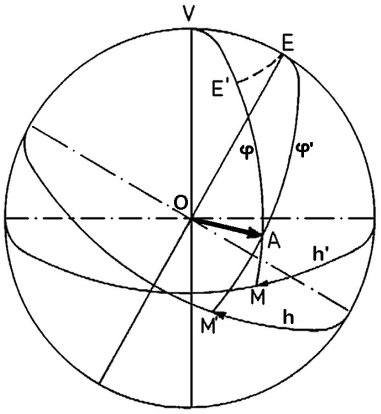


Fig. 7.6. Error de verticalidad del eje principal. Observaciones acimutales

También en este caso se calcula el error máximo, que podemos cometer en lecturas acimutales, en función de la sensibilidad del nivel de burbuja que lleve instalado el instrumento topográfico, y será:

$$e_{va} = \frac{1}{12}\ S''$$

En caso de instrumentos que montan nivel

electrónico es:

$$e_{va} = \frac{1}{4} P_e$$

siendo P_e la precisión del estabilizador del compensador.

Se observa claramente que el error de verticalidad del eje principal es mucho más importante en la determinación de ángulos verticales que en la de ángulos acimutales.

Las expresiones que calculan en error de verticalidad del eje principal en función de la sensibilidad del nivel de burbuja son válidas para teodolitos, taquímetros, estaciones totales y brújulas taquimétricas que estén dotados de dicho elemento. En el caso de las estaciones totales que dispongan de compensadores se utilizarán las expresiones en función del estabilizador del compensador. En el caso de que el equipo funcione con los compensadores desactivados se utilizarán las expresiones en función de la precisión del nivel.

Hay autores que afirman que si el instrumento está dotado de compensadores de doble eje, horizontal e índice vertical, se despreciarán estos errores.

7.2.2.2.- <u>Error de dirección</u>

Es el error que se producirá cuando el eje principal del instrumento topográfico no pase exactamente por el punto de estación, ó también, cuando la mira, prisma o señal de puntería a la que visamos, no se sitúe perfectamente sobre el punto que pretendemos medir. Este error sólo afecta a la medida de ángulos acimutales.

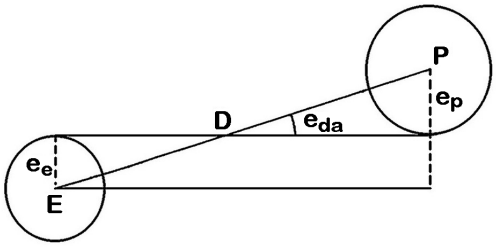


Fig. 7.7. Error de dirección

En la figura 7.7, sea *E* el punto de estación y *P* el punto al cual visamos. Designamos por e_e la máxima desviación admisible de la plomada del instrumento topográfico utilizado respecto al punto de estación y por e_p la separación máxima admisible de la mira o señal de puntería respecto al punto visado. Se observa que el radio e_p es mayor que e_e, hecho totalmente lógico, puesto que las dimensiones en planta de la mira siempre serán mayores que el punto materializado sobre el terreno y, por tanto, será difícil posicionarla exactamente. En el caso de utilizar jalones, sobre todo si están dotados de nivel esférico, el valor de e_p disminuye considerablemente.

Tomamos el caso más desfavorable, es decir, que se cometa el máximo error admisible tanto con el instrumento topográfico como con la mira o jalón, de manera que la visual sea tangente a ambos círculos por la parte interior.

Llamando e_{da} al error de dirección, este ángulo será el que forme la recta *EP* con la paralela a la visual más desfavorable trazada desde *E*.

Siendo *D* la distancia reducida *EP*, se tiene:

$$sen\ e_{da} = \frac{e_e + e_p}{D}$$

Como e_{da} es un ángulo muy pequeño, se puede sustituir el seno por el arco expresado en radianes, obteniéndose como valor máximo admisible del error de dirección expresado en segundos sexagesimales:

$$e_{da} = \frac{e_e + e_p}{D}\ 206265$$

Si utilizamos plomada mecánica y mira topográfica, se admite para el cálculo del valor máximo del error: $e_e + e_p = 5cm = 0{,}05m$

Si se utiliza la plomada óptica y mira topográfica, el valor máximo del error será: $e_e + e_p = 2{,}5cm = 0{,}025m$

Si utilizamos una estación total dotada de plomada óptica o láser y jalón porta prisma con nivel esférico, el caso habitual, el valor máximo del error es: $e_e + e_p = 1{,}25cm = 0{,}0125m$

En cualquier caso, siempre puede ser calculado este error para cada instrumento, teniendo en cuenta las condiciones específicas de la observación: altura de estacionamiento, altura y estabilidad de prisma, etc.

Vemos que el error de dirección es inversamente proporcional a la distancia, así, en trabajos topográficos en que esta es pequeña, el error de dirección es, con mucho, el mayor de todos los errores accidentales.

7.2.2.3.- <u>Error de puntería</u>

Cuando visamos un punto con el anteojo de un instrumento topográfico, la puntería consiste en mover el anteojo hasta hacer coincidir el centro de la cruz filar con el punto que queremos colimar, que estará señalado por una mira o una señal de puntería. Debido a imperfecciones de nuestra vista, el enrase de los hilos del retículo con la señal nunca será perfecto y se cometerá un error de puntería.

En el caso de instrumentos óptico-mecánicos:

• **Observaciones cenitales**.- Se adopta como error máximo visando a una señal de puntería bien definida, enrasando el hilo horizontal con la división de la señal:

$$e_{pc} = \frac{20''}{A}\ (1 + \frac{4A}{100})$$

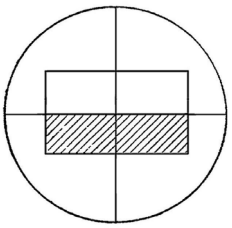


Fig. 7.8. Error de puntería. Cenital enrasada

siendo *A* el número de aumentos del anteojo. En el caso de visuales lanzadas a una mira topográfica, sin enrasar con la separación entre divisiones y determinando a estima, por tanto, la fracción de división, o en el caso de colimar prismas desde grandes distancias, se admite un error máximo mayor:

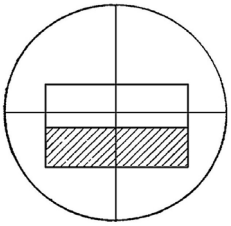


Fig. 7.9. Error de puntería. Cenital no enrasada

$$e_{pc} = \frac{50''}{A}\ (1 + \frac{4A}{100})$$

• **Observaciones acimutales**.- Se admite que son más precisas que las cenitales. La puntería estará bien realizada cuando el vertical divide a la mira o el jalón en dos mitades aparentemente iguales. El error máximo de puntería en observaciones de este tipo será:

$$e_{pa} = \frac{10''}{A}\ (1 + \frac{4A}{100})$$

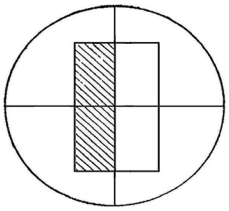


Fig. 7.10. Error de puntería. Acimutal

En el caso de estaciones totales:

• **Observaciones cenitales y acimutales.-** Cuando se lanzan visuales sobre prisma, los errores cenitales y acimutales dependen de la distancia de la visual. Así, si la distancia es corta y se observa con claridad el prisma, la expresión del error cenital y acimutal será:

$$e_{pc} = e_{pa} = \frac{20''}{A}\ (1 + \frac{4A}{100})$$

Fig. 7.11. Error de puntería. Estación total

Si la distancia es grande y no se puede observar con claridad el prisma, se utilizará:

$$e_{pc} = e_{pa} = \frac{50''}{A}\ (1 + \frac{4A}{100})$$

Sin embargo, si para la medida del ángulo acimutal no se utiliza el prisma, sino que se visa el jalón, la expresión que calcula en error máximo será:

$$e_{pa} = \frac{10''}{A}\ (1 + \frac{4A}{100})$$

7.2.2.4.- <u>Error de lectura</u>

En los instrumentos óptico-mecánicos, el error de lectura es el cometido al hacer la lectura sobre el dispositivo que permite leer valores de ángulo sobre los limbos. Dicho dispositivo será un micrómetro. El error dependerá de la *apreciación* de dicho micrómetro, que se define como la décima parte de la menor división, siempre que esa menor división se vea con un tamaño aparente superior o igual a *2mm*. El error máximo será *2/3* de la apreciación *m*, expresada en segundos, tanto en observaciones cenitales, como acimutales:

$$e_{lc} = e_{la} = \frac{2}{3}\, m''$$

Cuando se utiliza una estación total, el error de lectura dependerá del dispositivo electrónico que permite leer ángulos sobre los limbos y cuya precisión *p* viene indicada por el fabricante como la desviación típica para ángulos horizontales y verticales (según ISO 17123-3). Estos valores suelen expresarse en segundos sexagesimales o en *mgon* (*1 mgon = 10 segundos centesimales*).

$$e_{lc} = e_{la} = \frac{2}{3}\,p$$

7.2.2.5.- Error angular total

Como se vio en el capítulo 4, el error total de una operación en la que intervienen varias causas de error, independientes entre sí, será:

$$E_a = \sqrt{e_{va}^2 + e_{da}^2 + e_{pa}^2 + e_{la}^2}$$

en observaciones acimutales.

$$E_c = \sqrt{e_{vc}^2 + e_{pc}^2 + e_{la}^2}$$

en observaciones cenitales.

Todos los errores angulares aleatorios que hemos estudiado en este capítulo están expresados en segundos y, por tanto, también lo estarán los errores totales E_a y E_c.

7.3.- MEDIDA DE DISTANCIAS. MEDIDA DIRECTA DE DISTANCIAS

Además de la medida de ángulos, se precisa en Topografía la medida de distancias para que, a partir de ángulos y distancias, podamos calcular las coordenadas planas del punto visado con relación al punto de estación.

Puesto que en Topografía interesa determinar distancias reducidas, los instrumentos de medida de distancias deben disponer de procedimientos para reducir las distancias naturales medidas con ellos. Estos procedimientos consisten en la determinación, junto con la distancia natural, del ángulo vertical o bien del desnivel entre los dos puntos cuya distancia medimos.

Las distancias se pueden medir mediante dos métodos:

- **Métodos directos**.- Consisten en comparar la distancia a medir con un instrumento patrón, cuya longitud se conoce.
- **Métodos indirectos**.- Aprovechan determinadas propiedades para calcular distancias, sin necesidad de que se establezca un contacto directo entre el instrumento de medida y el terreno a medir. Son los más usados en Topografía.

7.3.1.- Medida directa de distancias

Entendemos, por tanto, como medida directa de distancias la que consiste en comparar la magnitud a medir con un instrumento de medida, previamente calibrado

(por ejemplo, cinta métrica). Esto se realizará superponiendo el instrumento de medida a la magnitud real a medir y anotando el número de veces que la longitud de aquél entra en ésta.

La medida directa constituye el método más sencillo para la medida de distancias. Sin embargo, su uso ha quedado restringido a la medida de distancias muy cortas y a la de la altura del instrumento. En Topografía, la forma más frecuente de medir distancias son los métodos indirectos, bien estadimétricos o por medio de ondas.

Para pequeñas distancias, por ejemplo, medida de la altura del aparato, se emplea el flexómetro. Para distancias mayores se emplea la cinta metálica, más precisa.

7.3.1.1.- <u>La cinta métrica. El flexómetro</u>

La cinta métrica utilizada en medición de distancias se fabrica en una delgada lámina de acero, aluminio o fibra de vidrio. La longitud de las cintas métricas es variable, las más usuales son de *10*, *15*, *20*, *25*, *30*, *50* y *100m*. Los flexómetros son metálicos, de longitudes entre *1* y *10m* y suelen incluir un mecanismo para el rebobinado automático de la cinta.

