

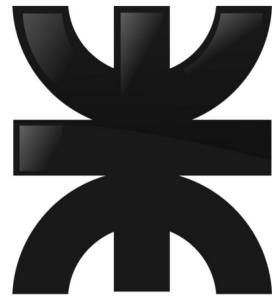
Tesis presentada para optar al Grado Académico de Doctor en Ingeniería,
Mención Electrónica

**DETECCIÓN DE LÍNEAS COMO SUPERFICIES CON CRESTA:
PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITAL COMO PARTE
DE UN SISTEMA DE VISIÓN PARA UN
AUTOCOLIMADOR NIKON 6B/6D**

Ing. Guillermo BERGUES

Directora: Dra. Georgina Flesia
Co-Director: Dr. Clemar Schürrer
Lugar de Trabajo: CEMETRO

Córdoba 2015



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Facultad Regional Córdoba

*A mi princesa,
tu amor es mi inspiración.*

Agradecimientos

Esta tesis es el resultado de la guía y la enseñanza de mis directores Dra. Georgina Flesia y Dr. Clemar Schurrer, así como también del Dr. Luis Canali. No tengo más que palabras de agradecimiento para mis profesores y directores, que compartieron todos sus conocimientos conmigo, sin más motivación que el deseo de enseñar con pasión.

Índice general

Agradecimientos	III
1. Motivación	1
1.1. Aportes	5
1.2. Estructura de la Tesis	8
1.3. Lista de Publicaciones	8
2. Autocolimador	11
2.1. Introducción	11
2.2. Principio de Funcionamiento	12
2.2.1. Relación de calibración.	14
2.2.2. Construcción del Espejo reflector (E).	14
2.2.2.1. Separación entre reflector y autocolimador. .	15
2.2.3. Ejemplo: Medición de la topología de una superficie. .	16
2.3. Autocolimador Nikon 6B/6D	17
3. Consideraciones de diseño	19
3.1. Medición mediante la Interfaz Visual	19
3.2. Componentes de la Interfaz	22
3.2.1. Interfaz simple con cámara CMOS.	22
3.2.2. Interfaz final con Cámara CCD.	23
3.2.3. Comparación entre cámaras CMOS Y CCD.	24
3.3. Alineación y distorsión	27
3.3.1. Efecto Vignetting.	27
3.3.2. Enfoque.	28
3.3.2.1. Índice de Nitidez.	30
3.3.3. Alineación cámara-telescopio.	31
3.3.4. Alineamiento de las líneas con la matriz de píxeles de la cámara.	31
3.4. Captura de las imágenes	33
3.4.1. Captura de las imágenes de la escala.	34

3.4.2. Captura de las imágenes de la cruz.	35
4. Desarrollo del Algoritmo: Simulación	37
4.1. Simulación de la imagen de la línea	37
4.1.1. Algoritmo.	40
4.2. Coeficiente de Pearson	41
4.2.1. Comprensión de los valores de r_{xy}	42
4.3. Detector Hough (D_H)	43
4.3.1. Primera etapa: corrimiento a nivel píxel (D_{H1}).	43
4.3.2. Análisis Teórico de la Transformada Hough Convencional (THC).	44
4.3.2.1. Algoritmo <i>THC</i>	45
4.3.2.2. Detectores de Borde.	47
4.3.3. Resultados sin ruido para el D_{H1}	52
4.3.4. Resultados con ruido para el D_{H1}	53
4.3.5. Segunda etapa: corrimiento a nivel sub-píxel.	54
4.3.6. Transformada Hough de niveles de gris sub-píxel (D_{H2}).	54
4.3.7. Espacio de conteo de parámetros Hough en escala de grises.	56
4.3.7.1. Algoritmo Hough sub-píxel.	57
4.3.8. Resultados de simulación con y sin ruido para (D_{H2}).	58
4.4. Detector Gaussiano (D_G)	61
4.4.1. Análisis Teórico.	61
4.4.1.1. Modelo de Borde.	63
4.4.2. Resultados de simulación con y sin ruido del D_G	67
4.5. Detector Probabilístico (D_P)	70
4.5.1. Resultados de simulación con y sin ruido para el detector (D_P).	72
4.6. Detector por Mínimos Cuadrados pesados (D_{WLS})	74
4.6.1. Resultados de simulación con y sin ruido para el detector (D_{WLS}).	76
4.7. Detector valor Máximo (D_M)	78
4.7.1. Resultados de simulación con y sin ruido para el detector (D_M).	79
4.8. Elección del detector	81
4.9. Análisis de detección con línea inclinada	83
5. Experimento de medición	87
5.1. Procedimiento de medición	88

6. Procesamiento de Imágenes	91
6.1. RGB a niveles de gris	92
6.2. Reducción del Efecto Vignetting	94
6.2.1. Filtro Savitzky-Golay.	95
6.2.2. Resultados de la aplicación del Filtro.	98
6.2.3. Correcciones posteriores del Vignetting.	98
6.3. Interfaz con cámara CMOS	99
6.3.1. Procesamiento de la imagen de la escala.	99
6.3.1.1. Corte horizontal.	101
6.3.1.2. Corte vertical.	103
6.3.1.3. Valor medio estimado para la relación píxel/segundo de arco.	104
6.3.2. Estimación de mediciones: Procesamiento de la imagen de la cruz.	105
6.3.2.1. Incertidumbre en la medición debida al Soft- ware.	106
6.3.3. Comparación de mediciones entre interfaz visual + au- tocolimador y nivel electrónico.	107
6.3.4. Conclusiones Cámara CMOS	109
6.4. Interfaz con cámara CCD	110
6.4.1. Procesamiento de la imagen de la escala.	110
6.4.2. Estimación de mediciones: Procesamiento de la imagen de la cruz.	111
7. Incertidumbre y resolución	113
7.1. Resolución	113
7.1.1. Ganancia en resolución.	115
7.1.1.1. Ganancia de Resolución del Detector Gaus- siano.	116
7.1.1.2. Ganancia de Resolución del Detector Hough .	117
7.1.1.3. Ganancia en resolución de los detectores res- tantes.	118
7.2. Incertidumbre	119
7.2.1. Aproximación entre α y $tg(\alpha)$	121
7.2.2. Temperatura.	122
7.2.3. Paralelismo del haz + Planitud espejo + Óptica del autocolimador.	124
7.2.4. Software de Detección + Ruido + Enfoque.	125
7.2.5. Filtro Savitzky-Golay (Efecto Vignetting).	125
7.2.6. Posición de los píxeles en el CCD.	125

7.2.7.	Linealidad de la escala + Óptica del autocolimador + Óptica de la cámara + Alineación de eje óptico.	126
7.2.7.1.	Análisis del desplazamiento traslacional (δ_x, δ_y).	126
7.2.7.2.	Análisis del desplazamiento angular.	134
7.2.8.	Orientación de la matriz de píxeles respecto a la cruz. .	135
7.2.9.	Turbulencias en el aire + Espejo reflector.	136
7.2.10.	Fuente luminosa + Fuente de alimentación.	137
7.2.11.	Incertidumbre final.	139
8.	Conclusiones y trabajo futuro	141
8.1.	Trabajos Futuros	143
	Bibliografía	145

Capítulo 1

Motivación

Los bordes que delimitan a los objetos en las imágenes son, en general, las características más importantes para reconocer los patrones que conforman a las figuras pertenecientes a los mismos. Esta particularidad queda muy bien ilustrada por nuestra capacidad visual para reconocer objetos a partir de los dibujos de sus contornos. Esta aptitud natural, que posee un operario humano, es de gran interés en el área de automatización de procedimientos vía visión por computador, donde es necesario crear sistemas de visión para identificar objetos simples, a través de sus contornos, utilizando las herramientas de segmentación de imágenes disponibles. Los objetos que se corresponden a esta descripción son las figuras generadas por líneas, círculos, segmentos, etc., que permiten identificar señales o patrones determinados en las imágenes para así tomar una medición en base a sus características; también proporcionan el conteo o separación de objetos mediante la detección de sus bordes en una línea de producción en serie o el seguimiento de los objetos en movimiento, y también posibilitan la lectura de patrones reticulares en instrumental específico, entre otras aplicaciones importantes.

Para que un sistema de visión por computador pueda emular los procedimientos realizados por un operario especializado, es necesario que reconozca, en base a patrones simples, la imagen global, para luego entregar la respuesta esperada con el mismo grado de aptitud que el operario o incluso mejorando la calidad de la detección en precisión y velocidad. Una vez conocida la estructura geométrica del objeto o figura, a partir de sus patrones simples, la medición de las dimensiones y la detección posicional del objeto puede realizarse a partir de una sola imagen, en forma online, [1, 2]. Una de las características más atrayentes de esta aproximación es la capacidad de reconocer los segmentos y líneas presentes en las retículas graduadas de los instrumentos ópticos de medición de alta precisión. Estos instrumentos poseen la escala de medición grabada en un retículo plano, que se sitúa entre

los lentes del telescopio y el ocular. El grabado conforma un conjunto de segmentos rectos equi-espaciados que junto con los números, determinan el paso de la escala. Por otro lado, el sistema óptico del instrumento permite la formación de una imagen virtual que tiene la forma de una cruz o par de cruces luminosas, que al ser observadas por el operario a través del ocular del instrumento y contrastadas con la escala grabada, otorgan la medición. Ahora bien, en base al conocimiento de la óptica del instrumento y mediante operaciones que involucran detección de bordes y contornos, que permiten obtener los patrones específicos que forman los segmentos de la retícula y la cruz luminosa virtual, se puede obtener una imitación certera de la medición que realiza el operario. La precisión con que la medición automática se realiza debe estar de acuerdo a las prestaciones del instrumento, por lo tanto, la segmentación de la imagen debe realizarse teniendo en cuenta la resolución del mismo.

Como consecuencia a la propuesta anterior, la pregunta principal que surge es: ¿qué es un borde? Se debe definir correctamente ya que este determina el contorno de los objetos a detectar. Como primera teorización, los bordes pueden ser delimitados como los puntos donde la intensidad de una imagen tiene transiciones abruptas. Si bien esta explicación soluciona varios problemas, una mirada más fina a esta definición no resulta muy satisfactoria, ya que se encuentran grietas cuando aumenta la complejidad de la imagen; por ejemplo, las texturas de una imagen tienen transiciones abruptas que no son consideradas usualmente como bordes por el ojo humano. De hecho, el humano reconoce texturas cuando las ve, pero son muy difíciles de definir ya que dependen mucho del contexto y de la conceptualización de una persona en particular, [3]. Este es el caso de una pared de ladrillos, donde se puede decir que los bordes son los contornos de la pared, mientras que los ladrillos definen la textura, o, de forma alternativa, se puede plantear que los contornos de cada ladrillo son los bordes y que la superficie irregular de cada ladrillo es la textura. Esta discriminación, entre bordes y textura, depende sólo de la escala de análisis y de la necesidad que plantea el problema a abordar. Esto ha motivado a la comunidad de visión a buscar variaciones abruptas en las imágenes en diferentes escalas [4], dándole, de esta manera, un marco de estudio a cada problema abordado.

En el caso ideal, el resultado de aplicar un detector de bordes a una imagen puede llevar a un conjunto de curvas conexas que indican los bordes de los objetos presentes en la imagen. Estas marcas o curvas se corresponden a diferencias en la orientación de las superficies originales. Estas superficies quedan definidas en la imagen por la información contenida en los cambios de intensidad en los colores (en una imagen RGB) o en los tonos de gris (en una imagen monocromática). Por esta razón, el aplicar un detector de

bordes en una imagen reduce significativamente la cantidad de información a ser procesada y filtra la información menos relevante, preservando solamente las propiedades de estructura (los contornos) de cada uno de los objetos presentes. Sin embargo, no siempre se obtienen curvas de borde ideales en las imágenes procesadas, más aún cuando provienen de entornos de moderada complejidad. Los bordes extraídos sufren a menudo de fragmentación o de pérdida de información, es decir, las curvas no son conexas y se presenta una incertidumbre grande en la detección. También aparecen falsos bordes que complican la interpretación de los objetos en la imagen.

Otro de los grandes problemas, especialmente cuando se utiliza el borde de las figuras para obtener una medición, es el de posicionamiento del borde: ¿es acaso el borde detectado el que nos interesa? ¿existirá un corrimiento inaceptable en la medición de acuerdo a la posición actualmente detectada? Este último problema se complica notablemente cuando la medición esperada es de alta precisión y donde las incertidumbres en juego están cerca de la centésima o milésima de píxel.

Existen muchos métodos de detección de bordes, los cuales se pueden aplicar para intentar solucionar estos problemas. Los más comunes han sido diseñados en base a derivadas discretas aplicadas en la imagen vista como una superficie, [5–8]. Estos métodos producen resultados aproximados, y en algunos casos, ambiguos, con respecto a la posición y tamaño de los bordes detectados, ya que a pesar de trabajar con una derivada, se trabajan los bordes como si la función de intensidad que forman fuera una función escalón o similar, perdiéndose información importante en el procedimiento. Inclusive, los métodos de detección tradicionales, resuelven las líneas de borde al nivel del píxel, y su precisión está limitada por la estructura discreta de la grilla, definida por la resolución espacial de la cámara utilizada para la captura.

Dado que los sistemas de visión modernos requieren una precisión superior al nivel del píxel, llegando a las centésimas y milésimas de píxel, el desarrollo de técnicas sub-píxel para la detección de bordes es uno de los temas actuales de interés en la investigación de técnicas de procesamiento de imágenes para aplicaciones industriales y para mediciones de alta precisión en metrología, [9, 10]. Particularmente, los desarrollos en la rama de metrología son extremadamente importantes para todo país que tenga planeado avanzar en su infraestructura productiva.

En las industrias de manufacturación, automovilística y aeroespacial hay una necesidad, cada vez mayor, de medir con precisión los parámetros geométricos de las superficies utilizadas en los montajes opto mecánicos y en el ajuste de los instrumentos ópticos. Los Autocolimadores se utilizan en este tipo de entornos industriales para las alineaciones de precisión de los componentes mecánicos, la detección de movimientos angulares, el monitoreo angular en el

tiempo, y para garantizar el cumplimiento de las especificaciones y estándares de ángulo, [11–13]. También son instrumentos importantes en los laboratorios de Metroología dimensional. Estos laboratorios son parte esencial de la estructura productiva y de investigación de un país, [14].

Los Autocolimadores operan, ya sea mediante la detección visual, cuando un operario mide a través del sistema óptico del instrumento, o mediante una detección digital, usando un fotodetector y un programa de detección, [15]. Los autocolimadores púramente ópticos a menudo se utilizan para alinear los extremos de la barra de un láser y para comprobar el paralelismo entre las caras de ventanas y cuñas ópticas. Los autocolimadores digitales se utilizan como patrones de medición de ángulo, para el seguimiento de movimientos angulares durante largos períodos de tiempo, y para comprobar la repetibilidad de la posición angular en sistemas mecánicos, [16]. El primer grupo de autocolimadores puede medir ángulos tan pequeños como 0.5 segundos de arco, mientras que un autocolimador digital puede ser hasta 100 veces más preciso, [17]. Los autocolimadores digitales poseen un fotodetector que permite obtener la posición del haz de luz proyectado en una grilla de gran resolución espacial. De esta manera, se obtienen mayores resoluciones con sólo incrementar la resolución espacial del detector, o mejorando el procesamiento de imágenes del sistema, [18, 19].

