



## UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y  
Sistemas

Programa: Control de procesos, electrónica industrial e ingeniería eléctrica

### **Reconstrucción de perfiles submicrométricos con Holografía Conoscópica para la medición de rugosidad**

Autor: Jorge Marina Juárez

Directores: Ignacio Álvarez García y Jose María Enguita González

Dedico esta tesis a mis peques,  
Simón y Arantxa y a María que me  
ha apoyado incondicionalmente para  
llevar este trabajo a buen puerto

A la memoria de César, un gran  
amigo y mejor persona

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Marco general de la tesis . . . . .	2
1.2. Motivaciones para la medición de las características de una superficie . . . . .	3
1.3. Objetivo de la tesis . . . . .	4
1.4. Estado actual de la Holografía Conoscópica . . . . .	5
1.4.1. Aplicaciones con sensores puntuales de Holografía Conoscópica . . . . .	5
1.4.2. Aplicaciones con sensores lineales de Holografía Conoscópica . . . . .	8
1.5. Desarrollo de la tesis . . . . .	13
<b>2. MEDICIÓN DE RUGOSIDAD Y ONDULACIÓN</b>	<b>15</b>
2.1. Regulación para la medida de rugosidad y ondulación . . . . .	15
2.1.1. Norma UNE-EN ISO 3274 . . . . .	16
2.1.2. UNE-EN ISO 4287 . . . . .	16
2.1.3. UNE-EN ISO 4288 . . . . .	17
2.1.4. UNE-EN ISO 11562 . . . . .	17
2.1.5. UNE-EN ISO 12085 . . . . .	17
2.1.6. VDI/VDE 2655 . . . . .	17
2.2. Definiciones . . . . .	17
2.3. Parámetros para la definición del estado superficial . . . . .	22
2.3.1. Parámetros de amplitud . . . . .	22
2.3.2. Parámetros de espaciamento . . . . .	25
2.3.3. Parámetros híbridos . . . . .	25
2.3.4. Curvas y parámetros asociados . . . . .	25
2.4. Sistemas de medición de rugosidad con contacto . . . . .	26
2.4.1. Sistemas basados en palpador . . . . .	26
2.5. Sistemas de medición de rugosidad sin contacto . . . . .	27
2.5.1. Sistema basado en iluminación de la superficie . . . . .	29
2.5.2. Triangulación láser con microscopio . . . . .	30
2.5.3. Medición a través del patrón Speckle . . . . .	31
2.5.4. Interferometría de desplazamiento de fase . . . . .	32
2.5.5. Interferometría con luz blanca . . . . .	34
2.5.6. SORM: Superfast Optical Roughness Measurement . . . . .	38
2.5.7. Medición Confocal . . . . .	39
2.5.8. Elipsometría . . . . .	39
2.6. Resumen de las técnicas de medición de rugosidad . . . . .	40
2.7. Conclusiones . . . . .	40

<b>3. LA HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA</b>	<b>43</b>
3.1. Holografía . . . . .	43
3.1.1. Holografía clásica . . . . .	43
3.1.2. Holografía conoscópica . . . . .	44
3.2. Holografía Conoscópica lineal . . . . .	52
3.3. El uso de la fase para la medición de distancias . . . . .	53
3.3.1. Extracción de la fase a partir de un holograma . . . . .	53
3.3.2. Medición de la calidad del holograma . . . . .	54
3.3.3. La imagen de luminosidad a partir de un holograma . . . . .	54
3.4. El uso de la Holografía Conoscópica para la medición de rugosidad . . . . .	54
3.5. Holograma de un perfil . . . . .	57
3.5.1. Cálculo de la fase en un punto distinto del primer pixel de la señal . . . . .	60
3.5.2. Filtrado de los hologramas . . . . .	65
3.5.3. Grados de libertad en el diseño de un sensor de Holografía Co- noscópica . . . . .	65
3.6. Conclusiones . . . . .	66
<b>4. CONFIGURACIÓN DEL SENSOR</b>	<b>69</b>
4.0.1. Configuraciones posibles del sensor . . . . .	70
4.1. Medición de distancias utilizando la fase . . . . .	71
4.2. Rama de iluminación . . . . .	73
4.2.1. La coherencia de las ondas electromagnéticas . . . . .	75
4.2.2. El ruido Speckle . . . . .	77
4.2.3. Soluciones existentes para la reducción del ruido Speckle . . . . .	79
4.2.4. Solución propuesta para la reducción del ruido Speckle . . . . .	81
4.2.5. Difusores . . . . .	84
4.2.6. Uso de luz no coherente . . . . .	86
4.2.7. Mejora del punto láser . . . . .	91
4.3. Generación de una línea láser con reducción de ruido Speckle . . . . .	92
4.4. El diseño del láser y la generación de la línea . . . . .	93
4.5. La generación de holograma . . . . .	94
4.6. Conclusiones . . . . .	98
<b>5. ENSAYOS</b>	<b>99</b>
5.1. Diseño de los experimentos . . . . .	99
5.1.1. Ángulo óptimo de triangulación . . . . .	100
5.1.2. Ensayo de resolución . . . . .	102
5.1.3. Ensayo de profundidad de campo . . . . .	105
5.1.4. Ensayo de tolerancia en el ángulo de la superficie . . . . .	105
5.2. Resultados . . . . .	106
5.2.1. Resolución . . . . .	107
5.2.2. Estabilidad de las medidas . . . . .	114
5.2.3. Profundidad de campo . . . . .	118
5.2.4. Comparación de configuraciones de cristal uniaxial, cilindro y lente de enfoque . . . . .	120
5.2.5. Otros ensayos . . . . .	122
5.3. Configuración óptima . . . . .	124
5.4. Mediciones de rugosidad . . . . .	125
5.5. Conclusiones . . . . .	126



*ÍNDICE GENERAL*

III

<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>129</b>
6.1. Configuración del sensor . . . . .	130
6.2. Láser . . . . .	130
6.3. Conoscopio . . . . .	131
6.4. Procesamiento . . . . .	132
6.5. Aportaciones de la tesis . . . . .	132
6.6. Comentarios finales . . . . .	132
<b>7. TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>135</b>

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

En la industria los controles de calidad cada día son más rigurosos e importantes, con lo que cada día es más demandado un control del 100 % de la producción, no solo de las características dimensionales y la detección de existencia de defectos, tanto superficiales como internos de los productos manufacturados, sino de la calidad de acabado superficial. En este último punto se enmarca la medición de rugosidad y ondulación (*Roughness* y *Waviness*) de las superficies como un parámetros que definen su calidad.

Se define la rugosidad [1] como el conjunto de irregularidades de la superficie real, definidas convencionalmente en una sección donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados. La rugosidad corresponde a irregularidades provocadas por la herramienta o elemento utilizado en su proceso de producción, corte, arranque de viruta y a la fatiga superficial, mientras que la ondulación resulta de la flexión de la pieza durante el maquinado, la falta de homogeneidad del material, liberación de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamientos térmicos y vibraciones, entre otros.

Una pieza perfecta es una abstracción matemática la cual, adicionalmente a las irregularidades microgeométricas, contiene irregularidades macrogeométricas que son errores de forma asociados con la variación de tamaño de la pieza, paralelismo entre superficies, planitud, conicidad, redondez y cilindricidad.

Estas características influyen de manera determinante en el acabado y comportamiento mecánico de los productos [2] o en su posterior procesamiento. En ocasiones es necesario que la superficie presente una rugosidad baja como por ejemplo en la chapa para las carrocerías de los automóviles, en este caso es importante mantener estos parámetros controlados dentro de unos límites ya que el aspecto visual después del pintado dependerá de ellos. Del mismo modo en la piezas que funcionan con deslizamiento, como en el caso de los cilindros y pistones de motores de combustión interna, es muy importante mantener controlados los parámetros de rugosidad para poder limitar el desgaste debido al rozamiento y que el sistema de lubricación resulte efectivo, evitando gripamientos. En otras ocasiones la rugosidad ha de presentar un valor mayor, por ejemplo para aumentar la fricción entre dos superficies, como en el caso de un cilindro de arrastre en un tren de laminación, que ha de presentar un valor suficientemente elevado de rugosidad que evite el deslizamiento con la banda que está siendo

laminada pero no demasiado elevado como para introducir marcas y deformaciones.

Los parámetros para la medición de rugosidad y ondulación se definen dentro del estándar ISO, así como las características de los instrumentos y los procedimientos para realizar las correspondientes medidas. Los instrumentos descritos en estas normas implican contacto para realizar la medición, esto resulta un problema para realizar un control en línea de la totalidad de la producción puesto que al tratarse de sensores que implican contacto la velocidad de inspección es limitada y se deben evitar colisiones y vibraciones en la superficie en estudio, es decir exigen unas condiciones de funcionamiento muy controladas para obtener medidas fiables y evitar el deterioro de los sensores. Por este motivo surge la necesidad del desarrollo de sensores que no impliquen contacto ya que, a priori, su velocidad de exploración puede ser mucho más elevada y prácticamente desaparece el riesgo de colisiones, además de resultar más inmunes a las vibraciones cuando la obtención del perfil se hace de una sola vez y no con un escaneo puntual. En la presente tesis se propone el desarrollo de un sensor basado en Holografía Conoscópica para la reconstrucción de perfiles submicrométricos a partir de los cuales se pueden calcular todos los parámetros que caracterizan el estado de una superficie.

## 1.1. Marco general de la tesis

El grupo de Inspección Automática On-Line de Productos Industriales de la Universidad de Oviedo, en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Oviedo, tiene una amplia experiencia investigadora en el campo de la Holografía Conoscópica. Fruto de esta investigación son las tesis de los Drs. Ignacio Álvarez García [3], José María Enguita González [4], Yolanda Fernández Fernández [5] y María Frade Rodríguez [6]. Hasta el momento casi todo el trabajo, en este campo, ha sido dirigido en el área de las mediciones macroscópicas, para la detección de defectos, pero tras estudiar las necesidades existentes en la industria se comenzó la investigación con el fin de desarrollar sensores basados en esta tecnología que permitieran aumentar la resolución de medida sabiendo que sería necesario reducir la distancia y rango de trabajo, permitiendo de esta forma la medición y detección de defectos a nivel microscópico.

Esta tecnología ha sido desarrollada por Optimet Optical Metrology principalmente para aplicaciones de medición puntual, en las que es necesario el desplazamiento del sensor o el espécimen para obtener un perfil de distancias. Esta configuración no es aceptable en un entorno industrial, en la que es necesaria la obtención de perfiles en una sola adquisición para evitar el efecto de movimientos y vibraciones. En el campo de los sensores perfilométricos de Holografía Conoscópica, se dispone de unidades para obtención de medidas a mayor distancia (800-1200 mm) con mucha menor resolución que la requerida.

El objetivo principal de esta tesis es la investigación y desarrollo de un sensor para la medición de rugosidad que supere las limitaciones de los existentes en la actualidad, esto significa que se tratará de un sensor con las siguientes características:

- Sin contacto.
- Que trabaje a una distancia de trabajo que se pueda considerar como segura para un entorno industrial, más adelante se matizará esta característica.

## 1.2. MOTIVACIONES PARA LA MEDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UNA SUPERFICIE<sup>3</sup>

- Con una profundidad de campo suficiente que permita al sensor trabajar cuando se producen pequeñas variaciones de distancia.
- Y con el que además se pueda obtener el perfil de medición completo en una única adquisición de forma que el sensor resulte inmune a las vibraciones, al contrario de lo que ocurriría si se tratase de un sensor puntual.

Se deberán establecer en este trabajo los parámetros que influyen en el diseño de un sensor de Holografía Conoscópica para la medición de rugosidad así como determinar los factores que influyen en la resolución y precisión que puede obtenerse con esta tecnología. Se analizarán a su vez los algoritmos de procesamiento utilizados en la actualidad con el fin de verificar o en su caso adaptar su uso para esta aplicación. Finalmente construirá un prototipo de laboratorio que permita obtener resultados similares a los obtenidos por los equipos de medición de rugosidad utilizados en la actualidad en la industria.

Aunque la presente tesis se presenta en el tiempo más tarde que la desarrollada por la Dra. María Frade [6], es conveniente remarcar que la mayor parte del desarrollo de la presente es anterior a [6], en cuya investigación se utilizaron muchos de los resultados aquí presentados.

### **1.2. Motivaciones para la medición de las características de una superficie**

Debido al creciente aumento en las necesidades de controles de calidad en los entornos industriales, con el fin de mejorar los procesos productivos, disminuyendo costes de fabricación y ofreciendo al cliente un producto de mejor calidad y más competitivo, es necesario el desarrollo de nuevas técnicas y sensores para llevar a cabo dichos controles de calidad.

Hasta hace algún tiempo los controles de calidad se hacían de forma estadística tomando muestras aleatorias de la producción y llevando a cabo sobre ellas las correspondientes mediciones e inspecciones. Esto era debido a que estos procesos de verificación solían ser lentos y tediosos con lo cual intentar llevar a cabo una inspección de la totalidad de la producción era una tarea imposible de realizar sin que influyese en la velocidad del proceso productivo con el consiguiente impacto económico.

Este problema está presente, principalmente, en los métodos de inspección que requieren un contacto entre el elemento medidor y la muestra que está siendo estudiada puesto que la aproximación del elemento sensor ha de realizarse de forma relativamente lenta para evitar colisiones que lo deterioren además de que, para realizar medidas elevadas de resolución, es necesario que no existan vibraciones, cosa que en un proceso real es prácticamente imposible de conseguir. Este es el caso, por ejemplo, de los equipos de medida de rugosidad y ondulación utilizados en la industria. Estos equipos, habitualmente, utilizan una cabeza palpadora, comúnmente conocida como *Stylus*, que recorre la superficie en estudio. El proceso es relativamente lento ya que en primer lugar debe realizarse una aproximación del sensor a la superficie y aplicar una fuerza controlada y limitada, puesto que si se aplicasen fuerzas mayores se podría modificar

la superficie o estropear el palpador y si se aplicase un fuerza muy pequeña podrían pasar desapercibidos los defectos más pequeños, en cualquiera de los dos casos las medidas serían incorrectas; una vez establecido el contacto, la muestra o el sensor, deben desplazarse el uno respecto del otro, lo que limita la velocidad para evitar que inercias en los movimientos puedan realizar un filtrado paso bajo de la superficie explorada. Como se puede inferir este proceso es inviable si se pretende incorporar a una línea de producción como puede ser un tren de laminación de chapa donde se pueden alcanzar velocidades de proceso por encima de 200m/min.

Con la aparición de los métodos de medida sin contacto, como los ultrasonidos, la visión artificial o algunas técnicas interferométricas las limitaciones de velocidad citadas antes desaparecen con lo que se puede realizar una inspección completa de la producción. En el caso de la medición de rugosidad existen numerosas alternativas basadas en tecnologías sin contacto, muchas de estas tecnologías están aún en fase de laboratorio, otras están implementadas en sensores comerciales. A pesar de todo, estos sensores no son utilizados de forma masiva en la industria debido a diversos motivos, por un lado algunas de estas tecnologías no realizan una reconstrucción topográfica de la superficie y hacen, en cambio, una estimación de algunos de los parámetros de rugosidad. Esto es, en muchas ocasiones, poco operativo ya que para definir de forma correcta y precisa el acabado superficial de un objeto es necesario medir diversos parámetros que en general no son cubiertos en su totalidad por estas soluciones. Otras tecnologías sí realizan una reconstrucción a nivel microscópico de la superficie permitiendo realizar el cálculo de todos los parámetros para establecer una caracterización completa del acabado superficial, este tipo de sensores hace uso, en general, de lentes de microscopio o sensores que implican unas distancias de trabajo y unos rango de trabajo muy reducidos. Esto es un inconveniente en una industria en la que existen vibraciones y elevadas tolerancias en la posición del producto con lo que muchas veces la superficie se encuentra fuera del rango de trabajo del sensor e incluso se producen colisiones entre el espécimen y el sensor lo que complica su instalación haciendo necesario el uso de sensores adicionales que detecten la posición relativa entre sensor y superficie para actuar retirando el primero en el caso de que la distancia entre ambos se reduzca demasiado. Adicionalmente en este tipo de sensores la medición y resultados es muy dependiente de la superficie, esto implica que es necesario realizar una calibración y ajuste cuando se cambia de tipo de superficie.

### 1.3. Objetivo de la tesis

Es objetivo fundamental de esta tesis la investigación y desarrollo de un sensor perfilométrico basado en Holografía conoscópica capaz de obtener perfiles de distancias submicrométricos con mejores características que los existentes en cuanto a:

- precisión, actualmente los sensores comerciales de Holografía Conoscópica alcanzan una resolución de  $1\mu m$ .
- profundidad de campo, en un proceso industrial no siempre es posible asegurar una posición precisa del target a inspeccionar.
- distancia de trabajo, es importante mantener una distancia de seguridad entre el sensor y la superficie para evitar colisiones.

- independencia del tipo de superficie.

Para conseguir el objetivo fundamental es necesario alcanzar diversos objetivos parciales que resolverán varios problemas presentes en los sensores actuales:

- Diseño de la mejor configuración óptica
- Reducción del ruido Speckle provocado por la iluminación láser.
- Mejora de los algoritmos de procesamiento.
- Desarrollo de herramientas de ajuste.
- Realización de ensayos sobre especímenes reales.
- Selección del sensor de imagen adecuado para las velocidades y tiempos de exposición requeridos.

## 1.4. Estado actual de la Holografía Conoscópica

En la actualidad existen varias configuraciones de sensores basados en Holografía Conoscópica sin embargo, como se verá a continuación, ninguna de estas configuraciones cumple las características necesarias para la adquisición de perfiles con resolución submicrométrica. A continuación se expondrán algunos ejemplos de aplicación de estos sensores que comprenden las diferentes configuraciones existentes.

### 1.4.1. Aplicaciones con sensores puntuales de Holografía Conoscópica

En este apartado se muestran algunas aplicaciones desarrolladas con sensores puntuales de Holografía Conoscópica, estos sensores pueden alcanzar resoluciones mejores  $1\mu m$ .

**Mediciones sobre engranajes** En este proyecto se realiza la reconstrucción de perfiles de revolución para la realización de medidas, en concreto en la fabricación de cubos sincronizadores para cajas de cambios de automóviles. Las tolerancias de fabricación de este tipo de elementos son muy reducidas,  $16\mu m$  en este caso, con lo cual es necesario realizar una reconstrucción suficientemente precisa del perfil lo que implica un control de giro que elimine las excentricidades y una medición muy precisa que proporcione una precisión mejor que  $1\mu m$ . En este equipo [7], desarrollado por la Universidad de Ovideo, se utilizó un sensor comercial de Holografía Conoscópica SmartConoprobe de Optimet <sup>1</sup> que cumple las características requeridas. En la *figura 1.1* se muestra un perfil reconstruido de este tipo de piezas.

El sensor utilizado puede alcanzar resoluciones aplicables a la medición submicrométrica de forma que permita la caracterización del acabado superficial de una muestra; sin embargo presenta dos inconvenientes que desaconsejan su uso:

- Se trata de sensores puntuales, esto implica que la reconstrucción de la superficie solo se podría realizar con un barrido en dos dimensiones.

<sup>1</sup>Optimet Optical Metrology Ltd, <http://www.optimet.com>

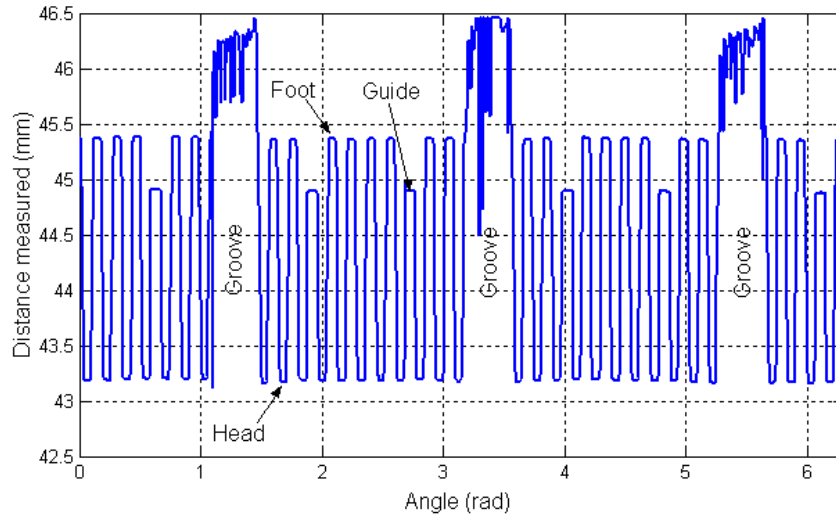


Figura 1.1: Reconstrucción del perfil de revolución de un engranaje sincronizador de una caja de cambios de automóvil.

- Estos sensores tienen un comportamiento pobre cuando la superficie no está en movimiento debido a la aparición de ruido Speckle, explicado en 4.2.2.

Mientras que por ejemplo en la medición de rugosidad es necesario que el perfil tomado esté estático o cuasiestático para evitar la integración de la superficie debida al movimiento, lo que actuaría como un filtro paso bajos de los detalles topográficos de la superficie, o en su defecto la adquisición de un perfil completo en el mismo instante. Puesto que en un proceso productivo esto no será posible por el propio flujo del proceso, será necesario emplear tiempos de exposición suficientemente bajos en el sensor de forma que no se distorsione el perfil de la superficie reconstruido. Los sensores actuales no tienen una característica de sensibilidad suficiente que permita disminuir este tiempo de exposición.

Este proyecto ha sido modificado posteriormente para la realización de medidas de Rollen, en la industria del automóvil estas medidas se realizan insertando dos bolas de tamaño conocido y calibrado en dos valles y midiendo la cuerda que las une. La *figura 1.2* ilustra el concepto de medición de Rollen, en este caso 2 Rollen.

Puesto que se obtiene un conjunto de puntos del perfil de revolución, es posible realizar una reconstrucción del perfil del diente, que en este caso es una curva “Evolvente” y calcular los puntos de tangencia de una bola virtual con los flancos que conforman el valle. En la *figura 1.3* se muestra la reconstrucción de los flancos del valle.

El sistema tiene una repetibilidad mejor que  $10\mu m$  y puede realizar una medición cada 3 segundos por lo que está instalado en el proceso para el control de la producción.

**Reconstrucción de piezas dentales** La Holografía Conoscópica es ampliamente utilizada para la reconstrucción de piezas dentales con la finalidad de realizar prótesis. Optimet dispone de equipos preparados para la reconstrucción automática de piezas dentales en formato CAD para la posterior fabricación de implantes.

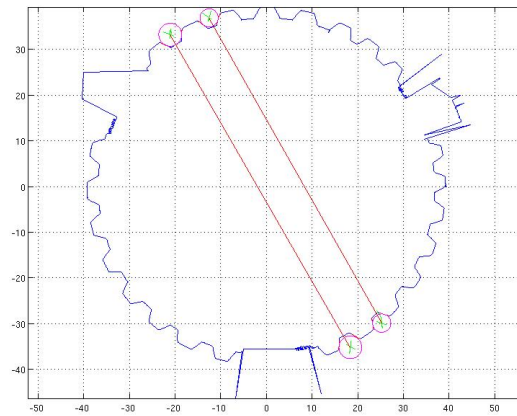


Figura 1.2: Medida de dos Rollen en un engranaje.

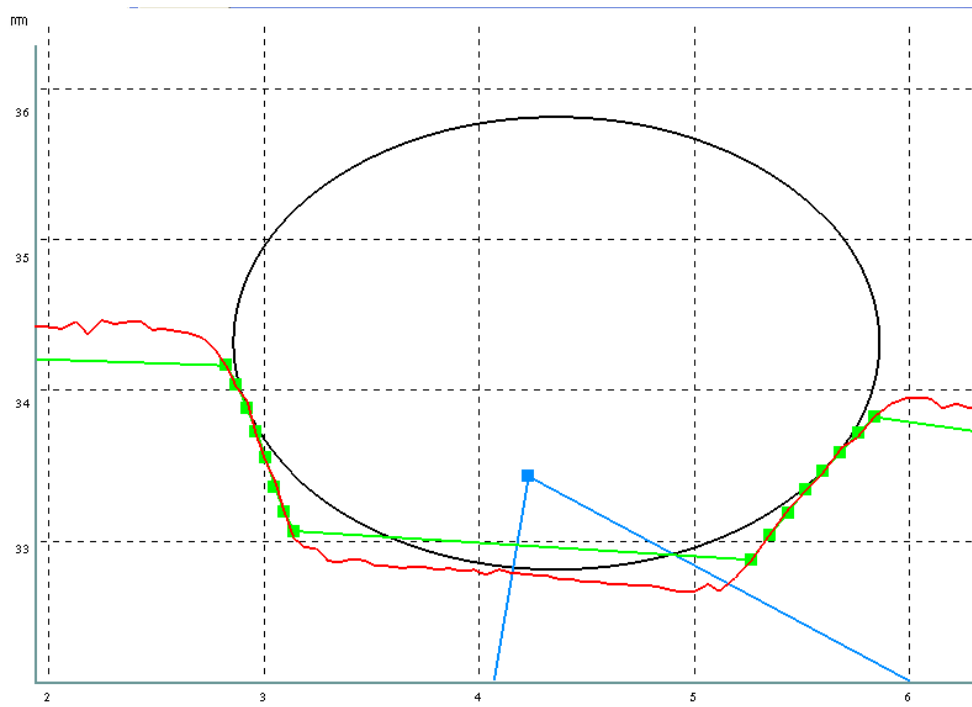
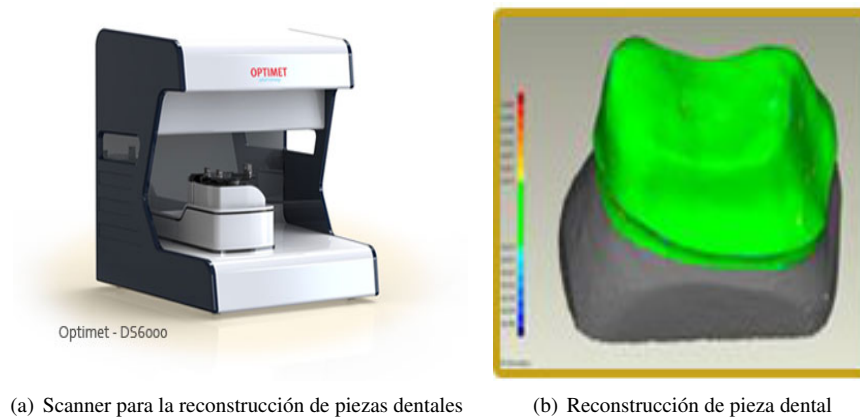


Figura 1.3: Cálculo del apoyo de una bola para la medición del Rollen.





(a) Scanner para la reconstrucción de piezas dentales

(b) Reconstrucción de pieza dental

Figura 1.4: Equipo y reconstrucción de una pieza dental

Este tipo de equipos es adecuado para estas aplicaciones puesto que presentan una elevada precisión y tienen una velocidad muy superior a la que se puede obtener con las máquinas de medición de coordenadas (CMM).

**Reconstrucción de las superficies de órganos** Se han realizado también trabajos para la reconstrucción de superficies de materiales blandos como los órganos de los animales o humanos, [8], con el fin de obtener más información sobre el estado del tejido antes de realizar una intervención. El trabajo de la Holografía Conoscópica sobre este tipo de superficies presenta sus propias particularidades puesto que los tejidos son porosos y la reflexión del haz es difusa. En la *figura 1.5* se muestra el esquema de funcionamiento utilizado para el estudio. El sensor de Holografía Conoscópica lleva unas marcas que son seguidas en todo momento por un par estereo para conocer la posición y orientación del sensor y por tanto poder referir los puntos de distancia adquiridos a un sistema de coordenadas conocido.

#### 1.4.2. Aplicaciones con sensores lineales de Holografía Conoscópica

**Detección de defectos en desbastes a la salida de la máquina de colada continua**  
El sistema Surfin, desarrollado inicialmente como un prototipo por la Universidad de Oviedo y Arcelor Mittal [9] [10] [11] [12] y posteriormente industrializado por la Universidad de Oviedo y la empresa Desarrollo Soluciones Integrales Plus S.L., se encuentra instalado a la salida de la máquina de colada continua en la acería LDA de Arcelor Mittal en Avilés, Asturias, está equipado con 12 sensores lineales de Holografía Conoscópica para la inspección de las caras superior e inferior en la producción de desbastes, estos sensores están configurados para funcionar a una distancia de trabajo de 1150mm, presentan una profundidad de campo de 80mm y una resolución de 0.2mm inspeccionando perfiles de superficie de 300mm en el sentido transversal del desbaste. El entorno de funcionamiento es muy adverso puesto que la superficie a inspeccionar se encuentra a una temperatura superior a 800°C. Con esta tecnología se realiza una reconstrucción suficientemente precisa de la superficie lo que permite analizar la presencia de grietas y distinguirlas de otro tipo de irregularidades como las formaciones

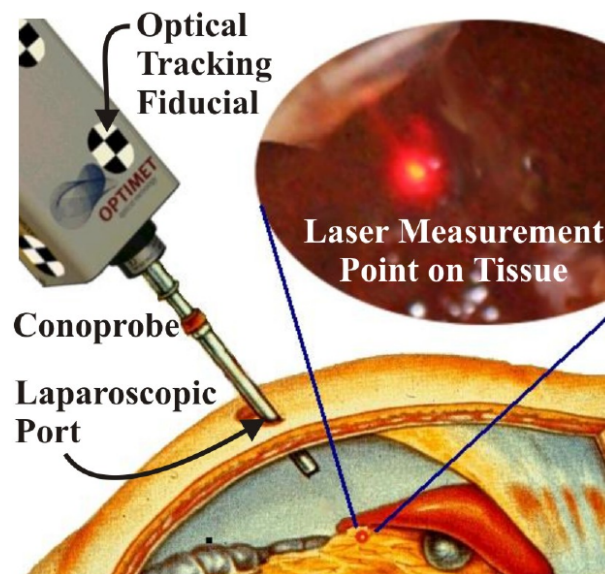
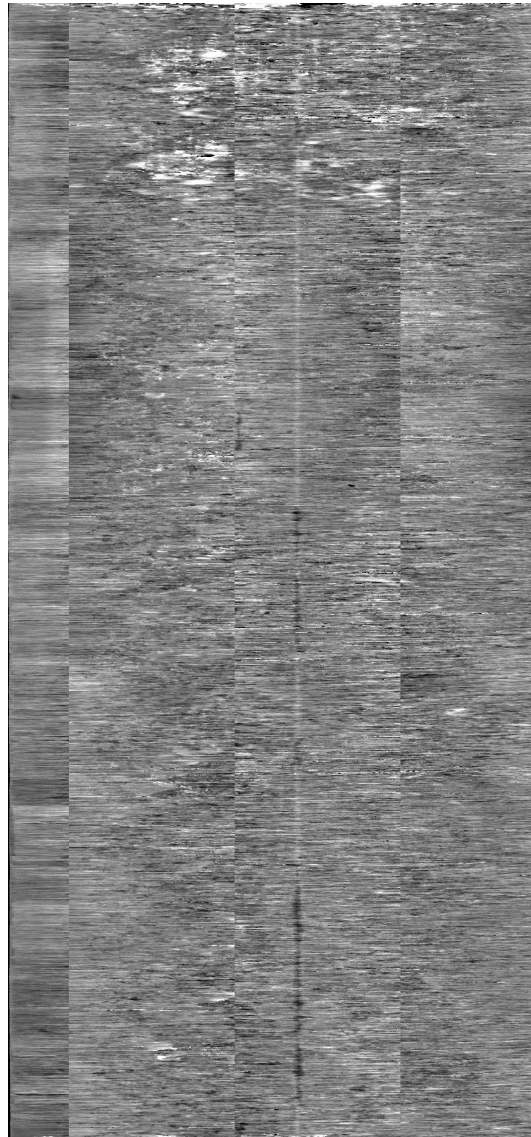


Figura 1.5: Reconstrucción de la superficie de un tejido vivo utilizando un sensor de Holografía Conoscópica.

de cascarilla, marcas de oscilación, etc. En la *figura 1.6(a)* se muestra la superficie reconstruida de un desbaste, la distancia se codifica según una escala de grises, para mostrarla al usuario, donde el blanco representa las zonas más cercanas y el negro las más alejadas. El centro de la imagen del ejemplo muestra una grieta longitudinal. En la *figura 1.6(b)* se muestra la superficie del mismo desbaste obtenida con una cámara lineal convencional, en esta imagen se ven, además de la grieta, diversas marcas que no son defectos y que dificultan el análisis automático de las imágenes.

**Reconstrucción de piezas mecanizadas para la verificación de resolución** La *figura 1.7* muestra el perfil de una pieza de calibración mecanizada compuesta por varios surcos con profundidades: 0.05mm, 0.1mm, 0.2mm y 0.5mm la imagen muestra un solo perfil, en rojo, el promedio de 10 perfiles, en azul y el promedio de 40 perfiles, en verde, la adquisición se realizó en movimiento con un sensor configurado para trabajar a una distancia de 800mm, con una profundidad de campo de 50mm, una resolución mejor que 0.05mm y una apertura de 80mm. Se puede comprobar que el sensor es capaz de distinguir perfectamente distancias inferiores a 0.05mm a una distancia de 800mm lo que hace suponer que disminuyendo la distancia se podrán conseguir mejores resoluciones que lo hagan adecuado para la medición de rugosidad.

El mismo sensor se ha utilizado para medir otros patrones mecanizados, *figura 1.8* con el fin de verificar la resolución que es posible alcanzar a una distancia de trabajo de 800mm, en este caso se ha realizado una exploración de la superficie, la *figura ??* muestra los resultados obtenidos en una aplicación de visualización y análisis desarrollada sobre Matlab en la que la ventana superior izquierda muestra la imagen de SNR (que indica la calidad de la señal obtenida), la ventana superior derecha muestra el mapa de distancias y la ventana inferior derecha muestra un perfil, la media de 10 perfiles y la media de 40 perfiles. Se puede ver que no hay una variación significativa del ruido al realizar el promediado, esto es debido a que la adquisición se realizó en



(a) Reconstrucción de la superficie con sensores de Holografía Conoscópica



(b) Imagen obtenida con una cámara lineal

Figura 1.6: Mapa de distancias de un desbaste reconstruido con un conjunto de sensores de Holografía Conoscópica e imagen convencional del mismo desbaste obtenido con una cámara lineal



Figura 1.7: Perfil de un patrón de calibración mecanizado con surcos con profundidades 0.05mm, 0.1mm, 0.2mm y 0.5mm; la imagen muestra un solo perfil, el promedio de 10 perfiles y el promedio de 40 perfiles. La adquisición se realizó en movimiento y a una distancia de 800mm.

movimiento y por tanto el ruido Speckle tiende a anularse como se verá posteriormente. Tanto en la superficie como en los perfiles se ha eliminado la curvatura propia de la pieza para que se puedan apreciar con mayor mejor los detalles.

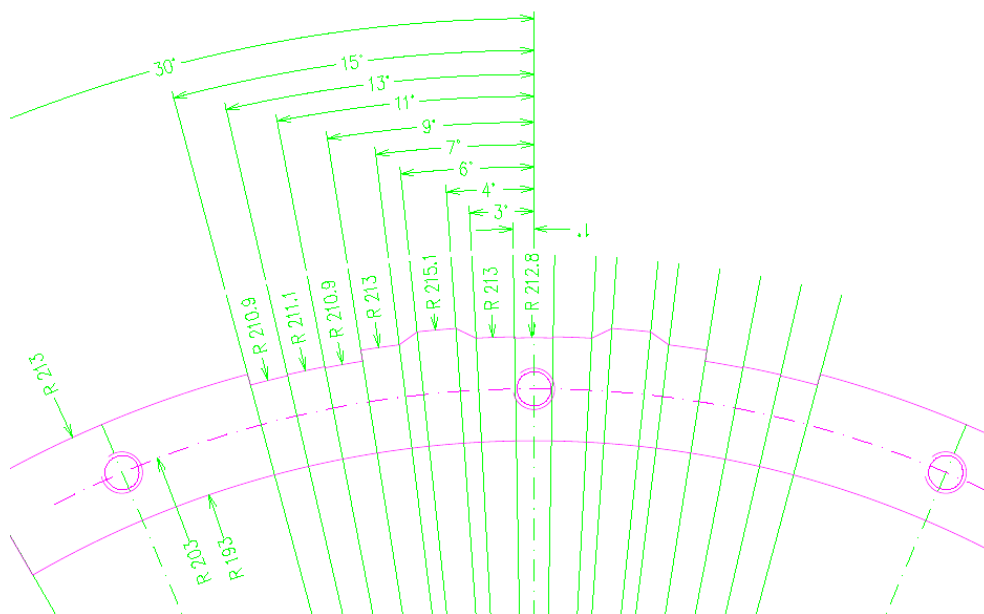


Figura 1.8: Patrón de calibración y verificación mecanizado.

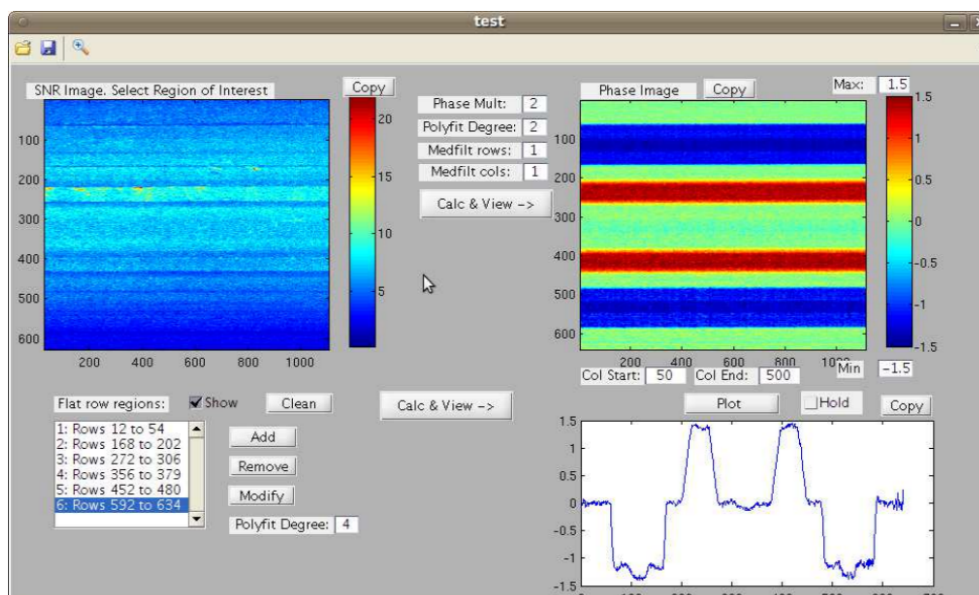


Figura 1.9: Resultados de la exploración del patrón correspondiente al radio de 172mm.

**Detección de defectos de laminación en la producción de tubos sin costura** Durante el proceso de laminación de tubos sin costura, *figura 1.10*, producidos mediante el método Mannesmann [13], se pueden producir desalineamientos en los rodillos de laminación que generan deformaciones y marcas longitudinales en los tubos.

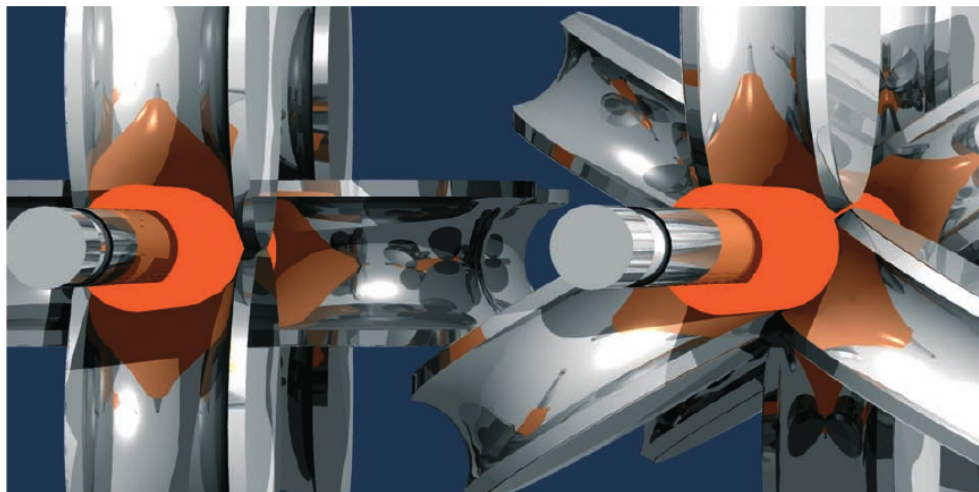


Figura 1.10: Representación de un laminador de tubos sin costura con 3 rodillos de laminación en cada caja. Si los rodillos no están perfectamente alineados se pueden introducir deformaciones y marcas continuas en los tubos.

En la *figura 1.11* se muestra la imagen de SNR, superficie y un perfil de un tubo sin



defecto, aproximadamente en el pixel 250 del perfil es donde ocurre el encuentro de 2 rodillos de laminación.

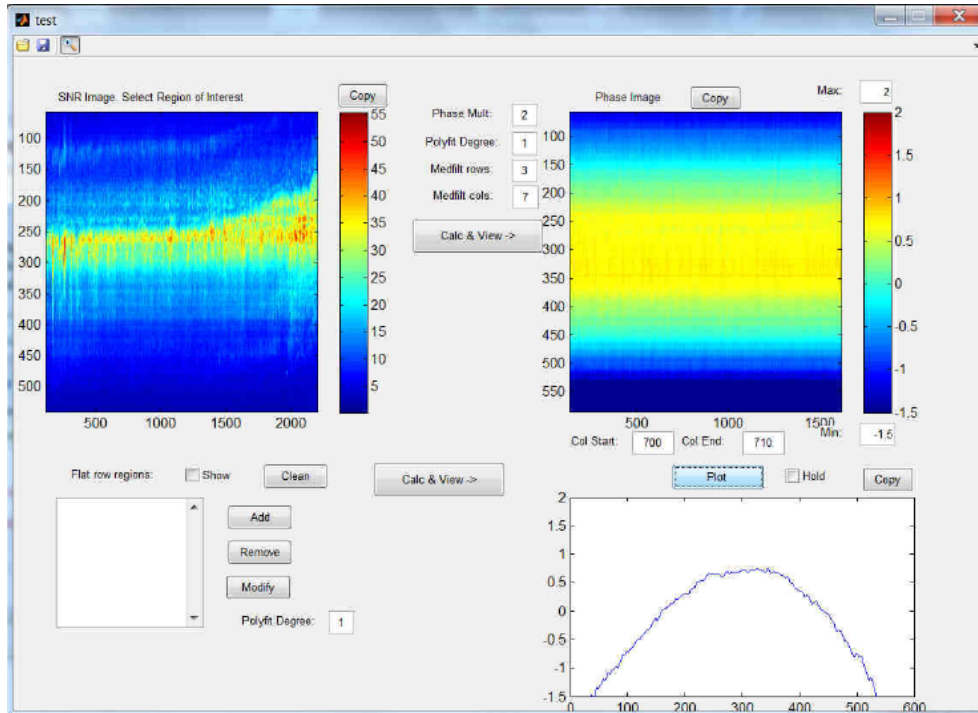


Figura 1.11: Tubo de control sin defecto.

6 En la *figura 1.12* se muestra la imagen de SNR, superficie y un perfil de un tubo con defecto producido durante el proceso de laminación y debido a un desalineamiento de los cilindros de laminación. El defecto se puede apreciar claramente en el perfil del tubo en el pixel 250.

## 1.5. Desarrollo de la tesis

Se introducen en este punto la estructura de los temas que van a ser tratados en los siguientes capítulos:

- En el *Capítulo 2* se introducen los conceptos relativos a la medición de rugosidad, los diferentes parámetros que identifican una superficie así como las técnicas existentes en la actualidad. Esto ayudará a comprender la situación actual en cuanto a medición de rugosidad, las limitaciones existentes con las tecnologías utilizadas y las características buscadas en el sensor desarrollado en este trabajo.
- En el *Capítulo 3* se explica la tecnología seleccionada para el desarrollo del sensor, la Holografía Conoscópica. Se realiza una explicación matemática del principio físico sobre el que se basa esta tecnología, inicialmente para una configuración puntual para luego extenderlo a una configuración lineal para obtener un perfil completo en cada adquisición. Tras esto se explicarán los algoritmos que permiten realizar el cálculo de la distancia y los marcadores utilizados para

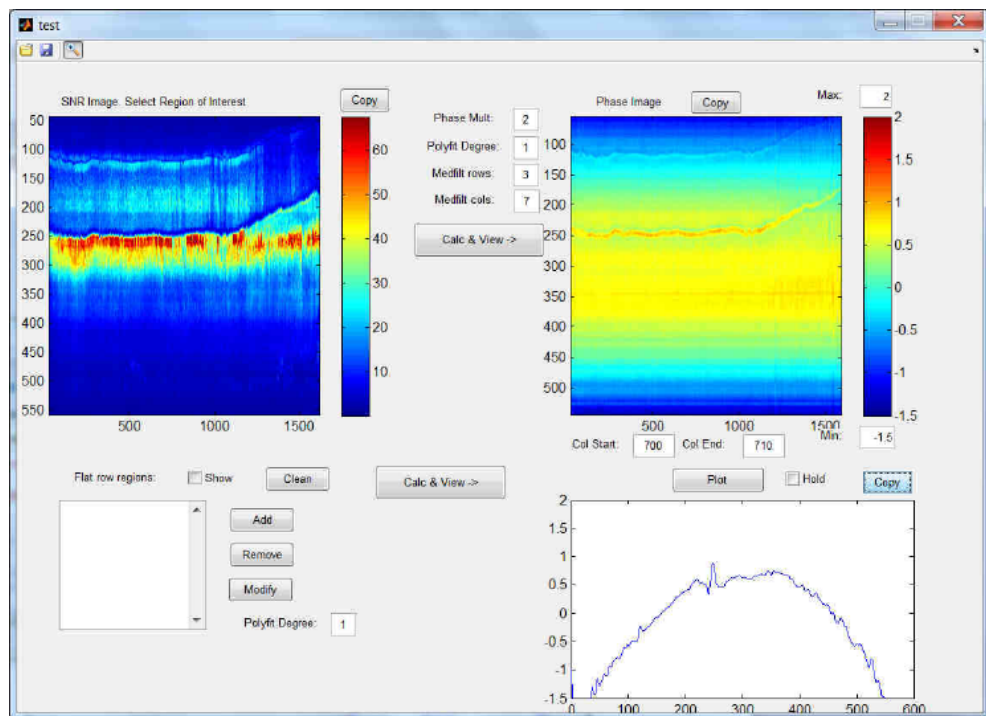


Figura 1.12: Tubo de control con defecto.

medir la calidad de la señal, también se propondrán mejoras en estos algoritmos para mejorar el procesamiento de la señal y por tanto obtener mejor resolución.

- En el *Capítulo 4* se estudiarán las posibles configuraciones de los elementos ópticos del sensor con el fin de obtener la más adecuada para cumplir los requerimientos de resolución, profundidad de campo y distancia de trabajo. En este capítulo se estudiarán también los métodos de reducción de Ruido Speckle y la configuración óptica del láser para obtener una línea homogénea.
- En el *Capítulo 5* se somete el sensor diseñado y construido según el capítulo anterior a diferentes ensayos para verificar que las mediciones obtenidas cumplen los requerimientos fijados en los primeros capítulos. Estos ensayos comprenden mediciones de calidad de señal, supresión de Ruido Speckle, profundidad de campo y resolución.
- Por último en el *Capítulo 6* se hace un repaso de los avances obtenidos y las aportaciones hechas en este trabajo y se proponen las líneas de investigación que se abren para mejorar las características del sensor y los algoritmos de procesamiento.

