

## **5. LECTURAS DE ÁNGULOS**

### **5.1. ELEMENTOS DE LECTURA DE ÁNGULOS<sup>1</sup>**

Una vez puesto en estación el aparato, y realizada la colimación al punto que se desee, es preciso de alguna manera realizar la lectura angular correspondiente a la puntería ejecutada.

En toda su generalidad, si suponemos la puntería indicada reducida a la recta que contiene al eje de colimación, y asimismo suponemos fijo el plato (azimutal o cenital según proceda), y en él grabado un círculo o limbo graduado, a partir de un cierto origen, es evidente que la cuestión se reduce a efectuar la lectura de la intersección de eje de colimación y limbo con la mayor precisión posible.

Los limbos pueden ser sexagesimales o centesimales, según el tipo de unidad que utilicen, y que su graduación crezca en el sentido de las agujas del reloj, o en sentido contrario.

Actualmente, todos se construyen en vidrio, siendo el trabajo de su grabado trascendental para la calificación de la bondad y precisión del aparato. Un aparato como el Wild T-2, dispone de un limbo de 70 mm de diámetro dividido en 2.000 partes, de uniformidad suficiente como para garantizar un error relativo para cualquiera de ellas inferior a  $10^{-3}$ , es decir, 2 segundos centesimales.

Como más adelante veremos, gran parte de los modernos goniómetros permiten situar (orientar) el cero de la graduación del limbo azimutal con el norte verdadero o con cualquier otra dirección prefijada (Taquímetros repetidores.) Ello permite leer azimutes directamente. No obstante, puede resultar tanto o más preciso y aconsejable medir los ángulos azimutales con respecto a un cero cualquiera, arbitrario (aparatos reiteradores), como más adelante veremos, y algunos instrumentos prescinden de dicha posibilidad. En contrapartida, los limbos cenitales necesariamente deben tener el cero, sea en la vertical del punto de estación, en el extremo superior del diámetro así definido, con lo que se medirá el ángulo o distancia cenital, o, en el extremo anterior del diámetro normal a aquél, y por tanto horizontal, leyéndose así el ángulo de altura sobre el horizonte, complemento de la distancia cenital.

Según la precisión de la medición de los ángulos se los identifica como aquellos que se utilizan para la construcción o carreteras con precisión del orden de minuto sexagesimal ( $1'$ ), hasta los topográficos de precisión hasta el orden de  $2''$  a  $5''$ , particularidad que se extiende a los teodolitos geodésicos que pueden determinar ángulos con precisión de fracciones de segundo.

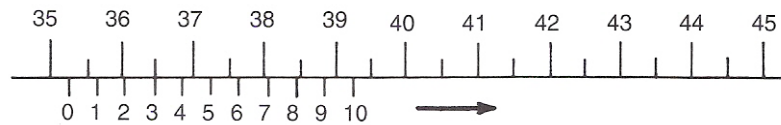
### **5.2. NONIUS**

El nonius es el procedimiento más sencillo de incrementar la precisión de lectura. Universalmente utilizado hasta la aparición de los micrómetros ópticos, aún no ha desaparecido del ámbito de las ciencias topográficas y geodésicas, siendo su principio aplicado en medición indirecta de distancias e incluso relacionado con la moderna distanciometría electrónica (nonius electrónico). Consta de una reglilla móvil,

---

<sup>1</sup> M. Chueca Pazos. J.Herráez Boquera. J.Berné Valero. Tratado de Topografía 1. Teoría de Errores e Instrumentación

solidariamente unida al índice cero de lectura, y con su cero coincidente con él, de una longitud igual a  $(n - 1)$  divisiones del limbo dividida en  $n$  partes:



La reglilla desliza tangente al limbo y la lectura se realiza contando la primera coincidencia entre trazos de limbo y nonius.

En efecto, si  $G$  es el valor de la graduación del limbo, y  $g$  el de una división del nonius, se tendrá:

$$(n - 1) G = gn$$

$$nG - G = gn$$

$$\mathbf{G - g = G/n = sensibilidad de nonius = S}$$

En la figura, la menor división del limbo  $G = 50^\circ$

$$G - g = 50^\circ / 10 = 5^\circ$$

sin nonius, la lectura directa con el cero sería  $35^\circ$  más una cierta fracción, inferior a  $50^\circ$ . Evidentemente, la distancia entre el 35 y el 0, y por pura geometría, vale

$$3 \cdot S = 3 \cdot G / n = 3 \cdot 5 = 15^\circ \text{ y la lectura será } 35^\circ 15^\circ.$$

### 5.3. APRECIACIÓN Y SENSIBILIDAD<sup>2</sup>

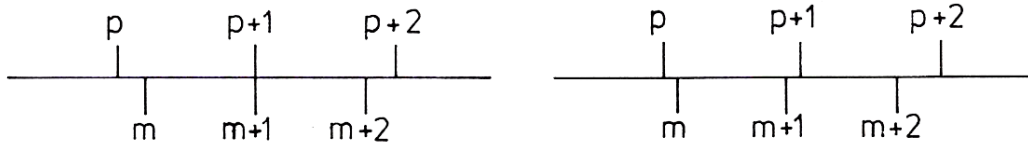
Según sabemos, el ojo humano alcanza a separar un ángulo mínimo de  $30''$ . Así, cuando la coincidencia de las divisiones limbo-nonius se vea con un ángulo igual o inferior a aquél, parecerán en línea recta. Ello implica la imposibilidad de incrementar indefinidamente la sensibilidad de los nonios, pues, evidentemente, si  $\mathbf{G - g = S}$  se ve bajo un ángulo inferior a  $30''$ , habrá a lo menos dos coincidencias seguidas. Y siendo condición *sine qua non* de un nonius bien construido que pueda apreciarse sin vacilación una coincidencia y una sola, el límite forzoso se produce cuando la sensibilidad es igual a la apreciación. Suponemos, pues, de ahora en adelante, no sólo para nonius, sino para cualquier lectura que deba realizarse mediante un índice y sobre una graduación, el caso límite, es decir, que la apreciación coincidirá con la sensibilidad, salvo que explícitamente se indique otra cosa.

En dicho supuesto, si suponemos que matemáticamente coinciden las divisiones  $(p + 1)$  (limbo) y  $(m + 1)$  (nonius), la separación de las  $p$  y  $m$  y  $p + 2$  y  $m + 2$ , respectivamente, será igual a la apreciación y se leerá correctamente en  $p + 1 / m + 1$ .

Una posición intermedia dará lugar a indeterminación en la lectura, apareciendo aparentemente en línea recta las  $p/m$  y  $p + 1 / m + 1$ . Si se lee  $p/m$  se cometerá un error por defecto igual a segmento  $pm$ , y si se lee  $p + 1 / m + 1$ , un error por exceso igual a segmento  $(p + 1)(m + 1)$ . Ambos errores serán, evidentemente, inferiores a la apreciación, cota máxima de error, con la que en alguna ocasión trabajaremos. No obstante, es más frecuente utilizar el error probable, cuyo valor será:

<sup>2</sup> M. Chueca Pazos. J. Herráez Boquera. J. Berné Valero. Tratado de Topografía 1. Teoría de Errores e Instrumentación

$$e_p = \frac{2}{3} a \quad (a = \text{apreciación})$$



Resumiendo:

Los **NONIOS** permiten aumentar la apreciación en los limbos metálicos.

Sensibilidad: cociente entre la separación entre dos divisiones del limbo y el número de divisiones del nonio:

$$S = \frac{G}{n}$$

La apreciación debe ser próxima al límite de percepción visual (0.2 mm; 30")

**6.3.3. Lecturas de los círculos (Limbos) en los teodolitos antiguos, con nonius y lupa.** A los efectos de mejorar la precisión de la lectura (no de la medición) el índice de los teodolitos viene provisto de un nonio o vernier. Donde el cociente entre la menor división del limbo y el número total de divisiones del vernier. Sensibilidad (o apreciación)

$$S = \frac{\text{división limbo}}{\text{N}^\circ \text{ total divisiones del vernier}} = \frac{d}{N}$$

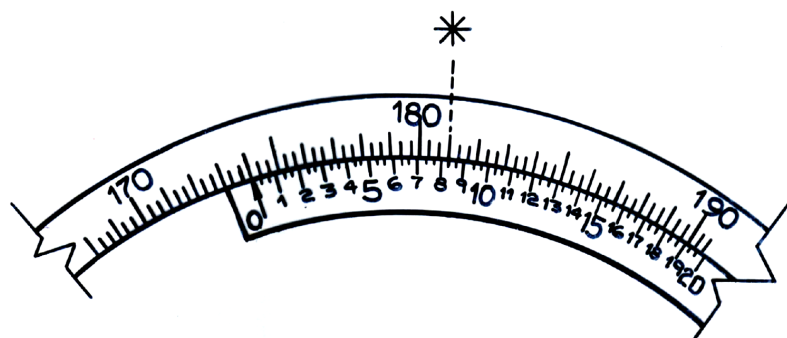
Por lo general el limbo (sexagesimal) está dividido de 20' en 20'. Si el vernier -nonio- tiene 60 divisiones su apreciación será.

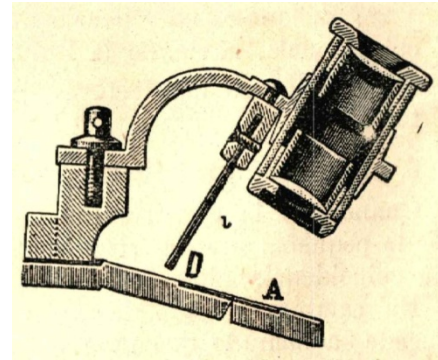
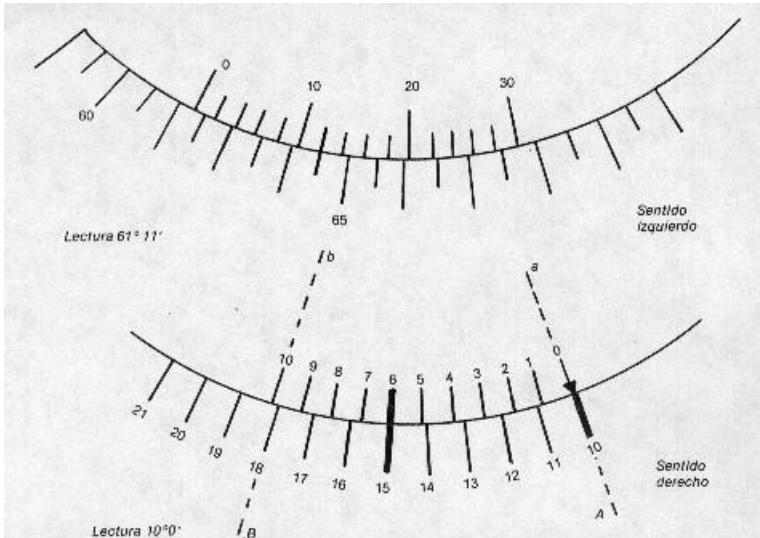
$$a = d / N = 20' / 60 = 20''$$

El método de lectura es el siguiente: se observa (con ayuda de la lupa) la posición del índice o "cero" del vernier sobre el limbo, leyéndose los grados y múltiplos de 20' (00', 20', 40'). La fracción de 20' restantes se calculará multiplicando la apreciación a del vernier (20") por el N° de orden de la división de éste que coincide con una división del limbo: Ej.:  $174^\circ 40' + 43 \times 20'' = 174^\circ 54' 20''$  43 es el N° de división del nonio.

Este cálculo se ha evitado escribiendo sobre las divisiones del vernier, no su N° de orden sino directamente sus valores angulares correspondientes. Ello permite la lectura directa de la fracción, expresada en minutos y segundos. Ejemplo

Lectura "gruesa o entera"	174° 00'
lectura fracción (en nonio)	<u>08'20"</u>
Lectura definitiva	174° 08'20"





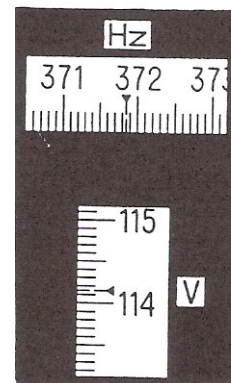
**5.4. MICRÓMETROS ÓPTICOS. <sup>3</sup>**

Los goniómetros de nonius han cedido el paso modernamente a los micrómetros ópticos. En efecto, los antiguos limbos para nonius, metálicos, con una cinta perimetral de plata en la que iba grabada la graduación, y sobre la que concéntrico y tangente deslizaba el nonius, requerían grandes diámetros para conseguir apreciaciones importantes, lo que hacía los teodolitos pesados y enojosos para su transporte. Por otra parte, inevitables errores de excentricidad de los nonius y de falta de homogeneidad en las divisiones exigían multiplicar su número (dos por lo menos, en los extremos de un diámetro), llegando a disponer de ocho en teodolitos para geodesia de primer orden. La necesidad de leer todos los nonius en cada puntería, adoptando como bueno el valor promedio, hacía lento el trabajo y, aun cuando se pretendía mediante microscopios cada vez más potentes situados sobre cada nonius facilitar la labor y obtener mayor precisión, las limitaciones ópticas y mecánicas de construcción de aparatos tales urgían un cambio de concepción en los mismos.

Así, las modernas máquinas de subdivisión y grabado de limbos de vidrio, de excelente precisión, facilitaron y consiguieron la sustitución de los limbos metálicos de nonius, con lectura por reflexión, por los limbos de vidrio, para lectura por transparencia o refracción.

**5.4.1. Micrómetros observación directa:** Dispone de un microscopio para poder leer los trazos de división que han sido exclusivamente grabados de forma regular en el limbo, no dispone de elemento auxiliar para lectura. El índice de alidada es observado directamente sobre los trazos del limbo.

Ej.: Wild TOS.



