



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Medida de distancias absolutas de muy alta precisión por interferometría láser.

Autor: Daniel Grau Ruiz

Director 1: Yves Salvadé, Grupo de Metrología y Visión Industrial, HE-Arc

Director 2: Salvador Sales Maicas, Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas,
UPVLC

Objetivos —

- Caracterización y evaluación de un sistema basado en interferometría heterodina capaz de medir distancias absolutas en superficies perpendiculares e inclinadas respecto al haz emitido, realizando las medidas con un solo detector.
- Observar la aparición del efecto Speckle producido por superficies rugosas o inclinadas.
- Caracterización del sistema ampliado, añadiendo 4 detectores, para eliminar el efecto Speckle y su posterior mitigación. Testeado en superficies perpendiculares e inclinadas.
- Mejora de los algoritmos (códigos Matlab).
- Test de mitigación de efecto Speckle.

Metodología —

- Testeado del sistema de medida con un detector y análisis de los resultados obtenidos con muestras de diferentes rugosidades.
- Realización de medidas con muestras rugosas inclinadas respecto al eje óptico y observación de la aparición del efecto Speckle.
- Incorporación de un conjunto de detectores al sistema de medida.
- Evaluación de las medidas realizadas con el conjunto de detectores.
- Mitigación del efecto Speckle producido en medidas con targets rugosos y/o inclinados.

Desarrollos teóricos realizados —

- No se han realizado desarrollos teóricos en este trabajo.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio —

Este ha sido un trabajo de fin de máster con una fuerte componente experimental, en el se han realizado medidas experimentales que se nombran a continuación.

- La rugosidad de las muestras utilizadas a lo largo del TFM han sido medidas con el uso de un perfilómetro.
- En el equipo constituido por un solo detector se han realizado medidas como la linealidad del equipo habiéndose colocado las muestras sobre un sistema de desplazamiento y han sido muestreadas para diferentes distancias y distintos distancias de focalización; se ha comprobado la correcta posición de la lente; el error en la medida para diferentes valores de distancia de focalización y diferentes rugosidades ha sido medida; y para finalizar con el equipo con un solo detector, el error de la medida para diferentes ángulos de inclinación ha sido medida.
- En el equipo constituido con un array de 4 detectores, se ha medido la linealidad del equipo y el error de la medida para diferentes ángulos de inclinación ha sido medida con el fin de realizar la corrección del efecto Speckle.

Resultados —

- El sistema de medida muestra linealidad haciendo uso de uno o varios detectores.
- Se obtiene una resolución en la medida del orden de 50 μm para muestras situadas a una distancia de 5m y con una inclinación respecto al eje óptico hasta 20°. Dicha resolución aumenta

para muestras con una inclinación mayor, hasta llegar a 110 μm para muestras con una inclinación de 45°.

- El enfoque de la muestra es fundamental para la obtención de una medida con una alta resolución, además de ser necesaria para realizar una óptima mitigación del efecto Speckle.
- La mitigación Speckle obtiene una reducción del error en la medida de hasta el 60% para medidas con muestras inclinadas hasta 40° respecto al eje óptico. Debido a la baja relación señal a ruido obtenida para ángulos >40° la mitigación Speckle no es eficiente, aumentando incluso el error de la medida.

Líneas futuras —

- Optimización del sistema para la adquisición de medidas con objetos en movimientos, manteniendo la precisión obtenida en condiciones estáticas.
- Modificaciones en el set-up utilizado con el fin de utilizar dos o más frecuencias.

Publicaciones —

- No hay publicaciones derivadas de este trabajo, aunque sus resultados serán de utilidad para la mejora del sistema de medida.

Abstract —

En este Trabajo Final de Máster (TFM) se ha realizado una caracterización y evaluación del sistema de medida de distancias absolutas mediante interferometría heterodina. Se ha observado la aparición de efecto Speckle cuando muestras rugosas o inclinadas son utilizadas. El efecto Speckle es un efecto que empeora la precisión del sistema de medida añadiendo fluctuaciones en la fase interferométrica del haz coherente utilizado. Con el fin de mitigar dicho efecto se ha añadido un conjunto de 4 detectores al sistema. Con este sistema se obtienen mejoras en la resolución de la medida de hasta el 60% para ángulos inferiores a 40° respecto al eje óptico; sin embargo, la mitigación del efecto Speckle no obtiene buenos resultados para muestras inclinadas 45°.

In this Final Master Thesis, an absolute distance measurement heterodyne interferometric system has been evaluated and characterized. An Speckle effect appears when tilt or rough targets are used. The Speckle effect affects the system accuracy, being less accurate when that effect appears and addign fluctuations in the coherent beam interferometric phase. According to mitigate the Speckle effect, an four-quadrant detector is used. This improvement increases the the system accuracy up to 60% for angles smaller than 40°; however, the Speckle effect mitigation doesn't obtain good results for 45° tilt targets.

Autor: Grau Ruiz, Daniel. email: dagrrui@upv.es
Director 1: Salvadó, Yves, email: Yves.Salvade@he-arc.ch
Director 2: Sales Maicas, Salvador, email: sales@dc.com.upv.es
Fecha de entrega: 09/07/2016

ÍNDICE

I. Introducción teórica. Conceptos básicos de metrología e interferometria	5
I.1. Introducción.....	5
I.2. Motivación.....	8
II. Material y métodos	10
II.1. Set-up del equipo de medida	10
II.2. Metodología utilizada.....	12
III. Resultados del equipo con un solo detector	16
III.1. Caracterización de las muestras	16
III.2. Linealidad del equipo y posición de la lente.....	16
III.3. Error en la medida para diferentes valores de Rfoc	19
III.4. Error en la medida para diferentes ángulos de inclinación de la muestra	21
IV. Resultados del equipo con array de cuatro detectores	25
IV.1. Linealidad del equipo.....	25
IV.2. Error en la medida para diferentes ángulos de inclinación de la muestra.....	26
IV.3. Mitigación del efecto Speckle.....	26
V. Conclusiones y líneas futuras	28
Referencias	30
Anexo	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Esquema del interferómetro de Michelson	5
Fig. 2. Esquema gráfico de la distancia medida debido a efecto Speckle	8
Fig. 3. Esquema técnico detallado del sistema de medida.....	10
Fig. 4. Fotografía del array de cuatro detectores instalado en el telescopio.....	11
Fig. 5. Fotografía del telescopio utilizado	12
Fig. 6. Muestras utilizadas en el experimento	13
Fig. 7. Representación gráfica de reflexión especular y reflexión difusa.....	14
Fig. 8. Fotografía del array de 4 detectores y del telescopio con el array añadido.....	15
Fig. 9. Linealidad del equipo con muestras reflectiva y de aluminio utilizando $Rfoc = 3$	17
Fig. 10. Linealidad del equipo con muestras reflectiva y de aluminio utilizando $Rfoc = 5.5$	18
Fig. 11. Posición de la lente para la muestra reflectiva utilizando $Rfoc = 5.5$	19
Fig. 12. STD para diferentes valores de $Rfoc$ en muestras perpendiculares con diferente Ra	20
Fig. 13. STD para diferentes ángulos de inclinación de la muestra utilizando $Rfoc = 5.5$	21
Fig. 14. Medida de STD para diferentes ángulos de inclinación de la muestra	22
Fig. 15. Simulación de STD en función del DOF	23
Fig. 16. Valores de STD experimentales y simulados	23
Fig. 17. Linealidad del equipo utilizando uno de los detectores del 4Q-detector	25
Fig. 18 Comparativa de STD obtenidas con diferentes detectores y valores simulados	26
Fig. 19. STD antes/después de realizar corrección del efecto Speckle	27

I. INTRODUCCIÓN TEORICA. CONCEPTOS BASICOS DE METROLOGIA E INTERFEROMETRIA.

I.1. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas, las medidas de distancias y de desplazamientos mediante técnicas ópticas son objeto de atención en un amplio abanico de actividades industriales. La interferometría es una técnica utilizada generalmente para realizar medidas de longitud [1-3].

En una medida interferométrica, una fuente de luz, generalmente coherente, es utilizada para la medida de distancia. El haz emitido por la fuente es dividido en dos caminos con diferentes longitudes para posteriormente unirse y hacerlos interferir entre ellos; la onda resultante es la suma de dichos haces que han recorrido caminos ópticos diferentes, produciéndose una suma constructiva o destructiva en función de ésta diferencia de caminos.

Fue Michelson quien a finales del siglo XIX estableció las bases de una técnica de medición de diferencias de caminos ópticos, donde la superposición de dos o más haces de luz producen un patrón de interferencia que consiste en un conjunto de regiones brillantes y oscuras, obteniéndose tales de una forma u otra en función de la fase que poseen los haces en el momento de la interferencia, de forma que será brillante para desfases de 2π radianes o múltiplos y oscura cuando la diferencia de fase es igual a π radianes o múltiplo impar. Un esquema del dispositivo presentado por Michelson es mostrado en la Fig. 1.

Actualmente existe una gran variedad de modelos existentes en el mercado, desde interferómetros incrementales que operan a una longitud de onda fija hasta sistemas de medida de distancias absolutas que pueden utilizar multitud de longitudes de onda (MWI), interferómetros de onda continua modulada en frecuencia (FMCW) e interferometría de luz blanca.

Las medidas de distancias absolutas de varios metros realizadas mediante técnicas de interferometría clásica o las actuales metrologías TOF (tiempo de vuelo-time of flight) no obtienen una resolución mejor a $100\mu\text{m}$ [4]. Sin embargo, su principal inconveniente es la medida incremental de distancias resultado del conteo de franjas ópticas.

Otros métodos de interferometría basados en MWI han sido desarrollados para conseguir medidas de distancias absolutas. Además, los sistemas de adquisición de datos y

las técnicas electrónicas de procesado de señal permiten realizar medidas rápidas y de alta resolución.

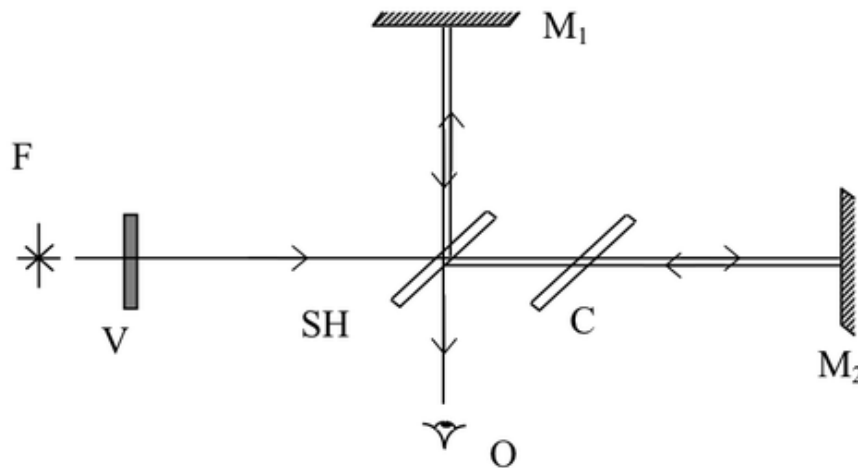


Fig. 1. Esquema del interferómetro de Michelson.

La ventaja que ofrece la MWI frente a la interferometría clásica es una gran flexibilidad en la elección de las diferentes longitudes de onda utilizadas y puede utilizarse en superficies rugosas[4-8]. Por otro lado, la precisión de este método depende, esencialmente, del procesado de señal y de las propiedades de la fuente [8,9] así como otras limitaciones de acuerdo con [10,11]. Aunque se trata de una técnica complicada y con un coste económico elevado, los métodos basados en MWI han generado un gran interés para realizar medidas de distancias micrométricas para aplicaciones industriales [4].

En función del método interferométrico utilizado la señal detectada por el detector del dispositivo y su sensibilidad tendrá unas u otras características. En general, la señal detectada por el detector al hacer interferir los haces de luz viene definida por la expresión (1):

$$V_{det} = A[1 + c \cdot \cos(\omega t + \varphi)] \quad (1)$$

donde A corresponde a una constante dependiente de parámetros como la potencia incidencia y eficiencia del foto detector, c corresponde al contraste del interferómetro siendo $c \leq 1$ y donde ω y φ corresponden a la frecuencia y fase de la onda, respectivamente.