## Capítulo 2

# MEDICIÓN DE RUGOSIDAD Y ONDULACIÓN

Este capítulo contiene una introducción a la normativa para la medición de rugosidad y ondulación, así como el estado del arte de los sistemas de medición de rugosidad y ondulación existentes de forma comercial o en fase de investigación y desarrollo. Se verá como existen múltiples sistemas de medición sin contacto para medición de unos pocos parámetros de rugosidad y ondulación, pero estas medidas se hacen de forma estimativa puesto que, en la mayoría de los casos, no se realiza una reconstrucción de la superficie en estudio.

Como se comentó durante la introducción, la medición de los parámetros de rugosidad y ondulación es una tarea muy importante dentro de la industria, debido a esto existe una completa regulación internacional en cuanto a las características de los sensores que se deben utilizar, los procedimientos de medida y los algoritmos para calcular los parámetros correspondientes; esto permite definir sin confusión las necesidades de los clientes y uniformizar los controles de calidad para unificar criterios, tanto en el proveedor como en el cliente.

Estas normas están basadas en medidores con contacto, esto es debido a que es la tecnología más experimentada y la más implantada en la industria, por esta razón al desarrollar un nuevo tipo de sensor deberán observarse, en la medida de lo posible, estas normas a pesar de que no siempre tienen una correspondencia unívoca con las características del sensor que se está estudiando.

### 2.1. Regulación para la medida de rugosidad y ondulación

Las normas de referencia internacionales que regulan la medición de rugosidad y ondulación son las definidas por la *Organización Internacional para la Estandarización (ISO)*<sup>1</sup>. El método más comúnmente utilizado es el *Método del perfil* que consiste en la adquisición de un perfil de la superficie a nivel submicrométrico, a continuación

---

<sup>1</sup><http://www.iso.org/iso>



este perfil es filtrado para separar sus componentes de alta y baja frecuencia, obteniendo dos nuevos perfiles; el primero, alta frecuencia, se utilizará para obtener los parámetros de rugosidad y el segundo, componentes de baja frecuencia, se procesará para obtener los parámetros de ondulación. Sobre estos perfiles filtrados se aplicarán los algoritmos para el cálculo de los parámetros que definen el estado de la superficie. Estos perfiles son adquiridos a lo largo de una longitud de muestreo que está definida y establecida en las normas que se verán más abajo.

Estas normas van dirigidas a sistemas de adquisición de perfiles submicrométricos con contacto para la caracterización de la superficie; esto es así porque los equipos de inspección con contacto son los más extendidos y utilizados en la industria. Esto introduce algunas dificultades en la validación de sistemas sin contacto puesto que algunas de las características no son directamente aplicables; es por ello que es necesario diseñar ensayos que permitan establecer una equivalencia entre los resultados obtenidos con un equipo con contacto y el sistema sin contacto. Por ejemplo, y como se verá más adelante, las normas hacen referencia al diámetro de la bola del palpador utilizado en el perfilómetro. Este diámetro determinará el tamaño mínimo lateral de detalle que es posible medir, en el caso de los sistemas sin contacto este concepto no es aplicable directamente, aunque sí será necesario determinar el diámetro del punto láser en los equipos que lo utilicen y que determinará el tamaño mínimo de detalles que es posible discriminar.

A continuación se hará una breve introducción a las principales normas que han de ser tenidas en cuenta en el momento de diseñar un equipo de medición de rugosidad y ondulación y, también, durante el diseño de los ensayos de medición. Contienen, por tanto, toda la información necesaria para uniformizar los equipos utilizados y la forma de realizar los ensayos.

### **2.1.1. Norma UNE-EN ISO 3274**

Esta norma especifica los diferentes perfiles que se han de capturar y generar para el estudio de la rugosidad y ondulación, así como las características que deben cumplir de los instrumentos por el método de contacto utilizados para adquirir estos perfiles. El instrumento proporciona un perfil en "bruto" que será necesario filtrar para realizar los estudios correspondientes. La norma define las longitudes de onda y la forma de los filtros a utilizar para extraer dos nuevos perfiles, uno que será destinado para la medición de rugosidad, utilizando un filtro pasa altos que deja pasar las altas frecuencias; y otro que será destinado a la medición de ondulación, utilizando un filtro paso bajos. La norma también define las longitudes de recorrido para la obtención de los anteriores perfiles, así como la separación entre muestras, o frecuencia de adquisición. También quedan definidos los rangos de fuerza que debe ejercer el elemento palpador sobre la superficie con objeto de acotar las deformaciones sobre ambos elementos debido al contacto. La norma recoge las dimensiones del elemento captador.

### **2.1.2. UNE-EN ISO 4287**

Esta norma recoge los términos, definiciones y parámetros para la determinación del estado superficial mediante el método del perfil. La norma especifica las características que han de cumplir los perfiles utilizados para la extracción de los parámetros

que definen el estado superficial, así como la forma en que deben ser calculados dichos perfiles, aplicando los filtros definidos en la norma anterior. En cuanto a los parámetros que definen el estado superficial se encuentran los parámetros básicos de rugosidad y ondulación incluyendo las expresiones matemáticas y los algoritmos que deben ser utilizados para el cálculo.

### 2.1.3. UNE-EN ISO 4288

En esta norma se definen los procedimientos y las reglas para realizar la comparación de los valores de los parámetros obtenidos, definidos en las normas ISO 4287, ISO 12085, ISO 13565-2 e ISO 13565-3. Asimismo define las longitudes de onda de corte de los filtros que deben ser utilizados para la obtención de los perfiles de rugosidad y ondulación partiendo del perfil original.

### 2.1.4. UNE-EN ISO 11562

Esta norma recoge las características metrológicas de los filtros corregidos en fase, que deben ser utilizados para la obtención de los perfiles de rugosidad y ondulación. Estos filtros están descritos como una función de ponderación que corresponde a la función de densidad de probabilidad gaussiana. También se especifican, en esta norma, los límites de error para este tipo de filtros corregidos en fase.

### 2.1.5. UNE-EN ISO 12085

En esta norma se recogen los términos y parámetros que se deben utilizar para describir el estado de una superficie por el método de los *detalles*. Este método focaliza su atención en el análisis de las particularidades y detalles de la superficie. Mientras que las normas descritas más arriba realizaban un estudio global de la superficie, utilizando valores medios y parámetros estadísticos, en este método se identifican los detalles presentes en la superficie. La norma define los algoritmos que deben ser utilizados para identificar y cuantificar dichos detalles.

### 2.1.6. VDI/VDE 2655

En esta norma se recogen los procedimientos para la calibración y configuración de los microscopios confocales para la medición de la rugosidad. Aunque estos procedimientos no son directamente aplicables a otros equipos distintos de los microscopios confocales, se trata de un documento a tener en cuenta para la validación del sensor basado en Holografía Conoscópica. Esta validación debería ser la base para la homologación del equipo a nivel industrial y la aceptación de las medidas entre clientes y proveedores.

## 2.2. Definiciones

Algunas definiciones utilizadas en las normas y que se refieren a los tamaños de las muestras son:

- **Superficie de referencia** es la superficie a partir de la cual se determinan los parámetros de rugosidad. Tiene la forma de la superficie geométrica. Se puede calcular por el método de mínimos cuadrados.

- **Perfil real** es la intersección de la superficie real con un plano normal. En la *figura 2.1* se muestra el concepto de obtención de un perfil real.  
directorio de documentos.

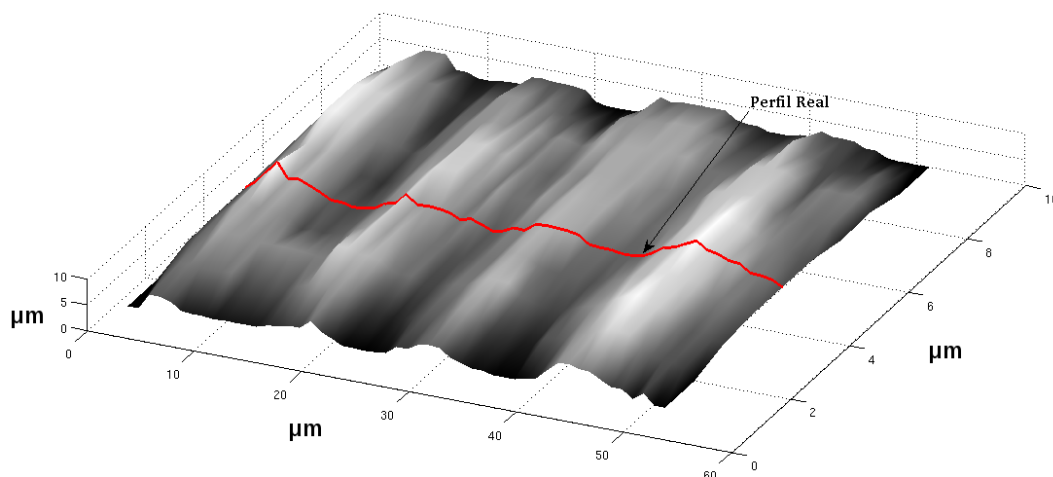


Figura 2.1: Esquema representativo para la obtención de un perfil real a partir del cual se determinan el resto de perfiles utilizados para calcular los parámetros que caracteriza una superficie.

- **Longitud básica** es la longitud de la línea de referencia utilizada para separar las irregularidades que forman la rugosidad superficial.
- **Longitud de evaluación** es la longitud utilizada para determinar los valores de los parámetros de rugosidad superficial; puede comprender una o varias longitudes básicas. En la *figura 2.2* se muestra un esquema del significado de este perfil. Los rugosímetros comerciales suelen tener un rango entre 0.25 y 4 mm.
- **Longitud de muestreo** es la longitud en la dirección del eje X, utilizada para identificar las irregularidades que caracterizan al perfil en evaluación. Los rugosímetros comerciales suelen tener un rango entre 0.75 y 4.5 mm.
- **Filtro paso altos**, para la extracción de los detalles de medición, que se verán más adelante, se aplican filtros paso altos que eliminan la ondulación presente en la superficie. Los valores típicos de estos filtros son de 0.25, 0.8 y 2.5mm dependiendo del valor de rugosidad de la superficie, cuanto mayor es la longitud de corte del filtro mayores serán los valores de rugosidad medidos.
- **Línea media de los mínimos cuadrados** es la línea de referencia cuya forma es la del perfil geométrico. Divide el perfil de modo que, en el interior de la longitud básica, la suma de los cuadrados de las desviaciones a partir de esta línea es mínima, *figura 2.3*.
- **Línea media aritmética (o línea central)** es la línea de referencia con la forma del perfil geométrico, paralela a la dirección general del perfil en el interior de

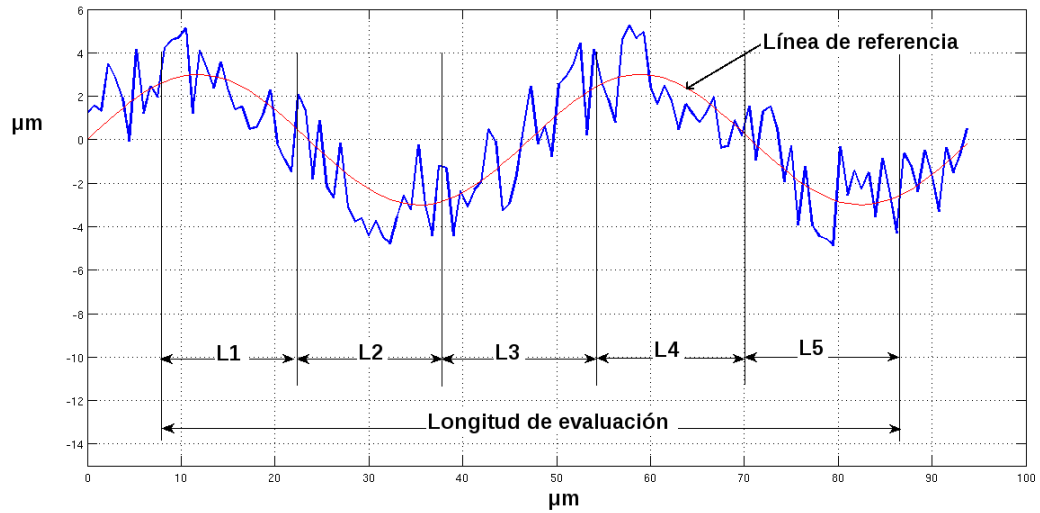


Figura 2.2: Esquema representativo de la longitud de evaluación, para la determinación de los parámetros de rugosidad, en función de las longitudes básicas (L1, L2, L3, L4 y L5). Longitud de evaluación = L1+L2+L3+L4+L5

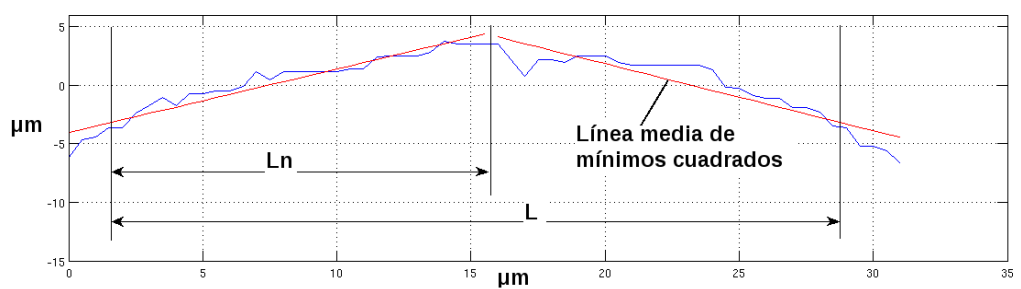


Figura 2.3: Esquema representativo para el cálculo de la línea media de mínimos cuadrados. Se calculan las longitudes básicas y para cada una de ellas se calcula la recta que ajusta los puntos por el método de mínimos cuadrados, esto dará información sobre la tendencia de la superficie.

la longitud básica. Divide el perfil de modo que la suma de áreas comprendidas entre ella y el perfil es igual en la parte superior e inferior, *figura 2.4*.

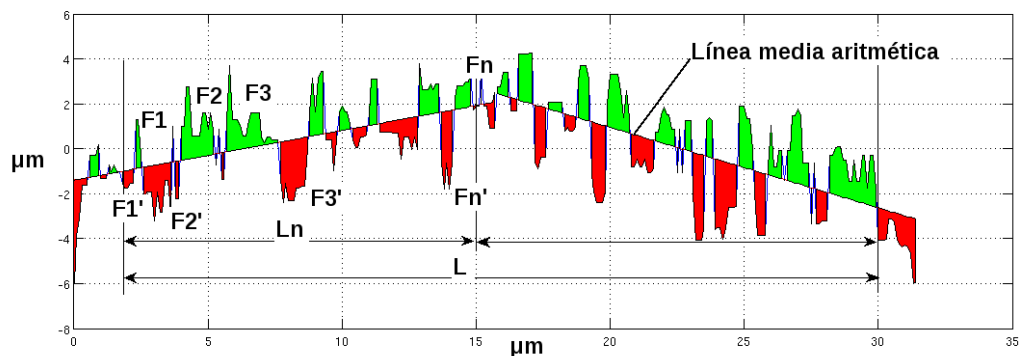


Figura 2.4: Esquema representativo para el cálculo de la línea media aritmética. La línea media aritmética se calcula de tal forma que  $\sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n F'_i$

- **Cresta local del perfil** es la parte del perfil comprendida entre dos mínimos adyacentes del perfil, *figura 2.5*.

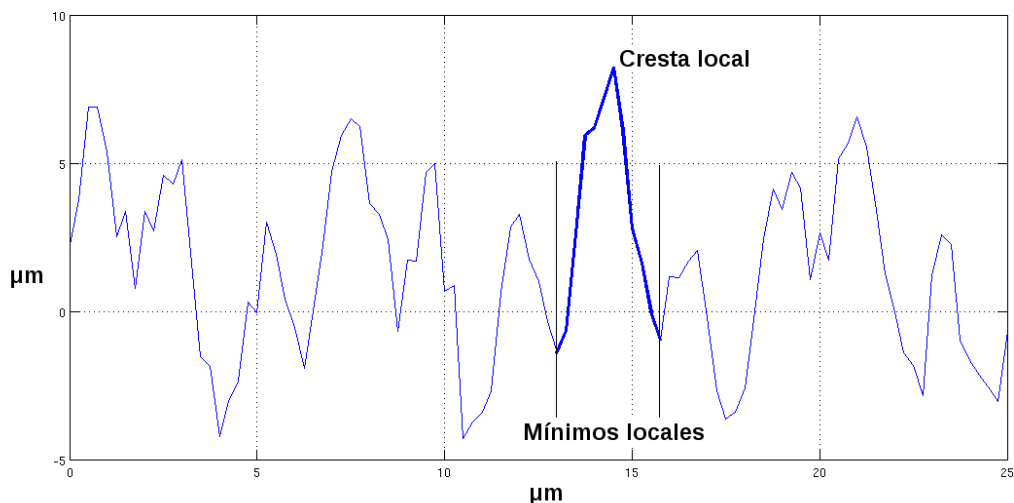


Figura 2.5: Ejemplo de cresta local de un perfil.

- **Valle local del perfil** es la parte del perfil comprendida entre dos máximos adyacentes del perfil, *figura 2.6*.
- **Cresta del perfil** es la parte del perfil dirigida hacia el exterior del cuerpo uniendo dos intersecciones consecutivas del perfil con la línea media, *figura 2.7*.
- **Valle del perfil** es la parte del perfil dirigida hacia el interior del cuerpo uniendo dos intersecciones consecutivas del perfil con la línea media, *figura 2.8*.

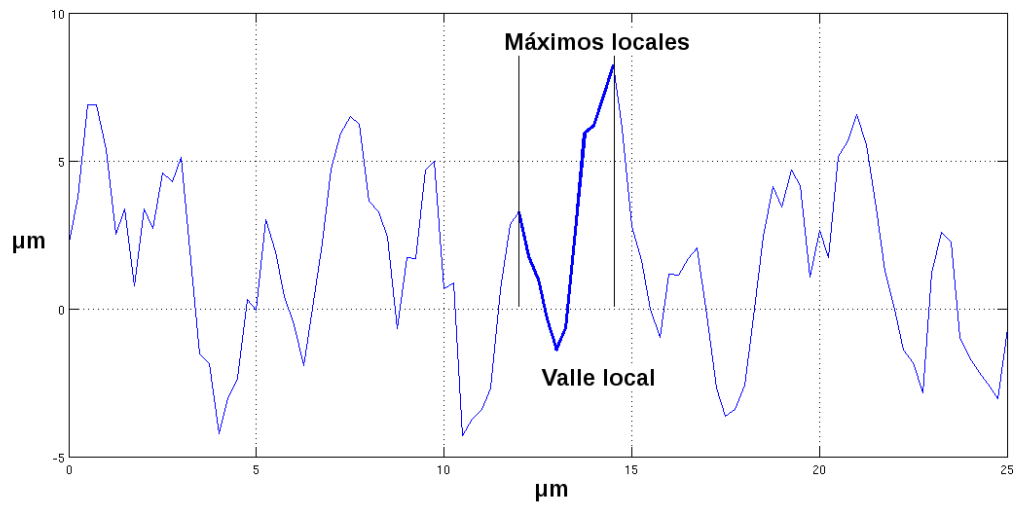


Figura 2.6: Ejemplo de valle local de un perfil.

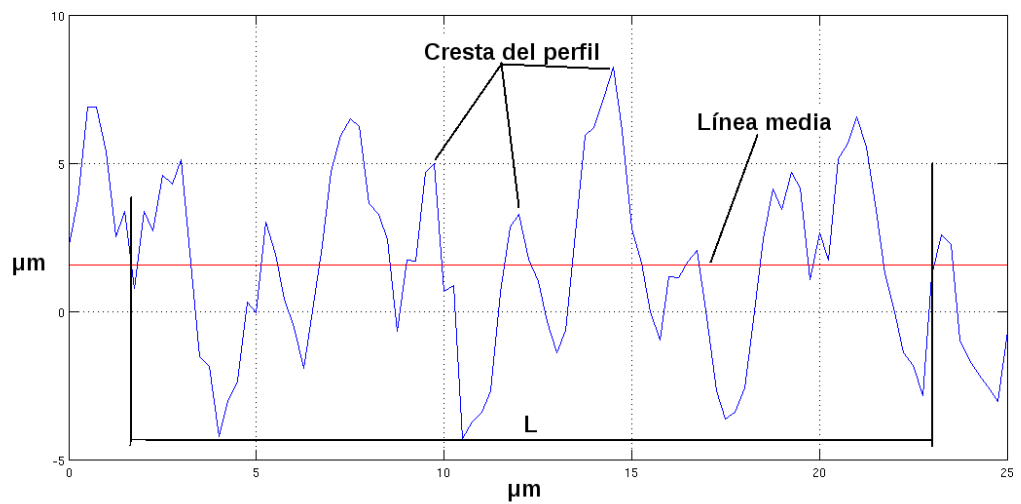


Figura 2.7: Ejemplo de cresta de un perfil.

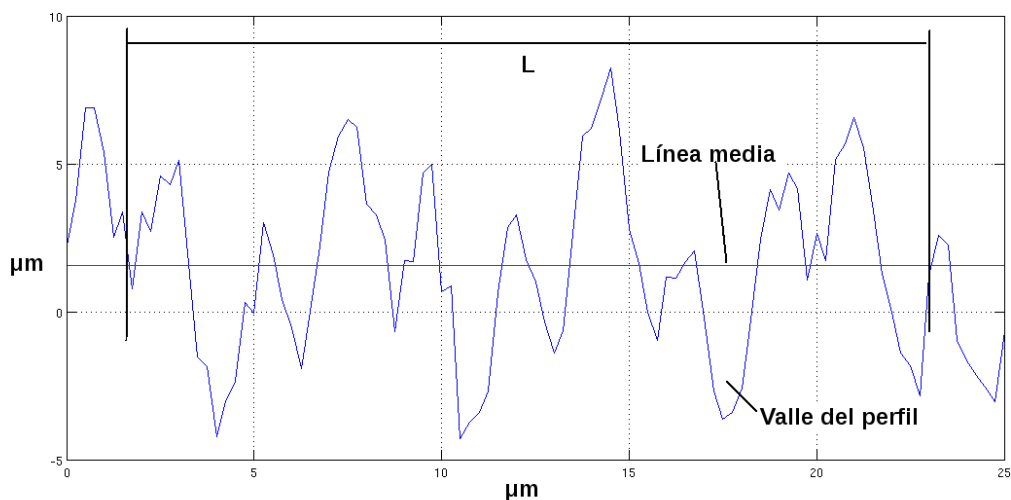


Figura 2.8: Ejemplo de valle de un perfil.

### 2.3. Parámetros para la definición del estado superficial

Como se vió durante la descripción de la norma *UNE-EN ISO 4287*, esta recoge las expresiones matemáticas y los algoritmos que deben ser utilizados para caracterizar una superficie por el método del perfil. Los parámetros se clasifican en 4 grupos en función del tipo de característica que representan.

En cada definición de un parámetros se indican tres abreviaturas para dicho parámetros, la primera letra de estas abreviaturas puede ser:

- **P**: indica que el parámetro está medido sobre el perfil primario
- **R**: indica que el parámetro está medido sobre el perfil de rugosidad
- **W**: indica que el parámetro está medido sobre el perfil de ondulación(Waviness)

Cuando se indica un parámetros cuya abreviatura comienza por **Z** se refiere al conjunto de puntos que forman el perfil.

#### 2.3.1. Parámetros de amplitud

En este conjunto de parámetros se recogen los valores de amplitud de diferentes características:

- **Máxima altura del pico del perfil** ( $P_p$ ,  $R_p$ ,  $W_p$ ): este parámetro indica la mayor de las alturas ( $Z_p$ ) de los picos de los perfiles: primario( $P_p$ ), de rugosidad( $R_p$ ) y de ondulación( $W_p$ ). Esta altura se calcula respecto de la línea media de cada perfil, *figura 2.9*.

- **Máxima profundidad de valle del perfil** ( $P_v$ ,  $R_v$ ,  $W_v$ ): este parámetro indica la mayor profundidad ( $Z_v$ ) de los valles de los perfiles: primario ( $P_v$ ), de rugosidad ( $R_v$ ) y de ondulación ( $W_v$ ). Este valor se calcula respecto de la línea media de cada perfil, *figura 2.9*.
- **Máxima altura del perfil** ( $P_z$ ,  $R_z$ ,  $W_z$ ): este valor es el resultado de la suma de la máxima altura de pico ( $Z_p$ ) y la máxima profundidad de valle ( $Z_v$ ) comprendidas en una longitud de muestreo, *figura 2.9*.

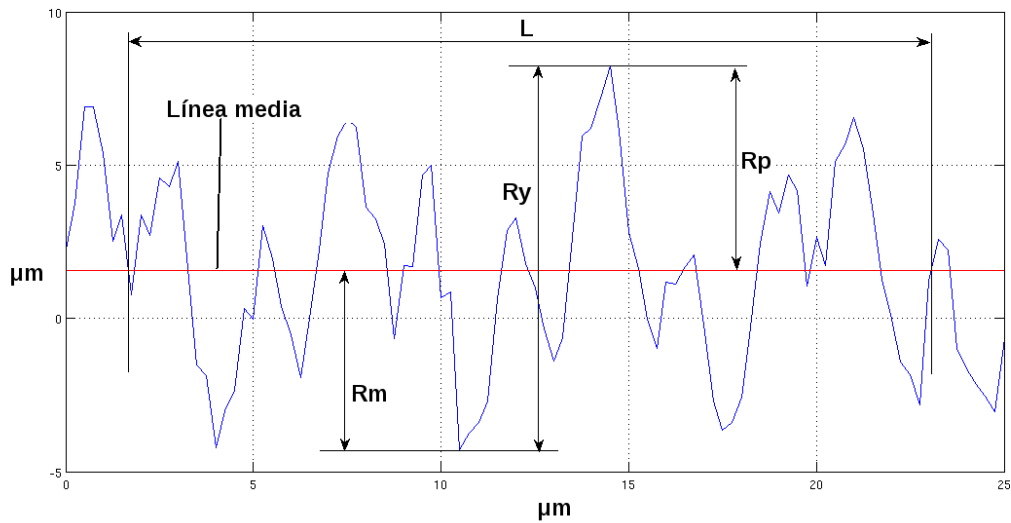


Figura 2.9: En esta figura se esquematiza los parámetros de máxima altura del pico del perfil, máxima profundidad del valle del perfil y máxima altura del perfil de rugosidad. La relación entre ellos es:  $R_y = R_m + R_p$ .

- **Altura media de los elementos del perfil** ( $P_c$ ,  $R_c$ ,  $W_x$ ): el valor de este parámetro corresponde al valor medio de las alturas de los elementos del perfil comprendidos en una longitud de muestreo, y se calcula la siguiente expresión (2.1).

$$P_c, R_c, W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} \quad (2.1)$$

- **Altura total del perfil** ( $P_t$ ,  $R_t$ ,  $W_t$ ): este parámetro es el resultado de la suma de la mayor altura de pico ( $Z_p$ ) y la mayor profundidad de valle ( $Z_v$ ) del perfil, comprendidas en una longitud de evaluación.
- **Desviación media aritmética del perfil evaluado** ( $P_a$ ,  $R_a$ ,  $W_a$ ): es la media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas  $Z(x)$  comprendidas en una longitud de muestreo 2.2, *figura 2.10*





### 2.3.2. Parámetros de espaciamiento

- **Ancho de los elementos del perfil:** es la longitud de la línea media que contiene una cresta y un valle consecutivo, en la *figura 2.11* se puede ver una representación del significado de este parámetro.

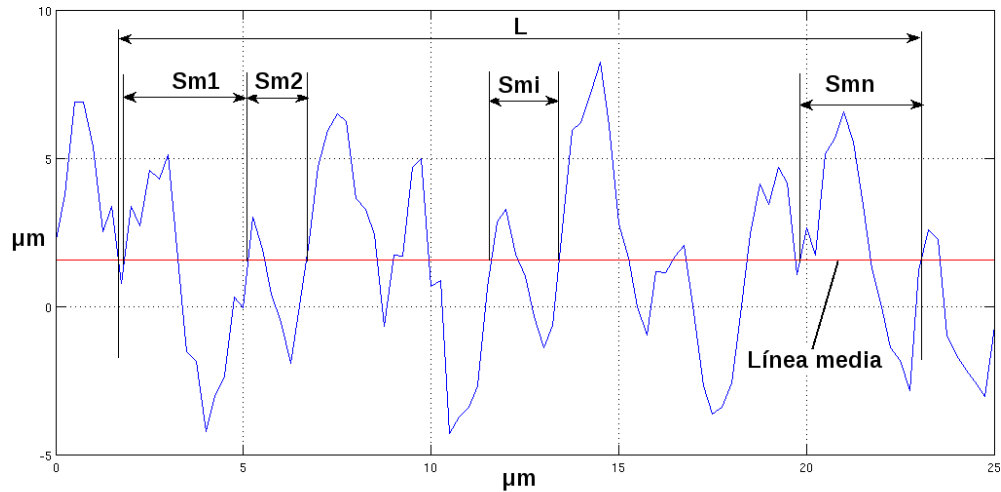


Figura 2.11: Esquemización del ancho de las irregularidades del perfil.

- **Anchura media de los elementos del perfil (PSm, RSm, WSm):** este parámetro mide el valor medio de las anchuras de los elementos del perfil,  $Xs$ , comprendidas en una longitud de muestreo 2.6.

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (2.6)$$

### 2.3.3. Parámetros híbridos

- **Pendiente media cuadrática del perfil evaluado (PΔq, RΔq, WΔq)** este parámetro representa el valor medio cuadrático de las pendientes locales  $dZ/dX$  comprendidas en la longitud de muestreo.

### 2.3.4. Curvas y parámetros asociados

Todas las curvas y parámetros asociados se definen sobre la longitud de evaluación, en lugar de sobre la longitud de muestreo, con objeto de obtener curvas y parámetros más estables

- **Tasa de material del perfil (Pmr(c), Rmr(c), Wmv(c)):** cociente entre la longitud de material de los elementos del perfil  $MI(c)$  en un nivel dado  $c$  y la longitud de evaluación 2.7.

$$Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c) = \frac{Ml(c)}{ln} \quad (2.7)$$

- **Curva de tasa de material del perfil** (Curva de Abbott Firestone): representa la tasa de material del perfil en función de nivel.
- **Diferencia de altura entre niveles de corte del perfil**( $P\delta c, R\delta c, W\delta c$ ): distancia vertical entre dos niveles de corte de una curva de tasa de material 2.8

$$R\delta c = C(Rmr1) - C(Rmr2); (Rmr1 < Rmr2) \quad (2.8)$$

- **Tasa de material relativa**( $Pmr, Rmr, Wmr$ ): tasa de material determinada para un nivel dado de corte, a una altura  $R\delta c$  respecto a una referencia  $C0$ .
- **Curva de distribución de amplitud**: función que representa la distribución de las ordenadas  $Z(x)$  dentro de la longitud de evaluación.

## 2.4. Sistemas de medición de rugosidad con contacto

La determinación del estado de una superficie con sistemas de contacto puede realizarse de dos formas, en primer lugar a través de patrones visotáctiles, este consiste en la comparación visual y táctil entre la superficie sometida a examen y un conjunto de patrones de referencia, resulta útil para la comparación de acabados superficiales obtenidos con el mismo proceso de fabricación. Los patrones se clasifican según el tipo de mecanizado al que es sometida la superficie. Este sistema es muy poco preciso y sometido a la decisión subjetiva del examinador. Por otro lado, el método más comúnmente utilizado consiste en la realización de una exploración de la superficie utilizando un elemento palpador.

### 2.4.1. Sistemas basados en palpador

Esta tecnología es la más utilizada en la industria y es en la que está basada la mayor parte de las normas que regulan la medición de rugosidad. A pesar de proporcionar una gran resolución y tratarse de una tecnología que está muy desarrollada, no impide que cuente con algunas desventajas que hacen poco recomendable, y en ocasiones imposible, su utilización en procesos productivos continuos en los que se desea realizar un control del 100 % de la producción.

El principal problema que se presenta a la hora de utilizar este tipo de equipos fuera de laboratorio es el mismo hecho de trabajar con contacto, en primer lugar el contacto entre el palpador y la superficie debe realizarse con una velocidad adecuada y con precisión puesto que una colisión podría provocar que el equipo resultase descalibrado o incluso el palpador resultase inutilizado. Por otro lado la fuerza ejercida por el palpador, sobre la superficie debe ser controlada para no introducir errores en la medida, esto es factible de conseguir en un entorno controlado como puede ser un laboratorio, pero puede llegar a ser imposible en una línea de producción, como puede ser un tren de laminación o un equipo montado en un brazo robot, en el que la superficie puede estar vibrando y cambiando la altura relativa al medidor.

Diámetro Palpador	Ra	Rq	Rz
2	3.271	3.860	13.610
5	2.931	3.412	10.783
10	2.351	2.891	9.208

Tabla 2.1: Datos de los parámetros calculados a partir de la simulación con diferentes diámetros de palpador, en  $\mu m$ .

Por otro lado, al tratarse de sistemas de medición con contacto es necesario tener en cuenta el tamaño del elemento palpador, en <sup>2</sup> y [14] puede estudiarse, a través de una simulación, la comparación de los valores de los parámetros obtenidos en el proceso de medición de rugosidad de una superficie utilizando palpadores de varios tamaños, a medida que se aumenta el diámetro del palpador, este actúa como un filtro paso bajo descartando los detalles más pequeños, e influyendo, por tanto, en los valores de los parámetros calculados. Esta característica está recogida y documentada en la norma UNE-EN ISO 11562, comentada anteriormente, con las definiciones de las características de los filtros que deben aplicarse en función del rango de rugosidades que se desean medir. En la *figura 2.12* se pueden comparar las simulaciones, obtenidas de <sup>3</sup>1, de inspección de una superficie aleatoria con tres diámetros de palpador diferentes.

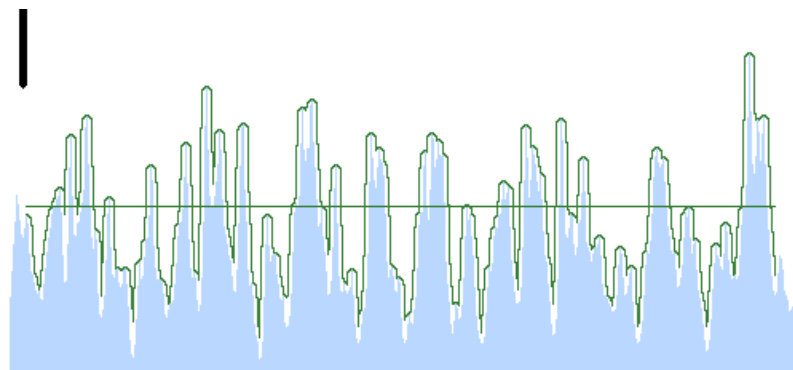
En la *tabla 2.1* se puede comprobar que las mediciones de los parámetros *Ra*, *Rq* y *Rz* difieren significativamente en función del palpador elegido.

## 2.5. Sistemas de medición de rugosidad sin contacto

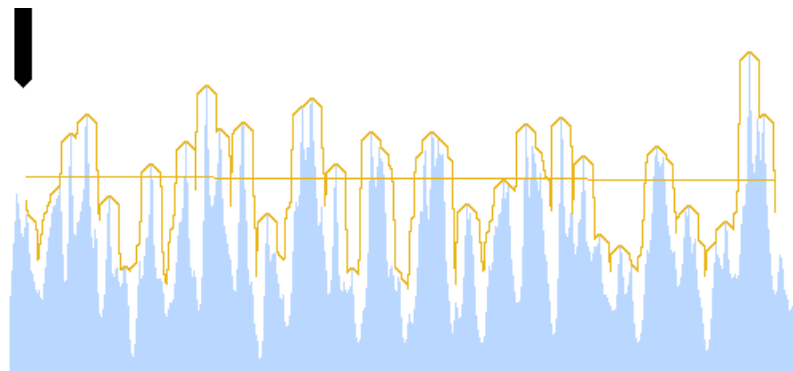
La medición de rugosidad y ondulación con contacto resulta, como se ha visto, lenta y poco efectiva para su incorporación en procesos productivos continuos o cuando se pretende examinar la totalidad de la producción. Por este motivo se han desarrollado, y desarrollan, numerosas investigaciones y sistemas para la medición del estado de las superficies sin contacto.

Algunos de los sistemas de medición sin contacto no hacen una reconstrucción de la topografía de la superficie, sino que realizan una estimación de los parámetros de rugosidad, y ondulación, en función de diversas propiedades, en general, el número de parámetros calculados es limitado con lo que el estudio de la superficie puede resultar incompleto. Además este tipo de sistemas solo permite el cálculo de parámetros referentes a valores medios por lo que no es posible el estudio de defectos puntuales en la superficie. Otros, en cambio, sí realizan una reconstrucción de la superficie para el análisis completo de la misma. En todos ellos las propiedades ópticas del material inspeccionado influyen en las medidas calculadas por lo que es necesario calibrar los equipos cuando cambia el tipo de material, incluso cuando el aspecto superficial del mismo material cambia, por ejemplo al aplicar ciertos tratamientos superficiales. La mayoría de estas tecnologías son propiedad intelectual de empresas y están protegidas por patentes.

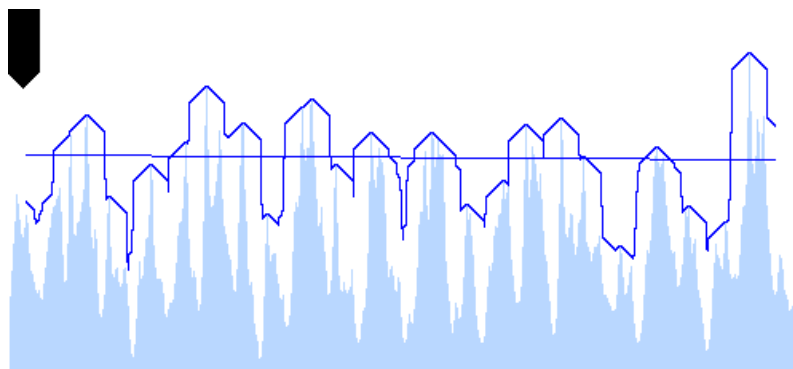
<sup>2</sup>Estudio del efecto del tamaño del palpador en la medición de rugosidad. <http://www.cenam.mx/dimensional/java/Rugosidad/Rugosidad.htm>.



(a) Simulación con palpador de diámetro 2µm.



(b) Simulación con palpador de diámetro 5µm.



(c) Simulación con palpador de diámetro 10µm.

Figura 2.12: Comparación de los perfiles obtenidos con 3 palpadores de diferentes diámetros. El material corresponde a la zona de color azul. La línea horizontal muestra el valor medio correspondiente al perfil obtenido.

En primer lugar se presentarán los métodos de medición que no realizan una reconstrucción de la topografía de la superficie para luego pasar a los sistemas que sí realizan dicha reconstrucción.

### 2.5.1. Sistema basado en iluminación de la superficie

Este sistema, propuesto por G. Moreas y H. Uijtbroeks en [15], se basa en la reflexión que provoca una superficie, en función de su rugosidad, al ser iluminada oblicuamente con una fuente flash, obteniendo una imagen en Bright field como las utilizadas en numerosos trabajos de visión convencional [16]. Al utilizar este tipo de iluminación, los puntos de la superficie que son opuestos a la reflexión entre la fuente de luz y la cámara producirán en esta última zonas de baja luminosidad, y por el contrario las zonas que son favorables a la reflexión producirán puntos brillantes. En la *figura 2.13* se puede ver un ejemplo simplificado de una imagen tomada con esta técnica sobre una superficie metálica pulida, especular, con un defecto.

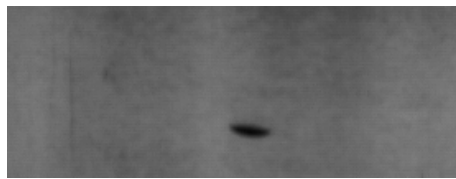


Figura 2.13: Ejemplo de una superficie pulida con un defecto iluminada para obtener una imagen Bright field

El sistema propuesto consiste en iluminar una banda laminada, que se mueve a una velocidad de 20m/s con un flash y capturar la imagen con un microscopio adaptado para cubrir una superficie de  $2000\mu\text{m} \times 1520\mu\text{m}$ . Las imágenes así obtenidas presentan un aumento del número de zonas oscuras, más pequeñas, cuando disminuye la rugosidad, en la *figura 2.14* se pueden ver dos imágenes de dos superficies con rugosidades distintas tomadas con este método.

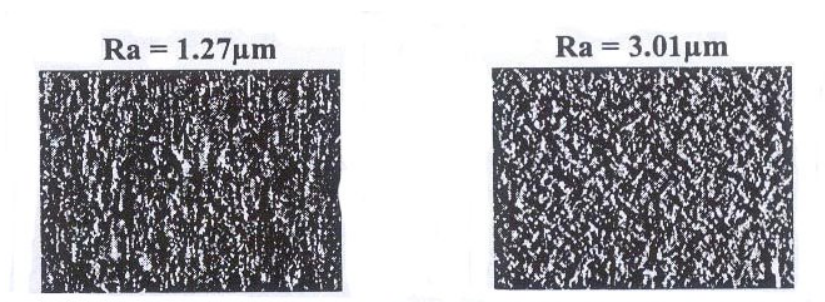


Figura 2.14: Imágenes de dos superficies con diferentes rugosidades iluminando, oblicuamente, la superficie con un flash

Este sistema permite el cálculo del parámetro  $Ra$  en el rango entre  $1\mu\text{m}$  y  $3\mu\text{m}$ , pero no obtiene una representación real de la superficie, con lo que no es útil para obtener el resto de parámetros que caracterizan la superficie. Por otra parte, este método es útil para superficies en movimiento, hasta cierto límite, si son iluminadas brevemente, por ejemplo, para una velocidad de movimiento de la superficie de  $20\frac{\text{m}}{\text{s}}$  sería necesario un tiempo de iluminación máximo de 10ns. Finalmente el patrón obtenido es altamente dependiente del material y acabado superficial, por lo que debe calibrarse específicamente para cada uno, incluso para rangos estrechos de variación de rugosidad.

### 2.5.2. Triangulación láser con microscopio

La triangulación láser [17] es una técnica de visión artificial muy utilizada para la reconstrucción de formas a través de la medición de perfiles de la superficie. En la *figura 2.15* se representa el principio de funcionamiento de la triangulación láser que consiste en proyectar sobre la superficie una línea láser y capturar con una cámara como se deforma esta línea sobre la superficie debido a su geometría.

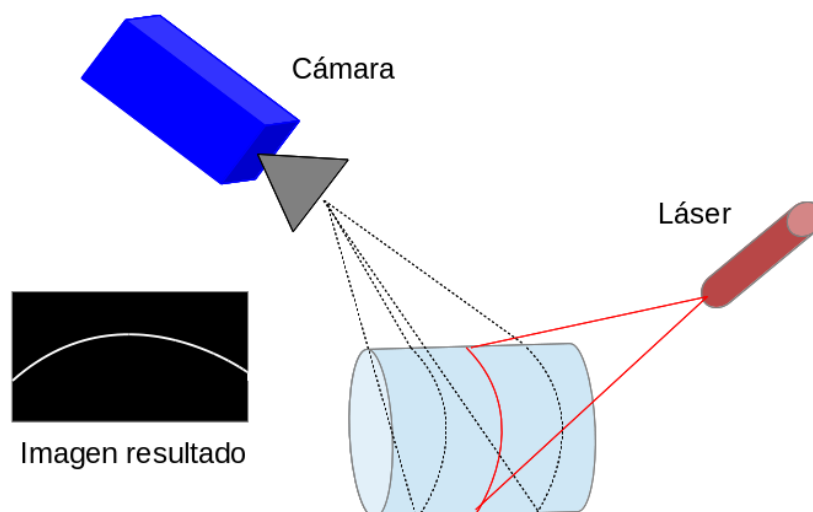


Figura 2.15: Principio de funcionamiento de la triangulación láser; se proyecta sobre la superficie una línea láser que se deforma debido a la geometría de aquella. La imagen resultante se trata para reconstruir la geometría de la superficie.

Esta técnica ha sido utilizada en Center for Research in Metallurgy CRM para la reconstrucción de perfiles submicrométricos para la medición de rugosidad [18] [19]. El sistema desarrollado se basa en la triangulación láser convencional pero utilizando una lente de microscopio, esto permite obtener una resolución en la triangulación adecuada para la medición de la rugosidad.

La tecnología permite reconstruir con la resolución adecuada la topografía de la superficie pero, al utilizar una lente de microscopio la distancia de trabajo es muy pequeña, del orden de unos pocos milímetros, y la profundidad de campo es menor que un milímetro. Esto hace que el equipo no resulte adecuado para su uso industrial donde es muy difícil asegurar la posición de la superficie.

### 2.5.3. Medición a través del patrón Speckle

Este método, propuesto por Peter Lehemann en [20], utiliza las propiedades estadísticas de los patrones de Speckle para hacer una estimación de la rugosidad de la superficie. Los patrones de Speckle aparecen al iluminar una superficie estática con una fuente coherente, lo que provoca una dispersión de la luz dando lugar a imágenes que tienen unos puntos más brillantes que otros; esto es debido a la propia rugosidad de la superficie que al no ser especular, y completamente plana, hace que los rayos se reflejen en los detalles que conforman la rugosidad y salgan en diferentes direcciones e interfieran, produciendo una imagen con zonas brillantes y oscuras, correspondiente al patrón de Speckle de la superficie para la iluminación utilizada. El método consiste en estudiar el patrón de Speckle y estudiar sus propiedades estadísticas estableciendo una relación entre estas con la rugosidad de la superficie. Con este método se pueden estimar los parámetros  $Rq$  y  $Ra$  que definen la rugosidad de la superficie, el resto de parámetros no es posible su cálculo ya que no se hace una reconstrucción real de la superficie, sino una estimación de ciertos parámetros, los estadísticos, mientras que los parámetros que indican mediciones absolutas no es posible obtenerlos. En la *figura 2.16* se pueden ver 4 superficies con diferentes rugosidades obtenidas utilizando este método.