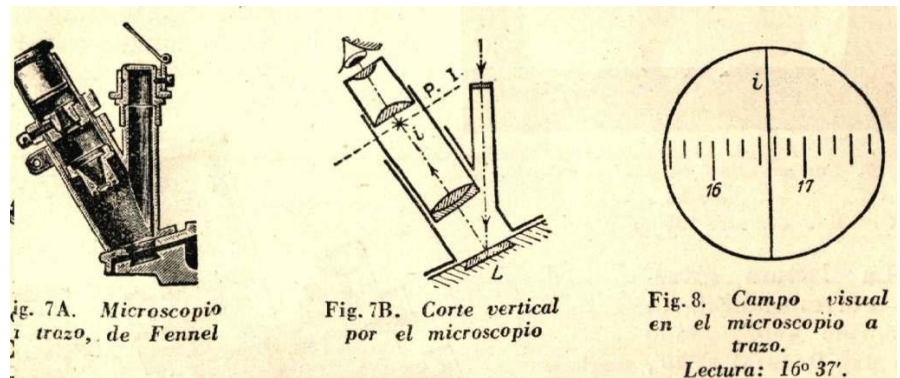
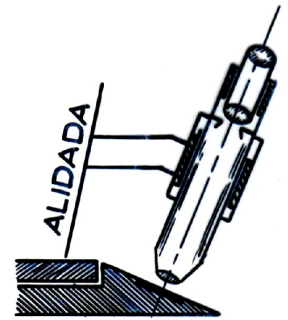
. Lectura horizontal 114.15.

<sup>3</sup> M. Chueca Pazos. J.Herráez Boquera. J.Berné Valero. Tratado de Topografía 1.Teoría de Errores e Instrumentación

### 5.4.2. Microscopios lectores

#### De trazos

Consta de un tubo soporte dentro del cual hay un diafragma y un ocular que se utiliza para enfocar el diafragma. Ese tubo soporte se utiliza dentro de otro tubo que está unido a la alidada para enfocar el limbo, el enfoque se realiza análogamente al de un anteojo astronómico. Hay microscopios que tienen de tres a cinco hilos, donde se hace lectura por estimación de cada hilo y las semisumas de cada lectura de los hilos que distan igualmente del medio, deben ser igual a la lectura de este último, luego promediamos estas tres lecturas y obtenemos el valor que corresponde a la bisección.

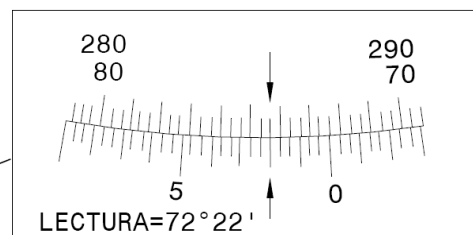
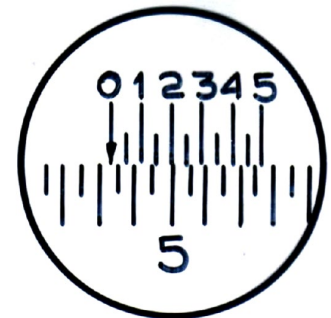


#### De Nonius

Es análogo al anterior, donde lleva un nonius montado en el diafragma y graduado en la placa de cristal. La lectura se realiza de la misma manera que con el vernier y la lupa.

Apreciación:  $a = 5'/10 = 300''/10 = 30''$

$$\begin{array}{r} \text{Lectura: } 4^{\circ}40' \\ \underline{\quad 2' 00''} \\ 4^{\circ}42' 00'' \end{array}$$



Teodolito Sokkia con lectura directa de nonio

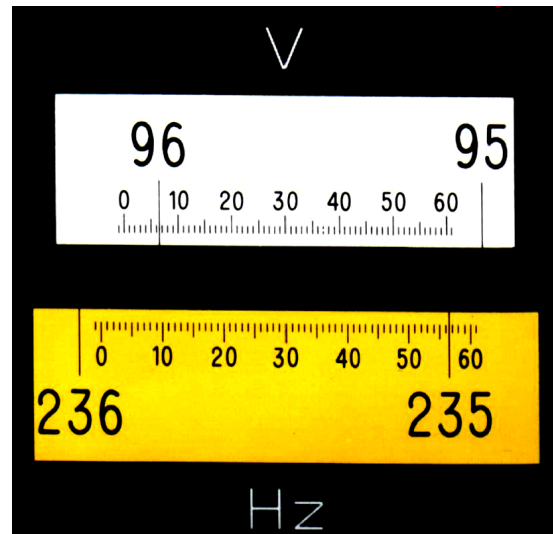


### 5.4.3. Micrómetro de escala o estima

El aumento del microscopio es suficientemente grande para disponer de una escala, de extensión igual a una división del limbo, sobre la que se superpone el índice de alidada.

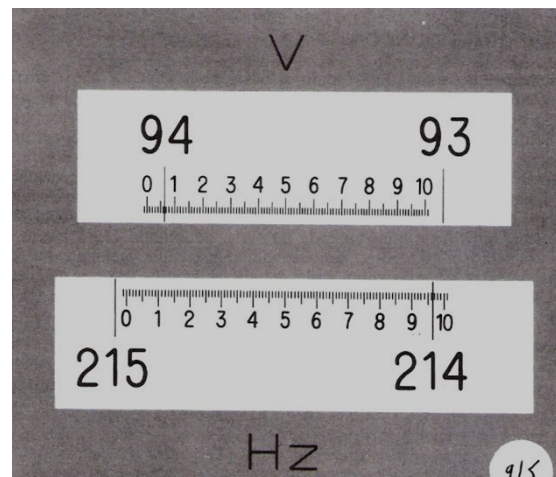
En estos microscopios va montado un micrómetro de cristal, es decir, una placa con una escala graduada de 0 a 60 de tal modo que la distancia entre su trazo inicial, que es el trazo de lectura y su trazo final, corresponde al valor de una división del limbo. Si en este caso el limbo se halla dividido en un grado, es decir 60', por lo tanto 60 divisiones micrométricas corresponden a 60', es decir, una división del micrómetro equivale a 1' y por estima se pueden hacer décimas de minuto o bien 6".

Ejemplo de lectura 360°, Círculo Vertical: 96°06'24", Círculo Horizontal: 235°56'18"



A través del microscopio se ve la división del micrómetro con una magnitud aparente de 2 mm, según es práctica habitual de construcción. Así, siendo según sabemos, 0,2 mm el límite de apreciación del ojo humano a magnitudes lineales, la apreciación del micrómetro será de 1/10 de su menor de división.

Lectura del círculo 400gon:  
Hz: 214,964gon. V: 94,064gon



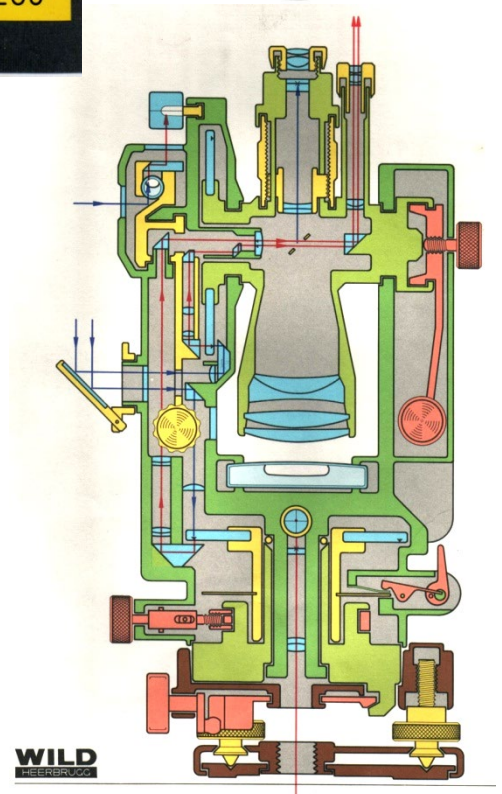
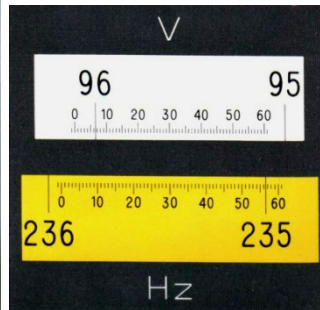
Definiéndose la sensibilidad del micrómetro como 1/10 de su menor división, es obvio que apreciación y sensibilidad coincidirán, según era de esperar.

No obstante, algunas marcas, por supuesto no de las mejores, construyen sus aparatos observándose en ellos una magnitud aparente inferior a 2 mm en la mínima división del micrómetro. En dicho caso, su sensibilidad será superior a la apreciación, y no se alcanzará la precisión de lectura nominal ofrecida en catálogo.

Normalmente, se utiliza el mismo microscopio para leer tanto el limbo horizontal como el vertical. Un sencillo dispositivo de conmutación permite hacer visible en el campo del microscopio el limbo que se desee leer, o bien, sin dispositivo alguno, se observan los dos limbos. Para evitar errores por confusión de limbos (leer un ángulo azimutal en el limbo vertical o viceversa) se acostumbra a colorear los limbos con colores diferentes (azul y amarillo, por ejemplo) anotando a cada lectura el color de la misma.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> M. Chueca Pazos. J.Herráez Boquera. J.Berné Valero. Tratado de Topografía 1. Teoría de Errores e Instrumentación

- **Teodolito de escala marca Wild, modelo T16**, 28x aumentos, sensibilidad de niveles de alidada  $30''/2\text{mm}$ , de índice  $1'/2\text{mm}$ , círculos  $360^\circ$  o  $400^g$ , apreciación  $1'$ , estima  $6''$ .



En la figura se recoge la marcha de los rayos en el taquímetro Wild T-16, correspondiente a los principios explicados, junto con la distribución de los elementos en el interior del mismo, y su aspecto exterior.

Los límites fisiológicos de estima del ojo humano y la no eliminación de errores de excentricidad residual, limitan el sistema, según ya se indicó, a precisiones medias. Son típicos del caso de taquímetro «minutero» (mínima división del micrómetro 1 minuto), con apreciación de 10 segundos.

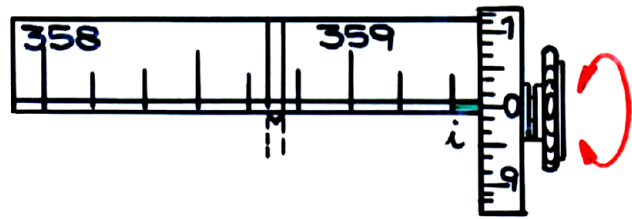
#### 5.4.4. Tornillo micrométrico

En el teodolito dotado de microscopio con tornillo micrométrico, se ejecuta la medición del segmento comprendido entre la marca-índice y el trazo anterior del limbo con ayuda de un tornillo micrométrico.

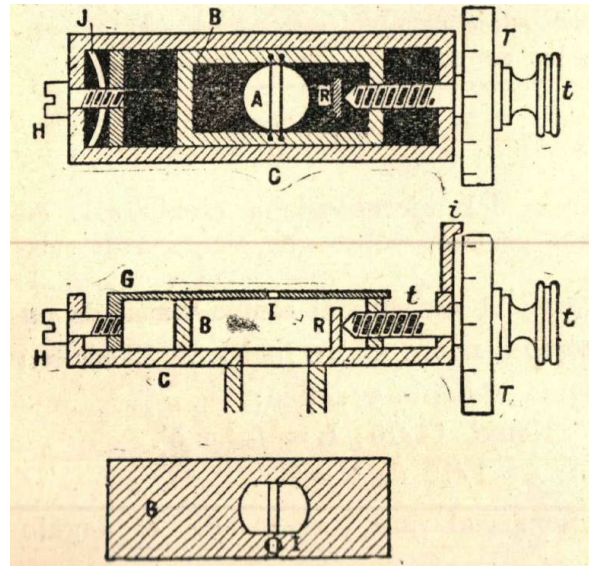
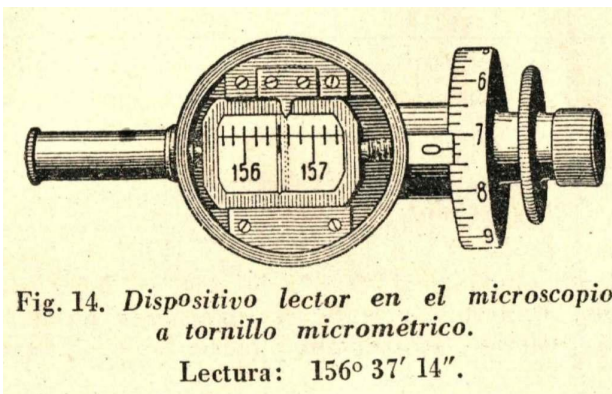
Hay varios tipos, aunque hoy ya sólo se usa el micrómetro óptico de coincidencia.

**5.4.5.A Tambor. (De uso en teodolitos antiguos)**

Es un tornillo de precisión. Desde ya, que la cantidad que avanza el tornillo está expresada en segundos, para poder así sumar directamente lo que indica el limbo.

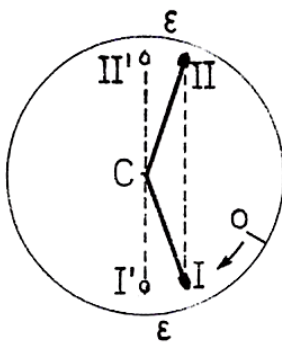


Ej.: Lectura gruesa 358° 40'  
 Lectura fina 5' 00"  
 apreciación  $a = 10'/60'' = 600''/60 = 10''$   
 Lectura: 358° 45' 00"

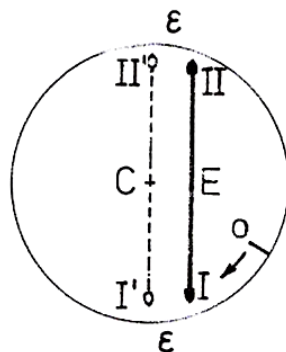


**5.4.6. ERROR DE EXCENTRICIDAD**

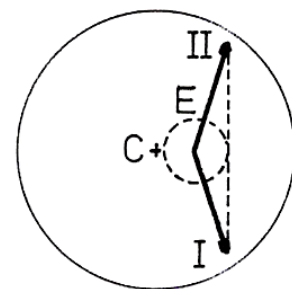
Es cuando el centro del limbo no coincide con el centro de rotación de la alidada por donde pasa el eje principal. El índice de lectura puede estar desviado, o el limbo descentrado, o coexistir ambos errores.