El detector de los autocolimadores digitales ha sido cambiado muchas veces a lo largo de las últimas décadas, desde slits oscilantes con células fotoeléctricas, diodos en un circuito diferencial para posicionar detectores sensibles (PSD) hasta los muy conocidos detectores CMOS y CCD, [15]. Los dos primeros detectores no son usados actualmente, mientras que los dos últimos son ampliamente utilizados en los modelos comerciales. También se desarrollaron, a nivel comercial, algunas interfaces externas que pueden transformar ciertos modelos específicos de autocolimadores visuales en digitales. Uno de los más conocidos es el kit de actualización Davidson Optronics Digital Autocollimator Upgrade Kit, que permite a los modelos D-652 tener toda la funcionalidad digital del Nuevo Modelo D-720 de dos ejes de medición. El paquete de actualización reemplaza el ensamblaje del ocular con una cámara de video controlada por un software cerrado al público, [20].

Esta tesis explica, siguiendo el curso de la literatura actual, el diseño e implementación de una interfaz electrónica externa para un autocolimador visual estándar Nikon 6B/6D perteneciente al Laboratorio de Metroología dimensional de la UTN regional Córdoba (CEMETRO), [21]. El fabricante de este instrumento no provee una interfaz externa que le permita aumentar sus capacidades y tampoco es posible cambiar el detector, porque posee un sistema óptico cerrado extremadamente complejo. Dadas estas limitaciones, para ciertas mediciones, su resolución es insuficiente. La interfaz propues-

ta resuelve estas limitaciones y se puede utilizar para el seguimiento de las desviaciones angulares en tiempo real, reemplazando al operario humano e incrementando la precisión de la medición de ángulos. En base a esta problemática, también se desea desarrollar la teoría base que hacía falta incluir en la literatura de autocolimadores. A continuación se detallan los puntos abordados.

1.1. Aportes

Esta tesis conduce los esfuerzos de investigación en el campo de procesamiento de imágenes al tema crucial de la metrología, enfocando el análisis en el instrumental óptico para medición de ángulos.

El autocolimador Nikon 6B/6D disponible en el laboratorio de Metroología dimensional CEMETRO es de gran importancia para el personal del laboratorio y para las empresas cordobesas. Este laboratorio tiene una infraestructura única en la región, situándolo dentro de los laboratorios más relevantes de Argentina. Todos los estudios que se desarrollaron en esta tesis, permiten que el laboratorio siga creciendo y permanezca como una herramienta activa en la cadena productiva de la región. Por otro lado, todo el material de investigación está disponible con libre acceso, para que laboratorios similares puedan crear sus propias interfaces visuales, mejorando la calidad de sus mediciones angulares.

Para poder lograr este objetivo, se estudiaron modelos estadísticos de detección de líneas a nivel sub-píxel para así poder diseñar el algoritmo necesario para mejorar la precisión de las mediciones de dicho autocolimador. La interfaz presentada en esta tesis aumenta la resolución nativa del autocolimador Nikon 6B/6D (40 veces), sin requerir ninguna manipulación interna del instrumento. El sistema óptico no fue retocado, ya que la interfaz es totalmente externa al mismo. Por otro lado, el estudio presentado indica, de forma teórica, que con ligeras modificaciones en el diseño de la interfaz y en el software, se pueden implementar otras interfaces digitales para varios modelos de autocolimadores visuales y otros instrumentos que posean retículas graduadas grabadas bajo el mismo procedimiento de construcción.

En un trabajo inicial, Schürrer et al. [22], se abordó un diseño de una interfaz de bajo costo. El montaje de esta sencilla interfaz poseía una cámara web con un sensor CMOS y una lente de gran apertura angular. Este sistema permitió capturar el centro de la imagen interna, formada en el autocolimador, para posteriormente procesar la información y obtener una medición. La precisión e incertidumbre propias del nuevo sistema no se discutieron porque la óptica de la cámara y los dispositivos de posicionamiento no eran lo

suficientemente fiables, sin embargo, se pudo realizar un estudio inicial del aumento de resolución.

Luego, en un trabajo posterior, Bergues et al. (2014) [23], se amplía y mejora el diseño inicial mediante la sustitución de la web-cam con una cámara Basler Ace de alta resolución y con sensor CCD. En esta etapa, se calibra la posición de la cámara, se crea un método de alineación para reducir los errores externos y se mejora el algoritmo de detección de bordes sub-píxel.

Finalmente, en el último desarrollo, Bergues et al. (2015) [24], se presenta detalladamente el proceso de diseño del software y se mejora la detección, introduciendo un pre-procesamiento para reducir el efecto Vignetting. Para el diseño del programa de detección se utiliza una simulación que permite elegir el algoritmo óptimo de posicionamiento de líneas a nivel sub-píxel. Analizando el comportamiento de 5 detectores, entre ellos un nuevo modelo de transformada Hough sub-píxel nunca antes propuesto, se estudia a fondo el diseño del software. El algoritmo óptimo trabaja las líneas como superficies, a las cuales se le hacen cortes en la dirección de máximo gradiente para poder obtener así los centros de las mismas. Este método permite “construir” la posición de la línea a través de toda la matriz, siguiendo la superficie que esta forma con sus valores de intensidad.

El trabajo propuesto permite calcular, entre otras cosas, la incertidumbre inicial que introduce el software a la medición, cuestión muy importante en metrología y que nunca antes se había propuesto en la literatura existente. El estudio de la incertidumbre permite que se detecten los puntos del instrumento que necesitan mejorarse y en cuánto deben hacerlo. En base a esto, se pueden elegir las características de la cámara para el sistema visual a montar en el autocolimador.

Por otro lado, los cinco detectores presentados, son utilizados sobre las imágenes capturadas con la interfaz, para verificar, en un experimento controlado, si la simulación y el cálculo de incertidumbre mencionado, se correspondían a los valores buscados.

Si bien este diseño es similar al de Yuan et al. [15, 19], en sus papers discute un autocolimador basado en un CCD experimental, y la medición final sólo analiza la estabilidad térmica de la fluctuación del cero a largo plazo (luego de 15 horas obtiene el primer resultado). En sus trabajos no analiza que pasa en toda la escala de medición o en un rango de la misma. Tampoco introduce un estudio de la incertidumbre asociada a la medición que propone.

El diseño propuesto es mejor al de Yuan et al. en tres puntos principales: entrega una medición final para el rango completo del autocolimador, no sólo el valor cero; introduce un cálculo de incertidumbre asociada al nuevo procedimiento de medición (según JGUM) para poder corregir el conjunto de

mediciones realizadas y para ver en donde se encuentran los puntos débiles de la medición y, finalmente, su algoritmo de detección sub-píxel también compensa el Efecto Vignetting. Esta última mejora es muy importante cuando se desarrolla una interfaz exterior al autocolimador óptico; como no se puede corregir el sistema óptico desde dentro, se debe disminuir al máximo posible todo el deterioro de la imagen capturada producido por los fenómenos ópticos relacionados a la interacción de la luz incidente con los lentes y diafragmas del autocolimador.

En cuanto al diseño del software, en Arp et al. [16], se discute un autocolimador electrónico de haz de referencia con sensibilidad al nano-radian. Este diseño también corrige los errores de la expansión del CCD por temperatura con técnicas de procesamiento de imágenes similares a las propuestas en [22], [23], [24] y, [25]. Pero en este trabajo no se explica en detalle el desarrollo del algoritmo, sólo expresa someramente que la detección de la retícula se realiza mediante un ajuste de funciones continuas sobre secciones ortogonales de las líneas de la misma. Nuestro algoritmo es detallado hasta el mínimo detalle, permitiendo que todo miembro de la comunidad metrológica pueda utilizarlo y pueda replicarlo sin restricción alguna.

En otro campo de análisis, Fabijańska [9],[26], utiliza funciones continuas, tanto gaussianas como polinómicas, en imágenes con altos niveles de blur para definir bordes, también sin desarrollar el algoritmo en cuestión. Nuestros desarrollos permiten comprender otros campos de trabajo donde los perfiles de las líneas se pueden analizar como superficies o como un conjunto consecutivo de perfiles de línea ajustados con funciones continuas.

Esta tesis también presenta un novedoso método alternativo para la literatura de autocolimadores y la literatura de detección sub-píxel. En vez de trabajar con perfiles gaussianos o polinómicos, realizando cortes ortogonales a la línea en la dirección de máximo gradiente y dependiendo de una única función de ajuste, como desarrolla Flesia et al. [25], se detecta la posición global de la línea través de una versión de la Transformada Hough a niveles de gris, [24, 27]. A esta transformada se le hacen modificaciones para que detecte a nivel sub-píxel. Partiendo de la transformada Hough convencional [28, 29], e incluyendo en el proceso la influencia del ruido en la imagen y de la inclinación de las líneas, se explica en detalle la implementación, de tal manera, que la nueva transformada sea comprendida en su totalidad. Cuando la determinación del centro de la línea debe hacerse con alta precisión, la transformada Hough usual introduce errores inaceptables, por lo cual es necesario estudiar algoritmos alternativos que permitan la incorporación de acumuladores con mayor resolución. La nueva transformada soluciona esta problemática.

El estudio, en esta tesis, de algoritmos sub-píxel para el posicionamiento

de curvas dentro de una imagen es de gran interés en campos muy diversos; por ejemplo, relacionado a mediciones, es importante para la estimación del ancho de vidrios, [10]. Por otro lado, es de conocimiento general, que las rutas, vías de tren y ríos pueden ser asimilados como líneas en imágenes satelitales, [30]. La extracción de estos objetos a través de asimilarlos como líneas permite obtener información geográfica crucial. También lo desarrollado es útil en aplicaciones tales como posicionamiento de robots y reconocimiento de objetos, [31, 32]. Para todos estos campos, la nueva aproximación es conveniente, y el estudio completo suma importantes conclusiones.

1.2. Estructura de la Tesis

La tesis está armada de la siguiente manera: en primer lugar, en el Capítulo 2, se explica el funcionamiento del autocolimador, así como también algunas características constructivas que son importantes en todos los análisis posteriores. Luego, en el Capítulo 3, se presenta la interfaz visual creada para el instrumento. Partiendo de la construcción en base a una cámara CMOS se llega a la interfaz final con cámara CCD. En el trayecto de diseño se expone el porqué de este cambio de sensor, juntamente con todos los conceptos que afectan a la captura de la imagen a ser medida.

En el Capítulo 4 se introducen los algoritmos de detección estudiados a través de una simulación. Esta permite elegir el detector óptimo para este tipo de imágenes. En el Capítulo siguiente (5), se muestra la experiencia de medición creada para corroborar el funcionamiento de la interfaz y del detector creado. Se utiliza, en esta experiencia, instrumental de medición trazable a patrones internacionales.

Los datos obtenidos son estudiados en el Capítulo 6, donde se aplica el algoritmo elegido de tal forma que se pueda obtener una medición similar a la que realiza un operario humano.

En el Capítulo 7 se calcula la nueva resolución y se estudia la incertidumbre para el nuevo instrumento de acuerdo al “Joint Committee for Guides in Metrology” (JCGM). En el Capítulo de incertidumbre se presentan algunas conclusiones determinantes en cuanto a la formación de la interfaz.

Finalmente, en el Capítulo 8, están las conclusiones y futuros trabajos.

1.3. Lista de Publicaciones

Los trabajos que fueron desarrollados en el proceso de creación de la interfaz visual fueron los siguientes:

1. A. G. Flesia, C. Schurrer, G. Bergues, “Creación de un sistema de interface de visión basado en procesamiento de imágenes para un autocolimador Nikon 6D”. 4to SEEMI, Valparaíso, Chile, 21 al 13 de noviembre 2011.
2. G. Bergues, G. Ames, L. Canali, C. Schurrer, and A. Flesia, “Modelado de la retícula de medición de un autocolimador Nikon 6b/6d mediante transformada hough” presented at the XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPIC), Sep 2013.
3. C. Schurrer, A. Flesia, G. Bergues, G. Ames, and L. Canali, “Interfaz visual para un autocolimador Nikon 6d mediante procesamiento de imágenes con precisión sub-píxel: un caso de estudio”. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial - RIAI, vol. 11, no. 3, pp. 327–336, 2014.
4. G. Bergues, G. Ames, L. Canali, C. Schurrer, and A. Flesia, “External visual interface for a Nikon 6d autocollimator,” in Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International, May 2014, pp. 35–39.
5. A. G. Flesia, G. Ames, G. Bergues, L. Canali, and C. Schurrer, “Subpixel straight lines detection for measuring through machine vision,” in Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International, May 2014, pp. 402–406.
6. G. Bergues, G. Ames, L. Canali, C. Schurrer, and A. Flesia, “Detección de líneas en imágenes con ruido en un entorno de medición de alta precisión,” in Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2014 IEEE, June 2014, pp. 582–587.
7. G.J. Bergues, L. Canali, C. Schurrer, A G. Flesia “Electronic Interface with Vignetting Effect Reduction for a Nikon 6B/6D Autocollimator”, IEEE transactions on Instrumentation and Measurement, 2015. Vol: PP, no. 99, doi=10.1109/TIM.2015.2444263, ISSN=0018-9456.
8. G. Bergues, L. Canali, C. Schurrer, A G. Flesia “Sub-pixel Gray-scale Hough Transform For An Electronic Visual Interface” Latin America Transactions, IEEE, 2015. Vol 13, no. 9, doi=10.1109/TLA.2015.7350069, pp. 3135-3141.

Capítulo 2

Autocolimador

En este capítulo se introduce el instrumento de medición sin la interfaz, con el objetivo de comprender su construcción óptica y su funcionamiento. En la Sección 2.2 se explica el principio que el aparato utiliza para obtener la medición, detallando paso a paso los conceptos más importantes (relación de calibración, construcción del espejo reflector y las consideraciones para la medición). Luego, en la Sección 2.3, se presenta el Autocolimador Nikon 6B en particular.

2.1. Introducción

Un autocolimador (Fig. 2.1), es un instrumento óptico utilizado para la medición de pequeños desplazamientos angulares (del orden de los segundos de arco). Para las pequeñas medidas angulares, los autocolimadores proporcionan un muy sensible y exacto acercamiento. El instrumento es esencialmente la combinación de un telescopio y un colimador.

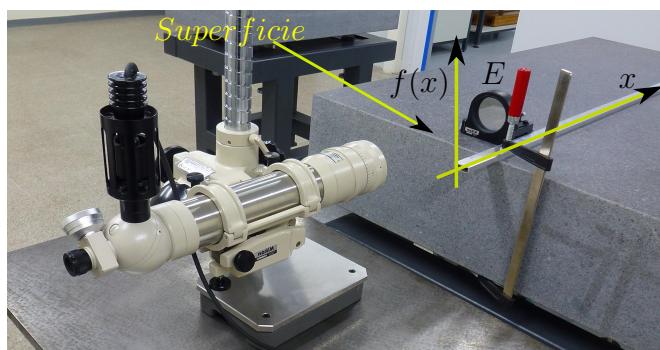


Figura 2.1: Autocolimador Nikon 6B.