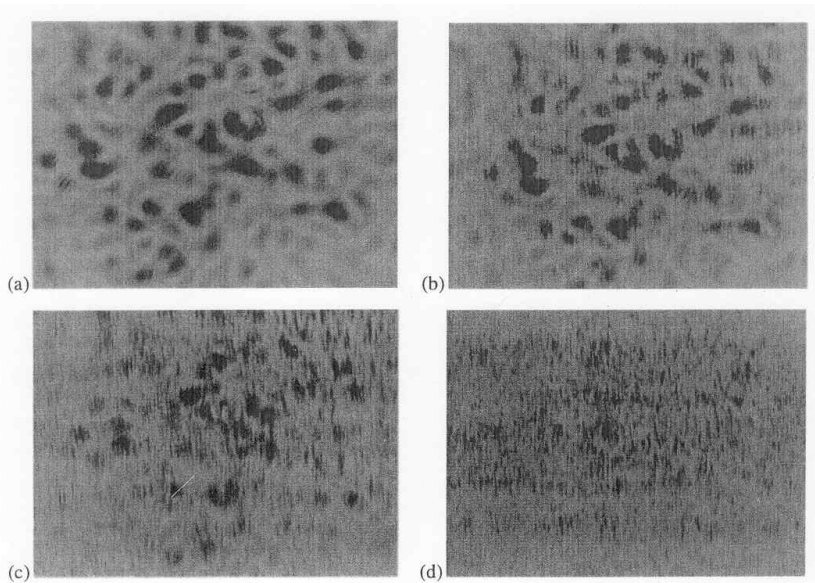


Figura 2.16: Imágenes de los patrones de speckle de cuatro superficies con diferentes rugosidades. a) oblea de silicio ( $Ra < 10\text{nm}$ ), b) superficie metálica con  $Ra \approx 25\text{nm}$ , c) superficie metálica con  $Ra \approx 50\text{nm}$ , d) superficie metálica con  $Ra \approx 100\text{nm}$

En la *figura 2.17* se puede ver el montaje propuesto por Peter Lehemann para realizar la medición de la rugosidad a través del patrón de Speckle. El sistema utiliza una iluminación láser, fuente coherente, que se proyecta sobre la superficie en estudio oblicuamente, la reflexión del rayo láser es recogida por un sensor CCD dando lugar a las imágenes de la *figura 2.16*

Este método aunque consigue elevadas precisiones en las estimaciones de los parámetros  $Rq$  y  $Ra$  no permite, como se comentó anteriormente, el cálculo del resto de



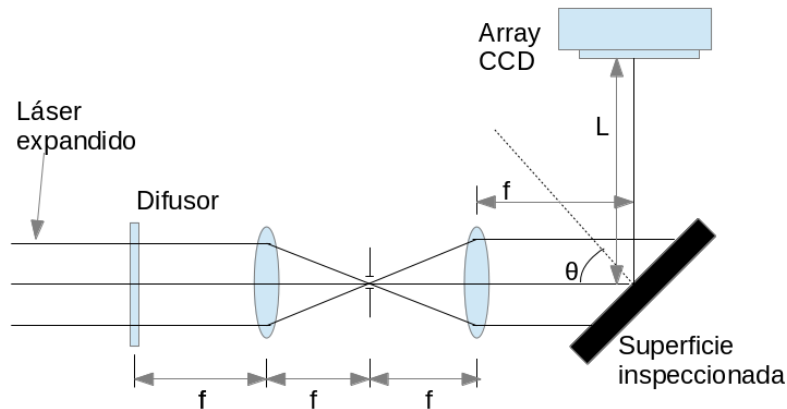


Figura 2.17: Montaje para la medición de la rugosidad a través del patrón de Speckle

parámetros que definen completamente las características de una superficie al no hacer una reconstrucción real de la topografía de la superficie. Por otra parte los patrones de Speckle aparecen cuando la muestra en estudio tiene velocidad nula respecto de la fuente y del sensor, esto es debido a que, aunque los patrones de Speckle están siempre presentes, su configuración cambia en función del ángulo de iluminación y del ángulo desde el que se observa la superficie, si se varían estos ángulos o cambia la superficie, debido a que el proceso implique el movimiento de la misma o del equipo de inspección, el sensor capta sucesivos patrones de Speckle durante el tiempo de integración del mismo, esto produce una distorsión en las medidas que lo hace poco operativo para los procesos industriales.

#### 2.5.4. Interferometría de desplazamiento de fase

Esta técnica corresponde a una solución comercial aportada por *Ambios Technology*<sup>4</sup> y combina un sensor de interferometría con desplazamiento de fase con un microscopio para el escaneo de superficies tanto transparentes como opacas, este sistema permite una reconstrucción completa de la topografía de la superficie con una resolución vertical de 0.2nm. Como inconveniente se aprecia que el sistema está destinado a laboratorio y no a su uso en una línea de producción. En la *figura 2.18* se puede ver una fotografía un sistema comercial con esta tecnología.

La interferometría de desplazamiento de fase [21] consiste en la adquisición de un conjunto de interferogramas con un desplazamiento en la fase entre cada uno de ellos; para ello se parte de un interferómetro en el que el espejo, que refleja el rayo de referencia, se puede acercar o alejar de forma muy precisa, por ejemplo utilizando un actuador piezoeléctrico, con esto se varía el rayo de referencia y para un mismo punto se pueden obtener diferentes interferogramas.

La *figura 2.19* muestra el esquema de funcionamiento de un interferómetro de desplazamiento de fase, en el se puede ver el generador láser, a la izquierda; un divisor del rayo (beamsplitter), en el centro, que divide el rayo incidente en el rayo de referencia y

<sup>4</sup><http://www.ambiosotech.com/>

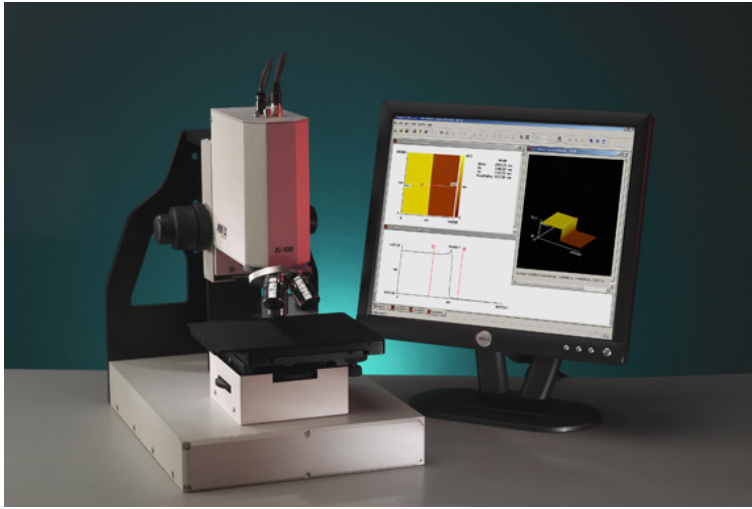


Figura 2.18: Imagen de un sistema comercial utilizando interferometría de desplazamiento de fase.

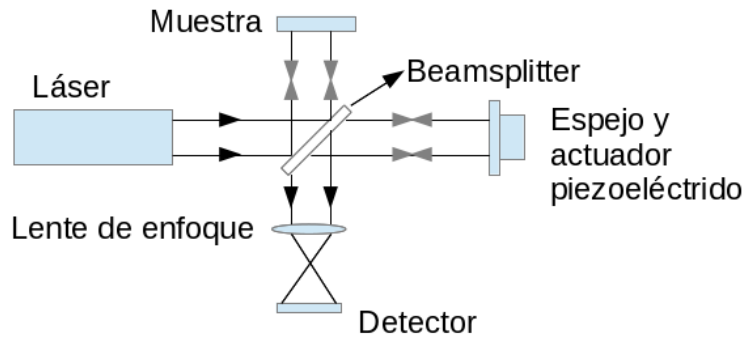


Figura 2.19: Esquema de un interferómetro de desplazamiento de fase, se puede observar el actuador piezoeléctrico que acerca y aleja el espejo del separador de rayos (beam-splitter).

el rayo que se proyecta en la superficie que se está examinando; la superficie en estudio, en la parte superior de la figura; el espejo, a la derecha, que se puede acercar y alejar respecto del beamsplitter de forma precisa utilizando un actuador piezoeléctrico y el sensor en el que se forman los interferogramas. Con esta tecnología es posible obtener buenos resultados con patrones de interferencia con bajo contraste y los resultados son independientes de la luminosidad obtenida en el interferograma. Para el cálculo de la distancia es suficiente con utilizar tres interferogramas que se diferencien entre ellos en la posición del espejo, es decir, tienen un desplazamiento de fase entre los tres que es equivalente a la posición del espejo. Por otro lado, es necesario que el sistema está montado en una estructura que le aisle de las vibraciones para asegurar que el interferómetro se encuentra a la misma distancia de la superficie durante la captura de los tres interferogramas en las tres posiciones del espejo y por tanto que las diferencias de fase son debidas al cambio de posición del espejo. Esto provoca que la estructura que con-

tiene el interferómetro deba ser suficientemente rígida y que a pesar de esto sea difícil su uso en aplicaciones en las que existan vibraciones que puedan provocar variaciones de distancia entre la superficie en estudio y el equipo de medida.

### 2.5.5. Interferometría con luz blanca

En la literatura, [22], existen diversas configuraciones para la ejecución de un interferómetro de luz blanca, el interferómetro de rejilla (*grating inteferometer*), el interferómetro de test de coherencia (*coherence probe interferometer*) y el interferómetro de difusión (*scatterplate interferometer*). Los primeros consisten en la generación de una interferencia al hacer pasar el haz de luz blanca a través de una rejilla cuidadosamente diseñada para que la frecuencia de franjas del patrón de interferencia sea la misma para todas las longitudes de onda de la luz blanca, por otro lado ha de tenerse en cuenta que el patrón de interferencia de orden 0 ha de ser igualmente independiente de la longitud de onda.

El principio de funcionamiento del interferómetro de rejilla de luz blanca queda expuesto en la *figura 2.20*, en él el interferómetro es iluminado con una onda esférica enfocada en las proximidades de la rejilla. Una rejilla senoidal pura proporcionará solamente dos órdenes de difracción. Si  $\theta$  es el ángulo de incidencia,  $\varphi$  es el ángulo de difracción,  $d$  es el periodo de la rejilla y  $\lambda$  es la longitud de onda, la ecuación de la rejilla proporciona 2.9

$$d(\sin(\theta) - \sin(\varphi)) = \lambda \quad (2.9)$$

por simplicidad se puede asumir que  $\Phi = \lambda/d$ , por tanto, el ángulo de difracción es proporcional a la longitud de onda. Si la luz está enfocada a una distancia  $t$  de la rejilla, se producirán dos imágenes del punto separadas una distancia  $t\varphi$  dada por 2.10

$$\text{separacion punto enfocado} = \Phi t = 2 \frac{\lambda}{d} t \quad (2.10)$$

por lo que la separación de los puntos es proporcional a la longitud de onda y por tanto la separación de las franjas es independiente de la longitud de onda. El punto central entre los dos puntos originales es también independiente de la longitud de onda, por tanto la franja de orden 0 es independiente de la longitud de onda.

El inteferómetro de desplazamiento de fase es el más potente y utilizable a efectos prácticos, esto es motivo para que muchos equipos comerciales utilicen su principio de funcionamiento. A pesar de que la interferometría por desplazamiento de fase presenta una gran precisión esta tiene limitado su rango dinámico. Se puede comprobar que para el inteferometro de desplazamiento de fase, utilizando luz monocromática, la diferencia

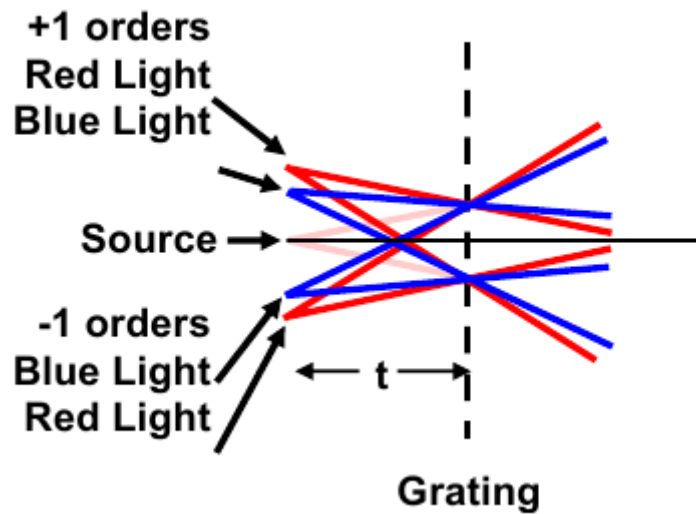


Figura 2.20: Principio de funcionamiento de un interferómetro de rejilla de luz blanca.

de altura de dos puntos adyacentes debe ser menor que  $\lambda/4$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda de la luz utilizada. Si la diferencia de altura es mayor que esta cantidad se produce ambigüedad en la medida puesto que no es posible determinar a cuantas  $\lambda$  corresponde la variación en la medida. Una técnica que ha demostrado resolver este problema en la limitación de la máxima pendiente medible es el uso de 2 o más longitudes de onda. Si las medidas se realizan utilizando dos longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  se puede demostrar que la máxima diferencia medible corresponde a  $\lambda_e q/4$  que viene dada por 2.11

$$\lambda_e q = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad (2.11)$$

Seleccionando adecuadamente las longitudes de onda es posible obtener un rango dinámico mucho más amplio que el disponible cuando solamente se utiliza una única longitud de onda.

Una mejora aproximación a lo anterior es el uso de luz blanca. En la *figura 2.21* se puede comparar la interferencia generada utilizando solamente luz roja y utilizando luz blanca.

El escaneo vertical en busca del pico de coherencia [23] es la mejor solución para la medición de grandes variaciones de distancia o medida de superficies rugosas, para ello se utiliza una fuente de luz con un amplio espectro. Debido a esto la coherencia de la luz es muy baja y por tanto solo se obtendrá un buen contraste en la franjas de interferencia cuando los dos caminos del interferómetro son muy próximos en cuando a la distancia se refiere. Así, si en el microscopio de interferencia, la longitud del camino

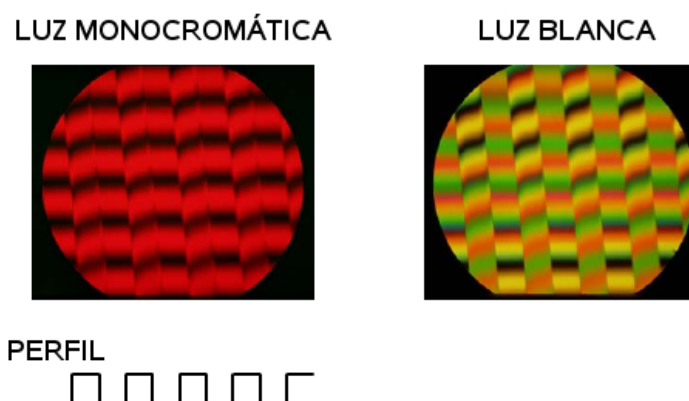


Figura 2.21: Comparación entre los patrones de interferencia obtenidos por desplazamiento de fase utilizando luz monocromática, a la izquierda, y luz blanca, a la derecha, sobre un perfil con forma de onda cuadrada.

de la muestra se varía, las variaciones de distancia en la muestra se pueden obtener de las posiciones de la muestra para cada punto en las que el contraste de las franjas es máximo.

El mayor inconveniente de este sistema es que solo se puede realizar la medida de un punto de cada vez y además esta medida implica una cantidad importante de cálculos lo que la hace poco recomendable para su utilización para su funcionamiento on-line. La *figura 2.22* muestra el interferómetro utilizado por la compañía *3D shape GmbH* en su sensor *Korad<sup>3D</sup>* diseñado para la medida de rugosidad.

El interferómetro de dispersión, inventado por Jim Burch en 1953 [24][25], es un interferómetro de camino común por lo que los rayos de referencia y test siguen el mismo camino. En la *figura ??* se muestra la configuración de un interferómetro de dispersión para la inspección de espejos esféricos. En la parte superior izquierda se puede observar una imagen ampliada del resultado obtenido. Para el funcionamiento se ilumina con un láser o una fuente de banda ancha una pequeña apertura generando una fuente de extensión limitada. A continuación se coloca una lente que enfoca la fuente en el espejo en estudio a través de un beamsplitter. La placa de dispersión se coloca en las proximidades del centro de curvatura del espejo, parte de la luz incidente en la misma se dispersa iluminando la superficie del espejo y parte de la misma pasa directamente a través del centro iluminando un punto de la superficie. Tras la reflexión, la luz se propaga nuevamente a través de la placa de dispersión haciendo lo propio con una porción del haz. Finalmente una lente de enfoque genera el patrón de franjas de interferencia en un detector.

El patrón de interferencia se produce porque cada vez que la luz alcanza la placa de dispersión, parte de la misma se dispersa y el resto la atraviesa directamente. Puesto que la placa de dispersión es atravesada 2 veces se producen 4 permutaciones en el haz que llega al detector: 1) *Dispersa-Dispersa*, 2) *Dispersa-Directa*, 3) *Directa-Dispersa* y 4) *Directa-Directa*. Si se examina cada una de las combinaciones se verá su papel en la generación del patrón de interferencia. El haz *Directo-Directo* atraviesa directamente la

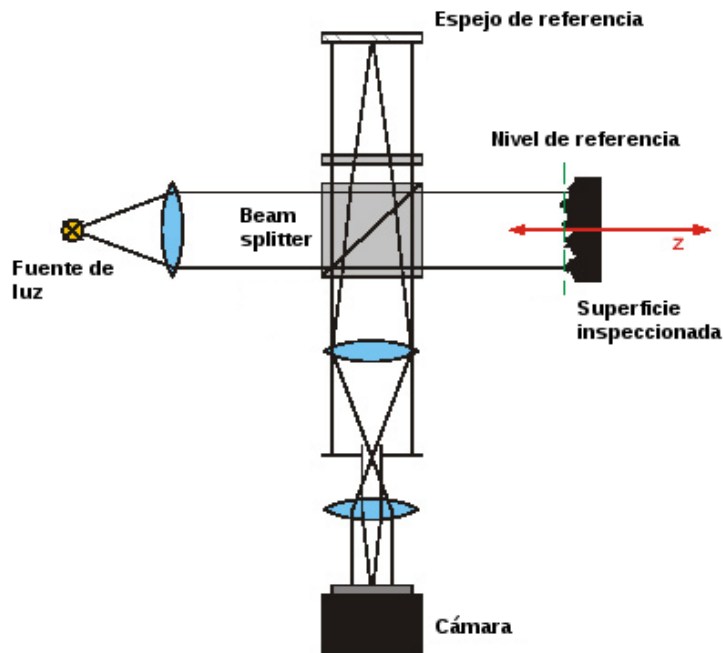


Figura 2.22: Esquema de un interferómetro de luz blanca.

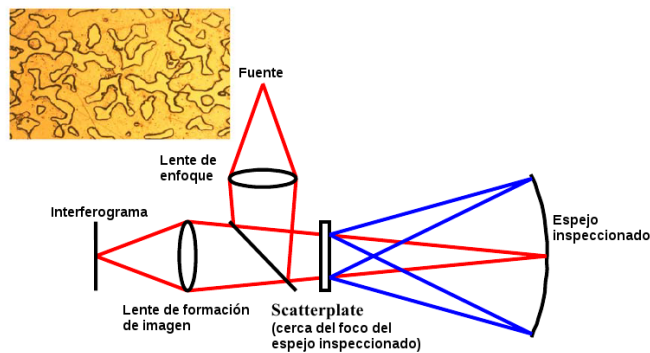


Figura 2.23: Interferómetro de difusión para el estudio de espejos esféricos.

placa de dispersión ambas veces y se localiza en el detector formando un *punto caliente*. Puesto que este *punto caliente* nunca es dispersado no contribuye a la formación de franjas. De forma similar ocurre con el haz *Disperso-Disperso* que no contribuye a la formación de las franjas; el haz es dispersado dos veces dando lugar a una iluminación de fondo en el plano de la imagen. El haz *Directo-Disperso* es la referencia para el interferómetro; la luz pasa directamente a través de la placa de dispersión y forma una imagen en la superficie de test. Si la imagen de la fuente es suficientemente pequeña las variaciones de fase introducidas en el haz reflejado son despreciables. En el camino de vuelta la luz sí es dispersada. El haz *Disperso-Directo* sirve como camino de test

para el interferómetro, la luz es dispersada en su primer paso por la placa iluminando la superficie del espejo. Cualquier imperfección en la superficie introducirá una variación de fase, el haz reflejado atraviesa directamente la placa produciendo las franjas cuando interfiere con el haz de referencia.

### 2.5.6. SORM: Superfast Optical Roughness Measurement

El SORM es un micro perfilómetro diseñado para la medición de la rugosidad en líneas de alta velocidad como la laminación del acero. En la *figura 2.24* se muestra la estructura del sensor. Este consta de un conjunto de fotodetectores distribuidos en una semicircunferencia y un rayo láser.

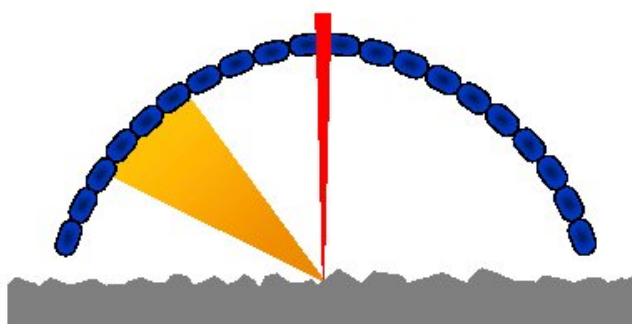


Figura 2.24: Estructura del sensor SORM con los fotodetectores distribuidos en una semicircunferencia y el haz láser incidiendo perpendicularmente a la superficie teórica.

El principio de funcionamiento de este sensor consiste en la medición del ángulo de reflexión de un haz láser sobre la superficie, con esto se puede obtener la inclinación de la superficie en cada punto, en una dirección, teniendo en cuenta que se puede considerar la superficie como una sucesión de superficies planas ("caras"). Cada "cara" refleja una porción de luz como si fuera un espejo como se puede ver en la *figura 2.25*, y el sensor recoge en alguno de sus fotodetectores esta reflexión, con esto se obtiene el ángulo de salida del rayo desde la superficie y se puede calcular la pendiente de la superficie en ese punto, una vez obtenida la inclinación de la superficie se puede reconstruir punto a punto un perfil para el cálculo de los parámetros que caracterizan la superficie.

Esta técnica permite reconstruir la superficie de manera indirecta, aunque con esta tecnología no es posible tener un valor absoluto de la distancia entre el sensor y la superficie, sino que el siguiente valor es calculado teniendo en cuenta el anterior.

Este sistema es fabricado y comercializado por *EMG Automation GmbH*<sup>5</sup> y entre sus características principales ofrecen un rango de medida para  $R_a$  entre 0.1 y  $3\mu m$  con una precisión de  $\pm 0,2\mu m$  para el valor de  $R_a$ . El sensor cuenta con 20 fotodetectores para la estimación del ángulo de inclinación de la superficie.

Debido a que el ángulo de reflexión máxima no está restringido al plano del semicírculo de sensores, esta técnica tiene problemas en superficies muy reflectantes.

<sup>5</sup>EMG Automation GmbH. SORM 3plus. <http://www.emg-automation.com/>

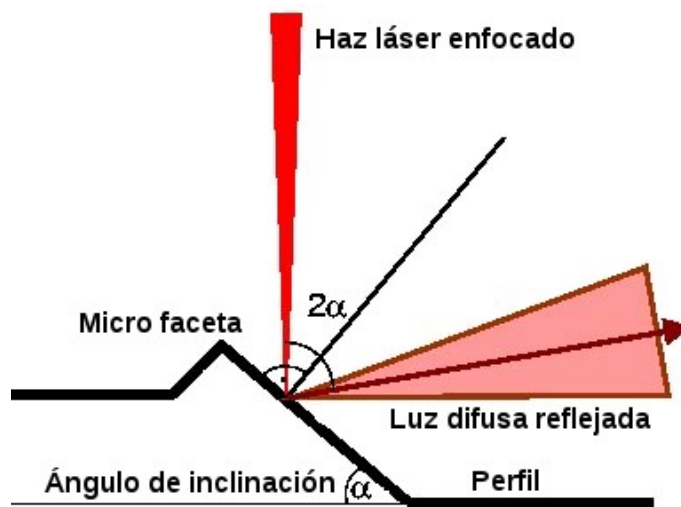


Figura 2.25: Principio de funcionamiento del sistema SORM. Si la "cara" de la superficie tiene un ángulo  $\alpha$  respecto de la horizontal y se proyecta un haz láser colimado perpendicular a la normal, el haz reflejado tendrá un ángulo  $2\alpha$  respecto de la normal y será recogido por el fotodetector correspondiente de la semicircunferencia.

Además, la variación absoluta de la distancia entre los sensores y la superficie hace que cambie la zona de máxima luminosidad para el mismo ángulo de la cara, por lo que las variaciones de distancia deben ser controladas.

### 2.5.7. Medición Confocal

Este sistema, utilizado por algunos fabricantes de medidores de rugosidad, consiste en iluminar la superficie, *figura 2.26*, con un punto láser, suficientemente fino, y enfocarlo a través de un sistema óptico, la reflexión del punto pasa por un "pinhole" y la luz resultante es capturada por un sensor. En función del enfoque del punto, que varía con la posición de la óptica, la cantidad de luz que atraviesa el pinhole varía. Para obtener el punto de máxima luminosidad que corresponderá al punto de mejor enfoque, se mueve la óptica verticalmente y en función de su posición se determina la distancia del punto de la superficie.

Este método implica una exploración vertical para cada punto, con lo cual resulta lento haciéndolo poco apto para su uso en una línea de producción industrial.

### 2.5.8. Elipsometría

La elipsometría [26] es una técnica óptica basada en la medición del cambio de estado de polarización de un haz colimado de luz monocromática polarizada, producidos por la reflexión sobre una superficie. Esta técnica fué propuesta por M. Harke.

En la *figura 2.27* se puede ver un esquema de funcionamiento del sistema propuesto: el láser genera un haz que se hace pasar a través de un polarizador para tener una onda con polarización plana, a continuación el haz atraviesa un retardador de un cuarto de onda dando lugar a una onda con polarización elíptica, este haz se proyecta sobre



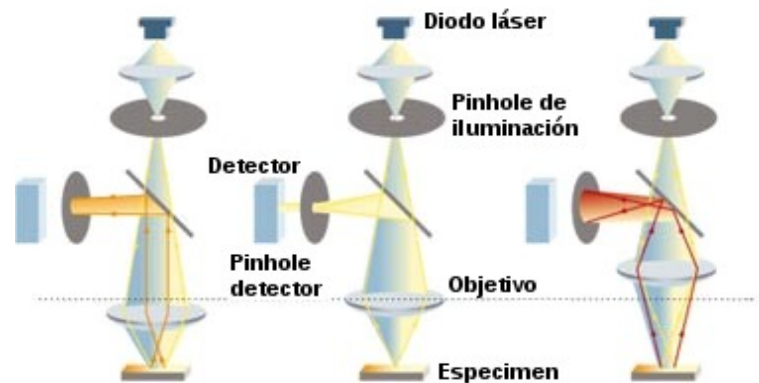


Figura 2.26: Principio de funcionamiento de un medidor de rugosidad "Confocal".

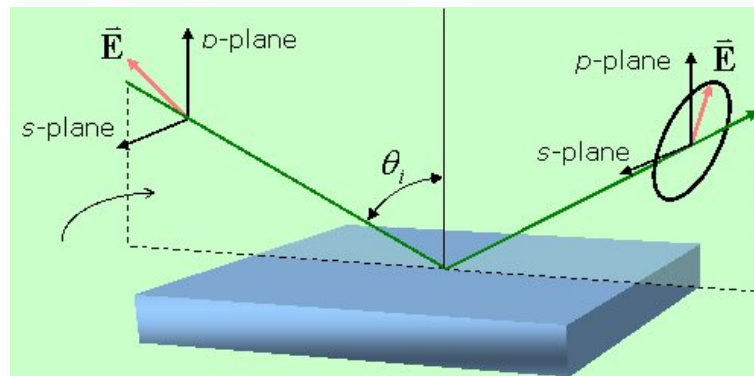


Figura 2.27: Principio de funcionamiento de un elipsómetro.

la superficie que deformará su polarización en función de las características de la misma. El haz reflejado atraviesa una óptica que lo enfoca y un analizador, un polarizador, dando lugar a una onda que es capturada por un sensor y analizada. Esta tecnología proporciona una elevada resolución a la hora de reconstruir la topografía de una superficie, pero es muy sensible a las vibraciones del elemento y a la propia geometría del equipo lo que lo hace poco recomendable para su uso industrial.

## 2.6. Resumen de las técnicas de medición de rugosidad

Se ha realizado un repaso de las técnicas existentes para la medición de rugosidad, en la *tabla 2.2* se muestra un resumen de las técnicas estudiadas y sus principales características.

## 2.7. Conclusiones

En este capítulo se han repasado los parámetros que definen la calidad de una superficie, estos parámetros están definidos en un conjunto de normas ISO. Para calcu-

Técnica	Sin contacto	Reconstrucción de la superficie	Interferométrica	Técnicas ópticas
Palpador		X		
Iluminación de la superficie	X			X
Triangulación láser con microscopio	X	X		
Medición Speckle	X		X	
Interferometría de desplazamiento de fase	X	X	X	
Interferometría de luz blanca	X	X	X	
Elipsometría	X	X	X	
SORM	X	X		X
Medición confocal	X	X		X

Tabla 2.2: Comparación de las distintas tecnologías existentes para la medición de la rugosidad.

larlos es necesario recurrir al perfil real de la superficie por lo que deben utilizarse instrumentos de medida que permitan obtener una representación fiel de la superficie. Tradicionalmente se han utilizado perfilómetros de contacto para la reconstrucción de la superficie; como este método tiene varios inconvenientes para realizar una medición en un proceso continuo, se han desarrollado numerosas tecnologías sin contacto con el fin de paliar los problemas encontrados en el perfilómetro de contacto. Algunas de estas tecnologías calculan algunos parámetros de la superficie de forma indirecta, pero no realizan una caracterización completa de la misma, otras tecnologías permiten obtener un perfil real de la superficie pero por el modo de funcionamiento no son adecuados a un proceso continuo industrial en el que hay vibraciones o el objeto inspeccionado no puede asegurar una posición con suficiente precisión. Por otro lado, en todas ellas las características ópticas de la superficie influyen en las medidas calculadas por lo que es necesario calibrar los equipos para cada material inspeccionado, incluso para diferentes tipos de acabado superficial para un mismo material.



## Capítulo 3

# LA HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA

### 3.1. Holografía

#### 3.1.1. Holografía clásica

En un dispositivo de imagen convencional cada punto del mismo representa la intensidad de luz que percibe procedente de un solo punto del espacio. Sin embargo, con la holografía se captura no sólo la amplitud, sino la fase de las ondas luminosas, pudiendo reconstruirse de esta forma la escena 3-D. [27]

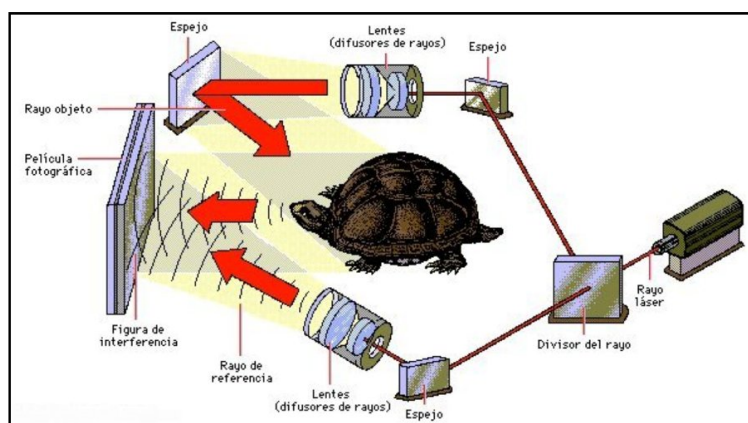


Figura 3.1: Principio de la holografía convencional

La holografía o “reconstrucción del frente de ondas” fue iniciada en 1947 por el británico Dennis Gabor, como un procedimiento para mejorar el poder resolutivo del microscopio electrónico. El método consiste en tomar una fotografía (holograma) de las interferencias producidas al incidir simultáneamente sobre la placa fotográfica las ondas dispersadas por el objeto y las de un haz de referencia coherentes con las anteriores, es decir, de igual longitud de onda y fase de partida. Aunque con una apariencia desordenada, el holograma suministra información más completa que una fotografía

ordinaria, y suficiente para poder reconstruir la imagen del objeto mediante un sistema óptico adecuado. La holografía no empezó a desarrollar todas sus posibilidades hasta el año 1961, en que mediante el uso del láser se dispuso de fuentes luminosas de gran intensidad y mucho más coherentes que las disponibles hasta entonces.

En la *Figura 3.1* se puede apreciar cómo un rayo de luz monocromática proveniente de una fuente coherente se desdobra en dos: uno que incide directamente sobre la placa holográfica, y otro que se refleja en el objeto, produciendo una figura de interferencia en la película holográfica.

Si se quiere obtener la distancia de un solo punto emisor, se medirá el número de franjas por unidad de superficie, puesto que cuanto más distante esté el punto emisor más cercanas estarán dichas franjas en el holograma.

La holografía clásica presenta algunas desventajas tales como la necesidad de utilizar luz muy coherente (como un láser), así como un sistema estable. Si se obtiene el holograma de una escena completa, los hologramas parciales de cada punto aparecen superpuestos. Aunque es posible reconstruir la escena 3D desde el punto de vista óptico (eliminando el objeto e iluminando directamente la imagen holográfica se consigue la interferencia inversa), no resulta posible aislar los hologramas individuales para la reconstrucción 3D de forma numérica. Por ello, en objetos 3D este método se suele utilizar por comparación del patrón obtenido respecto a un patrón de referencia inicial: la diferencia de ambos se muestra en forma de franjas, de cuyo procesamiento sí es posible extraer la variación de forma sufrida.

### 3.1.2. Holografía conoscópica

Las primeras publicaciones acerca de la *Holografía Conoscópica* se remontan al año 1985 y se deben a los profesores G.Y. Sirat y D. Psaltis como consecuencia de sus trabajos en el Instituto de Tecnología de California. A su vuelta a Francia, G.Y. Sirat prosiguió sus trabajos y creó en 1988 la sociedad *Le Conoscope SA* para industrializar los resultados de su investigación bajo la protección de patentes internacionales.

Se puede definir la conoscopía como un método interferométrico holográfico que utiliza una luz incoherente. Su principio básico se fundamenta en las propiedades de birrefringencia de ciertos cristales uniaxiales, que permiten la separación de la onda que proviene de cada punto del objeto en dos ondas desfasadas proporcionalmente a la geometría del montaje.

#### Principio físico Holografía conoscópica

La ausencia de rayo de referencia global, como ocurría con la holografía tradicional, permite trabajar con luz incoherente. Pero para que los rayos generados puedan interferir se requiere coherencia de polarización. Esto se consigue emplazando dos polarizadores circulares, uno a cada lado del cristal. Este montaje, llamado también conoscopio, se representa esquemáticamente en la *Figura 3.2*, en la que aparece ampliada la región de contacto aire-cristal para mostrar el fenómeno de separación angular entre los dos modos de propagación

El conoscopio está compuesto por un cristal uniaxial (por ejemplo, de calcita), situado entre dos polarizadores circulares. Cada punto  $P$  del objeto emite o refleja la luz quasi-monocromática y espacialmente incoherente, en un cono de luz hacia el sistema.

Cada rayo de este cono atraviesa el primer polarizador circular, que deja pasar una onda plana, y llega al cristal uniaxial, que la divide en dos polarizaciones ortogonales

con un desfase relativo de  $\frac{1}{4}$  de onda.

En el interior del cristal los dos rayos -el ordinario y el extraordinario- se propagan con velocidades diferentes, debido a que el índice de refracción del cristal es distinto para cada uno de ellos. El índice de refracción para el rayo ordinario es constante, mientras que el correspondiente al rayo extraordinario es función del ángulo que forma este rayo con el eje óptico.

A la salida del cristal, los dos rayos se desfasan según la diferencia de sus velocidades. Después del segundo polarizador, los dos rayos se reencuentran en un mismo estado de polarización, pudiendo entonces interferir de manera constructiva o destructiva según la diferencia de fase. El interferograma observado sobre un medio es una figura de Fresnel como la que se aprecia en la *Figura 3.3*.

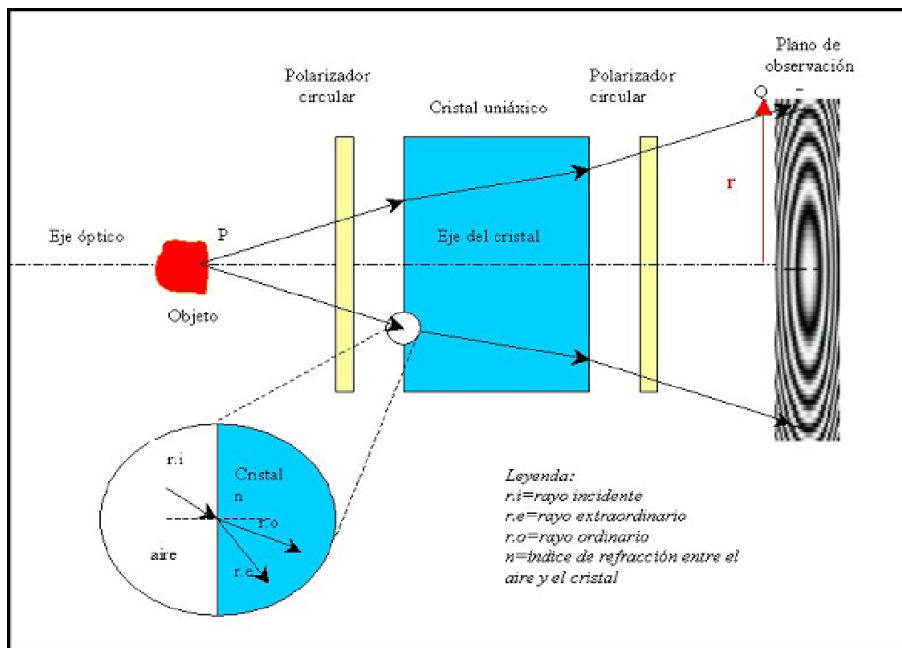


Figura 3.2: Principio de la holografía conosópica

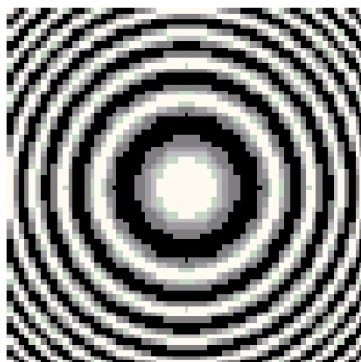


Figura 3.3: Figura de Fresnel.

## Principio teórico Holografía conoscópica

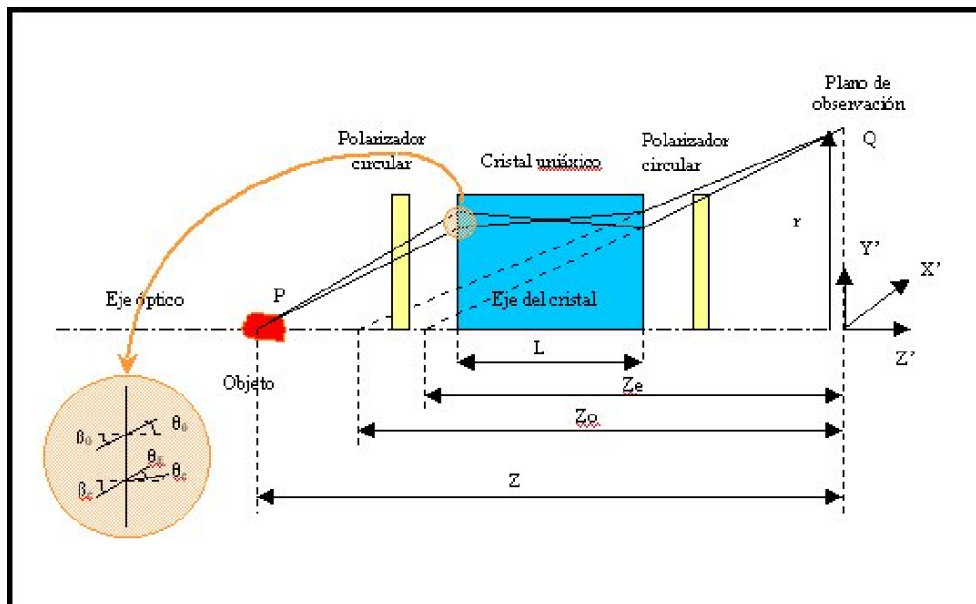


Figura 3.4: Dispositivo conoscópico: convenciones de notación.

El desarrollo que efectuaremos a continuación pondrá de manifiesto la forma de reconstruir la distancia teórica a partir del análisis del interferograma. Para una demostración rigurosa remítase a [28].

La Figura 3.4 representa el montaje conoscópico básico (un cristal birrefringente emplazado entre dos polarizadores circulares). Consideremos un sistema ortonormal de coordenadas  $X'Y'Z'$  centrado en un punto del plano de registro coincidente con la intersección de dicho plano con el eje óptico, siendo la dirección de este último la del eje  $Z'$ . Sea  $P$  un punto del plano objeto y  $Q$  otro punto correspondiente al plano de observación. Este plano de observación, llamado también plano de registro se localiza en la superficie sensible del detector utilizado.

El cristal cuya longitud es  $L$ , se sitúa con su eje óptico paralelo al del sistema. El índice de refracción para el rayo ordinario será  $n_o$  y para el rayo extraordinario  $n_e$ . Las intersecciones del eje óptico con los rayos que salen de  $Q$  (representados por líneas punteadas en la Figura 3.4) definen las distancias ordinaria  $Z_o$  y extraordinaria  $Z_e$  del punto  $P$  visto en el plano de observación. Estas proyecciones pueden considerarse como producto de la supresión del efecto geométrico introducido por el cristal. Su media geométrica es la *distancia conoscópica corregida*  $Z_e = \sqrt{Z_o Z_e}$ . Para designar a los ángulos que forman los rayos que salen de  $P$  y  $Q$  con la dirección del eje óptico se utilizarán los símbolos  $\beta$  (en el aire) y  $\theta$  (en el interior del cristal). Estos símbolos irán acompañados de los subíndices  $e$ ,  $o$  o  $c$ , según se refieran al rayo ordinario, al extraordinario o al rayo medio relativo a la distancia conoscópica corregida.

Las coordenadas del punto  $P$  son  $(x, y, z)$ . Como origen del sistema de referencia se encuentra en el plano de registro, las coordenadas del punto  $Q$  son  $(x', y', z' = 0)$ . En el plano del detector la distancia radial  $r$  del punto  $Q$  es igual a

$$r = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2} \quad (3.1)$$

Finalmente  $\theta_e$  representa el ángulo que forma el eje óptico el vector de Poynting asociado a la onda extraordinaria.

La intensidad luminosa en  $Q$  se expresa por:

$$I = I_o(1 + \cos(\Delta\phi)) \quad (3.2)$$

siendo  $I_o$  la intensidad procedente de  $P$ , mientras que  $\Delta\phi = \Delta\Pi + \Delta\varphi$  representa la suma del desfase introducido por los polarizadores ( $\Delta\Pi$ ) y el debido al cristal ( $\Delta\varphi$ )

A continuación procedemos a calcular el valor  $\Delta\phi$ , teniendo en cuenta la influencia de los polarizadores y del cristal.

■ *Cálculo del desfase introducido por el cristal*

Las leyes de Snell-Descartes relativas a la refracción suministran las siguientes ecuaciones:

$$\sin(\beta_o) = n_o \sin(\theta_o) \quad \text{para el rayo ordinario} \quad (3.3)$$

$$\sin(\beta_e) = n_e(\theta_e) \sin(\theta_e) \quad \text{para el rayo extraordinario} \quad (3.4)$$

$n_e(\theta_e)$  representa la variación del índice de refracción del rayo extraordinario en función del ángulo que forma el rayo con el eje óptico. Esta variación viene dada por la expresión:

$$\frac{1}{n_e^2(\theta_e)} = \frac{\sin^2 \theta_e}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta_e}{n_o^2} \quad (3.5)$$

En lo que respecta al vector de Poynting, su dirección viene definida por:

$$\tan \theta_E = \frac{n_o^2}{n_e^2} \tan \theta_e \quad (3.6)$$

Por otra parte la geometría del dispositivo proporciona las siguientes relaciones:

$$r = (Z - L) \tan \beta_o + L \tan \theta_o \quad (3.7)$$

$$r = (Z - L) \tan \beta_e + L \tan \theta_E \quad (3.8)$$

El conjunto de expresiones 3.3 a 3.8 representan las ecuaciones que constituyen la conoscopía. Las geometrías de los rayos ordinario y extraordinario proporcionan los caminos ópticos de los rayos  $l_o$  y  $l_e$ . El camino óptico del rayo ordinario será la suma del camino en el aire y el camino en el cristal:

$$l_o = \frac{Z - L}{\cos \beta_o} + \frac{n_o L}{\cos \theta_o} \quad (3.9)$$

El camino óptico del rayo extraordinario será también la suma del camino en el aire y el camino en el cristal, pero en este caso hay que tener en cuenta que:

- El índice de refracción del rayo extraordinario depende del ángulo de incidencia.
- Se debe aplicar el principio de Huygens para medios anisótropos uniáxicos, puesto que no hay simetría en la dirección del rayo.



$$l_e = \frac{Z-L}{\cos\beta_e} + \frac{n_e(\theta_e)}{\cos\theta_E} \cos(\theta_E - \theta_e) \quad (3.10)$$

La expresión del desfase  $\Delta\varphi$  entre los dos rayos es la diferencia de camino óptico ( $l_e - l_o$ ) multiplicada por el número de onda  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la fuente utilizada.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(l_e - l_o) \quad (3.11)$$

Sustituyendo en la ecuación 3.11 las expresiones de  $l_e$  y  $l_o$  dadas por 3.9 y 3.10 se obtiene el desfase introducido por el cristal en un punto  $Q$  del detector:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{Z-L}{\cos\beta_e} - \frac{Z-L}{\cos\beta_o} + \frac{Ln_e(\theta_e) \cos(\theta_E - \theta_e)}{\cos\theta_E} - \frac{Ln_o}{\cos\theta_o} \right) \quad (3.12)$$

Combinando las ecuaciones 3.3 a 3.8 con la ecuación 3.12, la diferencia de fase se puede escribir en función de los parámetros del sistema. De todas maneras no es posible expresar explícitamente la diferencia de fase  $\Delta\varphi$  en función de la coordenada radial en el plano del detector. Sin embargo, la necesidad de establecer esta dependencia, que vendrá dada en la forma:

$$\Delta\varphi = \sum_{k=0,2,4,\dots}^{+\infty} a_k r^k \quad (3.13)$$

obliga a realizar una serie de cálculos en los que debido a la simetría cilíndrica respecto al eje óptico, se desprecian en la suma anterior los términos de orden impar. De esta forma se obtendría asumiendo un desarrollo hasta orden 2 en  $r$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{Z_o} - \frac{1}{Z_e} \right) r^2 \quad (3.14)$$

Con la aproximación de cuasi-paralelismo, que los ángulos  $\beta_o$  y  $\beta_e$  son pequeños y sus senos pueden aproximarse al valor de los ángulos, la ecuación 3.12 queda

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta n L}{n_e^2 Z_e^2} r^2 \quad (3.15)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left( (Z-L) \left( \frac{1}{\sqrt{1-\sin^2\beta_e}} - \frac{1}{\sqrt{1-\sin^2\beta_o}} \right) + (Ln_o) \left( \frac{n_e}{\sqrt{n_e^2 - \sin^2\beta_e}} - \frac{n_o}{\sqrt{n_e^2 - \sin^2\beta_o}} \right) \right) \quad (3.16)$$

■ *Cálculo del desfase introducido por los polarizadores*

Para determinar la respuesta impulsional  $H(r, z)$  del sistema conoscópico en un punto  $P$  de un objeto, hay que tener en cuenta no sólo el desfase introducido por el cristal  $\Delta\varphi$ , sino también el desfase debido a los polarizadores circulares,  $\Delta\Pi$ . Para facilitar el estudio de este sistema se adopta el formalismo de Jones, que consiste en representar cada componente por una matriz.

Un polarizador circular está compuesto por un polarizador lineal y una lámina de  $\frac{\lambda}{4}$ . Sin embargo, dentro del primer polarizador circular, entre el polarizador

lineal y la lámina  $\frac{\lambda}{4}$  se inserta una lámina de cristal líquido (LCD), que tiene la particularidad de que, si está bajo tensión, hace que la polarización gire  $90^\circ$ . Se comporta entonces como una lámina de media onda orientada a  $45^\circ$  respecto al eje de polarización lineal. Es decir, el polarizador lineal y la lámina de  $\frac{\lambda}{4}$  forman el polarizador circular, mientras que los dos estados de la válvula LCD permite obtener dos polarizaciones con diferencia de media onda.