Desviado



Descentrado



Desviado + descentrado

En cualquier caso, si la lectura exacta es  $I' = II' - 180$  y la aproximada I y el error cometido  $\epsilon$ , se tendrá:

$$I' = I + \epsilon$$

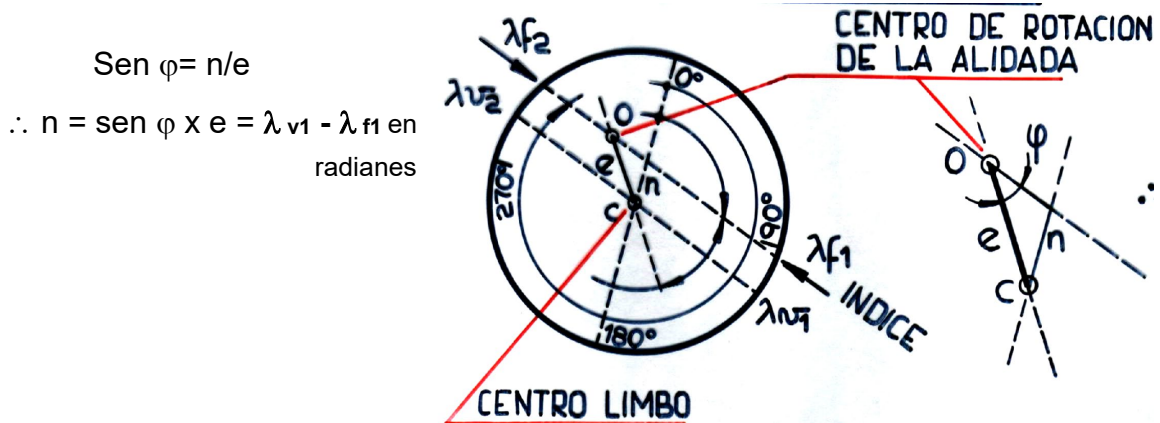
$$II' = II - \epsilon$$

$$I' + II' = 2I' + 180^\circ = I + II$$

$$I' = (I + II - 180^\circ) / 2$$



la semisuma de lecturas en los nonius, corregida en 180° una de ellas, ofrece la lectura exacta. Demostrado de otro modo:



Se bisecta un punto en una dirección, con el círculo vertical a la izquierda y se lee el valor de  $\lambda_{f1}$ , valor que está afectado de error de excentricidad, cuando se tendría que haber leído  $\lambda_{v1}$ , si leemos a 180° vamos a leer  $\lambda_{f2}$ , también afectado de error, cuando tendríamos que haber leído  $\lambda_{v2}$ . Analizando el triángulo de la figura, que se origina en las distintas posiciones del círculo, surge que si  $\varphi = 0^\circ$  ó  $\varphi = 180^\circ$  no incide el error de excentricidad, pero si  $\varphi = 90^\circ$  ó  $\varphi = 270^\circ$  el error es máximo.

La forma de salvar este error es la siguiente:

Si hacemos el promedio, donde:

$$\lambda_{v1} = \lambda_{f1} + n$$

$$\lambda_{v2} = \lambda_{f2} - n \quad \therefore \lambda_{v1} = \lambda_{v2} \pm 180^\circ = \lambda_v$$

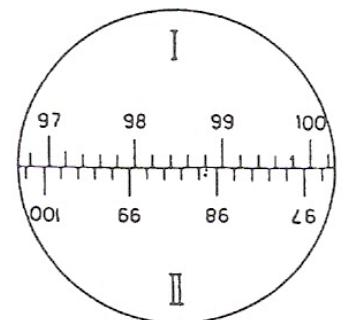
$$2\lambda_v = \lambda_{f1} + \lambda_{f2} \pm 180^\circ$$

$$\lambda_v = \frac{\lambda_{f1} + \lambda_{f2} \pm 180^\circ}{2}$$

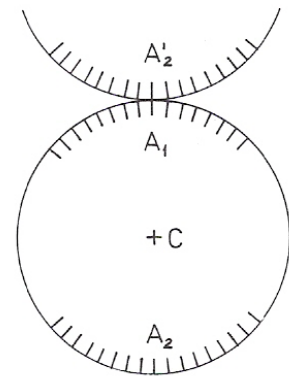
Por lo tanto el error positivo de la lectura  $\lambda_{f1}$  se compensa con el error negativo de la correspondiente  $\lambda_{f2}$ , resultando así que el promedio de ambas lecturas será el valor angular correcto de la dirección a un punto P. Cosa análoga ocurre con el limbo vertical cuyo centro de graduación no coincide con el eje secundario del teodolito.

**5.4.7. Micrómetro de coincidencia:** Un sistema de prismas yuxtapone en el microscopio las imágenes de dos zonas opuestas del limbo, de manera que se aprecian dos lecturas correspondientes a dos índices diametralmente opuestos. La lectura debe ser deducida del número de divisiones entre las graduaciones principales correspondientes a dos índices diametralmente opuestos.

Todo estriba, pues, en arbitrar un procedimiento óptico que sustituya al mecánico indicado (construcción de dos nonius).

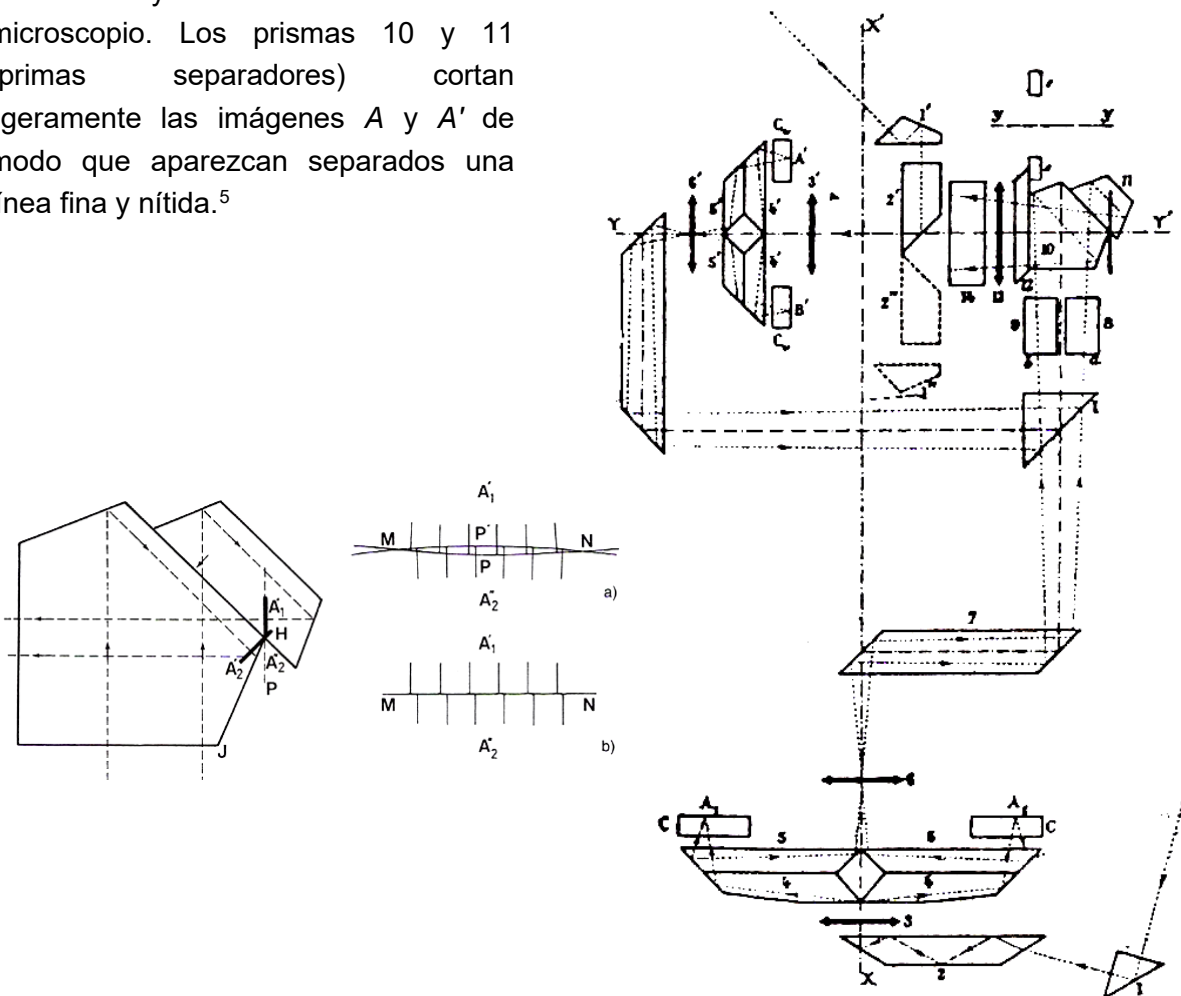


El micrómetro Wild resuelve el problema de la siguiente forma. Mediante un procedimiento óptico se consigue trasladar la imagen del sector  $A_2$  paralelamente a sí misma hasta  $A'_2$  resultando  $A_1$  y  $A'_2$  tangentes al observarlas a través de un microscopio. Evidentemente, las lecturas del punto de tangencia en  $A_1$  y  $A'_2$  diferirán en  $180^0$  (o  $200^0$  centesimales). Si ahora se gira  $A_1$  en un sentido cualquiera,  $A'_2$  girará en sentido opuesto resultando inmediatamente, el ángulo girado como la diferencia entre la lectura anterior, en  $A_1$  o  $A'_2$  y su correspondiente en el nuevo punto de tangencia.

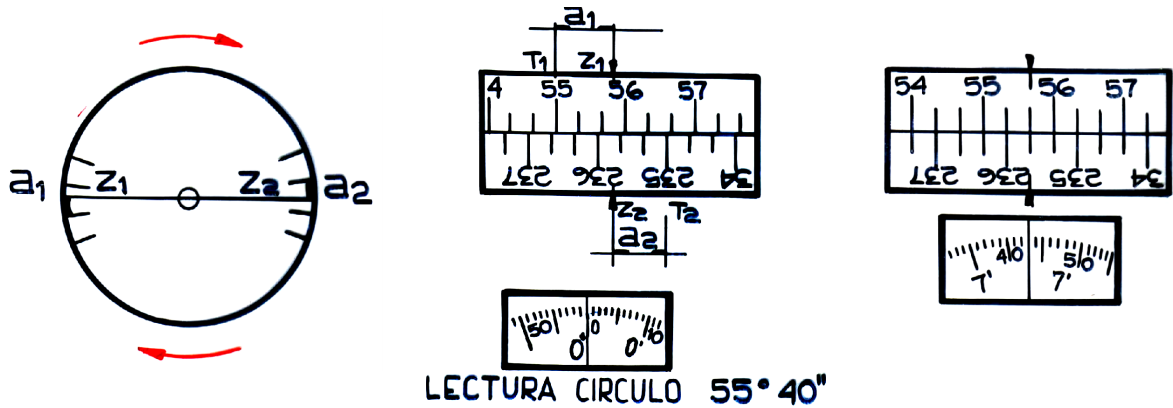


Con ello, el **error de excentricidad queda totalmente eliminado**,

La materialización óptica del micrómetro explicado se recoge en la figura siguiente, en colimación azimutal como cenital, con la marcha de los rayos, desde el espejo exterior hasta el microscopio de lectura, generalmente situado en un tubo tangente al telescopio a lo largo de una generatriz común. Un botón de conmutación introduce el prisma I la posición de la figura, impidiendo así la lectura del círculo azimutal, con lo que pueden leerse separadamente le azimutales y cenitales en el mismo microscopio. Los prismas 10 y 11 (primas separadores) cortan ligeramente las imágenes  $A$  y  $A'$  de modo que aparezcan separados una línea fina y nítida.<sup>5</sup>

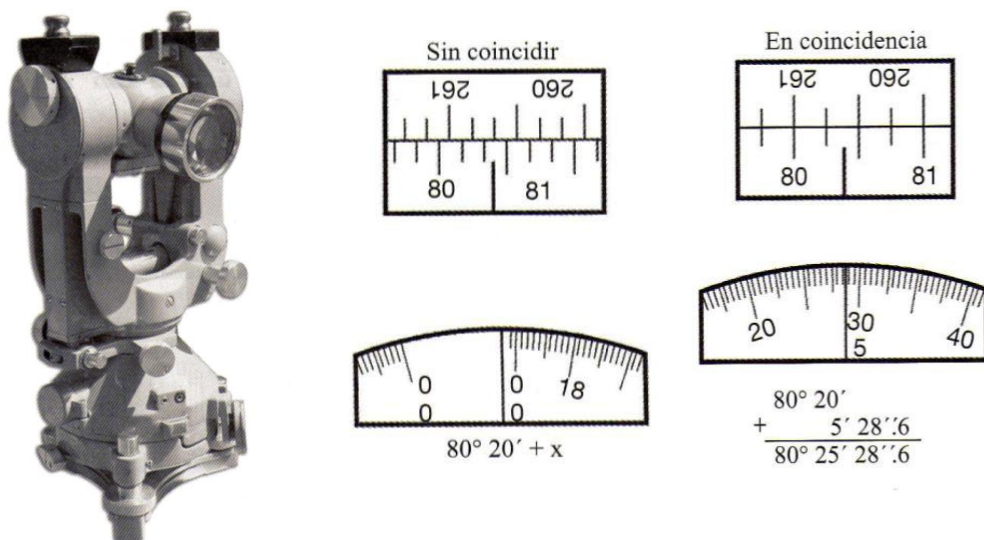


<sup>5</sup> M. Chueca Pazos. J.Herráez Boquera. J.Berné Valero. Tratado de Topografía 1.Teoría de Errores e Instrumentación



