

ALINEACION EMPLEANDO UN SISTEMA
OPTICO DE ENFOQUE Y UN LASER.
APLICACIONES EN LA INDUSTRIA NAVAL

POR

L. M. ZERVINO, H. J. RABAL,
H. F. RANEA SANDOVAL, J. O. TOCHO,
M. GALLARDO y M. CARAVAGLIA



ALINEACION EMPLEANDO UN SISTEMA OPTICO DE ENFOQUE Y UN LASER. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA NAVAL (*)

Por L. M. Zerbino, H. J. Rabal, H. F. Ranea Sandoval,
J. O. Tocho (**), M. Gallardo y M. Garavaglia

RESUMEN

Se describe un método de alineación empleando un láser de He-Ne ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$, $P = 2 \text{ mW}$) acoplado a un sistema telescópico que permite enfocar el haz luminoso hasta obtener puntos brillantísimos de diámetros mucho menores que $50 \mu\text{m}$. Se analiza su aplicación a la determinación de rectas, planos y relaciones entre ellos (paralelismo, perpendicularidad, etc.). Se detalla su utilización en dos casos concretos: a) Verificación de la alineación del cigüeñal del motor principal de un buque frigorífico surto en el puerto de Buenos Aires (Argentina), y b) Verificación de la colinealidad entre los ejes de dos cojinetes de un tubo de timón de un barco en construcción en el Astillero Río Santiago (Argentina).

1. INTRODUCCION GENERAL

LASER es una sigla formada por las primeras letras de la palabra de la frase, en inglés, «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», esto es, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

Las características sobresalientes de la radiación emitida por el láser son las siguientes: elevada coherencia, gran monocromaticidad, notable intensidad, distribución gaussiana de la intensidad a través del haz luminoso, reducidísima divergencia y excelente definición de su plano de polarización (1). En general, tales características son obtenidas empleando diferentes tipos de láseres. Así algunos láseres gaseosos —como el de He-Ne— emiten radiación coherente y monocromática, mientras que algunos láseres sólidos —como el de rubí— emiten intensidades luminosas elevadísimas. Las diferentes características enunciadas permiten, a su vez, aplicaciones específicas del láser.

El presente trabajo describe el empleo del láser en la definición de rectas y de planos en el espacio y a establecer relaciones geométricas entre rectas, rectas y planos y entre planos. Los resultados de esta aplicación son rápida y fácilmente transferidos a la alineación de puntos en el espacio, a la determinación de la perpendicular a un plano y a la verificación del paralelismo de rectas y de planos.

(*) Trabajo realizado en el CENTRO DE INVESTIGACIONES OPTICAS (CONICET - UNLP - LEMIT). La Plata, Argentina.

(**) Miembro de la Carrera del Investigador Científico de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC-BA).

2. SISTEMA OPTICO A LASER PARA ALINEAR PUNTOS EN EL ESPACIO

El sistema óptico que debe emplearse para propósitos de alineación de piezas y componentes o de verificación del estado de alineación de las mismas será de diseño especial, apropiado para dichos trabajos. Tal diseño obedece a las características que interesan en la emisión del láser: que sea un haz altamente colimado de luz coherente con distribución gaussiana de intensidad. Estas características se obtienen cuando dentro de la cavidad resonante se sustenta una configuración del campo electromagnético correspondiente al modo resonante más bajo, TEM_{00} , que es aquel que genera, efectivamente, un frente de onda con distribución gaussiana de intensidad. La cavidad resonante más conveniente es la hemifocal, constituida por un espejo esférico y otro plano, estando ubicado este último en el foco de aquél. El haz según el cual se propaga dicho frente de onda poseerá líneas de propagación hiperbólicas y el diámetro mínimo de la sección del haz o cintura del haz W_0 queda determinada por:

$$W_0 = \sqrt{\frac{D \lambda}{\pi}} \quad [1]$$

donde λ es la longitud de onda de la radiación y D la distancia entre los espejos. La figura 1 describe la situación experimental señalada. Las dos asíntotas de las líneas de propagación hiperbólicas permiten definir el ángulo de divergencia del haz emitido por el láser, según:

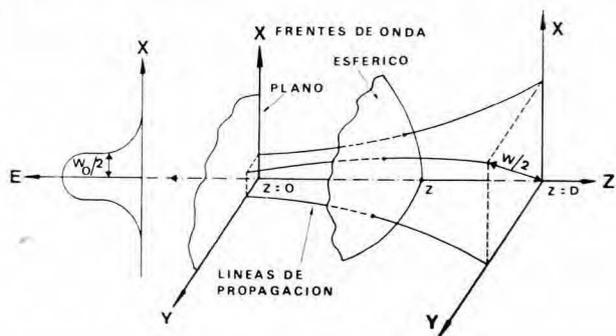


Fig. 1.—Líneas de propagación hiperbólicas del frente de onda producido en una cavidad resonante hemifocal. El espejo plano está en $z = 0$ y el esférico en $z = D$. El haz correspondiente al modo TEM_{00} tiene perfil gaussiano de cintura W_0 .

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi W_0} \quad [2]$$

La expresión de la divergencia [2] claramente indica que haces de radiación láser más y más direccionales se obtendrán si se incrementa la cintura W de los mismos. Para obtener cinturas mayores deben emplearse sistemas ópticos apropiados del tipo de los telescopios afocales de montaje galileano o newtoniano.