Fig. 7.12. Flexómetro

Fig. 7.13 y 7.14. Cintas métricas

Dependiendo del tipo de material con el que está construida una cinta se puede obtener una determinada precisión. La Homologación CEE crea tres clases (clase I, II, III.). Para cada clase se indican tolerancias, recogidas en la tabla siguiente, a una tensión y temperatura dadas. Las cintas más precisas son las de clase I, aunque las más utilizadas son clase II, normalmente metálicas, o clase III, de fibra de vidrio.

CLASE DE PRECISIÓN	LONGITUD (*m*) / TOLERANCIA (*mm*)								
	1 m	*2 m*	*3 m*	*5 m*	*10 m*	*20 m*	*30 m*	*50 m*	*100 m*
CLASE I	*±0,2*	*±0,3*	*±0,4*	*±0,6*	*±1,1*	*±2,1*	*±3,1*	*±5,1*	*±10,1*
CLASE II	*±0,5*	*±0,7*	*±0,9*	*±1,3*	*±2,3*	*±4,3*	*±6,3*	*±10,3*	*±20,3*
CLASE III	*±1,0*	*±1,4*	*±1,8*	*±2,6*	*±4,6*	*±8,6*	*±12,6*	*±20,6*	*±40,6*

Por lo general están protegidas dentro de un rodete metálico ó de PVC (carcasa cerrada), las cintas a partir de *30m* se construyen también con soporte abierto por lo general en forma de cruceta lo que facilita la limpieza y el rebobinado. Siempre se debe comprobar el inicio de la graduación de la cinta, ya que es variable (a extremo de anilla, a origen de cinta o desplazado). La dilatación del tejido, causado por la tracción, hace que la precisión de la cinta disminuya, por lo que es preciso contrastarla, sobre todo si se trata de cintas largas.

Existen cintas para mediciones de precisión, pero que requieren toda una serie de procesos de estacionamiento y de correcciones por calibración, temperatura, pandeo y pendiente. Todo esto hace que, como se comentó anteriormente, la medida de distancia se realice habitualmente por métodos indirectos. En cualquier caso, siempre pueden ser utilizadas, con las debidas precauciones.

También aquí se cometen errores sistemáticos y aleatorios o accidentales. Entre los primeros tenemos errores por falta de alineación, de horizontalidad, de pandeo y por falta de contraste. Los errores aleatorios son de lectura y falta de coincidencia de un tramo y del siguiente. Teniendo en cuenta ambos tipos de errores, se establece una estimación del error medio, según las expresiones:

En terreno fácil: $e = 0{,}00032\ L + 0{,}0022\ \sqrt{L}$

En terreno difícil: $e = 0{,}00032\ L + 0{,}0078\ \sqrt{L}$

donde *L* es la distancia medida.

7.4.- MEDIDA INDIRECTA DE DISTANCIAS POR METODOS ESTADIMETRICOS

Aunque el fundamento es sencillo, la medición de distancias por métodos directos es una operación complicada, larga, tediosa y costosa cuando la distancia es larga o el terreno es irregular, de manera que la mayoría de las distancias no se pueden medir con este método. Para la medida de distancias en Topografía se emplean, normalmente, métodos indirectos.

El primero de los métodos que vamos a estudiar es el método estadimétrico.

7.4.1.- Fundamento de los métodos estadimétricos

Si observamos una regla vertical, o mira topográfica, a través del espacio que queda entre dos listones separados verticalmente una distancia *h*, tendremos, por semejanza de triángulos (figura 7.15):

$$\frac{D}{d} = \frac{H}{h} \qquad D = \frac{d}{h}\ H$$

siendo *d* la distancia del ojo a los listones, *D* la distancia del ojo a la regla y *H* la longitud del tramo de regla que abarca la vista entre los dos listones.

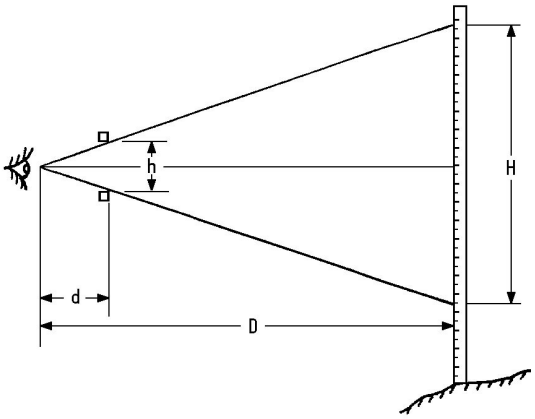


Fig. 7.15. Fundamento de la estadimetría

Conociendo el valor de las otras tres magnitudes, podremos calcular la distancia *D*. Este es el fundamento de los métodos estadimétricos para la medida indirecta de distancias.

$$D = K\ H$$

Existen distintas formas de aplicar la expresión fundamental de la estadía, lo que da lugar a tres categorías o tipos de estadímetros. La que utilizan normalmente los instrumentos topográficos es la denominada 1ª categoría, en la que permanece constante la relación *d/h=K* y lo que varía es la magnitud *H* que abarca nuestra vista sobre la regla graduada. La constante *K* se denomina *constante diastimométrica* y los anteojos suelen construirse de manera que su valor sea 100.

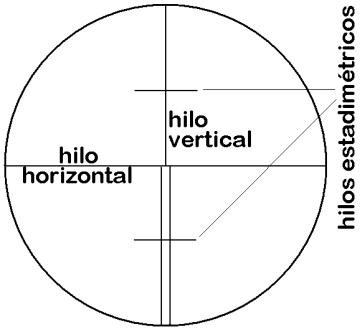


Fig. 7.16. Retículo estadimétrico

En la práctica, los dos listones se sustituyen por dos hilos horizontales grabados en el retículo del anteojo y equidistantes del *hilo central* denominados *hilos estadimétricos* (figura 7.16). Esta categoría de estadímetros se denomina también *de mira variable e hilos fijos*. La mayor de las tres lecturas, *lectura superior* L_s, será la correspondiente al hilo que ocupa la posición superior (H_S en la figura 7.18), la *lectura inferior* L_i corresponderá al hilo que ocupa la posición inferior (H_I) y la *lectura axial* o *central* L_c corresponde al hilo central (H_C). Como cada una de estas lecturas de mira corresponde a la distancia desde donde está apoyada la mira hasta la posición del hilo, la magnitud *H* se obtendría:

$$H = L_S - L_I$$

Por tanto, la expresión para el cálculo de la distancia mediante la estadimetría, para visuales horizontales sobre una mira topográfica situada verticalmente, será:

$$D = K\,(L_S - L_I)$$

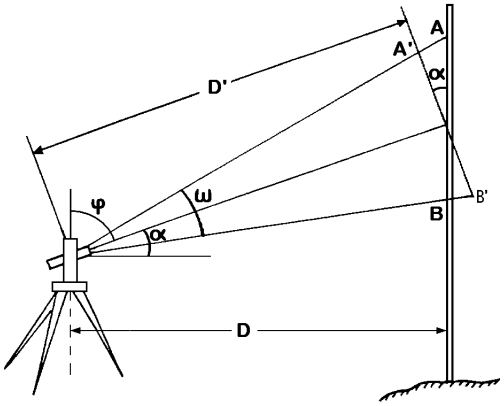


Fig. 7.17. Visuales inclinadas

En el caso más general, visuales inclinadas, la expresión a emplear debe tener en cuenta la inclinación de la mira respecto a la visual y la de ésta respecto a la horizontal, por lo que será (figura 7.17):

$$D = K\,(L_S - L_I)\cos^2\alpha = K\,(L_S - L_I)\,sen^2\varphi$$

siendo α la altura de horizonte y φ la distancia cenital de la visual.

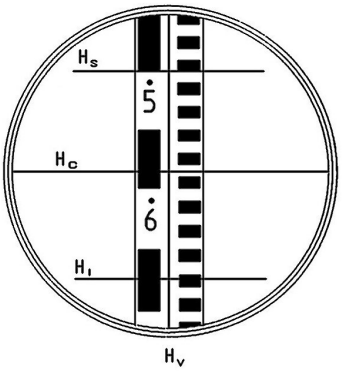


Fig. 7.18. Lectura de mira

La lectura debe tomarse hasta la cifra correspondiente a los milímetros o medios milímetros en miras de nivelación, cuya menor división en un doble milímetro o milímetro, aunque en miras divididas en centímetros esta cifra no podrá leerse con mucha exactitud.

Para hacer una lectura de mira anotaremos las lecturas de los tres hilos del retículo, comprobando que no

hay equivocación: la lectura del hilo central coincide con la media aritmética de las de los hilos extremos:

$$L_c = \frac{L_s + L_i}{2}$$

Es una práctica nada recomendable la de anotar directamente la diferencia entre las lecturas extremas, ya que no permite comprobación.

7.5.- MEDIDA INDIRECTA POR MÉTODOS ELECTRÓNICOS

La medida de distancias mediante estadimetría acarrea grandes errores además de no poder medir grandes distancias. Todo esto llevó a que a mediados del siglo XX se iniciasen los estudios para medir la distancia mediante ondas y obtener así un método de medida indirecta de distancias más preciso y que permitiera medir grandes distancias.

7.5.1.- Sistema en la medición de distancia. Comparación de fase

Para medir las distancias mediante ondas existen dos posibles métodos:

- Medir el tiempo invertido por una señal, de velocidad conocida, en recorrer una distancia. Para ello es necesario disponer de un reloj de muy alta precisión.
- Comparar la onda original con la reflejada desde el punto al que se quiere medir la distancia, determinando el desfase entre ambas y calculando así la distancia.

Es este segundo método el que utilizan prácticamente todos los instrumentos utilizados en Geodesia y Topografía.

En función del tipo de onda utilizada, los medidores electrónicos de distancia se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- **Equipos electromagnéticos. Telurómetros**

La onda portadora está incluida en la zona de las microondas del espectro electromagnético, con una longitud de onda (λ) comprendida entre *1m* y *1cm* aproximadamente. Estos equipos pueden medir distancias mayores de *150km*, con precisiones del orden de *10mm±3ppm*. Necesitan un reflector activo que emita una onda de retorno y no precisan una colimación precisa entre emisor y reflector. Su utilización principal es la medida de largas distancias propias de las triangulaciones geodésicas.

- **Equipos electroópticos. Geodímetros y distanciómetros**

Si la onda portadora utilizada pertenece a la zona visible del espectro, con λ entre *0,7* y *0,4µm*, son los denominados *geodímetros* o distanciómetros de luz visible. La fuente de la portadora suele ser un láser gaseoso de Helio-Neón. El alcance

máximo suele estar en torno a los *60km* y con precisiones del orden de *5mm±1ppm*. El reflector es pasivo y su utilización fundamental es en triangulaciones geodésicas.

Cuando la onda utilizada se sitúa en el infrarrojo, con λ entre *1,2* y *0,7µm* estamos ante los denominados distanciómetros infrarrojos, que son los instrumentos que habitualmente utilizamos en Topografía. En este caso, la fuente de la portadora suele ser un diodo de arseniuro de Galio (GaAs). Utilizan reflectores pasivos y tienen un alcance máximo de *20km* con precisiones de *5mm±1ppm*. Los utilizados normalmente en los instrumentos topográficos no superan los *5km* y pueden alcanzar, en los instrumentos más precisos, valores de *0,2mm±0,2ppm*.