Este instrumento tiene la capacidad de realizar la medición sin hacer contacto directo con la pieza a medir, característica muy útil, por ejemplo, en una línea de ensamblaje o en laboratorios de alta precisión, en donde los instrumentos y elementos deben ser manipulados con delicadeza.

2.2. Principio de Funcionamiento

Para la medición, el autocolimador trabaja en conjunto con una superficie de reflexión o espejo E (ver Fig. 2.2), cuya distancia al autocolimador no influye en la medición (bajo ciertas convenciones de medición).

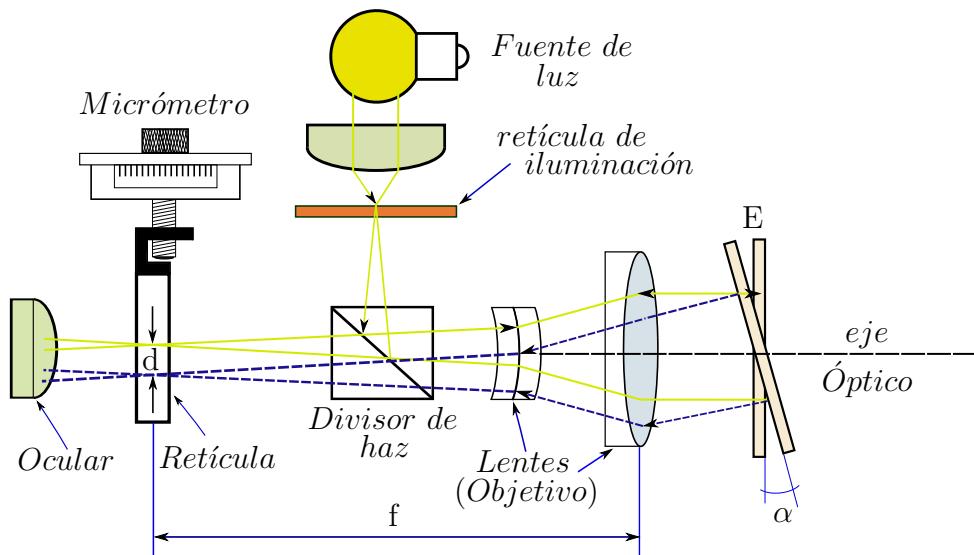


Figura 2.2: Esquema de funcionamiento del Autocolimador, donde f es la distancia focal, d es el desplazamiento de la cruz, y α el ángulo medido.

El concepto principal en el funcionamiento del autocolimador es el siguiente: se proyecta un haz de luz colimado, paralelo a su eje óptico y a través de su objetivo, que es el utilizado para realizar la medición. En la Fig. 2.3 se puede ver el principio de colimación en acción: un haz de luz que sale en todas las direcciones posibles desde la fuente de luz, es “colimado” luego de pasar por el conjunto de lentes.

Analizando la Fig. 2.2 el procedimiento global de medición es el siguiente: la luz, proveniente de la fuente de luz, es enviada a través de la retícula de iluminación, donde toma la forma de cruz (la cruz luminosa de medición).

Posteriormente, el recorrido del haz es cambiado mediante el divisor de haz, el cual es un espejo semi-transmisivo que permite la reflexión en un solo sentido, para que el haz se traslade en forma similar al eje óptico del objetivo. Luego se vuelve exactamente paralelo al eje a medida que surca los lentes del objetivo (proceso de colimación). Una vez finalizado el trayecto, se refleja sobre el espejo E , volviendo a su fuente de origen, donde se mide la desviación angular (α) del mismo con respecto al eje óptico del instrumento.

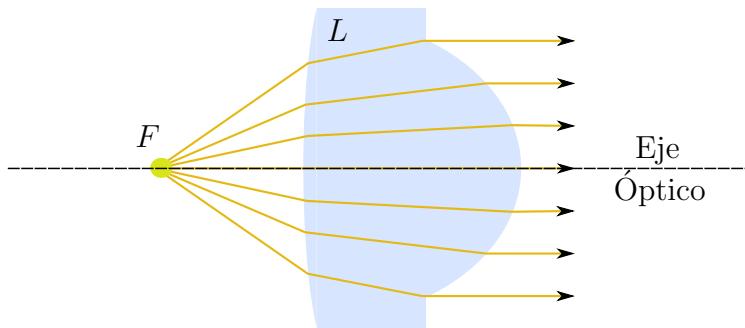


Figura 2.3: Esquema del principio de colimación de un haz de luz. La fuente F envía rayos en todas las direcciones y el conjunto de lentes L paraleliza cada uno de los mismos con respecto al eje óptico de L .

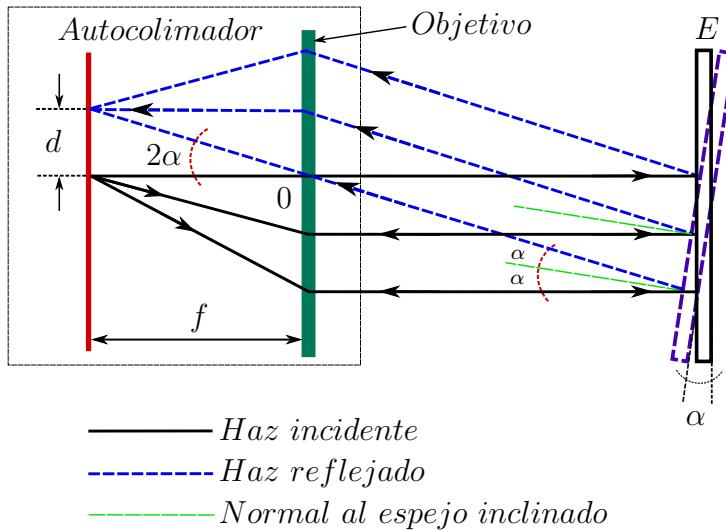


Figura 2.4: Esquema de funcionamiento del Autocolimador, donde se especifica con más detalle el comportamiento del haz de luz. El bloque autocolimador es reducido para poder ver el desplazamiento del haz incidente y reflejado.

Ahora bien, si el espejo E está perpendicular al haz emitido por el autocolimador, este es reflejado por el mismo de vuelta a su punto de origen y en

la retícula interna del autocolimador (observada a través del ocular), no se distingue ningún desplazamiento d del haz (esquematizado en la Fig. 2.4 por las líneas de color negro continuas). Sin embargo, si E está inclinado, el haz reflejado por él (líneas azules punteadas en la Fig. 2.4) se desplaza respecto a la escala de medición de la retícula interna, la cual está calibrada para que los desplazamientos d sobre su escala sean los ángulos de la inclinación α del espejo.

2.2.1. Relación de calibración.

Muchos factores regulan las especificaciones de un autocolimador, en particular, su distancia focal f y la apertura efectiva del telescopio e_A . f determina la sensibilidad básica y el rango de medición angular. Cuanto más larga sea la distancia focal, mayor es el desplazamiento lineal d para una determinada inclinación del reflector, pero, la inclinación máxima del reflector, que se puede acomodar, se podrá reducir. Por lo tanto, la sensibilidad se negocia contra el rango de medición. Para estas consideraciones de diseño y para la comprensión de la medición es importante la relación de calibración del instrumento que está dada por:

$$\tan(2 \cdot \alpha) = \frac{d}{f}, \quad (2.1)$$

Esta relación se puede apreciar claramente a partir del rayo reflejado que no se desvía, porque pasa por el centro óptico O del objetivo (ver Fig. 2.4).

2.2.2. Construcción del Espejo reflector (E).

Uno de los puntos principales de este instrumento está relacionado al espejo reflector E , que se posiciona en el objeto a medir. Para que la medición cumpla con los principios de colimación se debe utilizar un reflector plano y pulido correctamente. No interesa que el reflector no cubra todo el rango de apertura del objetivo, la característica más importante tiene que ver con la reflexión perpendicular. Por esta razón, el espejo utilizado tiene que seguir las especificaciones mostradas en la Fig. 2.5. En los bordes de la superficie, afectadas por la curvatura del lente, se coloca una máscara que tiene como fin absorber los rayos de luz que al ser reflejados se aparten de la colimación buscada. De esta manera, sólo se conservan los rayos del haz que interesan al instrumento.

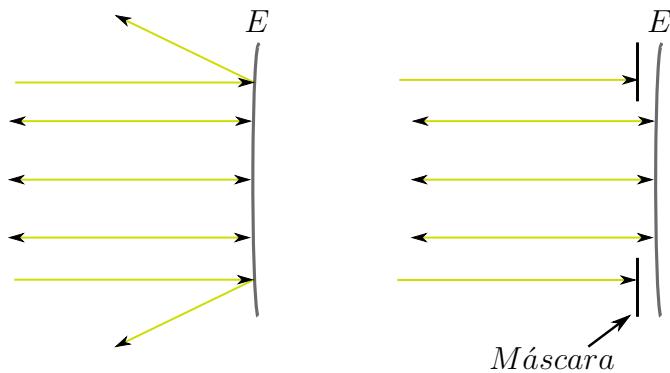


Figura 2.5: Esquema del espejo reflector con la curvatura de los bordes sin máscara y con máscara.

2.2.2.1. Separación entre reflector y autocolimador.

La separación máxima entre el reflector y el autocolimador (distancia de trabajo W_d), se rige por la apertura efectiva del objetivo; por otro lado, el rango de medición del instrumento se reduce con largas W_d . El aumento de la distancia máxima de trabajo mediante el aumento de la apertura efectiva exige un reflector más grande para que el contraste de la imagen sea satisfactorio. Por estas cuestiones básicas, el diseño de un autocolimador implica que muchos criterios entrarán en conflicto y por esta razón, se requiere que las consideraciones generales se atengán a la aplicación a abarcar.

En cuanto a las mediciones de alta exactitud, hay que tener en cuenta las corrientes de aire en la trayectoria óptica entre el autocolimador y el espejo reflector porque pueden causar fluctuaciones continuas en las lecturas obtenidas. Este efecto es más pronunciado a medida que la distancia entre los dos aumenta. Por esta razón, siempre se debe hacer un estudio de la medición. Posicionando el espejo en un punto determinado, se realiza la misma medición varias veces, para ver si las corrientes de aire están afectando la repetibilidad de la medida.

Otro error muy común aparece cuando la planitud y la reflectividad del espejo no es de alta calidad. Cabe destacar ente este punto, que Nikon provee sus propios espejos para el autocolimador estudiado (ver Fig. 2.6).

Cuando el autocolimador y el espejo pueden permanecer extremadamente cercanos y fijos, se pueden tomar lecturas con una repetibilidad excelente. Cuando alguno de estos tiene que ser trasladado, se debe tener mucho cuidado y se debe corroborar lo expresado.



Figura 2.6: Espejo reflector Nikon para autocolimador Nikon 6B/6D.

2.2.3. Ejemplo: Medición de la topología de una superficie.

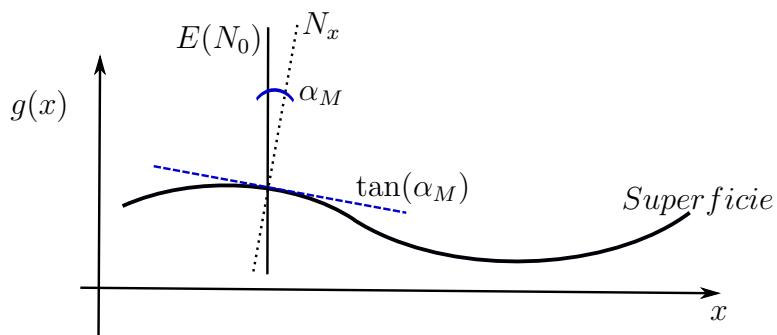


Figura 2.7: Gráfica de la Topología de una superficie determinada por la $\tan(\alpha)$. El espejo E está en la posición de referencia definiendo el valor de la normal N_0 .

Una de las mediciones usualmente realizadas con autocolimadores es la obtención de la topología de una superficie, experiencia implementada y visible en la Fig. 2.1, donde se ve, sobre la mesa de referencia (superficie), la barra de aluminio que le sirve de guía al espejo E para poder desplazarlo en línea recta y así generar, al tomar varias mediciones, la curva correspondiente a la topología de la superficie en esa dirección.

La Fig. 2.7 muestra la gráfica esquemática utilizada para explicar la medición implementada en la Fig. 2.1. La función $g(x)$ representa la forma de la superficie en la dirección de desplazamiento x del espejo sobre la superficie a medir.

Para cada posición del espejo E se define como N_x a la normal a la superficie, en el punto x . En $x = 0$ se define que el espejo E no está inclinado, por lo cual N_0 es la referencia de la medición (ver Fig. 2.7); entonces se cumple:

$$\frac{dg(0)}{dx} = \tan(\alpha_0) = 0, \quad (2.2)$$

Luego se van midiendo los otros ángulos α_M cuya tangente está dada por $\tan(\alpha_M) = dg(x)/dx$, en base a la posición N_0 y se obtiene la topología de la superficie de la siguiente manera:

$$g(x) = g(0) + \int_0^x \tan(\alpha_M) dx, \quad (2.3)$$

2.3. Autocolimador Nikon 6B/6D

El autocolimador ubicado en el Laboratorio CEMETRO (Fig. 2.1) es un instrumento de campo oscuro. Esto significa que se puede medir mejor si la luz ambiente es reducida, ya que se puede obtener un mejor contraste entre la escala del instrumento y la cruz de medición.

Estos autocolimadores de alta precisión tienen una apertura de 70mm, construcción que proporciona imágenes claras y brillantes con una resolución de 0,5 segundos de arco dentro de un rango de 5 minutos de arco y un 1 segundo de resolución para el rango total de 30 minutos.

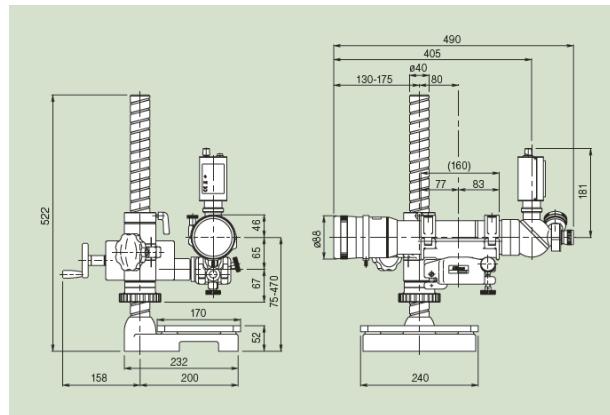


Figura 2.8: Dimensiones en (mm) del autocolimador Nikon 6B.

Una de las prestaciones más importantes que posee, es que puede medir los desplazamientos angulares de guiñada y cabeceo al mismo tiempo debido a su escala vertical y horizontal. Sus dimensiones, mostradas en la Fig. 2.8, están diseñadas de tal manera que la interacción con el operario sea óptima, tanto las perillas de medición como de configuración de posición son de una calidad asombrosa.