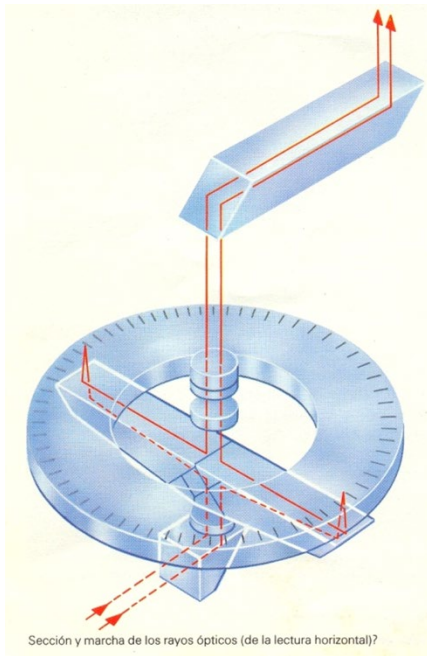
Lect. Circulo 55° 40'  
 Lect. Tambor 7' 43"  
 Lectura 55° 47' 43"

La alidada está provista de dos índices  $Z_1$  y  $Z_2$ , cuyas distancias  $a_1$  y  $a_2$  a los trazos del limbo que le preceden se trata de medir. Por un sistema óptico se obtienen dos imágenes de las posiciones  $Z_1$  y  $Z_2$  que quedan una sobre la otra enfrentadas e invertidas. La primer lectura es aproximada con los índices correspondientes y el micrómetro a cero, y se busca a la izquierda del índice en la escala directa (no invertida) el trazo numerado más próximo que da los trazos enteros y se anota el número, por ejemplo 55°40'. Después se busca en la escala invertida la división que se diferencia en 180° a la anteriormente anotada, y se toma la distancia angular entre ambos trazos y se divide por dos por medio de 2 plaquitas de vidrio, o sea, placas planas de caras paralelas enfrentadas entre sí que reciben las imágenes de cada uno de los trazos diametralmente opuestos, girando ambas, se hacen coincidir los trazos  $T_1$  y  $T_2$ . Se lee por medio de la escala la distancia angular que existe entre  $Z_1$  a la graduación 55° y entre  $Z_2$  a la graduación 235°, la lectura en esa escala da la media aritmética de las lecturas correspondientes a los dos puntos opuestos del limbo, siendo por ejemplo la lectura final 55° 47' 43".



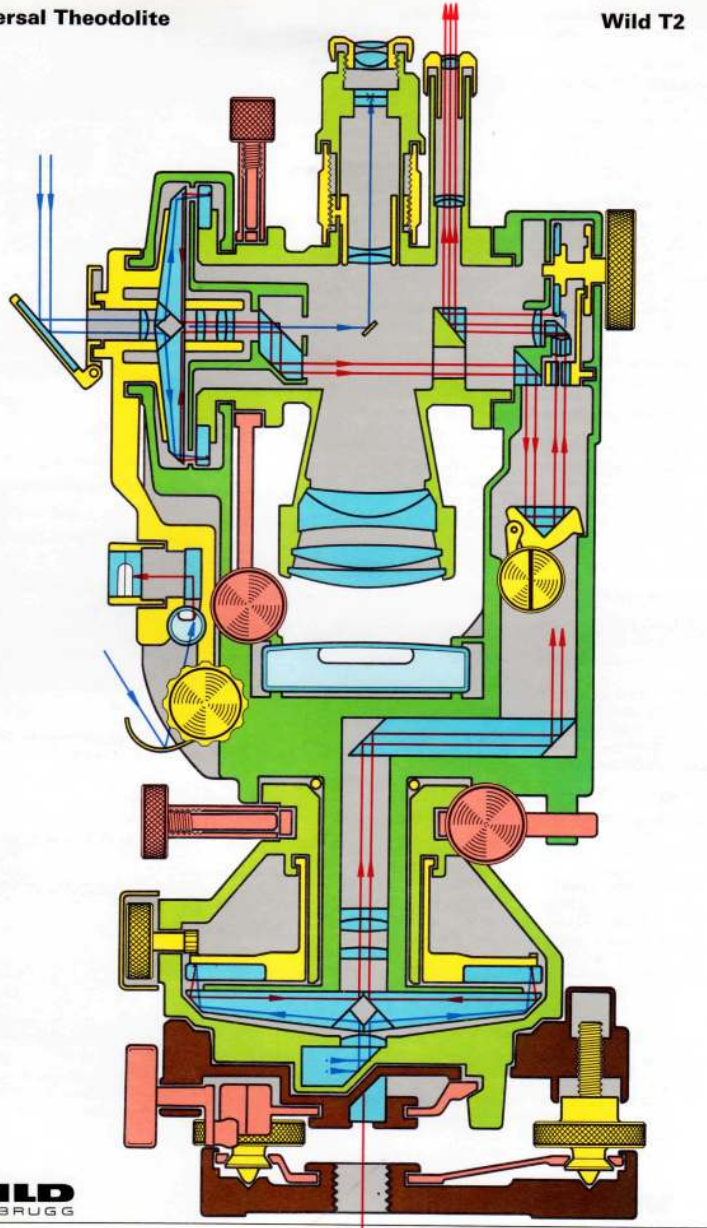
Los micrómetros permiten elevar la aproximación en la lectura, antes de anotar cualquier lectura angular es necesario hacer la coincidencia con el tornillo del micrómetro del índice hasta la marca precisa del círculo horizontal o vertical.

Limbos y primas se disponen en el taquímetro Wild T-2, como indica la figura.

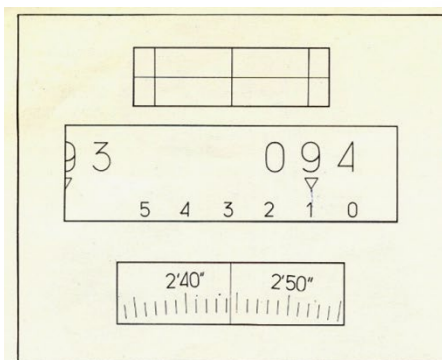


Universal Theodolite

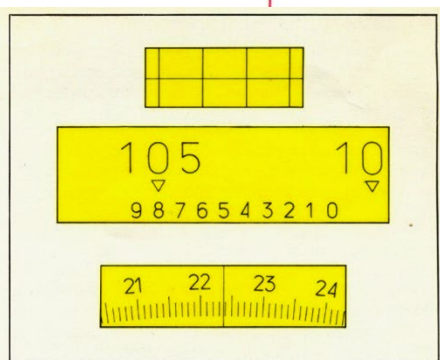
Wild T2



**WILD**  
HEERBRUGG



Lectura del ángulo vertical 360°: 94°12'44"



Lectura del ángulo horizontal 400°: 105.8224°



#### 5.4.8. Micrómetro óptico de precisión.

Es un dispositivo óptico-mecánico, asociado a un microscopio, que permite medir la fracción de división. Está esencialmente constituido de una **lámina de vidrio con caras paralelas** que desvía la imagen del índice en una cantidad igual a la fracción de división a medir. Esta fracción es leída directamente sobre la escala micrométrica, visible en el microscopio, o sobre el propio tambor micrométrico.

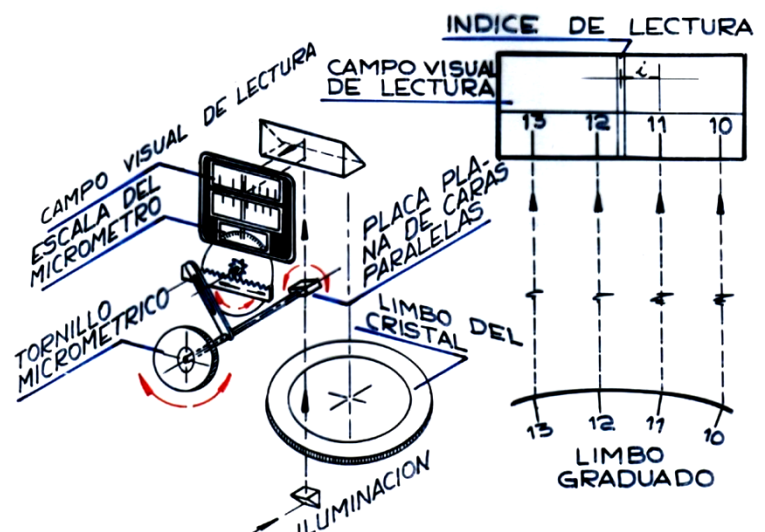
- **Micrómetro de coincidencia:** Si al microscopio de coincidencia se le añade un micrómetro capaz de leer la fracción de división, ya se dispone de un micrómetro de coincidencia. Para poder leer la fracción, se deberá poner en prolongación las graduaciones diametralmente opuestas del limbo, y a continuación ya se podrá tomar lectura.

El micrómetro de coincidencia, visto en inc. 5.4.7., requiere la estimación final de una fracción de división, según hemos visto. Su complemento natural será un dispositivo óptico adicional que mida dicha fracción de última división del limbo.

Bastaría con disponer de un dispositivo que permitiera un giro relativo de  $A_1$  y  $A_2$  igual como máximo a la mitad de la última división indicada, a partir de la posición de puntería. Si pudiera mediante dicho dispositivo llevarse a coincidencia dos trazas en  $A_1$  y  $A_2$  coincidirán todas dos a dos, y evidentemente, la medición de dicho giro será la fracción que antes se estimaba<sup>6</sup>. (Demostración ver M. Chueca Pazos. J.Herráez Boquera. J.Berné Valero. Tratado de Topografía 1. Teoría de Errores e Instrumentación. Capítulo 9. 4.2)

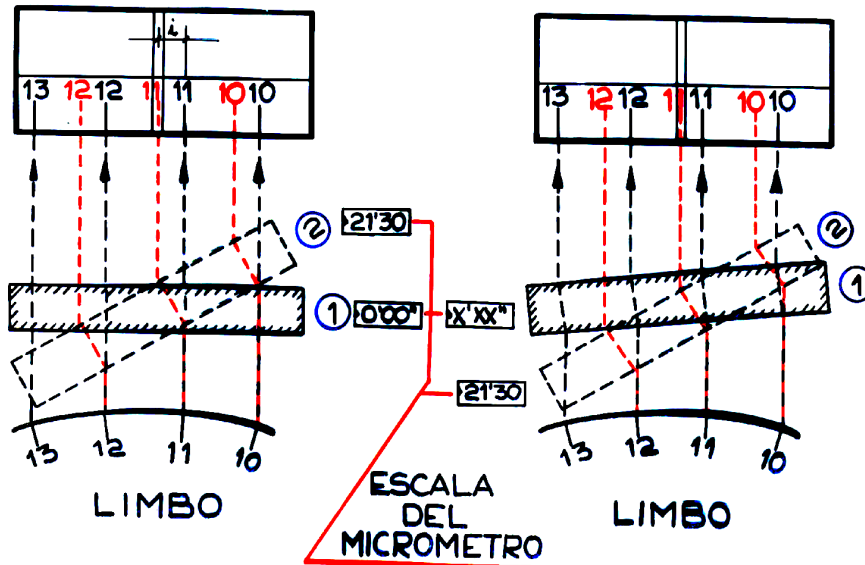
#### Funcionamiento del micrómetro óptico

El sistema de lecturas con micrómetro óptico, (ideado por Heinrich Wild) en la actualidad se utiliza en teodolitos de diversas marcas. Tal dispositivo se basa en el desplazamiento de los rayos luminosos que concurren a formar las imágenes de las divisiones de los limbos, al atravesar una lámina plana de caras paralelas accionada por un tornillo, de tal forma que los desplazamientos mencionados resultan con suficiente aproximación, proporcionales al giro de la misma, quedando indicados los valores angulares correspondientes en una escala adosada a dicho tornillo de comando. Supongamos que debemos efectuar la lectura correspondiente a una determinada dirección. Observamos en la figura siguiente un sector del limbo, y a través de un sistema óptico no representado en la figura, la formación de las imágenes de las divisiones de aquel en el campo visual de lectura, donde se encuentra el índice. Para completar la lectura es



<sup>6</sup> M. Chueca Pazos. J.Herráez Boquera. J.Berné Valero. Tratado de Topografía 1. Teoría de Errores e Instrumentación

menester agregar a la división del limbo correspondiente, en este caso  $11^\circ$ , el intervalo (i) comprendido entre la misma y el índice de lectura.  
 Admitiendo una posición tal de la placa plana, que los rayos luminosos la atraviesen sin desviarse, y que la escala correspondiente se encuentre en cero antes de efectuar la lectura.



Lectura directa:  $11^\circ$   
 Lectura con micrómetro:  $\frac{21' 30''}{11^\circ 21' 30''}$   
 Lectura completa  
 1): Posición inicial del micrómetro en el caso particular que corresponda a **cero**  
 (2): Posición final del micrómetro (coincidencia): el valor de su escala completa la lectura.

Lectura directa:  $11^\circ$   
 Lectura con micrómetro:  $\frac{21' 30''}{11^\circ 21' 30''}$   
 Lectura completa  
 1): Posición inicial del micrómetro en el caso más general correspondiente a **cualquier valor**  
 (2): Posición final del micrómetro (coincidencia): el valor de su escala completa la lectura. A la coincidencia le corresponde el mismo valor, a pesar de la distinta posición inicial.

De acuerdo a lo expuesto, el valor de la lectura sería  $11^\circ$  más el intervalo (i) comprendido entre dicha división y el índice. Para poder medirlo hacemos girar la placa accionando el tornillo, hasta que se produzca la coincidencia de la imagen correspondiente a la división  $11^\circ$  con el índice (posición punteada); como el desplazamiento de los rayos luminosos provenientes del sector del limbo considerado es proporcional al giro de la placa plana, se deduce que el valor medido en la escala nos proporciona el del intervalo i.

