

Un método rápido y preciso para ajuste de monturas ecuatoriales

TOMÁS PANETH S. I.

*Observatorio Nacional de Física Cósmica,
San Miguel, Argentina*

Abstract: The hour axis of any equatorial instrument may be centered in a very short time and with great accuracy using a theodolite. It can be operated in autocollimation using a mirror solidary with the hour axis or in reciprocal collimation if it is an optical instrument and it is preferred to operate with it.

Practical details of the method are given together with a series of considerations on the clock and the total accuracy that can be obtained in the guiding and the reasonable precision in each of the adjustments.

Introducción

Lo tedioso de los métodos habituales para el ajuste de monturas ecuatoriales, y la dificultad en aplicarlos para un celóstato, movieron a desarrollar el método aquí descrito. Dado que es aplicable a cualquier instrumento con montura ecuatorial, sea radiotelescopio o telescopio óptico, y además es preciso y rápido, se juzgó oportuno presentarlo para su utilización.

Para tener una idea de la rapidez y precisión del método, téngase presente que para el celóstato de San Miguel, estando todo preparado, se tardaron aproximadamente 4 horas para ajustar el azimut y elevación del eje horario con exactitud de un segundo de arco, pudiendo repetirse el ajuste las veces que fuere necesario con la ventaja adicional que la normal al espejo primario queda automáticamente en declinación cero, como corresponde a un celóstato de Lippmann.

Esencialmente el método consiste en llevar el eje horario a su posición correcta con ayuda de un teodolito. Es la aplicación del método óptico de montaje de máquinas. Para su ejecución se necesita un espejo solidario al eje, en cuyo caso se trabajará con el teodolito en autocolimación; o bien, en el caso de los telescopios ópticos, es posible trabajar en colimación recíproca entre el instrumento y el teodolito.

La normal al espejo (o el eje del telescopio, si se piensa operar en colimación recíproca) tendrán desde el comienzo declinación aprox. cero, y el único movimiento que habrá en declinación durante el ajuste será desde allí hasta exactamente cero. Habrá que observar el espejo desde tres

puntos cercanos al mismo: uno situado al Este, otro al Oeste y el tercero desde arriba, en el mismo plano meridiano. Para los dos primeros solamente se necesita un azimut de referencia (un objeto debidamente alejado, en lo posible cerca de la horizontal, cuyo azimut respecto al meridiano se conoce), para el tercero se necesita además la latitud del lugar de la intersección de los dos ejes (horario y declinación) del instrumento.

Preparación

Para poder operar en autocolimación hace falta un espejo y el dispositivo de iluminación del retículo del teodolito desde la zona del ocular. Para los teodolitos Zeiss ya vienen estos elementos como accesorios optativos, pero este no fue el caso del teodolito disponible en San Miguel y en consecuencia hubo que diseñar y contruir el dispositivo de iluminación consistente en:

- portalámparas con su lamparita.
- lupa, que hace las veces de condensador reproduciendo el filamento de la lámpara aproximadamente en la pupila de salida del ocular.
- vidrio a 45° colocado detrás del ocular, muy cerca del último lente del mismo, que hace las veces de espejo transparente y sirve para iluminar el retículo desde atrás, al tiempo que permite observarlo.

El sistema logró la autocolimación, es decir: el objetivo reproduce el retículo en el infinito, el espejo (estando su normal alineada con el eje del teodolito) devuelve la imagen, el objetivo la reproduce y finalmente el ocular permite observar la coincidencia del teodolito con su imagen. En cuanto al filamento de la lámpara, al reproducirse en la pupila de salida, ilumina correctamente el retículo y ni ésta ni sus posteriores imágenes resultan visibles.

En el caso del radiotelescopio, y en el de telescopios ópticos en que se prefiera autocolimación, se necesita además un espejo de unos 10 cm de diámetro o mayor, plano por lo menos $\lambda/2$, aluminizado en primera superficie, con su montura; el cual habrá que fijar cerca del extremo inferior del eje horario de modo que resulte fácilmente ajustable el paralelismo de su cara al eje (sin terminar dicho ajuste durante el montaje porque es consecuencia del método).