Se denomina interferencia homodina aquella donde se hacen interferir los haces con la misma frecuencia siendo la diferencia entre ellas nula, teniendo que se cumple $\omega = \omega_2 - \omega_1 = 0$, reduciendo la ecuación (1) a la expresión (2):

$$V_{det} = A[1 + c \cdot \cos(\varphi)] \quad (2)$$

Aquellos métodos de interferencia que hacen interferir los haces de luz con frecuencia diferente se denominan heterodinas, siendo en este caso $\omega_2 \neq \omega_1$, deduciéndose la expresión (3) a partir de la expresión (1):

$$V_{det} = A[1 + c \cdot \cos(\omega_{het}t + \varphi)] \quad (3)$$

La detección heterodina ofrece resultados de mayor sensibilidad respecto a la detección homodina, y a pesar de tratarse de una técnica más complicada y mayor coste económico, ha despertado gran interés en la comunidad científica [11-16].

Estudios realizados con técnicas como la FMCW y la MWI donde son iluminadas muestras rugosas aparecen unas limitaciones en las medidas producidas por dicha rugosidad y por la inclinación de la muestra respecto al haz de luz [17-19]. Estas limitaciones son comúnmente llamadas Speckle o moteado y, como ya se ha mencionado, son una fuente del deterioro de la precisión de la medida. El llamado efecto Speckle aparece como una serie de fluctuaciones aleatorias de la medida que son debidas a las variaciones de profundidad en la superficie de medida; estos efectos, debidos a la variación aleatoria de la fase interferométrica φ que resulta de la coherencia de la luz coherente, de acuerdo con [12,20-22], causan un error en la medida. La medida de distancia obtenida en este caso corresponde a medidas erróneas de distancia donde la medida de distancia obtenida no corresponde con la distancia real entre el dispositivo y la muestra, sino que corresponde a la distancia entre éstos habiendo sido desplazado un offset respecto al haz óptico, tal y como es mostrado en la Fig. 2. Diferentes métodos han sido estudiados hasta ahora con el fin de reducir el efecto Speckle [19,23-24].

El efecto de la aparición de Speckle ocurre en menor medida con técnicas de medida de distancia que utilizan luz incoherente, como son la interferometría clásica o tecnologías TOF, donde el promediado Speckle actúa, incluso, reduciendo el error de la medida realizada. Sin embargo, la limitada precisión en la medida y la limitada sensibilidad en técnicas con luz incoherente hacen que no sea una técnica apropiada para este tipo de medida.

El set-up utilizado en este trabajo consta de un láser DFB que es utilizado como fuente de luz coherente. A continuación un modulador acousto-óptico (AOM) modula linealmente la longitud de onda emitida por el láser; dicha señal es dividida en dos, para ser conectada a dos interferómetros, uno de referencia y otro objetivo.

En este proyecto se utiliza un conjunto de detectores que reciben información de la muestra, a partir de las medidas realizadas es posible determinar el vector de Pointing que indica las coordenadas del “centroide” de la medida, X_0 e Y_0 . Una vez determinado la dirección de Pointing, las fluctuaciones de la medida son reducidas haciendo uso de la información de “centroide” que es proporcionada por el “set” de detectores [20].

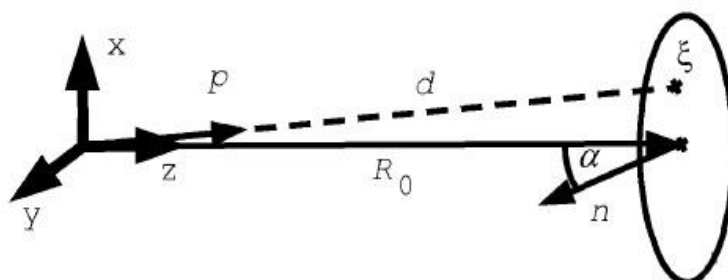


Fig. 2. Esquema gráfico de la distancia medida en la dirección del vector de Pointing desplazada un offset del centro de la muestra.

Con la configuración antes detallada, el patrón Speckle es medido con una sola longitud de onda para determinar la dirección de Pointing en cada medida de la distancia y con ello realizar la corrección de la medida. Cabe destacar que el sistema no está limitado por el uso de una sola frecuencia, por lo que el uso de varias de ellas se tiene en cuenta para realizar futuros trabajos.

1.2 MOTIVACIÓN

El trabajo realizado en este Trabajo Final de Máster (TFM) se enmarca en el proyecto “Coherent Frequency Modulated Continuous Wave Absolute Distance Meter (CFMCW)” cuyo objetivo es el desarrollo de un prototipo de metrología de distancia absoluta que pasará a formar parte de un sistema de medidas de coordenadas en gran escala. Su principal uso será en aplicación industrial tal como fabricación y ensamblado de diferentes partes en la industria. Este tipo de aplicaciones están caracterizadas por unos requisitos de una precisión de medida muy precisa ($\ll 100 \mu\text{m}$) y medidas de distancia absoluta hasta 100 m.

El principal riesgo para llevar a cabo esta tecnología al mercado comercial de forma exitosa se centra en el telescopio, debido a la crítica sensibilidad y precisión de medida y la velocidad de ésta. Los sistemas disponibles en el mercado están limitados por las no

linealidades de la fuente láser, e intentan mejorar la precisión mejorando la fuente de emisión coherente.

En este proyecto, en lugar de mejorar la fuente, se toman precauciones para medir y compensar las no-linealidades producidas por la fuente y eliminar el ruido en el proceso de detección. Todo ello con el objetivo de reducir complejidad en el sistema y los costes económicos.

II. MATERIAL Y METODOS.

II.1 SET-UP DEL EQUIPO DE MEDIDA

Medidas de distancias absolutas de muy alta precisión pueden ser conseguidas mediante técnicas MWI. Para ello, un complejo sistema ha sido desarrollado con el fin de conseguir precisiones del orden de las decenas de micrómetros en medidas de distancias absolutas de 50 a 100 metros.

El equipo utilizado consta de un laser DFB como fuente de luz coherente donde su longitud de onda es continuamente sintonizada linealmente. Este laser es conectado a dos interferómetros: uno de referencia y otro objetivo.

Por un lado, el interferómetro objetivo o target focaliza la luz en el objeto, recoge la luz reflejada por éste a través del telescopio utilizado y, posteriormente es recibida por un detector. Haciendo uso de la mezcla heterodina con una frecuencia óptica desplazada, el tiempo de retardo es convertido en información de frecuencia del interferograma. Con el fin de eliminar el ruido, fotodetectores de auto-balance son utilizados. La salida del detector es convertida AD por un sistema de adquisición de datos DAQ y procesada en tiempo real por dos FPGAs.

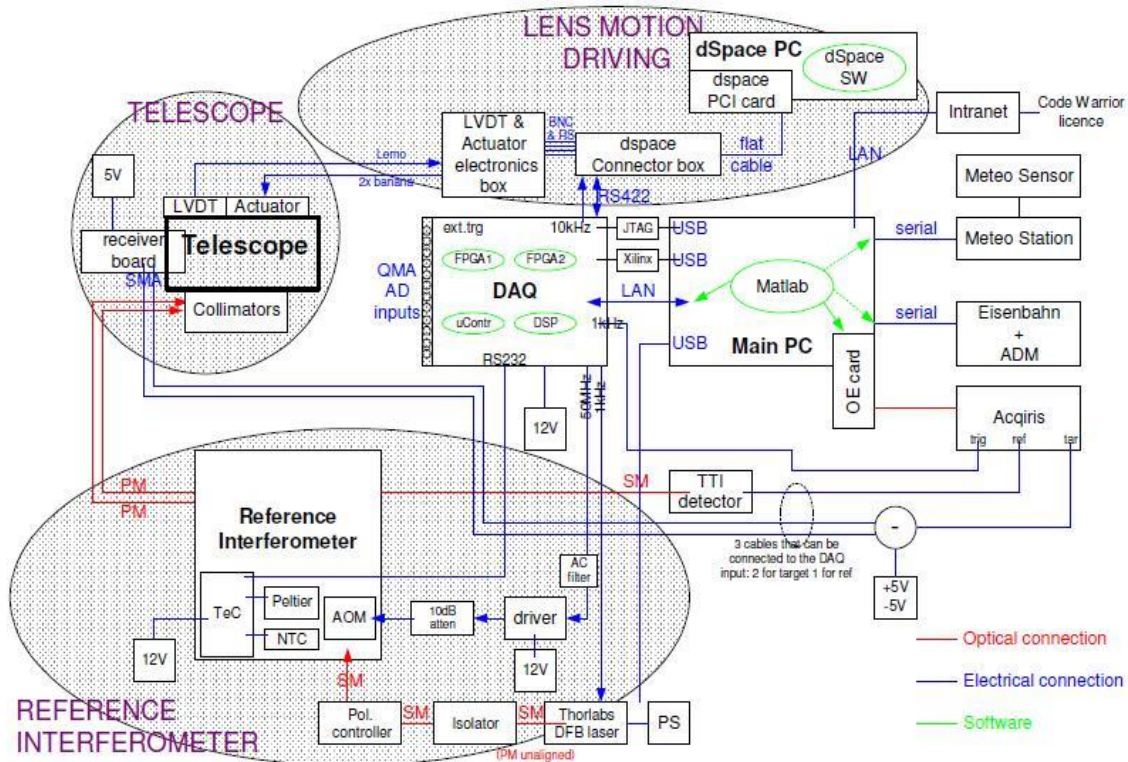


Fig. 3. Esquema técnico detallado del sistema de medida.

Por otro lado, en el interferómetro de referencia es medida simultáneamente la longitud de onda producida por el laser DFB con el fin de conocer con exactitud la longitud de onda emitida debido al desconocido comportamiento del laser, tanto en sintonizado como en fase. A partir del interferómetro de referencia se obtiene una longitud estándar, por lo que, el retardo de tiempo es conocido con una precisión muy alta y las no-linealidades producidas por el láser pueden ser eliminadas. Cabe citar que un sistema todo-fibra es utilizado. Un esquema del sistema completo es mostrado en la Fig. 3.

En relación a los detectores utilizados, en el primer experimento se utiliza un solo detector, mientras que en el segundo experimento ese detector es sustituido por un array de cuatro detectores. Dichos detectores están dispuestos de forma cuadrada, representando cada uno de ellos un cuadrante del eje coordenado. El haz reflejado por la muestra se hace incidir sobre estos detectores, en la medida de lo posible, puesto que el haz tiene dimensiones menores al conjunto del array formado por estos cuatro detectores. Una fotografía y esquema de la placa con los conectores de los detectores y una vista frontal de los detectores insertados en la placa son mostrados en la Fig. 4.

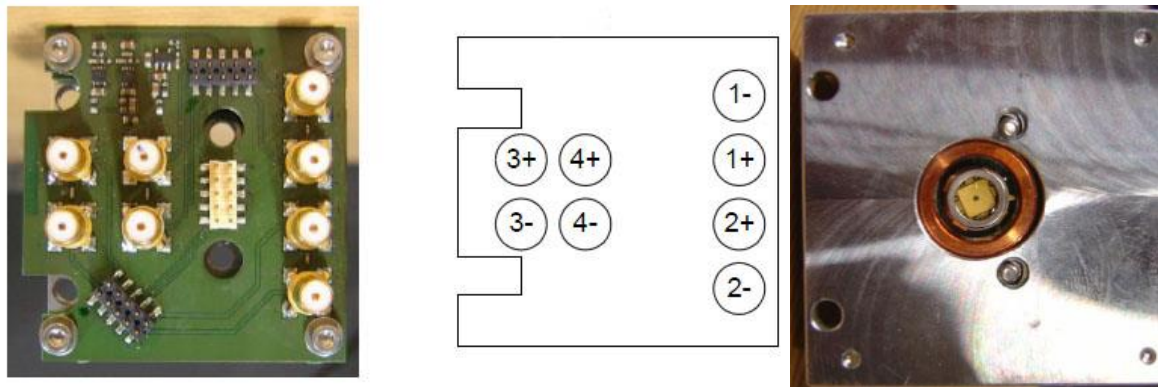


Fig. 4. Fotografía del array de 4 detectores vista desde arriba(izq.). Esquema de las conexiones (centro).

Fotografía del array de los detectores insertados sobre la placa (dcha.)

A lo largo de todos los experimentos realizados en este TFM es utilizado un sistema de desplazamiento sobre el cual se han colocado las muestras estudiadas. Las muestras han sido situadas sobre dicho sistema de desplazamiento a lo largo del eje óptico, interceptando el haz a una distancia entre 4 y 5 metros respecto al telescopio.