Cuando el haz luminoso emitido por el láser atraviesa una lente L_1 de distancia focal f_1 , si su cintura W_0 se ubica a la distancia d_0 de L_1 , resultará enfocado de manera que un nuevo valor de cintura W_1 se obtiene a la distancia d_1 de L_1 . Las relaciones entre dichos parámetros son las siguientes:

$$\frac{1}{W_1^2} = \frac{1}{W_0^2} \left(1 - \frac{d_0}{f}\right)^2 + \frac{1}{f^2} \left(\frac{\pi W_0}{\lambda}\right)^2 \quad [3]$$

$$d_1 = f + \frac{(d_0 - f)^2}{(d_0 - f)^2 + (\pi W_0^2/\lambda)^2} \quad [3']$$

En la práctica no se puede tener suficiente control sobre las dimensiones de la cintura original del haz W_0 y menos aún sobre su posición en el eje de la cavidad resonante, ya que ambos parámetros dependen fuertemente de las condiciones geométricas y físicas de la cavidad, por lo que, para emplear la fórmula [2] resulta necesario introducir algunas simplificaciones. Ellas son suponer que la cintura del haz W_0 , dentro de la cavidad hemifocal es igual al diámetro del haz emergente del láser y que, por lo tanto, d_0 es prácticamente igual a f_1 . El resultado de esta simplificación es que:

$$W_1 = \frac{f \lambda}{\pi W_0} \quad [4]$$

La ecuación [4] permite establecer lo siguiente:

a) La cintura W_1 del haz enfocado es proporcional a la longitud de onda λ y a la distancia focal f_1 de la lente, así como inversamente proporcional a la cintura W_0 o, dentro de las simplificaciones establecidas anteriormente, proporcional al diámetro del haz incidente sobre la lente. Si la cintura W_0 del haz incidente es mayor que la apertura de la lente, ésta fija el valor de la cintura del haz.

b) Para una radiación de longitud de onda λ , la condición de mejor enfoque (W_1 mínimo) se logra para el menor valor del cociente f_1/W_0 , el que, a su vez, puede asimilarse a la luminosidad, $f_1/\text{número}$, de las lentes.

El análisis referido a la acción de una lente puede extenderse para analizar el acoplamiento de dos lentes con el objeto de formar un sistema telescópico. Para ello se emplea la ecuación [4], teniendo presente que la cintura del haz de salida de la primera lente —lente expansora— debe ser igual a la cintura del haz que admite la segunda lente —lente colimadora— acoplada a la primera, guardando la relación telescópica, esto es, que la diferencia que las separa sea igual a la suma de las respectivas distancias focales. De modo tal que la cintura final del haz W_2 resulta igual a:

$$W_2 = \frac{f_2}{f_1} W_0 \quad [5]$$

Luego si $f_2 > f_1$, el sistema telescópico produce un incremento de la cintura del haz W_2 o, según la ecuación [2], disminuye su divergencia.

La figura 2 muestra esquemáticamente el efecto telescópico sobre un haz gaussiano, como así también ilustra sobre la profundidad de foco obtenida por el sistema telescópico. La profundidad de foco Δf se define arbitrariamente como la distancia entre los puntos en los que la cintura del haz W se ha incrementado en un 5 por 100.

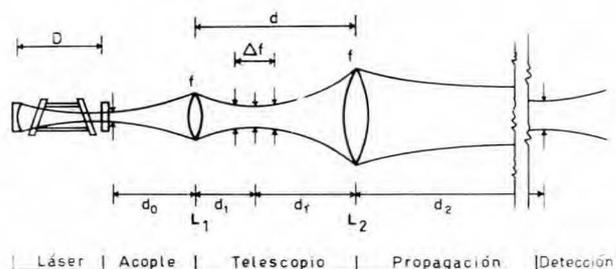


Fig. 2.—Sistema telescópico acoplado a un láser que emite un haz gaussiano. Las letras señalan los parámetros que se describen en el texto.

La aplicación de las expresiones previas permite calcular Δf como:

$$f = \frac{0,32 \pi W^2}{\lambda} \quad [6]$$

El acoplamiento de un sistema telescópico a un láser, como el mostrado en la figura 2, permite dos variantes de importancia: por un lado puede disponerse del telescopio a distancias variables d_0 del láser y, por otro, para un valor dado de d_0 , puede desplazarse la lente colimadora variando la distancia d . El resultado general, sin embargo, produce la variación de la distancia d_2 a la que se encuentra la cintura final del haz W_2 .

El análisis de estos dos procesos de enfoque de un haz gaussiano a distintas variables puede hacerse derivando la expresión [3]. Una variación Δd_0 en la posición d_0 del telescopio con respecto al láser produce una variación en la posición de la cintura W_1 igual a:

$$\Delta d_1 = \frac{f_1^2 D^2 - f_1^2 (d_0 - f_1)^2}{\{ (d_0 - f_1)^2 + D^2 \}^2} \Delta d_0 \quad [7]$$

A su vez, una variación de la distancia relativa d entre las lentes significa una variación de la distancia d' , de tal modo que se producirá un cambio en la posición de la cintura final W_2 del haz igual a:

$$\Delta d_2 = \frac{f_2^2 (\pi W_1^2/\lambda)^2 - f_2^2 (d' - f_2)^2}{\{ (d' - f_2)^2 + (\pi W_1^2/\lambda)^2 \}^2} \Delta d \quad [8]$$

Resulta evidente que el signo de Δd_1 y Δd_2 en las expresiones [7] y [8], respectivamente, depende de las relaciones que guarden D , $d_0 - f_1$, y W_1^2/λ , $d' - f_2$.