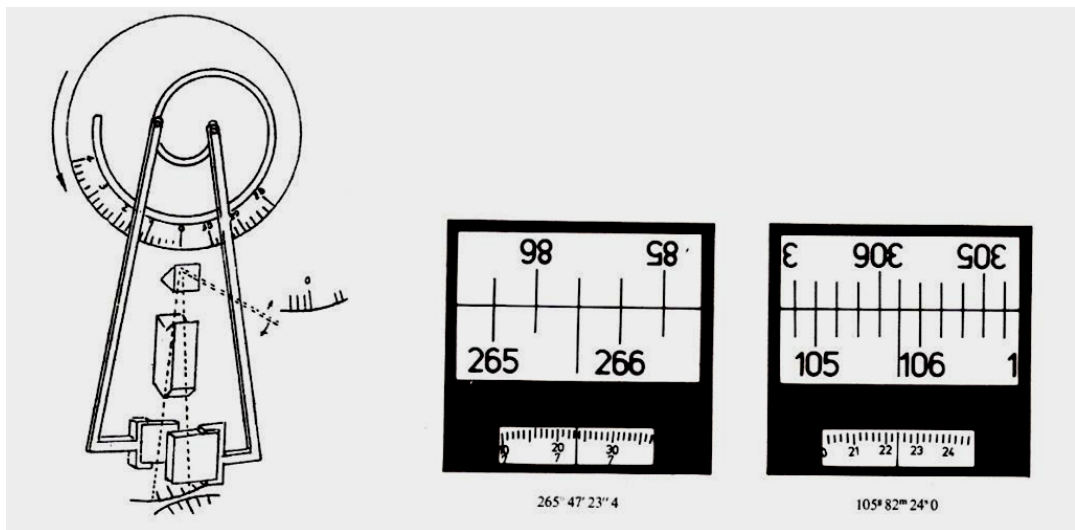
Teniendo en cuenta que a cada posición de la placa, y por lo tanto del tornillo de comando, le corresponde un solo valor en su escala, no es necesario que el micrómetro se encuentre en cero, antes de cada lectura, sino que podrá ocupar cualquier posición, siendo igualmente correctas sus indicaciones, debiendo ser llevada en cada caso la imagen de la división que corresponda, a formarse en coincidencia con el índice de lectura, accionando como ya se ha explicado el tornillo de comando y leyendo en su escala el valor que resulte, el que habrá que adicionar a la lectura efectuada en la división entera del limbo en coincidencia con el índice.

En los micrómetros ópticos más completos la imagen de la escala es observada en el campo visual de lectura, simultáneamente con el limbo y el índice.

Para efectuar la lectura, con el tornillo del micrómetro se desplazan las imágenes de las divisiones de los limbos (ambos a la vez) hasta obtener la coincidencia con el índice de la división que corresponda en el limbo (acimutal o vertical según el caso).

El valor de la división en coincidencia con el índice (única posible en cada caso), dará los grados, en tanto que los minutos y décimas, se completan en la escala del micrómetro.

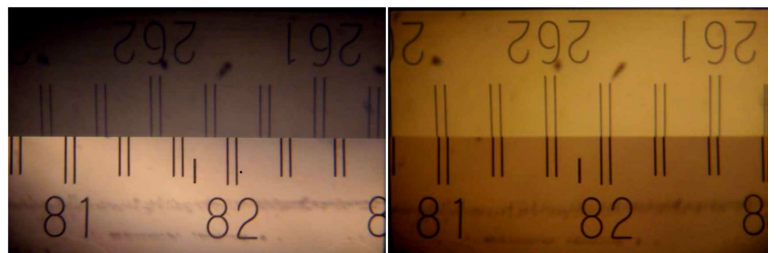
El micrómetro de gran sensibilidad mide el desplazamiento<sup>7</sup>, según el esquema de la siguiente figura, y un pequeño limbo de vidrio, con su dispositivo óptico correspondiente, agrega al visor del microscopio la imagen del micrómetro deseada, obteniéndose la lectura final.



Con ayuda del micrómetro explicado se consigue la lectura directa del segundo sexagesimal, con estimación de las décimas, precisión sobrada para cualquier trabajo topográfico y suficiente para tareas geodésicas, aún de primer orden, multiplicando el número de observaciones.

### Lecturas:

La lectura se realiza por medio del ocular que se encuentra a un costado -microscopio- del anteojo. Para poder realizar la lectura, primero deben coincidir las dos líneas, inferior y superior más cercanas a la



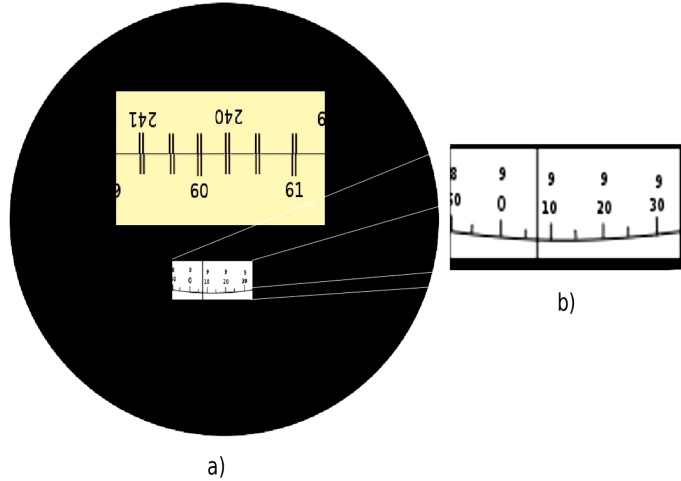
marca central. En la figura se muestra el caso en el cual las líneas no coinciden y la posición en la cual deben estar para realizar la lectura en forma correcta.

✓ **Lectura de los grados.** En la figura siguiente, se muestra el disco graduado donde se realizará la lectura de los grados. Se toma como lectura de los grados el

<sup>7</sup> M. Chueca Pazos. J.Herráez Boquera. J.Berné Valero. Tratado de Topografía 1. Teoría de Errores e Instrumentación

primer número que se encuentra en la parte inferior izquierda respecto de la marca central, en este caso será 60 grados

✓ **Lectura de los minutos.** Para realizar la lectura de los minutos, primero se lee la decena del minuto, esto se realiza contando (figura a) los espacios que separan la lectura del grado, en este caso 60, del número invertido de arriba que difiere en 180 grados, o sea 240. Para este ejemplo, esta diferencia sería un espacio, lo que se traduce en 10 minutos. Cuando estos números están separados 6 espacios (60 minutos) hay que agregar 1 grado a la lectura de los grados, en el ejemplo quedaría 61. Este es un caso particular porque las marcas del nonio coinciden en dos posiciones, una con 6 espacios (entre el 60 y 240) y otra con 0 espacios (61 coincidiendo con 241). La unidad de los minutos se lee del micrómetro (figura b). En la figura b, se puede apreciar dos escalas, la unidad del minuto corresponde al número que se encuentra en la parte superior de dicha escala. en este caso serían 9 minutos. Por lo tanto, la lectura correspondiente a los minutos sería de 19'

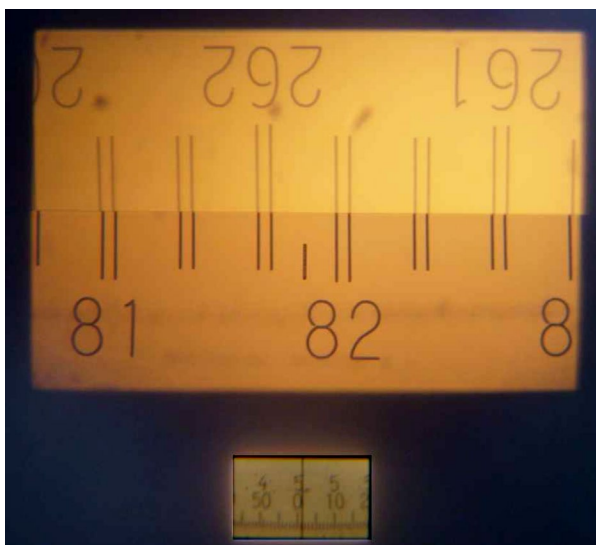


✓ **Lectura de los segundos.** Se lee directamente en el micrómetro (figura b) en la escala inferior, en este caso se sería 7 segundos

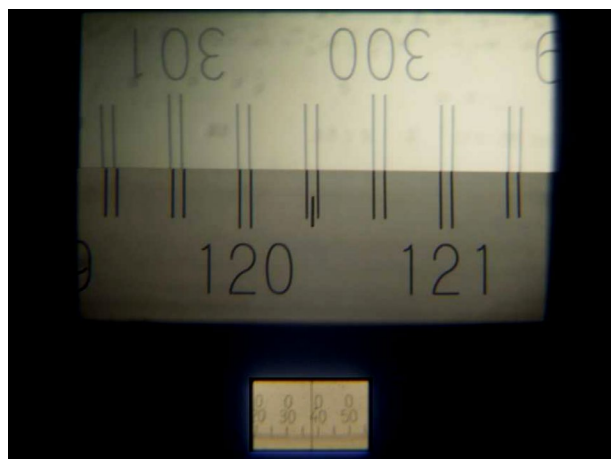
**Lectura final: 60° 19' 7"**

Otros ejemplos:

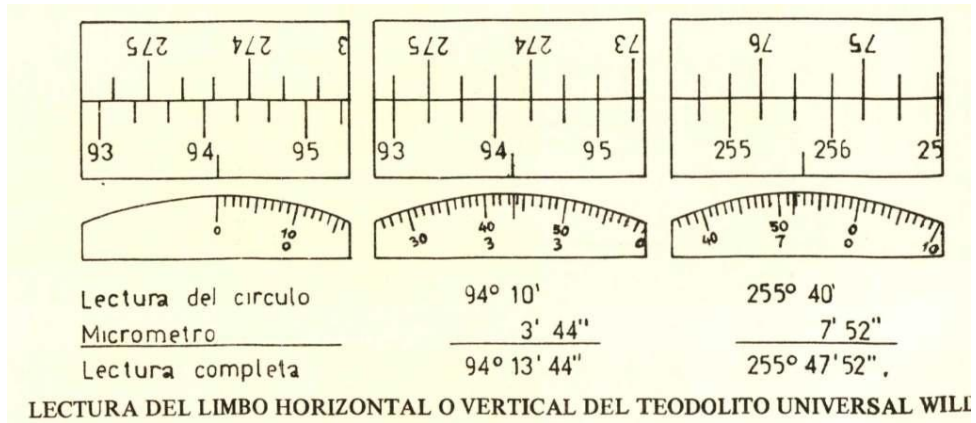
81° 55' 1"



120° 20' 38"

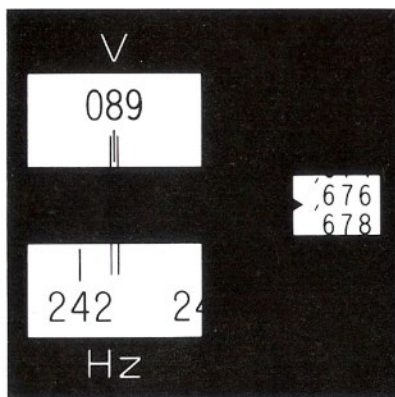




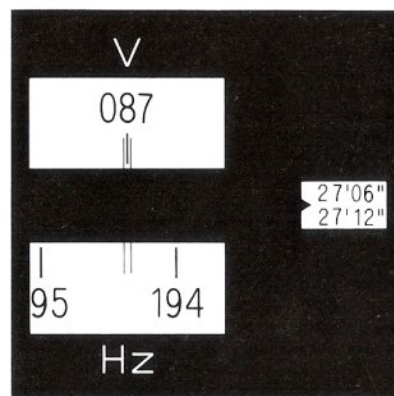


• **Micrómetro encuadrado:** En este sistema **no existe lecturas de puntos diametralmente opuestos**. Consiste en apreciar la fracción, de unidad por medio del micrómetro. Una vez que se haya hecho la coincidencia entre el índice de alidada (doble ranura) y la marca de división. Esta coincidencia se efectúa encuadrando la división dentro de la doble ranura de alidada, y sólo es posible para una división.

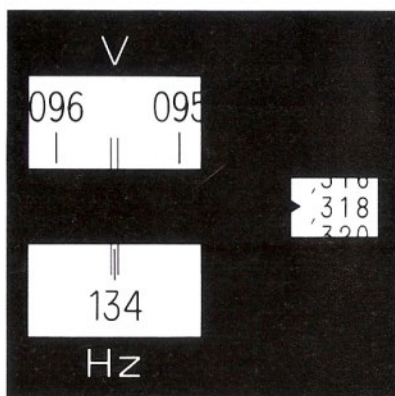
Lecturas de ángulos Wild T1



V=89,677°

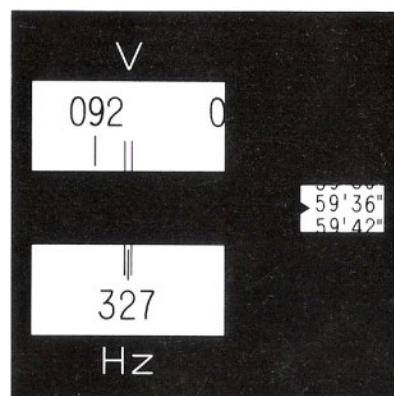


V=87°27'09"



ra del círculo 400°

Hz=134,318°



a del círculo 360°

Hz=327°59'36"

Otro ejemplo



**Lectura de los círculos (Wild T1)**

Previamente bajar el espejo de iluminación y dirigirlo hacia el cielo o a un plano posterior claro y uniforme hasta que las imágenes de los círculos en el microscopio de

lectura queden uniformemente iluminadas. Girar el ocular del microscopio hasta que los trazos del círculo y el índice se vean nítidos. En la parte inferior del campo del microscopio se observa la zona de lectura del círculo horizontal "Hz" y encima la zona de lectura del círculo vertical "V", ambos con índice de doble trazo. A la derecha la ventanilla del micrómetro que vale para ambos círculos y que tiene como índice una flecha negra. Para la lectura del círculo horizontal, girar el botón del micrómetro hasta que en la zona inferior señalada con "Hz", un trazo de la división se encuentre exactamente en medio del índice doble. Leer la cifra de ese trazo para obtener los grados y añadirle como parte decimal la lectura de la escala del micrómetro que se ve en la ventanilla a la derecha. El micrómetro de 0,002<sup>g</sup>, o bien 6" respectivamente. Si el índice triangular se encuentra entre dos cifras de la numeración entonces se leer por ej.: 0,001<sup>g</sup> (=0,1<sup>c</sup>) en los círculos de graduación 400<sup>g</sup>, o bien 3" en los de 360<sup>g</sup>, respectivamente. Para la lectura del círculo vertical se procede de la misma manera con la imagen del medio señalada "V" y la misma escala del micrómetro.