El desfase  $\Delta\Pi$  introducido por los polarizadores será positivo o bien negativo dependiendo de la tensión del LCD. Así, si la lámina LCD está bajo tensión, la respuesta impulsional conoscópica positiva atendiendo a las ecuaciones 3.2 y 3.15 se expresa por:

$$I_+ = I_o(1 + \cos(\Delta\phi)) = I_o \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta n L}{n_c^2 Z_c^2} r^2 \right) \right) \quad (3.17)$$

Si la lámina LCD está sin tensión, la respuesta impulsional negativa viene dada por:

$$I_- = I_o(1 - \cos(\Delta\phi)) = I_o \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta n L}{n_c^2 Z_c^2} r^2 \right) \right) \quad (3.18)$$

La *Figura 3.5* muestra los hologramas positivo y negativo obtenidos con un dispositivo conoscópico. Se observa que los ruidos ópticos se localizan en los mismos lugares dentro de los dos hologramas.

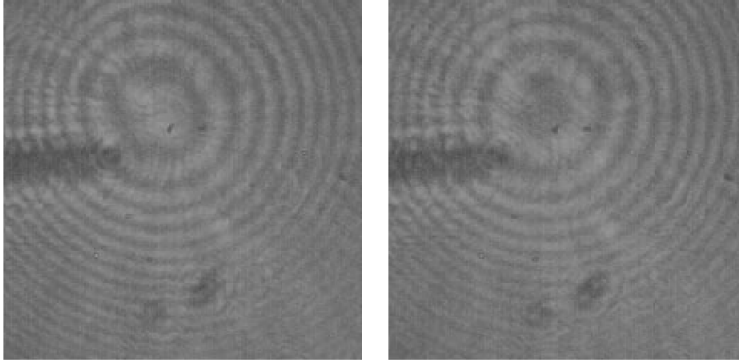


Figura 3.5: Hologramas conoscópicos positivo y negativo.

### Contraste conoscópico

Con el fin de eliminar los ruidos ópticos que alteran los hologramas conoscópicos, se introduce la noción de contraste óptico (*Figura 3.6*), que incrementa notablemente la relación señal/ruido pues desaparecen los términos debidos a la intensidad del punto luminoso ( $I_o$ ):

$$C = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} = \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta n L}{n_c^2 Z_c^2} r^2 \right) = \cos \left( K \frac{r^2}{Z_c^2} \right) \quad (3.19)$$

Como se puede apreciar, el holograma es una función cosenoidal de frecuencia variable con el cuadrado de  $r$  y que varía de forma inversa al cuadrado de la distancia del punto  $P$  al  $Q$ , de lo que se deduce que los puntos más alejados del cristal birrefringente darán lugar a menor número de franjas por unidad de superficie.

### Diferentes formas de calcular el contraste

Existen diferentes formas de calcular el contraste. Si denominamos  $I_+$  a la imagen tomada con el polarizador con tensión positiva e  $I_-$  cuando el polarizador está sometido a tensión negativa tendremos.

- Contraste simplificado:

$$C_s = I_+ - I_-$$

- Contraste normal:

$$C = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}$$

- Contraste antirreflexivo:

$$C_{anti} = \frac{I_+ - I_-}{(I_+ + I_-)^2}$$

- Contraste complejo:

$$C^* = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}$$

$$C_c = \frac{C^*}{\text{abs}(\text{hilbert}(C^*))}$$

El *contraste antirreflexivo* se comporta muy bien en superficies que sean muy reflectantes. El *contraste complejo* es el que mejor señal produce pero presenta el inconveniente de requerir más potencia de calculo, haciéndolo desaconsejable para cálculos en vivo. Por lo general se empleará el *contraste normal* pues es el que mejor señal tiene en relación al tiempo de cálculo.

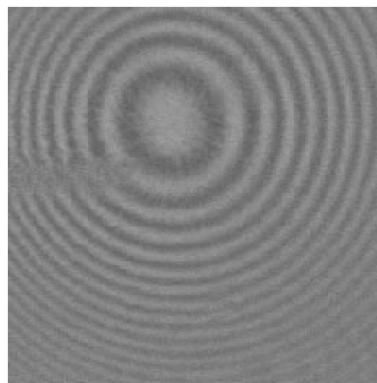


Figura 3.6: Holograma del contraste.

### Holografía de un punto

Conforme se ha visto en los apartados anteriores, el patrón de interferencia observado consiste en un conjunto de franjas concéntricas, donde la intensidad en el punto  $Q$ ,  $I(Q)$ , resultante de la interferencia de los rayos ordinario y extraordinario en el punto  $Q(x', y')$ , se relaciona con la intensidad de su punto  $P$  correspondiente,  $P(x, y, z)$  por medio de la expresión:

$$I(Q) = I(P)(1 + \cos\Delta\varphi) \quad (3.20)$$

Donde  $\Delta\varphi$  está definida en 3.15.

### Holografía de un objeto plano

Si se considera un objeto plano localizado a una distancia  $Z$  del plano de registro  $\Sigma$ , su distribución de intensidad se representa por  $I(x, y)$ . A cada punto  $P(x, y)$  le corresponde en el plano  $\Sigma$  una zona de Fresnel. En el punto  $Q(x', y')$  de  $\Sigma$ , la intensidad resultante es la suma de todas las zonas de Fresnel generadas por cada punto  $P(x, y)$  activo como emisor incoherente. El holograma de un objeto plano de intensidad  $I(x, y)$  viene dado por:

$$H(x', y') = \int \int_{\text{objeto}} I(x, y, z)(1 + \cos\Delta\varphi) dx dy \quad (3.21)$$

Suponiendo que fuera del objeto  $I(x, y)$  es nula, esta expresión pasa a ser una ecuación de convolución

### Holografía de un objeto 3D

Un objeto tridimensional se caracteriza por la ecuación  $z = f(x, y)$ . Cada punto de la superficie contribuye aditivamente al holograma del objeto, que no es más que una simple convolución. El holograma de un objeto tridimensional viene dado por:

$$H(x', y') = \int \int \int_{\text{objeto}} I(x, y, z(x, y))(1 + \cos\Delta\varphi(x, y)) dx dy dz(x, y) \quad (3.22)$$

Esta ecuación puede interpretarse como una suma de convoluciones correspondientes al troceado fino del objeto tridimensional. Quedando la ecuación como una convolución:

$$H(x', y') = I(x, y, z(x, y)) * (1 + \cos\Delta\varphi(x, y)) \quad (3.23)$$

donde  $*$  es el operador convolución. La ecuación anterior corresponde a un sistema lineal cuya respuesta impulsional fuese:

$$R(x', y') = 1 + \cos\Delta\varphi(x, y) = 1 + \cos(\alpha(x^2 + y^2)) = 1 + \cos(\alpha r^2) \quad (3.24)$$

En un sistema conoscópico, cada punto  $P(x, y, z)$  produce en el detector una figura de interferencia de Fresnel. Como la señal obtenida tiene simetría radial -y por lo tanto, cada uno de los radios contiene toda la información de la imagen-, esta figura de interferencia se puede reducir a una línea, como la que se representa en rojo en la *Figura 3.7*. Así, esta señal unidimensional de la que se desea obtener la fase tendrá la forma:

$$S_r(x') = \cos(\alpha x^2) \quad (3.25)$$

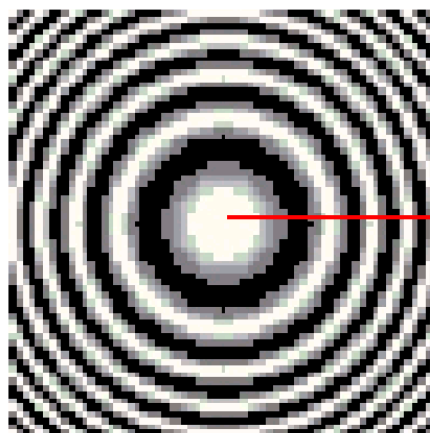


Figura 3.7: Figura Fresnel.

### 3.2. Holografía Conoscópica lineal

Con la configuración vista hasta ahora el interferograma que se obtiene no es lineal, esto es, la variación de fase y frecuencia respecto de la distancia no es lineal. Para soslayar este inconveniente, Gabriel Y. Sirat, Jacob Vetch y Yann Malet propusieron en su patente [29] el uso de dos cristales uniáxicos convenientemente orientados, la *Figura 3.8* representa esquemáticamente la idea de la holografía conoscópica lineal tal como se refleja en la patente. En ella se ven los dos cristales uniáxicos utilizados para obtener un holograma cuya fase, y frecuencia, varía linealmente con la distancia.

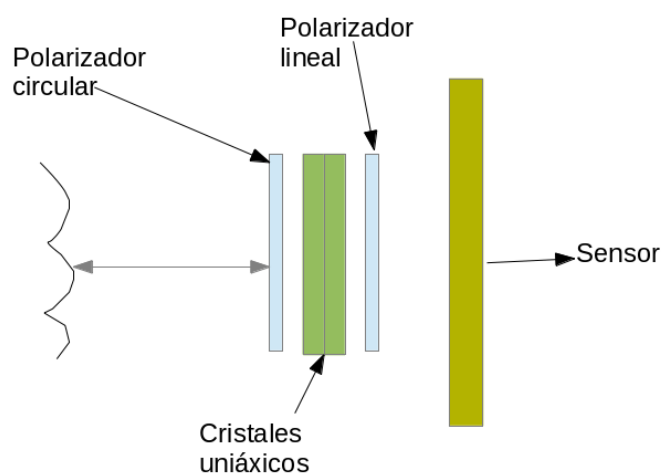


Figura 3.8: Holografía Conoscópica Lineal

En la imagen se coloca un polarizador circular frontal puesto que al utilizar una iluminación láser la luz puede entrar en el cristal uniáxico con una polarización inad-

cuada. A continuación hay dos cristales uniaxiales con los ejes anisotrópicos perpendiculares y un polarizador lineal con una orientación intermedia entre ambos ejes de los cristales, de esta forma se cambia la polarización de los rayos que salen del conjunto de cristales para hacer que coincidan y por tanto puedan formar la interferencia que da lugar al holograma.

En esta configuración se utiliza una pequeña triangulación entre la fuente de iluminación y el sistema conoscópico. Se proyecta una línea láser fina sobre la superficie que se está inspeccionando y por medio de la configuración óptica adecuada cada punto resultado de la intersección de la línea láser con la superficie genera una señal cuya frecuencia es proporcional a la distancia.

### 3.3. El uso de la fase para la medición de distancias

Los sensores comerciales de *Holografía Conoscópica* utilizan una configuración colineal entre la iluminación y el conoscopio. Esto implica que entre el sensor y la superficie estudiada, el camino de los rayos incidente y reflejado es el mismo. La forma tradicional de medir la distancia *Holografía Conoscópica* es mediante la variación de la frecuencia de la señal interferométrica ante cambios de distancia según la ecuación 3.19. Se ha demostrado [30] que la utilización de una pequeña triangulación permite obtener información de fase, con una resolución hasta 10 veces superior a la frecuencia.

#### 3.3.1. Extracción de la fase a partir de un holograma

Para realizar la extracción de la fase a partir de la señal de un holograma es necesario realizar la secuencia de pasos que se explica a continuación:

1. Cálculo del contraste, este paso es opcional y depende de la configuración del sensor, esto es, si permite obtener dos hologramas con un desfase de  $180^\circ$  el cálculo del contraste mejora la calidad de la señal filtrando parte del ruido.
2. Normalizado de la señal, si se ha calculado el contraste en el paso anterior la señal obtenida ya está normalizada, si no se calculó se realiza una normalización convirtiendo la información de los píxeles de la imagen del holograma a valores flotantes y con valores entre -1 y 1 de forma que queda listo para los siguientes pasos.
3. Cálculo del espectro de la señal a través de una Transformada de Fourier discreta de 256 puntos para cada columna del holograma.
4. Obtención de la componente frecuencial principal, realizando una búsqueda de la componente de mayor amplitud en el espectro dentro de la banda de frecuencias de interés.
5. Cálculo de la frecuencia principal a partir del lóbulo alrededor de la componente principal en el espectro.
6. Se debe extraer la frecuencia central, medición en frecuencia, y la fase de la componente senoidal de esa frecuencia, medición en fase.

### 3.3.2. Medición de la calidad del holograma

Para obtener una medida objetiva de la calidad del holograma se utiliza la relación *Señal/Ruido*, si consideramos  $f_i$  como el valor absoluto de cada una de las componentes y  $f_p$  como el valor absoluto de la componente frecuencial principal, se define:

$$SNR = \frac{f_p}{\sum_{i=1}^n f_i}$$

El valor obtenido indica la calidad de la señal en cuanto a su relación con el ruido y que, en general, este será de frecuencias mayores a la principal. Cuanto menor sea el ruido mejor será la calidad de la señal y habrá menor error en el cálculo de la fase. El valor obtenido tendrá un valor máximo teórico de 1 que representará la situación en que la señal es una senoide perfecta.

Durante el diseño y construcción de los sensores se deberá buscar la configuración y ajuste que maximice este valor, la principal consecuencia de esto será un mayor contraste, amplitud, en las franjas del holograma. Esto hará que los cálculos sean más precisos, al más amplitud en el espectro la componente principal de la señal, y por tanto el error introducido por ellos sea menor.

### 3.3.3. La imagen de luminosidad a partir de un holograma

A partir de un holograma es posible obtener una imagen convencional de luminosidad. La componente de luminosidad continua de las franjas de un holograma depende de la reflexión de la luz en la superficie, de la misma forma que funciona la imagen convencional en la que la imagen se forma a partir de la luz reflejada por la superficie. Esta imagen es útil porque además de obtener el mapa de distancias de la superficie permite obtener una imagen convencional de la misma. Esta componente de continua llega al sensor sin sufrir interferencia y por tanto forma una imagen identificable de la superficie. Esto se ha utilizado en el proyecto Surfin comentado en el apartado 1.4. Las imágenes 3.9 y 3.10 muestran respectivamente el mapa de distancias y la imagen convencional de una superficie de un desbaste de acero a alta temperatura en el que hay cascarilla formada durante el enfriamiento. Este tipo de imágenes queda fuera del alcance de esta tesis puesto que no aporta información de distancia necesaria para la medición de rugosidad.

## 3.4. El uso de la Holografía Conoscópica para la medición de rugosidad

Como se ha visto durante la introducción existen numerosas aplicaciones en las que se utiliza la Holografía Conoscópica para la medición de distancias, estas aplicaciones abarcan desde medidas macroscópicas, como por ejemplo la detección de grietas en desbastes de acero, hasta aplicaciones de elevada precisión como la medición de diámetros en engranajes de cajas de cambio para automóviles o en la fabricación de prótesis dentales.

Hasta el momento se ha justificado la utilización de la Holografía Conoscópica por sus características en cuanto a la distancia de trabajo necesaria para alcanzar las resoluciones necesarias. En toda medición con luz coherente aparece el problema del *Ruido*

### 3.4. EL USO DE LA HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA PARA LA MEDICIÓN DE RUGOSIDAD<sup>55</sup>

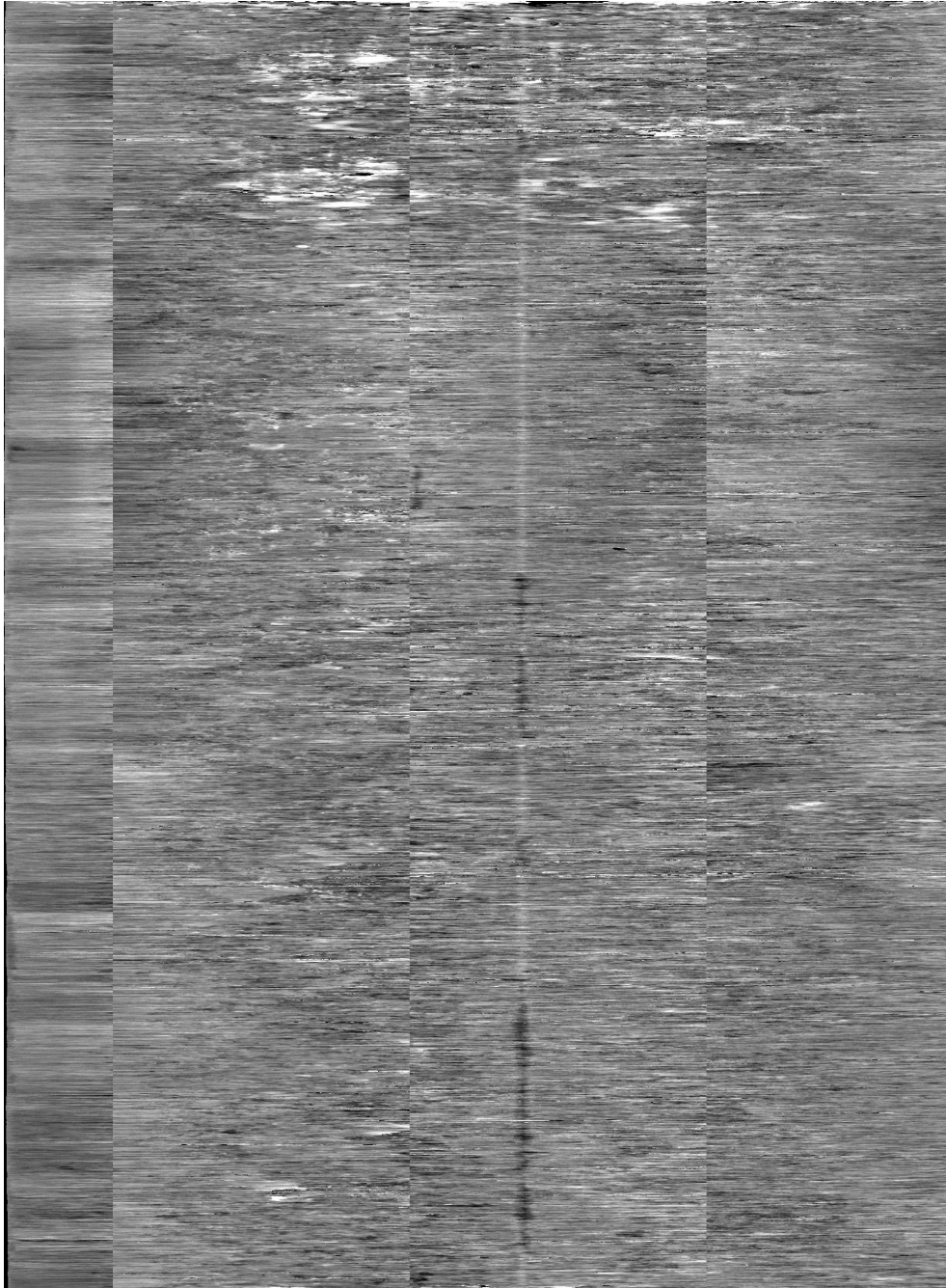


Figura 3.9: Mapa de distancias de la superficie de un desbaste generada a partir de los perfiles de distancia obtenidos con un sensor de holografía conoscópica. La superficie completa está compuesta por los perfiles obtenidos de 4 sensores de Holografía Conoscópica para cubrir el ancho completo del desbaste.



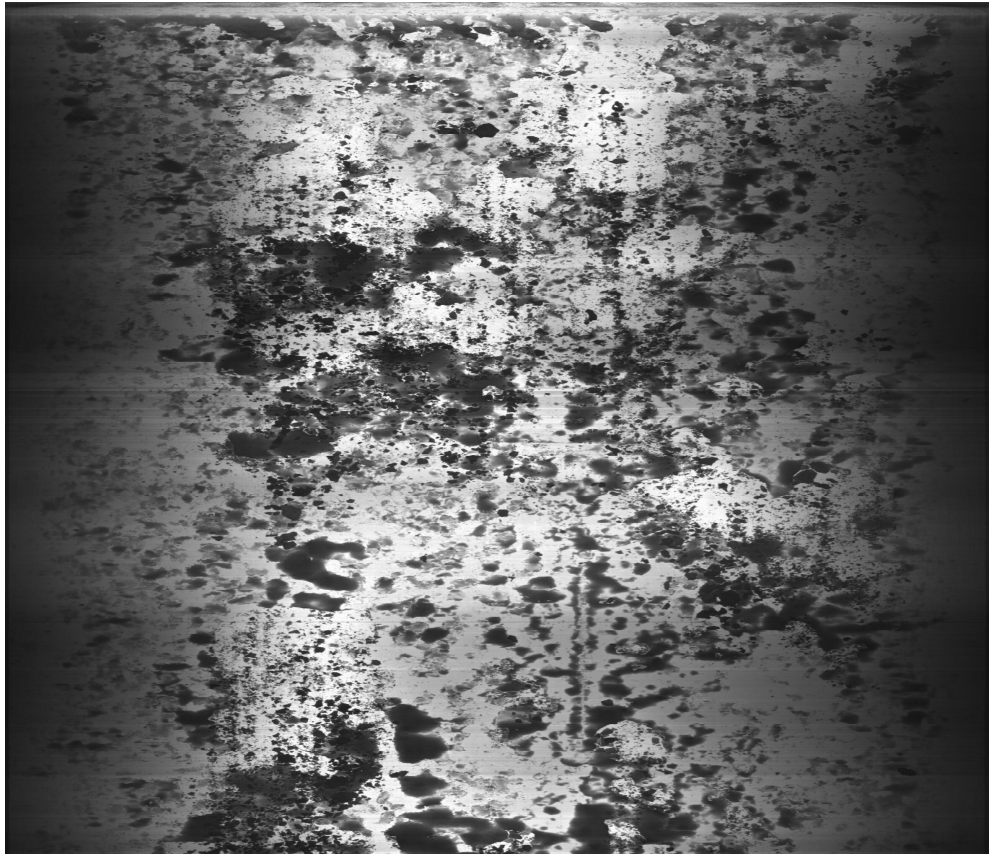


Figura 3.10: Imagen convencional de la misma superficie mostrada en la 3.9.

*Speckle* [31]. A nivel macroscópico, como en los ejemplos anteriores, y con el objeto en movimiento este se promedia y se cancela en su mayor parte. Sin embargo, en medición de rugosidad se desea obtener el perfil de las variaciones de superficie causantes del *Speckle*, por lo que el efecto del mismo no es cancelable, y deben buscarse métodos ópticos para evitar su aparición.

La utilización de la Holografía Conoscópica para la medición de rugosidad presenta un problema importante debido a la presencia del Ruido *Speckle*. En este trabajo se buscan formas para su reducción con la finalidad de mejorar la calidad de los hologramas y por tanto de la resolución de medición sin necesidad de introducir filtrados adicionales. Para reducir el efecto del ruido *Speckle* se debe reducir la coherencia del haz láser utilizado para iluminar el punto o línea que se está midiendo. Un método para conseguirlo es desenfocando el punto o línea pero esto afectaría a la medida con lo que se descarta completamente. Otra forma es generar varios patrones de *Speckle* durante el tiempo de integración del sensor de forma que el ruido de los diferentes patrones se cancele mutuamente; la forma más simple de conseguir esto es hacer pasar el haz láser a través de un difusor que está rotando a alta velocidad y enfocándolo nuevamente. El difusor introducirá retardos pseudoaleatorios en el frente de ondas con lo que las interferencias generadas por los patrones *Speckle* tenderán a cancelarse. En el siguiente capítulo se verán los efectos de este método de reducción de ruido *Speckle* sobre un punto.

Un método más elaborado para la reducción de ruido *Speckle*, como se propone en [32], consiste en utilizar elementos ópticos que provocan difracción en el haz, DOE en sus siglas en inglés, están formados por una o más rejillas convenientemente diseñadas para generar varios caminos ópticos simultáneamente que den lugar a otros tantos patrones de ruido *Speckle* que tiendan a cancelarse. En [33] se propone un método de reducción de ruido *Speckle* consistente en reflejar la luz sobre dos espejos montados en dos elementos piezoeléctricos vibrando a alta frecuencia, el objetivo nuevamente es obtener una variación temporal de los ángulos de incidencia del haz en la superficie para que los patrones de ruido *Speckle* se cancelen durante el tiempo de integración del sensor.

Otro aspecto que se trata en este trabajo es el diseño de la configuración óptima del sensor para la medición de distancias con precisiones mejores que un micrómetro, se tratan los aspectos que afectan a la configuración del holograma, número de franjas, etc. También se trata en este trabajo, como se verá en el apartado 3.5.1, la mejora del procesamiento para obtener mejores resoluciones.

### 3.5. Holograma de un perfil

Para la medición de rugosidad en un proceso on-line resulta importante poder adquirir un perfil de distancias completo en una sola imagen, esto permite inmunizar el sistema respecto de las vibraciones y variaciones absolutas de distancia que podrían distorsionar el perfil sobre el que se calculan los parámetros de rugosidad.

Para obtener un perfil completo con *Holografía Conoscópica*, al igual que con muchas otras tecnologías como la triangulación láser, será necesario proyectar una línea

láser en vez de un único punto, de esta forma se obtendrá una imagen como la mostrada en la imagen 3.11 en el que cada columna corresponde a la distancia a un punto del perfil, de esta forma de obtiene un perfil de distancias en una sola imagen.

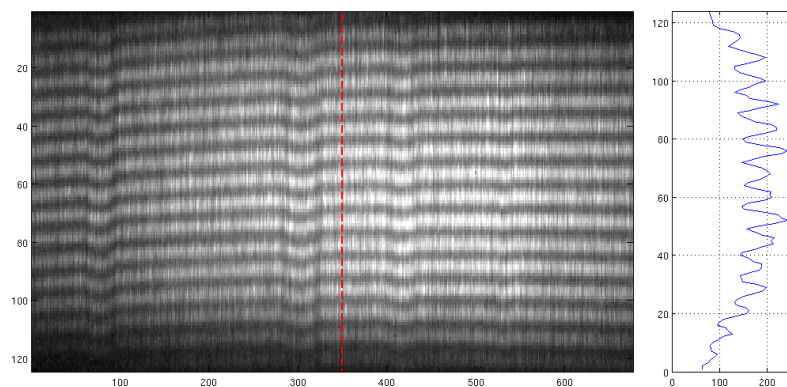


Figura 3.11: Holograma correspondiente a un perfil de distancias, a la derecha se muestra una columna del holograma que corresponde a un punto de la línea.

El proceso de cálculo sobre este holograma consiste en aplicar los pasos explicados en el apartado 3.3.1 a cada una de las columnas, por tanto si la imagen tiene 1000 puntos, por ejemplo, será necesario realizar otras tantas FFT y aplicar los correspondientes Goertzel, con lo que se obtendrá un perfil de fase que se convierte directamente a un perfil de distancias relativas, figuras 3.12 y 3.13.

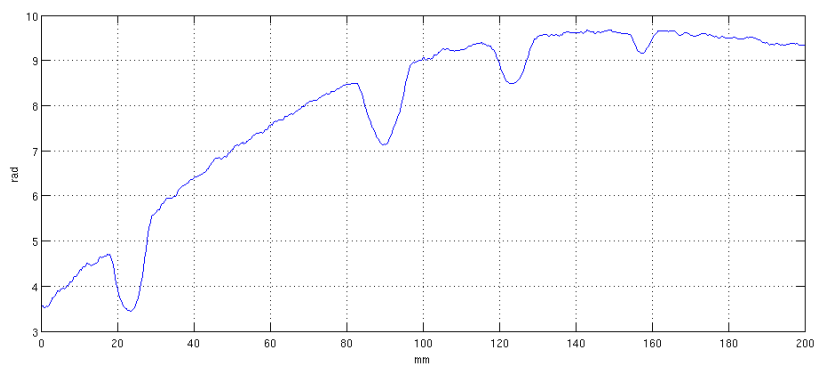


Figura 3.12: Perfil de fases obtenidas a procesar el holograma de un perfil.

Además de los perfiles anteriores también se obtienen los perfiles de frecuencia, figura 3.14, y de SNR, figura 3.15; el primero es una indicación de la distancia absoluta del sensor a la superficie, aunque esta medida no es tan precisa como la fase puesto que las variaciones de frecuencia son muy pequeñas; el segundo, como se comentó anteriormente, es una indicación de la calidad de la señal obtenida.

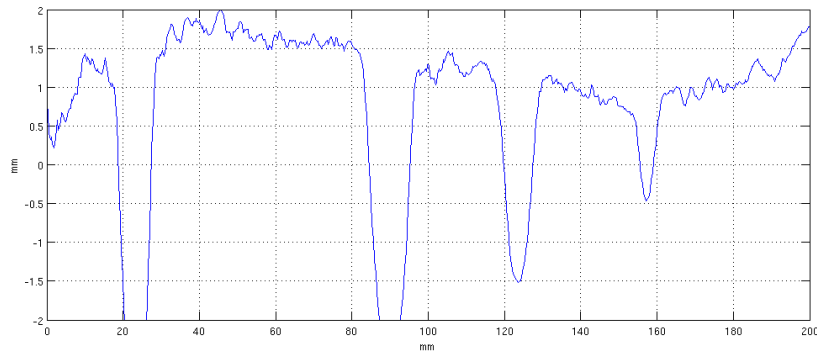


Figura 3.13: Perfil de distancias relativas calculado a partir del perfil de distancias anterior, la diferencia entre ambos perfiles reside en las unidades, mientras que la fase se representa en radianes la distancia está representada en milímetros.

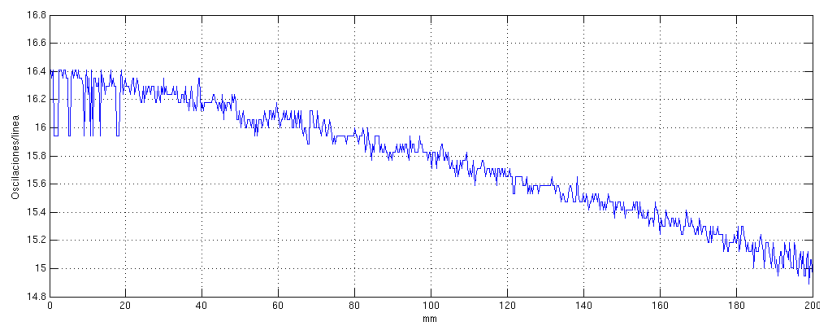


Figura 3.14: Perfil de frecuencia que ofrece una indicación de la distancia absoluta del sensor a la superficie inspeccionada.

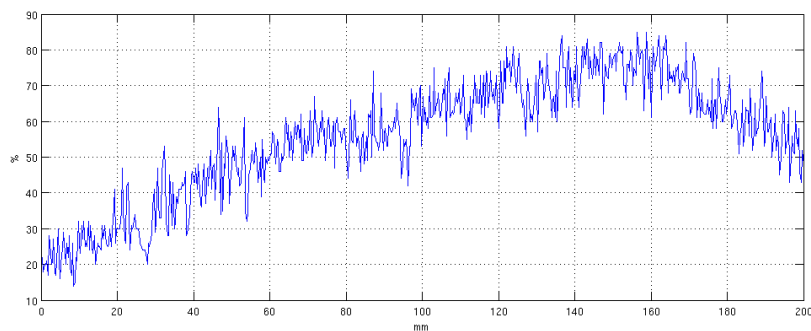


Figura 3.15: Perfil de SNR que ofrece una indicación de la calidad de la señal obtenida, esta indicación es porcentual.

Comparando el perfil de SNR de la figura 3.15 con el holograma original de la imagen 3.11 se observa que el punto de mayor valor de SNR, que corresponde a la mejor calidad de señal, coincide con la zona del holograma donde existe una mayor amplitud de las senoides verticales, la senoide tiene mejor contraste por lo que al calcular la FFT la componente frecuencial principal tendrá proporcionalmente mucha más energía que el resto del espectro. Por otro lado en la zona izquierda del holograma el contraste de la senoide es más pobre y por tanto la amplitud mucho menor, esto se traduce en un espectro en el que la componente principal tendrá menos energía comparada con el resto de las componentes debidas al ruido.

Se habla de perfil de distancias relativas puesto que utilizando la información de fase no es posible obtener un valor de distancia absoluto, solamente la relación entre un punto y el siguiente. Cuando hay un cambio brusco de distancia en un perfil puede ocurrir que la variación de fase sea tal que el algoritmo no sea capaz de determinar la posición relativa entre dos puntos. Por otro lado si una superficie tiene una ligera inclinación, en la que por ejemplo la fase va creciendo, al alcanzar un valor de  $\pi$ , si la superficie fuese completamente lisa, el siguiente punto tomaría el valor de  $-\pi$  y por tanto para obtener el perfil real será necesario realizar un despliegue de fase con el que los puntos que se encuentran a una distancia de, aproximadamente,  $2\pi$  se moverán ese valor para producir la continuidad necesaria en el perfil. En las figuras 3.16, 3.17 y 3.18 se ve la secuencia en la que se parte de un perfil sin corregir los saltos de fase, se realiza el despliegue de la misma y por último se elimina la tendencia para que puedan ser observables los detalles de distancia.

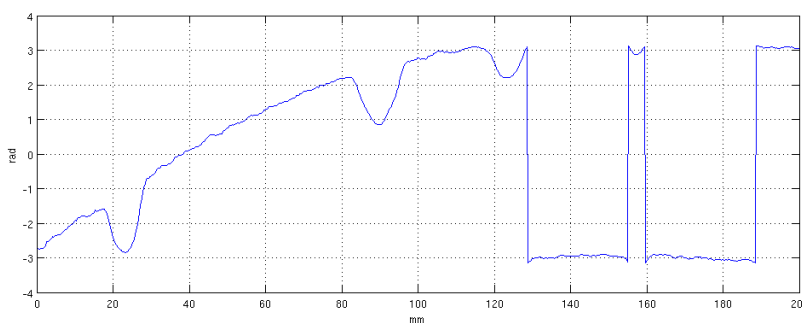


Figura 3.16: Perfil de fase sin corregir los saltos de  $2\pi$ .

### 3.5.1. Cálculo de la fase en un punto distinto del primer píxel de la señal

Tradicionalmente se toma como valor de fase calculado el obtenido para cada componente frecuencia directamente del cálculo de la FFT, este valor es el correspondiente al primer píxel de la señal. Este punto, cuando la señal no está perfectamente libre de ruido, introduce un error en el valor calculado. Se puede mejorar este resultado si se toma como punto de referencia para el cálculo de la fase el centro del holograma. El centro del holograma no tiene porqué corresponderse con el centro de la señal capturada, esto es debido a que por motivos constructivos y de alineación el sensor puede estar desplazado respecto del centro del holograma.

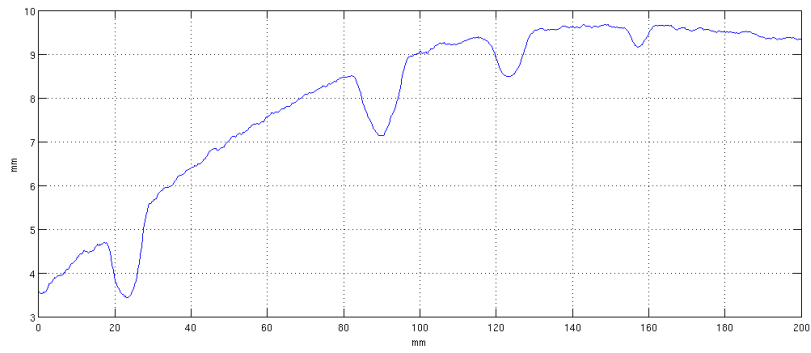


Figura 3.17: Perfil de fase desplegada sin eliminar la tendencia.

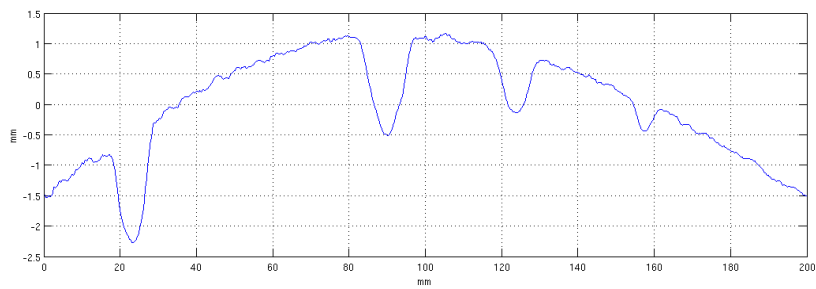


Figura 3.18: Perfil de fase desplegada y con la tendencia eliminada.

Por otro lado, la frecuencia no es constante a lo largo del holograma por lo que el valor de la fase depende del punto donde se calcula.

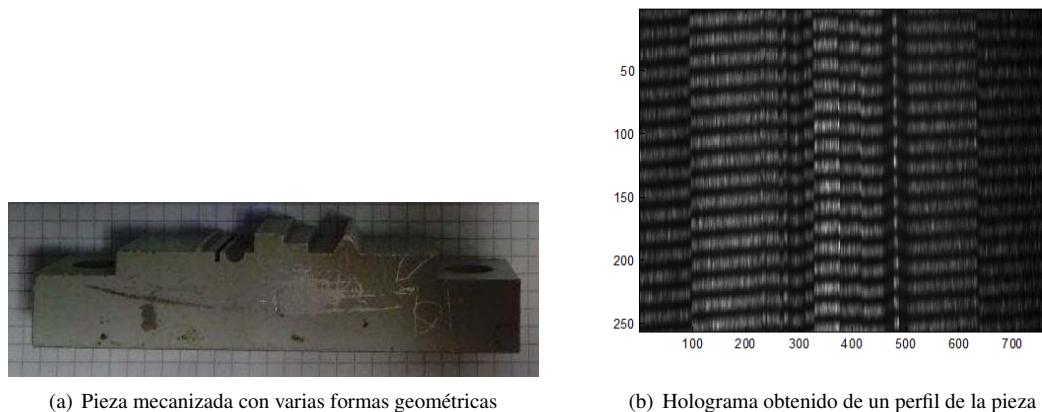


Figura 3.19: Pieza de calibración y holograma obtenido de su perfil.

En la *figura 3.19* se muestra la imagen de una pieza con diversas formas geométricas y el holograma obtenido. El holograma de la *figura 3.19(b)* se ha procesado y calculado la fase para reconstruir el perfil tomando como punto de referencia el punto inicial de la señal, *figura 3.20(a)*, y el punto central del holograma, *figura 3.20(b)*. Observando ambas figuras se ve que el nivel de ruido es sensiblemente menor en la segunda, lo que permitiría distinguir detalles con menor variación de distancia.

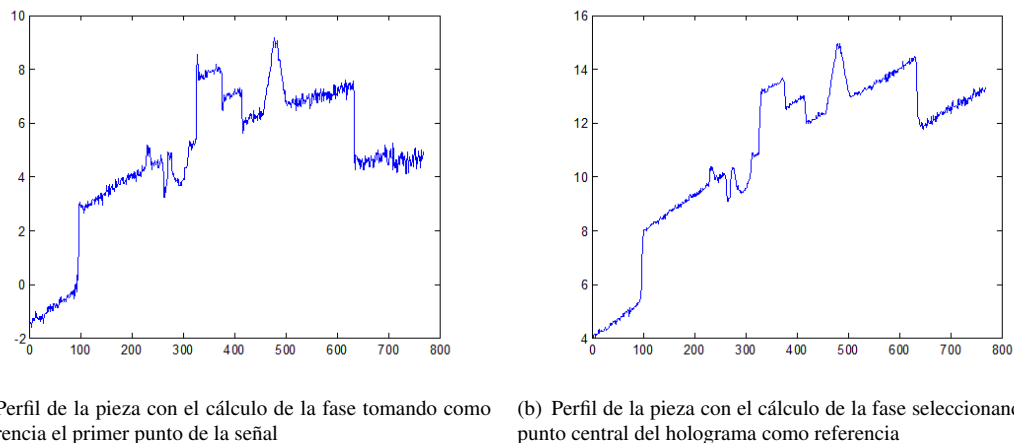


Figura 3.20: Comparación del nivel de ruido en la medición del perfil del holograma 3.19 en función del punto inicial tomado para el cálculo de la fase.

Para facilitar la realización de estos ensayos, se llevaron a cabo sobre un prototipo a nivel macroscópico, esto permite comprender como funciona y como varía la resolución obtenida de forma más sencilla puesto que los detalles microscópicos no afectan a la medida. Para realizar el mismo test a nivel microscópico será necesario disponer

de una superficie lisa, como podrían ser una oblea de silicio, de forma que se pueda medir el nivel de ruido en la señal de fase. Luego estos resultados deberán contrastarse utilizando un patrón con la superficie conocida a nivel microscópico.

Se han realizado, durante el desarrollo de esta tesis, ensayos y se ha comprobado, cambiando el punto de cálculo, que la relación señal/ruido variaba dependiendo del punto seleccionado. Se ha buscado entonces el que proporciona la mejor relación señal/ruido y este punto acaba correspondiendo al camino óptico del montaje. En base a estos ensayos se ha deducido en este trabajo la expresión que permite corregir y determinar el punto óptico para el cálculo de la fase. A continuación se detalla el proceso diseñado para determinar el punto óptico para el cálculo de la fase y la expresión matemática que permite realizar el cálculo en dicho punto.

Para realizar la corrección y calcular la fase tomando como pixel inicial otro distinto se sigue la siguiente expresión: si se considera como  $fn_0$  como la frecuencia normalizada de la componente principal y  $pixel$  como el pixel de referencia que se toma para el cálculo de la fase y  $fase_0$  la fase calculada con la FFT para la componente principal, el cálculo de la fase según este método sigue la siguiente expresión matemática:

$$fase_{nueva} = fase_0 + resto\left(\frac{fn_0 * pixel}{2 * \pi}\right)$$

El valor del pixel puede tomar valores negativos o superiores a la longitud de la señal utilizada para el cálculo de la FFT y el valor óptico de este valor corresponde con el centro de la señal o el punto donde la señal tiene menos ruido.

La búsqueda del pixel central del holograma, que resulta el óptico para el cálculo de la fase, se realizará mediante el cálculo de la desviación estándar del ruido según el punto inicial de fase elegido. Para una superficie plana, el punto óptico es aquél para el que se obtiene una desviación mínima. Por ejemplo si se considera la zona entre los milímetros 100 a 300 del holograma de la imagen 3.11, en esa superficie plana se calcula la desviación estándar que proporciona una indicación del ruido de medida; se realiza este proceso con cada uno de los pixels iniciales y se obtiene el punto donde esta desviación estándar alcanza su valor mínimo. La figura 3.21 muestra la evolución de la desviación estándar de esta superficie plana en función del punto tomado como referencia para el cálculo de la fase. Se puede observar que, a pesar de que, la imagen tiene 128 filas, es decir cada senoide tiene 128 puntos, el punto óptico se encuentra en el punto 190, esto indicaría que el sensor no está centrado en el camino óptico formado por el conoscopio.

La figura 3.22 muestra una comparación de la fase de la superficie plana anterior calculada para los puntos iniciales 50 y 190. En la figura 3.23 se muestra el perfil completo de una superficie con varias marcas, el sensor está configurado para 800mm de distancia de trabajo, esta configuración no es la más adecuada la medición de rugosidad pero sí resulta útil cuando se desea determinar el grado de ruido de un perfil comparado con unos defectos conocidos y medidos. Las marcas tienen una profundidad de 1mm, 0.5mm, 0.25mm y 0.1mm (a la derecha). Comparando ambos perfiles, el calculado fuera del punto óptico de referencia de fase muestra un ruido con una amplitud próxima a 0.5mm, mientras en el perfil calculado en el punto óptico se puede apreciar la marca de 0.1mm, aproximadamente en la posición 190mm del eje X.



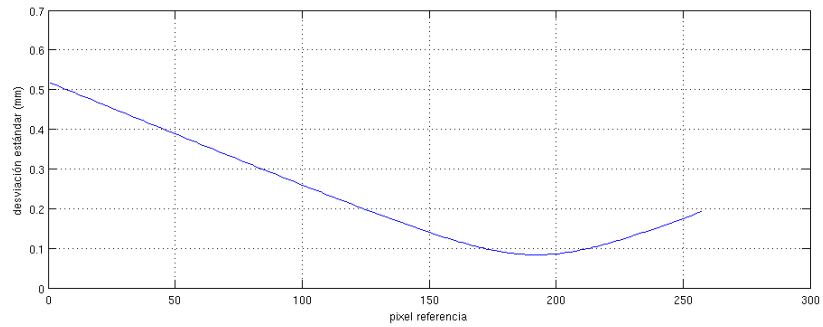


Figura 3.21: Desviación estándar de la distancia en la medición de una superficie lisa.

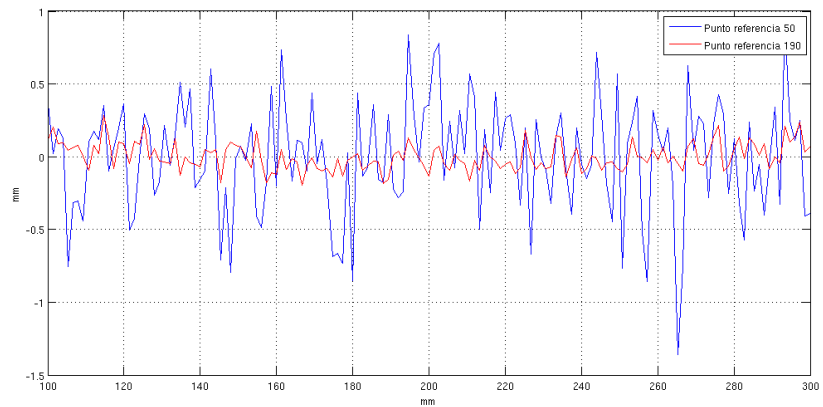


Figura 3.22: Comparación del perfil de distancias de una superficie plana tomando como punto de referencia un punto cualquiera, el 50, y el punto de fase óptimo, el 190, según la figura anterior.

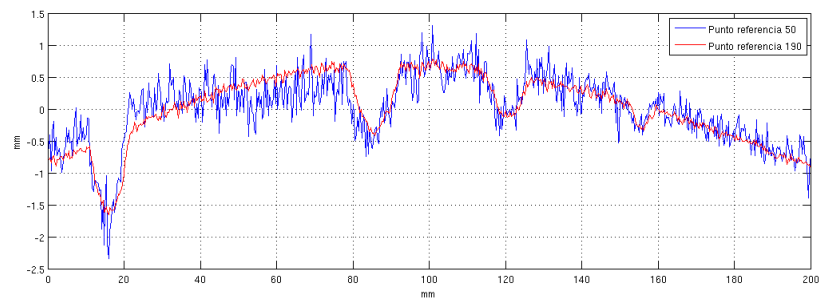


Figura 3.23: Comparación del perfil completo de distancias de una superficie tomando como punto de referencia un punto cualquiera, el 50, y el punto de fase óptimo, el 190, según la figura anterior.

### 3.5.2. Filtrado de los hologramas

En las aplicaciones industriales donde las condiciones difieren mucho de las de un laboratorio el ruido presente en un holograma puede arruinar completamente las medidas o cuando menos reducir considerablemente la resolución obtenida en las medidas.

Para eliminar el ruido es posible utilizar las técnicas convencionales de filtrado en 1 ó 2 dimensiones, no obstante el uso de filtros orientables permite no solamente eliminar el ruido de cualquier naturaleza sino también mejorar la calidad de la imagen sin alterar la información relativa a la distancia. Este tipo de filtros han sido estudiados en el grupo de investigación de Visión Artificial del departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y de Sistemas de la Universidad de Oviedo y los resultados se encuentran en el artículo [34] y en las Tesis Doctorales de Jose María Enguita [4] y Yolanda Fernández [5].