Actualmente existen en el mercado equipos que pueden efectuar mediciones de distancia sin reflector. Estas distancias no suelen superar los *100m*, aunque existen equipos que pueden realizar este tipo de mediciones para distancias superiores a *1.000m*. La distancia que se puede medir depende tanto del distanciómetro como de la rugosidad y el color de la superficie sobre la que mide. Se trata también de distanciómetros infrarrojos con el mismo tipo de diodo para la generación de la portadora, pero que bajo determinadas condiciones consiguen mayores rendimientos de éste. Sus precisiones son semejantes a las indicadas anteriormente.

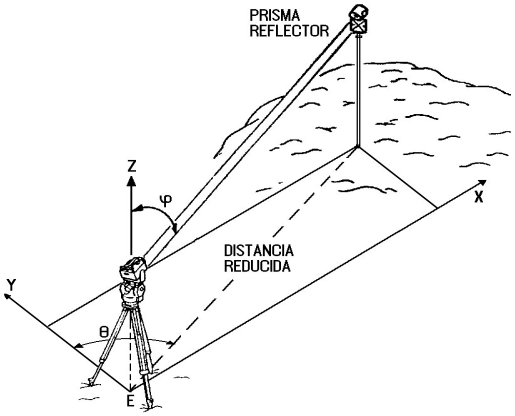


Fig. 7.19. Estación total y prisma

El procedimiento utilizado en este último tipo de aparatos para la medida de distancias se denomina comparación de fase y es el siguiente: El emisor, un diodo de arseniuro de galio, emite una onda, perteneciente a la zona infrarroja del espectro, que actúa como portadora de una determinada frecuencia, por consiguiente, con una determinada longitud de onda. La señal viaja hasta el punto extremo de la alineación a medir y allí es devuelta por un prisma de reflexión total, construido generalmente de vidrio con forma de triedro trirrectángulo y paredes especulares. La onda reflejada es captada de nuevo, en el distanciómetro, por un fotorreceptor, normalmente un fotodiodo, en el que se generará una corriente que se traduce en información para el microprocesador.

Por tanto, el recorrido total realizado por la señal es el doble de la distancia a calcular *D*. Esta distancia se mide gracias a la modulación que se induce sobre la onda portadora, ya que a cada frecuencia corresponde una determinada longitud de onda λ, de manera que si conocemos el número de longitudes de onda *N* que ha descrito la señal desde la salida del distanciómetro hasta su nueva recepción, conoceremos la distancia en una

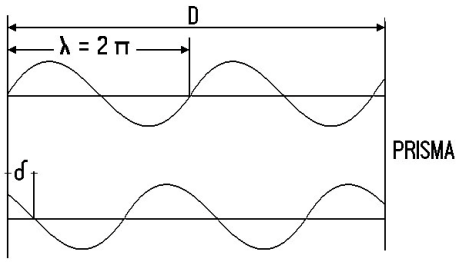


Fig. 7.20. Medida de la distancia.

primera aproximación. Para determinar este número de longitudes de onda, los distanciómetros utilizan hasta cuatro longitudes de onda distintas.

Para calcular con precisión la distancia se usa una onda de frecuencia conocida y se compara a la salida del emisor y a su regreso, en el receptor, a fin de conocer el desfase δ producido entre ambas situaciones (figura 7.20). A partir de este dato se calcula, ya con alta precisión, la distancia, con la expresión:

$$2 \quad D = N \ \lambda + \frac{\delta}{2\pi} \lambda$$

7.5.2.- Precisión de un distanciómetro

El error que se produce en la medida de una distancia con un distanciómetro se expresa, como ya hemos visto, de la siguiente forma: *Amm+Bppm*.

La existencia de dos componentes es debida a que existen errores que son no proporcionales o independientes de la distancia medida (*A*) y que se expresan como un valor en milímetros y errores que son directamente proporcionales a la distancia medida (*B*) y que se expresan como partes por millón, o lo que es lo mismo, milímetros por kilómetro medido.

A continuación vamos a estudiar brevemente los errores que componen cada parte.

7.5.2.1.- Errores proporcionales a la distancia

Los errores serán:

- **Corrección atmosférica**

Como ya se ha visto, la medida de la distancia depende de la longitud de onda y ésta es función de la velocidad de propagación en el medio y de la frecuencia. La longitud de onda se calcula teóricamente en función de la velocidad de la luz en el vacío, pero en la atmósfera la velocidad de propagación de la onda es inferior, dependiendo de las condiciones atmosféricas (temperatura y humedad).

La cantidad de vapor de agua contenida en el aire está relacionada con la presión atmosférica y esta última es mas fácil de calcular que la humedad, por lo que suele ser éste el valor utilizado.

Las casas fabricantes suministran los distanciómetros con unos valores de corrección que aplica directamente el equipo. Pero estos valores corresponden a unas condiciones atmosféricas que no suelen ser las que se dan en el momento de la medición, por lo que, si queremos que el valor de la distancia sea preciso, debemos indicar al equipo los valores de temperatura y presión atmosférica en ese momento.

Al distanciómetro se le podrán introducir estos valores y él calculará automáticamente la corrección, o en el manual dispondrá de una gráfica donde, entrando con los valores de temperatura y presión ó humedad, nos indicará en valor de corrección que debe ser introducido en el equipo

- **Error producido por la frecuencia de modulación**

Si se producen variaciones en la frecuencia de modulación de la portadora cambia la longitud de onda, lo que conlleva que para una misma distancia varíe el número de ciclos y por tanto la medición de la distancia por parte del distanciómetro. Este error se suele producir por desajustes del oscilador y solo puede ser medido e introducido el valor de corrección en el equipo por laboratorios especializados.

Además de estos errores, también es aplicable el error de refracción atmosférica, que se explicará en el Tema 13, y que suele ser corregido automáticamente por el equipo.

7.5.2.2.- <u>Errores no proporcionales a la distancia</u>

Estos errores serán:

- **Errores del distanciómetro. Constante del instrumento**

No coincidencia del centro geométrico y el centro eléctrico del distanciómetro (punto desde el que se emite la onda). Toda distancia medida por un equipo topográfico se debe referir a un punto del eje principal de dicho equipo, lo que permita la proyección precisa sobre el punto de estación. Si el centro eléctrico del distanciómetro no coincide con dicho eje principal, se debe tener en cuenta el desplazamiento para el cálculo de la distancia. Es un valor constante y depende del diseño del equipo.

- **Errores del reflector. Constante del prisma**

La onda incidente llega al reflector y, tras sufrir tres reflexiones, sale del reflector en una dirección paralela a la de llegada y con sentido contrario. Debido al índice de refracción del cristal y a las reflexiones sufridas se producirá una variación en la fase de la onda, lo que implica la determinación de un valor de distancia a corregir en el cómputo general. La posición del prisma respecto a la vertical del punto señalado por el jalón también debe ser tenida en cuenta. Se debe indicar al equipo el prisma que está utilizando o, en su defecto, la constante de dicho prisma, para que la utilice en el cálculo de la distancia.

7.5.3.- <u>Errores aleatorios ó accidentales en la medida de la distancia por métodos electrónicos</u>

Los errores serán los siguientes:

- **Error en la medida de la distancia mediante distanciómetro (e_d)**

Es el error estudiado anteriormente y que viene indicado para cada equipo por parte del fabricante bajo la expresión: *Amm+Bppm*. El valor indicado es el error estándar o desviación típica, obtenido para ese equipo. Lo denotaremos como e_d.

- **Error de dirección (e_e y e_p)**

Ya explicado para medida de ángulos, sólo que aquí utilizaremos independientemente los valores de error para el punto de estación e_e y para el punto visado e_p con los siguientes valores de error:

e_e con plomada mecánica: *0,0275m*.
e_e con plomada óptica o láser: *0,0025m*.
e_p con jalón: *0,01m*.
e_p con trípode dotado de plomada óptica o láser: *0,0025m*.

- **Error de inclinación del jalón (e_i)**

Es el error que se comete en la medida de la distancia por la inclinación del jalón porta prisma.

La situación normal es que el jalón esté dotado de nivel esférico, pero la evidente dificultad de mantenerlo calado o la posibilidad de rotura o desajuste de éste hace que se tomen, a la hora de determinar los errores máximos aleatorios los siguientes valores:

β con nivel esférico: 1^g
β sin nivel esférico: 3^g

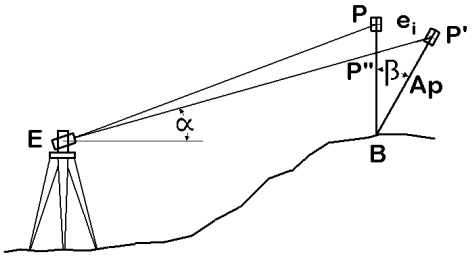


Fig. 7.21. Error de inclinación del jalón.

La posición del jalón perfectamente nivelado permite calcular la distancia *EP*, pero debido al error de inclinación la distancia calculada será *EP´*, con lo que el error cometido es *P"P´*. Como ya hemos indicado, la máxima inclinación del jalón no pasará de 3^g, porque esa inclinación ya es detectable a simple vista. Este ángulo hace que se pueda considerar despreciable la distancia *PP"* y por tanto iguales *EP* y *EP"*. Por esto, calcularemos *EP´* como la suma de *EP* y *P"P´*.

Para obtener el valor de $e_i = P''P'$ utilizamos el triángulo *BP"P´*. Sabiendo que α es la altura de horizonte de la visual, β la inclinación del jalón y *Ap* la altura del prisma se aplica el teorema del seno en el citado triángulo y se obtiene:

$$\frac{e_i}{sen\ \beta} = \frac{Ap}{sen\ (100 + \alpha)}$$

y despejando, el error máximo debido a la inclinación del jalón será:

$$e_i = \frac{Ap\ sen\ \beta}{sen\ (100 + \alpha)} = \frac{Ap\ sen\ \beta}{cos\ \alpha}$$

En el caso de utilizar prisma sobre trípode este error no se contempla.

- **Error total en la medida de distancia con distanciómetro**

Por las mismas razones que se explicaron en la medida de ángulos, la expresión del error aleatorio total en la distancia será:

$$E_d = \sqrt{e_d^2 + e_e^2 + e_p^2 + e_i^2}$$

TEMA 8. NIVEL

8.1.- MEDIDA DE DESNIVELES

Los instrumentos topográficos pueden medir diferencias de altitud (desniveles) entre el punto de estacionamiento y el punto medido. La determinación de la altitud de este último se obtiene a partir de la altitud del punto de estacionamiento y del desnivel calculado, mediante lo que conocemos por arrastre de coordenadas.

Los dos procedimientos más habituales para la medida de desniveles son (figura 8.1):

- Con visuales horizontales: Se emplean instrumentos cuyos anteojos se sitúan en posición horizontal. El desnivel viene dado por la diferencia entre la altura del anteojo con relación al punto de referencia y la lectura realizada sobre una mira topográfica, o por la diferencia entre dos lecturas de mira en puntos distintos.
- Con visuales inclinadas: Se emplean instrumentos cuyo anteojo es capaz de moverse en el plano vertical. Para el cálculo del desnivel debe tenerse en cuenta el ángulo vertical y la distancia reducida entre el punto de referencia y el punto medido.

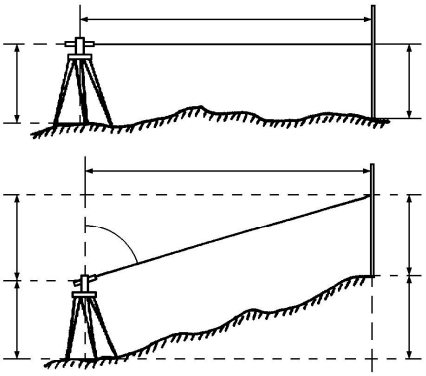


Fig. 8.1. Procedimientos de cálculo de desniveles

Los instrumentos más especializados para la medida de desniveles son los niveles o equialtímetros, de visual horizontal. Los taquímetros y las estaciones totales permiten determinar desniveles mediante visuales inclinadas, pero las precisiones alcanzadas son siempre inferiores a las obtenidas con nivel.