- **Micrómetro de doble círculo:**

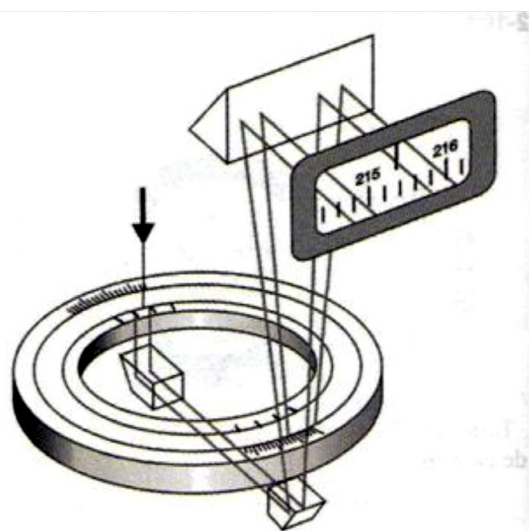
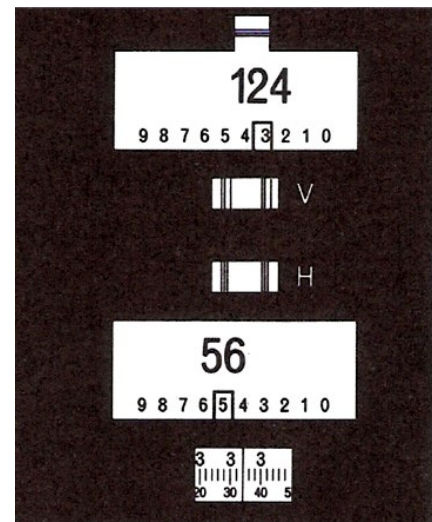
El doble círculo es un dispositivo muy empleado en los aparatos Kern, y suprimen errores de excentricidad de círculos por la puesta en coincidencia de imágenes diametralmente opuestas de dos graduaciones concéntricas, llevadas por el limbo. Lect. Hz= 56° 53'32"

Kern ha introducido el principio del doble círculo para las lecturas en los limbos con dos divisiones concéntricas. El círculo exterior tiene divisiones simples, mientras que en el interior los trazos son dobles.

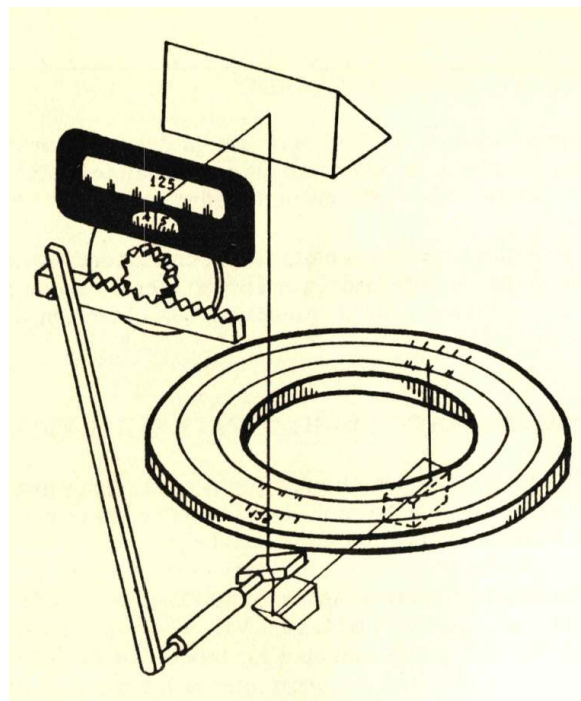
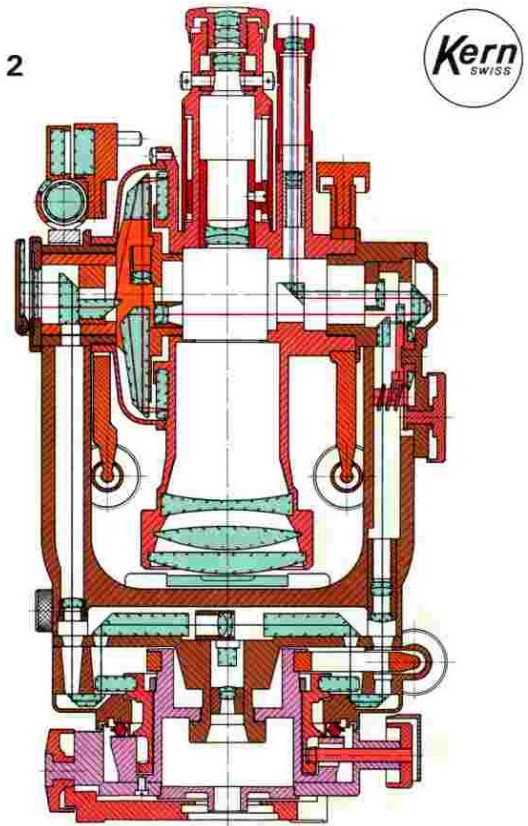
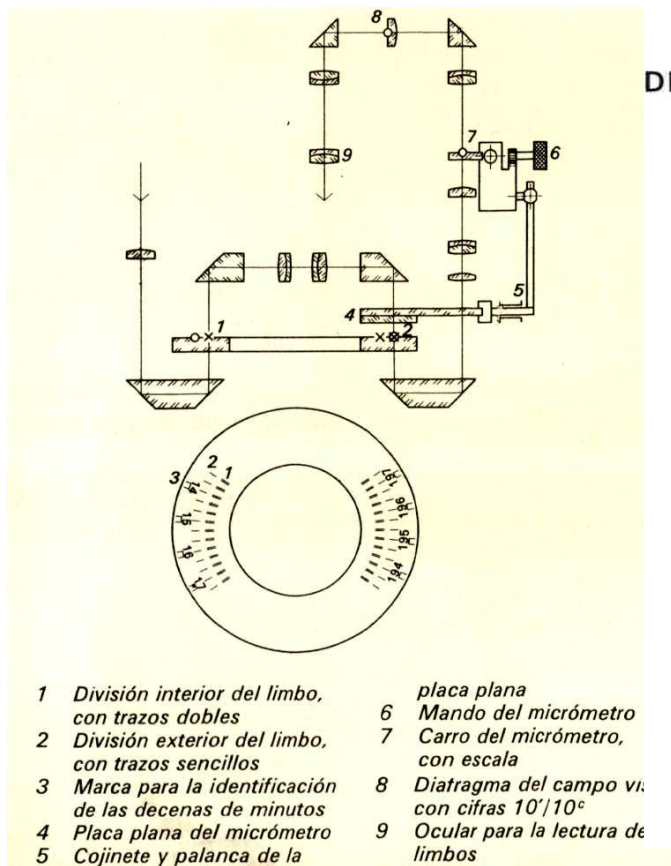
Por medios ópticos la imagen de una parte de las divisiones interiores se proyecta sobre la posición diametralmente opuesta de los trazos grabados sobre el círculo exterior. Se elimina así la influencia del error de excentricidad de los limbos como ya se ha visto al estudiar esta causa de error.

No obstante, el aporte más importante del sistema de doble círculo está dado por el empleo de dos diámetros distintos con trazos de división para efectuar la lectura correspondiente a una dirección de manera que la curva que representa los errores de división de los círculos graduados tiene un período de 360°.

En la figuras se reproducen esquemáticamente el sistema de coincidencia en el una vista de los elementos ópticos y mecánicos que llevan las imágenes de dos partes



diametralmente opuestas hasta el ocular de las lecturas en el sistema de doble círculo empleado en el DKM2-A de KERN. <sup>8</sup>



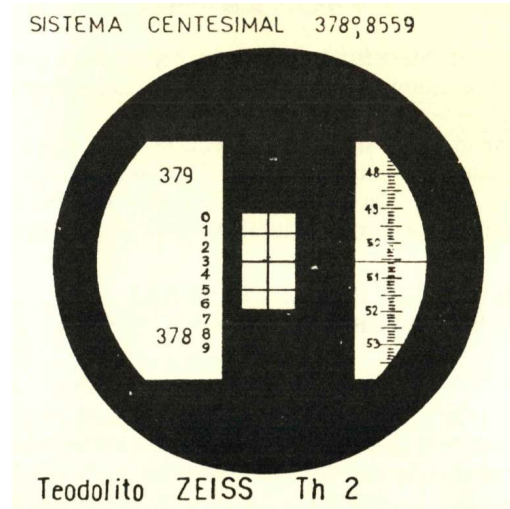
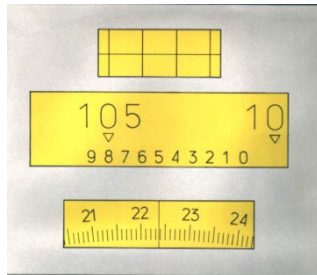
**Sistemas de lecturas analógicas con digitalización del resultados**

<sup>8</sup> A. Berli. Topografía. Tomo I



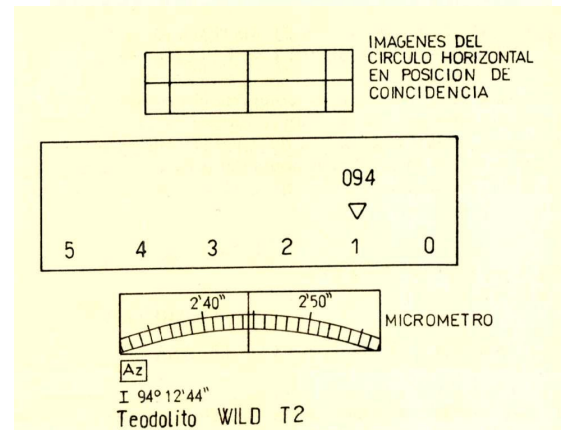
Son aquellas lecturas de los círculos cuyas cifras se leen directamente en forma sencilla, por simple observación en el microscopio sin necesidad de recurrir al conteo sobre escalas.

En algunos casos las 6 primeras cifras se obtienen directamente y sólo la última debe contarse sobre la escala graduada, como puede verse en las lecturas en sistema centesimal de la figura.



En sistema sexagesimal corresponden a los teodolitos Zeiss Th2 y Wild T2 respectivamente.

Se dice entonces que la lectura está parcialmente digitalizada.<sup>9</sup>



### 5.5. MEDIDA ELECTRÓNICA DE ÁNGULOS <sup>10</sup>

En la actualidad y con la generalización de la aplicación de la informática a todas las técnicas se ha implantado de forma general la presentación de la lectura en el limbo sobre una pantalla de cuarzo líquido.

Para ello, ha sido necesario modificar los limbos de vidrio para que un círculo de lectura sea capaz de realizar la estimación angular y presentar el resultado en la pantalla de cuarzo.

Los sensores electrónicos de posición angular miden el ángulo girado por un eje (anteojo) respecto a una dirección. Para ello, disponen de unos limbos codificados que permiten a un sensor convertir valores analógicos en digitales para obtener las medidas.

El codificador es un limbo de cristal donde las escalas grabadas con trazos transparentes y opacos serán los signos de codificación a leer por una célula.

Existen dos sistemas de lectura: INCREMENTAL Y ABSOLUTO.

El sistema incremental. No tiene valor fijado en su superficie. El ángulo de rotación se obtiene por la variación de una magnitud susceptible de medida electrónica. Algunos

<sup>9</sup> A. Berli. Topografía. Tomo I

<sup>10</sup> M. Chueca Pazos. J.Herráez Boquera. J.Berné Valero. Tratado de Topografía 1. Teoría de Errores e Instrumentación



sistemas miden diferencias de fase y otros ciclos en la intensidad luminosa. Casi todas las estaciones totales y teodolitos adoptan este sistema.

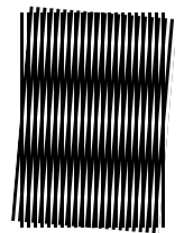
El sistema absoluto. Sobre el círculo de cristal lleva fijado un origen o cero absoluto. Algunos equipos, los menos precisos, llevan grabados un código especial, y por lectura sobre él se determinan los valores angulares.

Existe un sistema diseñado por la casa Leica (Wild) llamado dinámico, con precisiones similares al incremental.

### 5.5.1. Codificador giratorio incremental <sup>11</sup>

Los limbos incrementales no tienen un valor fijado en su superficie, miden incrementos de valores angulares, respecto a un origen de referencia aleatorio. Existen dos sistemas. El basado en las interferencias producidas por el giro de dos patrones radiales, uno grabado sobre el limbo, con trazas equidistantes, y otro sector con igual grabación que gira sobre el limbo. El giro de este último produce unas interferencias, con un patrón “moiré” cuya luminosidad se explora mediante fotosensores.

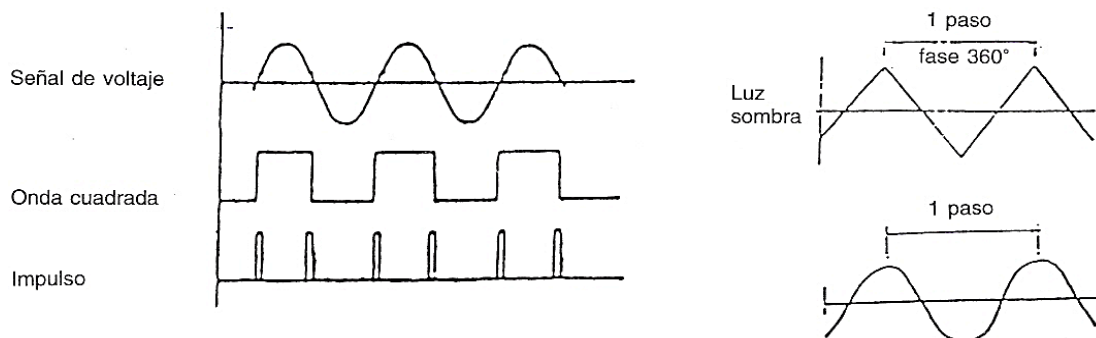
(Moiré: pronunciado “muaré,” es un patrón de interferencias que se forma cuando se superponen dos rejillas de líneas con un cierto ángulo).