II.2 METODOLOGIA UTILIZADA

El trabajo realizado consta de dos experimentos principales:

En el primer experimento se han realizado medidas de distancia de muy alta precisión mediante el sistema mostrado y con el telescopio de un solo detector, mostrados en las Fig.3 y Fig. 5, respectivamente. Con este set-up se ha realizado un testado del conjunto completo, comprobando el buen funcionamiento del telescopio, donde se ha comprobado la linealidad y la posición de la lente para diferentes longitudes de medida. Además se han realizado medidas a diferentes ángulos de inclinación respecto el haz óptico con el fin de conocer el error obtenido debido a la aparición del efecto Speckle.

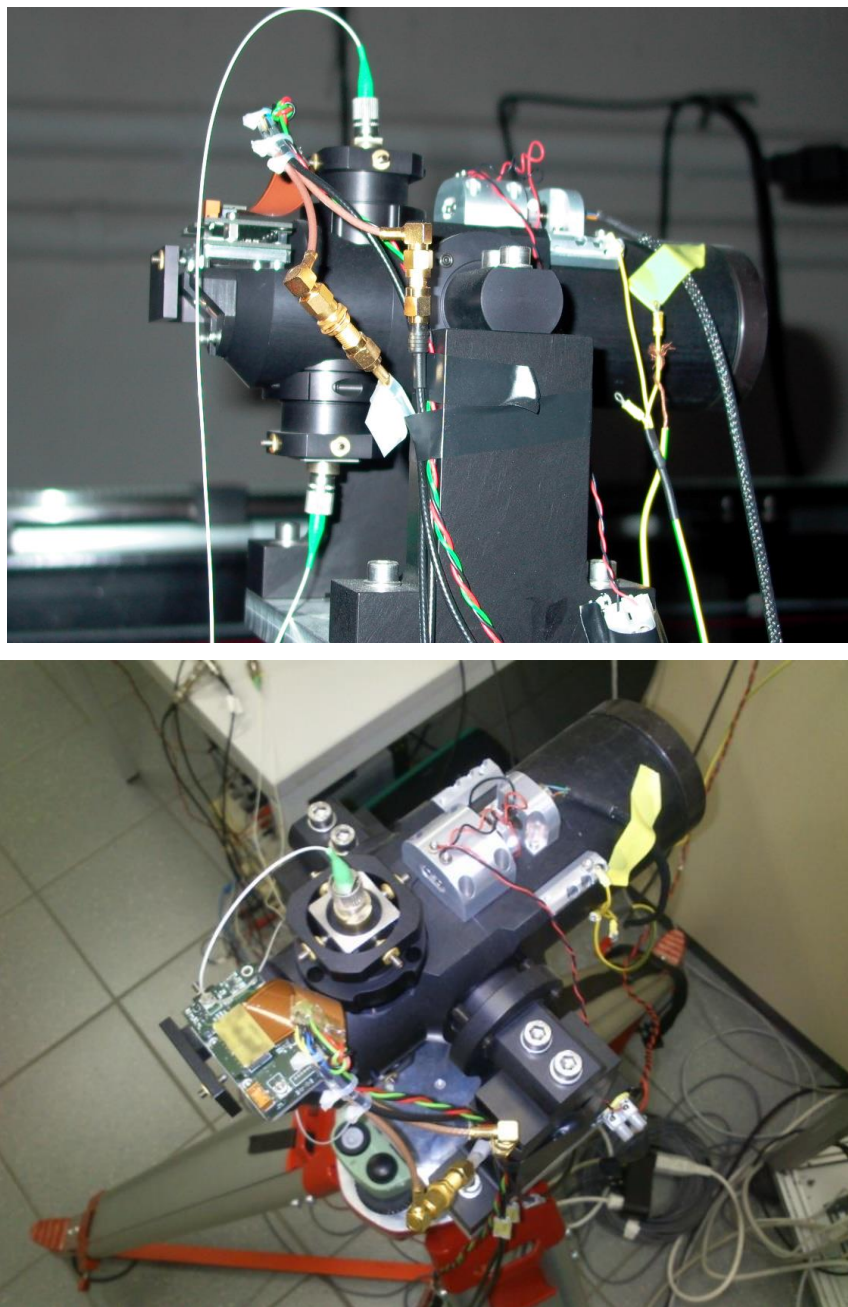


Fig. 5. Fotografía del telescopio utilizado. Vista lateral (arriba), Vista superior (abajo)

Para comprobar la linealidad del telescopio se ha iluminado la muestra dispuesta sobre el sistema de desplazamiento y ortogonalmente al eje óptico; dicha muestra ha sido muestreada a diferentes distancias. Esta comprobación es realizada con dos muestras, la primera de ellas es una muestra reflectiva con comportamiento cuasi-especular; la segunda es una muestra de aluminio con una rugosidad mayor que la anterior y un comportamiento más difuso. Un detalle de las muestras utilizadas es mostrado en la Fig. 6.

Para comprobar la correcta posición de la lente ha sido iluminada la muestra reflectiva a diferentes distancias, realizando enfoque del haz para cada una de ellas. En cada una de las medidas se comprueba la posición de la lente; ésta es correcta si se encuentra dentro de unos límites establecidos por la empresa.

Para finalizar con el primer experimento, un conjunto de medidas han sido realizadas a diferentes ángulos de inclinación de la muestra respecto al eje óptico para comprobar la aparición del efecto Speckle. Por otro lado, estos resultados son comparados con simulaciones donde ha sido realizada la mitigación del efecto Speckle, dejando evidencias que es necesario realizar cambios en el set-up con el fin de eliminar dicho efecto de las medidas realizadas.

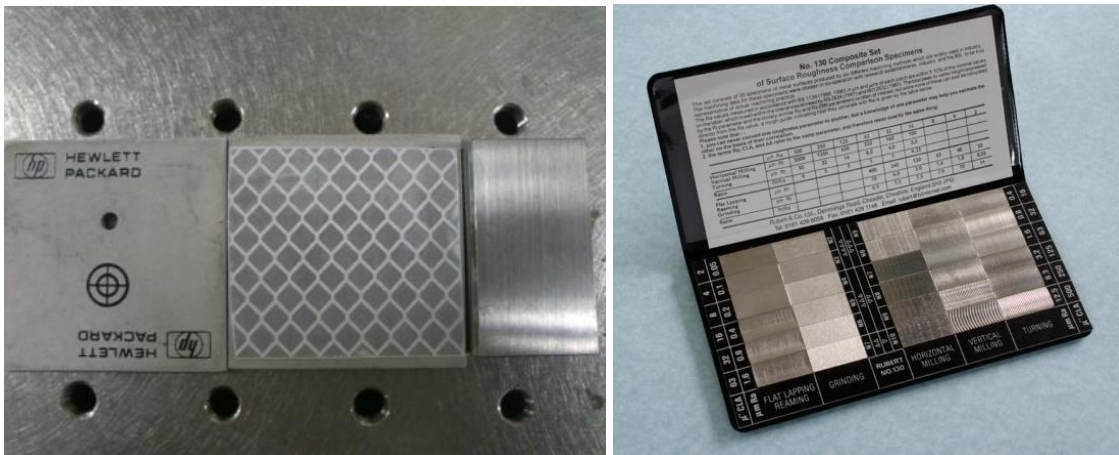


Fig. 6. Muestras utilizadas en el experimento. Lámina reflectante, lamina de aluminio H, bloque de aluminio, set de muestras N°130 Rubert&Co. (de izq a dcha)

Las medidas realizadas en el experimento se realizan con diferentes muestras. Cada muestra está compuesta por diferentes materiales y rugosidades. Como se ha comentado en el capítulo I, la rugosidad es uno de los parámetros que afectan a la aparición del efecto Speckle, es por ello que las muestras han sido caracterizadas con el fin de conocer la rugosidad de éstas.

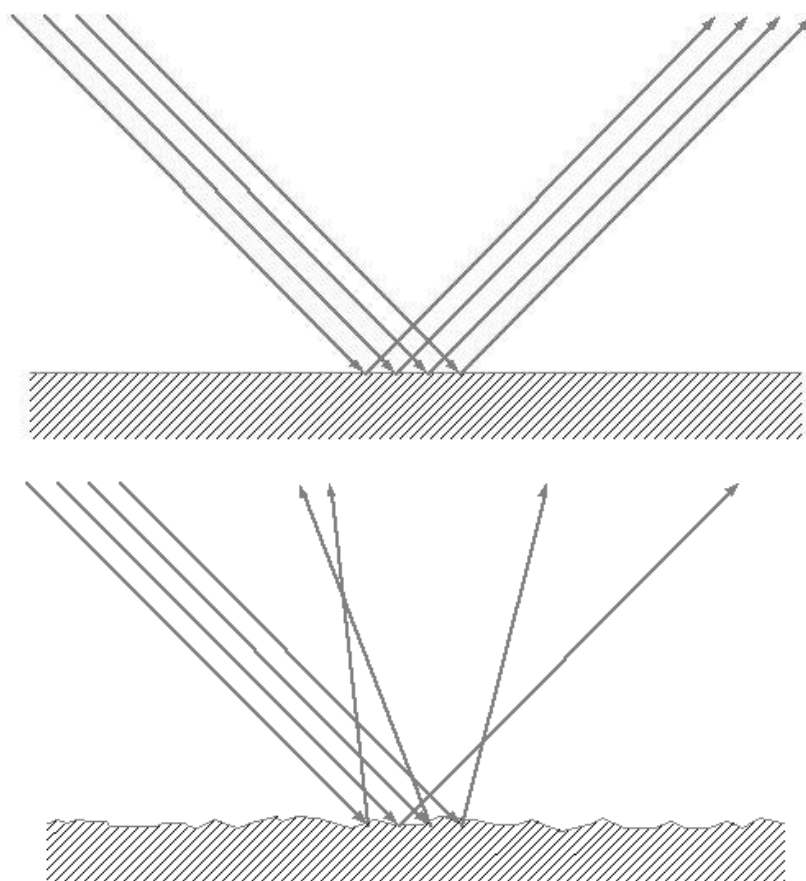


Fig. 7. Representación de reflexión especular (izq.) y reflexión difusa (dcha.)

Se define rugosidad como el conjunto de irregularidades que presenta una superficie; estas irregularidades son debidas al proceso de fabricación, por lo que cualquier superficie tiene cierta rugosidad a escala micrométrica. El parámetro de rugosidad utilizado es R_a (Roughness arithmetic), definido por la ecuación (4), donde se calcula un promedio de los valores absolutos de las alturas medidas a lo largo del perfil de la muestra.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (4)$$

En función del tipo de superficie sobre la cual se hace incidir un haz de rayos paralelos podemos decir que hay dos tipos de reflexiones: Reflexiones especulares y reflexiones difusas. La reflexión especular ocurre cuando un haz de rayos paralelos incide sobre una superficie reflectora plana y la luz es reflejada de forma que ángulo incidente y reflejado son iguales. Por otro lado, la reflexión difusa ocurre cuando el haz de rayos paralelos incide en una superficie rugosa y la reflexión de la luz toma diferentes direcciones, desviando la luz en diferentes direcciones. Un esquema de ambos tipos de reflexión es mostrado en la Fig. 7.