8.2.- ESQUEMA GENERAL Y FUNDAMENTO DEL NIVEL

El esquema general de un nivel es sencillo: Un anteojo y un dispositivo de nivelación, nivel de burbuja sólo o acompañado de otros mecanismos, que permita conseguir la horizontalidad del eje de colimación del citado anteojo. Para conseguir esto, el eje de colimación y el eje del nivel deben ser paralelos, y ambos perpendiculares al eje principal del

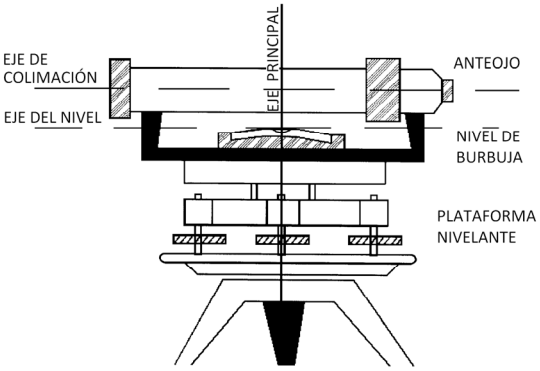


Fig. 8.2. Esquema general del nivel

instrumento. Para facilitar la nivelación se cuenta con los tornillos de la plataforma nivelante (figura 8.2).

Este esquema básico se completa con una serie de dispositivos:

- Los anteojos suelen ser estadimétricos, para permitir la determinación de la distancia reducida entre el punto de estación y el punto visado. Si no lo son, pueden disponer de un sistema para la medida de esa distancia mediante métodos electrónicos.
- Los niveles suelen incorporar también un limbo acimutal, generalmente de poca apreciación, sobre el que se leerán ángulos mediante micrómetros o de forma electrónica. Puesto que el anteojo del nivel ocupará una posición horizontal, no tiene sentido incorporarle un eclímetro, por lo que los niveles nunca medirán ángulos verticales.
- No suelen incorporar plomadas ópticas ni láser, ya que para la puesta en estación en niveles no es imprescindible.
- Los instrumentos que disponen de medida electrónica permiten el archivo y descarga de los datos de campo, así como la obtención de resultados in situ.

El fundamento de la determinación del desnivel con este instrumento consiste en garantizar que la visual lanzada por él es rigurosamente horizontal, lo que constituye un plano de comparación para distintos puntos del terreno. La forma de garantizar la horizontalidad es lo que da lugar a la existencia de distintos tipos de niveles, que estudiaremos más adelante.

El cálculo del desnivel con éste instrumento se puede realizar estacionándolo sobre un punto y colocando una mira topográfica sobre el otro punto entre los que se quiere determinar el desnivel. La expresión será, tal como se deduce de la figura 8.3 (*método del punto extremo*):

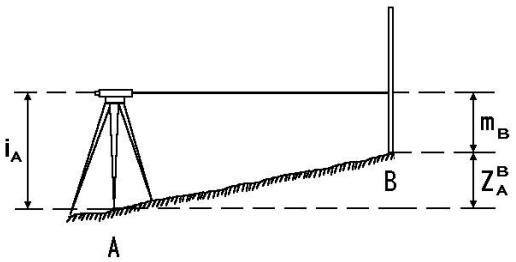


Fig. 8.3. Método del punto extremo

$$Z_A^B = i_A - m_B$$

Siendo i_A la altura del instrumento y m_B la lectura del hilo axial del retículo. En el caso de que la cruz filar sea estadimétrica, conviene tomar las tres lecturas y efectuar la comprobación que ya conocemos.

Los niveles suelen ser aparatos muy precisos, por lo que la aparición en la expresión anterior del término i_A, que siempre introduce un error importante, es indeseable. Para eliminarla se emplea ventajosamente el *método del punto medio* (figura 8.4.), consistente en estacionar el nivel en una posición intermedia entre los dos

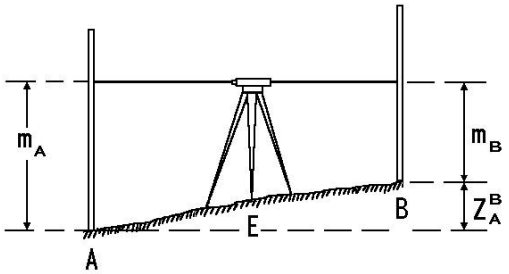


Fig. 8.4. Método del punto medio

puntos cuyo desnivel se pretende determinar. Esta posición *E* no tiene porqué estar alineada con los dos puntos, es suficiente con que las distancias desde el estacionamiento a cada una de las posiciones de la mira sean aproximadamente iguales.

El desnivel Z_A^B se determina entonces como la suma del desnivel de *B* respecto a *E* y la de *E* respecto a *A*. Como sabemos:

$$Z_E^B = i_E - m_B$$

$$Z_A^E = -Z_E^A = -(i_E - m_A) = m_A - i_E$$

El desnivel de *B* respecto a *A* será:

$$Z_A^B = Z_A^E + Z_E^B = m_A - i_E + i_E - m_B = m_A - m_B$$

Con este método no es necesario, por tanto, medir la altura del aparato.

8.3.- CAUSAS DE ERROR EN LOS NIVELES

Los errores aleatorios o accidentales que pueden producirse en las mediciones con nivel analógico, de línea o automático, son:

- Error de horizontalidad del eje de colimación:

Es el error que se comete cuando, al lanzar la visual a la mira topográfica, el eje de colimación no queda en una posición perfectamente horizontal. Como, por construcción, este eje es perpendicular al eje principal, lo que hacemos es verificar la verticalidad de éste.

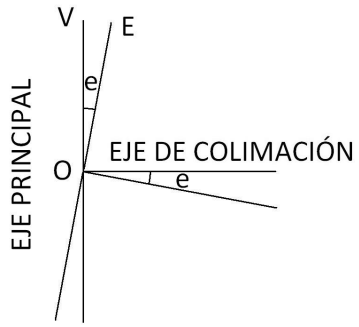


Fig. 8.5. Error de horizontalidad del eje de colimación

En la figura 8.5 vemos que, en un instrumento topográfico estacionado en el punto *O*, *OV* es la vertical del lugar o posición exacta que debería ocupar el eje principal y *OE* es la posición que ocupa realmente el eje principal en una determinada observación, que forma un ángulo *e* con la vertical. Al lanzar la visual, se produce un error de horizontalidad del eje de colimación que dependerá de *e* (de su magnitud y de la dirección en que se produce) y de la dirección de la visual. En el caso más desfavorable (figura 8.5), si el eje principal se inclina en la dirección de la visual, todo el error *e* se transmite a ésta.

Este error es el que se explicó en el tema 7 como error de verticalidad del eje principal para observaciones cenitales y, como se indicó, el valor adoptado será:

$$e_h = \frac{1}{3}\ s''$$

Siendo *s* la sensibilidad del nivel de burbuja.

Cuando el nivel disponga de un dispositivo que mejore la precisión del nivel de burbuja (nivel de coincidencia o de burbuja partida) se considerará la sensibilidad de este dispositivo.

Cuando se trate de un nivel automático, que disponga de un dispositivo distinto del nivel de burbuja para garantizar la horizontalidad del eje de colimación (compensador), se utilizará la desviación típica de éste. Su valor depende de la precisión del instrumento, pero suele ser menor de *1"*.

- Error de puntería:

Este error ya se explicó en el tema 7. En el caso del nivel no se podrá elegir un punto de la mira para enrasar el hilo horizontal sino que, normalmente, no coincidirá con una división de ésta, por lo que se deberá estimar la fracción de división no completa. En este caso, el error máximo admisible será:

$$e_p = \frac{50''}{A}\left(1 + \frac{4A}{100}\right)$$

Siendo *A* el número de aumentos del anteojo.

Este será en caso de los niveles de línea y de los analógicos automáticos, que utilizan mira topográfica.

- Como los errores anteriores se calcularon en segundos, el error total, también en segundos, vendrá dado por la expresión:

$$E_n = \sqrt{e_h^2 + e_p^2}$$

Los niveles electrónicos suelen indicar en los manuales metodologías de ajuste por medio de series de mediciones (norma ISO 17123-2), que permiten determinar para el instrumento los valores de corrección necesarios que permitan alcanzar las precisiones indicadas, normalmente como desviación estándar en *1km*. En estos instrumentos también se debe tener en cuenta la precisión de la mira de código de barras utilizada.

8.4.- CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE NIVELES

En la actualidad, los tipos de niveles que se puede encontrar son básicamente dos: los analógicos automáticos y los electrónicos automáticos. Los primeros utilizan miras topográficas convencionales y los segundos miras de código de barras.

Sin embargo, antes de pasar a describir estos tipos de niveles, repasaremos brevemente otros tipos anteriores.

8.4.1.- Niveles de plano y de línea

Nivel de plano

Es el tipo clásico de nivel. La horizontalidad de las visuales se consigue con un nivel de burbuja muy sensible y un sistema de tornillos nivelantes. Por tanto, una vez nivelado el instrumento de forma semejante a un taquímetro, al girar el eje de colimación en torno al eje vertical debe describir un plano horizontal, lo que justifica el nombre de éste tipo de niveles.

En la práctica, la sensibilidad de los niveles de burbuja está limitada. Ya hemos explicado que en un nivel tórico a mayor radio de curvatura corresponde mayor sensibilidad, pero radios de curvatura muy grandes no son prácticos por la dificultad de mantener calada la burbuja. Cualquier defecto constructivo que suponga que el eje de colimación no sea perfectamente paralelo a la plataforma nivelante, que contiene el nivel de burbuja, va a introducir errores en la medición.

Este tipo de niveles no se utiliza en la actualidad.

Nivel de línea

En los niveles de línea la horizontalidad se consigue independientemente para cada visual. Disponen de un nivel de burbuja esférico, para nivelar groseramente el instrumento con ayuda de los tornillos nivelantes, y de un nivel de burbuja más preciso, que se mueve con el anteojo y cuyo eje debe ser paralelo, por construcción, al eje de colimación. Este nivel de burbuja va provisto de un *tornillo de basculamiento fino*, que permite imprimir pequeños giros verticales al conjunto anteojo-nivel de burbuja, posibilitando el calado de la burbuja.

Fig. 8.6. Nivel de línea

Es imprescindible calar la burbuja de este nivel de burbuja una vez colimado cada punto y antes de efectuar la lectura de mira. Cuando posteriormente colimemos otro punto, debemos repetir el proceso, ya que por el procedimiento descrito sólo se garantiza la horizontalidad de la visual para la que hemos calado la burbuja. Por eso este tipo de instrumentos se les denomina niveles de línea.

El sistema que hemos descrito supone, como ya hemos comentado, que el eje del nivel de burbuja es paralelo al eje de colimación. Cualquier defecto que impida que se cumpla esta condición va a suponer la aparición de errores de medición.