El sistema que mide oscilación de la intensidad luminosa, analiza también cambios de luminosidad, al atravesar un haz un limbo que lleva unas zonas opacas y transparentes.

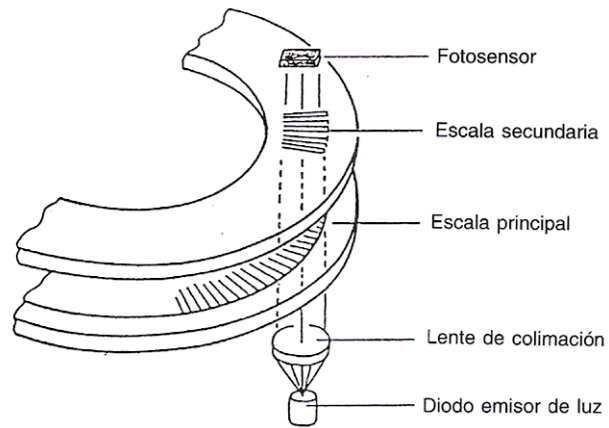
La estructura básica del equipo está formada por un limbo en el cual se han trazado unas ventanas (zonas claras y oscuras), un diodo emisor de luz y en la parte opuesta un fotodetector.

La luz generada por el LED atraviesa el limbo por las zonas claras y se interrumpe en las oscuras. Estos cambios luz-oscuridad se detectan en el fotodetector, y los convierte en señal eléctrica. Este cambio, que en función de la ranura tendría que ser triangular, por efecto de la difracción que sufre el haz, el fotodetector lo reconoce como una onda senoidal. Esta medida luego se convierte en forma digital o cuadrada, y se generan unos impulsos, fácilmente contables.



<sup>11</sup> M. Chueca Pazos, J.Herráez Boquera, J.Berné Valero. Tratado de Topografía 1. Teoría de Errores e Instrumentación

Contando el número de pulsos se podría saber el ángulo, girado, pero con esta medida sólo se llega a un valor aproximado, en función del tamaño de las rendijas y el punto inicial y final en ellas. Por ejemplo, en el Kern E2, el número de trazos radiales es de 20.000. Si cada paso representa 2 minutos, y además el conteo lo realizara con el mismo signo, tanto si el giro fuese a derechas como a izquierdas, no valdría como elemento de medida. Para salvar estas dificultades se utilizan más fotodetectores. Primero, para saber el sentido de giro, se utiliza un segundo fotodetector, desplazado 1/4 de paso (90°) entonces las señales generadas por ellos serán:



$$V_1 = A \sin \varphi$$

$$V_2 = A \sin (\varphi + 90) = A \cos \varphi$$

En el primer fotodetector se produce una señal seno y en el segundo una coseno. De tal manera, que el circuito de computación determina cuál de ellas empieza primero. Si empieza la señal  $V_1$  se gira a derechas; si empieza  $V_2$  gira a izquierdas, así se sabe si hay que sumar o restar los pulsos.

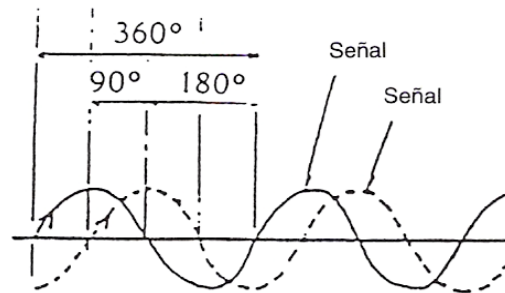
Para la lectura de precisión se realiza una interpolación. Para ello, se utilizan dos sistemas: el de división de resistencia y el de la tangente. Siendo este último el más extendido. Para ello, se utilizan 4 fotodetectores desplazados entre sí 1/4 de vuelta (0°, 90°, 180°, 270°) Y las señales que determinan son:

$$V_1 = A \sin \varphi$$

$$V_2 = A \sin (\varphi + 90) = A \cos \varphi$$

$$V_3 = A \sin (\varphi + 180) = - A \sin \varphi$$

$$V_4 = A \sin (\varphi + 270) = -A \cos \varphi$$



De manera que:

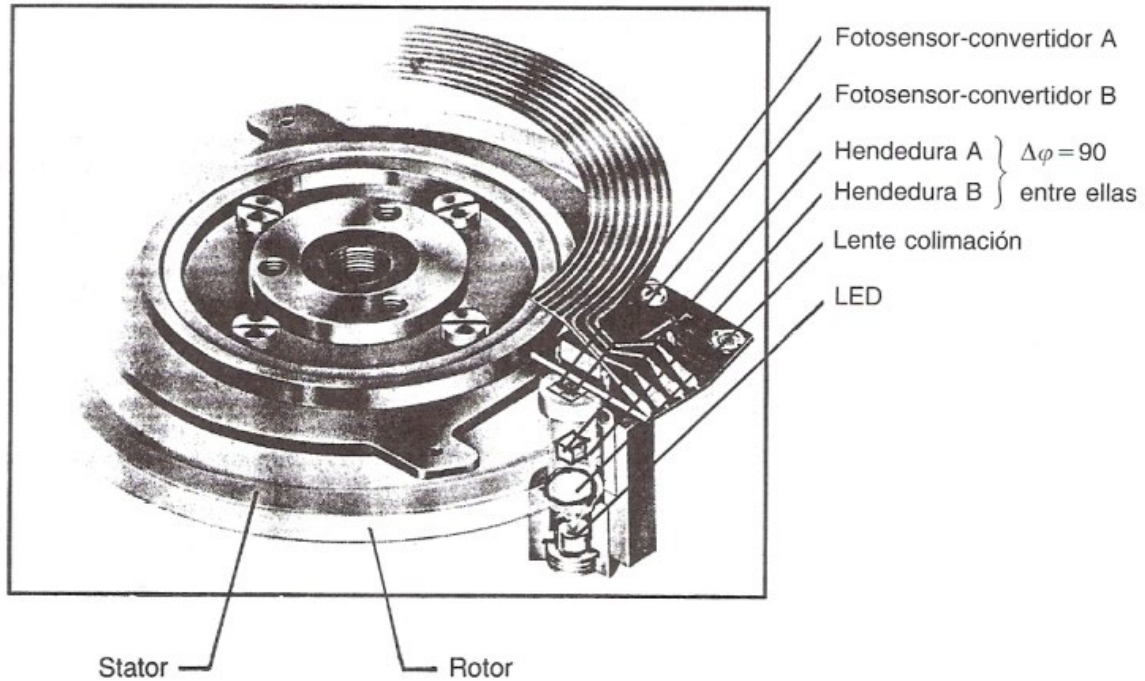
$$\frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_4} = \text{tg } \varphi$$

Que por medios electrónicos determina fácilmente el valor de  $\varphi$ .

La lectura del ángulo vertical es similar, pero se precisa fijar correctamente la posición del 0.

Para ello, se disponen de dos escalas especiales. Una en el limbo y otra en la alidada, de tal manera que coincidan cuando el eje de colimación sea perpendicular al eje principal. Para reiniciarlo una vez activado el aparato es preciso cabecear el telescopio para que el detector explore las coincidencias y establezca el cero.

El valor medido se compensará electrónicamente de la falta de perpendicularidad, de forma automática.



### 5.5.2. Codificador Absoluto.

Dispone de un limbo codificado que es leído por fotosensores que se mueven conjuntamente con la alidada (dinámico), o que están fijos (estático). Las posiciones de luz y oscuridad de los sensores proporcionan un código binario que es traducido a valor angular. Existen dos métodos: la medición estática y la medición dinámica.

- **Convertor analógico numérico para el sistema binario** <sup>12</sup>

Sistema Binario Absoluto. (visto en el Tema 1) La medición se realiza midiendo el arco comprendido entre el origen y la posición de un índice ideal sobre el sector del círculo correspondiente. El resultado de la medida de esta magnitud física es transformado, mediante elementos sensibles, al código binario.

Código Gray. En el sistema anterior cuando se pasa de algún número a su inmediato superior se observa que se modifican varios dígitos (por ej.: cuando se pasa de 7 (00111) a 8 (01000) y de 15 (01111) a 16 (10000). Estos cambios provocan errores al intervenir elementos sensibles que transforman medidas en números binarios. Es por ello que se usa el código Gray, dado que produce un solo cambio de dígito cuando se pasa de un número binario al inmediato siguiente.

Para comprender mejor el uso del binario valorado o del Código Gray como nuevo sistema de medida de ángulos -en reemplazo de los sistemas tradicionales centesimal y sexagesimal- consideramos un caso muy simple, que carece de interés para las mediciones prácticas por el reducido número de posiciones que se pueden definir sobre el círculo, pero que ilustra sobre la aplicación de este nuevo convertor analógico-numérico.

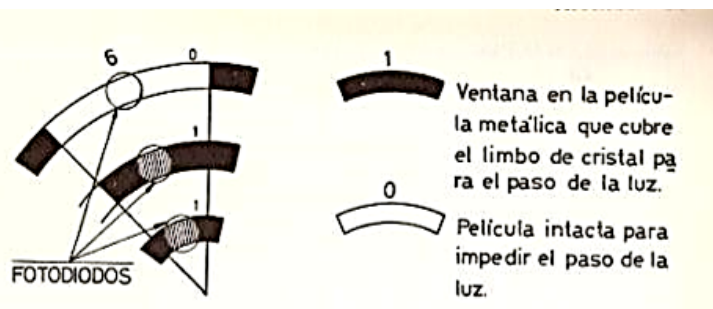
Sean  $8 = 2^3$  sectores circulares iguales sobre el círculo a codificar para representar a los 8 números decimales comprendidos entre el 0 y el 7. Como la notación binaria de cada uno de ellos requiere el uso de 3 bits, se trazan sobre el círculo 3 pistas que

<sup>12</sup> A. Berli. Topografía. Tomo I

tienen la forma de coronas circulares. En la pista externa se representa el dígito menos valorado ( $2^0$ ) y en la interna el de mayor valor ( $2^2$ ). Aunando sectores y pistas resultan  $3 \times 8 = 24$  sectores de corona circular sobre las pistas

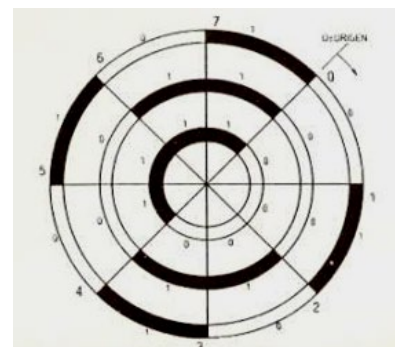


Para representar el 1 se practica un corte, ranura o ventana sobre la película metálica en la parte correspondiente a la corona circular, y para representar el 0 se deja intacta la película. Tres fotodiodos, uno por cada pista, detectan la existencia de ranura (1) o de su falta (0) y permiten leer el número correspondiente en el sistema binario. Ej.: la posición de los 3 diodos sobre las pistas reconocen *ranura-ranura-lleño*

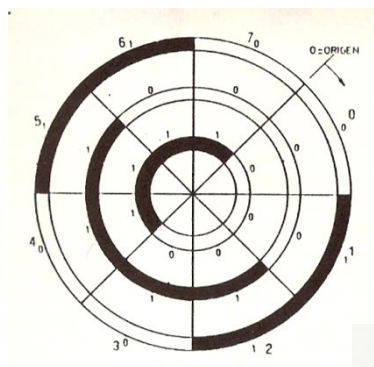


que corresponden al número binario valorado  $110 = 6$  en el sistema decimal.

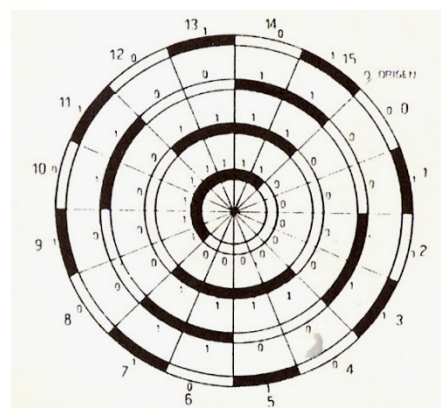
A continuación se representa el disco completo o limbo para representar tres bits en el sistema binario valorado. Este círculo desempeña el rol de convertor del sistema analógico propio de los teodolitos al sistema binario.



Limbo para representar 3 bits en el código Gray



Limbo para representar 4 bits en el sistema binario valorado. Para mayor claridad graficaremos un círculo con  $16 = 2^4$  sectores, para representar los números decimales comprendidos entre 0 y 15. La notación binaria requiere el empleo de 4 bits, motivo por el cual habrá 4 pistas con sus respectivos fotodiodos lectores





Limbo para representar 4 bits en el código Gray

- **Conclusiones** sobre los conversores analogico-numéricos en el sistema binario.