### 3.5.3. Grados de libertad en el diseño de un sensor de Holografía Conoscópica

A la hora de diseñar un sensor de Holografía Conoscópica con unas determinadas características, hay varios elementos ópticos del sensor que influyen en su comportamiento. Se verá a continuación la influencia de estos elementos:

- **Cristal Uniáxico**, el espesor del cristal uniáxico determina la separación de los rayos ordinario y extraordinario que producirán la interferencia. Aumentando el espesor del mismo aumenta la frecuencia de las franjas del holograma. Una frecuencia excesivamente baja provocará que en el cálculo de la Transformada de Fourier la componente principal esté muy cerca de la componente de continua del holograma haciendo además que la variación de fase con la distancia sea muy lenta. Esto es porque la distancia es proporcional en primer lugar a la frecuencia y a medida que la frecuencia aumenta o disminuye lo hace más rápidamente la fase. Si la frecuencia es baja, proporcionalmente la fase variará más lentamente que si la frecuencia es más elevada. Por otro lado una frecuencia excesivamente alta provocará que la fase varíe excesivamente rápido con la distancia, esto que a priori parece una ventaja se convierte en un problema cuando el objeto examinado tiene variaciones bruscas en su superficie lo que provocará situaciones de incertidumbre en el momento de realizar el despliegue de la fase y por tanto ambigüedades en la medición de distancia.
- **La lente cilíndrica**, la frecuencia de las franjas queda fijada, como se vio en el punto anterior, por el espesor del cristal uniáxico, la lente cilíndrica es la encargada de formar la imagen en el sensor, con ella se puede variar virtualmente la frecuencia de las franjas, aunque no la variación de fase con la distancia. Además tiene la función de extender el holograma para que ocupe toda la región de interés del sensor y de que al variar la distancia el holograma siga ocupando toda la región de interés del sensor. Por otro lado esta lente ayuda a corregir el camino óptico seguido por la luz cuando existe una pequeña desalineación entre el cristal uniáxico y el sensor.
- **El sensor**, el tamaño de pixel del sensor influye igualmente en la frecuencia capturada, aunque no en la variación de frecuencia y fase con la distancia. Esto es porque cuando el tamaño del pixel se hace más grande, para el mismo tamaño

de imagen formado por la óptica, toma más área de holograma, y por tanto más ciclos de la senoide formada, por otra parte se reduce el número de pixels por ciclo. Por tanto la frecuencia que “ve” el sensor es mayor que con un tamaño de pixel menor.

- **Ángulo de triangulación**, otro parámetro que influye en la resolución y variación de la fase con la distancia es el ángulo de triangulación, en el próximo capítulo se verá como este ángulo puede hacer que la fase varíe más rápidamente con la distancia cuando el ángulo formado entre la iluminación y el conoscopio aumenta, por otro lado al aumentar esta variación, si la superficie presenta variaciones bruscas de altura se pueden producir puntos de incertidumbre donde no sea posible distinguir si la superficie sube o baja. Además al aumentar el ángulo de triangulación si la superficie presenta agujeros habrá zonas que queden ocultas al sensor.

### 3.6. Conclusiones

En este capítulo se ha introducido la teoría en la que se basa la *Holografía Conoscópica* tanto en la configuración puntual como la extensión a la configuración lineal que permite obtener un perfil en cada imagen. A continuación se ha visto la configuración óptica necesaria que permite generar un holograma.

Una vez capturado un holograma, utilizando un elemento sensor como puede ser un CCD, se explica la secuencia habitual de operaciones que es necesario realizar para llegar a obtener la información de distancia; desde el filtrado del holograma, el cálculo de la frecuencia principal y el cálculo de la fase para la componente frecuencial principal.

Como aportación de esta tesis se han realizando diversos experimentos y se ha comprobado que la relación Señal/Ruido mejora cuando se elige como punto para el cálculo de la fase el centro del holograma que corresponde al eje óptico del conjunto. Como resultado se ha diseñado el proceso de cálculo del punto óptimo para el cálculo de la fase y la aplicación posterior del cálculo de fase en ese punto 3.5.1. Se ha comprobado con varios ejemplos que el perfil resultante tiene una mejor relación Señal/Ruido que utilizando el punto inicial de la fase como se hacía hasta ahora. Esta aportación para el cálculo de la fase supone un avance en la mejora del procesamiento y configuración del sensor puesto que es posible obtener un perfil de distancias con mejor calidad sin necesidad de buscar una colocación óptica de los elementos en cuanto al camino óptico de la luz, permitiendo además obtener señales con menos ruido y por tanto mejorar la resolución alcanzable.

Además de lo anterior se ha desarrollado el cálculo de la imagen de luminosidad a partir del holograma partiendo de la componente continua del holograma de cada punto, esto hace que el sensor conoscópico se comporte como una cámara lineal perfectamente sincronizada en el espacio y por tanto generando imágenes de luminosidad que facilitan la identificación de detalles en la superficie obtenida.

Por último se han estudiado los diferentes elementos y parámetros de configuración de los sensores de holografía conoscópica y como influyen en la resolución que se puede alcanzar, los problemas que presentan cuando se llevan a valores extremos y por

tanto la necesidad de buscar una configuración que cumpla las requerimientos para la aplicación que se está estudiando. Estos detalles se estudiarán en el siguiente capítulo donde se buscará la configuración más adecuada para la aplicación que se está estudiando.



## Capítulo 4

# CONFIGURACIÓN DEL SENSOR

Como se ha visto visto en la introducción, el objetivo de este trabajo es el diseño de un sensor para la medición de rugosidad, esto implica el diseño de un sensor que proporcione, por un lado, resoluciones submicrométricas en la medición de distancias; para la medición de rugosidades en el entorno de  $5\mu m$ , valor muy habitual en la producción, por ejemplo, de chapa para automoción, será necesario que el sensor sea capaz de resolver distancias de  $0.5\mu m$ . Por otro lado, puesto que la finalidad de uso del sensor es el sector industrial en procesos continuos, la distancia de trabajo deberá ser suficiente como para evitar colisiones a la vez que la profundidad de campo deberá ser suficiente para asegurar un trabajo en la mayoría de circunstancias de la línea puesto que, en general, el posicionamiento del objeto no es tan preciso como puede serlo en un equipo de laboratorio; se puede fijar esta distancia entre 50 y 80 milímetros, esto proporciona un espacio suficiente para la colocación de algún tipo de protección en forma de escudo que proteja el equipo.

En los capítulos anteriores se han estudiado por una parte los parámetros que caracterizan la calidad de una superficie en cuanto a su rugosidad y los diferentes sistemas de medición de rugosidad existentes. Por otro lado, se ha seleccionado la Holografía Conoscópica como la tecnología que soluciona los problemas que se encuentran con las tecnologías existentes y se ha estudiado el principio de funcionamiento de esta técnica así como los parámetros que caracterizan su funcionamiento. Además se ha introducido el flujo de procesamiento que es necesario seguir para obtener la información de distancia a partir del holograma obtenido.

En el desarrollo de la configuración adecuada para el sensor de Holografía Conoscópica con resolución submicrométrica, es necesario estudiar en detalle y proponer soluciones que mejoren los siguientes aspectos:

- **Rama de iluminación:** reducción de ruido Speckle, generación de una línea óptica (intensidad y ancho estable en toda su longitud).
- **Rama de adquisición:** determinación de óptica necesaria, cilindros de generación de holograma, cristal uniaxial (si sólo se dispone de uno, ya se dirá después), CCD.

- **Posición relativa entre ambas ramas:** configuración en triangulación frente a colineal, estudio del ángulo óptimo de triangulación.
- **Procesamiento de la señal y calibración**

#### 4.0.1. Configuraciones posibles del sensor

Con todo lo anterior, en este capítulo se buscará la configuración que cumpla las especificaciones para un sensor para la medición de rugosidad. En una configuración típica de un sensor de holografía conoscópica, comercial, se puede hablar de dos subsistemas, por un lado se encuentra el subsistema o rama de iluminación y por otro lado el conoscopio encargado de generar la interferencia que da lugar al holograma que contiene la información de distancia. Estas dos ramas pueden estar colocadas de forma colineal, utilizando para ello un beamsplitter, para hacer que el camino de ida y vuelta del haz de iluminación sea colineal, o formando una triangulación, en el que la rama de iluminación y el conoscopio forman un cierto ángulo, este ángulo. En las figuras 4.1(a) y 4.1(b) se muestran los esquemas de ambas configuraciones. La configuración colineal

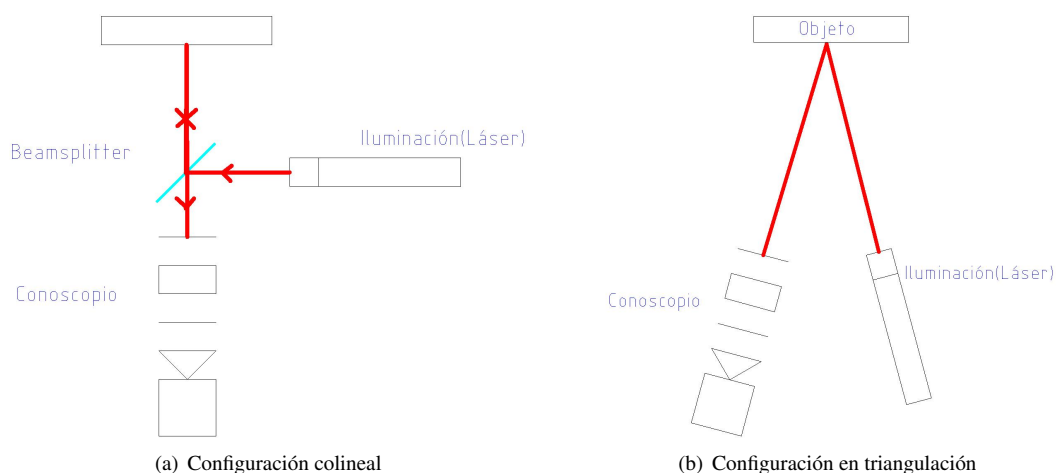


Figura 4.1: Configuraciones posibles del sensor de holografía conoscópica

es adecuada para la inspección en el interior de orificios o el uso con periscopios que permitan inspeccionar y medir las paredes de dichos orificios, esto no es posible con una configuración en triangulación que por otra parte presenta ventajas en cuanto a la resolución alcanzable como se verá más adelante.

Por otra parte la necesidad de utilizar un beamsplitter en la configuración colineal implica una pérdida significativa de luz puesto que en el camino de ida, desde la fuente láser al objeto inspeccionado, se pierde un 50 % de luz y en el rayo reflejado se pierde otro 50 % lo que implica que como máximo el sensor recibirá un 25 % de la potencia original.

En este capítulo se discutirá la utilización de la fase para la medición de distancia, teniendo en cuenta los inconvenientes que presenta esta debido al despliegue de la misma en tramos de  $2\pi$ . A continuación se verán los detalles de la generación de la línea láser,

Frecuencia (Cpl)	Fase (Radianes)
12.0	-0.693
12.2	0.227
12.4	0.687
12.6	1.147
12.8	1.607
13.0	2.528

Tabla 4.1: Fases de las componentes principales de hologramas con frecuencias centrales crecientes

los problemas que se presentan por la utilización de un láser, las soluciones existentes para minimizarlos y la solución propuesta en este trabajo. Por último en la parte óptica de generación del holograma se estudiará la influencia de los distintos elementos en la generación del holograma y como afectan a la resolución del sensor fijando finalmente la configuración más adecuada para la aplicación fijada en este trabajo.

## 4.1. Medición de distancias utilizando la fase

Como se vió en el capítulo 3, el uso de la fase para la medición de distancia en los sensores con una configuración en triangulación mejora sensiblemente la resolución teórica que es posible alcanzar. En este apartado se verá la influencia del ángulo de triangulación en las resoluciones obtenidas, se verá igualmente que el ángulo de triangulación está limitado por otro tipo de factores de tipo funcional.

La interferencia producida por el conoscopio, como se vio previamente, da lugar a una onda senoidal, puesto que dicha senoide se desarrolla en el espacio se utilizará para la frecuenciart la unidad de *Ciclos Por Línea* (Cpl)

En la *tabla 4.1* y en la *figura 4.2* se pueden ver las fases de las componentes principales en variaciones de frecuencia de 0.2 Cpl para una senoide pura, estas variaciones, como se verá más adelante, son mucho menores que en una configuración en triangulación del sensor. La variación de fase para un incremento en la frecuencia de 0.1 Cpl es de 0.644 radianes.

Por lo visto hasta ahora, en las configuraciones colineales, se utiliza la frecuencia para el cálculo de la distancia puesto que la mejora en resolución aportada por la fase no es significativa y además se encuentra el inconveniente del gradiente máximo que se puede medir y que, además, la medida no es absoluta sino relativa debido a los despliegues de fase de  $2\pi$ .

En la configuración en triangulación la variación de fase es mucho más rápida que la frecuencia, proporcionalmente, para una misma variación de distancia, respecto a la configuración colineal, como contrapartida aparece una limitación en cuanto al gradiente máximo que se puede detectar puesto que la fase toma valores periódicos entre  $-\pi$  y  $+\pi$  Este gradiente máximo viene determinado por la: *Longitud de onda equivalente*, que se define como la variación en distancia que produce un cambio en la fase



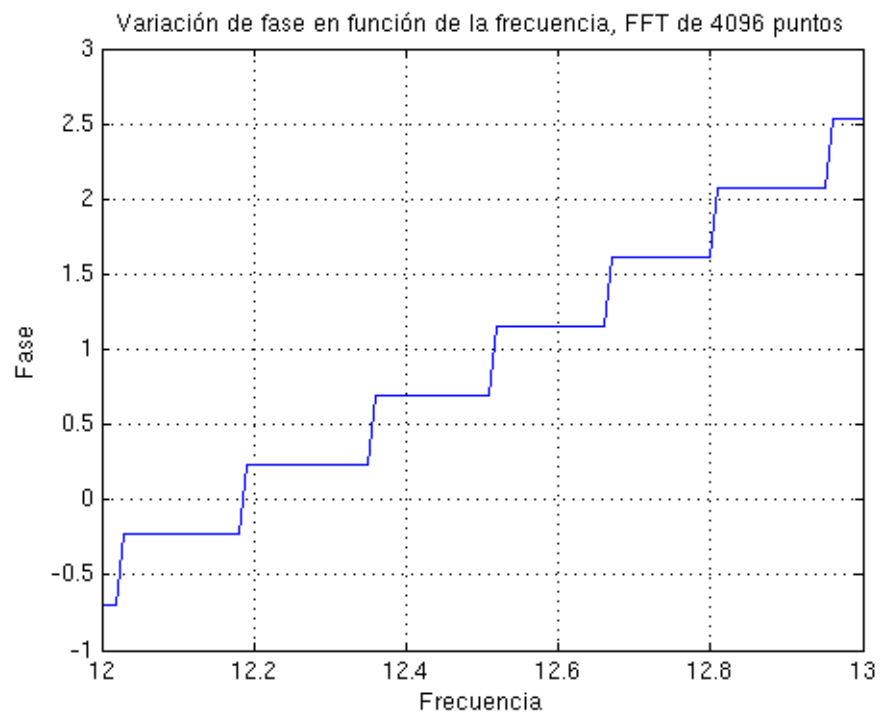


Figura 4.2: Variación de la fase en función de la frecuencia utilizando una FFT de 4096 puntos. Se puede ver la incertidumbre en el cálculo de la fase debida a la poca variación de la misma respecto de la frecuencia.

Frecuencia (Cpl)	Fase (Radianes)
9.0744	-1.7158
9.0774	-1.5734
9.0804	-1.4311
9.0834	-1.2888
9.0865	-1.1465
9.0895	-1.0042

Tabla 4.2: Fases de las componentes principales de hologramas para la configuración en triangulación

equivalente a  $2\pi$  Otra limitación del uso de la fase para la medición de distancias es que no permite obtener un valor absoluto de la distancia, puesto que la fase toma valores periódicos, para obtener una medición absoluta es necesario hacer uso del valor de frecuencia y combinar ambas medidas. Por otro lado, cuando se utiliza la Holografía Conoscópica para la reconstrucción de superficies, que no tengan saltos mayores que la mitad de la longitud onda equivalente, las medidas relativas aportan toda la información necesaria, este es el caso de la medición de rugosidad en el que la medición de los parámetros que caracterizan a la superficie se hace sobre la topografía de la misma.

En la *tabla 4.2* y en la *figura 4.3* se muestran los valores de variación de la fase con la frecuencia en una configuración en triangulación, utilizando una FFT de 4096 puntos. La variación equivalente de fase para una variación en frecuencia de 1Cpl es de 47.136 radianes, esto significa más de un orden de magnitud respecto a la configuración colineal. Además se puede ver que la variación en la fase es significativamente más lineal que en el caso de la configuración lineal.

A la vista de los resultados anteriores y a pesar de las limitaciones en cuanto a no poder realizar una medición absoluta de distancias y no poder detectar variaciones bruscas de distancia, la configuración con un ángulo de triangulación se presenta como la más adecuada puesto que permite obtener mejores resoluciones utilizando el cálculo de variación de fase.

## 4.2. Rama de iluminación

A pesar de que la Holografía Conoscópica no necesita luz coherente para generar los patrones de franjas, solo es necesario luz pseudomonocromática, se utiliza un generador láser para obtener un rayo pseudomonocromático colimado. Esto es debido a que conseguir, partiendo de una fuente de iluminación no coherente, un haz pseudomonocromático y colimado es muy complicado y presenta unas elevadas pérdidas de luz siendo necesarias fuentes de elevada potencia y conjuntos de lentes complejos para colimar el haz resultante. Por esta razón, en los sensores comerciales este subsistema se limitaba a un diodo láser con las lentes necesarias para lograr enfocar el haz en un punto o línea, la luz obtenida así es coherente, y útil para trabajar en Holografía Conoscópica, y en general se comporta adecuadamente con un número elevado de superficies de diversa naturaleza, con objetos en movimiento y realizando medidas “macroscópicas”. Pero al disminuir la dimensión de los detalles que se quieren examinar, como en

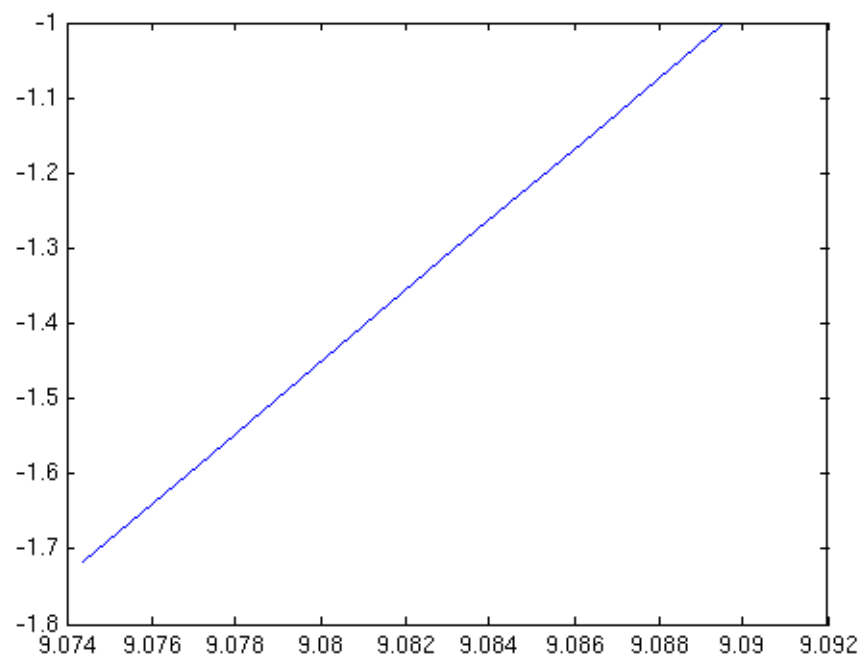


Figura 4.3: Variación de la fase en función de la frecuencia utilizando una FFT de 4096 puntos. La variación de la fase es más lineal respecto de la configuración colineal.

el caso de la rugosidad, o al trabajar con objetos que no están en movimiento aparecen problemas de ruido, en concreto ruido Speckle que se verá con más detalle en el apartado 4.2.2, provocando una disminución en la resolución obtenida en la medición.

### 4.2.1. La coherencia de las ondas electromagnéticas

La luz natural es el resultado de la superposición de la emisión de un número muy elevado de átomos, cada uno de ellos emitiendo una radiación independiente en distinto momento y con distinta frecuencia y fase, esto da lugar a un campo altamente fluctuante. En este campo solo se puede determinar el valor de un punto de la onda de forma estadística. Por ello, tenemos unas propiedades estadísticas para la luz fluctuante, [35], [36] y <sup>1</sup>

#### Intensidad óptica

Considerando un campo escalar complejo de la onda:  $E(r,t)$ , si se tratara de una onda completamente determinista su ecuación para la intensidad sería

$$I(r, t) = |E(r, t)|^2$$

En una onda fluctuante se deben realizar un promedio de un gran número de muestras de la onda

$$I(r, t) = \langle |E(r, t)|^2 \rangle$$

con lo que se obtiene la intensidad promedio. En este punto se puede diferenciar entre dos formas de onda en función de su estacionalidad:

- **Onda estadísticamente estacionaria:** la intensidad no varía para  $t$  pero puede variar para  $r$ , en la parte superior de la *figura 4.4* se puede ver la función del campo dependiente de la posición y del tiempo. En la parte inferior, calculando el promedio de un periodo  $T$  que contiene suficientes fluctuaciones según la expresión:

$$I_p(r) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |E(r, t)|^2 dt$$

Se obtiene que la intensidad promedio es independiente de  $t$ .

- **Onda estadísticamente no estacionaria:** la intensidad varía para  $t$  y para  $r$ , en la parte superior de la *figura 4.5* se puede ver la función del campo dependiente de la posición y del tiempo.

#### Coherencia temporal

La coherencia temporal se relaciona con la correlación de la fase de la onda en un momento determinado punto alcanzado por la misma en dos instantes de tiempo diferentes. Si se considera el campo eléctrico en un punto  $P$  en dos instantes distintos,  $t$  y  $t+T$ , se define tiempo de coherencia como el máximo valor de  $T$  para el que la diferencia de fase en ese punto es predecible.

<sup>1</sup>Luis Arizmendi. Óptica estadística y la coherencia de la luz, tema 3. <http://www.uam.es/otros/masterfotonica/Documentacion/Interferometria/2008/tema3-coherencia-08-09.pdf>

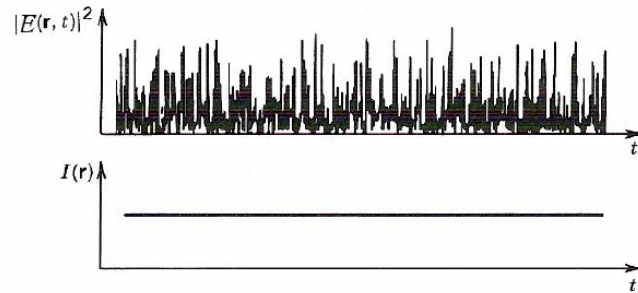


Figura 4.4: Representación del campo dependiente de la posición y el tiempo, debajo intensidad promedio para la onda estacionaria, dependiente de la posición pero independiente del tiempo.

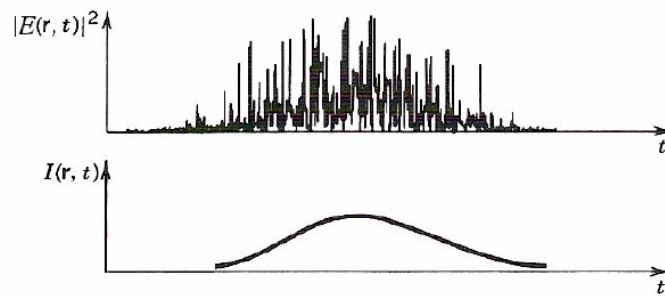


Figura 4.5: Representación del campo dependiente de la posición y el tiempo, debajo intensidad promedio para la onda estacionaria, dependiente de la posición y del tiempo.

Si se define el grado de coherencia temporal normalizado (complejo) como la función de correlación normalizada del campo eléctrico en dos instantes de tiempo:

$$\gamma(\tau) = \frac{\langle E(t) E(t+\tau) \rangle}{I}$$

Su valor módulo mide el grado de correlación entre

$$E(t) \text{ y } E(t + \tau)$$

y su valor se encuentra en el rango:

$$0 \leq |\gamma(\tau)| \leq 1 \quad [\gamma(\tau) = 0 \text{ para } \tau < 0]$$

Para la luz monocromática (determinista en el tiempo)

$$E(r_0, t) = E_0(r_0)e^{-i\omega_0 t} \longrightarrow \gamma(\tau) = e^{-i\omega_0 \tau}$$

y por tanto

$$|\gamma(\tau)| = 1$$

A medida que la luz es menos monocromática el valor de la correlación decrece y por tanto el valor de la coherencia temporal.

### Coherencia espacial

La coherencia espacial hace referencia a la relación entre las fases de dos puntos del espacio de una sección transversal del haz luminoso. Si se consideran dos puntos del espacio, P1 y P2, que se encuentran en la misma sección transversal del haz, con sus correspondientes campos eléctricos  $E_1(t)$  y  $E_2(t)$ , si la diferencia de fase entre ambos campos permanece constante en cualquier instante  $t > 0$  se dice que entre ambos puntos hay una coherencia espacial perfecta.

En el caso general, la función de coherencia mutua:

$$\Gamma(r_1, r_2, \tau) = \langle E(r_1, t) E(r_2, t + \tau) \rangle$$

compara las fluctuaciones del campo en el punto  $r_1$  en el instante  $t$  con las del campo en  $r_2$  en el instante  $t + \tau$ . Si se normaliza:

$$\gamma(r_1, r_2, \tau) = \frac{\Gamma(r_1, r_2, \tau)}{[I(r_1)I(r_2)]^{1/2}} \quad 0 \leq \gamma(r_1, r_2, \tau) \leq 1$$

La coherencia espacial viene determinada por el módulo la función de coherencia mutua para el mismo instante ( $\tau = 0$ ) En las fuentes luminosas convencionales el área de coherencia es del orden de  $0,0001 \text{ mm}^2$ , mientras que para un láser, este área es del orden de  $1 \text{ mm}^2$

La coherencia espacial se ve afectada por la divergencia del haz y el tamaño del punto focalizado en el objetivo.

#### 4.2.2. El ruido Speckle

Según [37], considerando un frente de ondas como el lugar geométrico en el que los puntos del medio son alcanzados por una determinada onda en un mismo instante. Si se combina un conjunto de frentes de onda se producirá una interferencia mutua y se generará un patrón de intensidades aleatorio conocido como *Speckle*.

El *Ruido Speckle*<sup>2</sup> es una característica de las imágenes coherentes, incluidas las imágenes de ultrasonidos. Se trata de un ruido aleatorio, determinístico, que aparece en las imágenes generadas con radiación coherente de una superficie que dispersa la radiación. El efecto speckle es el resultado de la interferencia de varias ondas con diferentes fases que se suman formando una onda cuya amplitud, y por tanto intensidad, varía aleatoriamente. Cuando una superficie recibe la radiación de una onda, según la teoría de la difracción, cada punto se convierte en un emisor secundario de ondas esféricas. La radiación resultante en cualquier punto es el resultado de la suma de cada uno de los rayos que fueron dispersados por la superficie. Si la superficie es suficientemente rugosa como para crear diferencias de caminos ópticos superiores a un longitud de onda, dando lugar a diferencias de fase superiores a  $2\pi$ , la intensidad de la onda resultante varía aleatoriamente. La textura que se observa en un patrón Speckle no se corresponde con la estructura subyacente de la superficie. Los brillos locales, en cualquier caso, reflejan la heterogeneidad local de la topología, de una escala similar a la del ruido, de la superficie. Un ejemplo sencillo para observar el ruido speckle consiste en iluminar una superficie rugosa con un haz láser y tomar una imagen con una cámara, tal como se puede observar en la *figura 4.6*.

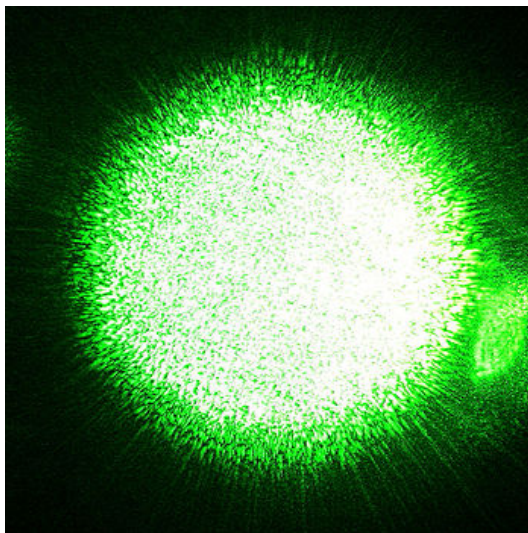


Figura 4.6: Imagen de ruido Speckle obtenida como resultado de iluminar una superficie rugosa con un haz láser.

Si una superficie rugosa se ilumina con una fuente coherente, se forma un patrón de speckle en el punto de observación, esto es conocido como *patrón de speckle subjetivo*. Es subjetivo porque la estructura de detalle del patrón de speckle depende de los parámetros del sistema de adquisición, por ejemplo, si cambia la apertura de la lente utilizada, el tamaño del ruido speckle cambia; si cambia la posición de observación, el patrón de ruido speckle cambiará progresivamente llegando, incluso, a desaparecer la relación con el patrón original.

<sup>2</sup>Martin E. Anderson and Gregg E. Trahey. A seminar on k-space applied to medical ultrasound. <http://dukemil.bme.duke.edu/Ultrasound/k-space/>

Lo anterior se explica porque cada punto de la imagen se puede considerar iluminado por un área finita del objeto. El tamaño de este área queda determinado por el límite de resolución de la difracción de la lente que viene fijado por el disco de Airy,<sup>3</sup> cuyo diámetro es  $2,4\lambda u/D$  siendo “u” la distancia entre el objeto y la lente, y D la apertura de la lente. La luz en puntos próximos de la imagen procede de la dispersión de áreas que tienen muchos puntos en común y la intensidad de estos puntos no difiere mucho entre sí. Por otro lado, dos puntos de la imagen que sean iluminados por zonas del objeto que están separadas por un diámetro del disco de Airy, tienen intensidades de luz que no están relacionadas. Esto se corresponde a una distancia en la imagen equivalente a  $2,4\lambda v/D$ , siendo “v” la distancia entre la imagen y la lente. Así, el tamaño del ruido speckle en la imagen es de este orden.

El ruido speckle puede aparecer a cualquier escala, desde la escala microscópica, en el estudio de la microtopología de la superficie, medición de rugosidad a través de imágenes, etc, también se puede observar a una escala media, por ejemplo en las imágenes de ultrasonidos de una ecografía al analizar los órganos de los seres vivos debido a las irregularidades de los tejidos y en las imágenes macroscópicas como por ejemplo en las imágenes de radar tomadas desde satélite debido a las irregularidades de la superficie terrestre y los océanos. Por tanto siempre estará presente debido a las irregularidades existentes en la superficie en estudio cuando se utiliza una radiación coherente para “iluminarla”.

El ruido speckle tiene, por tanto, un impacto negativo en la imagen obtenida, ya que la textura obtenida debido al mismo deforma el holograma, introduciendo errores en el momento de la reconstrucción de los datos del holograma. Por este motivo es necesario la eliminación del ruido speckle antes de que sea capturado por el sensor, ya que si se realizase un filtrado por software del holograma se perdería información en el mismo proceso de filtrado, ya que el mismo es producido por la propia rugosidad de la superficie que se está analizando.

Una solución sería utilizar una fuente de luz monocromática no coherente, esto sería factible ya que la holografía conosópica no necesita de una fuente coherente para generar el holograma, al no necesitar rayo de referencia; otra solución consiste en partir de un láser y disminuir la coherencia espacial del mismo. En el siguiente apartado se propondrán varias soluciones para la reducción del ruido speckle partiendo de una iluminación láser.

### 4.2.3. Soluciones existentes para la reducción del ruido Speckle

En la literatura se pueden encontrar diversas soluciones para la reducción del ruido speckle, algunas de ellas tratan de eliminarlo a través de software, una vez que la imagen ha sido capturada, como por ejemplo las propuestas en [38] y [39]. Este tipo de soluciones, como se comentó anteriormente, no resultan interesantes para este trabajo, ya que es preferible tratar de eliminar el speckle antes de capturar la imagen, puesto que cualquier procesamiento posterior por software eliminará información de la imagen y por tanto afectará a la resolución del sensor.

<sup>3</sup>Circular Aperture Diffraction, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/phyopt/cirapp2.html>



También se han propuesto, en diferentes publicaciones, soluciones para la eliminación del ruido speckle antes de capturar la imagen. Estas soluciones tratan principalmente de disminuir la coherencia de la radiación, en el caso de este trabajo del haz láser, espacialmente, para eliminar de este modo uno de los orígenes del ruido speckle, que como se comentó en el apartado anterior es debido a la coherencia de la radiación y a la propia microtopología de la superficie que se está estudiando.

La solución propuesta por Jahja I. Trisnadi[40] tiene por objetivo disminuir la coherencia de forma espacial y consiste en introducir una vibración en la fuente láser, consiguiendo eliminar el ruido speckle al aparecer varios patrones de speckle que se cancelan mutuamente. Esta técnica tiene como inconveniente que da como resultado una integración de la superficie, reduciendo la resolución lateral ya que el diámetro final del punto a lo largo del tiempo es mayor, con lo cual queda descartada ya que, para la medida de rugosidad, además de resolución vertical en la medida de distancias, es necesaria una elevada resolución lateral para poder distinguir las variaciones de distancia según la norma. En la *figura 4.7* se puede observar una simulación del resultado final al aplicar una vibración sobre el láser, el *punto rojo* es una acumulación de puntos individuales que debido a la vibración fluctúan sobre la superficie, en azul se representa el punto que se obtendría sin vibración. Mientras que el punto azul tiene un diámetro de  $5 \mu m$  en el caso de introducir la vibración el diámetro llega a  $20 \mu m$ .

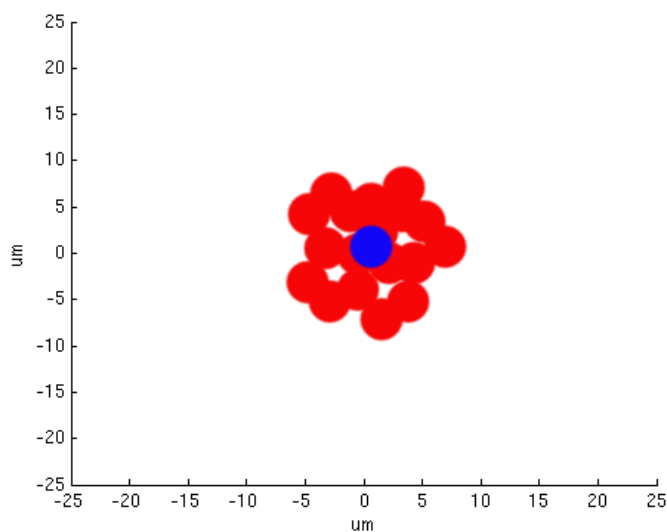


Figura 4.7: Efecto de introducir una vibración en el generador láser.

Como consecuencia de la propuesta anterior y teniendo en cuenta la naturaleza del ruido speckle, que depende del punto de vista desde el que se mire el punto y del ángulo de iluminación, así como de la longitud de onda utilizada, se han propuesto varios trabajos que se basan en la obtención de varios patrones de speckle para el mismo punto[41]. En el caso de tener varios puntos de vista, sería necesario utilizar varios sensores enfocando al mismo punto, el problema en este caso es la complejidad del

montaje ya que la reducción de speckle se nota a partir de la utilización de 4 sensores, además del montaje de las señales recibidas por los sensores ya que cada una, en principio, es independiente de las demás. En el caso de utilizar varios ángulos de iluminación, el principio es el mismo y consiste en utilizar varias fuentes de radiación coherente, láser, iluminando el mismo punto, en este caso la complicación reside en conseguir que todas las fuentes iluminen exactamente el mismo punto y obtener un diámetro iluminado suficientemente pequeño para poder ser utilizado para la medida de rugosidad. Por último, los patrones de ruido speckle son dependientes de la longitud de onda utilizada; así, si se utilizan varias longitudes de onda suficientemente separadas para iluminar el mismo punto, se obtendrán diferentes patrones de interferencia que se pueden procesar para obtener una imagen con menos ruido speckle; este montaje resulta complejo para su utilización en holografía conoscópica, ya que sería necesario separar cada componente y hacerla pasar por un conoscopio (uno por cada longitud de onda) con lo cual se obtendrían varios hologramas que habría que componer.

También se ha propuesto [42] introducir un elemento consistente en una pantalla lcd que cambia su patrón de difusión con una corriente eléctrica, al introducir un difusor, que además cambia con el tiempo, se rompe la coherencia espacial del haz al producirse retardos debidos al difusor. Con esto se obtiene una integración en el tiempo de los patrones de ruido speckle que tiene como consecuencia una reducción del mismo debido a la cancelación de dichos patrones manteniendose la información de la señal.

Por otra parte, para eliminar la coherencia espacial del haz laser, se ha propuesto el uso de algún sistema de modulación del haz. Estos moduladores consisten en una celda con un fluido que se hace vibrar a alta frecuencia, utilizando para ello elemento piezoeléctrico, debido a estas vibraciones, se producen variaciones en la densidad del fluido haciendo que cambie [43] y [44], también, su índice de refracción. Debido a esto se producen retrasos y cambios en la polarización del haz dando como resultado, de nuevo, un patrón de ruido speckle que cambia con el tiempo y que al ser capturado por un sensor, que tiene un tiempo de integración finito, produce una cancelación del ruido.

#### 4.2.4. Solución propuesta para la reducción del ruido Speckle

Se ha realizado un conjunto de experimentos para llevar a cabo una reducción del ruido Speckle basándose en las soluciones propuestas en la literatura existente. Para realizar los experimentos se han capturado las imágenes de la proyección del láser sobre una superficie rugosa. En primer lugar se ha realizado un montaje como el mostrado en la *figura 4.8* El montaje consta de una fuente de iluminación láser(1), un difusor(2) de tipo "Ground Sandblasted glass"(en 4.2.5 se puede encontrar más información sobre el tipo de difusor utilizado y su elección), dos lentes(3)(4) para realizar el enfoque del haz láser en el objeto(5) utilizado para comparar la variación del ruido speckle y por último un sensor(6) que captura la imagen para poder realizar la captura de las imágenes.

El objetivo de este montaje es romper la coherencia espacial del haz láser utilizando el difusor, este hace que los diferentes rayos sigan caminos diferentes con lo cual se introducen retrasos y desfases, y alterando las polarizaciones de los diferentes rayos que llegan al mismo. En la *figura 4.9(a)* se puede ver una imagen del punto láser, proyectado sobre una superficie rugosa, sin el difusor. A continuación en la *figura 4.9(b)* se puede ver el mismo punto proyectado sobre la misma superficie pero interponiendo

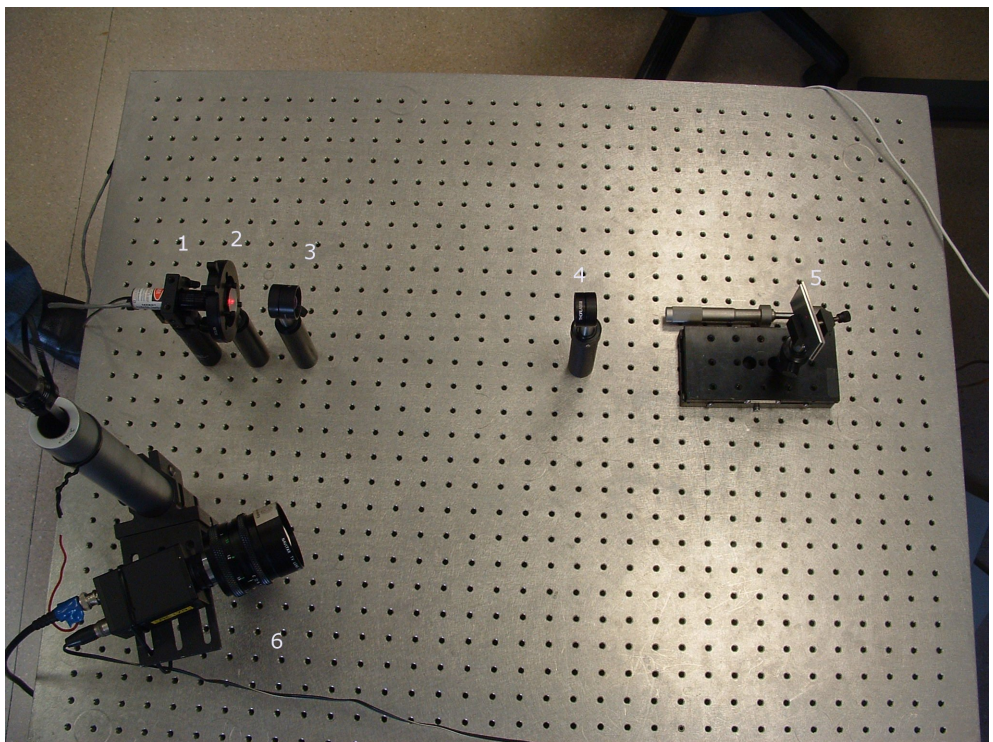
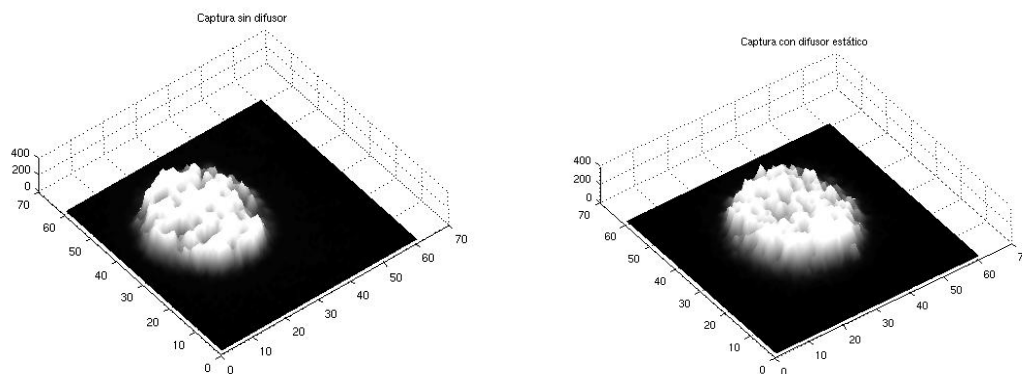


Figura 4.8: Montaje en el laboratorio para la reducción del ruido speckle

un difusor y las lentes necesarias, comentadas anteriormente, para enfocar el punto. La diferencia entre ambas imágenes apenas es apreciable, esto es debido a que colocando el difusor de forma estática, únicamente se ha cambiado el patrón de ruido Speckle y por tanto, este sigue estando presente.



(a) Captura realizada proyectando el láser sobre una superficie rugosa directamente

(b) Captura realizada proyectando el láser sobre una superficie rugosa colocando un difusor y las lentes necesarias para realizar el enfoque del haz láser

Figura 4.9: Capturas de un punto sobre una superficie rugosa sin/con difusor

Si además de colocar el difusor éste se hace vibrar, aumenta el número de patrones de Speckle con lo que en la cámara se produce la suma de todos ellos, debido al tiempo de integración finito de la cámara, que da como resultado la anulación de los mismos. En la *figura 4.10* se puede ver el resultado de colocar un difusor y hacerlo vibrar. El punto tiene una distribución de energía más uniforme y su contorno está mejor definido, con lo cual es más fácil determinar su centro y sus características y extraer información del mismo.

A continuación se colocó el conoscopio delante de la cámara para comprobar el cambio en el holograma con el difusor en estático y vibrando. El holograma obtenido corresponde a un punto y, aunque la intención de este experimento no era la de realizar medidas, sí que resulta interesante ver la mejoría del holograma, ya que en el caso del holograma capturado con el difusor en estático, las franjas apenas son perceptibles (*figura 4.11(a)*), mientras que si se hace vibrar el difusor, *figura 4.11(b)*, las franjas del holograma son perceptibles.

A modo ilustrativo, en las *figuras 4.12(a)* y *4.12(b)*, se muestra una línea de estos hologramas. El sistema estaba sin calibrar ni ajustar, sólo se pretende demostrar que se puede obtener un holograma a partir de la luz que sale del difusor, y que teóricamente es incoherente. Los hologramas, en general, muestran unos patrones de franjas, y midiendo la frecuencia y la fase de estas franjas, es posible determinar la distancia a la que se encuentra el objetivo, así pues, en el primero la señal no tiene una forma periódica y su transformada de Fourier, *figura 4.12(c)*, contiene muchas componentes, con lo cual será prácticamente imposible determinar la componente principal y por tanto calcular la distancia, esto es debido al ruido speckle que introduce componentes adicionales a la señal de interés. En cambio, en el segundo caso la señal tiene una componente senoidal y si se calcula su transformada de Fourier, *figura 4.12(d)*, se obtiene,

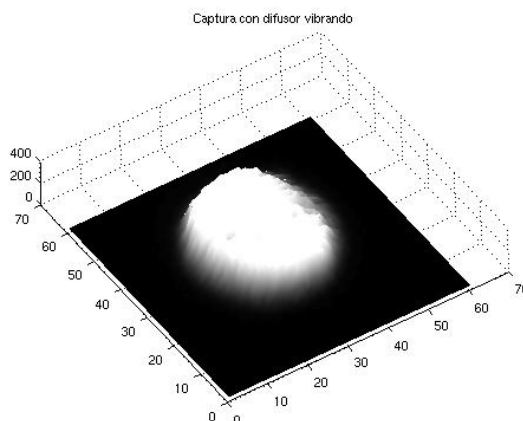


Figura 4.10: Captura con el difusor vibrando, el punto tiene una distribución de la luminosidad más uniforme y el contorno del mismo está mejor definido con lo cual es más fácil extraer información de este punto que de los puntos de las figuras 4.9(a) y 4.9(b)

además de la componente de continua, una componente bien definida y que representa la frecuencia principal del holograma, gracias a que prácticamente el ruido speckle ha desaparecido al producirse una cancelación de los patrones de ruido speckle debido al movimiento del difusor que provoca que, durante el tiempo de integración de la cámara, esta "vea" varios patrones de ruido speckle, al contrario de lo que ocurría en el caso anterior cuando sólo había un patrón de ruido speckle durante el tiempo de integración de la cámara, a pesar de haber introducido un difusor.

Una vez que se ha visto que tras introducir un difusor y moverlo la calidad de holograma mejora, el siguiente paso es realizar un montaje en el que el movimiento de dicho difusor sea controlado y además se pueda variar su velocidad para realizar comparaciones y encontrar los valores óptimos. Estos valores serán tales que el número de patrones de speckle en cada frame, tiempo de integración del sensor, sea suficientemente alto para que se produzca la cancelación de los mismos y al final solamente quede la información del holograma. Por otra parte, si se eleva en exceso la velocidad de movimiento del difusor, por ejemplo si este se hace rotar y su velocidad de rotación es mayor que la frecuencia del sensor, se pueden comenzar a repetir los patrones y por tanto habría patrones que tendrían más peso que otros con lo cual de nuevo comenzaría a bajar la calidad del holograma. Por otra parte, la velocidad del movimiento del difusor depende de las características del mismo, por ese motivo los experimentos se realizarán con diferentes grados de granularidad en los difusores, cuanto mayor es la granularidad más patrones de Speckle aparecen y por tanto la necesidad de velocidad para el movimiento del difusor se reduce, pero por otro lado, como se comentó anteriormente, aumentan las pérdidas de luz en el difusor.