El sistema telescópico acoplado al láser puede ser empleado en trabajos de alineación según dos modos. Uno de ellos, extensamente utilizado (2), basa su eficacia en la detección del máximo de intensidad de la distribución gaussiana a través del haz. Una variante de este modo ha sido descrita por H. D. Betz (3), y en ella la introducción de diafragmas de media onda produce figuras de difracción cuya detección incrementa sensiblemente la precisión del método. El otro, que ha sido diseñado especialmente para los trabajos que se describen, permite enfocar el haz sobre blancos, los que contienen marcas fiduciarias adecuadas, ubicados a distancias variables y solidarios a las piezas o componentes que se desean alinear durante su montaje o bien cuyo estado de alineación se desea comprobar. El haz del láser se puede concentrar hasta tener diámetros menores que $50 \mu\text{m}$, de manera que el punto luminoso sobre los blancos se hace tan brillante que permite su detección aun con luz ambiente bastante intensa. Es interesante destacar que en las experiencias que se describen al final de este informe este método ha sido utilizado sin inconvenientes a pesar de las grandes variaciones de intensidad de la luz ambiente en las distintas zonas de trabajo: regiones con iluminación natural (luz del día), iluminación artificial y penumbra. Por último, la ubicación de los puntos brillantes que definen

una recta mediante el uso del sistema de alineación a láser fue verificada con un autocolimador. Esta verificación se realizó montando ambos instrumentos en un eje óptico común. La distancia entre ellos fue de 30 metros. Las posiciones de los puntos sucesivos enfocados con el sistema a láser se comprobaron con el autocolimador, encontrándose que las mismas correspondían a una recta dentro de las precisiones del anteojo.

3. APLICACIONES DEL SISTEMA OPTICO A LASER PARA DETERMINAR RECTAS Y PLANOS

3.1. Determinación de rectas

Como se vio en el párrafo anterior, existen dos formas de alinear una sucesión de puntos en el espacio usando un haz de luz de perfil gaussiano. En este trabajo se explica la utilización del segundo método (de enfoque).

Para materializar la recta representada por el haz es necesario determinar las coordenadas espaciales de al menos dos puntos contenidos en ella. Para ubicar estos puntos se utilizan como blancos diafragmas provistos de movimientos micrométricos según los tres ejes coordenados. El haz proveniente del sistema óptico se enfoca sucesivamente sobre el plano de los diafragmas y su posición exacta se determina moviendo los tornillos micrométricos hasta conseguir que se observe un máximo de luz detrás.

3.2. Determinación de planos

Cuando un haz de luz incide sobre un espejo plano que rota, el haz reflejado describe en general una superficie cónica. Si el haz incidente es perpendicular al eje de rotación del espejo, la superficie dada por rotación del haz reflejado degenera en un plano que es perpendicular al eje de rotación del espejo y contiene al haz incidente. Para materializar un plano que contenga una recta dada se hace pasar un haz por los puntos pertenecientes a ella y se lo hace incidir sobre un espejo plano montado en un sistema que permita fijar un eje de rotación perpendicular al haz incidente. El haz reflejado determina un plano en el sentido de que, con una adecuada combinación del sistema de enfoque y la rotación del espejo, se puede materializar cualquier punto de dicho plano en el espacio mediante los blancos con movimiento xyz antes mencionados.

4. APLICACION DEL SISTEMA OPTICO A LASER PARA DETERMINAR RELACIONES ENTRE RECTAS Y PLANOS

4.1. Dos planos perpendiculares

Dada una recta r contenida en un plano π , el conjunto de todas las rectas perpendiculares a r en un punto P de ella determinan un plano que es perpendicular a π . Entonces, dado un plano π materializado por la rotación de un espejo, para determinar un plano perpendicular a π se toma un haz reflejado en el espejo y se lo hace incidir sobre un prisma cubo (escuadra óptica) de manera que la reflexión sobre la primera cara coincida con el haz incidente i . En tal caso, el haz transmitido que se refleja en la interfase emergerá perpendicular al haz i . Al rotar el prisma alrededor del haz i manteniendo la condición para el haz reflejado en la primera cara, el haz emergente describirá un plano perpendicular al plano π , que puede ser materializado mediante la selección de algunos de sus puntos por el método de los blancos con montaje xyz.

4.2. Recta perpendicular a un plano

La traza de la intersección de dos planos perpendiculares a un tercero es perpendicular a éste. Luego para describir una recta perpendicular a un plano dado π , materializado por un espejo que rota, es suficiente determinar los planos perpendiculares a dos rectas contenidas en π , y la traza de su intersección será la recta buscada. Para esto se realizan las operaciones descritas en 4.1 con dos espejos rotatorios que determinan el mismo plano π . Tal

determinación se consigue imponiendo al segundo espejo la condición de que el haz reflejado en él se enfoque en un punto del plano π que no pertenezca a la recta determinada por el haz incidente.

4.3. Paralelismo entre dos rectas

Dos rectas perpendiculares a un mismo plano π son paralelas. Luego para determinar dos rectas paralelas que pasen por dos puntos A y B del plano π es suficiente aplicar lo dicho en 4.2, colocando sucesivamente el prisma cubo en tales puntos.

5. APLICACION DEL METODO EN DOS CASOS CONCRETOS DE LA INDUSTRIA NAVAL

El método desarrollado y el instrumental diseñado y construido se aplicaron en dos casos concretos: uno, en la verificación del estado del cigüeñal del motor de propulsión de un buque en reparaciones en el puerto de Buenos Aires, Argentina, y el otro, en la verificación de la colinealidad y el paralelismo de dos ejes en la máquina de timón de un buque en construcción en el Astillero Río Santiago, Argentina.