Si se pensara en colimación recíproca, habrá que iluminar el retículo del telescopio desde la pupila de salida del ocular del telescopio, observándose luego con el teodolito. (El objetivo del telescopio reproduce su retículo en el infinito, el objetivo del teodolito reproduce dicha imagen cerca del propio retículo cuando su eje es paralelo al del telescopio, si es que el objetivo cae dentro del haz de luz saliente por el objetivo del telescopio. En cuanto a las imágenes sucesivas del filamento de la lámpara ocurrirá lo mismo que en el caso de autocolimación). Si bien la colimación recíproca parece más sencilla que la autocolimación, y compensa parcialmente las flexiones, suele haber dificultades de orden práctico con los tres sitios del teodolito o por lo menos con el tercero (sobre el instrumento en el plano meridiano), de modo que generalmente resultará más práctica la autocolimación. Téngase presente además, que durante el ajuste el instrumento no debe moverse en declinación (salvo las aproximaciones a cero indicadas más adelante), de modo que si al Este está debajo del eje horario, al Oeste estará por encima y viceversa (a no ser instrumentos de horquilla que siempre están centrados).

En los tres sitios el teodolito debe estar apoyado en forma muy sólida, o al menos independiente del observador, especialmente si se pretende medir segundos de arco. Además estos sitios deben ser fácilmente reproducibles a lo cual contribuye no poco que el objeto de referencia para el azimut esté muy alejado. Un kilómetro, por ejemplo, da una tolerancia de colocación de 5 mm para un error de un segundo de arco.

Se sobreentiende que el teodolito elegido debe tener la precisión necesaria, pero teodolitos que permiten leer directamente el segundo de arco no son actualmente tan raros. Una precisión mayor, y aún ésta misma, suele carecer de sentido. Véase al respecto la última parte de este artículo.

La dirección del meridiano debe ser determinada para cada uno de los tres sitios; para ello puede, por ejemplo, utilizarse el método del promedio del azimut de una estrella al pasar las dos veces la misma altura sobre el horizonte. Para el origen de la escala de azimut conviene utilizar desde el principio el objeto de referencia elegido, o por lo menos, haber leído el azimut de éste, si se opera con origen arbitrario.

La latitud si se conoce en otro punto del observatorio, es fácil de trasladar, recordando que cada 30,8 m en la componente N-S de la distancia de ambos puntos, representan 1 segundo de arco. De lo contrario habrá que hacer la determinación con cualquiera de los métodos habituales, en algún sitio cómodo cercano, desde el cual luego habrá que trasladarla, pudiendo utilizarse directamente la de dicho sitio, si dentro de la precisión prevista está lo suficientemente cerca. En cuanto al método, naturalmente habrá que elegir alguno que con el menor esfuerzo matemático, dé la precisión necesaria.

En el caso de San Miguel, dado que se contaba con la colaboración de personal del Departamento de Geodesia y Topografía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, con su instrumental, su computadora y

sus programas, se hizo una determinación de coordenadas en un sitio del Observatorio y luego se trasladaron por triangulación. Para la determinación de coordenadas se tardaron unas 6 horas para hacer las observaciones correspondientes a una elevada cantidad de iteraciones de uno de los métodos derivados del de Gauss utilizando un teodolito de segundos y un cronómetro comparador de cinta de papel. Los resultados lograron, una vez procesados, una precisión de 0,1" en latitud, 1,5" (0,1 seg. de tiempo) en longitud y 1" para el azimut de referencia (por estar demasiado cerca). El traslado de coordenadas se hizo en cuatro horas, prácticamente manteniendo la precisión de 1".