Es necesario comparar el instrumento disponible con las referencias nacionales e internacionales para tener una idea de la exactitud y resolución del mismo. Como referencia Nacional en la medición de pequeños ángulos, está el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), que figura entre las entidades internacionales que han declarado capacidad para medir ángulos desde Diciembre del 2012. La sede de Córdoba es la referencia nacional y posee un autocolimador digital de 0,01 segundos de arco de resolución y una incertidumbre $U(95\%, k=2)$ de $0,2''$. El instituto paral INTI en Brasil (INMETRO), también tiene reconocimiento internacional en la medición de ángulos, llegando a medir con una incertidumbre de hasta $0,3''$ y una resolución de $0,01''$. Finalmente, como referencias internacionales, está el Autocolimador ELCOMAT HR de Möller-Wedell que tiene un rango de $300''$, una resolución de $0,005''$ y una incertidumbre máxima de $0,01''$ en el rango de $10''$. Por otro lado, la máxima exactitud de calibración en el mundo para configurar autocolimadores pertenece al Instituto Nacional de Mediciones Físicas alemán (PTB), el cual puede medir con una incertidumbre de hasta $0,007''$.

Nuestro autocolimador, a pesar de su robustez y características de medición, no es una de las mejores opciones del mercado en cuanto a sus prestaciones de resolución y exactitud. Sin embargo, como su construcción es excelente y la retícula de medición está manufacturada de tal manera que sea brillante, se puede, bajo ciertas consideraciones de diseño, acoplar una interfaz visual. A continuación se explica la configuración necesaria para acoplar la interfaz al instrumento.

Capítulo 3

Consideraciones de diseño

En este capítulo se explicará en detalle todo el procedimiento de diseño constructivo que se lleva adelante para la configuración inicial de la interfaz visual, así como también el método que se tiene que llevar a cabo para que la interfaz obtenga los parámetros de medición.

Se inicia la presentación con la Sección 3.1, que explica los pasos que se deben realizar para obtener una medición con la interfaz. De esta manera se podrá comprender que es lo que se obtiene a nivel general. Luego, en la Sección 3.2 se detallan las dos interfaces creadas, una con una cámara con sensor CMOS y otra con sensor CCD. En la Sección 3.3 se explica la alineación de la interfaz y, finalmente, en la Sección 3.4, se especifica la captura del conjunto de imágenes tanto de la escala de medición como de la cruz de posicionamiento.

3.1. Medición mediante la Interfaz Visual

En la Fig. 3.1 se puede ver una imagen de la retícula interna del auto-colimador (la que ve el operario cuando coloca un ojo en el ocular y la que la cámara captura). Se distinguen los elementos con los cuales se discierne una medición, la escala marcada en minutos, correspondiente a los segmentos lineales oscuros equi-espaciados, verticales y horizontales, y el haz de luz en forma de cruz, reflejado por el espejo.

Observando la posición de la cruz con respecto al centro de la retícula (punto de referencia) se obtiene la medición de los ángulos de cabeceo α_y y guiñada α_x entre la superficie a medir y la normal al espejo E .

En la Fig. 3.2, se representan los segmentos centrales de la retícula (resaltados en negro en la Fig. 3.1) y se expresan esquemáticamente los parámetros a obtener con la interfaz visual. Estas variables son las siguientes:

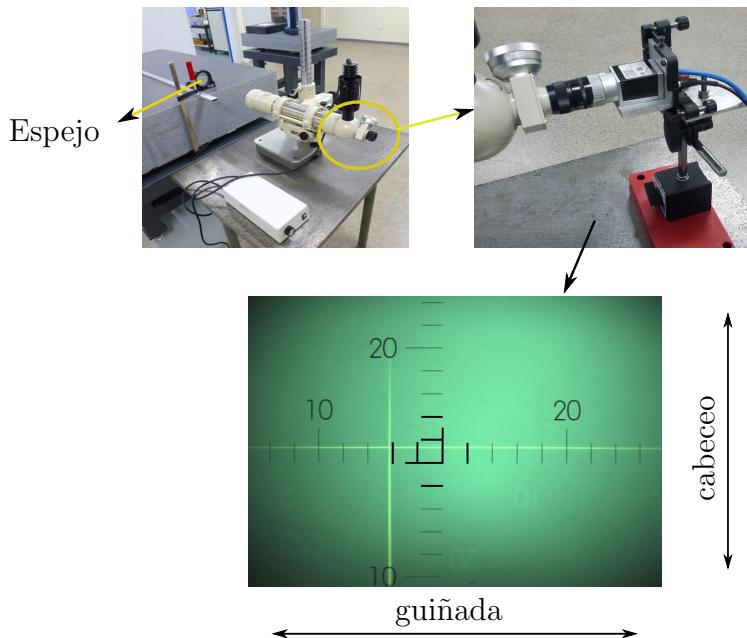


Figura 3.1: Imagen de la retícula tomada con la cámara CCD. La interfaz visual está dirigida al ocular del autocolimador, donde se observa la escala interna del autocolimador y el haz de luz en forma de cruz. Se observa la escala con sus respectivos ángulos de guiñada y cabeceo.

Δ_{XY} = Distancia de calibración de la escala. Este valor es muy importante ya que define la distancia entre dos divisiones consecutivas de la escala.

B_x = ángulo de guiñada medido en píxeles.

B_y = ángulo de cabeceo medido en píxeles.

Para obtener la medición con la interfaz se deben seguir los pasos que se especifican a continuación:

1. Establecer la distancia Δ_{XY} entre las divisiones de la escala de la retícula a nivel sub-píxel con la estimación de su incertidumbre. En la Fig. 3.2 se identifica este valor tanto para los segmentos horizontales como verticales, marcando su medición desde los centros de los segmentos (valor sub-píxel buscado).
2. Asociar un sistema de coordenadas (x, y) a la imagen de la retícula,
3. Identificar las líneas que forman la cruz, también a nivel sub-píxel,
4. Establecer la distancia B_x y B_y en píxeles entre el cero de la retícula

(el valor central de la misma u otra referencia que se haya elegido), y las líneas que forman la cruz.

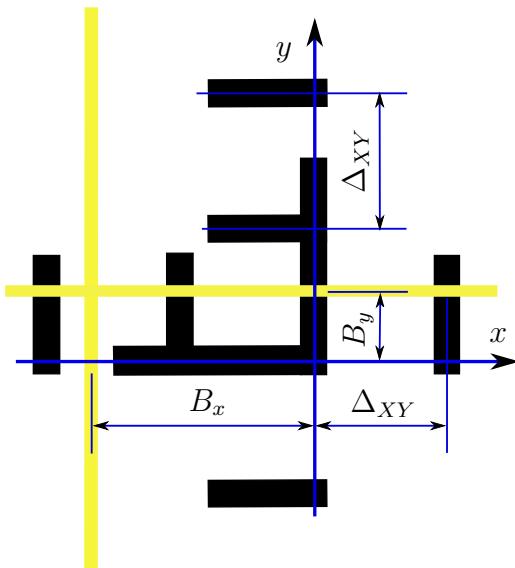


Figura 3.2: Esquema de la zona del cero de la retícula junto con la cruz de la Fig. 3.1 y los parámetros de medición B_x , B_y y Δ_{XY} a obtener. La medición se toma desde los centros de los segmentos de la escala y de la cruz.

En el autocolimador Nikon 6B/6D, la distancia entre divisiones de la retícula (Δ_{XY}) es de 60 segundos de arco, ($1\text{div} = 1\text{min}$). Entonces, por ejemplo, para obtener la medición del ángulo de cabeceo α_y en segundos de arco, se calculan primero los valores Δ_{XY} y B_y en píxeles, y se reemplazan dichos valores en:

$$\alpha_y = 60 \cdot \frac{B_y}{\Delta_{XY}}, \quad (3.1)$$

Lo mismo se realiza para el ángulo de guiñada, α_x , en segundos de arco.

Estos ángulos son muy pequeños y se tiene que tener el recaudo necesario para que su medición no sea influenciada por ningún tipo de vibración. Estas consideraciones se explican a continuación a medida que se explican las dos interfaces creadas.

3.2. Componentes de la Interfaz

La interfaz visual consta de tres elementos fundamentales: una cámara adosada al ocular del autocolimador Nikon, un sistema de ubicación que permite alinear los ejes ópticos de la cámara y el autocolimador, y una computadora para almacenar las imágenes y procesarlas.

A continuación se muestran dos sistemas, uno creado en base a una cámara de bajo costo con sensor CMOS y otro, con una cámara HD con sensor CCD .

3.2.1. Interfaz simple con cámara CMOS.

El primer sistema que se montó, el cual permitió hacer las mediciones iniciales, obtener los parámetros de configuración y comprender el problema de la creación de la interfaz, estaba construido con una cámara CMOS de 480×640 píxeles de resolución espacial y 8 bits de resolución en intensidad. Esta fue elegida para cumplir los requisitos mínimos de la medición, [22]. En la Fig. 3.3 se puede observar este primer sistema.

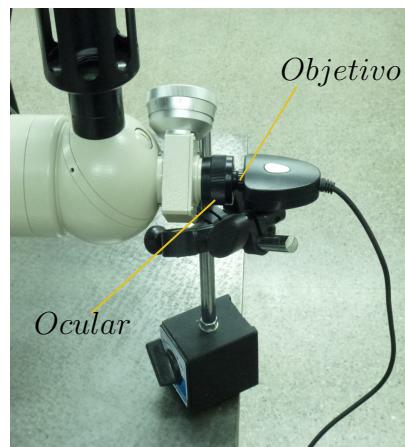


Figura 3.3: Cámara con sensor CMOS, ubicada frente al autocolimador de tal forma que el objetivo se introduce en el ocular del autocolimador.

El sistema de ubicación que se utilizó para alinear la cámara frente al ocular consta de tornillos micrométricos, propios del autocolimador, que permiten alinear la cámara al eje óptico del autocolimador y de una base con soporte magnético que permite que la cámara esté fija a la mesa anti-vibraciones. Tal como se puede ver en la Fig. 3.3, el objetivo de la cámara se aproxima al ocular de tal manera que la imagen virtual generada por el autocolimador

(la que observa el operario al ubicar el ojo sobre el ocular) pueda capturarse a través de la adquisición de una imagen.

Experimentos con esta cámara permitieron deducir que para que todo el rango de medición que posee el autocolimador (30 minutos de arco) pueda verse en una imagen capturada, se necesita tener una apertura angular mínima de $\theta_c = 21^\circ$ (ver Fig. 3.4).

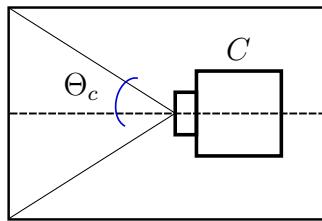


Figura 3.4: Apertura angular θ_c de la Cámara (C).

3.2.2. Interfaz final con Cámara CCD.

Una vez que los resultados de la primera interfaz fueron consistentes y demostraron que la creación de una interfaz visual para un autocolimador del tipo Nikon 6B/6D era posible, se procedió a montar una interfaz superior, [23].



Figura 3.5: Autocolimador Nikon 6B y cámara Basler HD, localizada frente al ocular.

La cámara Basler HD, modelo ACA 1600 20gc, mostrada en la Fig. 3.5, otorgó las prestaciones necesarias para llegar a una medición a nivel metrológico como se esperaba. Entre sus características principales se encuentran:

1. Resolución espacial: 1624×1234 píxeles.
2. Sensor: Sony CCD de escaneo progresivo.
3. Tamaño del sensor: $1/1.8"$.
4. Tamaño del píxel: $4,4\mu m \times 4,4\mu m$.
5. Conexión: Ethernet.

Debido a que se está haciendo una medición simultánea de los ángulos de cabeceo y guiñada, el tamaño del píxel tiene que ser cuadrado. Esto simplifica el procesamiento de imágenes y la medición final, ya que permite que las referencias verticales y horizontales sean iguales.

La resolución espacial mucho mayor, con respecto a la primera cámara, es esencial para el procesamiento, como se demostrará en las siguientes secciones.

3.2.3. Comparación entre cámaras CMOS Y CCD.

Dada las prestaciones que se esperan de un sistema metrológico, es importante tener en consideración algunas de las características que tiene que tener el sensor de la cámara elegida para la creación de la interfaz visual.

Si bien el avance en la construcción de sensores CMOS ha sufrido progresos sorprendentes y parece estar desplazando al sensor CCD en la construcción de cámaras digitales para fotografía profesional y para celulares, todavía carece de ciertas características importantes para aplicaciones científicas, en donde se necesiten realizar mediciones precisas.

Hasta el momento, los sensores CMOS están tomando un lugar preponderante en los aparatos comerciales debido a su construcción on-chip, que permite alcanzar altas velocidades de procesamiento (se pueden capturar imágenes más rápidamente e incluir procesamientos paralelos a la captura). Por otro lado son sensores de bajo consumo, fáciles de integrar (con un sólo chip basta) y necesitan menos soporte electrónico para su funcionamiento. Pero, por otro lado, el CCD sigue teniendo precisiones superiores en cuanto a la calidad de la imagen, bajo nivel de ruido y eficiencia cuántica. Explicando algunas de estas consideraciones de diseño de los sensores, se puede llegar a una conclusión acertada acerca de la mejor elección del sensor para este tipo de aplicaciones.

La *generación de carga* es la habilidad del sensor para interceptar los fotones entrantes para luego generar una señal de electrones a través del efecto fotoeléctrico, [33]. Este proceso se describe a través de un parámetro

llamado *eficiencia cuántica (QE)* (valor ideal 100 %). Para llegar a altos valores de (QE) se deben minimizar las pérdidas por absorción, reflección y transmisión.

Se puede trabajar directamente sobre las pérdidas por absorción para mejorar la *QE*. Esta pérdida está asociada a las estructuras muertas del dispositivo, ópticamente hablando, que rodean al píxel del arreglo. Los arreglos CMOS experimentan una pérdida por absorción mayor debido a que los MOSFET incorporados en cada píxel (entre 3 y 5 p/píxel) están ópticamente muertos y además necesitan varias capas de metal para interconectarlos mutuamente. Por otro lado, esta capa de metal produce efectos ópticos indeseados tales como el Vignetting, difracción y píxel crosstalk. Se pueden disminuir las pérdidas si se agranda el tamaño del píxel del CMOS, pero esto no es adecuado para aplicaciones metrológicas.

Los sensores CCD no requieren transistores activos para la lectura, por lo tanto, todo el píxel es sensitivo (tiene un factor de llenado del 100 %). Además, los CCD introducen, desde su invención y estado de arte, “iluminación trasera” que produce una *QE* de hasta un 90 % en el espectro visible. Esta tecnología está en pleno desarrollo en los CMOS pero no alcanza a la CCD debido a los problemas introducidos por la red metálica de conexión entre MOSFETs.

Una segunda tarea operativa de los sensores es generar la imagen electrónica, llamada *colección de carga*. Refiere a la habilidad del sensor para producir una imagen luego de que los electrones son generados por el fotodetector. Uno de los principales parámetros que gobiernan esta capacidad es la sensibilidad de píxel a píxel, conocida como *patrón de ruido fijo (FPN)*, que en ambas tecnologías es igual. Por lo tanto no influye en la elección final del sensor.

Un tercer parámetro a considerar es la *eficiencia en la colección de carga (CCE)*. Es crítico porque define la resolución espacial del detector (que para esta aplicación es muy importante). Idealmente, los electrones generados debido a la exposición fotónica permanecen en el píxel. Sin embargo en presencia de débiles campos eléctricos aparece la difusión térmica que crea píxel crosstalk (superposición de información en la imagen que disminuye la calidad de la misma). Los fabricantes de CCDs eliminaron el efecto de difusión utilizando un reloj de alto voltaje que aumenta los campos eléctricos notablemente. En contraste, la performance *CCE* de los CMOS es pobre debido a que trabajan con bajo consumo (aunque ha mejorado los últimos años).