5.1. Verificación del estado del cigüeñal del motor principal de un buque frigorífico

El buque frigorífico en cuestión tiene un porte bruto de 3.255 toneladas, con una eslora de 99,60 metros, una manga de 13,60 metros y un puntal de 8,80 metros. Está propulsado por un motor Fiat 4212 ESS de 4.800 CV. de potencia continua a 375 r. p. m., 12 cilindros en V simple efecto cuatro tiempos.

Por haber sufrido un desperfecto fue necesario rectificar los ocho muñones del cigüeñal. Fue decidida la rectificación «in situ» de dichos muñones en razón de la imposibilidad de desmontar la tapa de cilindros del motor y retirar el cigüeñal para rectificarlo en un taller de la especialidad. Antes de proceder a su rectificado se realizaron una serie de controles, mediciones y verificaciones, entre las que se contó la verificación de la alineación de las pistas de lubricación de los muñones del cigüeñal en dos posiciones angulares separadas por un cuarto de vuelta. Las pistas de lubricación estaban sin gran deterioro y por ello se las eligió como superficie de referencia para las mediciones.

Las posiciones angulares se eligieron adecuadamente para que las palanquillas y contrapesos del cigüeñal no bloquearan el paso del haz del láser. La elección de una rotación de un cuarto de vuelta era procedente, por cuanto se deseaba verificar si el cigüeñal había quedado alabeado y con una deformación permanente.

El sistema de enfoque y el láser fueron montados adecuadamente y en forma solidaria a uno de los laterales del motor. La figura 3 muestra una fotografía del sistema

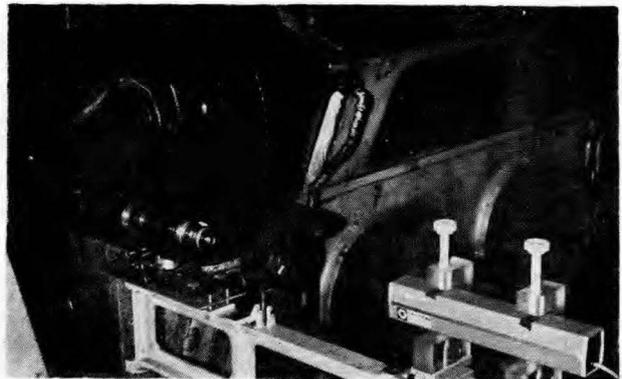


Fig. 3.—Montaje del sistema de alineación a láser en un costado del motor del buque frigorífico.

ya instalado y del espejo que refleja el haz del láser dirigiéndolo al interior del motor, mientras que en la figura 4 se ilustra sobre la situación de trabajo en el cárter del motor. Al fondo de esta fotografía se observa el espejo ya aludido y el camino del haz del láser totalmente libre de obstáculos.



Fig. 4.—Vista del interior del cárter del motor. Al fondo, señalado por la flecha, el espejo que permite la reflexión del haz del láser en una dirección paralela a la del cigüeñal.

La alineación de la posición superior de las pistas de lubricación se efectuó empleando como accesorio un soporte tipo trípode, cuyas patas, previamente calibradas, asentaban en el plano medio del block a la altura de las bancadas. El soporte estaba provisto de un buje cuyo eje era perpendicular al plano determinado por los extremos de las tres patas de aquél. Se aseguró dicha perpendicularidad por rotación. El buje alojaba un vástago, cuya superficie frentada inferior apoyaba sobre las pistas de lubricación durante las mediciones y sobre cuya superficie frentada superior se ubicaba una escuadra que llevaba fijo el soporte del diafragma de medir, el que posee movimiento micrométrico vertical.

El montaje descrito aseguraba que las mediciones fueran realizadas sobre la vertical al plano de bancadas. Por ello los diafragmas de medir sólo poseían movimiento micrométrico vertical.

La recta de referencia fue determinada enfocando el haz del láser sobre los diafragmas ubicados en las posiciones de las bancadas 2 y 8. Los puntos correspondientes a las otras bancadas fueron determinados mediante el procedimiento ya descrito en 3.1. Todos los valores de las lecturas fueron obtenidos como promedios a partir de por lo menos tres mediciones; sólo en algunos casos fueron realizadas hasta siete mediciones. El número de medidas dependió de las condiciones de trabajo. Por ello, la presencia de vibraciones provocadas por el funcionamiento de motores auxiliares, oleaje o por ráfagas de viento, de deformaciones del casco del buje debidas a la variación de la incidencia del sol, de fluctuaciones en la intensidad del haz de luz emitido por el láser provocadas por la inconstancia de la tensión de la línea de alimentación, etc., debieron ser analizadas y tenidas en cuenta en cada determinación. En algunas ocasiones las perturbaciones provocadas por algunos de los fenómenos aludidos hizo imposible continuar el trabajo hasta el restablecimiento de las condiciones óptimas.

Sin embargo, la dispersión de los valores medidos con respecto a sus respectivos promedios se encontró ubicada entre $\pm 10 \mu\text{m}$ y $\pm 50 \mu\text{m}$. La previsión teórica ubicaba los errores de medida en el rango de los $\pm 20 \mu\text{m}$, por lo que puede considerarse como muy satisfactorios los resultados obtenidos.

Los gráficos de la figura 5 muestran el resultado de las mediciones. De ellos puede inferirse que el cigüeñal mantiene su natural estado elástico y que no sufrió deformación de carácter permanente. La observación minuciosa de la pista de lubricación del muñón correspondiente a la bancada 3 mostró una superficie muy rayada y, en general, con un deterioro tal que justifica la única discrepancia anotada en el conjunto de mediciones.