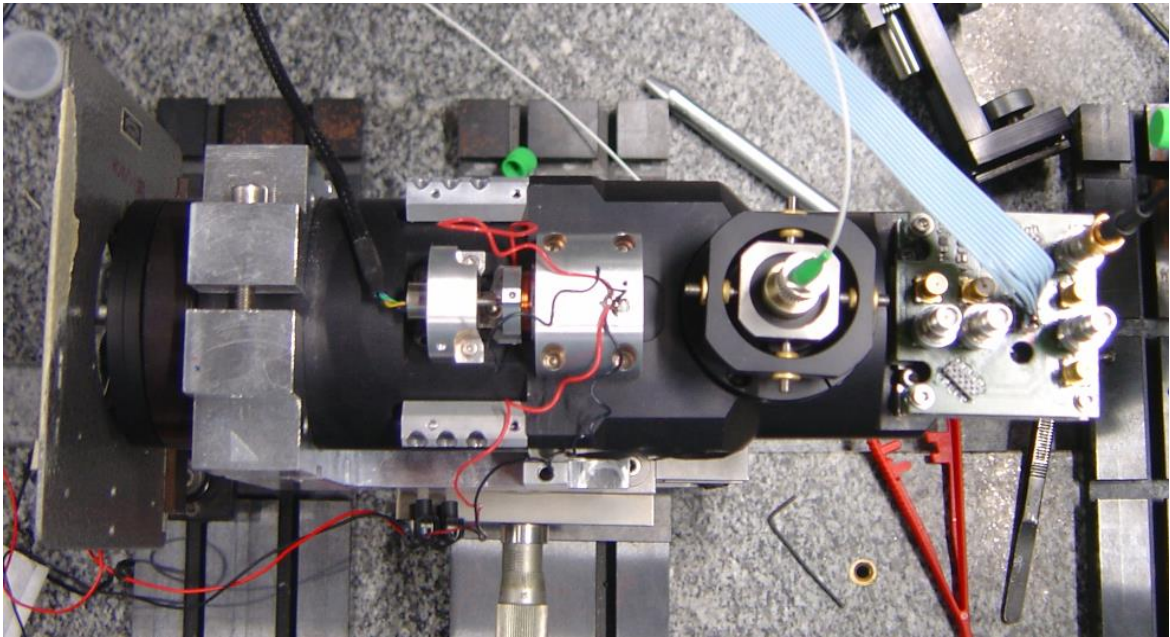


Fig 8. Fotografía del telescopio con array de 4 detectores añadido (abajo)

En el segundo experimento el set-up ha sido modificado añadiendo un conjunto de cuatro detectores, mostrado en la Fig.8 con los cuales es posible calcular la distancia real del telescopio a la muestra haciendo uso de las coordenadas del “centroide” de la muestra observada. Como en el experimento anterior, la linealidad del equipo ha sido comprobada para cada uno de los detectores añadidos. Tras la comprobación de linealidad, un conjunto de medidas a diferentes ángulos de inclinación respecto al eje óptico es realizado con el fin de calcular la distancia real entre el telescopio y la muestra, eliminando la aparición del efecto Speckle con la información proporcionada por el conjunto de detectores añadido.

III. RESULTADOS DEL EQUIPO CON UN SOLO DETECTOR

El set-up utilizado en el primer experimento realizado consta de un solo detector. En este capítulo se muestra la caracterización de las muestras utilizadas a lo largo de todo el documento, la puesta a punto y comprobación del buen funcionamiento del dispositivo de medida y el error de medida con diferentes ángulos de inclinación de la muestra respecto al eje óptico.

III.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

A lo largo del experimento un conjunto de muestras son utilizadas. Con el fin de tenerlas caracterizadas, y haciendo uso de un perfilómetro, se han tomado medidas de la rugosidad de cada una de ellas utilizando el parámetro Roughness aritmético (Ra).

En la tabla 1 se muestran los valores de rugosidad de las muestras utilizadas.

MUESTRA	Ra (μm)	
REFLECTIVA	-	-
ALUMINIO	3,1	\pm 0,2
N2	0,050	\pm 0,005
N3	0,10	\pm 0,01
N4	0,20	\pm 0,02
N5	0,40	\pm 0,04
N6	0,80	\pm 0,08
N7	1,60	\pm 0,16

Tabla 1. Rugosidad de las muestras utilizadas a lo largo del experimento

En relación a las muestras caracterizadas, notar que las muestras nombradas como N2-N7 son muestras del conjunto N°130 de Rubert&Co, y que tanto éstas como la muestra de aluminio se tratan de superficies metálicas pulidas, mientras que la muestra reflectiva se trata de un papel reflectivo del cual no se ha calculado la rugosidad.

III.2. LINEALIDAD DEL EQUIPO Y POSICIÓN DE LA LENTE

Tras el montaje del sistema, un testado del equipo debe ser realizado para comprobar su buen funcionamiento. La linealidad del dispositivo y la correcta posición de la lente para diferentes longitudes de medida han sido comprobados.

La linealidad del dispositivo ha sido comprobada realizando una serie de medidas de distancia. Para ello dos muestras, la reflectiva y la muestra de aluminio, han sido colocadas ortogonalmente al eje óptico y sobre un sistema de desplazamiento. Una vez colocadas han

sido iluminadas y muestreadas a diferentes distancias, desplazando las muestras en intervalos conocidos de distancia utilizando un sistema de desplazamiento sobre el cual se sitúa la muestra. Las medidas de distancia realizadas comprenden entre 4.8 y 5.8 metros.

Los resultados obtenidos utilizando el sistema de adquisición de datos dependen de varios parámetros de entrada. Uno de estos parámetros es la distancia de focalización, “*Rfoc*”; se trata de un parámetro que corresponde a la distancia aproximada que se desea medir, expresada en metros.

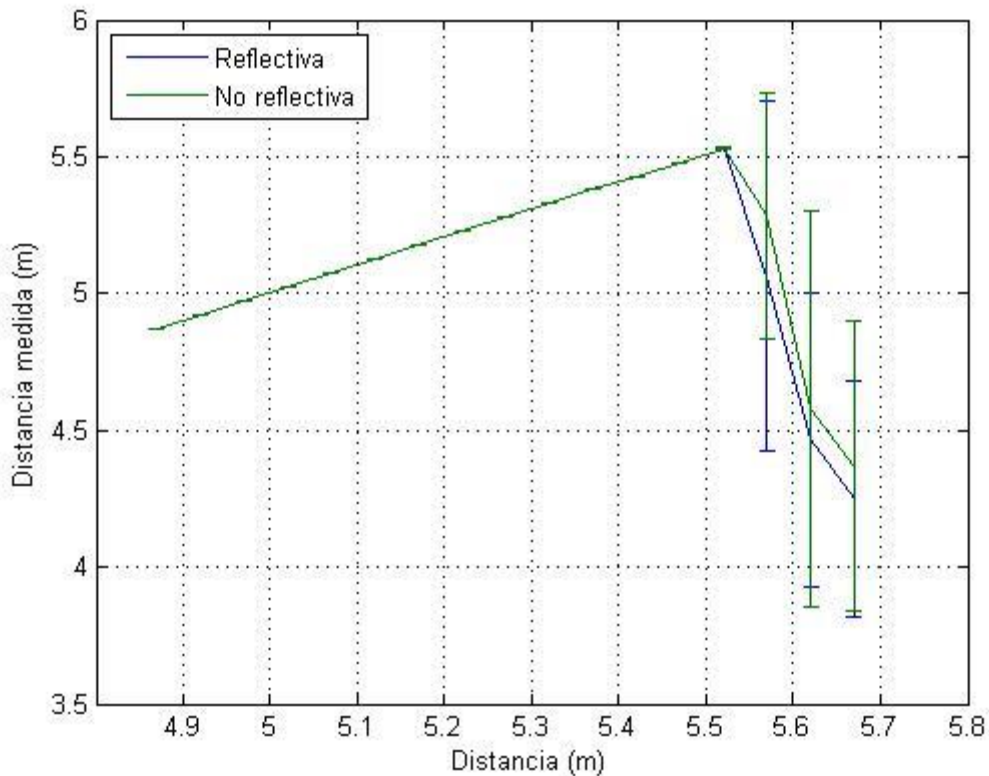


Fig.9. Linealidad del equipo con muestras reflectiva y aluminio utilizando un valor de $Rfoc=3$.

Una medida de la linealidad del telescopio es mostrada en la Fig. 9, donde se ha utilizado un valor de $Rfoc=3$. Se observa que el comportamiento lineal del sistema se pierde, en ambas muestras utilizadas, a partir de una distancia de 5.5 metros, introduciendo además un elevado error en las medidas. Debido a la diferencia entre el valor de $Rfoc$ utilizado y la distancia medida se produce la defocalización del spot, produciéndose por ese motivo una pérdida de la linealidad de la medida.

Una segunda medida de la linealidad del equipo es realizada con un nuevo valor de $Rfoc$, siendo éste $Rfoc=5.5$, siendo un valor más cercano a la distancia medida con el fin de evitar la defocalización. La figura 10 muestra la linealidad del equipo con un valor introducido de $Rfoc=5.5$.

Con estas medidas queda comprobada la linealidad del equipo, obteniendo unos valores de error alrededor de las 50 μm , tanto para la lámina reflectiva como la de aluminio. Como ha podido ser comprobado, el valor de entrada introducido para $Rfoc$ es importante para obtener un buen comportamiento en el equipo, es por este motivo por el cual a lo largo del trabajo se utiliza un valor de $Rfoc = 5.5$.

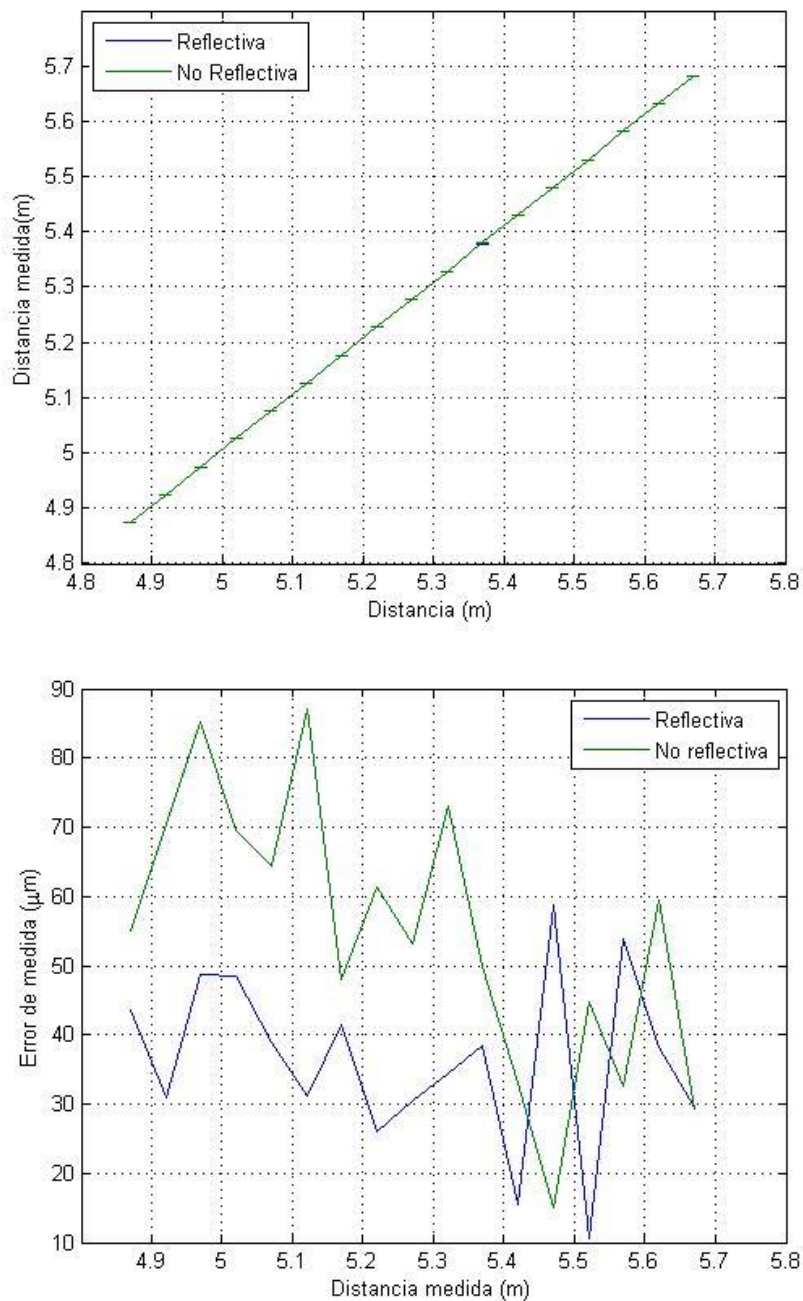


Fig.10. Linealidad del equipo con muestras reflectiva y aluminio utilizando un valor de $Rfoc=5.5$ (arriba), desviación estandar de las medidas de la distancia. (abajo)

Como se ha comentado en el capítulo II, otro de los aspectos para el buen funcionamiento del telescopio es la correcta focalización del haz sobre la muestra y ésta depende de la posición de la lente.