Otra tarea operacional es la *transferencia de carga*. Los CCD aplicados a las mediciones trabajan con una eficiencia del 99,9999 %. En contraste, los CMOS poseen una transferencia de carga muy dependiente del campo eléctrico, por lo que, si trabajan con bajos voltajes, tienen baja eficiencia.

El proceso de lectura es igual para los CCD y CMOS. Un capacitor se conecta a la salida de los amplificadores MOSFET y convierte la carga en señal. En teoría los amplificadores CMOS Y CCD deberían tener el mismo nivel de ruido, pero en la práctica los CCD tiene un piso de ruido hasta 100 veces menor que los CMOS. Se tienen estos niveles debido al diseño del amplificador y su electrónica. Los niveles de ruido en dispositivos CCD de astronomía llegan a ser tan pequeños como unos pocos electrones y por esto son los principales sensores utilizados en este campo de medición, [34].

En el caso de los CMOS, los niveles de ruido son mayores porque el circuito analógico es parte del chip. Las cámaras CCD pueden rechazar el ruido blanco usando capacitores para controlar el ancho de banda. Si se hiciera lo mismo con los CMOS se tendría un chip excesivamente grande y se perdería una de las características esenciales de estos dispositivos. Por otro lado, los CCD de metrología usan un ADC de 16 bits, cuestión muy complicada de alcanzar en los arreglos CMOS.

En cuanto a otras consideraciones acerca del ruido, es crucial remarcar que existen otras fuentes que aumentan el ruido en estos detectores. La mayoría de los píxeles CMOS con sus correspondientes 3 o más transistores están limitados por su ruido de reset kTC . Una componente de ruido muy grande que se genera cuando el capacitor es reseteado. Por naturaleza, los CCD, no tienen este ruido porque poseen la capacidad de muestrear y correlacionar con dos circuitos.

Por otro lado, se presentan los problemas introducidos por la corriente térmica negra (oscuridad total). Los CCD tienen niveles de corriente negra cerca de los $10pA/cm^2$ pero los CMOS superan estos valores entre 10 y 100 veces más: $100 - 2000pA/cm^2$. Finalmente, los CMOS tienen que luchar para disminuir ruidos producidos por problemas eléctricos que surgen de introducir el ADC y la lógica del chip todo en un mismo lugar físico, [33].

En la tabla 3.1 se resume el análisis. Para el caso estudiado, y la metrología en general, los sensores CCD, son los más aptos, aunque los sensores CMOS tienen un amplio margen de crecimiento para los próximos años.

Tabla 3.1: CCD vs CMOS.

CCD	CMOS
Mayor tamaño	Pequeño tamaño
Mayor precio	Menor precio
Ruido bajo	Mayor ruido
Alto consumo	Bajo consumo
Mejor imagen	Peor imagen

3.3. Alineación y distorsión

Se desarrolló un procedimiento para el montaje de la cámara de tal manera que las mediciones posteriores y los resultados del procesamiento de imágenes respeten las incertidumbres esperadas para un sistema metrológico de este calibre. Este método puede ser replicado para cualquier tipo de cámara.

El procedimiento de calibración posiciona la interfaz para que el software de procesamiento de imágenes pueda disminuir los efectos producidos por el Vignetting y así, la detección sub-píxel sea óptima .

El Efecto Vignetting se explica a continuación. Luego, en las secciones posteriores (3.3.2 a 3.3.4) se explicará el procedimiento previo a la detección, el cual permite que el software disminuya tal efecto. El software en cuestión, aplicado sobre las imágenes capturadas, será parte del Capítulo 6.

3.3.1. Efecto Vignetting.

El efecto Vignetting es un fenómeno óptico que aparece cuando la luz incide en un conjunto de lentes y produce, en el caso del autocolimador y/o la cámara del sistema de visión, que el patrón de intensidad de la iluminación de la retícula sufra un deterioro radial, causando un desvanecimiento gradual de las figuras que conforman la escala en la periferia de la imagen capturada.

Se analiza la deformación de la escala solamente porque las mediciones con la cruz se realizan en plena oscuridad, disminuyendo este efecto al punto de que no influye en la medición.

Este fenómeno óptico se produce visiblemente ante el ojo humano cuando se observa a través del ocular del autocolimador y aún más, cuando se analiza la imagen de la retícula de medición con el software de procesamiento, ya que la captura de la imagen realza este desvanecimiento, de tal manera que un patrón circular de iluminación de fuerte intensidad aparece en el centro de la imagen (ver Fig. 3.11b). Esta intensidad del centro de la imagen va disminuyendo regularmente a medida que se observa en dirección a la periferia en forma radial. De esta manera se observa una deformación en la imagen, [35]. La distorsión se hace más pequeña a medida que la distancia focal f se hace más grande, es decir, cuando el lente posee pequeña apertura angular; en el caso límite, la cámara es una pinhole teórica.

En la Fig. 3.6 se puede ver un ejemplo del efecto en acción. Como el diafragma del sistema óptico de la figura posee una apertura angular inferior al lente, algunos de los rayos incidentes se pierden completamente en la periferia. Para objetos distantes, el campo que se reproducirá correctamente, sin estar afectado por el Vignetting, está cubierto por el ángulo α . Para

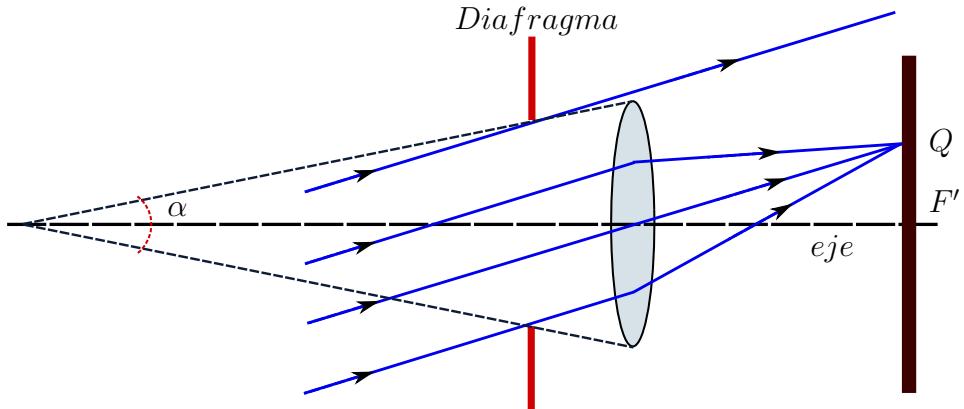


Figura 3.6: Ilustración del significado del Vignetting. De acuerdo a la apertura diafragma del lente, algunos rayos del haz de luz se pierden completamente produciendo este efecto.

ángulos $> \alpha$ el campo empieza a oscurecerse más rápidamente siguiendo esta relación, [36]:

$$E = B' \cdot \omega' \cdot \cos^4 \theta, \quad (3.2)$$

En base a la Fig. 3.7, que es una representación de la pupila de salida del sistema óptico mostrado en la Fig. 3.6, se definen las variables de la Ec. (3.2), [36, p. 113].

E , determina la iluminancia en el punto Q ; B' es la luminosidad (flujo por unidad de área), ω' el cono de iluminancia y $\cos^4 \theta$ el ángulo de decremento de la iluminancia.

El patrón particular producido por el efecto Vignetting sobre nuestras propias imágenes se muestra en la Fig. 3.8, que es una representación esquemática de la imagen capturada que se muestra en la Fig. 3.11b. El centro representado con el color amarillo es el centro del lente (el más iluminado), y a partir de allí se empieza a producir el deterioro de la imagen (oscurecimiento).

3.3.2. Enfoque.

Determinar cuando la cámara está en foco es un punto delicado [37], ya que se tiene que encontrar un equilibrio entre la nitidez de la imagen y el número de píxeles utilizados para la formación de la imagen. Para descifrar si toda una imagen está en foco se requiere comparar las partes que están más definidas con aquellas que resaltan por ser borrosas.

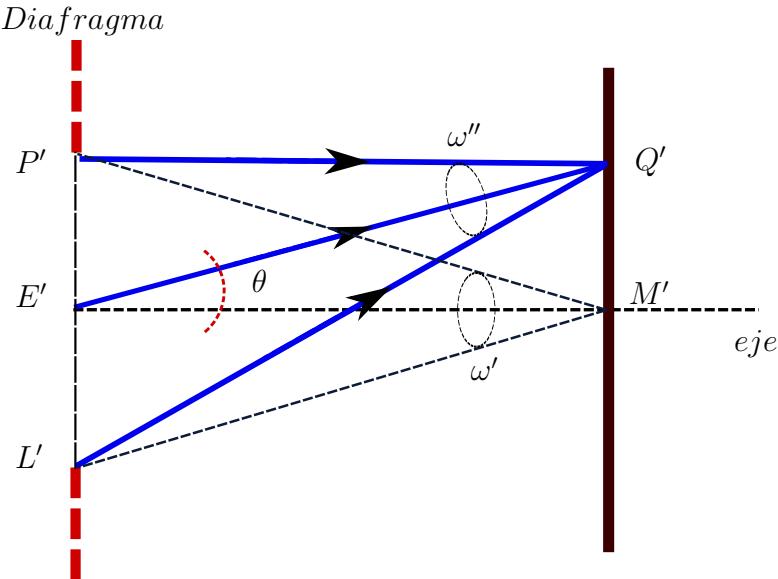


Figura 3.7: Esquematización del sistema óptico de la Fig. 3.6. La apertura $P'E'L'$ corresponde a la pupila de salida.

Esta etapa en la calibración es importante para el procesamiento de imágenes posterior, ya que de acuerdo a la calidad del enfoque que se obtenga, así será la detección de la posición de las líneas a nivel de sub-píxel para un conjunto objetivo-cámara determinado.

La definición de profundidad de foco (D) está expresada por la siguiente ecuación:

$$D = \frac{\lambda}{n \cdot \operatorname{sen}^2(\beta_o)}, \quad (3.3)$$

n , es el índice de refracción del medio en frente del lente, λ es la longitud de onda de la iluminación y β_o es un medio del ángulo subtendido por el objetivo al objeto. Se puede extender esta definición óptica para imágenes capturadas, [38, 39].

Se consigue la mejora del rango focal a través de una composición digital o del montaje de una imagen que se forma con las partes en foco de una serie de imágenes (correlacionadas a la original). Se debe cubrir todo el rango de la profundidad de foco D .

Para que el proceso de composición digital pueda seleccionar las partes de cada imagen en foco, y colocarlas en una imagen compuesta resultante, se debe definir una medida correspondiente. Dada la complejidad que aparece en esta definición, Vollath et al. [40], introduce criterios de nitidez para de-

terminar si una imagen está en foco o no. Como definición inicial, se puede declarar que el sistema está trabajando en el punto óptimo de foco cuando el máximo detalle es visible en cada sector de la imagen. Para corroborar este criterio, se evalúa la diferencia entre la intensidad de los píxeles adyacentes en el área de trabajo, si se desea analizar una porción de la imagen, o en toda la imagen, si toda su información es necesaria. El detalle más fino sólo será visible si la imagen está enfocada plenamente.

Otro criterio de enfoque, no tan sencillo, está basado en el tamaño de los discos de Airy. El disco de Airy es un fenómeno óptico producido por la naturaleza ondulatoria de la luz. Cuando esta atraviesa una apertura circular, se difracta produciendo un patrón de interferencia de regiones iluminadas y oscuras sobre una pantalla alejada. Si estos discos son tan pequeños como lo permite la óptica, se está en el punto de enfoque óptimo, [41]. Este método no es posible de aplicar porque nuestra cámara está capturando una imagen virtual formada dentro del autocolimador.

Se puede implementar de manera sencilla un índice de nitidez, según propone Vollath et al., a través de un programa de cálculo. Mediante este se define si la cámara está en foco o no, directamente desde las imágenes capturadas.

3.3.2.1. Índice de Nitidez.

Se crearon índices de nitidez de acuerdo al algoritmo presentado en [37]. Para tal fin, se arma una matriz de píxeles como la presentada a continuación, siendo 5 la posición del píxel central del arreglo (centro de la vecindad a trabajar):

1	2	3
4	5	6
7	8	9

Esta matriz se utiliza como referencia en la Ec. (3.4) que define el índice de nitidez (I_n) como:

$$I_n = \text{abs}[(0,7071*((5-1)+(5-3)+(5-7)+(5-9))+(5-2)+(5-4)+(5-6)+(5-8))], \quad (3.4)$$

La ecuación anterior resta la intensidad del píxel 5 (o sea $I(5)$) menos la del 1 y así sucesivamente, según exprese la ecuación. Mediante I_n se puede calcular la nitidez de una imagen determinada. Cuanto más grande el índice, mejor la nitidez, por lo cual se puede armar un bucle entre un conjunto de

imágenes para determinar la posición correcta de la lente de la cámara. El experimento se realiza varias veces, capturando decenas de imágenes en las diferentes posiciones del lente hasta ubicar la posición óptima del mismo.

Este procedimiento permitió obtener el punto correcto de enfoque. O sea, que tan lejos se debía situar el lente respecto al CCD para poder obtener la mejor calidad de imagen.

3.3.3. Alineación cámara-telescopio.

Las imperfecciones en el posicionamiento y alineación de la cámara con respecto al telescopio del autocolimador pueden causar distorsiones y falta de definición en la imagen de la retícula. Para poder avanzar hacia la adquisición de las imágenes es necesario alinear la cámara con respecto al eje del objetivo del autocolimador. Para este fin, se debe alinear en primer lugar, el eje óptico del instrumento con la normal al espejo E . El procedimiento que se aplica se basa en apuntar el objetivo del autocolimador al espejo hasta que aparezca la cruz en la retícula. Cuando el espejo está desalineado, se sale de rango y no se puede medir nada (no aparece la cruz). Una vez que la cruz está visible, se procede, mediante los elementos de posicionamiento propios del autocolimador, a ubicar la cruz en el centro de la escala para hacer la primera medición (la referencia o cero). Es importante realizar este paso en primer lugar, ya que la medición, al ser extremadamente precisa, salte fácilmente del rango del instrumento. Se debe prever qué desplazamientos angulares se desean medir.

El paso siguiente tiene que ver con el efecto Vignetting. Si la luz incidente en el telescopio posee un corrimiento con respecto al centro de la retícula, la imagen tendrá una estructura incorrecta de píxeles, que produce un error en el procesamiento de imágenes posterior (efecto producido por el vignetting). El proceso de calibración consiste en determinar, mediante una iteración entre posicionamiento de la luz incidente (utilizando los tornillos micrométricos nombrados) y los datos entregados por el software con respecto a la matriz de intensidades de la imagen de calibración, la posición óptima del halo de luz. En la Fig. 3.8 se expresa en forma de esquema el procedimiento.

Cuando el halo está centrado se continúa con el paso final, explicado en la sección siguiente.