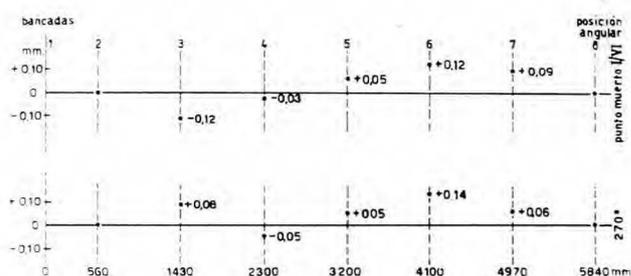


Fig. 5.—Localizaciones de las pistas de lubricación del cigüeñal, en dos posiciones angulares a un cuarto de vuelta entre ellas, antes de la rectificación. Ver comentarios en el texto.

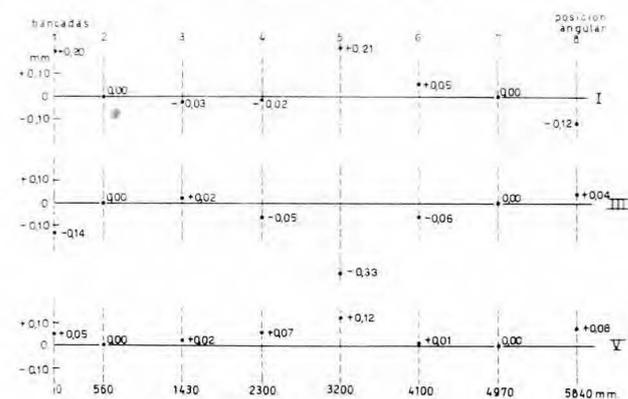


Fig. 6.—Localizaciones de las pistas de lubricación del cigüeñal, en tres posiciones angulares a 120° entre ellas, después de la rectificación. Ver comentarios en el texto.

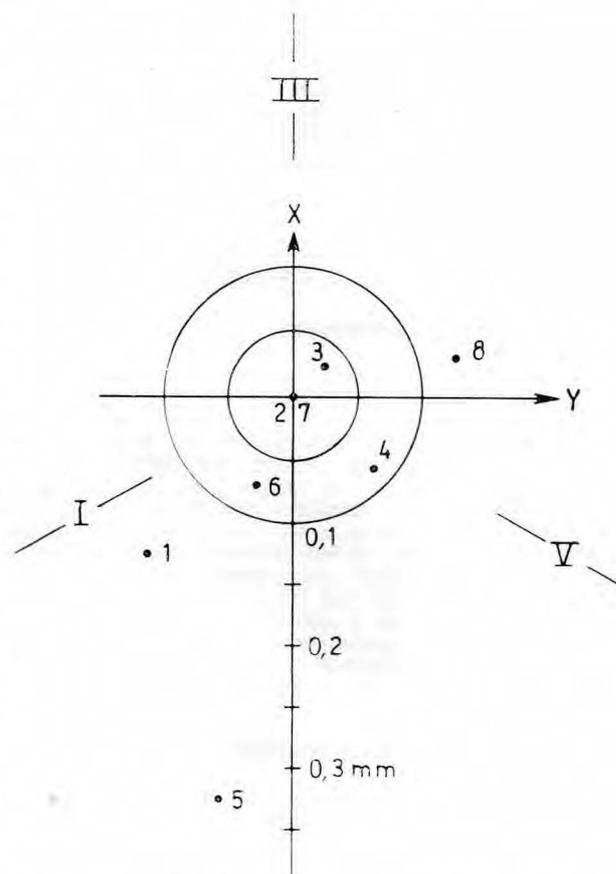


Fig. 7.—Posiciones relativas de los centros de los muñones del cigüeñal determinados a partir de la figura 6. El muñón 5 está excéntrico en demasía. Ver comentarios en el texto.

Una vez rectificadas los muñones del cigüeñal se realizó una segunda verificación. En ésta se procedió a determinar nuevamente la alineación de los puntos superiores de las superficies rectificadas de los muñones en tres posiciones angulares separadas 120° entre ellas. Las posiciones angulares también fueron seleccionadas para que las palanquillas y contrapesos no bloquearan la trayectoria del haz del láser.

En esta verificación, las dispersiones de las lecturas realizadas se encontró entre $\pm 8 \mu\text{m}$ y $\pm 30 \mu\text{m}$.

Los gráficos de la figura 6 muestran el resultado de estas nuevas mediciones. De ellas se puede deducir que los muñones están excéntricos. En efecto, con los datos obtenidos por las mediciones con el láser se preparó el gráfico de la figura 7. En el mismo se han representado las posiciones de los centros de los muñones con respecto de la recta determinada por los centros de los muñones 2 y 7. El error en la determinación de los centros fue de $\pm 30 \mu\text{m}$. El muñón 5 resultó fuera de tolerancia por excentricidad y debió maquinarse nuevamente.

5.2. Verificación de la colinealidad de ejes y del paralelismo entre ejes

5.2.1. Verificación de la colinealidad de los ejes de los dos cojinetes instalados en los extremos del tubo de alojamiento de la mecha de un timón.