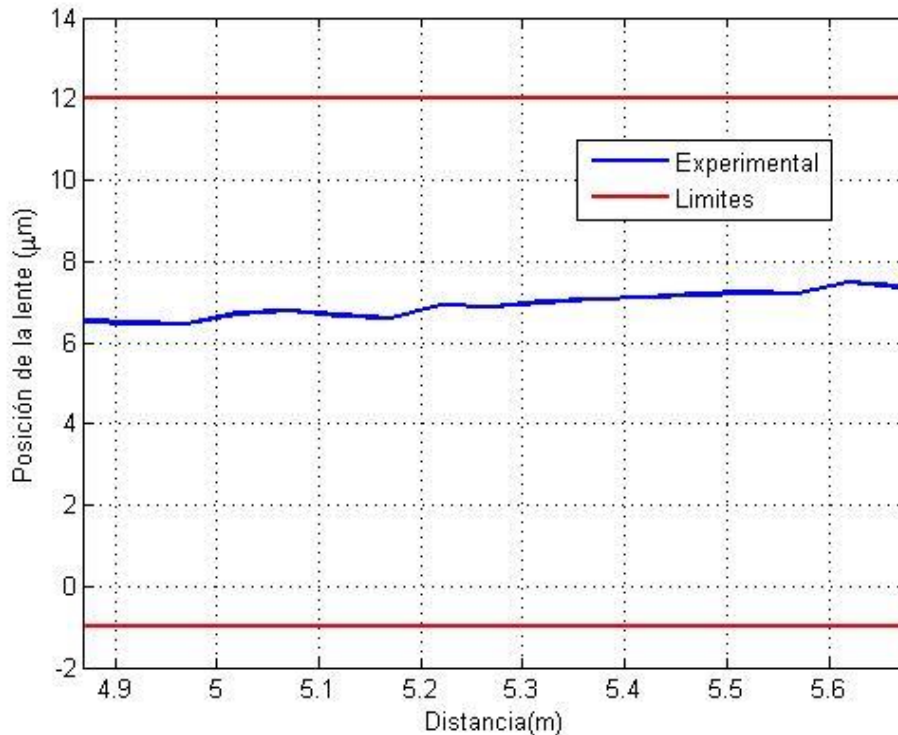


Fig.11. Posición de la lente para la muestra reflectiva utilizando un valor de $Rfoc=5.5$.

La posición de la lente ha sido medida para diferentes distancias. El buen posicionamiento de la lente viene definido por encontrarse dentro de unos límites, los cuales han sido proporcionados por la “Empresa” y se muestran en la Fig. 11 junto con los valores medidos, comprobándose que es correcto en dicho rango de distancias.

III.3. ERROR EN LA MEDIDA PARA DIFERENTES VALORES DE $Rfoc$ Y DIFERENTES VALORES DE RUGOSIDAD DE LA MUESTRA

Tal y como se ha observado, la linealidad del equipo depende del valor de $Rfoc$ introducido, perdiéndose ésta cuando la longitud medida es muy alejada del valor de $Rfoc$ introducido. Por este motivo, una serie de medidas han sido realizadas con diferentes muestras, posicionándolas perpendicularmente al haz óptico y utilizando diferentes valores de $Rfoc$.

Para estas medidas son utilizadas las muestras de la placa Rubert #130 situadas a una distancia de 5 metros. En la tabla 2 se muestran los errores de medida de las diferentes muestras para diferentes valores de $Rfoc$, donde puede observarse un descenso del error en

la medida cuando el valor de $Rfoc$ es más cercano a la distancia medida, esto puede ser debido una mejor focalización consecuencia de un posicionamiento de la lente más óptimo para dicha medida. Estos mismos datos son mostrados de forma gráfica en la Fig. 12.

Además de observar una mejoría en la medida cuanto menor es la diferencia entre el valor de $Rfoc$ y la distancia medida, también se observa que se obtienen valores más precisos para muestras menos rugosas; dicha tendencia se observa más claramente en la serie de datos obtenidos para el valor de $Rfoc$ igualado a la distancia.

Muestras	Rfoc = 5.5	Rfoc = 5.3	Rfoc = 5.2	Rfoc = Distancia
N2	63,93	58,41	55,85	42,65
N3	56,42	51,78	48,2	36,72
N4	59,83	51,53	45,94	30,61
N5	51,4	52,28	47,24	24,98
N6	52,02	45,53	38,75	11,12
N7	51,54	47,3	42,69	11,84

Tabla 2. Desviaciones estándar (μm) de las muestras utilizadas de Rubert #130 situadas ortogonalmente al haz óptico para diferentes valores de $Rfoc$.

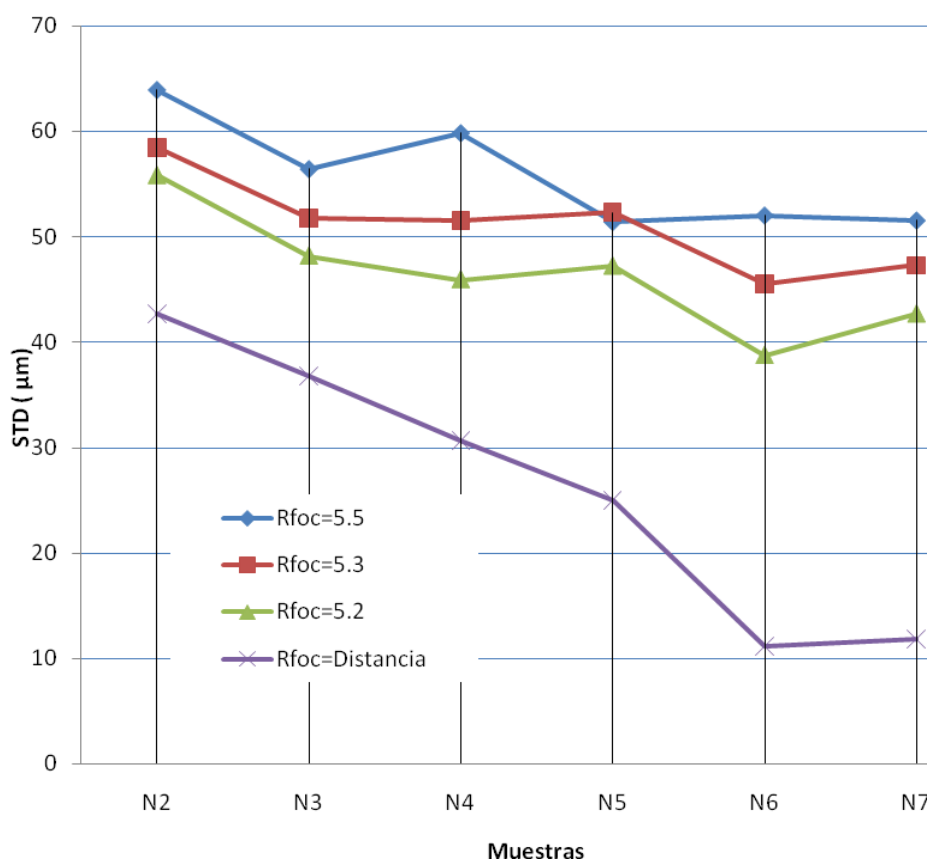


Fig. 12. Error en la medida para diferentes valores de $Rfoc$ en muestras posicionadas ortogonalmente al haz óptico.

III.4. ERROR EN LA MEDIDA CON DIFERENTES ANGULOS DE INCLINACIÓN

Como se ha mencionado anteriormente, la rugosidad de la muestra y la inclinación de ésta respecto al haz óptico influyen en la aparición del efecto Speckle. En este experimento se ha realizado un total de 60 medidas de distancia para diferentes ángulos de inclinación de la muestra de aluminio respecto al eje óptico. Las desviaciones estándar obtenidas a partir de este conjunto de medidas se muestran en las Fig.13; por otro lado se muestran las medias de dicho conjunto de medidas en la Fig.14., donde se observa un incremento de la desviación estándar para mayores ángulos de inclinación respecto al haz óptico.

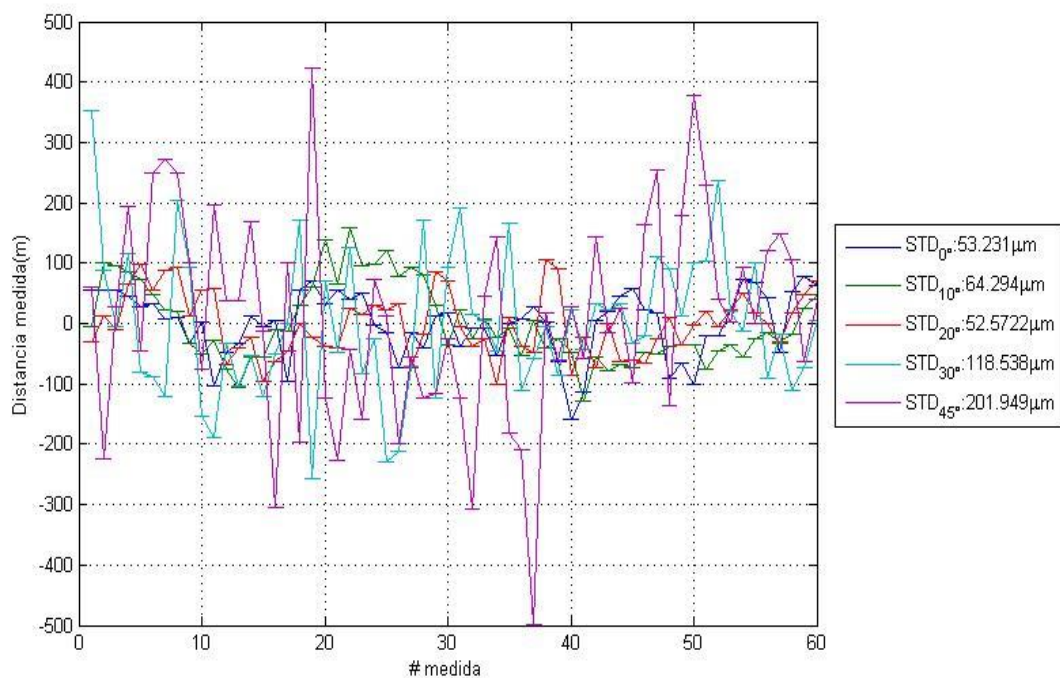


Fig. 13. Conjunto de valores de desviación estándar de la muestra de aluminio para diferentes ángulos de inclinación con $Rfoc=5.5$ obtenidos en 60 medidas realizadas a una distancia aproximada de 5 metros.

Tal y como se ha mostrado en la subsección III.3, existe una relación evidente entre la focalización del haz sobre la muestra y la desviación estándar obtenida de la medida. Para comprobar la importancia de la focalización en medidas con muestras inclinadas han sido utilizados los resultados obtenidos de una serie de simulaciones Monte-Carlo, realizadas con anterioridad a este trabajo, donde se aplica la mitigación del efecto Speckle.

Las fluctuaciones de la medida de la distancia del objeto en función de la distancia de focalización (DOF – Depth Of Focus), en este caso $DOF=5$ metros, antes y después de aplicar la mitigación de efecto Speckle son mostradas en la Fig. 15. Puede observarse que

distancias mayores de DOF afectan a la mitigación Speckle, siendo menor para mayores valores de DOF. Sin embargo, incluso con DOF mayores a 0.1 metros se obtiene una buena mitigación del efecto Speckle.

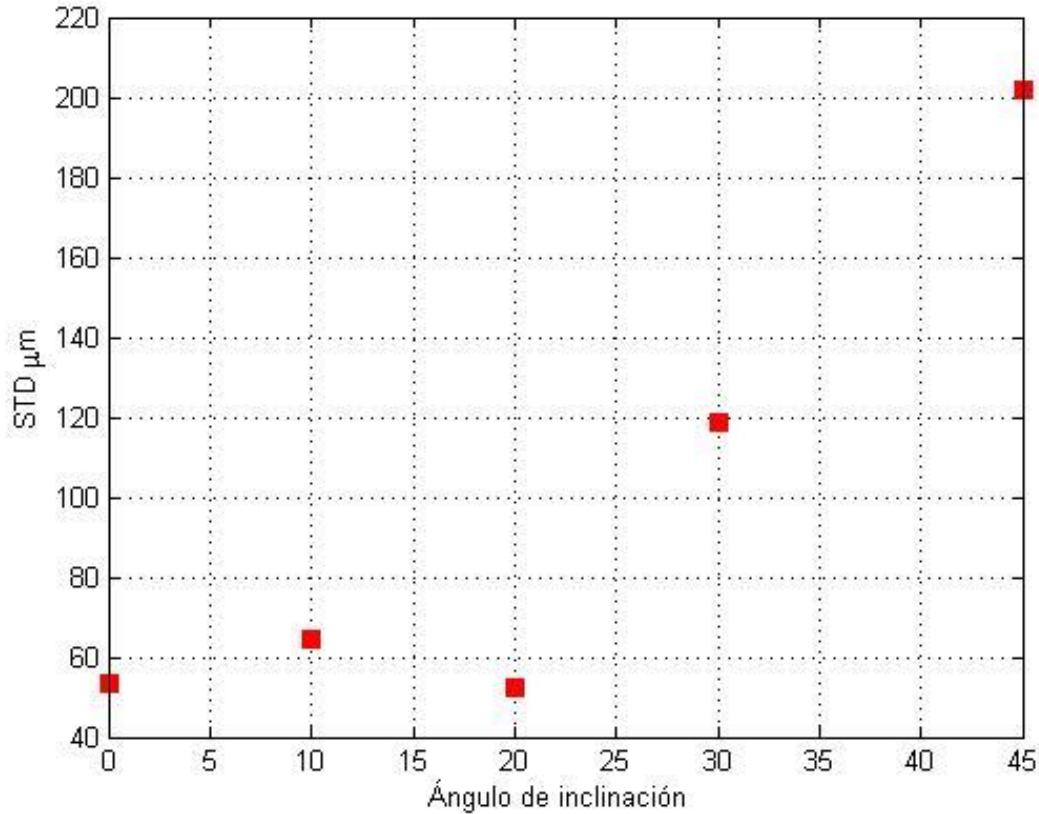


Fig. 14. Media de la desviación estándar de la muestra de aluminio para diferentes ángulos de inclinación utilizando un valor de $R_{foc} = 5.5$.