#### 4.2.5. Difusores

Existen diversos tipos de difusores, los *Ground glass diffusers*, los *Opal diffusing glass* y los *Holographic diffusers*; las diferencias existentes entre ellos estriban en el

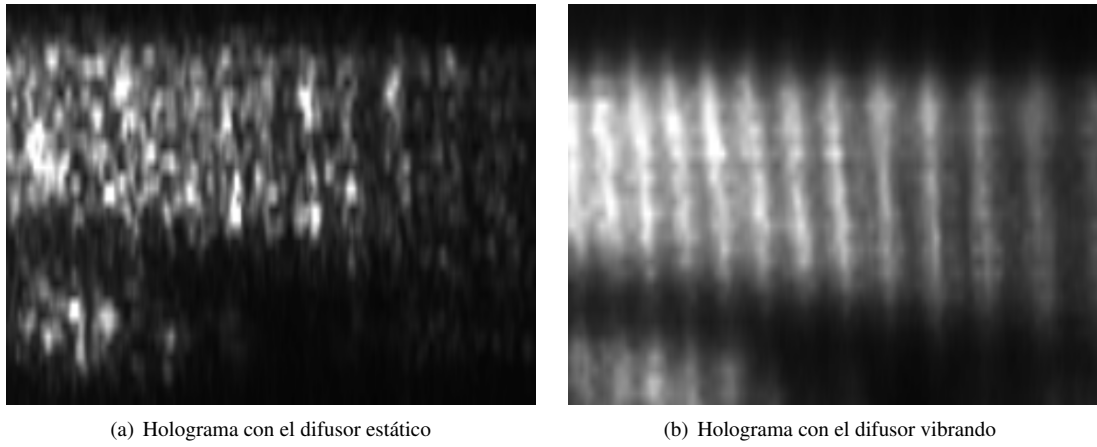
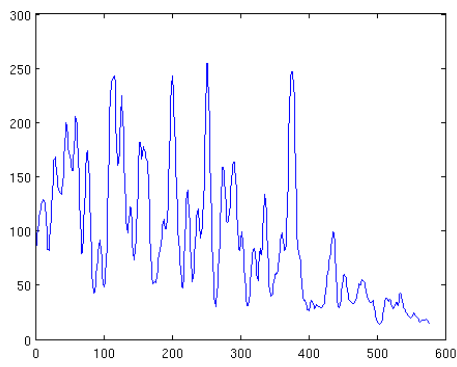
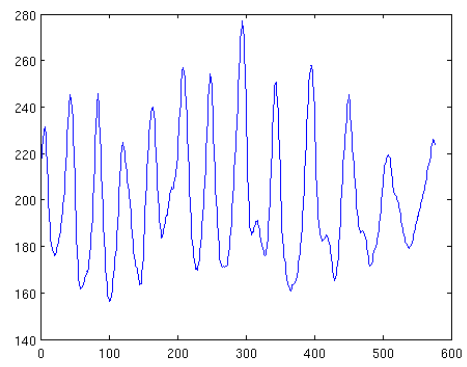


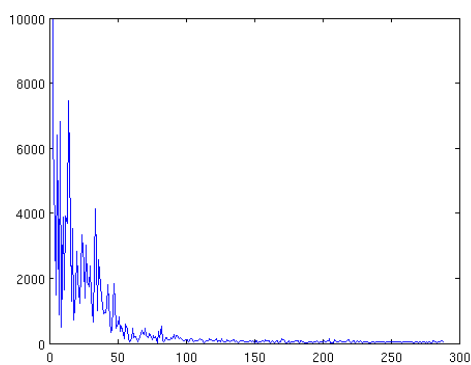
Figura 4.11: Capturas de un punto sobre una superficie rugosa sin/con difusor



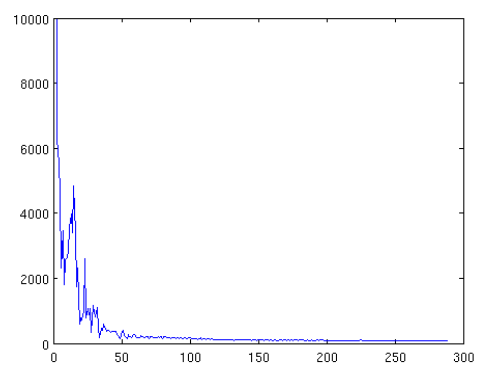
(a) Línea del holograma con el difusor estático sobre una superficie rugosa



(b) Línea del holograma con el difusor vibrando sobre una superficie rugosa



(c) Transformada de Fourier para el holograma obtenido con el difusor fijo sobre una superficie rugosa



(d) Transformada de Fourier para el holograma obtenido con el difusor vibrando sobre una superficie rugosa

Figura 4.12: Línea del holograma de un punto sobre una superficie rugosa sin/con difusor

material en que están contruídos y el proceso de fabricación utilizado.

Los *Ground glass diffusers* se construyen a partir de un trozo de vidrio que es pulido utilizando un chorro de arena. El valor con el se clasifican estos difusores se refiere al tamaño del grano de arena que impacta contra el vidrio. El proceso de chorreo de arena crea marcas en el vidrio que difuminan la luz que lo atraviesa. La ventaja de este tipo de difusores es que se puede controlar la difusión de la luz a través del tamaño del grano de arena utilizado en el proceso de chorreo.

Los *Opal diffusing glass* están formados por una base de vidrio en la que una de las caras es recubierta con una capa blanca lechosa llamada "ópalo". Esta capa actua como difusor de la luz que atraviesa el vidrio. Este tipo de elementos difunden más eficientemente la luz pero producen una mayor cantidad de pérdidas debido a dispersión.

Los *Holographic diffusers* son un tipo de elementos ópticos holográficos (*HOE*). Proporcionan una mayor transmisión de luz que los tipos vistos hasta el momento, con una transmisión de hasta el 90 % y reduciendo la cantidad de luz reflejada. Gracias a su diseño, también proporcionan una difusión más uniforme de la luz permitiendo al usuario controlar el ángulo y la forma de difusión de la luz.

Los difusores de tipo holográfico son los más adecuados para esta aplicación puesto que permiten controlar el ángulo del cono de luz de salida permitiendo utilizar un ángulo limitado que facilite la posterior colimación del haz resultante disminuyendo la complejidad de la óptica necesaria. Los *Ground glass diffusers* también son adecuados para esta aplicación aunque en este caso el ángulo de salida es más difícil de controlar y la pérdida de luz es mayor. Por último, los *Opal diffusing glass* son lo menos adecuados puesto que las pérdidas de luz son las más elevadas.

#### 4.2.6. Uso de luz no coherente

Como se apuntaba anteriormente, si se utilizase luz incoherente para iluminar la superficie, no existiría ruido Speckle en la imagen resultante, inherente a la radiación coherente, además el uso de una fuente de luz incoherente es posible dentro de la holografía conoscópica ya que no existe rayo de referencia como ocurre con la interferometría tradicional. El problema en este caso es encontrar un sistema óptico que permita enfocar una fuente de luz incoherente en un punto, ya que no es suficiente el uso de los tradicionales colimadores de los generadores láser para enfocar el rayo. En cuanto a la cualidad quasimonocromática requerida por la holografía conoscópica, esta se consigue utilizando filtros interferenciales que dejen pasar únicamente un estrecho rango de longitudes de onda. A pesar de todo, estos filtros pueden tener un ancho de banda excesivamente ancho para las necesidades requeridas.

Utilizando el simulador de rayos diseñado para este proyecto se han estudiado diferentes geometrías para el conjunto óptico necesario para enfocar la fuente de luz incoherente, también se han realizado simulaciones de los problemas que pueden aparecer en los errores debidos al montaje del conjunto.

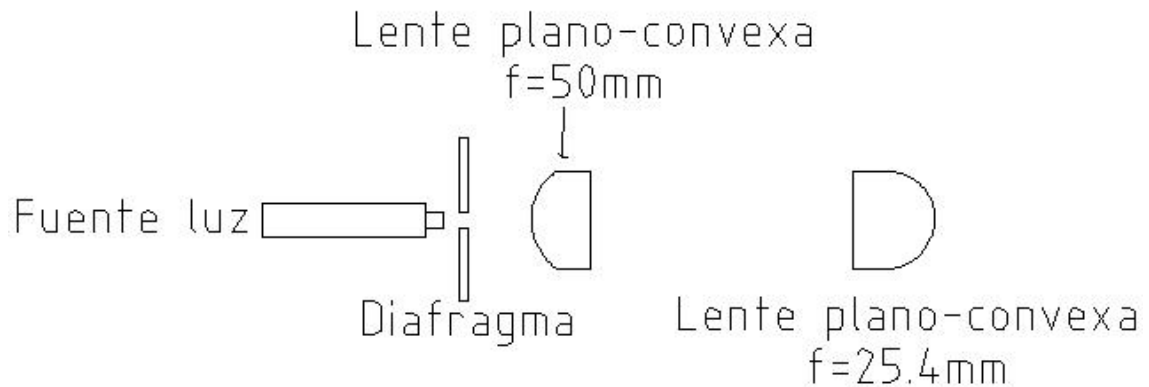


Figura 4.13: Esquema del montaje realizado en el laboratorio y simulado para colimar una fuente de luz incoherente

Para realizar los experimentos, tanto de simulación como de laboratorio, se ha utilizado una fuente de luz halógena guiada por fibra óptica con una ventana de salida de 5mm. Delante de la ventana se coloca un diafragma con una abertura de 1mm de diámetro, con esto se consigue una fuente de luz con una ventana definida por la apertura en el diafragma, aunque con una divergencia elevada. En las *figuras 4.13 y 4.14* se puede ver el esquema del montaje utilizado para colimar una fuente de luz incoherente, en la primera un dibujo simulando la posición relativa de los elementos y en la segunda el montaje real realizado en el laboratorio.

El montaje que se ha estudiado consta de dos lentes plano-convexas colocadas de manera que la primera hace que los rayos que entran salgan paralelo y la segunda enfoca los rayos que le llegan, paralelos, en su foco que es donde se tendrá el punto con el que se iluminará la superficie.

En la *figura 4.15(a)* se puede ver el trazado de rayos considerando la situación ideal en la que los caminos ópticos de las lentes están alineados, como se representó en el esquema de la *figura 4.13*; en la imagen, el foco está en la parte inferior y tiene un diámetro de 1mm, como ocurrirá en el montaje de laboratorio, las líneas en color rojo representan el camino de los rayos por el aire y las líneas en color azul representan los rayos en su camino por el interior de las lentes. La primera lente, plano-convexa con una



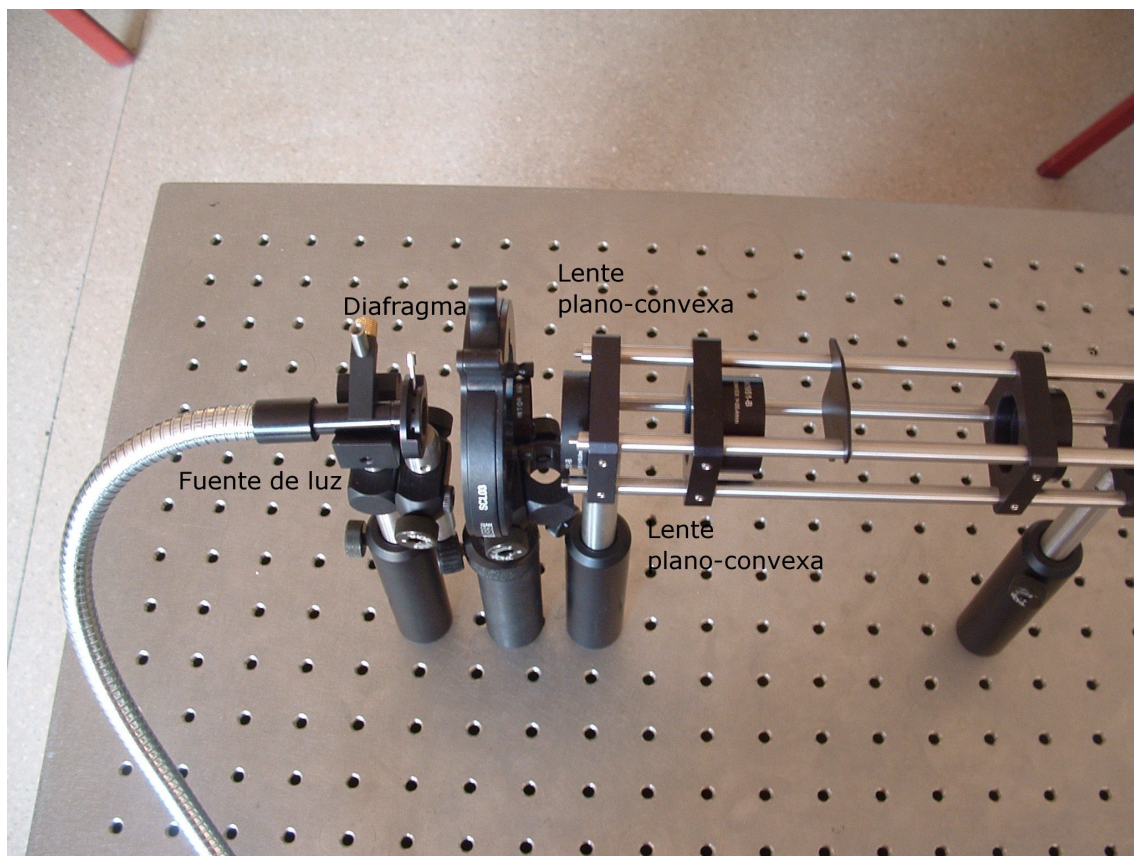
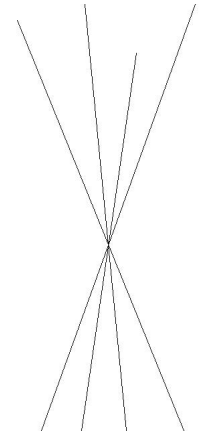
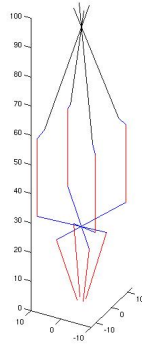


Figura 4.14: Realización en el laboratorio del montaje utilizado para la colimación de una fuente de luz incoherente

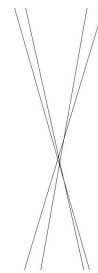
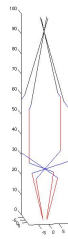
distancia focal de 50mm hace que todos los rayos salgan paralelos por su parte plana, la posición viene determinada por el foco de dicha lente y esta debe ser igual al valor de la distancia focal respecto de la fuente de luz. La posición de la segunda lente no es crítica puesto que los rayos le llegan paralelos a su eje óptico. La distancia focal de esta segunda lente determinará el punto en el que se enfoca la luz dando lugar a un punto fino como se puede ver en la *figura 4.15(b)* en que se puede apreciar que todos los rayos pasan por el mismo punto. Si introducimos un error en la alineación de las lentes, los caminos ópticos de estas dejarán de estar alineados y será imposible enfocar los rayos de luz en un punto, esto se puede ver en la *figura 4.16(a)*, en esta simulación se ha introducido un desplazamiento lateral de la segunda lente ( $f=25.4\text{mm}$ ) de un milímetro, este error provoca que los rayos no pasan por el mismo punto en el punto de enfoque de la lente como se puede ver en la *figura 4.16(b)* que corresponde al detalle del punto de enfoque. Esto provocará que el punto obtenido no será suficientemente estrecho y se producirá una integración de la superficie al obtener el holograma con lo que se anulará la medida de los detalles de la rugosidad; lo mismo ocurrirá si se produce una inclinación de una lente respecto de la otra ya que, en este caso, los rayos no saldrán paralelos al eje óptico de la primera lente, ni entrarán paralelos al eje óptico de la segunda lente.



(a) Simulación por trazado de rayos del sistema considerando que los caminos ópticos de las lentes están alineados y el foco tiene una ventana de salida de 1mm.

(b) Detalle del punto de enfoque en el que se puede ver que todos los rayos pasan por el foco dando lugar a un único punto

Figura 4.15: Trazado de rayos para el caso en el que las lentes están completamente alineadas.



(a) Simulación por trazado de rayos del sistema considerando que los caminos ópticos de las lentes están alineados y el foco tiene una ventana de salida de 1mm.

(b) Detalle del punto de enfoque en el que se puede ver que todos los rayos pasan por el foco dando lugar a un único punto

Figura 4.16: Trazado de rayos para el caso en que las lentes no están correctamente alineadas

El uso de la fuente halógena en combinación con el filtro interferencial daba como resultado un punto con una luminosidad muy baja con lo que resultaba muy complicado generar la interferencia, así pues además de una fuente de luz convencional, se han realizado ensayos con una fuente ASE, que emite en la banda entre 850 y 900 nm concentrando toda la energía en ella, esta banda es demasiado amplia para su utilización en Holografía Conoscópica puesto que no cumple la condición de monocromaticidad, coherencia temporal, así pues se dispuso un filtro interferencia con un ancho de banda de 1nm, a pesar de tener un ancho de banda muy reducido con esta aproximación no fue posible generar un patrón de interferencia puesto que el haz no era realmente monocromático. En la *figura 4.17* se muestra un detalle de un punto originado con esta fuente, en él se confirma la práctica ausencia de ruido Speckle, aunque, como ya se comentó, aparecen otros problemas debidos al enfoque del punto y al ancho de banda de la fuente.

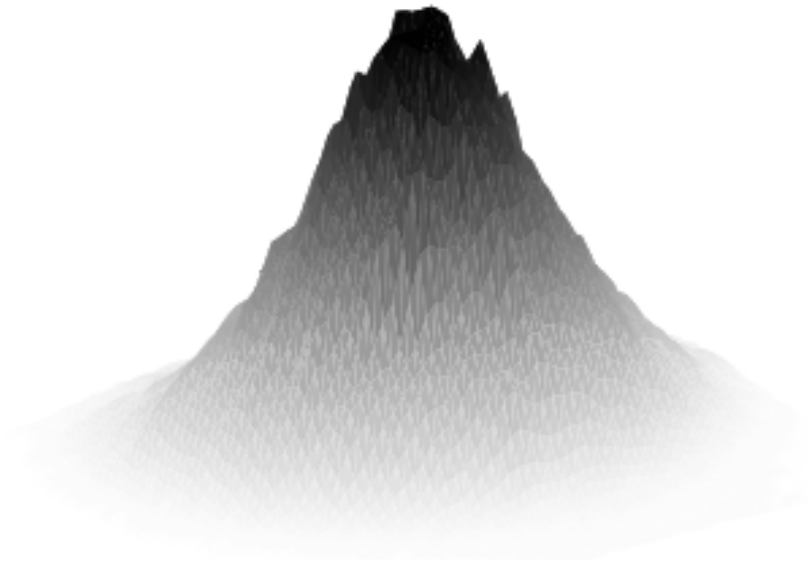


Figura 4.17: Punto obtenido con una fuente ASE.

El uso de otros tipos de fuentes presenta el mismo problema ya que aunque presentan longitudes de onda con mayor intensidad, como por ejemplo las lámparas de sodio de baja presión, *figura 4.18*, este máximo no está aislado y presenta una banda de radiación a su alrededor más ancha que resulta difícil de filtrar.

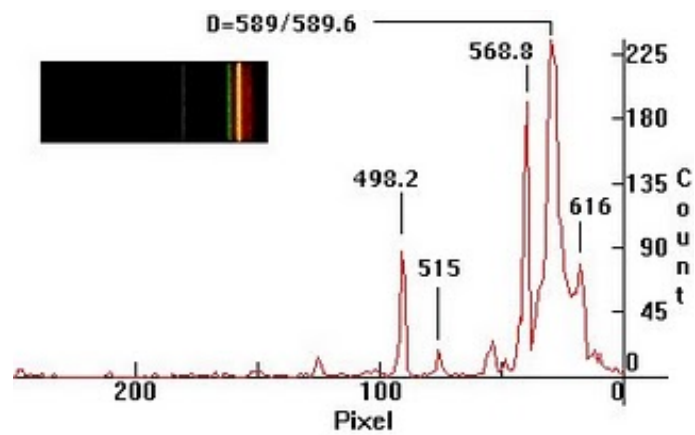


Figura 4.18: Espectro de radiación de una lámpara de sodio de baja presión.

### 4.2.7. Mejora del punto láser

Tanto en el caso del sistema utilizando el difusor para romper la coherencia del láser como en el caso del uso de una fuente de luz incoherente, el tamaño del punto conseguido no es suficientemente fino. La causa principal de esto, suponiendo que las lentes están perfectamente alineadas, es la geometría de estas. Centrándose en la iluminación con luz incoherente, en las simulaciones se podía ver que si las lentes estaban perfectamente alineadas en sus caminos ópticos, el punto obtenido era, idealmente, un punto con diámetro prácticamente nulo, esto no es del todo cierto ya que si se utilizan más rayos para la simulación se puede observar que este punto tiene un diámetro finito, esto se puede ver en la *figura 4.19*.

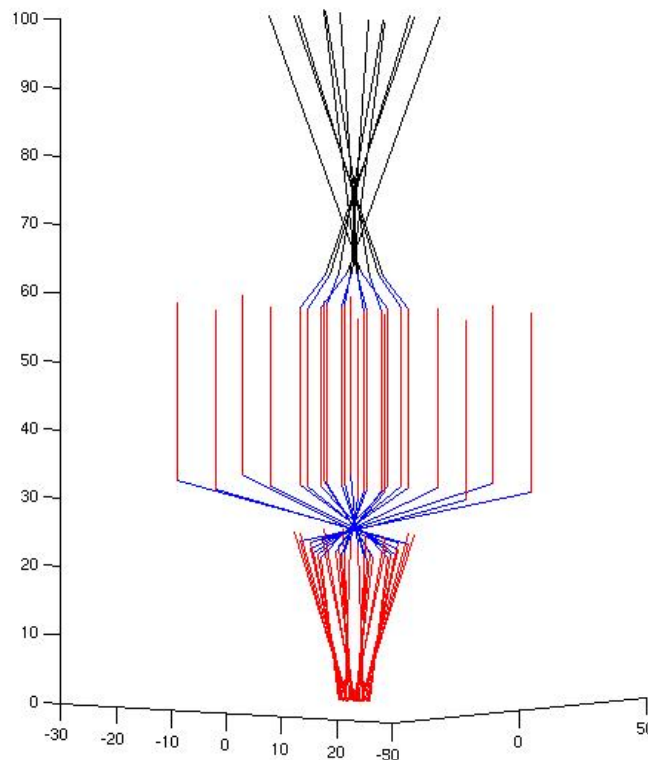


Figura 4.19: Simulación con más rayos en la que se puede ver que los rayos no convergen a un punto a pesar de que las lentes están perfectamente alineadas.

La explicación de esto reside, tanto en la simulación como en los resultados experimentales del laboratorio, en la utilización de lentes esféricas. Por geometría se sabe que la teoría de la óptica geométrica es perfectamente válida cuando las lentes son paraboloides correspondiendo el foco de la lente con el foco geométrico del parabolóide, la aproximación por esferas suele ser suficiente para la mayoría de los casos, ya que el error cometido no es excesivamente importante. En el caso del presente trabajo este

error no es despreciable ya que impide conseguir un punto de menor diámetro, algo importante para la observación a nivel microscópico de una superficie.

### 4.3. Generación de una línea láser con reducción de ruido Speckle

Lo visto anteriormente estaba orientado a la generación de un punto láser en el que se hubiera reducido de forma notable el ruido Speckle. Con el fin de obtener un perfil completo en cada adquisición de la superficie que se está analizando surge la necesidad de extender ese punto y generar una línea que sea igualmente cuasilibre de ruido Speckle.

Lo inmediato para generar una línea sería colocar a continuación de la lente de enfoque, lente 4 en la *figura 4.8*, una generadora de línea no gaussiana. Esta solución no es la más óptima puesto que el haz de luz a la salida de esta lente no está colimado, condición necesaria en la entrada de este tipo de elementos ópticos, y de hecho tiene un diámetro de 3 milímetros en los experimentos realizados, con lo que la línea resultante será irregular y será excesivamente ancha con lo que la visibilidad del holograma será muy pobre.

Para evitar lo anterior se utiliza un montaje con prismas anamórficos que *moldean* el punto consiguiendo que sea perfectamente circular y tenga un diámetro adecuado a la hora de alcanzar el generador de línea, tras estos se coloca un generador de línea (Powell lens [45]) y por último la lente de enfoque, lo suficientemente cerca para que el tamaño del haz cuando la alcanza sea lo bastante reducido. La *figura 4.20* muestra el esquema de colocación de los elementos utilizando los prismas anamórficos para mejorar la circularidad del punto a la entrada del generador de línea.

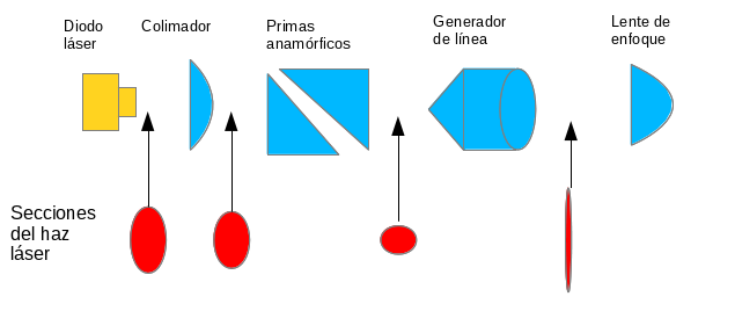


Figura 4.20: Esquema de la unidad láser con los prismas anamórficos para redondear el punto antes de su entrada en la lente generadora de la línea láser (Powell lens).

Con este montaje se consigue una línea con una cantidad de ruido Speckle muy reducida, un ancho muy pequeño y una longitud suficiente para conseguir un perfil suficientemente largo de la superficie. Además la distancia de trabajo puede modificarse cambiando simplemente la lente final que realiza el enfoque. En la mayoría de los ensayos se utilizó una lente plano convexa de 100 mm de distancia focal.

## 4.4. El diseño del láser y la generación de la línea

La configuración anterior proporciona una línea láser bien enfocada y suficientemente estrecha como para su utilización en la medición de rugosidad, el problema que ocurre con ella es que tiene demasiados elementos ópticos lo que implica elevadas pérdidas de luz, incluso utilizando un antirreflejo adecuado en todos ellos. Esto obliga a incrementar la potencia del láser para mantener el mismo nivel de luminosidad en la imagen. Por otro lado, al existir varios elementos ópticos, las imperfecciones de cada uno de ellos no hace sino aumentar la distorsión de la línea final y producir al final, además de la línea buscada, un halo que puede provocar errores de medición puesto que también será captado por el sensor y sumado a la señal de la línea principal.

Se propone en este apartado una nueva configuración de la unidad láser que reduce a 1 el número de elementos ópticos utilizados; esto reduce las pérdidas debido a reflexiones en las superficies de los elementos ópticos y la aparición del halo alrededor de la línea láser. El principio en el que se basa esta configuración es en el propio aprovechamiento de la forma elipsoidal del haz a la salida del diodo láser. Por ejemplo en el diodo PL TB450 de Osram los ángulos de divergencia paralelo y perpendicular son de  $15^\circ$  y  $25^\circ$  respectivamente.

Se han realizado simulaciones de la línea obtenida utilizando un cilindro y se han corroborado los resultados en un láser funcionando a 800 y 1200mm de distancia. En la figura 4.21 se muestra la configuración los caminos ópticos de los rayos simulando un diodo PL TB450 de Osram.

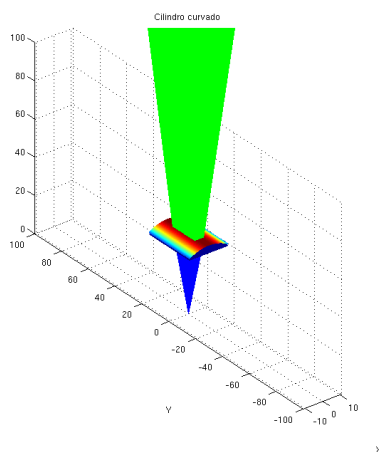


Figura 4.21: Simulación de un diodo láser enfocado en una línea utilizando una lente cilíndrica y enfocado a 800mm.

En la figura 4.22 se muestra el ancho de línea obtenido utilizando el cilindro convencional. Se puede ver que en el centro la línea es suficientemente estrecha, a una distancia de 800mm 0.14mm, mientras en los extremos el ancho de la línea es excesivo, 3.46mm. Estas dimensiones se han verificado con un diodo y una lente real utilizando un analizador de rayo.

Se ve que la idea inicial de utilizar un cilindro convencional para el enfoque de la línea presenta unos resultados limitados puesto que la longitud de línea utilizable está limitada por el ancho de la misma. La variación del ancho de la línea observado es debido a la diferencia de distancia entre el diodo láser y la parte central y extrema del cilindro. Por ello se ha diseñado una lente que corrige esta diferencia de distancia curvando un cilindro. La curvatura de este en el eje perpendicular a la línea se calcula en función de la distancia focal del cilindro original, de esta forma se consigue que la distancia desde el diodo láser a la lente de enfoque sea la misma para todos los puntos de la línea. La figura 4.23 muestra las superficies que conforman la lente, mientras que la figura 4.24 muestra los caminos de los rayos a través de la lente y la figura 4.25 muestra el ancho de la línea cuando se enfoca a 800mm.

El ancho de línea obtenido con esta nueva lente a 800mm es de 0.14mm en el centro y 0.17mm en los extremos. Estos valores revelan una uniformidad en el ancho de la línea que la hace adecuada para la utilización en los sensores de Holografía Conoscópica. En cuanto a la profundidad de campo utilizable, el ancho de la línea se mantiene por debajo de 0.2mm en toda su longitud durante 50mm.

## 4.5. La generación de holograma

La segunda sección que compone un sensor de holografía conoscópica es la propia generadora del holograma, *conoscopio*, en la teoría, esta está formada, según se vió en el capítulo 3, por un polarizador, a través del cual entra la luz reflejada en la superficie que se está midiendo, a continuación se encuentra un cristal birrefringente, y detrás de este un analizador constituido por un polarizador y detrás del mismo el sensor encargado de recoger el interferograma formado. Opcionalmente se puede colocar una válvula de luz que alternativamente introduce cambios en la polarización de la luz de

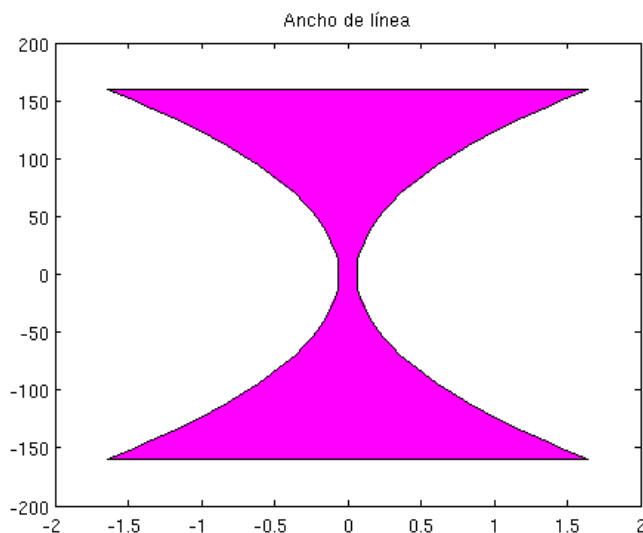


Figura 4.22: Ancho de la línea láser obtenido por simulación de un diodo láser con una lente cilíndrica y enfocado a 800mm.

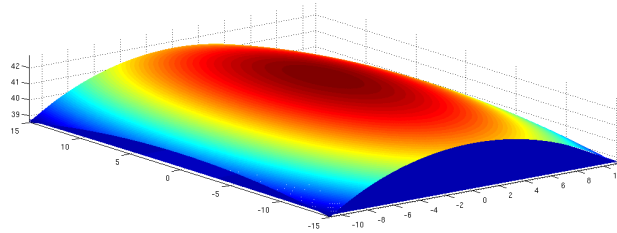


Figura 4.23: Superficies de la lente obtenida a partir de un cilindro que se curva sobre el eje perpendicular.

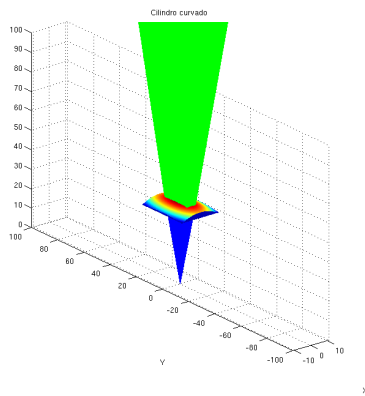


Figura 4.24: Trazado de rayos a través de un cilindro curvado.



entrada, estos cambios permiten obtener hologramas desfasados  $\pi$  radianes, que combinados para obtener la señal de contraste, permiten obtener un holograma con menos ruido. Este sistema presenta el inconveniente de que si el objetivo que se está examinando se encuentra en movimiento los hologramas desfasados utilizados para calcular el contraste no corresponderán al mismo punto o perfil lo que introducirá un error en las medidas, esto es porque ambos hologramas se han tomados en instantes de tiempo diferentes.

Para evitar este inconveniente se puede, como se muestra en la *figura 4.26*, colocar un beamsplitter en la entrada de luz y utilizar dos conoscopios uno sin introducir desfase y otro con un retardador de  $\pi$  radianes. Esto permitirá obtener dos hologramas desfasados  $\pi$  radianes del mismo punto de la superficie que se está inspeccionando. Esta configuración presenta el inconveniente de la dificultad constructiva puesto que es necesario incluir dos conoscopios completos en el mismo sensor. También aumenta la dificultad en el proceso de calibración puesto que es necesario ajustar el camino óptico de ambos conoscopios para que el desfase entre ambos sea de  $\pi$  radianes. Además supone una disminución del 50 % en la cantidad de luz que alcanza a cada uno de los conoscopios lo que implica mayores tiempos de exposición en el sensor o más potencia de luz.

Tanto en la configuración con la válvula de luz como con los 2 conoscopios se busca una forma de duplicar la información útil de forma que el ruido se cancele a no estar presente en ambos hologramas.

En el diseño del sensor propuesto se ha eliminado la válvula de luz y la necesidad de utilizar dos conoscopios puesto que lo que se persigue es obtener un holograma de buena calidad utilizando para ello un haz de luz que esté libre de ruido speckle, que es la principal fuente de ruido. Por esta razón, el conoscopio propuesto es más sencillo y requiere menos ajustes.

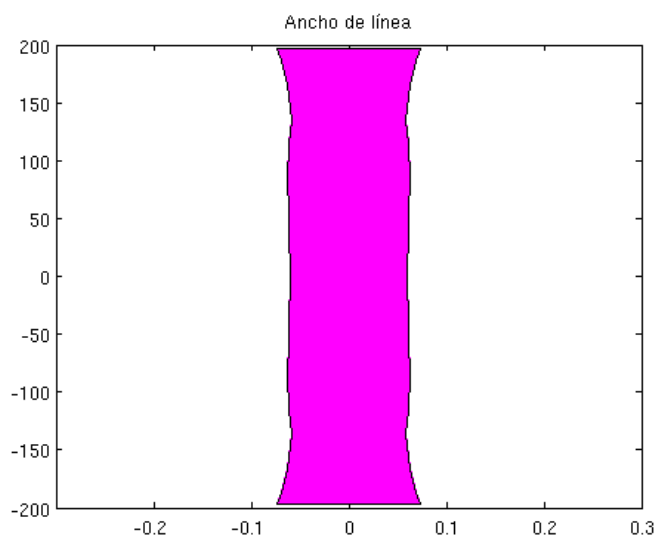


Figura 4.25: Ancho de la línea láser obtenido por simulación de un diodo láser con una lente cilíndrica curvada y enfocado a 800mm.

El principal aspecto constructivo del conoscopio es el grosor del cristal birrefringente, tal como se vió en el *capítulo 3*, determina la frecuencia de las franjas en el holograma. Al aumentar esta frecuencia disminuye el valor de la “longitud de onda equivalente”, es decir aumenta la tasa de variación de la fase con la distancia, esto hace que mejore la resolución pero por otro lado aumenta la incertidumbre ante variaciones bruscas de la distancia, también existe una limitación fijada por el número de pixels del sensor encargado de recoger el holograma, de forma que ha de cumplirse el teorema de Nyquist-Shannon de tal manera que el número de franjas debe ser, como máximo, igual a la mitad de los pixels del sensor para poder hacer una medición de la frecuencia de las mismas. Puesto que es necesario encontrar un compromiso entre la máxima resolución alcanzable y la máxima variación brusca de distancia esperada en la superficie, se puede utilizar como criterio para la selección que la “longitud de onda equivalente” debe ser mayor o igual que la máxima variación brusca de distancia esperada en la superficie. En el caso de la medición de rugosidad esto podría ser fijado por el máximo valor de Rz esperado en la superficie, es decir la máxima variación cresta-valle en el perfil de rugosidad.

El espesor del cristal uniáxico fija la variación de frecuencia y, por tanto, de fase con la distancia, por otro lado el número de franjas proyectadas sobre el detector se puede modificar variando la distancia focal de una lente cilíndrica colocada entre la lente de enfoque y el cristal uniáxico. Puesto que los rayos ordinario y extraordinario que salen del cristal uniáxico son paralelos y formarían el patrón de interferencia en el infinito, se coloca una lente cilíndrica que provoca que la interferencia se forme en un

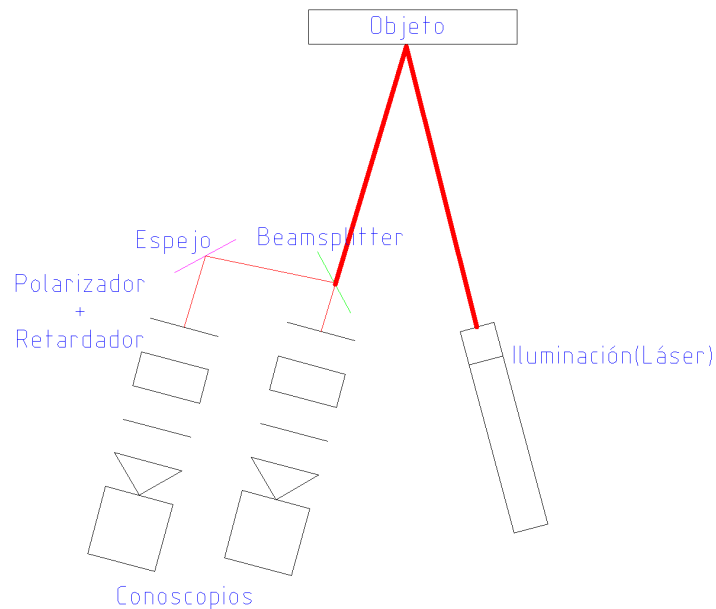


Figura 4.26: Esquema de un sensor con dos conoscopios, uno de ellos con un retardador de  $\pi$  radianes. Se ha representado en rojo el camino óptico seguido por el haz de iluminación, se puede apreciar en la potencia del mismo, representada por el grosor de la línea, disminuye al atravesar el beamsplitter, esto es debido a que la potencia debe dividirse en dos haces.

plano próximo al detector. Variando la distancia focal de esta lente cilíndrica se varía el plano en el que se forma la interferencia y por tanto la magnificación del patrón de interferencia que “ve” el detector. El resultado es que se puede controlar el número de franjas en la imagen obtenida buscando la que mejor se adecúe al tamaño del sensor.

## 4.6. Conclusiones

Es este capítulo se han estudiado los elementos de un sensor conoscópico y su influencia, el láser y la alternativa para la generación directa de una línea simplificando el montaje y disminuyendo las pérdidas de luz; la influencia del espesor del cristal uniaxial y el criterio a seguir para elegir su valor; el objetivo de la lente cilíndrica. Así mismo se ha visto como la configuración con un pequeño ángulo entre el láser y el conoscopio mejora la sensibilidad del sensor al poder realizar mediciones en fase a costa de perder la información precisa de la distancia absoluta.

En la parte referente a la generación de la línea láser se ha partido de la configuración actual que consiste simplemente en un diodo láser, una lente colimadora y un generador de línea de tipo Powell Lens. Se han estudiado las diversas propuestas existentes para la reducción de la coherencia de la fuente láser con el fin de reducir el ruido Speckle del holograma. Se han realizado montajes utilizando un difusor rotando a alta velocidad y se ha diseñado la configuración óptica que permiten enfocar el haz a la salida del difusor, que tiene una divergencia muy acusada. Con este montaje se han obtenido hologramas que comparados con los obtenidos en la configuración convencional ponen de manifiesto la mejora obtenida.

La Power Lens necesitan a la entrada un haz perfectamente colimado y con un diámetro suficientemente estrecho. Tras pasar el haz a través del difusor es muy difícil conseguir nuevamente un haz colimado, todo lo más se puede enfocar en un punto con mayor o menor profundidad de campo. El resultado de esto es que el haz entrante no tiene un diámetro y forma adecuados y por tanto la línea resultante no es suficientemente estrecha para esta aplicación.

Puesto que se utiliza un diodo láser para generar el haz láser, debido a la propia funcionamiento, el resultado es un haz divergente con una sección elíptica. En este trabajo se aporta como innovación el desarrollo y diseño de un nuevo tipo de lente que permite, aprovechando la propia divergencia del haz de un diodo láser, generar una línea láser que puede enfocarse con un ancho menor que con la Powell Lens además de permanecer enfocado en toda su longitud, cosa que no ocurre con la Powell lens. Esta lente, además, presenta otras ventajas como una menor pérdida de cantidad de luz respecto a una Powell Lens y que al colocarla detrás de un difusor no es necesario introducir complejos sistemas ópticos para enfocar sino que su diseño tiene en cuenta que la fuente original es divergente.

En el siguiente capítulo se expondrán los resultados de los experimentos llevados a cabo en el laboratorio con diferentes configuraciones y combinaciones de elementos buscando la que mejores resultados proporciona en función del objetivo de medición perseguido por el sensor.

## Capítulo 5

# ENSAYOS

Tras estudiar la configuración más adecuada para la medición de rugosidad se han realizado un conjunto de experimentos en laboratorio para comprobar la validez de los diseños y las capacidades de los mismos.

En los experimentos que se han realizado se han medido los diferentes parámetros que caracterizan el comportamiento del sensor, estos parámetros incluyen, además de la propia configuración del sensor, la medición de la resolución, la profundidad de campo del sensor y el funcionamiento del sensor cuando la superficie presenta un cierto ángulo respecto de la normal del sensor. Este último parámetro resulta interesante en las aplicaciones industriales puesto que no siempre es posible asegurar la colocación correcta de la superficie. En el diseño del sensor no es posible maximizar todos los parámetros de funcionamiento del mismo, sino que será necesario, en la mayoría de ellos, alcanzar una configuración que proporcione unos valores aceptables para todos ellos en función del entorno y la aplicación específica del sensor.

### 5.1. Diseño de los experimentos

Los experimentos se han realizado montando los componentes que forman el sensor sobre una mesa óptica en la configuración de triangulación, se han utilizado diversos materiales y acabados para la realización de los experimentos y la verificación de los resultados, así mismo se dispone de un conjunto de patrones con rugosidad calibrada. Para el movimiento de la superficie se ha utilizado una mesa de coordenadas de 3 ejes con una precisión de 10 nanómetros en cada uno de los ejes.

En los siguientes apartados se expondrá cada uno de los experimentos realizados para la evaluación de cada uno de los parámetros mencionados en el *capítulo 4*. Todos los experimentos se han realizado con los mismos elementos, lo que permite hacer una valoración del comportamiento en conjunto del sensor y establecer cual es la configuración óptima que permite obtener la mejor resolución con la mayor versatilidad para la utilización.

Los ensayos que se han realizado son:

- Determinación del ángulo óptimo de triangulación, en este ensayo se buscaba determinar el ángulo que proporciona una mejor resolución.
- Ensayo de resolución, para obtener una valoración de la relación entre la distancia de trabajo y la resolución obtenida, fijando el valor del ángulo de triangulación.
- Ensayo de profundidad de campo, con el que se puede calcular la relación entre la resolución y la profundidad de campo del sensor.
- Medida de los límites del ángulo formado entre el eje del sensor y la normal de la superficie. Los resultados de este experimento permiten valorar la flexibilidad del sensor a la hora de ser utilizado en entornos no controlados, como puede ser una factoría.

### 5.1.1. Ángulo óptimo de triangulación

El ángulo formado entre la rama de iluminación y la rama de generación del holograma determina la resolución máxima que se puede obtener con el sensor, si se fijan el resto de parámetros de la configuración. Cuando se utiliza la medida en fase, este ángulo determina la variación de la fase respecto de la variación de distancia, puesto que la variación de frecuencia depende del grosor del cristal birrefringente. Por tanto, el ángulo de triangulación determina la longitud de onda equivalente que, a su vez, fija el máximo gradiente que es posible medir con la configuración elegida; si la longitud de onda equivalente es muy pequeña, la variación de fase con la distancia es muy elevada pero el máximo gradiente que se puede medir se reduce, conviene recordar que, cuando se utiliza la fase para medir distancias, la máxima variación que se puede medir es de  $2\pi$ .

Se ha realizado un experimento, en el laboratorio, para la determinación del ángulo óptimo de la triangulación entre la rama de iluminación y de generación del holograma, realizando para ello ensayos de resolución tal como se explican en el punto 5.1.2. Para ello se han fijado, cuando ha sido posible, todas las variables de la configuración del sensor, grosor del cristal birrefringente, configuración óptica del conoscopio y configuración de la rama de generación del punto para la disminución de la coherencia y reducción de ruido speckle. Lo que no ha sido posible mantener en todos los casos es la distancia de trabajo del sistema, esto es debido al tamaño de los elementos de ambas ramas que obligaban a separarlos cuando el ángulo era reducido y por tanto aumentar la distancia de trabajo.

Por esta razón, para poder comparar las resoluciones obtenidas con los diferentes ángulos se definió el concepto de *Resolución relativa en fase*, este parámetro define el número de particiones que es posible discriminar en una variación de  $2\pi$  de la fase, es decir la mínima variación de distancia que es posible determinar por la variación de fase. Para ello se calcula la longitud de onda equivalente, definida en el apartado 4.1, y se divide por la resolución absoluta, para cada configuración. Por ejemplo, para un ángulo de 14.9 grados es posible determinar una variación de  $2\pi/70$  esto es 0.09radianes, por tanto el ruido de medición es menor que este valor. Para el ángulo de 28.9 grados, la variación mínima de fase que es posible discriminar es de 0.029 radianes. Dependiendo del resto de la configuración y de la longitud de onda equivalente se obtendrá la mínima variación de distancia que es posible medir. Si la longitud de onda equivalente para la configuración es de, por ejemplo, 0.1mm, será posible discriminar variaciones

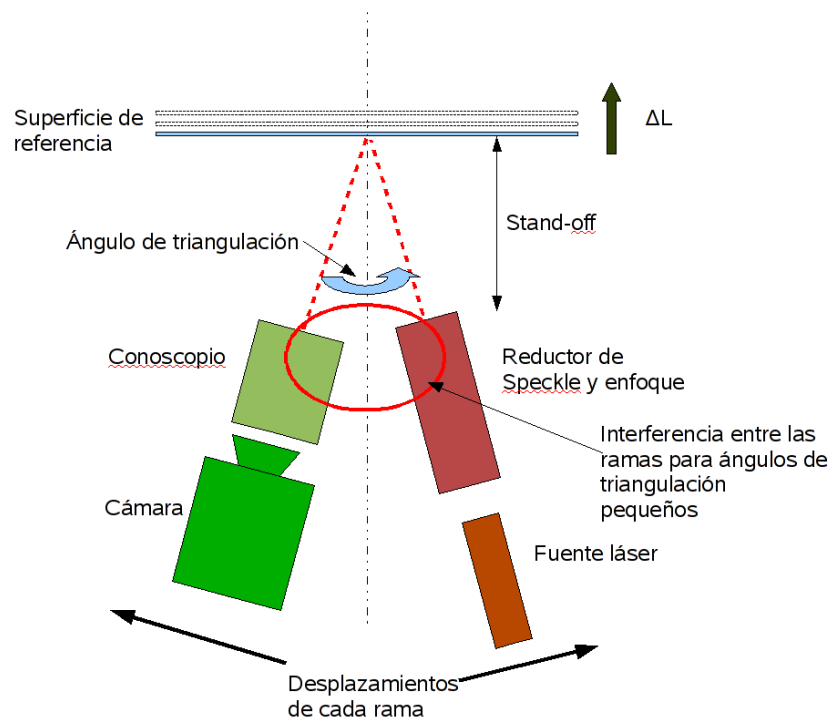


Figura 5.1: Esquema representativo la configuración y los movimientos relativos entre los elementos que componen el sensor para la determinación del ángulo óptimo de triangulación. El círculo rojo muestra la interferencia entre los elementos cuando el ángulo de triangulación es pequeño y la distancia de trabajo, también, es pequeña. Por esta razón es necesario definir el parámetro de *resolución relativa en fase* tal como se explica en el texto.