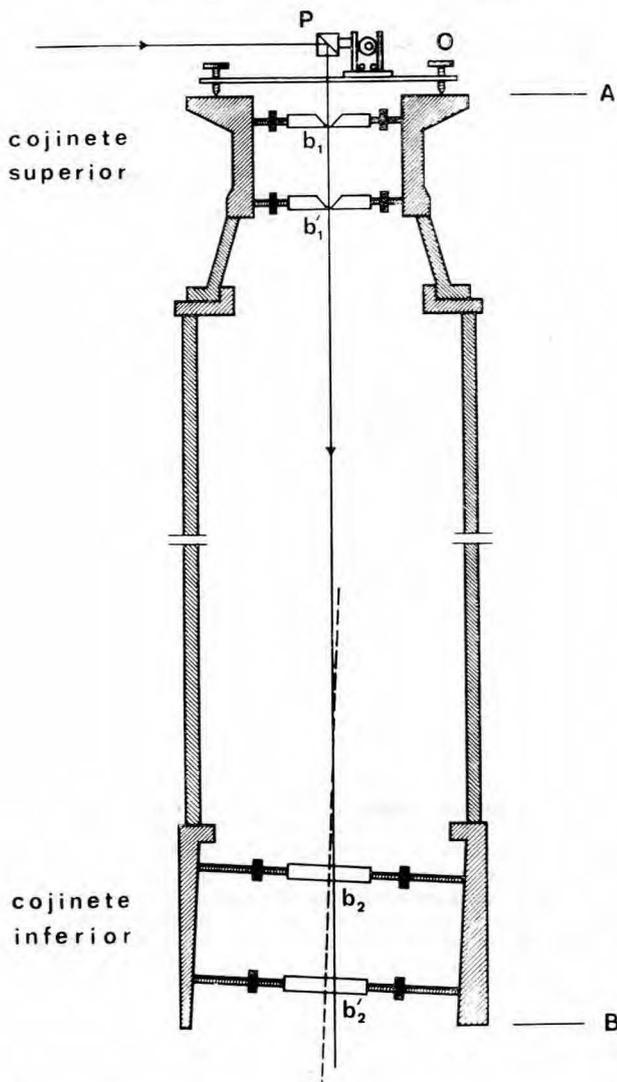


Fig. 8.—Esquema de un tubo de alojamiento de la mecha de un timón. b_1 y b_2 : blancos; P: prisma; O: tornillos calantes. El eje del cojinete inferior está representado por la línea de trazos. El ángulo de desviación entre este eje y el del cojinete superior ha sido exagerado.

Dicho tubo, esquematizado en la figura 8, tenía, aproximadamente, las siguientes dimensiones: diámetro interno del cojinete superior, 32 cm.; diámetro interno del cojinete inferior, 69 cm.; longitud total del tubo entre A y B, 306 cm.

Los ejes de los dos cojinetes fueron materializados por medio de blancos centrados utilizando montajes tipo «araña». Se dispuso de cuatro blancos, dos en cada cojinete. Los blancos ubicados en el cojinete superior eran discos de metal con un orificio de $200 \mu\text{m}$. Los del cojinete inferior eran discos de vidrio óptico, cuya superficie incluía una familia de círculos concéntricos cuyas distancias estaban bien determinadas («targets»).

Los montajes tipo «araña» constaban de tres patas con tornillos calantes formando ángulos de 120° entre sí. Desplazando los tornillos se pudo lograr un centrado de los blancos ubicados en los montajes con una precisión de $200 \mu\text{m}$.

La foto de la figura 9 muestra uno de los montajes utilizados colocado en el tubo correspondiente.

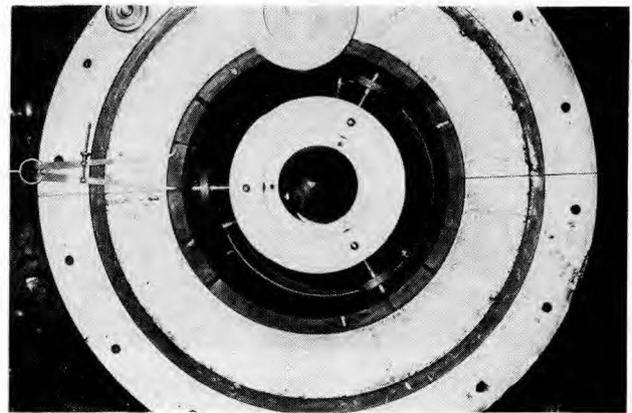


Fig. 9.—Vista de un montaje tipo «araña» colocado en el cojinete superior de uno de los tubos.

La luz del láser, proveniente del dispositivo de enfoque que aparece en la figura 10, se llevó, por medio de un prisma P, a pasar por los orificios de los dos primeros blancos. Se obtuvo de esta manera un haz que materializaba el eje del cojinete superior. Este haz enfocado sobre los dos blancos de vidrio determinó sendos puntos. La posición de cada uno de los puntos respecto del centro del blanco correspondiente resultó ser una medida de la falta de colinealidad entre los ejes de los cojinetes, el superior materializado por el haz del láser y el inferior por los centros de los blancos.

El prisma antes nombrado está dotado de pequeños movimientos controlados mediante tornillos micrométricos y se ubicó sobre el plano del cojinete superior apoyado en una planchuela metálica provista de tres tornillos calantes O. El prisma y su montaje se ven en la foto de la figura 11.

Los puntos de intersección del haz que determinaba el eje del cojinete superior con los blancos inferiores se observaron por medio de un anteojito. De esta manera se midieron las coordenadas polares de los puntos en el sistema de referencia de cada blanco, como se muestra en la figura 12.