3.3.4. Alineamiento de las líneas con la matriz de píxeles de la cámara.

Como se explicó en la sección 3.3.3 lo primero que se hace es ubicar en forma global la cruz de medición. Luego se procede con esta nueva alineación

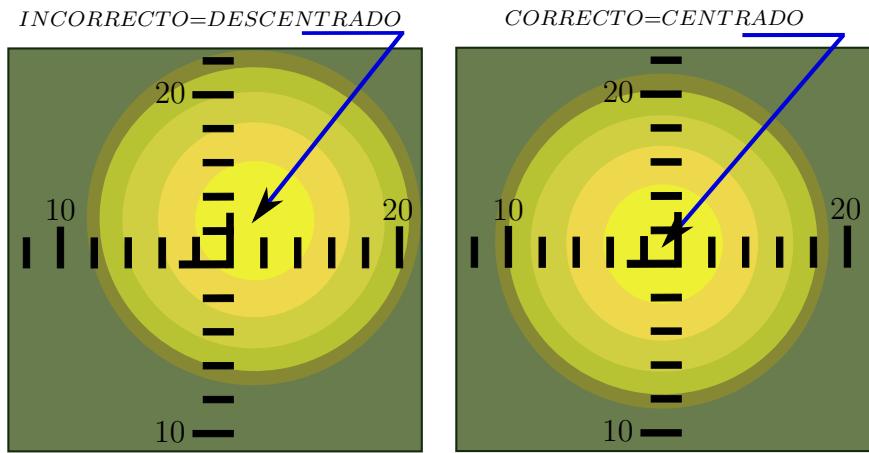


Figura 3.8: Esquema de como se observa la luz incidente en el telescopio sobre la imagen de la retícula (ver imagen capturada 3.11b). La flecha azul indica la dirección del gradiente de iluminación. Se debe que centrar el halo de luz en el centro de la imagen.

ya que ciertos algoritmos funcionan mejor si las líneas están dentro del rango de inclinación previsto (se hace un estudio en la Sección 4.9). Se busca la posición que suple esta premisa: las líneas de las imágenes adquiridas deben estar posicionadas sobre los píxeles cuadrados del CCD (paralelas a la matriz creada por los mismos).

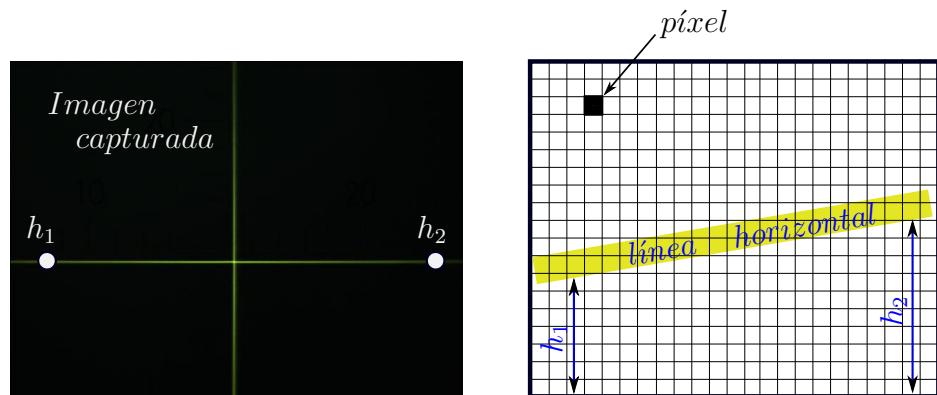


Figura 3.9: Esquema de cómo se debe corregir el alineamiento de las líneas respecto a la matriz de píxeles. Las alturas de los extremos tienen que ser iguales, $h_1 = h_2$.

Se realiza una calibración espacial utilizando sólo la línea horizontal de la cruz (ver la Fig. 3.9). Se debe lograr que las alturas de los extremos de la

línea nombrada, medidas con respecto al último píxel vertical de la matriz, sean iguales, $h_1 = h_2$. Para lograr esto se utilizan el detector Hough (Sección 4.3) o el detector de valor máximo (Sección 4.7).

3.4. Captura de las imágenes

El autocolimador Nikon 6B es un autocolimador de campo oscuro, optimizado para que el operario ubique la cruz con respecto a los segmentos de la retícula mirando por el ocular en un entorno con poca iluminación (aún mejor en completa oscuridad), por lo cual, cuanto más oscura es la habitación, mayor será la precisión obtenida en el posicionamiento de la cruz y en la medición posterior, ya que existirá un contraste más elevado entre el segmento oscuro de la retícula y la cruz brillante sobre le mismo.

La retícula del autocolimador, en condiciones de operación normales, sin la interfaz visual, tiene dos figuras principales que aparecen simultáneamente frente al operario: una escala y la cruz. Esta última, al poseer su propia iluminación, permite contrastar los segmentos oscuros de la escala con su brillo; se puede ubicar mejor el centro del segmento de la escala cuando la cruz lo superpone y lo ilumina. Sin embargo, este método de lectura impide capturar adecuadamente una imagen de la escala por separado. Este procedimiento de medición está creado para un operario humano, no para capturar con una cámara la imagen virtual de la escala y de la cruz, por separado.

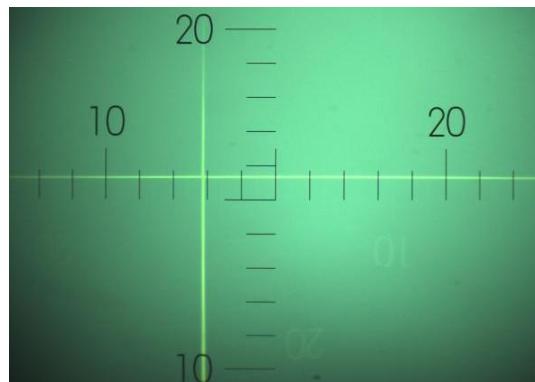


Figura 3.10: Imagen captura de la retícula del autocolimador. La cruz amarilla de posicionamiento está superpuesta a los segmentos oscuros de la escala.

Ahora bien, para el procesamiento de imágenes y su respectiva segmentación hay que capturar las imágenes de estas dos figuras individualmente. Una imagen, donde se observen al mismo tiempo, la escala y la cruz, introduce errores en la determinación de la posición de las líneas. Estos errores surgen

de la mezcla de píxeles entre la escala y la cruz debido a la superposición de las figuras. Esto se puede ver claramente en la Fig. 3.10, donde los segmentos oscuros se mezclan con las líneas amarillas de la cruz de posición.

Sin embargo, se puede separar la captura de la escala y de la cruz, sin producir ningún movimiento en el sistema de ubicación de la cámara. Se cambia la iluminación del ambiente cuando es necesario obtener la cruz y se apaga la fuente de generación del haz cuando se captura la escala, manteniendo a la vez, la iluminación óptima del ambiente. Las figuras no se desplazan, una de otra, al agregar o quitar iluminación o al apagar y/o regular la fuente de luz de la cruz.

3.4.1. Captura de las imágenes de la escala.

Luego de la alineación del espejo y la ubicación de la cámara con respecto al objetivo, se tomaron imágenes de la retícula con la habitación iluminada, de modo de maximizar el contraste de fondo claro y líneas oscuras de la escala, como puede verse en la Fig. 3.11.

Es importante recalcar que las imágenes de la escala se capturan una sola vez, al comienzo de la experiencia, para estimar la relación píxel/segundo de arco (Δ_{xy}) correspondiente a la cámara utilizada. Este paso puede considerarse como parte de la calibración necesaria para la interfaz antes de realizar las mediciones angulares.

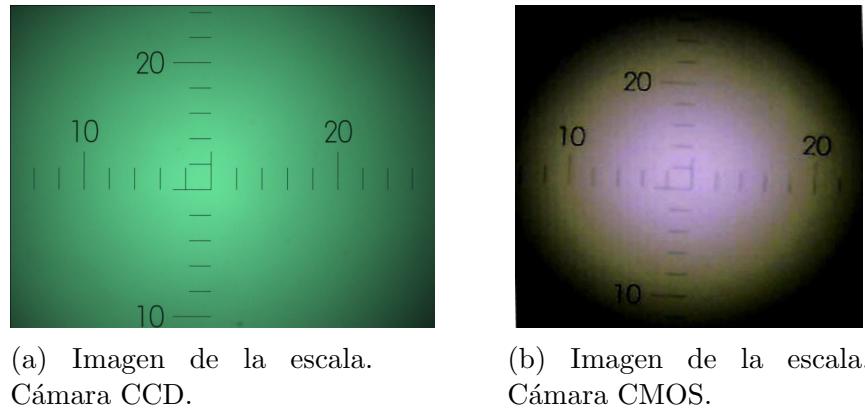


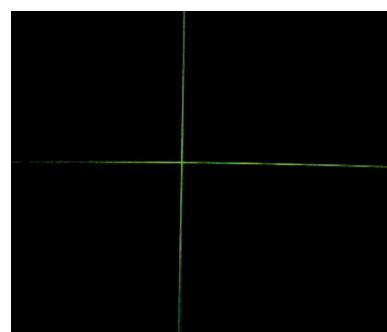
Figura 3.11: Imagen de la escala de la retícula de medición capturada con las dos interfaces visuales.

3.4.2. Captura de las imágenes de la cruz.

Finalmente, para realizar una medición, se disminuye al máximo la luz ambiente del laboratorio. Como el fondo ahora es oscuro y la cruz es clara, el sensor de la cámara captará únicamente las excitaciones producidas por la cruz y no se podrá observar ningún segmento propio de la escala. Este escenario puede verse en la Fig. 3.12. La calidad de las cámaras queda retratada en ambos conjuntos de imágenes. Por otro lado, se resalta la robustez del algoritmo que se presentará a continuación: con ambas cámaras obtiene mejoras en la resolución del instrumento.



(a) Imagen de la cruz. Cámara CCD.



(b) Imagen de la cruz. Cámara CMOS.

Figura 3.12: Figura de la Cruz de medición capturada con las dos interfaces visuales.

Capítulo 4

Desarrollo del Algoritmo: Simulación

El objetivo de este capítulo es analizar diferentes algoritmos de detección de centros de líneas a nivel sub-píxel con el fin de obtener el detector óptimo que será utilizado para el programa de la interfaz visual. Este estudio riguroso está basado en una simulación, que examina el comportamiento de los algoritmos en un entorno controlado. Este enfoque, nunca antes propuesto en la literatura de autocolimadores, detalla el desempeño de los algoritmos bajo el ruido presente en las imágenes capturadas y de acuerdo a la inclinación particular de la línea horizontal de la cruz.

En el desarrollo se incluyen cinco algoritmos de segmentación de líneas y detección de centros. El primero, descrito en la Sección 4.3, está construido mediante la transformada Hough (se verán dos versiones de la misma, siendo una de ellas un nuevo modelo, nunca antes presentado); el segundo (Sección 4.4), está definido mediante el ajuste de funciones gaussianas sobre secciones ortogonales de las líneas (se explica el porqué de la elección de esta función); el tercero (Sección 4.5), fue creado en base a la definición de la media probabilística ponderada; el cuarto (Sección 4.6), utiliza una regresión lineal de toda la matriz de píxeles por el método de mínimos cuadrados pesados; y finalmente, en la Sección 4.7, se desarrolló un último detector a través de la detección del máximo de dicha función muestrada.

4.1. Simulación de la imagen de la línea

Se programó en Matlab un software que genera un conjunto de 100 imágenes de una recta definida de acuerdo a un crecimiento de intensidades dado por una función Gaussiana tridimensional. Las líneas vistas como superficies

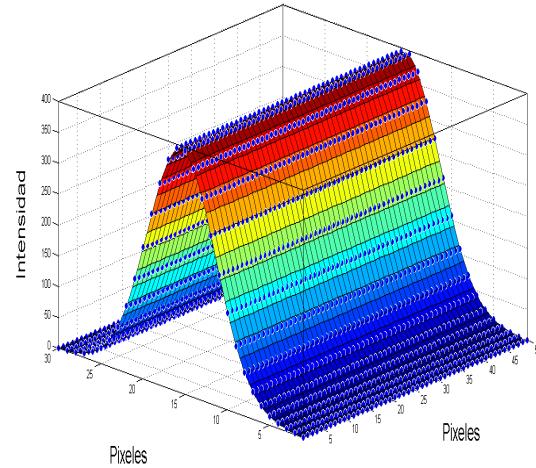


Figura 4.1: Perfil 3D de una línea de la cruz.

tienen la forma de la Fig. 4.1.

En la Fig. 4.2 se puede ver un segmento lineal tomado de la cruz capturada, a la cual se le hace un corte ortogonal en la dirección de máximo gradiente (línea punteada azul). El perfil que presenta esta muestra, proveniente del corte, corresponde a una función gaussiana discreta, que en una secuencia, forma la superficie de la Fig. 4.1. Este tipo de líneas, y el perfil que se observa luego de hacer cortes sobre la misma en la dirección del máximo gradiente fue estudiado en nuestro primer trabajo, Schürer et al. [22]. Por ende, la simulación representa a las líneas reales (capturadas) de la cruz y de la escala del autocolimador, capturadas mediante la cámara de la interfaz visual. Un segmento de las líneas, tanto la capturada (ver Fig. 4.3a), como la simulada (ver Fig. 4.3b), están mostradas en la Fig. 4.3.

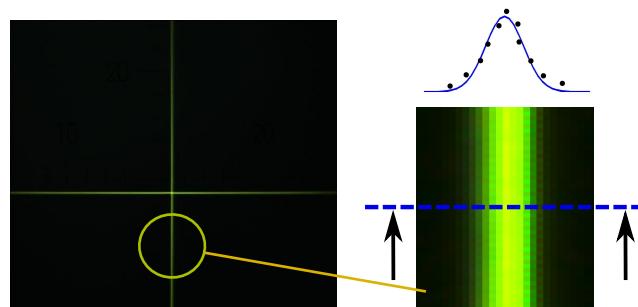


Figura 4.2: Línea capturada de la cruz a la cual se le hace un corte en la dirección de máximo gradiente para poder obtener su perfil gaussiano.

Cada imagen simulada describe una sola línea desplazada paralelamente (ver Fig. 4.3c), con paso centesimal (valor sub-píxel elegido), de la anterior. De esta manera se generan 100 posiciones diferentes, una consecutiva de la otra.

Este conjunto de imágenes simuladas permite examinar y depurar, al trabajar en un entorno conocido y con las posiciones simuladas determinadas, el comportamiento del algoritmo en sus diferentes etapas de formación. Se comparó la posición obtenida con cada detector, con la posición simulada.

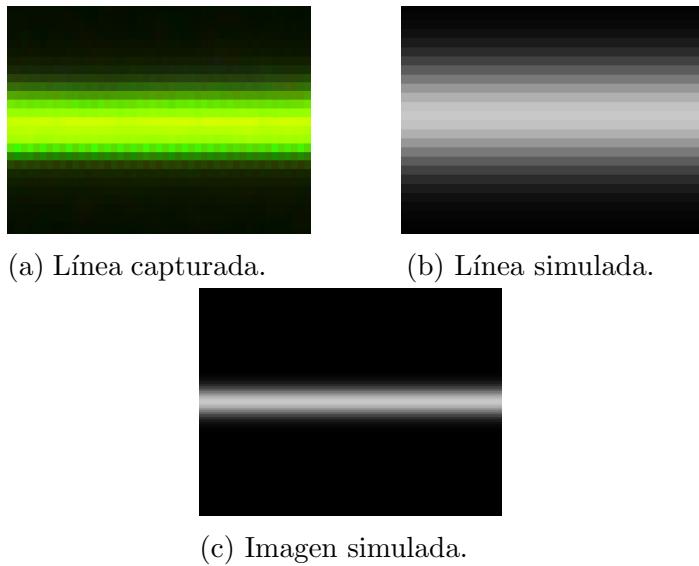


Figura 4.3: Segmento de la línea capturada (a) y de la línea simulada (b). Imagen simulada (c).