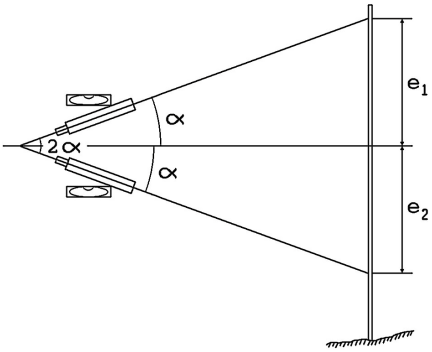


Fig. 8.7. Nivel de línea reversible

Para evitarlo se construyen los denominados niveles de línea reversibles, en los cuales el anteojo y el nivel de burbuja pueden girar 180^0 en torno a un eje que debe coincidir con el de colimación. El objetivo es poder lanzar dos visuales a cada punto, una con el anteojo en posición normal y otra con el anteojo girado. Daremos como resultado el promedio de las dos lecturas. Antes de realizar cada una de las dos lecturas, debemos calar la burbuja con el tornillo de basculamiento fino. Como se aprecia en la figura 8.7, cualquier falta e paralelismo entre ejes que introduzca un error en la lectura en posición normal, supone un error igual y de sentido contrario en la posición girada, siempre que hayamos tenido la precaución de nivelar antes de efectuar cada una de las lecturas.

Si el eje del nivel de burbuja y el eje de colimación forman un ángulo α una vez nivelado el instrumento en la primera posición, formarán el mismo ángulo una vez nivelado en la segunda posición. Por tanto, los errores e_1 y e_2 son iguales y de signo contrario. Si la lectura correcta es m, las lecturas que obtendremos serán:

$$m + e_1 \qquad \text{y} \qquad m + e_2 = m - e_1$$

El resultado de la medición será:

$$m_R = \frac{(m + e_1) + (m - e_1)}{2} = m$$

Para que le nivel de burbuja pueda ser empleado en las dos posiciones del anteojo, debe tratarse de un nivel de burbuja de doble cara, cuyo fundamento ya conocemos. Habitualmente, los niveles reversibles incorporan un nivel de burbuja de doble cara y de coincidencia.

Como hemos indicado, la doble lectura realizada con niveles de línea reversibles supone la eliminación de todos los errores sistemáticos. En consecuencia, siempre que se trabaje de esta forma, este tipo de niveles no precisa de ninguna corrección.

Este tipo de niveles consigue altas precisiones, pero debido al laborioso proceso de toma de datos no se encuentran ya en el mercado. Sin embargo, puesto que aún existen equipos en funcionamiento, es necesario conocerlo.

8.4.2.- <u>Niveles analógicos automáticos</u>

Este tipo de niveles está constituido por instrumentos dotados de dispositivos compensadores que obligan a que la visual sea horizontal, dentro de ciertos límites. Utilizan miras topográficas convencionales o parlantes.

Fig. 8.8. Nivel analógico automático

Están provistos de un nivel de burbuja esférico, que permite realizar una nivelación grosera con ayuda de los tornillos nivelantes. Una vez realizada esta operación, el

ángulo que el eje principal del nivel forma con la vertical el mismo que forma el eje de colimación con la horizontal y caerá dentro de los límites de actuación del mecanismo compensador, que es del orden de *10* a *15´*. Así, la nivelación definitiva se realiza automáticamente, llegando a precisiones del compensador inferiores a *1"* (*0,3 – 0,5"*). A continuación se realiza la lectura de mira.

Por tanto se trata de niveles cuya precisión depende de la del compensador, pero que pueden llegar a altas precisiones, y que tienen siempre la ventaja de su sencillez y rapidez de uso, por lo que son muy empleados.

Existen distintos mecanismos para el dispositivo compensador, entre ellos: espejos compensadores, prismas suspendidos, mecanismos pendulares con o sin amortiguación, etc.

8.4.3.- <u>Niveles electrónicos automáticos</u>

También denominados niveles electrónicos de código de barras por el tipo de mira que utilizan. Sus precisiones son variables, desde equipos de obra a los de máxima precisión.

Fig. 8.9. Nivel electrónico automático

Presentan la particularidad de realizar la medida de desniveles y de distancias de forma automática, lo que les permite almacenar los datos y transferirlos a un ordenador personal o realizar cálculos en el propio instrumento. Disponen de un dispositivo compensador semejante a los de los niveles analógicos pero con control electrónico del rango de inclinación.

El método de trabajo es semejante a los niveles analógicos automáticos: En primer lugar se cala el nivel de burbuja esférico para que el eje de colimación esté dentro del rango de trabajo del compensador y a continuación se pulsa la tecla de medida para todas las posiciones de la mira. Se reducen los tiempos de medida y se facilita el trabajo al eliminar la lectura de mira, aunque normalmente disponen de retículo que permite la toma de datos como en un nivel analógico automático.

Estos niveles electrónicos utilizan dos principios de funcionamiento para la lectura sobre la mira de código de barras: El de correlación y el basado en transformadas de Fourier. El primero utiliza una base de datos de la mira de código de barras de la que dispone y con la que compara la imagen de la mira captada por el detector para la lectura que está realizando, obteniendo así la altura de mira y la distancia. Y el segundo transforma la imagen de la mira al dominio de la frecuencia para determinar los datos de la visual.

Estos equipos pueden realizar mediciones aunque parte de la mira de código de barras quede oculta por obstáculos o fuera de campo. Pero para que la medida sea posible esta sección de mira no observada no debe superar el *20* o *30%*, según equipos.

8.4.4.- Niveles láser

La utilización del láser en los niveles da lugar a dos tipos de niveles láser: rotatorios y lineales.

Fig. 8.10. Nivel láser rotatorio

Niveles láser rotatorios

Disponen de un emisor láser que proyecta un haz sobre un prisma pentagonal que rota por la acción de un motor eléctrico. Este haz genera un plano en el espacio que puede ser horizontal, vertical o de un ángulo determinado, dependiendo de las características del nivel.

Fig. 8.11. Detector

El instrumento monta niveles de burbuja y dispositivos compensadores para garantizar la nivelación. La velocidad de giro del haz es variable según los instrumentos. El alcance del láser es también variable, pudiendo ser el radio mayor de *400m*. Los instrumentos de este tipo no suelen alcanzar nivelaciones de alta precisión, pero son muy útiles en nivelaciones de obra.

En las distintas aplicaciones puede bastar con la presencia del láser visible o pueden utilizarse detectores, que son sensores que determinan el eje del haz láser recibido. Pueden utilizarse de forma independiente o unidos a una mira convencional y suelen disponer de una pantalla de cristal líquido y señales acústicas para indicar la posición del eje del láser.

Fig. 8.12. Nivel láser lineal

Niveles láser lineales

Utilizan un láser semejante a los anteriores pero sin rotación y su utilización principal es la de alineación de tuberías. Disponen de dispositivos de nivelación y pueden emitir el láser con la inclinación que se le indique. Disponen también de señales de puntería para colocar en el extremo opuesto de la alineación.

Fig. 8.13. Señal de puntería

9. ESTACIÓN TOTAL

9.1.- TEODOLITO Y TAQUÍMETRO

El *teodolito* es un instrumento óptico-mecánico que responde a la definición de goniómetro completo, ya que mide ángulos horizontales y verticales con muy alta precisión. Estas precisiones exigen alta sensibilidad de los niveles de burbuja, grandes aumentos del sistema óptico de los anteojos y mucha apreciación de los limbos, hasta *0,1"*. Todo lo anterior hizo que fuese un instrumento fundamental para, por ejemplo, la realización de las redes geodésicas y en los trabajos geodésicos y topográficos de muy alta precisión.

El *taquímetro*, o teodolito-taquímetro, fue el instrumento óptico-mecánico más utilizado en trabajos topográficos. Se trata de un instrumento que, a los elementos de medida de ángulos acimutales y verticales propios del teodolito, incorpora la posibilidad de medir distancias, gracias a un anteojo estadimétrico. De esta forma, es posible determinar las coordenadas de cualquier punto visado con relación al punto de estación.

Los taquímetros tienen apreciaciones angulares inferiores a los teodolitos, entre 10^s y 2^m. Mayores apreciaciones son inútiles ya que al visar a una mira topográfica parlante el error de dirección superará al de lectura. En ambos instrumentos, los anteojos son de analatismo central.

El esquema general de un teodolito o de un taquímetro es semejante, y se recoge en la figura 9.1, separando sus tres bloques fundamentales:

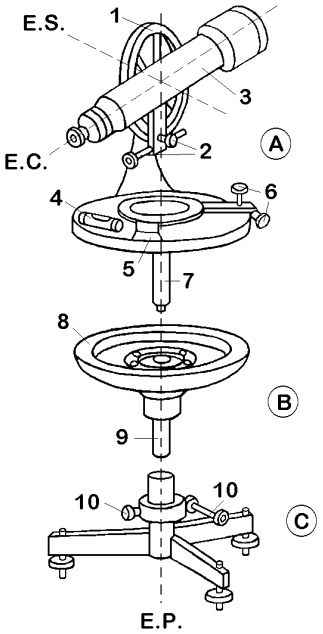


Fig. 9.1. Esquema teodolito o taquímetro

El bloque *A* constituye la alidada horizontal. En él se sitúa el eclímetro (*1*), con los tornillos de presión y coincidencia del movimiento de giro del anteojo en torno al eje secundario (*2*) y el propio anteojo (*3*). Puede observarse también un nivel de burbuja (*4*), el índice de lectura acimutal (*5*) y un juego de tornillos de presión y coincidencia (*6*) para el giro en torno al eje vertical. El bloque *A* termina en un eje vertical (*7*) que se aloja en otro eje hueco del bloque *B*.

En el bloque *B* se encuentran el limbo horizontal (*8*) y un eje hueco (*9*) que aloja al eje (*7*) y a su vez se introduce en otro eje hueco del bloque *C*.

El bloque *C* incluye la base nivelante y un tercer juego de tornillos de presión y coincidencia (*10*), también para

el giro en torno al eje vertical.

En el teodolito o el taquímetro pueden darse dos tipos de movimientos en torno al eje vertical (principal) del aparato. Si fijamos el tornillo de presión (*6*) y soltamos el (*10*), el movimiento de giro horizontal arrastra a los bloques *A* y *B* y, por tanto, al limbo horizontal. Este giro se llama *movimiento general del instrumento*. Si, por el contrario, fijamos el tornillo de presión (*10*) y soltamos el (*6*), lo que se mueve es el bloque *A*, permaneciendo fijo el conjunto de los bloques *B* y *C*. Este giro, que no arrastra el limbo acimutal, se denomina *movimiento particular de la alidada acimutal*. El movimiento general arrastra el limbo horizontal y el índice de lectura unidos solidariamente, por lo que la lectura no varía. El movimiento particular, por el contrario, arrastra el índice pero no el limbo, por lo que la lectura varía a medida que gira la alidada acimutal.

La existencia de estos dos movimientos nos permite hacer coincidir la graduación cero del limbo acimutal con una visual determinada y referir a ella todas las lecturas. Frecuentemente se toma como referencia la dirección del Norte verdadero, de forma que las lecturas tomadas sean acimutes. Esta operación se conoce como *orientar* el aparato y se estudiará posteriormente.

Normalmente los aparatos van blindados para proteger sus componentes (limbos, sistemas ópticos, etc.), pero todos ellos responden al esquema general que acabamos de estudiar.

Ambos tipos de equipos fueron utilizados en Geodesia y Topografía hasta hace unas décadas, cuando el desarrollo de la medida de ángulos y distancias por métodos electrónicos dejó obsoletos estos equipos óptico-mecánicos.

9.2.- ESTACIÓN TOTAL

La *estación total* permite la medida de ángulos y distancias, al igual que el taquímetro, con la diferencia de que ambas magnitudes se miden electrónicamente.

Como se vio en el tema 7, el fundamento de la medida electrónica de ángulos consiste en la medición y transformación de un valor angular analógico en un valor digital, obteniendo la medida angular a través de un microprocesador y pudiendo alcanzarse altas precisiones sin el lento proceso de lectura de ángulos en micrómetros encuadrados.