5.2.2. Verificación del paralelismo entre los ejes de los cojinetes superiores de los alojamientos de las mechas de los timones de babor y estribor

Las pistas de los cojinetes y los respectivos planos superiores de sus cabezales, donde apoyan las crucetas, habían sido maquinados en una sola operación, lo que garantizaba la perpendicularidad entre cada plano y el eje del cojinete correspondiente. Por lo tanto, esto permitió trasladar el problema al de la verificación de la perpen-

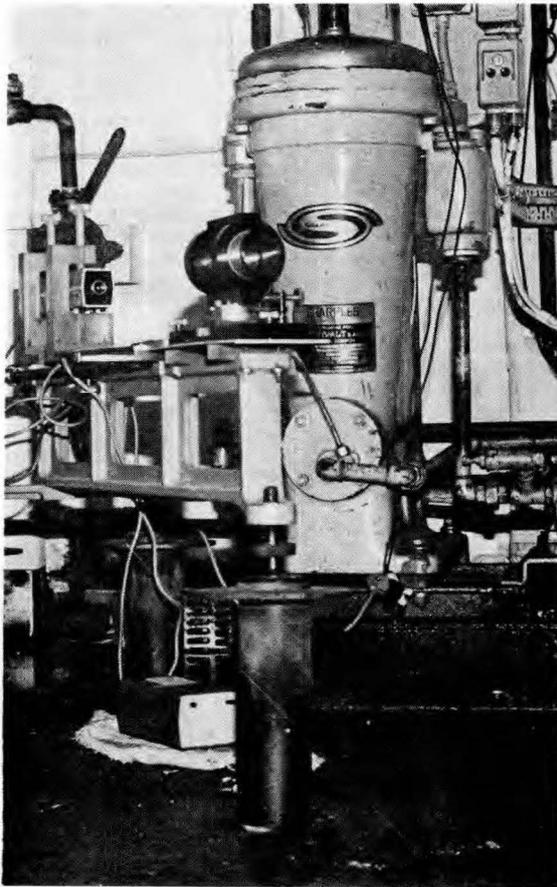


Fig. 10.—Montaje del sistema de alineación a láser en la sala de la máquina del timón.



Fig. 11.—Vista del prisma y su montaje sobre el plano superior de uno de los cojinetes.

dicularidad entre el eje de un cojinete (estribor) y el plano inferior del otro (babor). Para materializar el plano del cojinete de babor sobre el de estribor fue necesario concebir un dispositivo, que se complicó, en parte, debido a los obstáculos que hubo que sortear en la máquina del timón (ver zonas sombreadas en la figura 13).

El haz del láser proveniente del sistema de enfoque SE se hizo incidir sobre un espejo fijo E_1 , de manera que la reflexión estuviera contenida en un plano paralelo al del cojinete de babor e incidiera en el espejo rotatorio E_2 de la figura 14.

La figura 15 muestra las dos escuadras que soportan los movimientos micrométricos verticales con los que se determina cuándo el haz del láser está contenido en un plano paralelo al del cabezal.

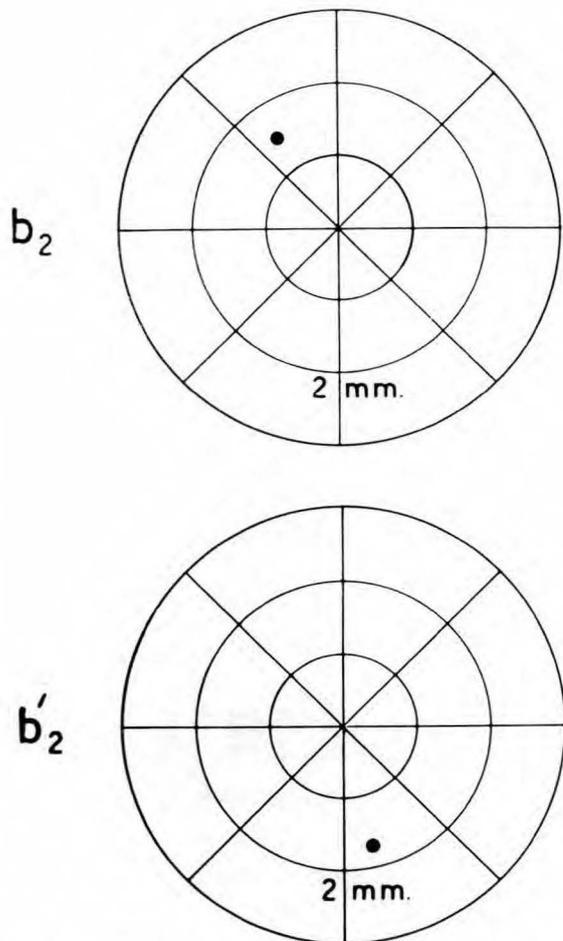


Fig. 12.—Coordenadas de los puntos de intersección del haz del láser con los «targets» montados en el cojinete inferior b_2 y b_2' .