Simulaciones para diferentes ángulos de inclinación son mostradas en el Anexo, donde puede observarse, tal y como muestra la Fig. 15, un notable descenso en el error de la medida tras realizar la mitigación del efecto Speckle para cualquier ángulo de inclinación.

Una serie de valores de la desviación estándar de las medidas experimentales y simulaciones realizadas para diferentes ángulos de inclinación son mostrados en la Fig. 16., donde se observa una tendencia creciente en los valores de STD para mayores ángulos de inclinación. También puede observarse que para ángulos de inclinación mayores a 20° se observa una discrepancia entre los resultados experimentales y la simulación sin realizar mitigación Speckle.

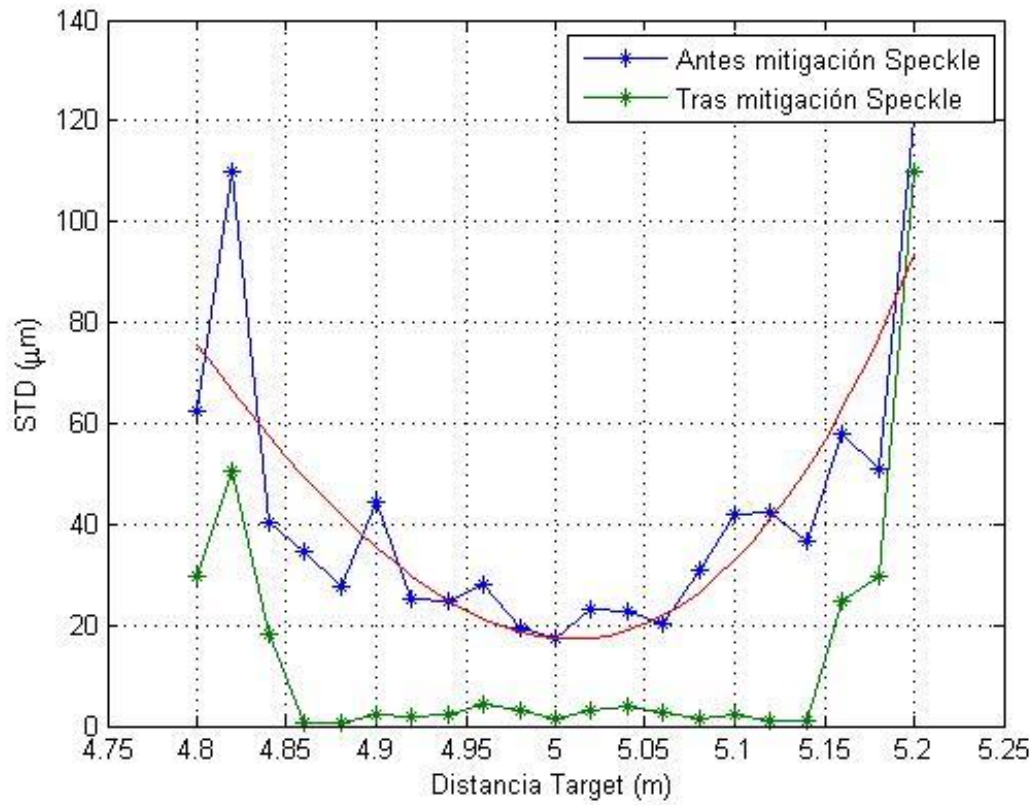


Fig. 15. Simulación de la desviación estándar en función de la DOF, en una muestra situada a 5m de distancia e inclinada 10° del eje óptico, antes (azul) y después (verde) de realizar la supresión del efecto speckle.

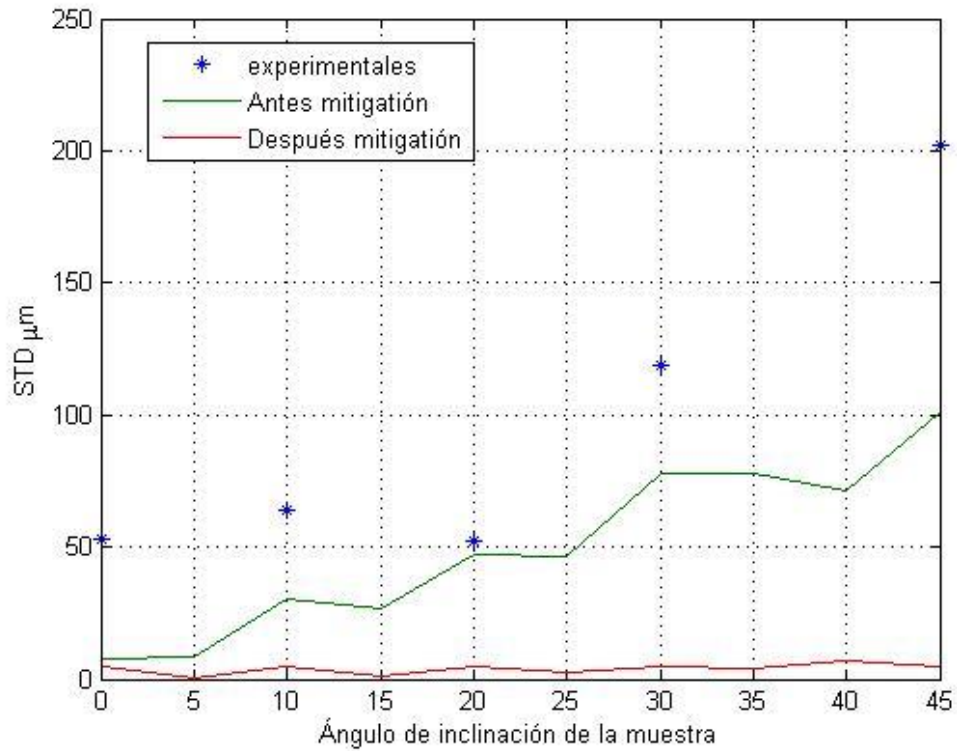


Fig. 16. Valores de STD experimentales y simulados realizados a una distancia de 5m para diferentes ángulos de inclinación.

Por otro lado, los resultados obtenidos en la Fig. 16. muestran la importancia de mitigar el efecto Speckle para obtener medidas de muy alta precisión. Como ya se ha comentado, para realizar la mitigación del efecto Speckle es necesario disponer de más de dos señales, con el fin de calcular el “centroide” de la señal. Por este motivo, un dispositivo de cuatro sensores ha sido implementado con el fin de sustituirlo por el sensor utilizado hasta el momento.

IV. RESULTADOS DEL EQUIPO CON ARRAY DE 4 DETECTORES

Con el fin de realizar la mitigación Speckle un set-up diferente compuesto por cuatro detectores se añade al equipo. Con este nuevo set-up se realizan de nuevo las pruebas de correcto comportamiento del equipo tal y como se han realizado en el capítulo III. Una vez comprobado el buen funcionamiento del equipo, por un lado, se han realizado medidas de distancias para diferentes ángulos de inclinación con un solo detector en con el fin de comparar con los resultados obtenidos en el capítulo anterior; por otro lado han sido realizadas una serie de medidas con los cuatro detectores con el fin de realizar la mitigación del efecto Speckle haciendo uso del “centroide” de la señal.

IV.1. LINEALIDAD DEL EQUIPO.

Para garantizar el buen funcionamiento del equipo, dado que solamente han sido sustituidos los detectores, únicamente se realiza la comprobación de linealidad, en cada uno de los detectores. Una medida de linealidad de uno de los detectores es mostrada en la Fig. 17, donde el valor de $Rfoc$ utilizado es $Rfoc = 4.5$

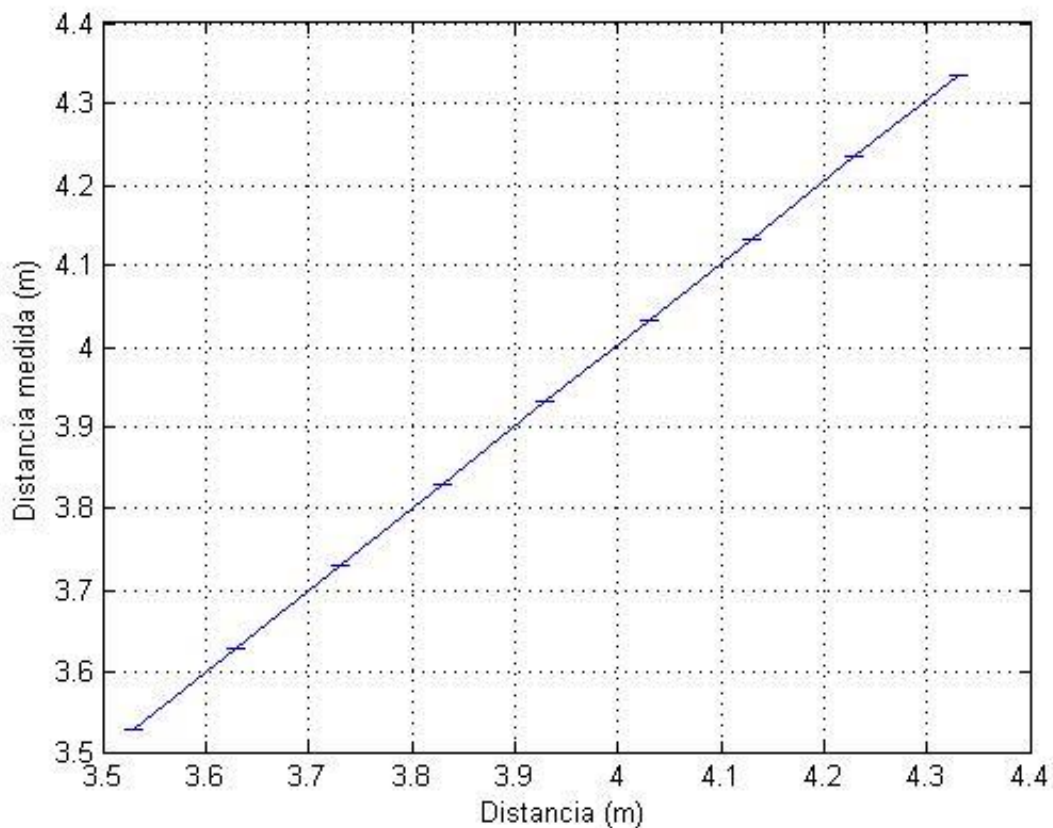


Fig. 17. Linealidad del equipo utilizando solo uno de los detectores del 4Q-detector, utilizando un valor de $Rfoc = 4.5$.

IV.2. ERROR EN LA MEDIDA EN MUESTRAS CON DIFERENTES ÁNGULOS DE INCLINACIÓN

Tal y como se ha realizado en la subsección III.4, se realizan medidas del error de la medida para diferentes ángulos de inclinación utilizando un solo detector del 4Q-detector. Los resultados obtenidos con el nuevo detector y los anteriormente obtenidos experimentalmente junto con las simulaciones son mostrados en la Fig. 18, donde se observa que resultados experimentales de STD obtenidos con ambos detectores para ángulos mayores a 30° discrepan en un centenar de μm . Esta discrepancia puede ser debida a un mal alineamiento en el primer telescopio.