El Ajuste

Preparado el teodolito para autocolimación (o el instrumento para colimación recíproca si se opera así), se ubica y se nivela el teodolito en el punto Este. A continuación, manteniendo apagada la luz para autocolimación, se lee el azimut del punto de referencia a partir de un cero arbitrario. Luego, si no lo estuviera, se enfoca el teodolito cuidadosamente al infinito y, prendida la luz, se lleva a elevación cero, es decir rigurosamente horizontal. Moviendo el teodolito solamente en azimut y el instrumento a ajustar solamente en ángulo horario, se busca la coincidencia de la imagen del retículo con el retículo del teodolito, utilizando previamente la mira exterior del teodolito para encontrar la imagen. Lograda la coincidencia, se lee nuevamente el azimut. Este debería ser de 90° respecto del meridiano (ver figura 2). Habrá un cierto error. Se anota y se repite el procedimiento en el punto Oeste, habiendo girado el instrumento en ángulo horario a la nueva posición. Lograda nuevamente la coincidencia del retículo con la imagen, se observará un nuevo error respecto del azimut correcto, que allí debería ser de 270° respecto del meridiano (ver figura 3). De las figuras surge, que los errores así determinados, de un lado resultaron de la suma de los errores de azimut del eje horario más la proyección del error de declinación, y del otro lado de la diferencia. Separados los dos mediante una ecuación sencilla, manteniendo siempre el teodolito en la posición Oeste, se corrige primero el error de declinación corrigiendo el de su proyección, y luego el de azimut del eje controlando la operación en todo momento con el teodolito. Queda ahora un error de azimut igual a cero en el Oeste. A continuación se repite el procedimiento del lado Este. Cada uno de los errores residuales, es decir el de la proyección del de declinación y el de azimut del eje horario, será ahora la mitad del error total observado. Hechas las nuevas correcciones se vuelve al punto Oeste. En San Miguel, en este momento, el error ya resultó menor que 1". De lo contrario debería haberse repetido el procedimiento. Si se ha operado con el mismo instrumento y no con un espejo auxiliar fijado en forma arbitraria al eje, éste es el momento de poner en posición los limbos horario y de declinación.

Falta ajustar la inclinación del eje horario. Para ello se aprovecha la circunstancia de que el instrumento a ajustar o el espejo auxiliar se encuentran rigurosamente con declinación cero. Se coloca el teodolito en la tercera posición, exactamente en el plano meridiano. Nuevamente se lleva

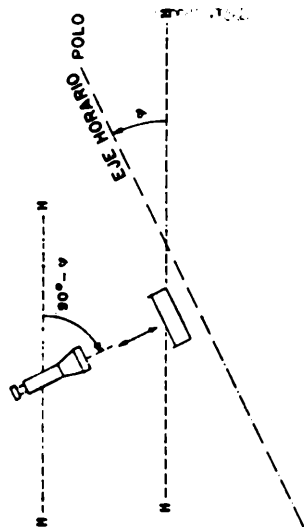


FIG. 1

POSICION EN EL MERIDIANO
VISTA DESDE EL OESTE

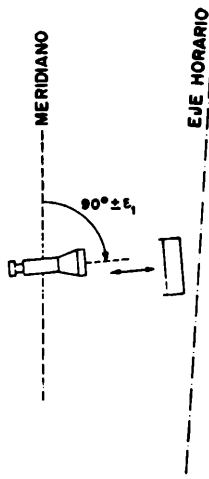


FIG. 2

POSICION AL ESTE
VISTA DESDE EL CENIT

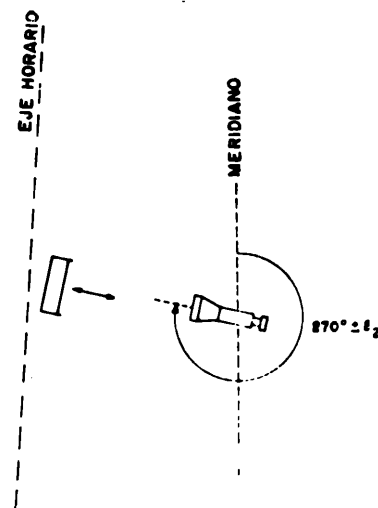


FIG. 3

POSICION AL OESTE
VISTA DESDE EL CENIT

a coincidencia la imagen con el retículo moviendo el instrumento a ajustar solamente en ángulo horario pero el teodolito ahora se mueve solamente en elevación mientras su azimut se mantiene en el meridiano. Lograda la coincidencia se corrige la inclinación del eje horario siguiéndolo con el teodolito hasta que la elevación de éste corresponda a la colatitud del lugar (figura 3). Con ello queda terminado el ajuste de la posición del eje horario.