En el caso de la medida de distancias, la estadimetría no permite grandes precisiones ni mediciones a grandes distancias, lo que sí puede lograrse mediante la medición electrónica de distancias, que se estudió en el tema 7.

Ambas razones hacen que los teodolitos y taquímetros hayan sido sustituidos ventajosamente por las estaciones totales, de las que existe una gran variedad de modelos que cubren los distintos rangos de precisión.

Las estaciones totales están equipadas con software que permite:

- Realizar la toma y gestión de datos, como importación, exportación, modificación, etc.
- Facilitar operaciones básicas como estacionamiento, orientación, etc.
- Realizar aplicaciones como replanteo, cálculo de coordenadas, medida de superficies, volúmenes, alineaciones, etc.
- Conectar con otros equipos, por ejemplo receptores GPS, para compartir datos.
- Tomar imágenes que faciliten la interpretación posterior de los datos tomados.
- Etc.

Cada vez es más común que estén dotadas de pantallas que, además de presentar los datos tomados o calculados, nos permiten ver gráficamente el trabajo realizado.

Además, existe abundante software para instalar en ordenadores personales con el que se puede importar/exportar datos y realizar todos los cálculos topográficos para elaborar planos de levantamientos, proyectos de ingeniería, obtención de datos para el replanteo de dichos proyectos, etc.

El esquema general de la estación total es semejante al descrito para teodolito y taquímetro, con los mismos bloques y elementos. La diferencia está en los dispositivos electrónicos que permiten la lectura de ángulos y distancias, la nivelación, etc., que no aparecen en aquellos.

9.3.- OPERACIÓN

9.3.1.- Puesta en estación

Antes de comenzar a efectuar mediciones con un instrumento topográfico es preciso realizar la operación conocida como *puesta en estación*. La puesta en estación supone dos condiciones, que deben cumplirse simultáneamente:

- La nivelación del instrumento, usando para ello el nivel de burbuja más sensible o el dispositivo de nivelación del que esté provisto el instrumento en combinación con los tornillos nivelantes.
- El eje principal del instrumento debe pasar por el punto de estación, o punto al que vamos a referir las lecturas, lo que se confirmará con la plomada óptica o láser de la que disponga el instrumento.

Para ello, el instrumento se monta sobre un trípode, que tendrá sus tres patas bien clavadas en el suelo y su meseta lo más horizontal posible. Empleando la plomada mecánica y/o la plomada óptica o láser situaremos el eje del aparato sobre el punto de estación y luego lo nivelaremos. Si es preciso, moveremos de nuevo el aparato sobre la meseta del trípode y lo volveremos a nivelar. Repetiremos este proceso tantas veces como sea necesario, hasta que se cumplan simultáneamente las dos condiciones.

9.3.2.- Orientación

En el apartado 7.1.2.1 se explicó que el limbo horizontal tiene la particularidad de poder situar su cero u origen de mediciones en una posición determinada. Este hecho permite la orientación del instrumento topográfico, que podrá ser al Norte verdadero, al magnético o arbitraria.

El caso más habitual consiste en estacionar sobre un punto de coordenadas conocidas y orientar al Norte verdadero visando a otro punto de coordenadas también conocidas. Esta operación se conoce como *materializar* la *base topográfica* formada por los dos puntos.

La estación total puede realizar este proceso de dos formas:

- Estacionado el instrumento en el primero de los puntos de coordenadas conocidas se le indican las coordenadas de éste, bien tecleándolas en ese momento o recuperándolas de la memoria, y a continuación se le indican de la misma manera las coordenadas del otro punto al tiempo que se visa éste. La estación total procederá a la orientación de su limbo de forma automática.
- El acimut de la alineación se calcula a partir de las coordenadas de los dos puntos y, una vez estacionada la estación total en el primer punto, se hace coincidir la visual al otro punto con el valor del acimut, introduciéndolo en el instrumento. De forma similar podemos orientar al Norte magnético si conocemos el rumbo de una alineación y el instrumento está provisto de una declinatoria u orientadora, o a cualquier otra dirección que en un momento dado pueda interesar como referencia para las lecturas acimutales.

9.3.3.- Lecturas

Una vez estacionado el instrumento, y orientado si procede, se toman las lecturas. Para ello visamos los distintos puntos moviéndonos primero con los tornillos de presión de los movimientos vertical y horizontal, hasta que el punto aparezca en el campo de visión del anteojo y se fijan los dos tornillos de presión. Si la estación dispone de dispositivo de fricción sustituyendo a los tornillos de presión, el proceso es semejante, moviendo el instrumento manualmente. A continuación se opera con los de coincidencia hasta que el punto quede en el centro de la cruz filar, es decir colimado. En este momento se pueden observar las medidas angulares, pero si se necesita medir la distancia, se actuará sobre la tecla correspondiente.

Los datos correspondientes a una visual aparecen en la pantalla y pueden guardarse en la memoria del instrumento. Estos datos serán: número de punto, ángulos horizontal y vertical, distancia natural o reducida, desniveles, códigos y atributos, corrección *ppm*, constante de prisma, coordenadas *X*, *Y*, *Z* del punto visado o del punto de estación, altura de prisma y de instrumento, etc.

Para realizar estas mediciones de la forma más precisa posible, las estaciones totales disponen de una serie de correcciones, unas automáticas y otras que debemos activar.

Compensador de doble eje. Como se estudió en el tema 7, la inclinación del eje vertical genera errores en la medida de ángulos, tanto horizontales como verticales. Por ello las estaciones totales están dotadas de estos compensadores, que son dispositivos que corrigen los errores producidos por pequeñas desviaciones del eje principal. Aseguran, siempre que estén perfectamente ajustados, precisiones de *0,5* a *2"* dentro de su amplitud de operación que está en torno a *4* a *5´*. Estas magnitudes son propias de estaciones totales para aplicaciones topográficas.

Corrección atmosférica. También se estudiaron en el tema 7 los errores que genera la atmósfera al medir una distancia mediante ondas. El fabricante del instrumento indica estos errores mediante una expresión de la forma *Amm+Bppm*. Esta cuantía es cierta siempre y cuando se hayan introducido en la estación total los valores de temperatura y presión atmosférica existente en el momento de la medición. Para ello todas las estaciones totales disponen de un apartado específico en su software.

Además de estas correcciones, de la que disponen prácticamente todas las estaciones totales, existen otras, que son: error de colimación, error de perpendicularidad, curvatura terrestre, error de índice del círculo vertical, refracción, error de índice del compensador, excentricidad del círculo, reducción al nivel medio del mar, distorsión de la proyección, etc.

9.3.4.- Cálculo de distancias y desniveles

La estación total calcula, en primera instancia, la distancia natural entre el punto de estación y el punto visado, pudiendo presentar en pantalla este dato o ya calculada la distancia reducida. Pero normalmente, al descargar los datos brutos en un ordenador, la distancia que forma parte de los datos de una visual puede ser la distancia natural, por lo que debemos recordar la expresión que permite el paso entre una y otra:

$$D = D_N \cos \alpha = D_N \operatorname{sen} \varphi$$

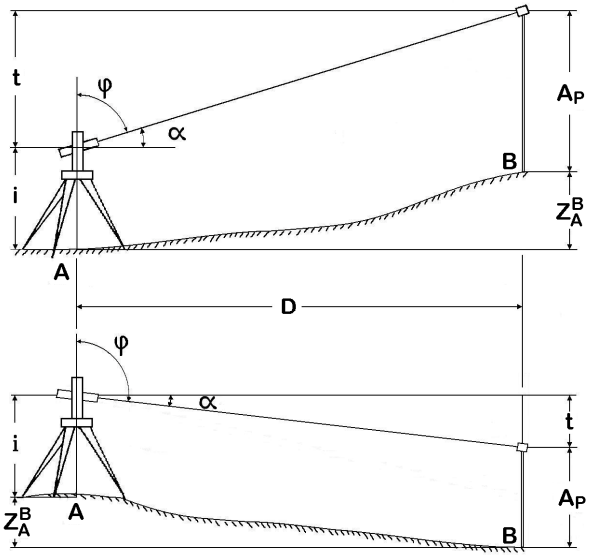


Fig. 9.2. Cálculo del desnivel con estación total

La estación total calcula, por defecto, el ángulo vertical como *φ* (distancia cenital), aunque puede presentarlo como *α* (altura de horizonte), como *%*, etc.

La estación total permite calcular el desnivel, es decir la diferencia de cota, entre el punto visado y el de estación, para ello se debe introducir en ella tanto la altura del prisma (*Ap*) como la del instrumento (*i*).

Pero también podemos calcularlo a partir de los datos brutos de la visual. Para ello necesitamos conocer la distancia reducida entre ambos puntos (*D*), la altura del instrumento en el punto de estación (*i*), el ángulo vertical de la visual (φ o α) y la altura del prisma sobre el punto (*Ap*). Cuando se utilice una estación total sin prisma, la altura de prisma será *0*.

Llamamos *tangente topográfica* o *tangente trigonométrica* (*t*) a la distancia vertical entre el centro del anteojo y la proyección del hilo central del anteojo.

Como se ve en la figura 9.2, este valor puede calcularse con la expresión:

$$t = \frac{D}{tg\ \varphi} = D\ \ cot\, g\, \varphi$$

cuando la estación total calcula distancias cenitales (φ), que es lo habitual. Cuando se trata de alturas de horizonte (α), la expresión sería:

$$t = D\ \ tg\ \alpha$$

El desnivel se calcula por la expresión:

$$Z_A^B = t + i - Ap$$

Esta fórmula se aplica tanto en visuales ascendentes ($\varphi<100^g$) como descendentes ($\varphi >100^g$). En efecto, en una visual ascendente se tendrá, según se ve en la figura 9.2:

$$t + i = Ap + Z_A^B$$

de donde se despeja directamente la expresión del desnivel.

En visuales descendentes, será:

$$i + (-Z_A^B) = (-t) + Ap$$

puesto que *t* es negativa, al serlo la tangente de φ, y Z_A^B es negativa, ya que la cota del punto visado es menor que la del punto de estación. Despejando, obtenemos la expresión anterior.

Es habitual indicar que el anteojo de instrumento topográfico está en posición normal o en posición invertida. Estas dos posiciones suelen ser indicadas por la estación total mediante un icono en pantalla.

Posición normal del anteojo es aquella en la que, para una visual determinada, la distancia cenital leída está entre *0* y 200^g. En esta posición, la tangente topográfica será positiva para visuales en ascenso y negativa para las en descenso, puesto que la tangente es positiva de *0* a 100^g y negativa de *100* a 200^g. Esto coincide plenamente con lo explicado en el cálculo del desnivel.

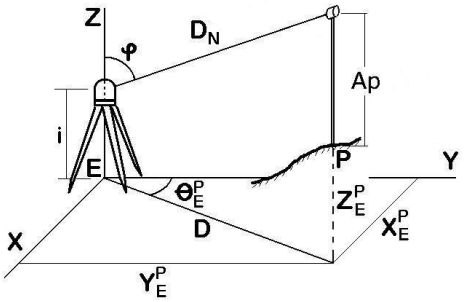


Fig. 9.3. Fórmulas taquimétricas

Posición invertida del anteojo es aquella en la que se obtiene una distancia cenital entre *200* y 400^g. En este caso, las tangentes topográficas para visuales en descenso serán positivas y negativas en ascenso, debido al signo que adoptan las tangentes. Es claro que en este caso no pueden ser utilizadas directamente los valores de las tangentes en el cálculo del desnivel.