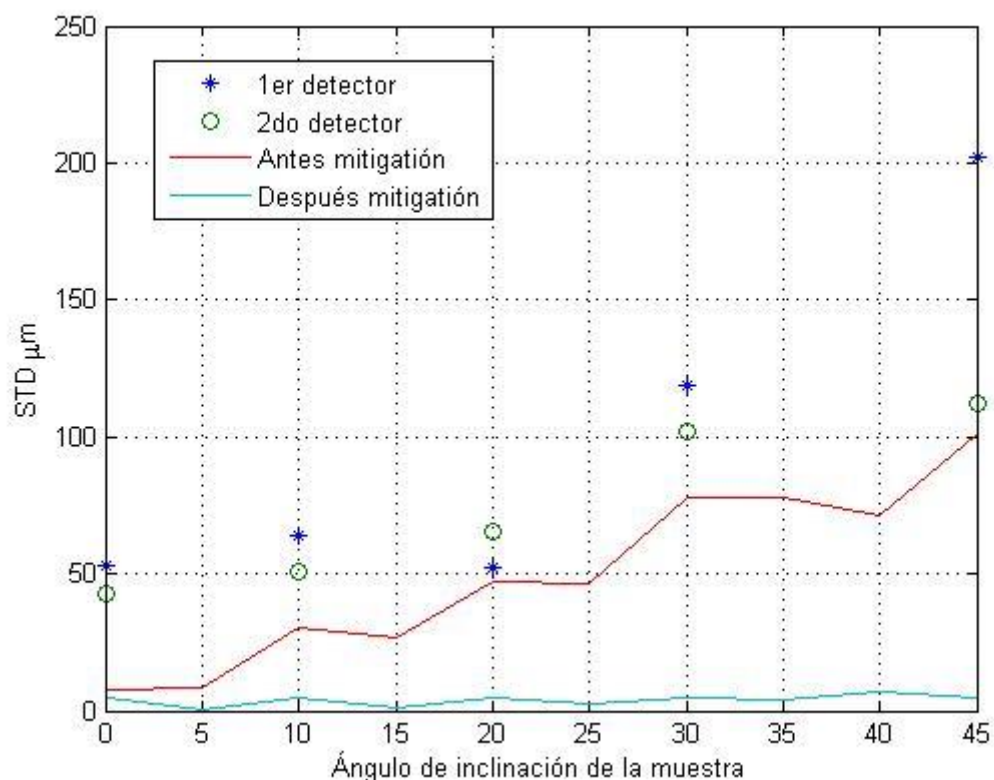


Fig. 18. Comparativa de STD obtenidas con diferentes detectores y valores simulados.

IV.3. MITIGACIÓN DEL EFECTO SPECKLE

Una vez comprobado el buen funcionamiento de los detectores y haciendo uso de la información obtenida a partir de los cuatro detectores instalados, se toman medidas de la distancia para diferentes ángulos de inclinación con el fin de realizar una corrección del efecto Speckle y obtener medidas de distancia con mayor precisión.

Grados	STD (μm)	STDcorregida(μm)
30	55,7	54,83
35	94,26	56,77
40	160,69	65,65
45	92,6	155,91

Tabla 3. STD para diferentes angulos de inclinacion antes de realizar la corrección de centroide y despues, haciendo uso de los 4 detectores

En la tabla 3 se muestran los valores de desviación estándar de medidas de distancias con los cuatro detectores; en la segunda y tercera columna se muestran las desviaciones estándar sin realizarse corrección y habiéndose corregido la distancia, respectivamente. Una representación grafica de estos mismos valores se muestra en Fig. 19, donde puede observarse un incremento de la desviación estándar para una inclinación de 45° en los datos corregidos, esto podría deberse a la baja relación señal a ruido producido por dos aspectos: En primer lugar debido a la inclinación de la muestra, la señal recibida tiene un bajo SNR; en segundo lugar debido a que el haz se hace interferir entre los cuatro detectores una porción del haz se pierde no siendo detectada por ninguno de los detectores, lo que hace que la señal sea menor si cabe.

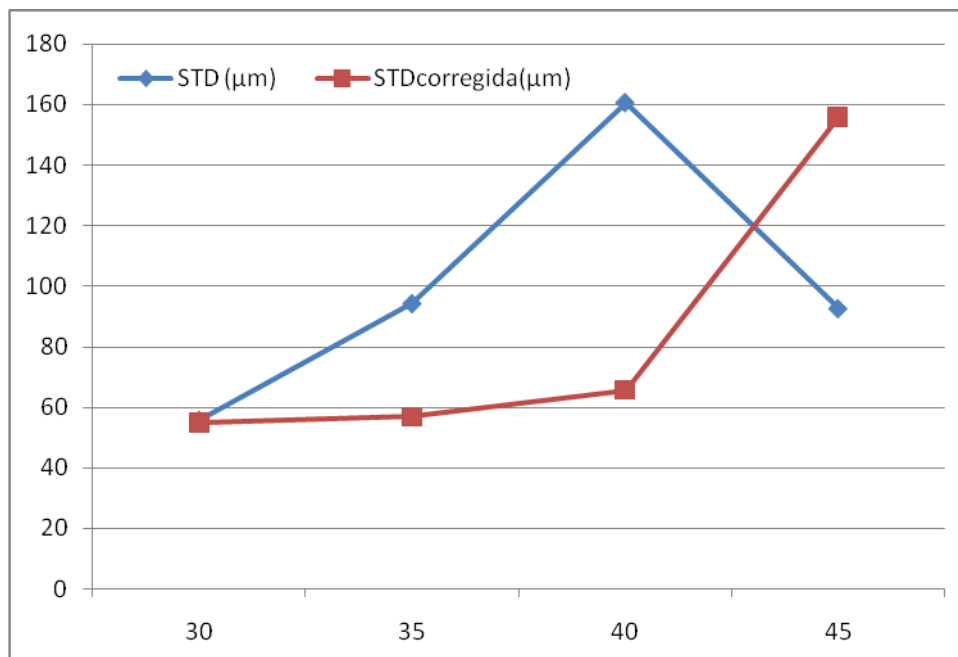


Fig. 19. STD para diferentes angulos de inclinación antes de realizar la corrección de Speckle (azul) y después (rojo), haciendo uso de los cuatro detectores.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Como conclusiones cabe destacar:

- La linealidad y buen comportamiento del sistema de medida ha sido comprobado, cabe mencionar la dependencia del comportamiento del equipo en función del valor de “*Rfoc*”.

El valor de entrada introducido para *Rfoc* es importante para obtener un buen comportamiento en el equipo, es por este motivo por el cual a lo largo del trabajo se ha utilizado un valor de *Rfoc* =5.5.

Tras los resultados obtenidos se puede observar que la linealidad de la medida depende del valor “*Rfoc*” introducido inicialmente, manteniéndose la linealidad del equipo para valores de “*Rfoc*” cercanos a la longitud medida; sin embargo, para valores de *Rfoc* lejanos a la longitud medida se pierde linealidad y aumenta el error de la medida.

- Por otro lado, se ha comprobado que la posición de la lente se mantiene dentro de los límites teóricos establecidos por la empresa.
- En relación con las simulaciones que muestran la distancia de enfoque (DOF-Depth Of Focus), o lo que es lo mismo, el desenfoque producido, cabe destacar que este desenfoque tiene dos impactos principales sobre la medida realizada:
 - La amplitud de interferencia decrece, menor eficiencia de interferencia
 - Mitigación Speckle es menos precisa cuando DOF es mayor.
- La linealidad y buen comportamiento del sistema con el set de detectores añadido ha sido comprobada.
- En cuanto a los resultados obtenidos tras realizar la mitigación del efecto Speckle, tal y como muestra la Fig. 19, se aprecia un incremento del error tras realizar la mitigación en muestras con una inclinación de 45° respecto al eje óptico. Este resultado puede ser debido a la baja relación señal a ruido debido a la reflexión producida por la muestra rugosa.

Como trabajo futuro:

- En referencia al valor de “*Rfoc*”, se pretende modificar dicho valor a lo largo de la medida haciendo uso de iteraciones, pues, tal y como muestra la Fig. 12 el

error obtenido en la medida de distancia es menor cuando dicho parámetro coincide con la medida de la distancia.

- Otra línea de trabajo futuro es modificar el set-up utilizado con el fin de utilizar más de una frecuencia, ya que hasta ahora solamente una ha sido utilizada.

REFERENCIAS

- [1] Y. Salvadé, A. Courteville and R. Dandliker, "*Absolute metrology for the Very Large Telescope Interferometer (VLTI)*," Proc. SPIE 4006, Interferometry in Optical Astronomy, 424 (2000). doi:10.1117/12.390235
- [2] Y. Salvadé, N. Schúler, S. Lévèque, R. Dandliker and S. Le Flock, "*High-accuracy absolute distance measurement using frequency comb referenced multi-wavelength source*," Appl. Opt. 47, 2715-2720 (2008)
- [3] Y. Salvadé, N. Schúler, S. Lévèque R. Dandliker and S. Le Flock, "*Absolute metrology for the very large telescope inteferometer*", ODIMAP V Conf. doi: 10.13140/RG.2.1.1095.2406
- [4] R. Dandliker and Y. Salvadé, "*Distance measurement by multiple-wavelength interferometry*", J. Opt. 29, 105-114 (1998)
- [5] R. Dandliker, K. Hug, J. Politch and E. Zimmermann, "*High accuracy distance measurement with multiple-wavelength interferometry*", Optical Engineering 34 N°8, 2407-2412 (1995)
- [6] E. Zimmermann, Y. Salvadé, and R. Dändliker, "*Stabilized three-wavelength source calibrated by electronic means for high-accuracy absolute distance measurement*," Opt. Lett. 21, 531-533 (1996)
- [7] N. Schuhler, Y. Salvadé, S. Lévèque, R. Dändliker and R. Holzwarth, "*Frequency-comb-referenced two-wavelength source for absolute distance measurement*," Opt. Lett. 31, 3101-3103 (2006)
- [8] Y. Salvadé and R. Dändliker, "*Limitations of interferometry due to the flicker noise of laser diodes*," J. Opt. Soc. Am. A 17, 927-932 (2000)
- [9] Salvadé Y., "*Distance Measurement by Multiple-Wavelength Interferometry*," Thesis, University of Neuchâtel (1999)
- [10] P. Hariharan, "*Optical interferometry*," Academic Press Ed. (2003)
- [11] H. Tiziani, "*Heterodyne interferometry using two wavelengths for dimensional measurements*," Proc. SPIE 1553, Laser Interferometry IV: Computer-Aided Interferometry, 490 (1992); doi:10.1117/12.135333.
- [12] A. Fercher, H. Hu, and U. Vry, "*Rough surface interferometry with a two-wavelength heterodyne speckle interferometer*," Appl. Opt. 24, 2181-2188 (1985)
- [13] R. Dandliker, R. Thalmann and D. Prongué, "*Two wavelength laser interferometry using super-heterodyne detection*," Opt. Lett. 14 N°5, 339 -341 (1988)
- [14] R. Dändliker, "*Heterodyne holographic interferometry*," Progress in optics, vol XVII, North-Holland (1980)
- [15] G. Zurita, "*Interferometrías heterodina y cuasi heterodina: ideas fundamentales*," Revista Mexicana de física. Vol.37 N°3,396-417. (1991)
- [16] A. F. Fercher and H. Z. Hu, "*Two-wavelength heterodyne interferometry*," Optoelectronics in Engineering, Proceedings of the 6th International Congress Laser 83, (1984).
- [17] Goodman, "*Some fundamental properties of speckle*," J. Opt., Vol 66, No 11, November 1976
- [18] R. Dändliker, M. Geiser, C. Giunti, S. Zatti, and G. Margheri, "*Improvement of speckle statistics in double-wavelength superheterodyne interferometry*," Appl. Opt. 34, 7197-7201 (1995)

- [19] G. Margheri, C. Giunti, S. Zatti, S. Manhart, and R. Maurer, "*Double-wavelength superheterodyne interferometer for absolute ranging with submillimeter resolution: results obtained with a demonstration model by use of rough and reflective targets*," Appl. Opt. 36, 6211-6216 (1997)
- [20] Rohner M. and Salvadé Y., "Method for speckle mitigation in a interferometric distance meter and corresponding distance meter," Patent WO2011073126 A1, Jun, 23, 2011.
- [21] U. Vry and A. F. Fercher, "*Higher-order statistical properties of speckle fields and their application to rough-surface interferometry*," J. Opt. Soc. Am. A 3, 988-1000 (1986)
- [22] M. Giglio and S. Musazzi "*Surface roughness measurements by means of speckle wavelength decorrelation*," Optics Communications, Vol 258 N°2, 166-170 (1979)
- [23] Pircher, M., Gotzinger, E., Leitgeb, R., Fercher, A.F. and Hitzenberger, C.K., "*Speckle reduction in optical coherence tomography by frequency compounding*". J. Biomed. Opt. 8, 565–569 (2003)
- [24] Z. Sodnik, E. Fischer, T. Ittner and H. J. Tiziani, "*Two-wavelength double heterodyne interferometry using a matched grating technique*," Appl. Opt. 30, 3139-3144 (1991)

ANEXO

En relación a la importancia de la focalización, una serie de figuras análogas a la figura 15 mostrada en la subsección III.5., donde se muestran las fluctuaciones de la medida, antes y después de realizar la mitigación del efecto Speckle, de la distancia del objeto en función de la distancia de focalización.