Reloj

Demás está decir que en la actualidad normalmente éste se ajusta comparándolo con otro que se considera patrón. Con todo, cuando es mecánico, de tipo centrífugo o electrónico tipo oscilador no controlado por cristal y aun, en algunos otros casos, lo más cómodo es ajustarlo una vez puesto en su lugar el eje horario con cualquier estrella en la zona cenital, o con el objeto a considerar, en la zona de trabajo. Por supuesto que en los electrónicos se logra mucho mayor exactitud si se mide frecuencia o período con un instrumento adecuado, lo cual equivale a compararlos con el cuarzo de dicho instrumento, el cual suele tener una exactitud muy superior a la necesaria para un seguimiento correcto, sin perjuicio de que a su vez pueda haberse comparado con frecuencia patrón de la radio o un reloj patrón. El mismo procedimiento puede seguirse utilizando un reloj mecánico si se apoya en un punto adecuado un micrófono y luego se amplifica convenientemente. Cuando el ajuste del reloj es fácilmente repetible por tener escala adecuada, puede utilizarse dicho ajuste para pasar de hora sidereal a solar o para seguir cualquier objeto móvil como puede ser un cometa, conservando siempre bien marcados o anotados los puntos para hora solar y sidereal. En los demás casos habrá que dejarlo en una de estas dos últimas, y, si se necesita la otra, tener otro reloj o el dispositivo para la conversión, que pueden ser contadores si es electrónico, o engranajes.

CONSIDERACIONES SOBRE LA EXACTITUD NECESARIA O ACONSEJABLE EN LOS AJUSTES

- 1) Un error de colocación del eje horario de un segundo de arco en azimut considerando solamente la diferencia de coordenadas, puede producir una variación de hasta 2 segundos en declinación y variaciones muy grandes en ángulo horario. Considerando en cambio la variación de posición dentro del campo del instrumento, en ningún caso puede exceder los 2 segundos de arco.
- 2) Un error de colocación del eje horario de un segundo de arco en elevación produce exactamente los mismos efectos pero a distinta hora que el caso anterior.
- 3) La resolución de un telescopio está limitada por una serie de elementos entre los cuales está en primer término la relación entre el diámetro del objetivo y la longitud de onda empleada. Este criterio suele ser el que define la resolución en los radiotelescopios.
- 4) Exactitud de tallado de superficies. Salvo algunos radiotelescopios, no suele ser elemento que limita.
- 5) El "seeing" o sea el borronero producido por movimiento y desenfoco de la imagen debido a desplazamientos de inhomogeneidades en la atmósfera terrestre. Depende del lugar y del instante de la observación pero raras veces permite resolver ángulos menores de $\frac{1}{2}$ segundo de arco. Suele ser el elemento límite en los telescopios ópticos.
- 6) El grano de las emulsiones fotográficas o la resolución del elemento de registro empleado, suele limitar mucho más que el punto anterior en instrumentos ópticos de astronomía estelar.
- 7) La refracción atmosférica. Principalmente afecta al ángulo horario, pero también a la declinación, donde también puede representar variaciones considerables.

8) Muchos objetos tienen movimientos propios o aparentes, fácilmente apreciables respecto de coordenadas ecuatoriales. El Sol, por ejemplo, tiene una variación en declinación aparente de casi un minuto de arco por hora en tiempo de equinoccios.

9) Juegos y flexiones en la montura, movimientos debidos a deformaciones por cambios de temperatura en ésta y su basamento, etc., también limitan la precisión posible en el seguimiento.

10) Irregularidad en el movimiento horario. Diremos que hay irregularidad 100 % cuando el avance se realiza por pulsos y el instrumento permanece quieto entre ellos. El período de dichos pulsos corresponde a su frecuencia. Recuérdese que en cada segundo de tiempo el cielo avanza aparentemente 15 segundos de arco. Un reloj de péndulo, por ejemplo, normalmente tiene irregularidad 100 % con un período de 1 segundo o de $\frac{1}{2}$ segundo.

Sin llegar a este extremo aún los relojes centrífugos introducen cierta irregularidad. También introducen irregularidad los engranajes entre el reloj y el instrumento. Naturalmente se procura que la relación de irregularidad multiplicada por su período asegure que el objeto quede dentro del círculo resoluble por el instrumento, pero no siempre se logra. Debe tenerse presente que la inercia, la elasticidad, los juegos y el desgaste no necesariamente reducen la irregularidad. Si se utiliza para la impulsión un motor sincrónico, también se introduce una irregularidad con el doble de la frecuencia de alimentación que puede llegar a ser importante si la forma de onda de la corriente de alimentación difiere mucho de la que generaría el mismo motor trabajando como alternador. Con todo esta frecuencia suele ser lo suficientemente alta de modo que el objeto quede dentro de la parte central del círculo de difracción del instrumento, aún en los instrumentos más grandes. Si el movimiento horario se controla por un motor sincrónico alimentado por la red téngase presente que en muchas partes del mundo esto puede producir errores transitorios de seguimiento de minutos de tiempo (a cada uno de los cuales corresponden 15 minutos de arco). Especialmente en redes alimentadas por muchas usinas, los errores de frecuencia pueden exceder durante cierto tiempo el 4 % (si bien siempre se cuida de mantener acotado el error acumulado en períodos grandes para que los relojes eléctricos anden razonablemente bien). En ciertos radiotelescopios es perfectamente posible que aun en estas condiciones el objeto permanezca dentro de la parte central del lóbulo o sea dentro de la parte central del círculo de difracción, pero en los demás instrumentos inevitablemente creará problemas.