La ecuación utilizada para generar la línea Gaussiana en una imagen I formada por una matriz (N_x, N_y) , se escribió como:

$$I(i, j) = \text{round}(A \cdot e^{\frac{-(i_0-j)^2}{2 \cdot \Delta^2}}), \quad (4.1)$$

Donde:

$$i_0 = \frac{N_y}{2} \in N, \quad (4.2)$$

y,

$$0 \leq I(i, j) \leq 255 \text{ e } I(i, j) \in N, \quad (4.3)$$

La función *round* es la función redondeo al entero más próximo. El valor de A (amplitud), limitado en 200, describe el margen de crecimiento máximo de intensidad de la cámara Basler utilizada; valor elegido para que no se sobrepase, una vez que se sume ruido, el máximo 255 (8 bits). Las intensidades de la imagen se representaron de la misma forma que la cámara CCD codifica cada imagen: con 8 bits de resolución, que genera valores que van desde 0 a 255. El valor Δ permite construir un ancho de línea de acuerdo a la cantidad de píxeles que ocupa la línea presente en las imágenes capturadas, pudiéndose variar el ancho de acuerdo a la experiencia propuesta.

La primer imagen parte de una posición central (i_0) de la imagen, de 100×100 píxeles de resolución espacial, para luego generar las 100 posiciones siguientes mediante el paso sub-píxel elegido. Entonces, el espaciamiento se define, siendo i_0 un valor arbitrario (del centro de la imagen o de cualquier otro lugar, por ejemplo $i_0 = N_y/2$), de la siguiente manera:

$$y_0(k) = i_0 + k/100, \quad 1 \leq k \leq 100, \quad (4.4)$$

Siendo el valor $k/100$ el que permite posicionar las líneas con un paso centesimal de corrimiento.

A continuación se detalla el pseudo-código que construye las 100 imágenes para la simulación.

4.1.1. Algoritmo.

Para crear las 100 imágenes (n) de una línea recta con resolución espacial (N_x, N_y) , una matriz 3D se forma de la siguiente manera:

```

n = 100;
for i = 1 : N_x
    if d ≈ 0
        i_n = i_n - 1/d; (line inclination)
    end
    for j = 1 : N_y
        for k = 1 : n
            s_s = i_0 + (k)/n; (sub-pixel step)
            G(j, i, k) = round(A * exp(-(s_s + i_n - j)^2 / (2 * c^2)));
        end
        sv_s = 0;
    end
end

```

Luego para añadir ruido, se parte de la relación señal ruido S/N de la imagen capturada, que se calcula tomando muestras del ruido y de la señal (matrices de muestra) para luego calcular la Varianza de esos valores. Finalmente se usan estos valores en la siguiente ecuación:

$$S/N = 10 \log \frac{\text{var(imagen)}}{\text{var(noise)}}, \quad (4.5)$$

El valor S/N obtenido de la imagen capturada, y un rango alrededor de este, se utilizan en las secciones siguientes para el análisis de cada detector. Estos valores se utilizaron para crear las imágenes con ruido analizadas en la simulación.

4.2. Coeficiente de Pearson

A través de todas las experiencias, así como también en la simulación propuesta, se tienen dos conjuntos de datos por medición. El primer conjunto, relacionado a la referencia de la medición, es un vector con todas las posiciones de las líneas simuladas, en el caso de la simulación, o todas las posiciones de referencia creadas por el Nivel Electrónico cuando se trata de la experiencia de medición con el instrumental del laboratorio (ver Capítulo 5). El otro conjunto, es un vector con las posiciones obtenidas a través del detector que se esté estudiando.

Es necesario averiguar que tan bien son detectadas las posiciones respecto al primer conjunto de datos. La relación entre los datos primarios y secundarios se cuantifican usando coeficientes de correlación, siendo Pearson, uno de los más usados, [42]. Este coeficiente es ampliamente utilizado en ciencia como una medida del grado de dependencia lineal entre dos variables.

El Coeficiente de correlación de Pearson entre dos variables se define como la covarianza de las dos variables a comparar, dividido por el producto de sus desviaciones estándar:

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}, \quad (4.6)$$

Cuando se trabajan con muestras, como en el caso estudiado, se tienen a disposición las posiciones discretas en dos vectores unidimensionales de longitud n , denotados por los conjuntos de datos $x = \{x_1 \dots x_n\}$ e $y = \{y_1 \dots y_n\}$.

El coeficiente de correlación de Pearson para estas muestras se escribe como:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4.7)$$

donde \bar{x} es la media de las muestras para el conjunto de datos x (la misma definición es para y):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4.8)$$

Utilizando las ecuaciones (4.7) y (4.8) se llega al valor final de r :

$$r_{xy} = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{(n-1) \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{(n-1) \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}, \quad (4.9)$$

4.2.1. Comprensión de los valores de r_{xy} .

Los valores del coeficiente correlación varían entre $1 \geq r \geq -1$. Las correlaciones igual a 1 o -1 corresponden a puntos de datos que se extienden exactamente en una línea recta en el ideal teórico. La Fig. 4.4 representa en forma esquemática los valores principales del Coeficiente y su significado.

Es importante destacar que el coeficiente es simétrico: $\text{corr}(X, Y) = \text{corr}(Y, X)$. De esta manera se pueden estudiar los datos intercambiando los ejes sin obtener resultados diferentes.

En nuestros datos, un valor de $r \approx 1$ implica que una ecuación lineal describe la relación entre datos de posición de referencia y datos de posición detectada con una exactitud mejor que una parte en 10^{16} (corresponde a la representación de un número de punto flotante en la PC cuando hay varios cálculos de por medio). Como consecuencia, todos los pares (x, y) estarán situados sobre la línea recta definida por el modelo lineal.

Cabe mencionar que las simulaciones y los experimentos sobre las imágenes capturadas demuestran que para $r > 0,95$ se está frente a una buena detección de las posiciones y para un valor $r < 0,95$ la detección deja de ser útil para una medición de calidad metrológica (valor calculado empíricamente).

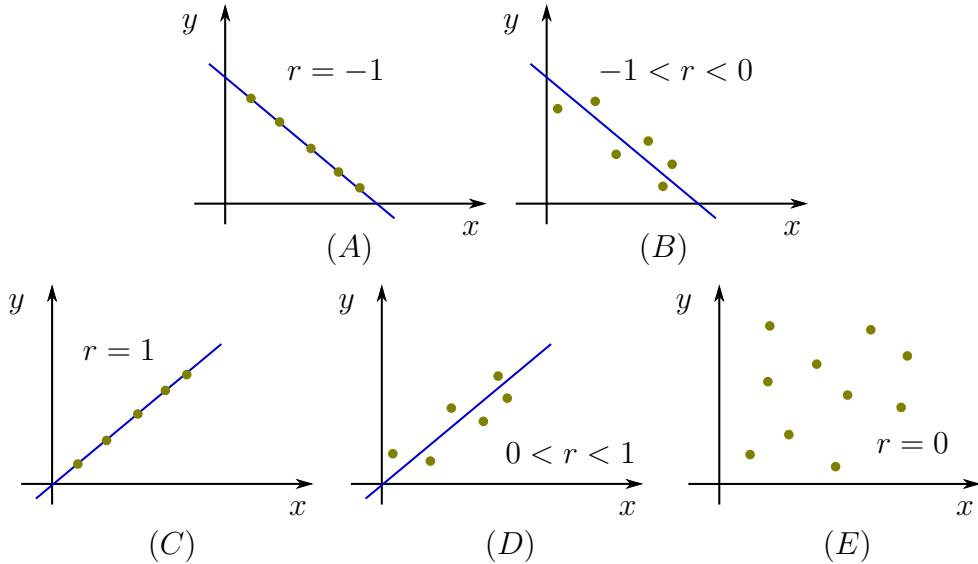


Figura 4.4: Valores característicos del Coeficiente de Pearson y su significado global. Los ejes (x, y) representan a los dos conjuntos de datos, primarios y secundarios. (A) Correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante. (B) Existe una correlación negativa de menor grado. (C) Correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante. (D) Correlación positiva de menor grado. (E) No existe relación lineal.

4.3. Detector Hough (D_H)

4.3.1. Primera etapa: corrimiento a nivel píxel (D_{H1}).

La transformada Hough se simuló, en primer lugar, utilizando un corrimiento a nivel del píxel de cada una de las líneas, limitando el valor de k de la Ec. (4.4) a un valor entero; Bergues et al. [43, 44]:

$$y_0(k) = i_0 + k, \quad 1 \leq k \leq 100, \quad (4.10)$$

De esta manera, la línea simulada se desplazó a través de 100 posiciones de la imagen creada, abarcando un rango de 100 píxeles. Conociendo los valores exactos de la posición simulada, se utilizó la transformada Hough Convencional para detectar dicha posición, de tal manera que se pudiese

comparar si la detección de la posición correspondía a la definida por la simulación.

4.3.2. Análisis Teórico de la Transformada Hough Convencional (THC).

La transformada de Hough es una técnica utilizada para aislar características de forma particular dentro de una imagen. La idea básica es encontrar curvas que puedan ser parametrizadas como líneas rectas, polinomios y círculos, [29]. Para trabajar con este tipo de parametrizaciones, en primer lugar, la transformada trabaja con una imagen binaria de bordes que surge de aplicar sobre la imagen en tono de grises los detectores usuales de gradiente (o filtros), como Canny, Prewitt, Sobel o LoG, [45].

Se puede describir analíticamente un segmento de línea en varias formas. Sin embargo, una ecuación conveniente para definir un conjunto de líneas es la notación paramétrica o normal. La transformada Hough utiliza esta descripción y permite transformar el espacio discreto de la imagen binaria de bordes, definido por píxeles, al espacio paramétrico que está en función de las variables paramétricas θ y ρ (ver Fig. 4.5). Estos dos parámetros definen una recta mediante la siguiente ecuación paramétrica:

$$\rho = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta), \quad (4.11)$$

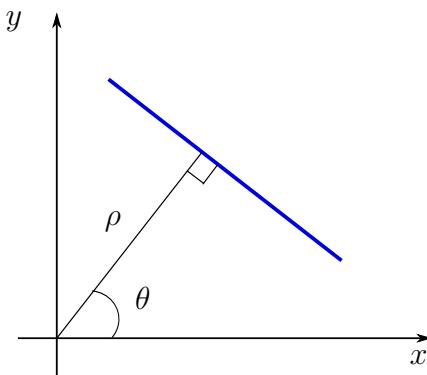


Figura 4.5: Plano de imagen binario (x, y) que contiene una recta que a la vez es definida por los parámetros θ y ρ del plano paramétrico utilizado por la Transformada Hough.

La representación de una recta, que utiliza Hough, construye un conjunto de propiedades entre el plano paramétrico y el plano imagen que permiten

solucionar el problema de detectar una línea en una imagen binaria. Se cumple:

1. Puntos que corresponden a una misma línea en el plano de imagen binario (x_i, y_i) se convierten en curvas sinusoidales que se cruzan en un mismo punto en el plano paramétrico (θ, ρ) .
2. Un punto en el plano paramétrico se convierte en una línea en el plano de imagen.
3. Puntos que corresponden a una misma línea en el plano imagen se convierten en curvas sinusoidales que se cruzan en un mismo punto en (θ, ρ) .
4. Los puntos que yacen en una misma curva sinusoidal en (θ, ρ) , se convierten en líneas que se cruzan en un mismo punto en (x_i, y_i) .

Como conclusión directa a estos enunciados se define que el problema de detectar píxeles colineales en la imagen binaria ahora se traslada a encontrar curvas sinusoidales concurrentes en el plano paramétrico. La Fig. 4.6 explica como los puntos colineales del plano binario se transforman en un conjunto de curvas sinusoidales concurrentes en el plano paramétrico.

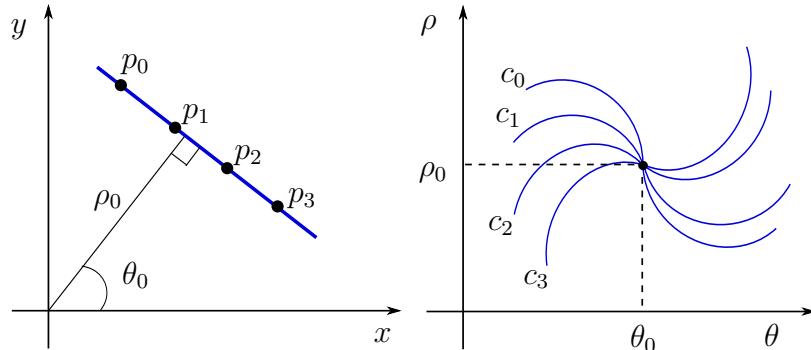


Figura 4.6: Transformación de puntos colineales de una imagen binaria al plano paramétrico a través de la Ec. (4.11). El punto p_0 se transforma en la curva c_0 y así sucesivamente.

4.3.2.1. Algoritmo THC.

El algoritmo de Hough aplicado a la imagen binaria para obtener las líneas que se forman en la misma se realiza de la siguiente manera:

1. Detección de los bordes de la imagen en escala de grises. Se genera aquí la imagen binaria mediante algún filtro de gradiente (ver Sección 4.3.2.2).
2. División del espacio paramétrico que se utilizará en la transformada Hough en pasos θ y ρ uniformes para crear la matriz H (ver Fig. 4.7).
3. Inicializar cada elemento del arreglo H a cero. Cada uno se utilizará como acumulador de cruces.
4. Transformar cada píxel de la imagen binaria mediante (4.11).
5. Cada celda del arreglo $H(\theta, \rho)$ por el cual pase una curva sinusoidal (que representa un punto del espacio imagen), se incrementa en 1.
6. Se aplica un umbral en función de las características de la imagen (ruido y líneas que interesa detectar) para determinar el valor en el cual un acumulador alto corresponde a una línea.

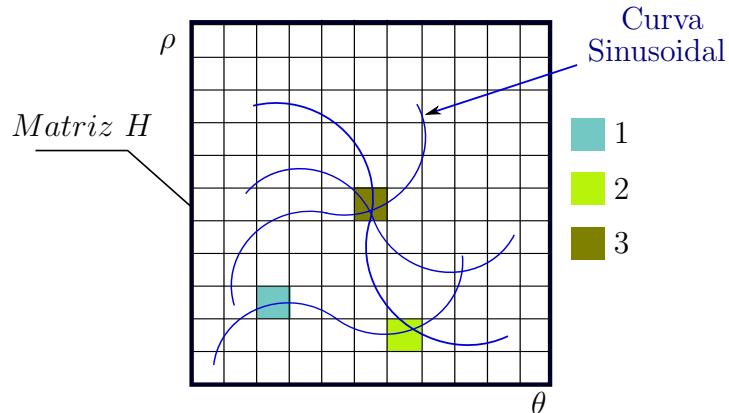


Figura 4.7: Esquema del espacio paramétrico dividido en pasos ρ y θ uniformes. Se muestran 4 curvas sinusoidales que se utilizan para el conteo. Las celdas en color contabilizan el incremento de acuerdo a la cantidad de curvas que pasan por ellas.