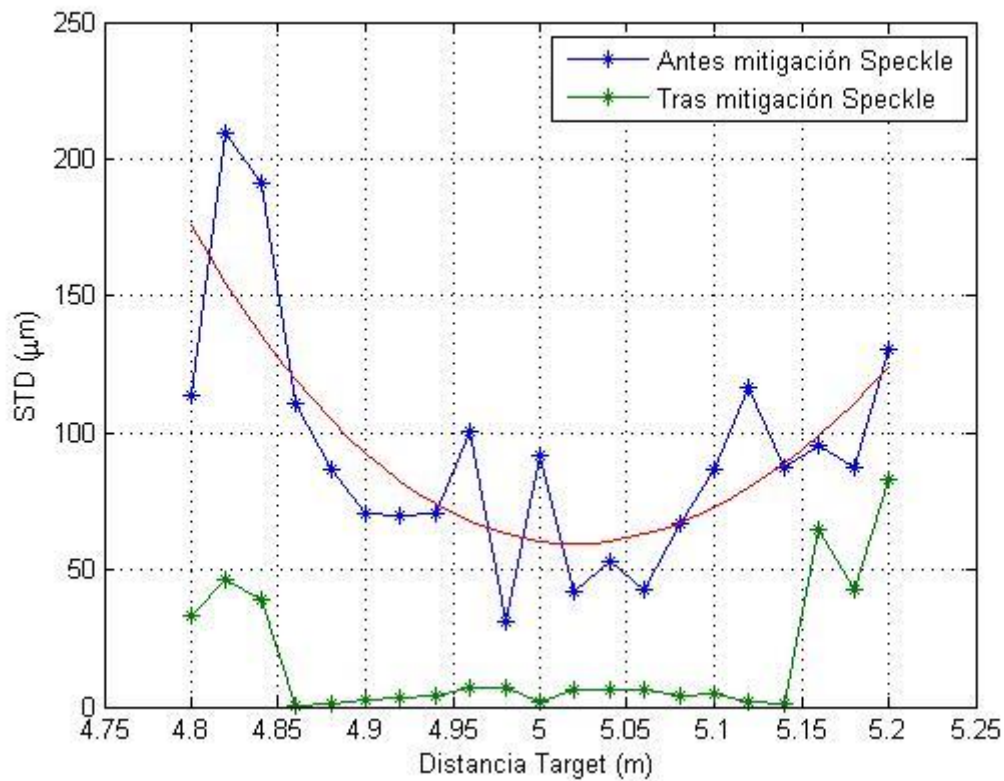


Fig. A1. Simulación de la desviación estándar en una muestra a 5m de distancia e inclinada 20° del eje óptico, antes de realizar la supresión del efecto speckle (azul) y después de realizar dicha mitigación (verde).

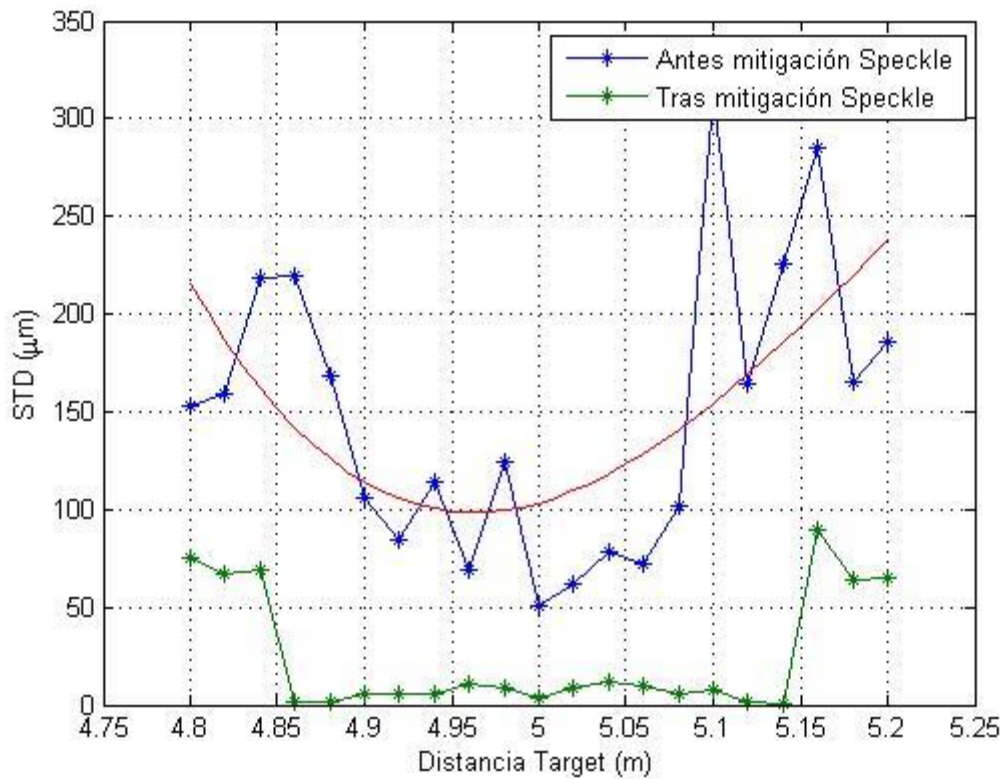


Fig. A2. Simulación de la desviación estándar en una muestra a 5m de distancia e inclinada 30° del eje optico, antes de realizar la supresión del efecto speckle (azul) y despues de realizar dicha mitigación (verde).

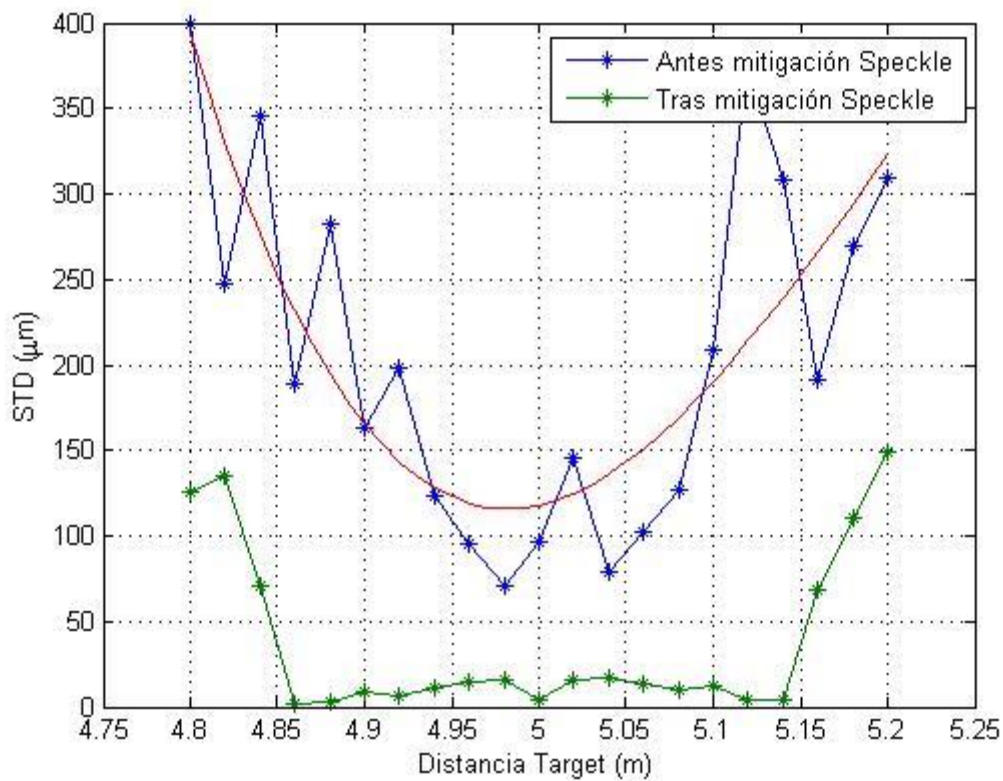


Fig. A3. Simulación de la desviación estándar en una muestra a 5m de distancia e inclinada 40° del eje optico, antes de realizar la supresión del efecto speckle (azul) y despues de realizar dicha mitigación (verde).

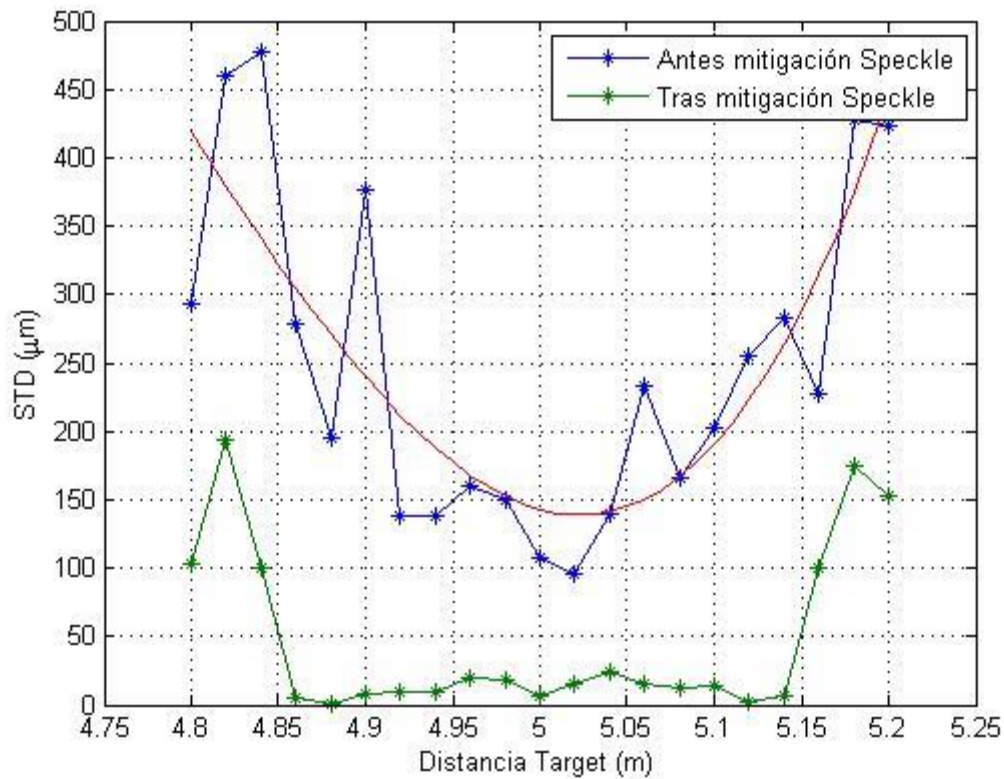


Fig. A4. Simulación de la desviación estándar en una muestra a 5m de distancia e inclinada 45° del eje óptico, antes de realizar la supresión del efecto speckle (azul) y después de realizar dicha mitigación (verde).

Inclinación (°)	STD con Speckle (μm)	STD mitigado(μm)
0	5,591805	4,414828
5	14,07925	6,013392
10	31,31213	6,320966
15	43,95195	5,522541
20	35,29823	6,891256
25	52,17158	4,811355
30	58,98292	6,289437
35	71,7962	5,774129
40	66,4664	7,635209
45	106,0594	10,9448

Tabla A1. Valores estimados de la desviación estándar en una muestra a 5m de distancia a diferentes ángulos de inclinación del eje óptico, antes y después de realizar la mitigación del efecto Speckle.