Llamamos fórmulas taquimétricas a las expresiones que nos permiten calcular distancias y desniveles a partir de las lecturas efectuadas con un taquímetro. Estas expresiones, ya conocidas, son las siguientes (figura 9.3):

$$D = D_N \ \cos \alpha = D_N \ \operatorname{sen} \varphi$$

$$t = \frac{D}{tg\ \varphi} = D \ \cot g\ \varphi = D \ tg\ \alpha$$

$$X_E^P = D \ \operatorname{sen} \theta_E^P \qquad Y_E^P = D \ \cos \theta_E^P \qquad Z_E^P = t + i - Ap$$

9.4.- ERROR EN LA MEDIDA DEL DESNIVEL CON ESTACIÓN TOTAL

Los errores accidentales en medida de ángulos y distancias con la estación total se han estudiado ya en el tema 7.

Corresponde ahora obtener los errores accidentales en la medida del desnivel y que son los siguientes:

- Error por visuales inclinadas y en la medida de la distancia:

$$e_t = D\ [\ (1 + \frac{E_d}{D})\ tg\,(\alpha + E_c) - tg\ \alpha\ ]$$

D = distancia reducida
α = máxima altura de horizonte prevista
E_d = error total en la medida de la distancia. Véase 7.5.3
E_c = error angular cenital total. Véase 7.2.2.5

Dependiendo de la topografía de la zona objeto del levantamiento, podremos estimar cuales serán los mayores valores de altura de horizonte que van a darse. e_t tiene en cuenta, además del error derivado de la inclinación de las visuales, el cometido al medir mediante ondas la distancia reducida, que influye en el cálculo de la tangente topográfica *t*.

- Error en la medida de la altura de aparato: Se considera $e_i = 0'01$ metros.

- Error de verticalidad del prisma:

$$e_m = Ap \ \operatorname{sen}\beta \ tg\,(\alpha + \beta)$$

Ap = máxima altura de prisma prevista, en metros
β = máxima inclinación prevista del jalón porta prisma

α = máxima altura de horizonte prevista

El error total en altimetría será:

$$E_v = \sqrt{e_t^2 + e_i^2 + e_m^2}$$

y está expresado en metros.

9.5.- MÉTODOS PARA AUMENTAR LA PRECISIÓN EN LA MEDIDA DE ÁNGULOS

En cualquier instrumento de medida, por bien construido que esté y aunque se realice el trabajo con el máximo cuidado, se cometerán siempre errores. Como sabemos, estos errores pueden ser sistemáticos o accidentales.

Los errores sistemáticos proceden del propio aparato, son debidos a desajustes, a imperfecciones, a defectos de fabricación y a errores residuales tras la corrección del mismo. Actuarán siempre en el mismo sentido y con la misma magnitud, o siguiendo la misma ley. Estos errores pueden hacerse despreciables en aparatos bien conservados, debidamente contrastados y empleando el método operativo adecuado.

Los errores accidentales existirán siempre, dependen del operador y su estudio es de gran importancia para garantizar que el trabajo a realizar no va a dar lugar a errores que excedan la tolerancia preestablecida.

En mediciones angulares de cierta precisión se aplican los siguientes procedimientos:

9.5.1.- Regla de Bessel

Consiste este método en visar dos veces cada punto, primero con el anteojo en posición normal y después con el anteojo en posición invertida previa vuelta de campana al anteojo y giro, respecto al limbo horizontal, de 180° ó 200^g. En el instrumento se puede seleccionar graduación centesimal o sexagesimal, aunque por defecto está seleccionada la centesimal.

En estaciones totales centesimales y con eclímetros de distancia cenital, como el de la figura 9.4, las lecturas sobre limbos deberían cumplir, visando siempre el mismo punto en ambas posiciones, que:

$L_{HN} = L_{HI} \pm 200^g$ en el limbo horizontal.

L_{HN} y L_{HI} son las lecturas acimutales en las posiciones normal e invertida, respectivamente.

$L_{VN} = 400^g - L_{VI}$ en el limbo vertical.

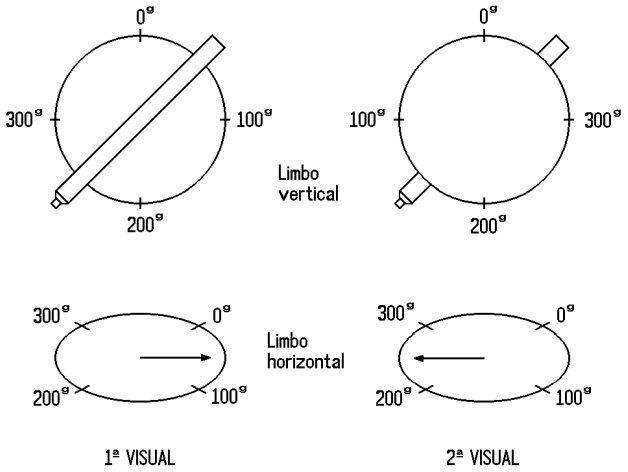


Fig. 9.4. Regla de Bessel

L_{VN} y L_{VI} son las lecturas cenitales en las posiciones normal e invertida, respectivamente.

Naturalmente, siempre se producirán errores, por lo que las dos igualdades anteriores no se cumplirán exactamente. Como resultado de la medición, una vez aplicada la regla de Bessel, se dará la media aritmética de las lecturas normal e invertida corregida:

$$L_H = \frac{L_{HN} + (L_{HI} \pm 200^g)}{2} \qquad L_V = \frac{L_{VN} + (400^g - L_{VI})}{2}$$

Aplicando esta regla eliminamos errores sistemáticos de ajuste (de desviación de índices, irregularidad del movimiento del tubo ocular, etc.), y reducimos errores accidentales. No afecta en los errores de verticalidad del eje principal y de dirección, que son independientes de la observación.

9.5.2.- Método de repetición

Este método exige para su realización orientar previamente la estación total.

Para medir un ángulo acimutal con este método (figura 9.5) se hace coincidir, en primer lugar, la visual al primer punto del ángulo a medir (en el sentido creciente de la graduación del limbo) con la lectura cero del limbo acimutal (1ª posición). Para ello seguiremos un procedimiento similar al utilizado para orientar el instrumento.

Seguidamente se colima el segundo punto del ángulo (2ª posición).

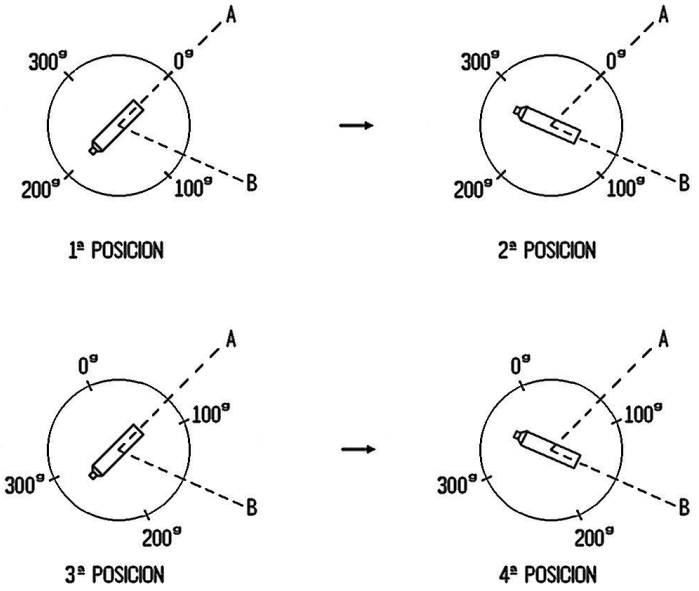


Fig. 9.5. Método de repetición

A continuación, fijando el ángulo leído, se vuelve a colimar el primer punto (3ª posición). Ahora, volvemos a colimar el segundo punto del ángulo (4ª posición). En este momento, si se lee el ángulo horizontal, se obtiene una lectura que será el doble del ángulo medido. Con este procedimiento, se pueden realizar las repeticiones que sean necesarias, de manera que se obtenga el ángulo medido tan solo dividiendo la lectura final entre el número de repeticiones realizadas.

Con el procedimiento que se muestra en la figura se consiguen dos repeticiones. Dos o tres repeticiones suelen ser suficientes, pues la precisión obtenida crece rápidamente con las primeras repeticiones para disminuir, también rápidamente, con las siguientes. Si por cálculo se deduce que es preciso un alto número de

repeticiones, lo que se necesitará probablemente será un instrumento de mayor precisión.

Este método se puede combinar con la regla de Bessel. Para ello, al terminar una serie de repeticiones, se gira 200^g el limbo horizontal y vuelta de campana el anteojo y se realizan las repeticiones en sentido inverso. Al final, se debe obtener 200^g al realizar la última visual; la diferencia será el error cometido al realizar el proceso.

El error que se comete al leer un ángulo con este método será:

$$E_a = \sqrt{\frac{2\,e_l^2}{n^2} + \frac{2\,e_p^2}{n} + e_v^2 + e_d^2}$$

siendo n el número de repeticiones y e_l, e_p, e_v y e_d los errores de lectura, puntería, verticalidad y dirección.

El método disminuye los errores accidentales de lectura y puntería, pero no influye en los de verticalidad y dirección.

9.5.3.- <u>Método de reiteración</u>

En este método no es preciso orientar la estación total, puesto que no es necesario hacer coincidir un ángulo horizontal determinado con una visual.

Cada reiteración debe realizarse combinada con la regla de Bessel.

Para realizar una medición dividimos la semicircunferencia por el número de reiteraciones + regla de Bessel que vamos a realizar: si necesitamos 4 observaciones, equivalentes a 2 reiteraciones + regla de Bessel, sería $200^g/2 = 100^g$. El ángulo así obtenido nos indica qué cantidad de grados hemos de girar aproximadamente el limbo horizontal antes de realizar la siguiente reiteración.

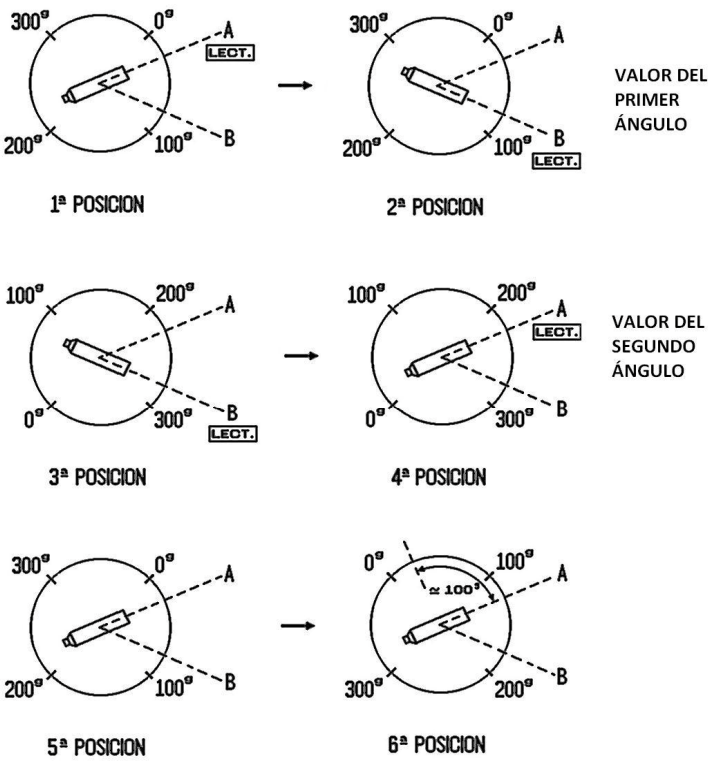


Fig. 9.6. Método de reiteración

Antes de comenzar con la aplicación de este método debemos observar la siguiente precaución: colocar el limbo horizontal de manera que la primera lectura

acimutal sea próxima a cero pero mayor, evitando así la necesidad de sumar o restar 400^g a una de las lecturas.