Ángulo de triangulación (°)	Resolución relativa en fase	Mín. fase detectable (rad)
14.9	70	0.0898
19.2	105	0.0598
23.7	197	0.0319
28.9	222	0.0283
34.2	146	0.0430
34.9	68	0.0924

Tabla 5.1: Datos de ángulos de triangulación y resolución relativa en fase, esta tabla representa la variación mínima de fase que es posible discriminar.

de distancia de  $0.45\mu\text{m}$ . Se considera *resolución absoluta* a la mínima variación de distancia que es posible distinguir con el sensor. La *tabla 5.1* contiene los resultados del experimento con cada una de las configuraciones. El ángulo está en grados y las unidades de la resolución relativa en fase representan el número de particiones que es posible distinguir en una variación de  $2\pi$  de la fase, y las unidades son  $\frac{\circ}{mm}$ . Las *figuras 5.2* y *5.3* muestra gráficamente los datos de la tabla, en ellas se puede observar como la resolución relativa en fase aumenta hasta un máximo próximo a los  $30^\circ$  y luego cae rápidamente pasado este ángulo, lo mismo ocurre con la variación mínima de fase que es posible distinguir. Esta pérdida de resolución para grandes ángulos es debida, principalmente, a la reflexión de la iluminación sobre la propia superficie rugosa, ya que, aunque en la teoría si se aumenta el ángulo aumenta la resolución, en la realidad, debido a la reflexión del haz de iluminación sobre la superficie, la resolución muestra un valor máximo y luego comienza a decaer la resolución, se trata pues de una limitación impuesta por las superficies estudiadas y no por la propia física del fenómeno conoscópico. Esto ocurría en todas las superficies estudiadas.

Aunque a la vista de los resultados se ve que el ángulo óptimo se encuentra próximo a  $30$  grados, en la práctica este ángulo es excesivo y presenta problemas cuando la superficie estudiada no se encuentra perfectamente perpendicular al eje del sensor, por lo que es recomendable disminuir el valor de este ángulo sacrificando resolución en beneficio de la flexibilidad que aporta el poder trabajar con ángulos mayores entre la superficie estudiada y el eje del sensor.

### 5.1.2. Ensayo de resolución

Se ha realizado una batería de ensayos para la determinación de la resolución real del sensor diseñado, los ensayos se han realizado con diferentes ángulos de triangulación y distancias de trabajo, también se han realizado ensayos sin el sistema de reducción de ruido Speckle.

En la *figura 5.4* se muestra el esquema del ensayo. El ensayo consiste en la adquisición de perfiles sobre planos paralelos separados una determinada distancia,  $\Delta L$ . Se fija como condición que la superficie utilizada como referencia tenga unos detalles menores que la resolución proporcionada por la configuración elegida. Esto es difícil de obtener ya que significaría utilizar superficies especulares que introducen otro tipo de problemas que no serán estudiados en este trabajo, por tanto, se elige una superficie con una baja rugosidad, sin ser especular, y el movimiento se realiza perpendicular al

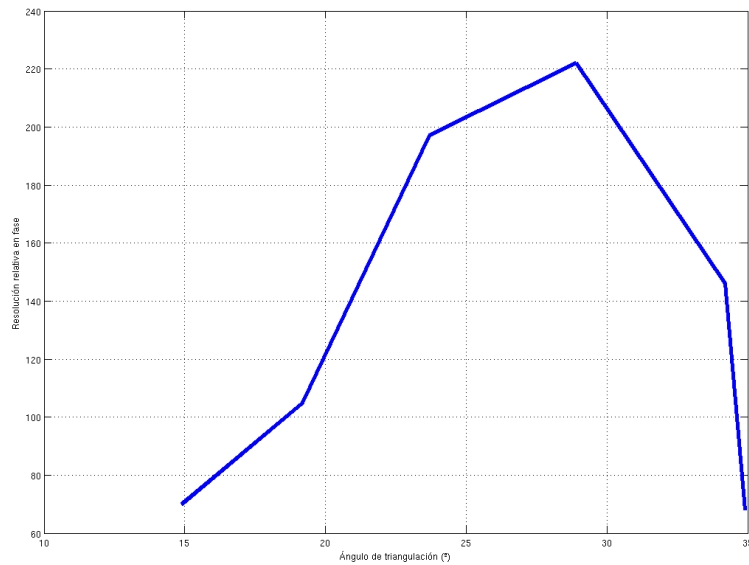


Figura 5.2: Resolución relativa en fase en función del ángulo de triangulación

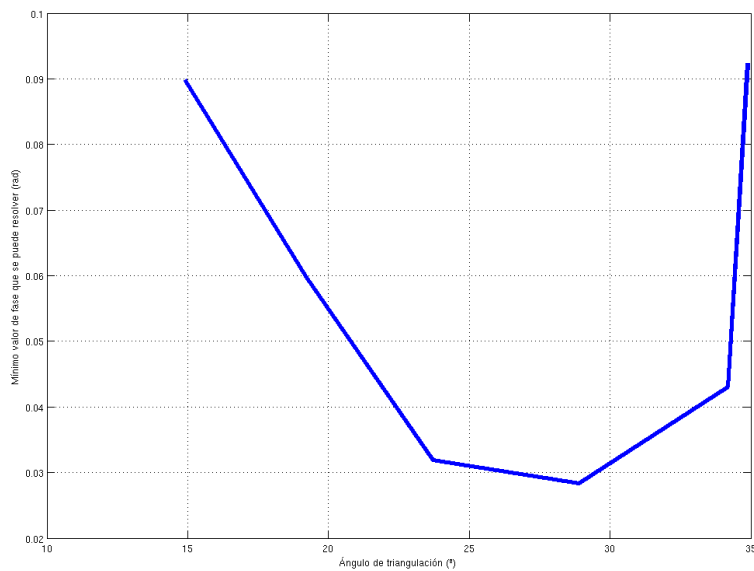


Figura 5.3: Variación mínima de fase que es posible resolver en función del ángulo de triangulación



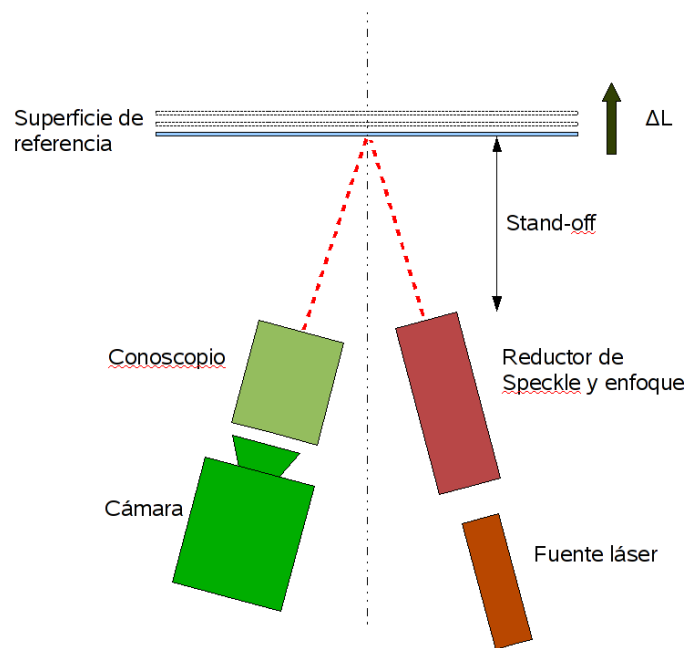


Figura 5.4: Esquema representativo del ensayo de resolución, el ramo de iluminación y el conoscopio forman un cierto ángulo de triangulación. La superficie de referencia se desplaza perpendicular a la bisectriz de ese ángulo con lo que el perfil captura tras cada movimiento no varía

eje de la configuración, es decir, a la bisectriz del ángulo formado entre la rama de iluminación y el conoscopio. Con esta condición, el perfil capturado no varía al desplazar la superficie y si existen detalles mayores que la resolución del sensor, estos permanecerán fijos en todas las imágenes y no afectarán a los cálculos de resolución. El entorno de trabajo, de desplazamiento de la superficie, está centrado a la distancia de trabajo óptima de la configuración, que depende del ángulo de triangulación y de los enfoques de la línea de iluminación y de la cámara.

Con este ensayo se determinará uno de los parámetros más importantes del sensor y, realizando diferentes configuraciones, se podrá determinar la forma de generar la línea más efectiva. Ha de tenerse en cuenta que la calidad de la línea de iluminación de la superficie determina la resolución que se puede obtener, así, cuanto más ancha es esta línea peor es la resolución obtenida, entre otros motivos debido a que el conoscopio recibe luz de puntos adyacentes a los medidos.

### **5.1.3. Ensayo de profundidad de campo**

Otro parámetro muy importante en el momento de diseñar un sensor es la profundidad de campo en la que se puede trabajar. La profundidad de campo es importante ya que permite determinar el rango de trabajo del sensor y servirá para decidir un sensor u otro. En general, durante el diseño de un sensor se suele alcanzar un punto de compromiso entre la resolución alcanzada y la profundidad de campo proporcionada por el sensor ya que al aumentar esta, la primera empeora. Por esta razón es importante determinar la profundidad de campo del sensor en relación con la resolución que proporciona, para ello se ha diseñado un experimento que permite determinar los límites de funcionamiento del sensor.

El ensayo consiste, al igual que en el caso anterior, en la adquisición de planos paralelos equiespaciados, pero en este caso la distancia mínima corresponde a una distancia en la que no existe señal y el desplazamiento se realiza hasta alcanzar un punto tan alejado en el que, de nuevo, la señal no existe. En las posiciones intermedias se mide la resolución entre cada dos planos. El rango de trabajo se fija entre la distancia mínima y máxima para las cuales la resolución se mantiene mejor o igual a la deseada. En el apartado de resultados se expondrán las medidas realizadas para este experimento.

En el diseño de un sensor para ser utilizado en una aplicación industrial on-line la profundidad de campo es un parámetro que debe estudiarse con cuidado puesto que en este tipo de aplicaciones las tolerancias de posicionamiento de la superficie a estudiar suelen ser elevadas y si el sensor proporciona una profundidad de campo reducida puede ocurrir que en un porcentaje elevado de situaciones las medidas se encuentren fuera de rango.

### **5.1.4. Ensayo de tolerancia en el ángulo de la superficie**

Dentro del entorno industrial y teniendo en cuenta la misma limitación en cuanto a la situación de la superficie que va a ser estudiada, el ángulo entre el eje del sensor y la superficie puede sufrir variaciones. Debido a esto se ha diseñado un ensayo que permita medir el máximo desvío angular de la normal de la superficie respecto al eje del sensor. Al igual que en el caso anterior se realizaron ensayos de resolución con

diferentes ángulos entre la normal de la superficie y el eje del sensor, ver *figura 5.5*. El máximo ángulo considerado es aquel para el que la resolución es mejor o igual a un valor fijado. Para evitar variaciones en el perfil estudiado en cada ángulo girado, dicho giro se realiza respecto del punto de incidencia del haz de iluminación en la superficie, de esta forma se asegura que el perfil es el mismo en todos los casos y la comparación y medidas son fiables. En este caso el ensayo consta de dos movimientos, por un lado se fija el ángulo entre la normal de la superficie y el eje del sensor y a continuación se realiza un ensayo de resolución desplazando la superficie respecto del en la dirección perpendicular al sensor. De nuevo, en el diseño de un sensor ha de llegarse a un punto de compromiso entre ambos valores.

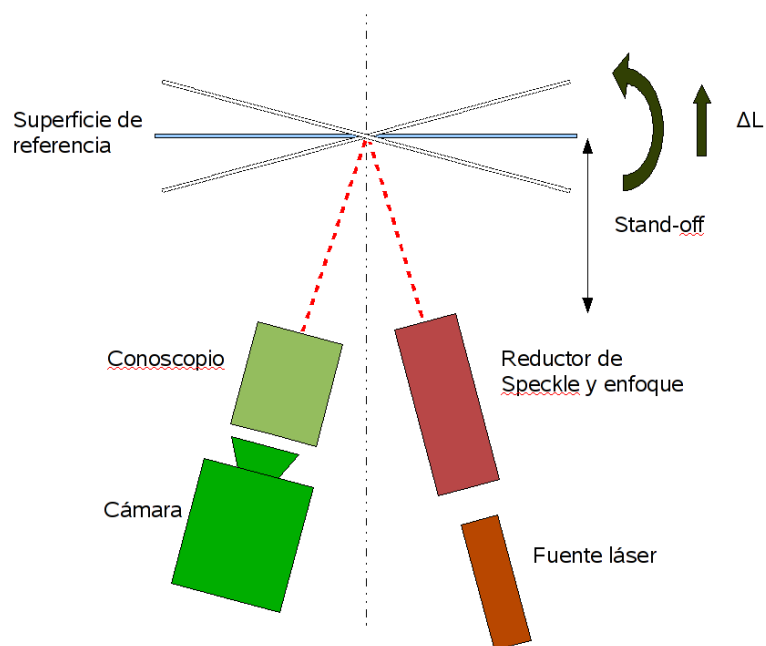


Figura 5.5: Esquema representativo del ensayo para determinar el máximo ángulo de soportado entre el eje del sensor y la normal de la superficie estudiada.

## 5.2. Resultados

Una vez visto el diseño de los ensayos, se llevaron a cabo numerosas medidas y repeticiones de los mismos. En los apartados siguientes se muestran los resultados más significativos de estos ensayos y se da una explicación de las medidas obtenidas y las diferencias entre las distintas realizaciones de los ensayos.

### 5.2.1. Resolución

Como se explicó anteriormente, para la medición de rugosidad es necesario alcanzar resoluciones mejores que  $1\mu\text{m}$  para la reconstrucción, fiel, de los perfiles submicrométricos de las superficies. Para evaluar la resolución del sensor y estudiar el efecto de los diferentes componentes y configuración de los elementos del sensor se han realizado numerosos experimentos de la forma comentada en el apartado 5.1.2. Para calcular la resolución los ensayos se realizan midiendo la frecuencia y fase al alejar una superficie plana del sensor en incrementos de distancia conocido y controlados con un tablero de desplazamiento de precisión. Una vez obtenidos los datos se ajustan a una recta de regresión considerando dicha recta como la variación teórica de fase y frecuencia para esa variación de distancia. A continuación se calcula la máxima desviación entre los datos medidos y la recta de ajuste lo que indicará el error máximo cometido y por tanto la incertidumbre de medida del sensor. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

#### Ensayo: stand-off 400mm y triangulación de $20^\circ$

Este ensayo se realizó a una distancia de 400mm y con un ángulo de  $20^\circ$  entre la rama de iluminación y el conoscopio. La adquisición se realizó desplazando la superficie analizada  $5\mu\text{m}$  en la dirección perpendicular al eje del sensor. La resolución calculada con esta configuración es de  $7.7\mu\text{m}$ . En la *figura 5.6* se muestran los valores de fase

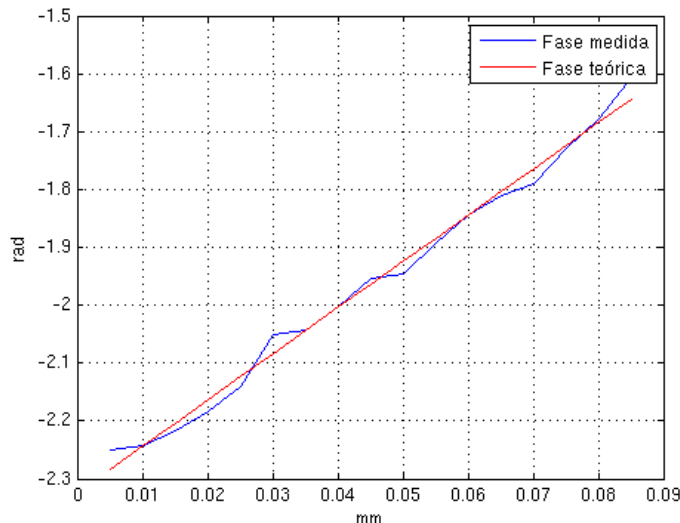


Figura 5.6: Comparación entre los valores medidos de fase y los valores teóricos de fase para una secuencia de desplazamiento de planos paralelos equiespaciados  $5\mu\text{m}$

medidos, en función del punto de desplazamiento, y los valores teóricos, tras ajustar los valores reales a una recta. La mayor desviación, respecto de los valores teóricos, corresponde al punto de desplazamiento de  $45\mu\text{m}$ , posiblemente en este punto se ha producido un fallo en el cálculo de la frecuencia y fase debido al ruido del holograma.

### Ensayo: stand-off 270mm y triangulación de 25°

Este ensayo se realizó a una distancia de trabajo de 270mm y con un ángulo de triangulación de 25°. La adquisición, al igual que en el ensayo precedente, se realizó desplazando la superficie objetivo  $5\mu\text{m}$  en la dirección perpendicular al eje del sensor. La resolución calculada para esta configuración es de  $2.2\mu\text{m}$ . Si se compara este ejemplo con el anterior, la mejora en la resolución, no es solamente debida a la variación en la distancia de trabajo, sino que también el ángulo de triangulación ha influido en el resultado, así, si se supone, como aproximación, que la resolución se duplica si se divide entre 2 la distancia, manteniendo el ángulo de la triangulación se habría obtenido una resolución, teórica, de  $5.5\mu\text{m}$ . Por motivos de disposición de los elementos no ha sido posible mantener el ángulo de 20° del ensayo anterior. En la *figura 5.7* se muestran

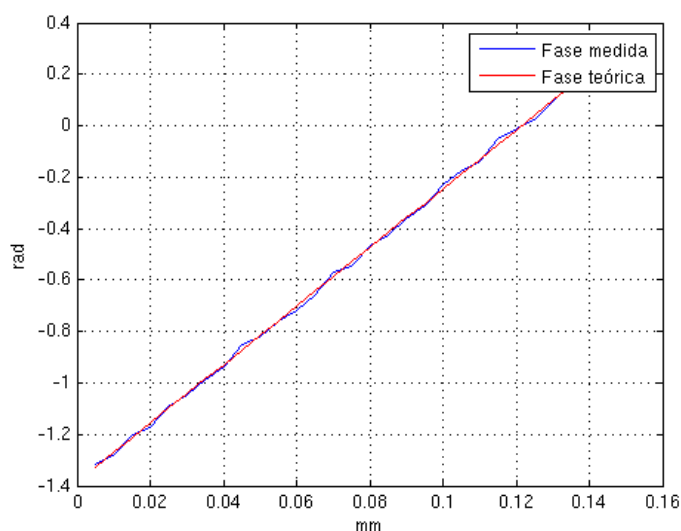


Figura 5.7: Comparación entre los valores medidos de fase y los valores teóricos de fase para una secuencia de desplazamiento de planos paralelos equiespaciados  $5\mu\text{m}$ , con una distancia de trabajo de 270mm y un ángulo de triangulación de 25°

una comparación entre los valores de fase medidos en cada una de las posiciones de la superficie de referencia, y las fases teóricas tras ajustar las fases medidas a una recta.

### Ensayo: stand-off 500mm y triangulación de 33.4°

La configuración utilizada en este ensayo corresponde a una distancia de trabajo de 500mm y un ángulo de triangulación de 33.4°, las características del ensayo son iguales a los anteriores. Con esta geometría se ha obtenido una resolución de  $12.5\mu\text{m}$ . La caída de resolución es debida, en parte al aumento de distancia, pero también por el aumento del ángulo de triangulación. Tal como se vió en el apartado 5.1.1, al incrementar el ángulo de triangulación por encima de 30° la resolución cae rápidamente. La *figura 5.8* muestra los resultados medidos y teóricos, las discrepancias en algunos puntos se deben al propio ruido de la señal, para los hologramas tomados se ha calculado una relación señal/ruido del 30 %, la baja calidad de la señal es debida al uso de un ángulo de triangulación excesivo que provoca una elevada dispersión de la luz que incide en

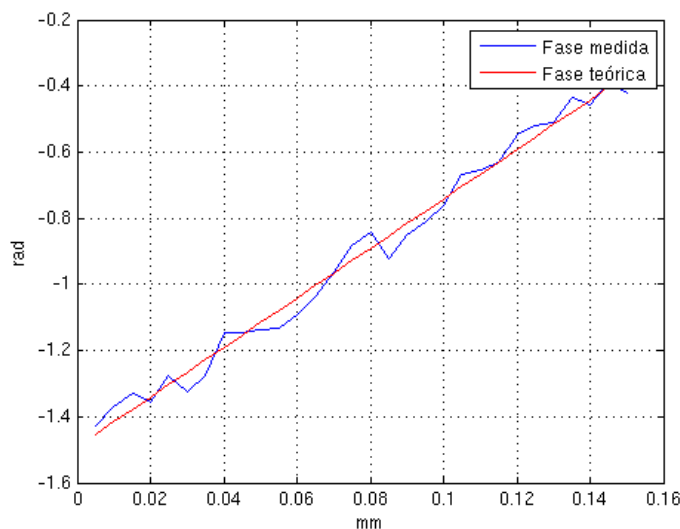


Figura 5.8: Comparación entre los valores medidos de fase y los valores teóricos de fase para una secuencia de desplazamiento de planos paralelos equiespaciados  $5\mu\text{m}$ , con una distancia de trabajo de 500mm y un ángulo de triangulación de  $33.4^\circ$

la superficie, debida a la propia rugosidad, y por tanto la cantidad de luz que llega al conoscopio es muy reducida e irregular introduciendo un nivel de ruido elevado en el holograma.

#### Ensayo: stand-off 300mm y triangulación de $19^\circ$

En este ensayo la geometría adoptada corresponde a una distancia de trabajo de 300mm y un ángulo de triangulación de  $19^\circ$ . La resolución obtenida es de  $5\mu\text{m}$ . La figura 5.9 se muestra la comparación entre las medidas tomadas y los valores teóricos calculados.

Todos los ensayos anteriores se han realizado utilizando la configuración del conoscopio mostrada en el capítulo 3. Las características de los componentes utilizados son:

- **Polarizador:** con un ratio de extinción 10.000:1
- **Cristal uniáxico:** con un grosor de 14mm
- **Difusor:** girando para disminuir el ruido Speckle presente en el holograma.

A continuación se muestran un conjunto de ensayos en los que se han variado uno o varios de estos componentes con el objeto de analizar la influencia de los mismos.

#### Ensayo: stand-off 300mm, triangulación de $28^\circ$ y difusor parado

En este ensayo se representa la influencia del sistema de reducción de Speckle, en este caso se ha anulado el sistema simplemente parando el difusor encargado de

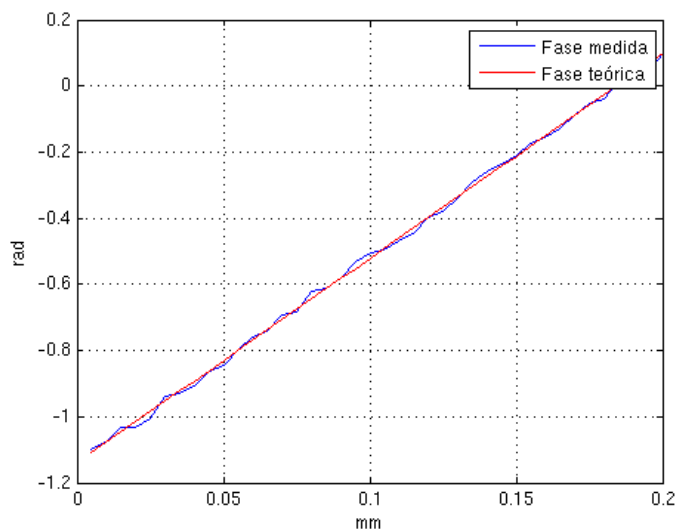


Figura 5.9: Comparación entre los valores medidos de fase y los valores teóricos de fase para una secuencia de desplazamiento de planos paralelos equiespaciados  $5\mu\text{m}$ , con una distancia de trabajo de 300mm y un ángulo de triangulación de  $19^\circ$

generar los diferentes patrones de Speckle que se cancelan en conjunto. A pesar de estar funcionando a una distancia de trabajo de 300mm, como en el ensayo anterior, y de tener un ángulo de triangulación muy próximo al ideal, la resolución obtenida solo es de  $34\mu\text{m}$ , muy lejos de las conseguidas, en cualquier configuración, con el sistema de reducción de ruido funcionando.

En la *figura 5.10* se muestra la comparación entre las medidas de fase realizadas y los valores de fase teóricos que se deberían haber obtenido. Se puede observar que existen muestras que no siguen la secuencia creciente esperada, esto es debido a la presencia de ruido Speckle que añade frecuencias adicionales y por tanto disminuye la información útil presente en el holograma. En la *figura 5.11* se puede ver que, en vez de obtener una senoide bien definida, se obtiene una señal con varias componentes frecuenciales, como se puede ver en el detalle de la transformada de Fourier calculada, existen varias componentes muy próximas que dificultan la detección de la componente principal. Este es un ejemplo de la influencia del Ruido Speckle visto en el apartado 4.2.2.

La influencia del ruido Speckle es muy significativa cuando se estudia la superficie a nivel submicrométrico puesto que es producido por la topografía de la superficie que es, precisamente, la escala a la que se está reconstruyendo la misma, con lo cual, las componentes frecuenciales del ruido estarán en el mismo entorno de la propia señal que contiene la información de distancia.

#### **Ensayo: stand-off 500mm, triangulación de $21^\circ$ y cristal uniaxial de 28mm**

En este ensayo se ha mantenido la configuración, en cuanto a los elementos utilizados, excepto en el caso del cristal uniaxial que ha duplicado su grosor, según esto, y lo visto en el *capítulo 3* la frecuencia resultante en el holograma será doble que las ob-

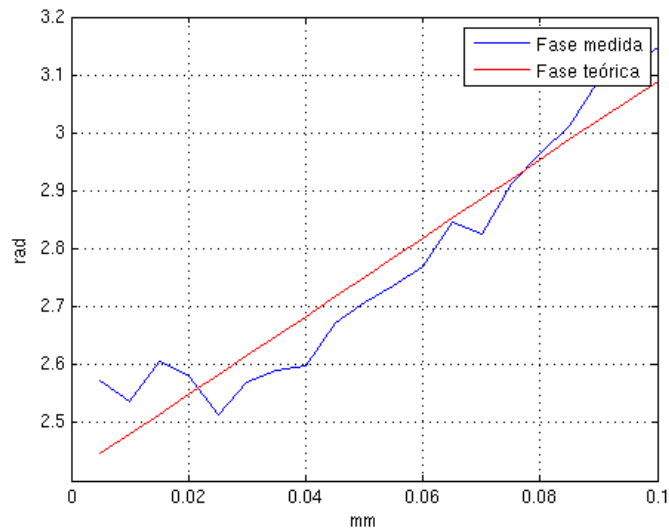
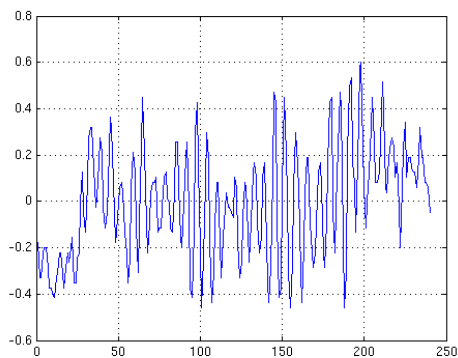
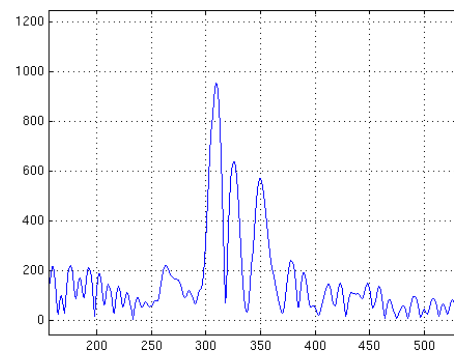


Figura 5.10: Comparación entre los valores medidos de fase y los valores teóricos de fase para una secuencia de desplazamiento de planos paralelos equiespaciados  $5\mu\text{m}$ , con una distancia de trabajo de 300mm, un ángulo de triangulación de  $28^\circ$  y el sistema de reducción de ruido Speckle parado.



(a) Holograma sin reducción de ruido Speckle



(b) Detalle del espectro de frecuencias del holograma obtenido sin reducción de ruido Speckle

Figura 5.11: Holograma puntual obtenido sin reducción de ruido Speckle y detalle del espectro de frecuencias contenidas.



tenidas hasta el momento. Con esta configuración la resolución obtenida es de  $4.5\mu\text{m}$ , que mejor que la obtenida en el ensayo con el cristal de grosor  $14\text{mm}$  y una distancia de trabajo de  $400\text{mm}$  con una triangulación de  $20^\circ$ .

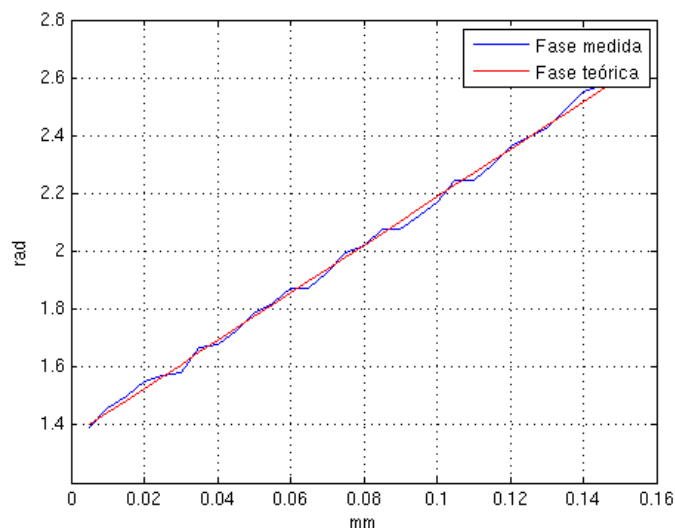


Figura 5.12: Comparación entre los valores medidos de fase y los valores teóricos de fase para una secuencia de desplazamiento de planos paralelos equiespaciados  $5\mu\text{m}$ , con una distancia de trabajo de  $500\text{mm}$ , un ángulo de triangulación de  $21^\circ$  y grosor del cristal uniaxial de  $28\text{mm}$

En la *figura 5.12* se muestra la comparación entre las medidas realizadas y los valores teóricos, la desviación máxima es de  $5\mu\text{m}$ , como se comentó más arriba, y la mejora se debe al aumento del grosor del cristal, la desventaja de este método a la hora de mejorar la resolución viene dada por la disminución de la longitud de onda equivalente, es decir la máxima variación de distancia que corresponde a una variación de la fase de  $2\pi$ . Al aumentar la frecuencia, la fase varía más rápidamente, con lo que disminuye la máxima variación que es posible medir sin incertidumbre. La resolución relativa en fase, que se definió como el número de valores que se pueden distinguir en una variación de la fase de  $2\pi$  no varía respecto del grosor del cristal uniaxial, por tanto al mejorar en la resolución viene dada por la reducción de la longitud de onda equivalente.

#### Ensayo: stand-off 300mm, triangulación de $28^\circ$ , comparación de polarizadores

Con este ensayo se comprobó la influencia de la calidad del polarizador utilizado. Para ello se mantuvo la configuración, en cuanto a geometría, y el resto de componentes. Se utilizaron dos polarizadores, uno con un ratio de extinción de  $10.000:1$  y otro con un ratio de  $100.000:1$ . Las resoluciones respectivas alcanzadas son de  $1.9\mu\text{m}$  y  $1\mu\text{m}$ . Esta diferencia viene marcada por la mejor selección de la polarización de los rayos que han de interferir para formar el holograma. En el caso del polarizador con menor ratio de extinción, este es atravesado por una mayor densidad de rayos con la polarización equivocada, lo cual dará lugar a ruido en el holograma introduciendo frecuencias adicionales y, por tanto, reduciendo la relación señal-ruido.

**Ensayo: stand-off 180mm, triangulación de 28°, sin válvula de luz**

Como se ha visto en el capítulo 3, introductorio a la *Holografía Conoscópica*, el conoscopio está formado, básicamente, por un cristal uniáxico entre dos polarizadores circulares, con el fin de reducir el nivel de ruido se añade una *válvula de luz* que introduce alternativamente desfases en el frente de ondas dando lugar a hologramas desfasados 180°. Si se calcula el contraste utilizando ambos hologramas el resultado es un holograma en el que predomina la información común a ambos hologramas. Con las mejoras introducidas para la reducción de ruido Speckle y el uso de polarizadores de buena calidad se comprobó las consecuencias de suprimir la válvula de luz, es decir, no se calculará el contraste y se utilizará un único holograma.

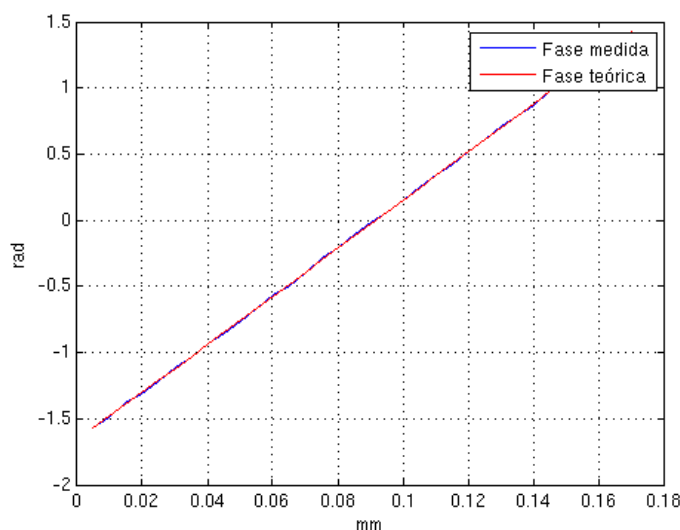


Figura 5.13: Comparación entre los valores medidos de fase y los valores teóricos de fase para una secuencia de desplazamiento de planos paralelos equiespaciados  $5\mu\text{m}$ , con una distancia de trabajo de 180mm, un ángulo de triangulación de  $28^\circ$  habiendo eliminado la válvula de luz

El resultado entre los valores teóricos y medidos puede observarse en la *figura 5.13*. El máximo error cometido es de  $0.9\mu\text{m}$ , esto significa unos resultados comparables a los obtenidos con las configuraciones utilizando la válvula de luz, este resultado puede explicarse puesto que la principal componente de ruido presente en los hologramas es debido al ruido Speckle que se ha reducido por el uso del difusor rotando. Este resultado es interesante para aplicaciones en las que el sensor se inspecciona superficies que se encuentran en movimiento, con el uso de la válvula se toman dos hologramas que no corresponden al mismo instante de tiempo con lo que, al estar desplazándose la superficie, corresponden a perfiles diferentes, y por tanto el contraste calculado no se corresponderá con un perfil real.

### Ensayo: stand-off 180mm, triangulación de 28°, sin válvula de luz ni polarizador delantero

Se realizó un experimento eliminado, además, el polarizador delantero, en este caso el máximo error cometido es de  $1.6\mu\text{m}$ , esto implica una pérdida significativa de resolución en comparación con la configuración que utiliza el polarizador, en cambio el único beneficio que supone la supresión del mismo es de carácter económico que así mismo es poco significativo en comparación con el resto de componentes. El resultado entre los valores teóricos y medidos puede observarse en la *figura 5.14*.

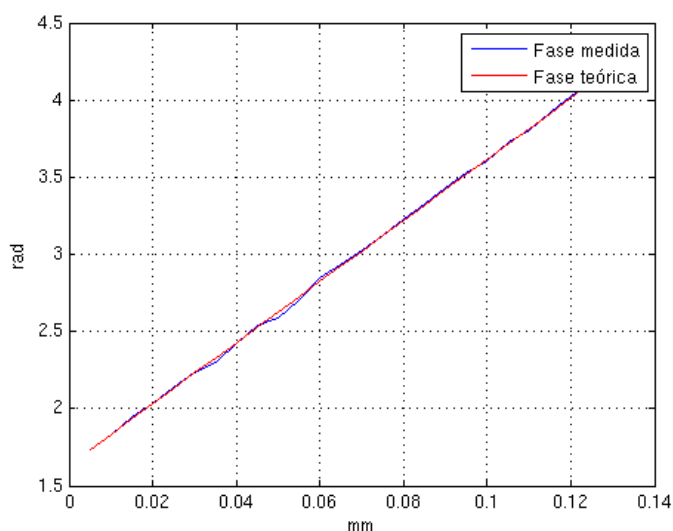


Figura 5.14: Comparación entre los valores medidos de fase y los valores teóricos de fase para una secuencia de desplazamiento de planos paralelos equiespaciados  $5\mu\text{m}$ , con una distancia de trabajo de 180mm, un ángulo de triangulación de  $28^\circ$  habiendo eliminado el polarizador delantero y la válvula de luz

### 5.2.2. Estabilidad de las medidas

Un aspecto importante que fija la máxima resolución que se puede esperar de un sensor es la estabilidad en las medidas. Definimos estabilidad como la máxima variación de las medidas a lo largo del tiempo en una situación invariable. En este sensor esta estabilidad viene determinada por tres factores:

- **Deriva de frecuencia de la fuente de iluminación láser**, los diodos láser tienen una pequeña deriva en la frecuencia de emisión que puede inducir variaciones en la frecuencia y fase del holograma. Por ejemplo, las fuentes láser utilizadas tienen una deriva de  $0.25\text{nm}/^\circ\text{C}$ , con la expresión

$$frec = \frac{shear}{\lambda * z} \quad (5.1)$$

que determina la frecuencia de las franjas por unidad de longitud, donde *frec* es la frecuencia de las franjas por unidad de longitud, *shear* es la separación de los

rayos ordinario y extraordinario introducidos por el shavart plate,  $\lambda$  es la longitud de onda de la fuente de luz y  $z$  es la distancia de trabajo, la variación de frecuencia por grado centígrado es de  $0.001\text{mm}^{-1}$

- **Temperatura**, cuando se trabaja con sensores de elevada precisión la temperatura juega un papel importante a la hora de determinar la máxima resolución que se puede alcanzár con ellos. En este caso la temperatura tiene una influencia limitada puesto que la tolerancia en la colocación de los elementos es suficientemente grande y por tanto las variaciones debidas a dilataciones por la temperatura son insignificantes.
- **Giro del difusor**, para la reducción del ruido Speckle se coloca un difusor girando a elevada velocidad en la rama de iluminación, esto provoca que se genere un número suficientemente elevado de patrones Speckle que, en media, se cancelan. El giro del difusor dista mucho de ser perfecto, en cuanto a la permanencia en el mismo plano del difusor por la tolerancias mecánicas del motor y la construcción del conjunto. Esto hace que este factor sea el principal a la hora de afectar a la estabilidad de las medidas.

Se han realizado ensayos, en paralelo con cada una de las configuraciones utilizadas para el estudio de la resolución, para la estimación de la estabilidad de las medidas y los resultados se muestran a continuación.

#### **Ensayo: stand-off 270mm y triangulación de 25°**

Para este ensayo se utilizó la misma configuración del sensor que la comentada en el primer ensayo de resolución, esto es, una distancia de trabajo de 270mm y un ángulo de triangulación de 25°. En el ensayo se tomó una secuencia de 120 hologramas con una frecuencia de 30 frames/seg.

Para calcular la estabilidad de la medida, con el difusor girando, se calculo en primer lugar la longitud de onda equivalente, esto es la variación de distancia en milímetros que corresponde a una variación en la fase de 2, resultando un valor de 0.520mm. A continuación se tomó una secuencia de hologramas sobre el mismo punto, sin variar la distancia y con un tiempo de exposición menor que el periodo de rotación del difusor. Para esa secuencia de hologramas se calculan las fases tal como se muestra en la *figura 5.15*. Si se convierte la variación de fase a milímetros utilizando la longitud de onda equivalente, se obtiene una variación máxima de  $1\mu$ .

Se observa un patrón en las medidas debido al giro del difusor utilizado para disminuir el ruido Speckle. Se concluye que este componente es la fuente principal de incertidumbre al realizar las medidas y que afecta directamente a la estabilidad.

#### **Ensayo: stand-off 500mm, triangulación de 21°**

Para este ensayo se utilizó una configuración de 500mm para la distancia de trabajo y un ángulo de triangulación de 21°, al diferencia que en el ensayo de resolución realizado con esta geometría, el cristal utilizado en este caso tiene un grosor de 14mm. La longitud de onda equivalente es de 0.733mm lo que da lugar a una desviación de las medidas de estabilidad de  $6.1\mu\text{m}$ .

De nuevo se observa en la *figura 5.16* que la dispersión de las medidas es debida fundamentalmente a una componente periódica introducida por la rotación del difusor.

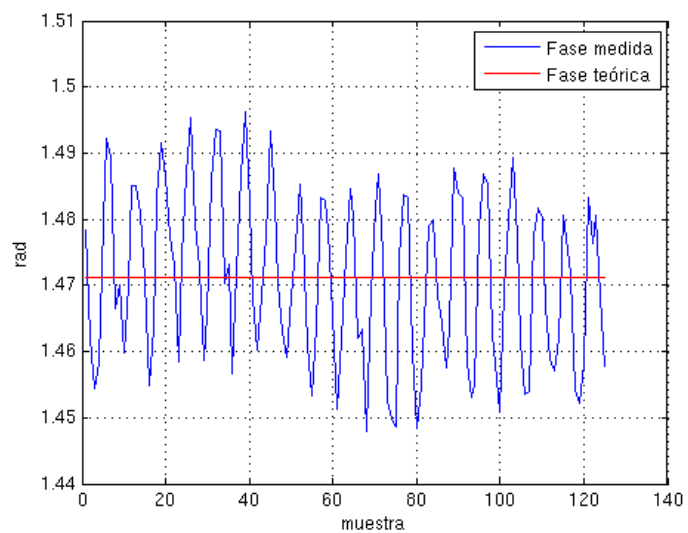


Figura 5.15: Evolución en el tiempo de la fase de un punto del perfil a distancia constante a una distancia de trabajo de 270mm y un ángulo de triangulación de  $25^\circ$

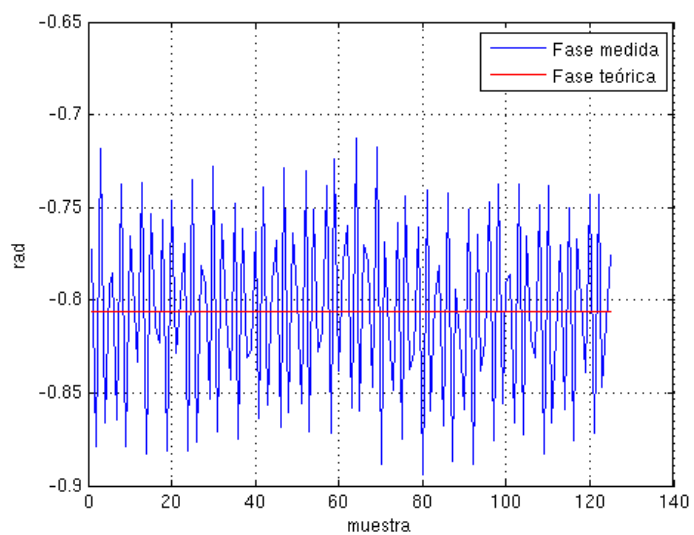


Figura 5.16: Evolución en el tiempo de la fase de un punto del perfil a distancia constante a una distancia de trabajo de 500mm y un ángulo de triangulación de  $21^\circ$

**Ensayo: stand-off 500mm, triangulación de 33.4°**

Este ensayo se realizó con la misma configuración que el visto anteriormente, con las mismas características, para la evaluación de la resolución. Se ha calculado una desviación estándar del valor de la fase de 0.033 rad, previamente se calculó la longitud de onda equivalente con esta configuración obteniendo un valor de 0.782mm, con lo que la desviación estándar convertida a milímetros es de  $4.1\mu\text{m}$ . En la *figura 5.17* se muestran los valores de fase obtenidos en una secuencia de 125 hologramas a una frecuencia de 30 frames/seg.

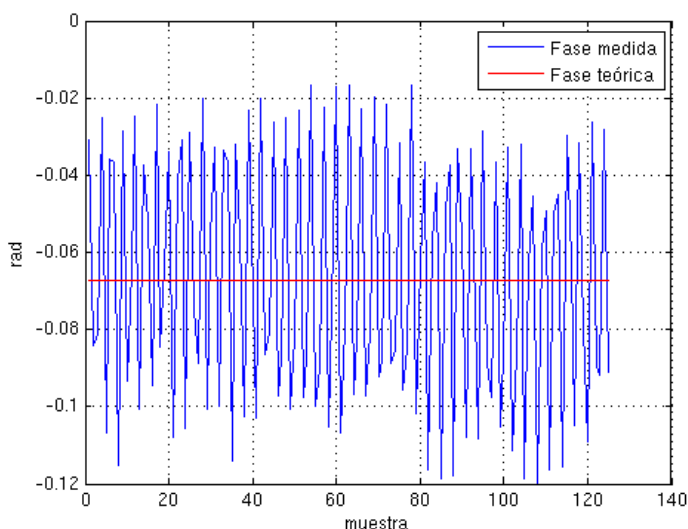


Figura 5.17: Evolución en el tiempo de la fase de un punto del perfil a distancia constante a una distancia de trabajo de 500mm y un ángulo de triangulación de 33.4°

La fase tiene una evolución periódica debida al giro del difusor, por tanto la mayor parte de la inestabilidad es debida al giro del difusor, tal como se adelantó previamente. La componente frecuencial de la inestabilidad de este ensayo es mayor que la observada en el ensayo anterior, esto se debe a una variación en la velocidad de giro del difusor, esa variación no ha sido posible medirla por falta de los instrumentos necesarios en el laboratorio.

**Ensayo: stand-off 500mm, triangulación de 33.4° y difusor parado**

El objetivo de este ensayo es verificar la afirmación realizada en los dos ensayos anteriores sobre la naturaleza de la componente senoidal observada en los ensayos de estabilidad. Para ello, utilizando una configuración idéntica a la anterior, se paró el difusor y se realizó una adquisición de una secuencia de hologramas estáticos. Esta secuencia tiene una longitud de 125 hologramas tomados a una frecuencia de 30 frames/seg.