11) El error acumulado al cabo de cierto tiempo de observación debido a inexactitud del reloj. Evidentemente depende del tipo de reloj utilizado, de su ajuste, y si existe, del sistema de conversión de hora solar en sideral. Los relojes mecánicos, si no trabajan a temperatura constante, raras veces tienen una estabilidad mejor que 10^{-4} y generalmente bastante peor (1×10^{-4} significa 1 seg de tiempo, o sea $15''$ de arco, al cabo de 10^4 seg o sean unas 3 horas). En los osciladores electrónicos depende mucho del tipo de circuito y de los elementos empleados llegándose a una es-

tabilidad del orden de 10^{-4} para un rango razonable de temperatura, cuando se ha cuidado. Al intervenir un cristal convenientemente tallado en el sistema, la estabilidad llega fácilmente a 10^{-5} y manteniendo la temperatura en un rango muy estrecho para el cristal y demás elementos del oscilador se llega a 10^{-9} . En la actualidad todavía se logran dos órdenes más comparando periódicamente con resonancias atómicas, pero todo esto carece totalmente de sentido para un reloj asignado exclusivamente al seguimiento de un telescopio, máxime que la rotación de la Tierra misma no tiene esa estabilidad.

Otro problema es la conversión de hora solar en sideral. La relación día sideral/día solar según *Astrophysical Quantities*, Allen, 1964, es $0,9972696634 + 1,9 \times 10^{-8}T$ (T en siglos julianos de 36525 días a partir de las 12^h UT del 1º de enero de 1900). Esto da para mediados de 1973 aproximadamente 0,997269686. Si en su lugar se utiliza la relación juliana $365,25/366,25 = 0,997269624$ se obtiene un error de $4,2 \times 10^{-8}$. La relación gregoriana $365,2425/366,2425 = 0,997269569$ en la actualidad ya da un error mayor, el cual vale $1,17 \times 10^{-7}$. Si se utiliza la relación simplificada, fácil de realizar con engranajes, $365/366 = 0,997267760$ se obtiene un error de $1,92 \times 10^{-6}$ todavía aceptable para la inmensa mayoría de los casos. A título de comparación todavía se dan los errores de otras relaciones más simples: $299/300 = 0,996666667$ o sea $6,03 \times 10^{-4}$; $199/200 = 0,995$ o sea $2,3 \times 10^{-3}$; $99/100 = 0,99$ o sea $7,3 \times 10^{-3}$.

De todo lo expuesto surge que por precisa que fuere la posición de la montura y exacto el reloj, no cabe esperar seguimientos muy exactos. En cada caso, dadas las variables no controlables, la precisión que se justifica en las demás queda determinada por las primeras. Por otra parte se ve que cuando realmente se hace necesario un seguimiento muy preciso, la única forma de lograrlo será con correcciones manuales periódicas o con algún dispositivo automático para el mismo efecto.

NOTAS

El nuevo telescopio solar del Departamento de Física Solar

H. MOLNAR

*Observatorio N. de Física Cósmica
San Miguel, Argentina*

1. Introducción

Hacia fines de 1973, el Departamento de Física Solar del ONFCSM pondrá en funcionamiento el nuevo telescopio solar Gregory coudé de 45 cm de abertura construido en Alemania. Las figuras 1 y 2 muestran un instrumento similar instalado en Locarno (Suiza). Su poder de resolución, tamaño de imagen (25 cm) y versatilidad en cuanto a posibilidades de instalar instrumental periférico, permitirán abrir nuevas líneas de trabajo e investigación, especialmente en el análisis de estructura fina y la magnetografía