El método operativo es el siguiente (figura 9.6): visamos el primer punto del ángulo a medir anotando la lectura acimutal (1ª posición). Giramos el instrumento en el sentido creciente de las lecturas hasta visar el segundo punto, anotando también su lectura (2ª posición). Por diferencia de lecturas obtenemos un primer valor del ángulo.

Ahora aplicamos la regla de Bessel (giro de 200^g y vuelta de campana del anteojo), por lo que estamos visando el punto anterior pero con una lectura distinta, la cual anotamos (3ª posición). A continuación visamos el primer punto y tomamos también su lectura (4ª posición). Por diferencia de lecturas obtenemos un segundo valor del ángulo.

En este momento disponemos de dos valores del ángulo a medir, es decir, de dos reiteraciones.

Para realizar las siguientes reiteraciones volvemos a la posición normal del anteojo (5ª posición). Giramos el instrumento aproximadamente la cantidad de grados que obtuvimos anteriormente, 100^g en el ejemplo. Finalmente realizamos el mismo proceso anteriormente descrito.

Al concluir tenemos una serie de reiteraciones repartidas en toda la extensión del limbo horizontal. Además, este método disminuye también los errores accidentales de lectura y puntería:

$$E_a = \sqrt{\frac{2\,e_l^2}{n} + \frac{2\,e_p^2}{n} + e_v^2 + e_d^2}$$

9.6.- VERIFICACIONES DE LA ESTACIÓN TOTAL

Los instrumentos topográficos son aparatos de precisión en los que los errores sistemáticos han sido determinados y puestos a cero en fábrica. Pero, por diversas causas, se pueden producir desajustes que puedan dar lugar a la aparición de errores sistemáticos en las mediciones. Por ello es importante que se revise el instrumento: antes de usarlo por primera vez, antes de realizar mediciones de gran precisión, después de largos periodos de trabajo, almacenamiento o transporte, etc. y siempre tras haber sufrido un accidente, como una caída, un fuerte golpe, etc.

Las estaciones totales incluyen, dentro del software, apartados específicos para realizar verificaciones y ajustes del equipo como error de colimación horizontal, del índice del círculo vertical, del nivel electrónico, de perpendicularidad, etc. El software guía en la realización de las verificaciones y ajustes citados. Además, en el manual del instrumento se indican procedimientos de verificación y ajuste del anteojo y de otros componentes como nivel esférico, plomada óptica o láser, plataforma nivelante, etc.

Pero para que estas verificaciones se realicen con precisión y los ajustes sean correctos, deben respetarse escrupulosamente las condiciones de realización, siendo

preferible, en muchos casos, que las ejecuten talleres certificados, donde además de éstas se chequearán los dispositivos electrónicos, se actualizará el software y nos aportarán certificado de la calibración que acreditará la precisión del equipo.

Las verificaciones que se estudian a continuación constituyen un chequeo rápido del funcionamiento del instrumento y no sustituye nunca a la revisión antes citada.

Estas verificaciones se efectuarán **siempre** siguiendo el orden en que se van a estudiar, puesto que cada una de ellas se apoya, en mayor o menor medida, en las anteriores.

9.6.1.- Verificación del nivel tórico

El elemento que permite la nivelación del instrumento topográfico es el nivel tórico, sea de burbuja o digital, del que dispone y es su verificación la primera que debemos realizar. La horizontalización de una superficie plana, sobre la que se apoya el nivel, presupone que el eje del nivel es paralelo a la superficie. En la práctica, es corriente que los niveles se descorrijan, debido al uso, por lo que se deben comprobar con cierta frecuencia. Cuando el nivel está descorregido y no se cumple la condición anterior, es evidente que no podemos garantizar la puesta en estación del instrumento puesto que no podremos nivelarlo.

Para comprobar si un nivel tórico está corregido calamos la burbuja en una determinada posición (posición 1) y a continuación giramos el instrumento 180^0 o 200^g (posición 2). Si la burbuja permanece calada el eje del nivel es paralelo a la superficie de apoyo y podemos nivelar.

Si el eje del nivel no es paralelo a la plataforma, sino que forma un ángulo α con ella, al calar la burbuja en la posición 1 la plataforma se habrá inclinado un ángulo α respecto a la horizontal (figura 9.7). Si giramos el nivel 180°, la burbuja adoptará la posición simétrica respecto al eje principal del aparato, ocupando la posición 2 de la figura. Como se puede apreciar, la desviación de la burbuja corresponde a 2α, es decir, dos veces la descorrección.

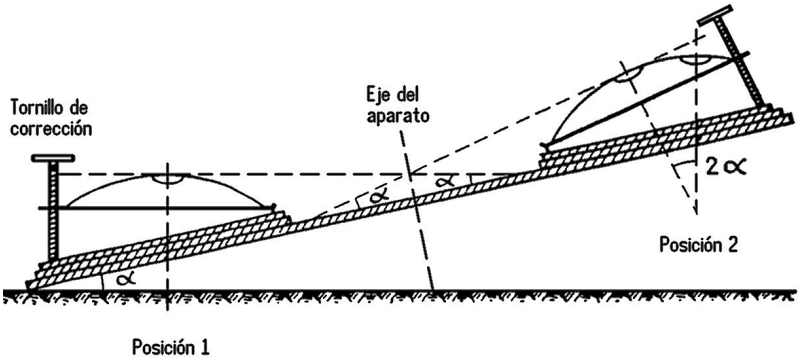


Fig. 9.7. Verificación del nivel tórico

Para corregir un nivel tórico de burbuja se puede actuar sobre el tornillo de corrección con el que están provistos estos niveles, haciendo que la burbuja recorra la mitad del desplazamiento que había sufrido, con lo cual el eje del nivel se habrá situado

paralelo a la plataforma. A partir de aquí ya podemos nivelar de la forma habitual. En los niveles digitales no tenemos posibilidad de actuar.

9.6.2.- Verificación de la perpendicularidad entre el eje de colimación y el eje secundario

Se pretende comprobar que el eje de colimación es perpendicular, en todas las posiciones del anteojo, al eje secundario o eje en torno al cual bascula el anteojo. Si esto no se cumple, al cabecear el anteojo se moverá el eje de colimación describiendo un cono, no un plano.

Para realizar esta verificación se nivela el aparato y, a continuación, se colima un punto lejano y bien definido (1ª posición). Seguidamente se aplica la regla de Bessel de forma estricta: se gira la alidada horizontal *180º* (ó *200g*) exactos y se cabecea el anteojo. Si no existe descorrección, el simple cabeceo del anteojo debe permitirnos volver a colimar exactamente el mismo punto.

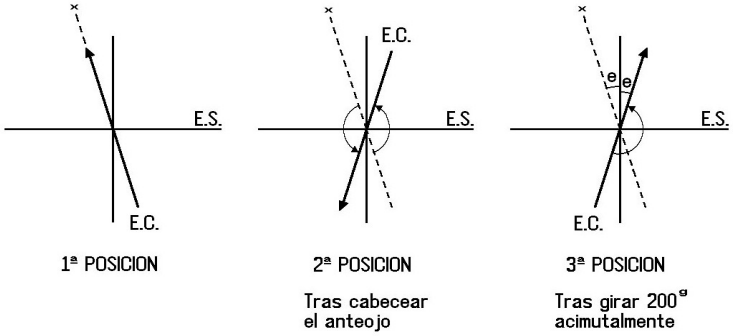


Fig. 9.8. Verificación de perpendicularidad eje de colimación y eje secundario

Si ambos ejes no son perpendiculares existe una descorrección *e* y el eje de colimación en la 3ª posición formará un ángulo *2e* con la posición inicial por lo que en la 3ª posición el punto no queda colimado (figura 9.8).

9.6.3.- Verificación de la perpendicularidad entre el eje secundario y el principal

Se pretende comprobar que el eje secundario es perpendicular, en todas las posiciones del instrumento, al eje principal o eje vertical. De no cumplirse esta condición, aun estando nivelado el aparato, al cabecear el anteojo se moverá el eje de colimación en un plano inclinado, no vertical.

Para realizar esta verificación se nivela el aparato y se colima la parte superior de una línea perfectamente vertical, por ejemplo el hilo de una plomada. Actuando únicamente sobre los tornillos del movimiento vertical del instrumento, comprobamos que el centro de la cruz filar sigue en todo momento la línea vertical marcada por el hilo de la plomada; si se separa de ella es porque existe descorrección.

9.6.4.- Verificación del eclímetro

Se pretende comprobar que, con el instrumento nivelado, el origen de las lecturas en el eclímetro ocupa una posición correcta. Esto supone, en un eclímetro que determine distancias cenitales, que al anteojo en posición perfectamente horizontal

corresponde una lectura de 90° (ó 100^g) exactos y al anteojo en posición perfectamente vertical corresponde una lectura de 0° (ó 0^g) exactos.

La verificación se realiza nivelando el instrumento y colimando, a continuación un punto alto y lejano que esté bien definido. Anotaremos la lectura vertical L_N en esta posición normal del anteojo. Seguidamente se aplica la regla de Bessel, pero no de forma estricta, girando aproximadamente 180° (ó 200^g) acimutales y cabeceando el anteojo, hasta volver a colimar el mismo punto. Anotaremos la nueva lectura vertical L_I en esta posición invertida del anteojo.

En un eclímetro centesimal de distancias cenitales (figura 9.9) si el eclímetro está corregido, se debe verificar:

$$L_N = 400^g - L_I = L'_I$$

como vimos al explicar la regla de Bessel.

Si existe descorrección, ésta puede determinarse (véase la figura 9.9):

$$L_N - e = L'_I + e \qquad L_N - L'_I = 2e \qquad e = \frac{(L_N - L'_I)}{2}$$

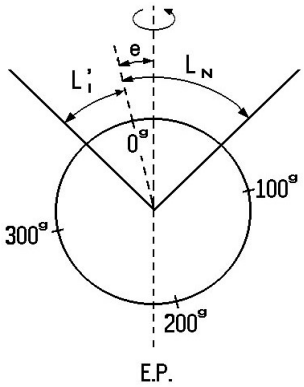


Fig. 9.9. Verificación eclímetro cenital

La lectura vertical correcta será:

$$L = \frac{(L_N + L'_I)}{2}$$

Con eclímetros de altura de horizonte, como los que se muestran en la figura 9.10, las expresiones para calcular la descorrección *e* y la lectura vertical correcta *L* varían: en el 1er caso de la figura, serán:

$$L = \frac{(L_N + L_I)}{2} \qquad e = \frac{(L_N - L_I)}{2}$$

y en el 2º caso, siendo $L'_I = 200^g - L_I$:

$$L = \frac{(L_N + L'_I)}{2} \qquad e = \frac{(L_N - L'_I)}{2}$$

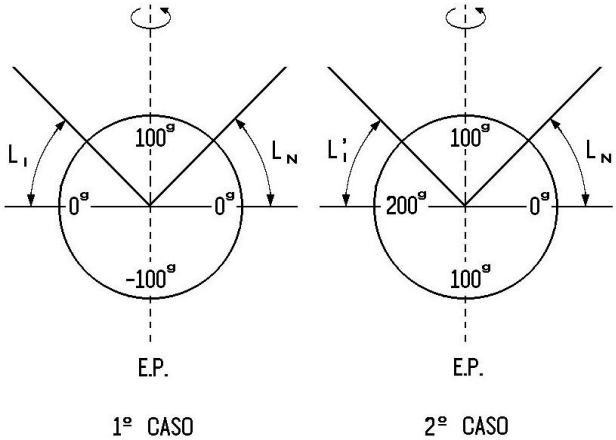


Fig. 9.10. Verificación eclímetro de altura de horizonte