En la *figura 5.18* se puede observar que ha desaparecido la componente senoidal que sí estaba presente en los ensayos realizados con el difusor girando, lo que da lugar a una desviación estándar de las medidas de  $1.1\mu\text{m}$ , muy inferior a la obtenida en el

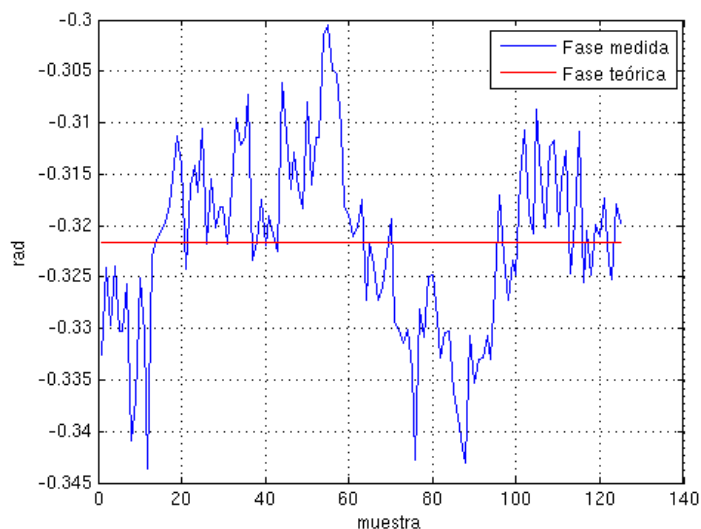


Figura 5.18: Evolución en el tiempo de la fase de un punto del perfil a distancia constante a una distancia de trabajo de 500mm y un ángulo de triangulación de  $33.4^\circ$  y con el difusor parado

ensayo con difusor girando. Esto confirma la afirmación realizada sobre la naturaleza de esta componente.

De los ensayos anteriores se desprende que la principal fuente de inestabilidad en las medidas viene dada, precisamente, por el elemento introducido para mejorar la resolución, un difusor girando para disminuir el ruido Speckle. En cualquier caso, el error debido, en los ensayos de resolución, al ruido Speckle justifica el uso del difusor con el fin de mejorar las características del sensor. Se deberán estudiar otros sistemas, sustitutivos del difusor, con el fin de mejorar la característica de estabilidad, pero ese apartado cae fuera del alcance de este trabajo.

### 5.2.3. Profundidad de campo

Como bien es sabido en el diseño de sensores, la profundidad de campo es un parámetro que determina la calidad de los mismos e indica el rango de trabajo en el que puede funcionar dicho sensor. En el caso del diseño de un sensor para la reconstrucción de perfiles submicrométricos con el fin de realizar medidas de rugosidad, este parámetro podría no resultar determinante puesto que las variaciones de distancia que es necesario medir llegan hasta unas pocas decenas de micrómetros, con lo cual la profundidad de campo estrictamente necesaria es muy reducida, si se dispone de un dispositivo de posicionamiento suficientemente preciso; pero, como ya se explicó anteriormente, el fin último del diseño de este sensor es su utilización en el entorno industrial, donde el uso de posicionadores de precisión es casi imposible y la superficie a estudiar tendrá unas holguras de posicionamiento, posiblemente, muy superiores a las habituales en este tipo de sensores, por tanto se ha prestado especial atención a este parámetro intentando maximizar su valor.

Para determinar la profundidad de campo obtenida con el sensor se han realizado diversos ensayos con la metodología expuesta en el apartado 5.1.3. Los resultados más significativos obtenidos se muestran a continuación.

#### Ensayo: stand-off 300mm, triangulación de 28°

En la figura 5.19 se ha representado la superficie de relación señal ruido, image izquierda, de un ensayo realizado a una distancia media de trabajo de 300mm con un ángulo de triangulación de 28° y con un avance entre planos de 0.2mm, cada columna representa un perfil de SNR a distancia constante. En la imagen derecha se muestra la evolución de la media de SNR para cada perfil. Se puede observar la variación de la relación señal ruido media teniendo un máximo, el punto de trabajo óptimo, y cayendo rápidamente al variar la distancia.

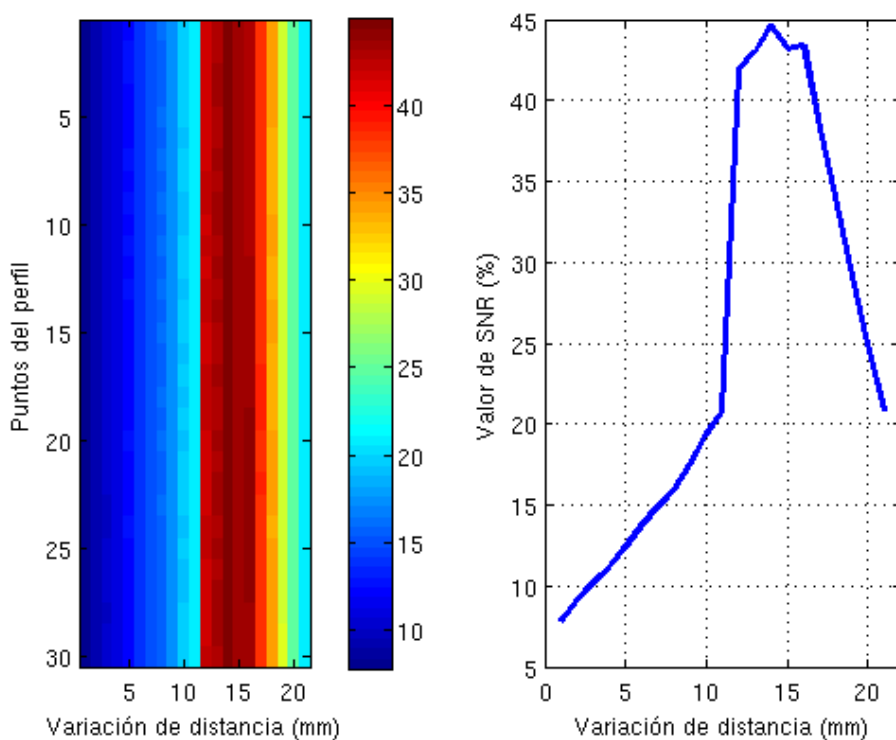


Figura 5.19: Superficie (derecha) y valores a lo largo de la distancia para un punto del perfil (izquierda) de relación señal-ruido para un ensayo de profundidad de campo en el que se ha capturado un mismo perfil a varias distancias de trabajo desplazando la muestra.

Si se considera un valor mínimo de SNR igual o superior al 40 %, el rango de distancias que cumple esta restricción es de 2mm. El motivo por el que cae tan rápidamente el valor de relación Señal Ruido es debido a la propia triangulación del sistema, esto hace que el haz reflejado rápidamente se salga del camino óptico del conoscopio y por tanto el contraste del holograma disminuya.



Por esta razón el ángulo de triangulación no debe ser tan elevado, aunque en los ensayos se haya visto que con este valor se alcanza la mejor resolución. Según la *figura 5.2* si este ángulo se reduce hasta 23 grados le pérdida de resolución relativa no es muy acusada y el ángulo es ligeramente más favorable.

#### 5.2.4. Comparación de configuraciones de cristal uniáxico, cilindro y lente de enfoque

Para poder determinar la combinación óptima del cristal uniáxico, cilindro y lente de enfoque se ha realizado un conjunto de ensayos utilizando los siguientes elementos:

- Cristales uniáxicos de grosor: 4, 7, 11, y 14mm
- Cilindro de enfoque de distancia focal: 72.5, 80, 147, 200 y 250mm
- Lente de enfoque de distancia focal: 25 y 35mm

El cristal uniáxico fija la frecuencia del holograma y por tanto la variación de la frecuencia y la fase con la distancia. El cilindro de enfoque tiene como misión forzar a formar la interferencia en un plano próximo al sensor CCD, no afecta por tanto en la variación de la frecuencia y fase con la distancia pero sí influye en el número de franjas que se proyectan sobre el sensor CCD. Por último la lente de enfoque, frente al sensor CCD, determina la apertura del perfil y el número de franjas proyectadas sobre el sensor.

En este conjunto de ensayos se ha estudiado el valor de la relación señal/ruido para cada una de las configuraciones y la frecuencia de franjas obtenida en el holograma. La *figura 5.20* se ve la relación entre estos tres elementos y la frecuencia de franjas obtenida.

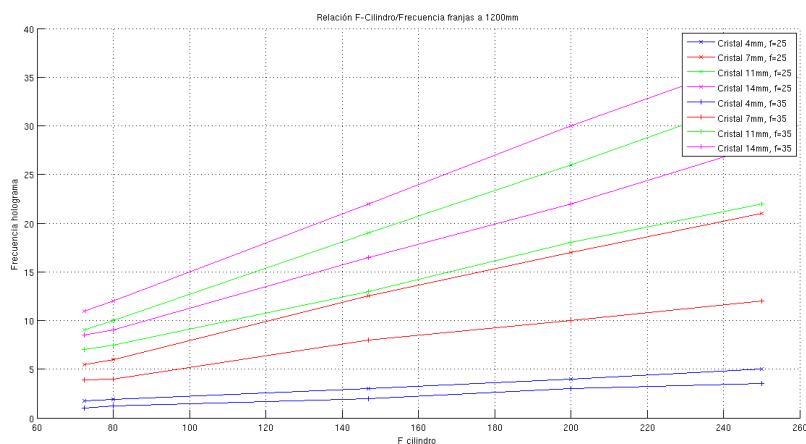


Figura 5.20: Frecuencias obtenidas en función del grosor del cristal uniáxico, el cilindro y la lente de enfoque.

Por otro lado en la tabla 5.2 se muestran los valores de frecuencia de franjas y SNR obtenidos con las diferentes configuraciones.

Cristal(mm)	Focal cilindro (mm)	Lente 25mm		Lente 35mm	
		Frecuencia	SNR	Frecuencia	SNR
4	72.5	1.75	20	1	20
4	80	1.9	25	1.25	25
4	147	3	35	2	35
4	200	4	70	3	70
4	250	<b>5</b>	<b>80</b>	<b>3.5</b>	<b>80</b>
7	72.5	5.5	4	3.9	20
7	80	6	4	4.5	25
7	147	12.5	4	8	35
7	200	17	4	10	70
7	250	21	4	<b>12</b>	<b>80</b>
11	72.5	9	4	7	2
11	80	10	4	7.5	2
11	147	19	6	13	3
11	200	26	5	18	4
11	250	33	6	22	5
14	72.5	11	5	8.5	4
14	80	12	4	9	4
14	147	22	6	16.5	5
14	200	30	5	22	7
14	250	37	8	28	8

Tabla 5.2: Resultados de frecuencia de franjas y SNR para diferentes configuraciones ópticas.

Analizando los resultados de la tabla se puede ver que para la lente de enfoque de 25mm la mejor combinación es la formada por el cristal de 4mm de grosor y el cilindro de distancia focal de 250mm. Y para la lente de enfoque de 35mm hay dos posibles combinaciones, la formada por el cristal de 4mm y el cilindro de 250mm y la formada por el cristal de 7mm y el cilindro de 250mm. En este segundo caso es preferible la segunda puesto que una mayor frecuencia de las franjas, proporcionada por el mayor grosor del cristal, supone una variación más rápida de la frecuencia y la fase y por tanto una mayor resolución. Por otro lado, la selección de la lente de enfoque está condicionada al tamaño del sensor CCD utilizado la misma apertura del perfil, a mayor tamaño del sensor mayor ha de ser la distancia focal de la lente. Es por tanto preferible el uso de la lente de 35mm.

### 5.2.5. Otros ensayos

#### Ensayo desplazamiento vertical

Este ensayo se realizó como comprobación y verificación de la veracidad de las medidas realizadas y reconstrucción de perfiles realizados. El mismo consiste en la toma de perfiles desplazando la muestra en la dirección del perfil tomado de forma que un perfil y el siguiente serán prácticamente iguales pero desplazados una cierta cantidad. Esto verifica la validez de los perfiles reconstruïdos y permite determinar la cantidad de ruido presente.

En la *figura 5.21* se muestran 5 perfiles correspondientes a la misma superficie y desplazados 0.1 mm en la dirección de exploración. Se puede comprobar que los detalles principales, como el escalón presente en el entorno de 5 mm, se mantiene en forma, al igual que el valle que se desplaza entorno a la posición de 3 mm.

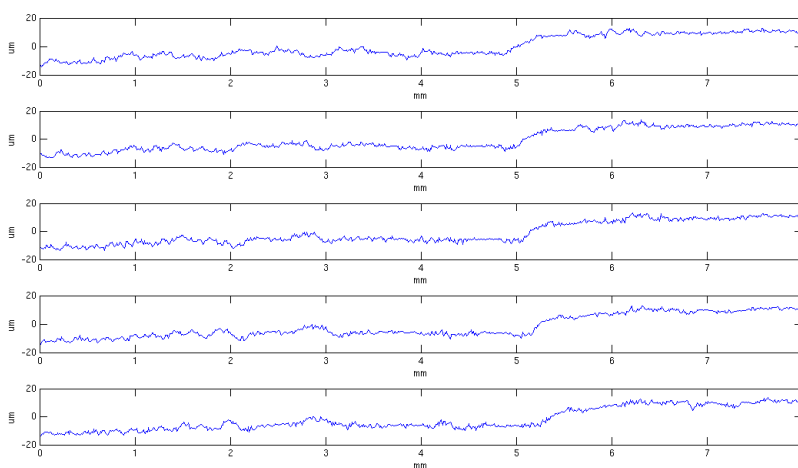


Figura 5.21: Ensayo de perfiles desplazados en la dirección de escaneado, el desplazamiento entre ellos es de 0.1mm.

El interés de este ensayo reside en el hecho de la dificultad para capturar dos veces el mismo perfil, cuando se ha desplazado la superficie o el sensor, o se ha variado algún componente del mismo, al tratarse de detalles del tamaño de micras en los que el ruido, en muchas ocasiones, se confunde con la propia señal. La principal fuente de ruido en los perfiles capturados se debe a ruido Speckle, que aunque ha sido reducido por los medios explicados en el anterior capítulo, siguen estando presentes y se hacen patentes, debido a su naturaleza, cuando, manteniendo exactamente el mismo perfil, este se desplaza, haciendo que las reflexiones sobre los detalles de la superficie varíen.

### Ensayo resolución lateral

La medición de resolución correspondiente al eje Z, es decir la distancia del sensor a la superficie, es, en principio, la más fácil de determinar y, podría parecer que a priori resultara, la más importante, esto no es cierto puesto que, si el sensor dispone de una gran resolución para la medición de distancias pero esta implica una integración de una superficie importante, el resultado final será un promedio de las distancias de los diferentes puntos de la superficie integrada, esto que en muchas ocasiones puede no ser determinante, para la medición de rugosidad, y la reconstrucción de perfiles sub-micrométricos en general, resulta muy importante ya que los detalles que se pretenden reconstruir tiene órdenes de magnitud menores que un micrómetro en las 3 dimensiones espaciales.

En el eje paralelo a la dimensión de la línea de iluminación, esta resolución se acepta como la longitud de la línea vista por el sensor dividida entre el número de puntos de la cámara en esa dirección, así por ejemplo para una longitud de línea de 12 mm, establecida por la norma, y 1280 puntos en la dirección paralela a la línea en la cámara, obtenemos una resolución aproximada de  $10 \mu m/px$ . Esto que es sencillo de calcular no es directamente mensurable para el eje X, perpendicular a la línea de iluminación.

Para medir la resolución en el eje X se han realizado un conjunto de ensayos con desplazamientos laterales de la superficie. Considerando la veracidad en la reconstrucción del perfil, tal como se vió en el ensayo anterior, el ensayo consiste en la comprobación de la variación del perfil con los movimientos laterales y el análisis del perfil obtenido en la dirección de desplazamiento. Se ha utilizado una superficie con surcos espaciados  $250 \mu m$ . En la *figura 5.22* se muestra el resultado del ensayo.

En la figura se ha superpuesto una línea paralela al desplazamiento de la cresta de un surco. En la imagen cada línea corresponde a un perfil en una posición, el eje Y indica el desplazamiento de cada uno de los perfiles. Se ha realizado un desplazamiento total de  $50 \mu m$  y en el perfil la cresta se ha desplazado 5 pixels, esto corresponde a una resolución de  $10 \mu m/px$  tal como se indicó anteriormente.

Con este ensayo se comprueba la capacidad del sensor para discriminar los detalles que forman la topografía de la superficie. Si fuera necesario incrementar la resolución lateral se podría utilizar una lente con mayor distancia focal lo que proporcionaría mayor zoom del perfil y por tanto mayor resolución lateral.

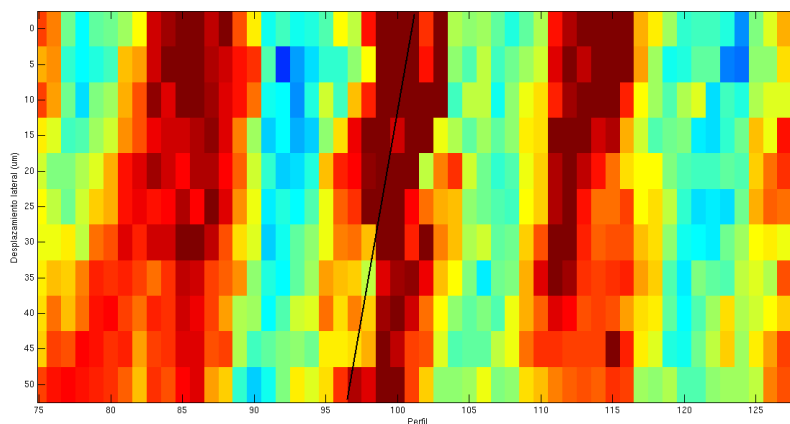


Figura 5.22: Ensayo de verificación de resolución lateral con desplazamientos de la superficie en incrementos de  $5\mu\text{m}$ .

### 5.3. Configuración óptima

El principal objetivo de esta tesis es fijar los parámetros de un sensor para la reconstrucción de perfiles submicrométricos para caracterizar superficies. Tras estudiar los principios de funcionamiento de la *Holografía Conoscópica*, ver las mejoras que se han introducido durante la investigación para el procesamiento de la señal y estudiar la influencia de los diversos componentes del sistema, en este capítulo se han presentado los experimentos y pruebas llevados a cabo con la finalidad de determinar la configuración óptima del sensor.

Para la configuración se ha visto que la disposición en triangulación proporciona la posibilidad de la medición utilizando la fase de la señal lo que proporciona mejor resolución que la utilización de la frecuencia solamente. En el apartado 5.1.1 se vió que el ángulo óptimo de triangulación correspondía a 28 grados aunque en el apartado 5.2.3 se comprobó que con este ángulo la profundidad de campo quedaba limitada a 2mm como máximo. Por esta razón se selecciona un ángulo de 23 grados con una profundidad de campo de 4mm aceptando una pérdida de la resolución relativa en fase.

Por otro lado, en el apartado 5.2.4 se ha analizado la mejor combinación de grosor de cristal, distancia focal del cilindro y distancia focal de la lente. Teniendo en cuenta que es preferible una frecuencia mayor, y atendiendo a los valores de SNR que indican la calidad de la señal, se seleccionan los siguientes componentes:

- Grosor de cristal de 7mm
- Cilindro de focal de 250mm
- Lente de enfoque de 35mm

**Con esto se obtiene un sensor con una apertura de 12mm, una resolución mejor que  $1\mu\text{m}$  en distancia y una resolución lateral de  $5\mu\text{m}$ , una distancia de trabajo de 100mm y una profundidad de campo de 4mm.**

## 5.4. Mediciones de rugosidad

Para finalizar los test se han comparado adquisiciones y mediciones de patrones calibrados de rugosidad. La comparación se realiza con la adquisición realizada con un perfilómetro de contacto. En la *figura 5.23* se muestran los perfiles adquiridos con el perfilómetro y el sensor conoscópico.

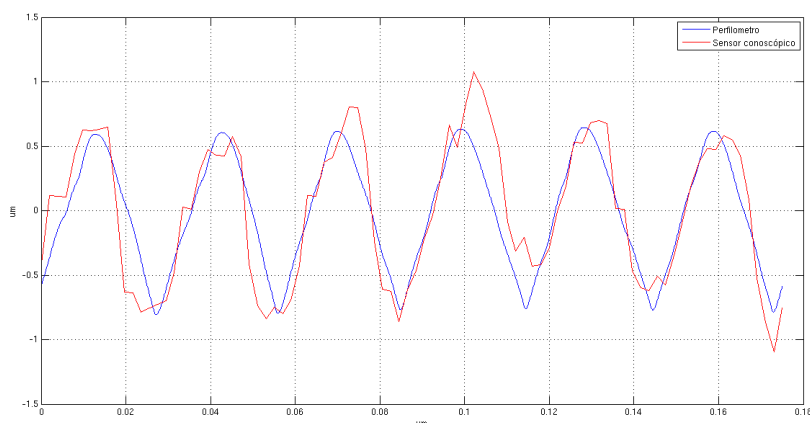


Figura 5.23: Comparación del perfil obtenido con un perfilómetro de contacto y el sensor de Holografía Conoscópica.

Los perfiles son prácticamente idénticos en forma y muy próximos en amplitud. El perfil obtenido con el sensor conoscópico tiene más ruido y menor resolución lateral que el perfilómetro. A pesar de esto, se ha conseguido el objetivo de alcanzar una resolución mejor que  $1\mu\text{m}$  de medición en distancia.

En cuanto a las mediciones se han obtenido, para el parámetro  $R_a$  con el perfilómetro una medida de  $2.99\mu\text{m}$  y con el sensor conoscópico de  $3.05\mu\text{m}$  y para el parámetro  $W_a$  con el perfilómetro el valor medido es de  $1.41\mu\text{m}$  y con el sensor conoscópico es de  $1.36\mu\text{m}$ .

Se ha realizado el mismo test con otro patrón y se ha obtenido para el parámetro  $R_a$  con el perfilómetro una medida de  $6.78\mu\text{m}$  y con el sensor conoscópico de  $7.10\mu\text{m}$  y para el parámetro  $W_a$  con el perfilómetro una medida de  $5.66\mu\text{m}$  y con el sensor conoscópico de  $5.74\mu\text{m}$ .

Se han realizado comparaciones de medición de rugosidad [30] de los parámetros  $R_a$  y  $R_q$  sobre 4 muestras de acero galvanizado con un perfilómetro de contacto y un sensor de *Holografía Conoscópica*. El sensor de *Holografía* tenía una distancia de trabajo de 110mm. El área inspeccionada es de  $12 \times 0.5\text{mm}$ . Debe tenerse en cuenta la dificultad de inspeccionar el mismo perfil con ambos sensores por lo que no se puede realizar una comparación directa de los perfiles obtenidos. En la *tabla 5.3* se muestran los resultados obtenidos para ambos parámetros en las 4 muestras estudiadas. Los resultados son muy prometedores puesto que la discrepancia entre ambos métodos está por debajo del  $\pm 10\%$ , que es la dispersión esperada entre dos instrumentos de contacto.

Muestra	Sensor Holografía( $\mu\text{m}$ )		Perfilómetro( $\mu\text{m}$ )	
	$Ra$	$Rq$	$Ra$	$Rq$
A	0.312	0.400	0.307	0.409
B	0.618	0.780	0.674	0.825
C	0.300	0.374	0.286	0.393
D	0.675	0.841	0.737	0.922

Tabla 5.3: Resultados de medición de los parámetros de rugosidad  $Ra$  y  $Rq$  sobre 4 muestras de acero galvanizado con un sensor de *Holografía conoscópica* y un perfilómetro de contacto.

## 5.5. Conclusiones

En este capítulo se ha detallado el diseño de los experimentos que se han llevado a cabo para comparar los efectos de los diferentes elementos del sensor y su influencia en la resolución y profundidad de campo.

Puesto que se ha decidido utilizar una configuración con una triangulación, con el fin de mejorar la resolución al realizar la medición con la señal de fase, los test que se han llevado a cabo se basan en esta configuración. Se han estudiado todos los parámetros que definen un sensor:

- Resolución
- Profundidad de campo
- Estabilidad de las medidas
- Distancia de trabajo

En este diseño el parámetro de exactitud pierde importancia puesto que el sensor no proporciona medidas absolutas de distancia sino relativas dentro de un perfil.

A pesar de que en teoría cuando mayor sea el ángulo de triangulación se obtiene una mayor variación de la fase con la distancia, este ángulo, en la práctica está limitado principalmente por la profundidad de campo. El sensor se diseña para su uso industrial por lo que es necesario tener en cuenta algunas consideraciones como la distancia de trabajo y la profundidad de campo. Con el diseño propuesto se obtiene una distancia de trabajo de 100mm y una profundidad de campo de 4mm. Este valor de distancia de trabajo permite instalar el sensor con cierta seguridad y colocar protecciones adecuadas que eviten las colisiones. Por otro lado la profundidad de campo de 4mm ofrece suficiente flexibilidad para la tolerancia de posicionamiento de la superficie inspeccionada.

El estudio realizado sobre la combinación de óptica, grosor de cristal y cilindro de enfoque a permitido determinar el grosor óptico del cristal birrefringente de forma que se optimiza el número de franjas obtenidas en el holograma. Este número de franjas proporciona un elevado nivel de contraste lo que se traduce en una mejor relación señal-ruido.

Por último se ha comprobado, con la configuración propuesta, el desempeño del sensor sobre un patrón de rugosidad conocido; de esta forma no existe incertidumbre en cuanto al perfil escaneado cuando este se realiza sobre una superficie cualquiera. El resultado de la reconstrucción del perfil y las mediciones confirma que la resolución del sensor es mejor que  $1\mu\text{m}$  tal como se vió en el apartado 5.4.





## Capítulo 6

# CONCLUSIONES

Al comienzo de este trabajo se ha visto la necesidad de desarrollar un sensor que permita realizar un control sistemático de la rugosidad de las superficies y que pueda integrarse en el proceso productivo. Con estos requerimientos lo más adecuado es un sensor sin contacto puesto que los sensores basados en contacto son excesivamente delicados para integrarlos en un proceso en el que habrá vibraciones movimientos y en el que la superficie en estudio tendrá una velocidad propia que los hará inservibles.

Puesto que la propia superficie a inspeccionar está, en general, en movimiento y debido a que en el propio proceso existirán vibraciones, lo más adecuado es un sensor que permita tomar perfiles completos en la misma adquisición, de esta forma se elimina la incertidumbre de medida debida a la vibración.

La aplicación final de este tipo de sensor es el sensor industrial donde puede haber una tolerancia de la posición normal de la superficie, en lo que a distancia se refiere; para conseguir que el sensor esté operativo la mayor parte del tiempo es importante que tenga una profundidad de campo lo más grande posible, además en ocasiones esta variación de distancia puede ser más amplia de lo normal con lo que es importante que el sensor tenga una distancia de trabajo que permita la colocación de defensas.

Se han estudiado los dispositivos existentes en la actualidad y se ha comprobado que aunque existen sensores para la medición sin contacto de la rugosidad, la mayoría tienen rangos de trabajo muy pequeños o distancias de trabajo que desaconsejan su uso en entornos industriales, otros miden de forma indirecta algunos parámetros que caracterizan la rugosidad pero no hacen una reconstrucción del perfil. La Holografía Conoscópica se presenta como una tecnología sobre la que se podría diseñar y construir un sensor que cumpla todos los requerimientos anteriores.

En la actualidad existen sensores comerciales basados en Holografía Conoscópica para la medición puntual. Estos sensores proporcionan resoluciones cercanas a  $1\mu\text{m}$ . Por otro lado también existen sensores con esta misma tecnología que permiten obtener perfiles completos en la misma adquisición aunque estos sensores están diseñados para funcionar a distancias entre 800 y 1200mm con resoluciones en el entorno de 0.075mm. Por tanto es necesario, basándose en el conocimiento existente, estudiar los puntos que se pueden mejorar tanto en el diseño óptico como en el procesamiento de la señal obtenida.

Durante el desarrollo de este trabajo se ha estudiado la teoría de la Holografía Conoscópica así como los algoritmos de procesamiento utilizados en la actualidad. Se ha analizado la influencia de cada elemento en la calidad de la señal obtenida y por tanto en la resolución que es posible alcanzar con una determinada configuración. Para el análisis se ha dividido el sistema en 4 partes, 3 corresponden al sensor físico y la última al tratamiento de la señal para obtener la información de distancia:

- Configuración del sensor
- Láser
- Conoscopio
- Procesamiento de la señal

## 6.1. Configuración del sensor

En este apartado se han estudiado las configuraciones de los sensores de Holografía Conoscópica disponibles actualmente, por un lado los sensores puntuales comerciales tienen una configuración colineal del láser y el conoscopio, calculando la frecuencia de las franjas del holograma se calcula la distancia absoluta de la superficie al sensor; por otro lado los sensores lineales tienen una pequeña triangulación que introduce variaciones en la fase del holograma proporcionales a la variación de distancia. La variación de la fase es mucho más rápida que la variación de frecuencia para un incremento determinado de distancia, por tanto es posible resolver variaciones más pequeñas de distancia haciendo uso de la información de la fase. Como contrapartida la fase solo toma valores entre  $-\pi$  y  $\pi$  por tanto no es válida para el cálculo de distancias absolutas. Por otro lado, el propósito del sensor diseñado es la reconstrucción de perfiles obtenidos en una adquisición con lo que solamente es importante la variación de fase/distancia entre puntos consecutivos, y no la información de distancia absoluta. En este trabajo se aporta la selección de esta configuración, partiendo de los experimentos realizados, para el propósito fijado al proporcionar mayor resolución y teniendo en cuenta que queda limitado la variación máxima de distancia entre dos puntos consecutivos.

El problema es que los sensores basados en triangulación existentes están diseñados para trabajar a grandes distancias y la resolución que proporcionan está muy alejada de la necesaria para la medición de rugosidad, por ese motivo partiendo de esta configuración ha sido necesario analizar la influencia de los diferentes elementos que componen el conoscopio y realizar el diseño de los elementos que lo componen para disminuir la distancia de trabajo y mejorar la resolución.

## 6.2. Láser

Una de las partes que más influye en la calidad de la señal es la iluminación láser. Es importante obtener una línea láser uniforme en distribución de potencia, y suficientemente fina para que la superficie a iluminar sea lo suficientemente estrecha como para ser utilizada para la medición de rugosidad.

Existen varias soluciones ópticas para la obtención de una línea láser más o menos homogénea como por ejemplo las “Powell lens”. Estas lentes permiten obtener una línea láser partiendo de un haz láser colimado. El problema que surge con estas lentes es que el haz que incide en la lente debe estar perfectamente colimado y circular. Los diodos láser generan un haz elíptico debido a la difracción que se produce en la unión de los semiconductores por lo que es necesario darle forma circular al punto. Esto se puede conseguir utilizando unos prismas anamórficos lo que introduce unas pérdidas de luz significativas. En este trabajo se aporta como novedad el diseñado de un nuevo tipo de lente que aprovecha la propia forma elíptica del haz generador por el diodo láser para crear una línea láser homogénea y enfocada en toda su longitud. Para ello se parte de una lente cilíndrica que enfoca la línea láser que se produce de forma natural por la forma del punto en la distancia de trabajo. Si solo se utilizara una lente cilíndrica la línea no estaría enfocada en toda su longitud por lo que la lente se curva en el eje transversal. De esta forma se asegura que el principio de línea alcanza la lente a la distancia focal adecuada. Con este diseño se simplifica significativamente el sistema óptico obteniendo una línea láser homogénea y enfocada en toda su longitud.

Por otro lado se han analizado las fuentes de ruido de los sensores y se ha detectado que el Ruido Speckle, intrínseco al uso de fuentes láser, introduce un error en las mediciones significativo. Este ruido es producido por la propia topografía de la superficie que se está examinando. Se ha investigado y desarrollado, durante este trabajo, un método para la reducción del Ruido Speckle en el punto o línea láser utilizado; este método consiste en rotar a elevada velocidad un difusor, esto hace que durante el tiempo de integración del sensor se generen varios patrones de Ruido Speckle que tienen a cancelarse. Se ha visto la mejora en la calidad del holograma obtenido y la mejora en la resolución obtenida.

### 6.3. Conoscopio

El conoscopio está formado por un polarizador circular, el cristal uniáxico y un polarizador lineal. Cuanto mejor es la eficiencia del polarizador lineal mejor será la calidad de la señal obtenida puesto que todos los rayos interferirán con la misma polarización. Por otro lado, cuanto mayor es la transmisividad de estos elementos menos potencia y tiempo de exposición serán necesarios; esto es importante cuando la superficie inspeccionada está en movimiento ya que si el tiempo de exposición es elevado se producirá una integración de la superficie que será equivalente a la aplicación de un filtro paso bajo con lo que se perderán muchos detalles de la rugosidad.

El grosor del cristal uniáxico determina la frecuencia del patrón de franjas. Cuanto mayor es el grosor más alta es la frecuencia de las franjas y más rápidamente varía la frecuencia y fase con la variación de distancias. No obstante esta frecuencia no puede aumentarse indefinidamente puesto que el elemento sensor, CCD, tiene un número de pixels finito y por tanto esta frecuencia está limitada por el teorema de Nyquist-Shannon; en realidad para que el cálculo de la frecuencia principal sea preciso la frecuencia de las franjas sobre el elemento sensor deberá ser sensiblemente inferior. Se ha comprobado que una frecuencia entre 15 y 25 franjas para una imagen de 256 pixels proporciona una senoide con suficiente información para el cálculo de la frecuencia principal.

Como se explicó en el apartado 6.1 se elige la configuración en triangulación porque proporciona mejor resolución a cambio de no poder realizar mediciones absolutas. En este apartado se aporta el diseño de los elementos ópticos que componen el conoscopio y el enfoque del holograma en el sensor.

## 6.4. Procesamiento

El holograma obtenido se procesa calculando el espectro y buscando la componente frecuencial principal. Esa componente principal está relacionada con la distancia por lo que con un polinomio de calibración puede calcularse la distancia equivalente, este es el método utilizado en los sensores puntuales comerciales. Calculando la fase de esa componente principal se obtienen las variaciones de distancia, este es el método utilizado para los sensores comerciales lineales y es el método de cálculo propuesto para el sensor para la medición de rugosidad.

En este trabajo se aporta una mejora en el cálculo de la fase de un holograma al buscar el centro real del holograma y calcular la fase en ese punto. Esta mejora reduce el nivel de ruido en el cálculo de la distancia. El cálculo del centro del holograma se realiza durante el proceso de ajuste del sensor y no cambiará mientras no se produzcan cambios en la configuración óptica del mismo.

## 6.5. Aportaciones de la tesis

La presente tesis aporta:

1. Estudio y comparación de las tecnologías de medición de rugosidad de superficies.
2. Método mejorado para el cálculo de la fase de la señal de *Holografía Conoscópica*.
3. Obtención de una imagen convencional de la superficie a partir de la luminosidad del holograma.
4. Sistema para la reducción del ruido Speckle en la línea láser.
5. Diseño de una lente para para la generación y enfoque de una línea láser a partir de la salida de un diodo láser.
6. Configuración de un perfilómetro basado en *Holografía Conoscópica* para la medición de rugosidad.

## 6.6. Comentarios finales

Los resultados obtenidos con este trabajo permiten vislumbrar un futuro prometedor para la Holografía Conoscópica dentro de la industria, para aplicaciones de inspección que de otra forma serían prácticamente irrealizables. La reconstrucción de perfiles submicrométricos on-line mejorará los procesos de fabricación de productos en los que el acabado superficial sea una de las características a controlar, puesto que este podrá ser monitorizado en tiempo real permitiendo actuar sobre el proceso de forma inmediata en el caso de detectar un desvío respecto del objetivo marcado.

Durante la realización del trabajo se han detectado los puntos más importantes que determinan las características finales de un sensor de Holografía Conoscópica. Uno de los elementos más importantes es el sistema de generación del punto de luz, o línea en caso de un perfilómetro; la calidad de la iluminación determina las características finales del sensor. Aunque según la teoría no es necesario el uso de fuentes de luz coherentes, sí se ve la necesidad de utilizar una fuente láser debido a su monocromaticidad, difícilmente obtenible con otras fuentes y a la facilidad de colimar el haz obtenido. Por contra, el uso de una fuente láser introduce otro tipo de problemas como el ruido Speckle que es debido a la propia coherencia del haz láser, por tanto es necesario disminuir la coherencia espacial, por ejemplo generando un número de patrones sobre la superficie suficientemente elevado de forma que se reduzca el ruido Speckle al realizar la integración temporal de los mismos. Una parte importante, por tanto, de este trabajo se ha centrado en la mejora del sistema de iluminación y en la reducción del ruido Speckle, que es especialmente importante cuando se realiza un estudio en la escala micrométrica de la superficie.

Para mejorar el enfoque del haz láser se ha aportado el diseño de un nuevo tipo de lente que mejora significativamente el reparto de la potencia del láser mientras mantiene enfocada la línea a lo largo de su longitud.

Por otro lado, el conoscopio y las lentes de enfoque están formadas por un conjunto de elementos que es necesario estudiar y diseñar como un todo. Se ha aportado el estudio y relación de cada uno de los componentes de este subsistema y la configuración que genera el holograma con mejor calidad y que por tanto proporciona la mejor resolución.

Por último, se ha detectado que el tratamiento que tradicionalmente se hacía del holograma se podía mejorar teniendo en cuenta, no solamente la frecuencia y la fase de la señal obtenida sino también la propia configuración óptica de forma que se busca el centro del holograma para calcular la distancia en ese punto de forma que la medición obtenida permite resolver variaciones de distancia menores.



## Capítulo 7

# TRABAJOS FUTUROS

Se abre con este trabajo una línea de investigación centrada en la mejora del sistema de eliminación del ruido Speckle. Para ello se propone el uso de varias longitudes de onda simultáneas lo que proporcionaría diferentes patrones de ruido que podrían ser cancelados. Por otro lado, la combinación de varias longitudes de onda permitiría eliminar la incertidumbre ligada al rango de variación de la fase, recordemos que no es posible detectar cambios bruscos de distancia si tienen un tamaño equivalente mayor a  $2\pi$ .

En el apartado de procesamiento se propone investigar el comportamiento del algoritmo para el cálculo de la FFT de Bluestein [46] [47]. Este algoritmo permite calcular el espectro de una señal en un rango de frecuencias determinado y con un elevado número de componentes frecuenciales. De esta forma sería posible calcular el espectro de detalle de la banda donde se encuentra la componente principal del holograma y determinar esta componente de manera más precisa, con lo que debería reducirse la incertidumbre introducida en el cálculo.





# Bibliografía

- [1] Nicolás Larburu Arrizabalaga. *Máquinas. Prontuario. Técnicas máquinas herramientas*. Thomson Editores, 2004.
- [2] Moisés Hinojosa Rivera and Martin Edgar Reyes Melo. La rugosidad de las superficies: Topometría. *Ingenierías*, Abril-Junio 2001, vol IV, N° 11:27–33, 2001.
- [3] Ignacio Álvarez García. PhD thesis, Escuela de Ingenieros Industriales Superiores de la Universidad de Oviedo, 1997.
- [4] José María Enguita González. *Detección de defectos superficiales mediante el procesamiento de interferogramas de holografía conoscópica*. PhD thesis, E.P.S. Ingeniería de Gijón, 2003.
- [5] Yolanda Fernández Fernández. *Técnicas de Procesamiento de Fase de Interferogramas de Holografía Conoscópica para Detección de Defectos Superficiales en Entornos Industriales*. PhD thesis, E.P.S. Ingeniería de Gijón, 2006.
- [6] María Frade Rodríguez. *Técnicas avanzadas de perfilometría óptica in-situe basada en interferometría de desplazamiento lateral para medidas submicrométricas*. PhD thesis, E.P.S. Ingeniería de Gijón, 2012.
- [7] I. Alvarez J. Marina N. Martínez, C. Fraga. On line measuring of pm complex parts by conoscopic holography. In *European Congress and Exhibition on Powder Metallurgy*, volume 2, pages 453–460, 2003.
- [8] Robert J. Webster III Tiffany T. Cheng. Conoscopic holography for image registration: A feasibility study. *Medical Imaging 2009: Visualization, Image-Guided Procedures, and Modeling*, 7261, 2009.
- [9] I. Alvarez A. Díez G. Sirat R. Falessi F. Obeso, L.F: Sancho. Novel on-line surface quality control for hot slabs in continuous casting. *La Revue de Métallurgie - Cahiers d'Informations Techniques*, 3:267–275, 2002.
- [10] C. Fraga J. Marina Y. Fernández G. Sirat J.M. Enguita, I. Alvarez. Conoscopic holography based long-standoff profilometer for surface inspection in adverse environment. *Optical Engineering*, 45:073602–1 – 073602–10, 2006.
- [11] Luis F. Sancho Luis A. Rodríguez Loredo C. Fraga J. Marina R. García I. Alvarez, J.M. Enguita. Procesos siderúrgicos: Inspección dimensional y detección de defectos superficiales en línea. *Automática e Instrumentación*, 392:68–72, 2008.

- [12] I. Álvarez A. Fdez de Lera L. F. Sancho, J. R. Somoano. Automated on-line inspection of surface scarfing in slabs and quality assessment based on novel image technologies. *Revue de Métallurgie*, 7-8:383–389, 2008.
- [13] E. Oberg and F.D. Jones. *Machinery's Encyclopedia: A Work of Reference Covering Practical Mathematics and Mechanics, Machine Design, Machine Construction and Operation, Electrical, Gas, Hydraulic, and Steam Power Machinery, Metallurgy, and Kindred Subjects in the Engineering Field*. Number v. 6 in *Machinery's Encyclopedia: A Work of Reference Covering Practical Mathematics and Mechanics, Machine Design, Machine Construction and Operation, Electrical, Gas, Hydraulic, and Steam Power Machinery, Metallurgy, and Kindred Subjects in the Engineering Field*. The Industrial Press, 1917.
- [14] Chao-Chang A. Chen, Jr-Rung Chen, Huay-Chung Liou, and Yen-Liang Chen. Size effects on stylus tip reconstruction for micro and nano roughness measurement. *Proceedings of SPIE*, 5879, September 2005.
- [15] G. Moreas and H. Uijtdebroeks. On-line roughness measurement of hot rolled strips. *CD European Communities*, ISBN 92-894-3671-9, March 2002.
- [16] Arturo de la Escalera Hueso. *Visión por computador*. PEARSON EDUCACION, 2001.
- [17] Richard Szeliski. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer, 2010.
- [18] W. Bilstein J. Watzinger K. Mörwald G. Moréas, F. Van De Velde and A. Wagner. Advanced sensor for on-line topography in continuous annealing lines. *Revue de Métallurgie*, 103:233–237, 2006.
- [19] G. Moreas D. Oppermann T. Routschek F. Van De Velde W. Bilstein, W. Enderle. Two systems for on-line oilfilm and surface roughness measurement for strip steel production. 2006.
- [20] Peter Lehemann. Surface-roughness measurement based on the intensity correlation function of scattered light under speckle-pattern illumination. *Applied Optics*, 38(7), March 1999.
- [21] Yeou-Yen Cheng and James C. Wyant. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry. *APPLIED OPTICS*, 24:3049, 1985.
- [22] James C. Wyant. White light interferometry. *Proceedings of SPIE*, 4737:98–107, 2002.
- [23] Shuko Yokoyama, Jun Ohnishi, Shigeo Iwasaki, Katuo Seta, Hirokazu Matsumoto, and Norihito Suzuki. Real-time and high-resolution absolute-distance measurement using a two-wavelength superheterodyne interferometer. *Meas. Sci. Technol*, 10:1233–1239, 1999.
- [24] J. M. Burch. Scatter fringes of equal thickness. *Nature*, 171:889, 1953.
- [25] J.H. Dickson. *Optical Instruments and Techniques*. 1970.
- [26] M. Harke, R. Teppner, O. Schulz, and H. Motschmann. Description of a single modular optical setup for ellipsometry, surface plasmons, waveguide modes, and their corresponding imaging techniques including brewster angle microscopy. *American Institute of Physics*, 68:3130–3134, 1997.

- [27] P. Hariharan. *Basics of Holography*. Cambridge University Press, 2002. ISBN-13: 9780521002004 | ISBN-10: 0521002001.
- [28] Gabriel Y. Sirat, Jacob Vecht, and Yann Malet. Linear conoscopic holography. patent 5953137, Optimet, Optical Metrology Ltd, 1997.
- [29] Y. Malet and G. Y. Sirat. Conoscopic holography application: multipurpose rangefinders. *Journal of Optics*, 29:183–187, 1998.
- [30] María Frade Jorge Marina Ignacio Álvarez, Jose M. Enguita and Guillermo Ojea. On-line metrology with conoscopic holography: beyond triangulation. *Sensors*, pages 7021–7037, 2009.
- [31] J.W. Goodman. Some fundamental properties of speckle. *J. Opt. Soc. Am.*, 66:1145–1149, 1976.
- [32] Akram MN Wang K Kartashov V Yan X Chen X. Ouyang G, Tong Z. Speckle reduction using a motionless diffractive optical element. *Optical letters*, 2010.
- [33] K. Wang Z. Tong X. Y. Chen G. Ouyang, M. N. Akram. Laser speckle reduction based on angular diversity induced by piezoelectric benders. *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*, 8, 2013.
- [34] Ignacio Álvarez César Fraga Jorge Marina José M. Enguita, Yolanda Fernández. Denoising of conoscopic holography fringe patterns with orientational filters: a comparative study. *Optical Engineering*, 44, 2005.
- [35] E. L. O’Neil. *Introduction to statistical optics*. Addison-Wesley, 1963.
- [36] J. W. Goodman. *Statistical optics*. Wiley, New York, 1985.
- [37] Joseph W. Goodman. *Speckle Phenomena in Optics*. Roberts & Company Publishers, 2007.
- [38] Fang Qiu, Judith Berglund, John R. Jensen, Pathik Thakkar, and Dianwei Ren. Speckle noise reduction in sar imagery using a local adaptive median filter. *GIS-science and Remote Sensing*, 41(3):244–266, July 2004.
- [39] L.J. Busse, T.R. Crimmins, and J.R. Fienup. A model based approach to improve the performance of the geometric filtering speckle reduction algorithm. In *IEEE Ultrasonics symposium*, pages 1353–1356. IEEE, 1995.
- [40] Jahja I. Trisnadi. Speckle contrast reduction in laser projection displays. *Proceedings of SPIE*, 4657:131–137, 2002.
- [41] Michael Pircher, Erich Götzinger, Rainer Leitgeb, Adiolf F. Fercher, and Christoph. K. Hitzenberger. Speckle reduction in optical coherence tomography by frequency compounding. In *Bio-Photonics*. Atom Physics, Lund Institute of Technology and Lund Medical Laser Centre in Sweden and Optics and Fluid Dynamics Dept., Risø National Laboratory and Center for Biomedical Optics and New Laser Systems in Denmark., 2003.
- [42] Lingli Wang, Theo Tschudi, Thorsteinn Halldórsson, and Pálmi R. Pétursson. Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical element. *Applied Optics*, 37:1770–1775, 1998.

- [43] C.V. Raman and N.S.N. Nath. The diffraction of light by high frequency sound waves: part i. *Proc-Indian Acad. Sci.*, pages 406–412, 1936.
- [44] Lingli Wang, Theo Tschudi, Markus Boeddinghaus, Alexander Elbert, Thorsteinn Hsllldórsson, and Pálmi Pétursson. Speckle reduction in laser projections with ultrasonic waves. *Optical Engineering*, 39(6):1659–1664, 2000.
- [45] Iam Powell. Linear deiverging lens, 1989.
- [46] Leo I. Bluestein. A linear filtering approach to the computation of the discrete fourier transform. In *Northeast Electronics Research and Engineering Meeting Record*, volume 10, pages 218–219, 1968.
- [47] Ronald W. Schafer Lawrence R. Rabiner and Charles M. Rader. The chirp z-transform algorithm and its application. *Bell Syst. Tech. J.*, 48:1249–1292, 1969.