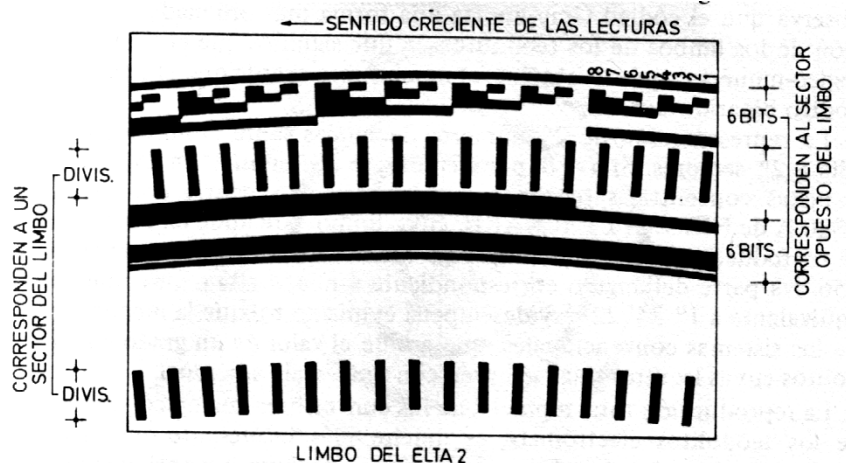
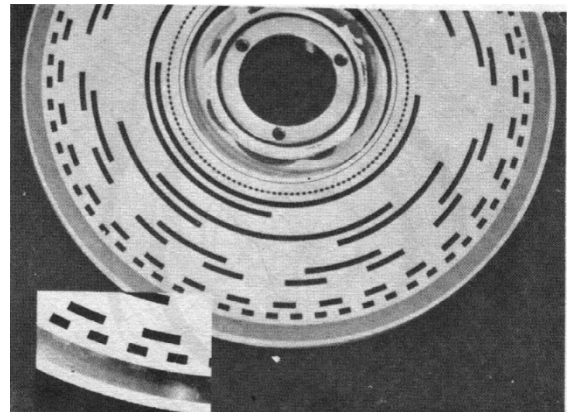
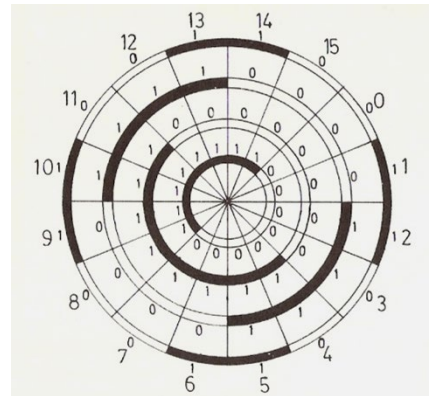
De la comparación de los dos últimos gráficos se observa que el código Gray aporta una forma más ordenada para la división de los limbos de los teodolitos, lo que significa que el conversor analógico-numérico que se obtiene es mucho más simple que el conversor del código binario valorado.

La representación de  $2^n$  números decimales sobre el limbo requiere  $n$  bits y  $2^n$  sectores. Si  $n = 8$ , por ejemplo, se necesitan  $2^8 = 256$  sectores y 8 pistas concéntricas (coronas circulares), cuyo limbo es dividido en Código Gray-. Es oportuno observar que la 256ava parte del ángulo correspondiente a una vuelta o giro completo es equivalente a  $1^\circ 24' 22''5$  y desempeña el mismo rol que la menor división de los sistemas convencionales, que asume el valor de  $1^\circ$  en los teodolitos cuyas lecturas finas se hacen con una escala adicional.

La reproducción total o parcial de los conversores analógico-numéricos de los teodolitos electrónicos es mucho más interesante que la de los sistemas convencionales. Por este motivo se incluye, a continuación, una parte del limbo del taquímetro electrónico

ZEISS, modelo ELTA 2, de, codificado en binario absoluto o valorado, con 12 pistas concéntricas. Como cada pista se corresponde con un bit, el limbo queda dividido en  $2^{12} = 4096$  sectores de círculo que equivalen a  $5',273$ . . . . Un aspecto complementario del

procedimiento de lectura de este instrumento es el uso del concepto del "doble círculo", que se concreta mediante la superposición intercalada de las divisiones de un sector entre dos bandas de 6 bits cada una. En la figura se indican, con los dígitos de 1 a 8,

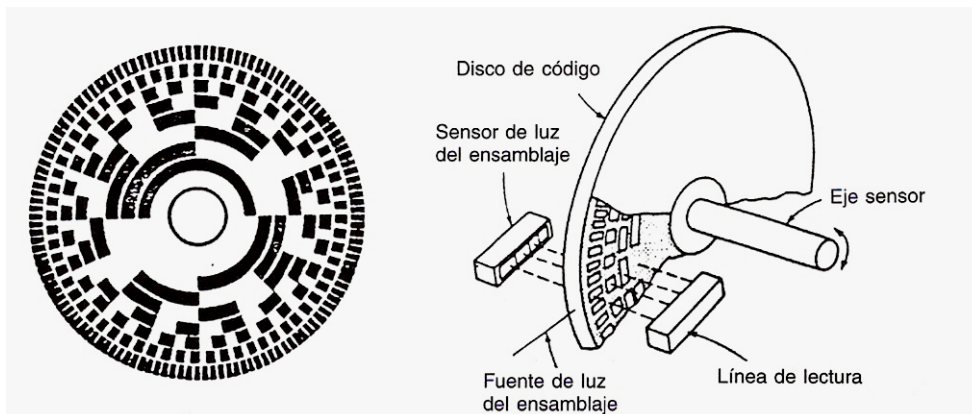


las lecturas en sistema binario absoluto que se corresponden con las posiciones sexagesimales cuyos valores aparecen en la última columna del cuadro siguiente

POSICION	LECT. BINARIA	LECT. DECIMAL	LECT. SEXAGESIMAL
1	110010100000	3232	284 <sup>0</sup> ,0625
2	110010100001	3233	284 <sup>0</sup> ,1504
3	110010100010	3234	284 <sup>0</sup> ,2383
4	110010100011	3235	284 <sup>0</sup> ,3262
5	110010100100	3236	284 <sup>0</sup> ,4141
6	110010100101	3237	284 <sup>0</sup> ,5020
7	110010100110	3238	284 <sup>0</sup> ,5898
8	110010100111	3239	284 <sup>0</sup> ,6777

- **Medición estática** <sup>13</sup>

En la medición estática sobre un círculo de cristal se ha grabado un código binario, que al leerse por los fotosensores se determina la posición sobre el círculo. Este sistema tiene unas limitaciones importantes de diseño, ya que para leer valores de minutos, exigen limbos muy grandes, para que en las últimas pistas los trazos sean detectados por los fotosensores.



Para evitar estos problemas algunas casas, han añadido un micrómetro electrónico, que con un sistema de coincidencia y lectura digital interno detectan los giros correspondientes a valores finales de minuto y segundo de arco (aparatos Elta de Zeiss, visto en el punto anterior "Conclusiones")

- **Medición dinámica**

Esta solución ha sido adoptada por la casa Leica (Wild); para ello sobre un disco se han grabado 2.048 espacios iguales formados por segmentos opacos y transparentes, o 1.024 unidades de fase

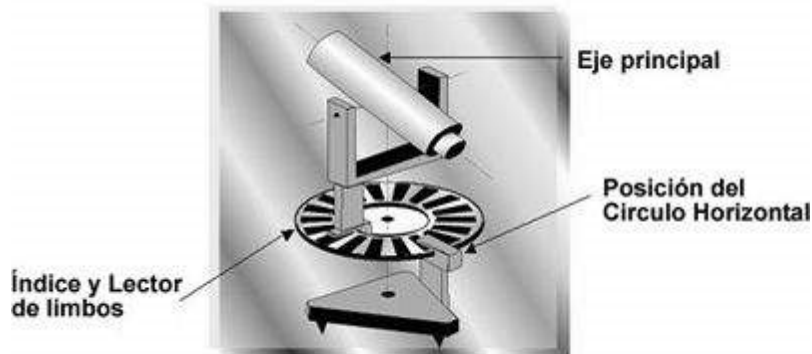
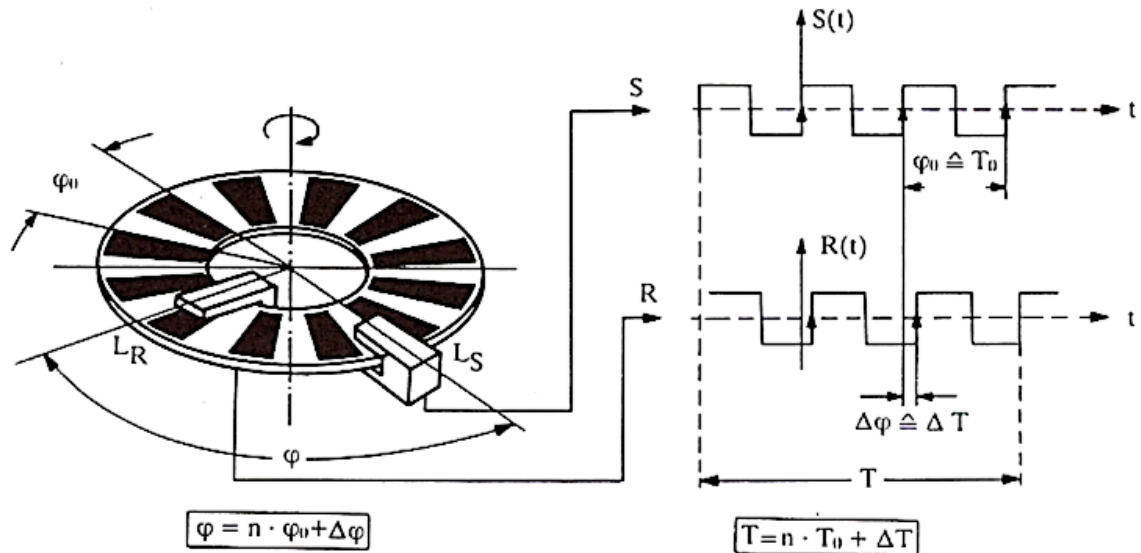
$$\varphi_0 = 360^\circ / 1024$$

En cada medición del ángulo, todos los trazos del círculo son explorados con lo cual queda eliminado el influjo de eventuales errores en la graduación, al colocar dos pares

<sup>13</sup> M. Chueca Pazos. J.Herráez Boquera. J.Berné Valero. Tratado de Topografía 1. Teoría de Errores e Instrumentación

de fotodiodos diametralmente dispuestos, eliminando también errores de excentricidades.

El esquema es el siguiente, limbo rotativo con 2.048 trazos, y parejas de fotodiodos. Un fotodiodo es fijo  $L_F$  a la base, y establece el origen de lectura, el otro es móvil  $L$  solidario al anteojo, es el ángulo que se quiere medir. En ambos fotosensores se generan señales senoidales, convertidas a cuadradas inmediatamente.



El ángulo a medir será  $\varphi$  que viene por la expresión

$$\varphi = n\varphi_0 + \Delta\varphi$$

siendo:

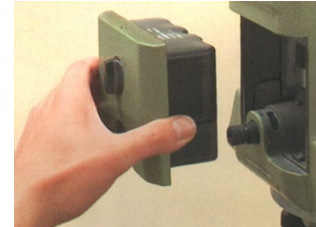
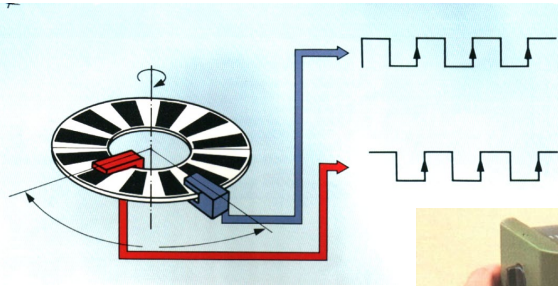
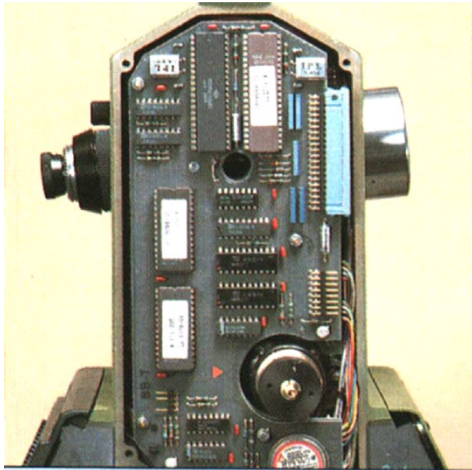
$n$  = número de períodos de onda cuadrada que han pasado sobre el fotodiodo, son contados electrónicamente.

$\Delta\varphi$  = diferencia de fase, que el aparato determina por comparación digital.

Este valor se ha obtenido de la exploración de muchas medidas, y una vez que el círculo haya llegado a la velocidad de rotación óptima. La duración de escaneado de una lectura dura alrededor de 0,6 segundos.

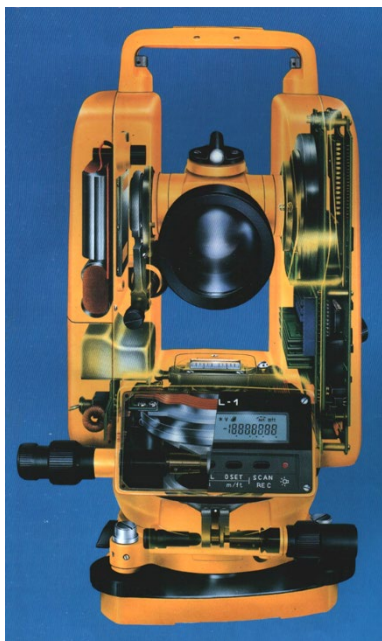
En estos equipos, la lectura no es continua, es decir, variable conforme gira la alidada; sólo se realiza cuando después de una puntería se activa el botón provocando la exploración de limbo. Podría trabajar con exploración continuada, pero supone un mayor coste.





La medición absoluta del ángulo se basa en una captación dinámica del ángulo con exploración optoelectrónica. Las mediciones se llevan a cabo en posiciones diametrales

Teodolito Nikon NE-5  
 30x aumentos  
 sensibilidad de niveles de alidada 30"/2mm  
 índice vertical automático  
 círculos 360° o 400g, apreciación 5



Teodolito Topcon DT-20. 30x aumentos, sensibilidad de niveles de alidada, 40"/2mm, índice vertical automático, círculos 360° o 400g, apreciación 20".