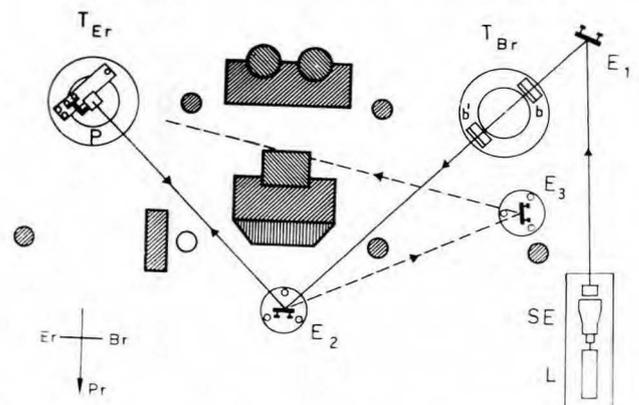


Fig. 13.—Vista simplificada (en planta) de la sala de máquina de timón. Las zonas sombreadas representan obstáculos (columna, máquina de timón, instrumental) que hubo que sortear. L: láser; SE: sistema de enfoque; E_1 : espejo fijo; T_{Br} y T_{Er} : tubos de los timones; b y b' : blancos; E_2 y E_3 : espejos rotatorios; P: prisma. El camino recorrido cuando se rota E_2 para que la reflexión sobre él incida en E_3 y se refleje para llegar a P está señalado con línea de trazos. (El obstáculo que la interrumpe era una saliente y el haz de luz pasaba por debajo.) Parte de este haz vuelve sobre sí mismo antes de incidir sobre el prisma.

El espejo E_2 fue colocado de forma que su movimiento reprodujera un plano paralelo al de babor y que pudiera hacer que el haz proveniente de E_1 , incidiera: a) en un segundo espejo rotatorio E_3 o b) en el prisma P ubicado sobre el timón de estribor. El espejo E_3 se colocó también de manera tal que los rayos reflejados en él reproducieran el mismo plano paralelo al de babor y pudieran llegar hasta el prisma P de estribor.



Fig. 14.—Espejo E_2 montado en la mesa rotatoria previamente calibrada.

El prisma P utilizado era un prisma-cubo (escuadra óptica) que desvía en 90° la luz que incide perpendicularmente en sus caras.

Se ubicó el prisma P de modo que el haz que llegaba a él desde E_2 se reflejara en parte sobre sí mismo y, al mismo tiempo, su parte transmitida, reflejada en la interfase, pasara a través del orificio del primer blanco del cojinete superior de estribor. Sobre el segundo blanco se colocó un papel milimetrado, donde se determinaron las coordenadas xy del punto de incidencia del referido haz. Rotando el prisma un ángulo muy pequeño alrededor de la dirección del haz incidente y haciendo pasar el haz transmitido nuevamente por el primer orificio, se tomaron las coordenadas de los sucesivos puntos de intersección con el segundo blanco. Estos puntos determinaron una recta r , que era la traza de un plano perpendicular a un haz contenido en un plano π paralelo al del cabezal del cojinete de babor.

Se rotó el espejo E_2 para llevar el haz reflejado en E_1 a incidir en E_3 y se rotó E_3 para llevar el haz hasta el prisma P , con el que se repitieron las operaciones ya referidas. Así se determinó en el sistema de coordenadas anterior una recta s , que era la traza de un plano perpendicular a otra recta contenida en el mismo plano π paralelo al cabezal del cojinete de babor usado como referencia. La figura 16 esquematiza el procedimiento empleado y los resultados obtenidos.

Entonces, en el cojinete de estribor, el punto T de intersección de las dos trazas determinó, junto con el orificio del blanco superior, un eje paralelo al eje del cojinete de babor y el apartamiento de T del centro del segundo blanco fue una medida de la desviación del paralelismo entre los ejes de los cojinetes.

Es interesante destacar que para realizar esta experiencia fue necesario enfocar el sistema óptico para distancias que variaban entre cuatro y veintiséis metros.

Los espejos E_2 y E_3 estaban firmemente sujetos, por medio de soportes dotados de movimientos micrométricos, a mesas rotatorias especialmente diseñadas (ver figura 14). Las mesas estaban compuestas por un disco de

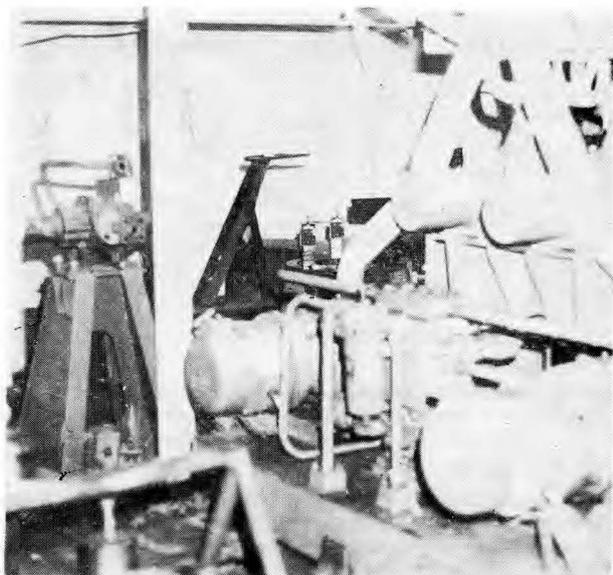


Fig. 15.—Escuadras que soportan los movimientos micrométricos verticales para determinar rectas paralelas a planos. a) Vista general del cabezal de estribor desde el espejo E_2 . b) Detalle de las escuadras sobre el plano del cabezal.

metal que podía girar asentado sobre un rodamiento fijo a una base provista de tres tornillos calantes. Como ya se explicó, para que la reflexión describiera un plano al rotar el espejo, era suficiente que el eje de rotación fuera perpendicular al haz incidente. Para lograr esto último se calibraron las mesas sobre un plano metrológico de la siguiente manera: a) Por medio de los tres tornillos calantes se orientó la mesa de modo que su superficie superior fuera paralela al plano patrón. b) Se hizo incidir sobre el espejo un haz de luz contenido en un plano paralelo al plano patrón y se ajustaron los tornillos micromé-