Este procedimiento tiene la ventaja de que no hace falta que los píxeles sean contiguos para poder determinar una línea, por lo tanto, favorece a la detección bajo cierto nivel de ruido. Por ejemplo, en nuestra primera aproximación con una $S/N = 18dB$, todas las líneas de la escala se determinaron correctamente, [43]. Pero, por otro lado, se pueden detectar líneas fantasma si los objetos están alineados al azar y se crean puntos colineales que nada tienen que ver con las figuras capturadas.

4.3.2.2. Detectores de Borde.

Para la primera etapa del algoritmo (la detección de bordes y la creación de la imagen binaria) se realiza un pre-procesamiento con un filtro detector de bordes. Esta etapa inicial permite que el plano imagen se adecúe correctamente, transformándolo a un plano de imagen binario, para aplicar la *THC* mediante la Ec. (4.11).

Un borde es la parte de la imagen que delimita una región de otra y se puede distinguir a través de una variación significativa de algún parámetro de la imagen. Como la intensidad de los píxeles de una imagen son proporcionales a la radiación de la escena capturada, los bordes físicos se representan a través de los cambios en la función intensidad de la imagen, [46].

Los tipos más comunes de borde son los escalones: cambios de intensidad de la imagen con forma de función escalón. Se producen principalmente por un borde físico, un objeto que oculta otro o una sombra sobre una superficie. Por lo general aparecen entre dos regiones que tienen niveles casi constantes, pero diferentes, de gris. Los bordes tipo escalón corresponden a los píxeles en los cuales se produce la discontinuidad en el nivel de gris; allí se localizan los puntos de inflexión de la función. Por lo tanto, los bordes pueden ser detectados utilizando el gradiente de la función de intensidad de la imagen. Están localizados como máximos o mínimos de la derivada de primer orden o como cruces por cero de la derivada de segundo orden.

Existe, conceptualmente, un conjunto de pasos para llegar a dicha localización. Los esquemas comúnmente propuestos para la detección de bordes incluyen tres operaciones:

- 1. Diferenciación:** consiste en implementar las derivadas necesarias para recorrer la imagen. Dada la función de intensidad de la imagen $g(x, y)$, en relación a la resolución espacial (x, y) , la derivada de primer orden de g , se puede calcular como las derivadas parciales en la dirección de los ejes principales:

$$g_x = \frac{\partial g}{\partial x}, \quad (4.12)$$

$$g_y = \frac{\partial g}{\partial y}, \quad (4.13)$$

Luego, utilizando las Ec. (4.12) y (4.13) se puede calcular el gradiente de g , que es un vector en la dirección de la máxima derivada direccional. Su

magnitud y dirección están definidas respectivamente de la siguiente manera:

$$\nabla G = \sqrt{g_x^2 + g_y^2}, \quad (4.14)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{g_y}{g_x} \right), \quad (4.15)$$

De acuerdo a la definición de borde, se puede decir que los píxeles correspondientes a un borde pueden ser localizados por los máximos del módulo del gradiente, y que la dirección del contorno del borde es ortogonal a la dirección del gradiente. Entonces, los métodos de detección basados en el gradiente son direccionales, ya que dan su respuesta máxima cuando están alineados con la dirección orthogonal del borde buscado.

Para obtener la diferenciación discreta sobre una imagen, se define una función de intensidad como el mapeo $Z_f \times Z_c \rightarrow Z_I$, donde Z_f, Z_c, Z_I son subconjunto de Z que representan la fila, la columna y el valor de intensidad de cada píxel de la imagen.

Se posee una función discreta $g(f, c)$, que nace del muestreo y cuantización de la función análoga de intensidad de la escena $g(x, y)$ que incluye la información de cada píxel. De esta manera, se pueden aproximar las derivadas de primer orden g_x y g_y como:

$$g_c(c, f) = g(c, f) - g(c + 1, f), \quad (4.16)$$

$$g_f(c, f) = g(c, f) - g(c, f + 1), \quad (4.17)$$

g_c y g_f corresponden respectivamente a la aproximación de g_x y g_y alrededor del píxel (c, f) . Estos operadores se pueden representar como máscaras de la siguiente manera:

$$g_c(c, f) = [-1 \ 0 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} g(c - 1, f) \\ g(c, f) \\ g(c + 1, f) \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

$$g_f(c, f) = [g(c, f - 1) \ g(c, f) \ g(c, f + 1)] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (4.19)$$

Siendo:

$$H_c = [-1 \ 0 \ 1], H_f = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

2. **Suavizado:** es la etapa de reducción de ruido de la imagen y regularización de la diferenciación numérica. Es claro que el ruido de una imagen induce problemas en la detección de bordes y en el proceso de localización a nivel sub-píxel. El Suavizar la imagen puede reducir notablemente el ruido, pero también tiene un efecto negativo: la pérdida de alguna información que degrada la localización correcta del borde. Por esta cuestión y dependiendo de la aplicación, tiene que existir un equilibrio estudiado entre la reducción del ruido y la pérdida de información debido al suavizado de la imagen.

Para la reducción de ruido se utiliza la operación matemática de convolución. En el procesamiento de imagen, la convolución es un filtro de propósito general que produce un rango de diferentes efectos según sea el kernel aplicado. La acción del filtro consiste en determinar un nuevo valor para un píxel, añadiendo valores ponderados de todos sus píxeles vecinos. Las ponderaciones aplicadas están determinadas por una matriz 2D llamada kernel de convolución o máscara.

3. **Umbralizado:** localización de los bordes incrementando la relación señal ruido para descartar los posibles falsos bordes. Generalmente se utiliza la magnitud del gradiente para determinar, a través de un máximo fijado, que valor corresponde a un borde y cual no.

Uno de los algoritmos utilizados en esta etapa final es el de “supresión no máxima” que mejora el umbralizado. La idea básica es extraer los máximos locales de la magnitud del gradiente a lo largo de la dirección del vector de gradiente. Es decir, un píxel dado es un máximo local si la magnitud del gradiente en ese píxel es mayor que el gradiente de dos puntos vecinos situado a la misma distancia, a ambos lados del mismo, a lo largo de la dirección del gradiente.

Los filtros más utilizados para la detección de bordes en este tipo de imágenes son los filtros de Sobel y Canny, [43]. Estos filtros están basados en el método de los gradientes tal cual se explicó anteriormente. En nuestro caso, se trabaja la imagen como función de los cambios de intensidad en los niveles de gris de cada píxel en las direcciones horizontal y vertical, que es dónde se hallan los bordes de interés en nuestras imágenes (los segmentos de la retícula), mediante las aproximaciones de las derivadas dadas por las matrices de convolución.

Para el caso del filtro de Sobel, las matrices de convolución están dadas por:

$$H_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

y,

$$H_f = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$

La simpleza de este detector, que sólo trabaja en la primer etapa de “diferenciación”, fue suficiente para las imágenes estudiadas ya que luego de la reducción del efecto Vignetting, la imagen presenta una buena relación señal ruido.

En el caso de Canny [47], se realizan algunos pasos previos antes de llegar a la etapa de convolucionar con la aproximación a las derivadas. Se tienen que cumplir varios criterios, que para ser llevados a cabo, tienen que incluir las etapas de “suavizado” para disminución de ruido y “umbralizado” mediante supresión no máxima.

Los criterios definidos por Canny son los siguientes:

1. **Criterio de Detección:** el algoritmo tiene que detectar la máxima cantidad de bordes.
2. **Criterio de localización:** Se debe minimizar la distancia entre la posición real del borde localizado y la posición de la detección.
3. **Criterio de mínima respuesta:** un borde en la imagen real debe ser marcado una sola vez y si fuera posible, una imagen ruidosa no debe crear falsos bordes.

Para que se cumplan estos criterios, Canny utiliza el siguiente algoritmo:

1. Disminución del ruido. Utilizando un filtro Gaussiano,
2. obtención del gradiente,
3. supresión no máxima y,
4. encontrar los bordes a través de un umbral con histéresis,

Canny propone que se disminuya el ruido mediante un kernel gaussiano de tamaño $2k + 1 * 2k + 1$ (un filtro de 5×5 funciona bien para la mayoría de los casos):

$$H_{ij} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} * \exp\left(\frac{(i - k - 1)^2 + (j - k - 1)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4.23)$$

La desviación estándar σ es el único parámetro del filtro gaussiano y es proporcional al tamaño del área de los vecinos más cercanos en que opera este filtro. Los píxeles más lejanos del centro del operador tienen menor influencia y los píxeles más allá de tres valores de σ a partir del centro tienen una influencia insignificante, [48].

Este filtro tiene el inconveniente de que además de remover el ruido, empaña la imagen, ocasionando la pérdida de los detalles más finos (la pérdida de información nombrada) e introduce un borroneo no deseado sobre la imagen [49, p. 176], [50].

En esta modelización, de acuerdo a las imágenes capturadas con la interfaz, no es conveniente reducir de esta forma el ruido presente. El filtrado gaussiano de Canny termina produciendo pérdidas de información innecesarias en la Transformada Hough. Esto se ve traducido en un engrosamiento de las líneas detectadas, creando así bordes dispares para las líneas detectadas, generando una incertidumbre mayor en la medición. En la Fig. 4.8 se observa la morfología de la detección a modo comparativo. Como cada segmento está formado por varios píxeles y además, tienen perfiles gaussianos, los gradientes van a tener dos valores máximos por línea, uno para cada borde lateral del segmento, definiendo así dos bordes por línea detectada. La diferencia de grosor en la detección para los filtros de Sobel y Canny es claramente visible.

A pesar de que el filtro Sobel se desempeñó bastante bien para la detección de las líneas, obteniéndose mediante él, líneas de menor grosor, ya que sólo se enfoca en calcular los gradientes en las direcciones que son de interés, la horizontal y vertical, sin agregar ningún pre-procesamiento previo en el



Figura 4.8: Comparación entre Canny (segmentos superiores) y Sobel (segmentos inferiores). Se observan tres segmentos de la escala de la retícula detectados por estos filtros, siendo los detectados por Sobel los de mayor calidad posicional.

algoritmo, no puede ser utilizado como única herramienta de detección sub-píxel. Se tiene que continuar trabajando el algoritmo Hough para obtener la detección de la posición central de la línea a nivel sub-píxel.

4.3.3. Resultados sin ruido para el D_{H1} .

Dado que el filtro de Sobel es el que mejor se adecúa para este tipo de imágenes [43], se presentan a continuación los resultados obtenidos utilizando este detector de bordes como parte del pre-procesamiento.

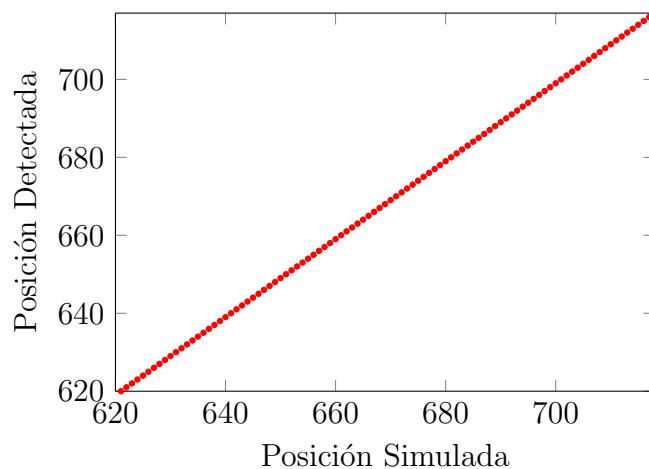


Figura 4.9: Detector Hough D_{H1} : Posición de la línea detectada vs. posición simulada cuando no hay ruido agregado a las imágenes de las líneas. $r_{xy} \approx 1$

Una vez que se tienen los bordes otorgados por Sobel en una imagen binaria, se pueden obtener las líneas rectas que representan estos bordes a través de la parametrización que utiliza la Transformada Hough. Se tendrán de esta manera, dos líneas rectas por segmento, y un valor central entre

ambas que determina la posición buscada. En la Fig. 4.9 se comparan las posiciones simuladas con las posiciones detectadas por este primer detector D_{H1} .

El valor calculado del coeficiente de Pearson r_{xy} fue igual a uno (teniendo en cuenta nuevamente el formato que utiliza la PC para la formación del número). Si el coeficiente es similar a 1 (rondando el sexto decimal), significa que los datos yacen en la misma línea de regresión, demostrando que la transformada Hough convencional detecta correctamente la posición de la línea simulada cuando hay un corrimiento de la línea a *nivel píxel*.

4.3.4. Resultados con ruido para el D_{H1} .

Mediante el análisis de la relación señal ruido de las imágenes capturadas con la cámara Basler, se obtuvo una relación señal ruido de $S/N = 18dB$ para el mejor caso. Este valor fue el obtenido en la primer etapa del algoritmo, presentado en Bergues et al., [44]. En base a este dato, se agregó ruido a la línea simulada en cada una de sus 100 posiciones. Este análisis arrojó resultados valiosos que permitieron observar el comportamiento de la transformada Hough bajo el ruido presente en las imágenes capturadas cuando existe un corrimiento a nivel píxel de la línea.

La detección bajo ruido y su comportamiento, utilizando el coeficiente de Pearson como medida, se puede observar en la Tabla 4.1.

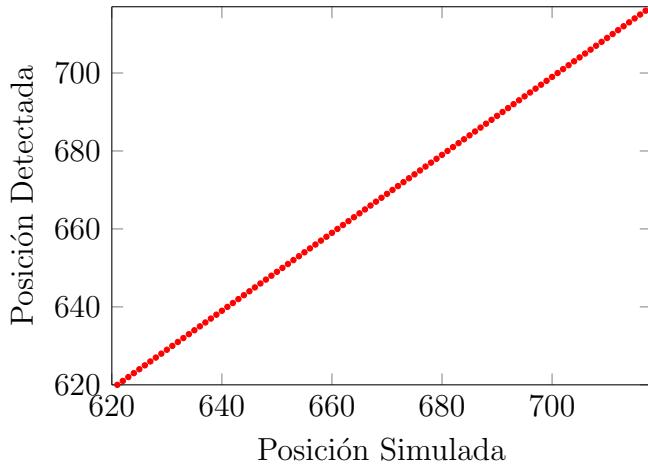


Figura 4.10: Detector Hough D_{H1} : Posición de la línea detectada vs. posición simulada. $r_{xy} \approx 1$, (con $S/N=18dB$)

El valor calculado de r para $S/N = 18dB$ fue similar a uno. Por lo que se puede concluir que para estos niveles de S/N la transformada Hough no se ve afectada y detecta la posición de la línea en el lugar correcto (Fig. 4.10).

Tabla 4.1: D_{H1} : Valores del coeficiente de Pearson para los diferentes niveles de ruido estudiados.

Relación S/N	r_{H1}
1 dB	0.18736
5 dB	0.47941
10 dB	0.95070
18 dB	0.99999

Es importante recalcar que para los valores de S/N por debajo de $15dB$ esta variante inicial de la transformada Hough deja de detectar la línea en la posición prevista. En las mediciones de calidad metrológica los valores de correlación deben ser superiores a $r = 0,95$.

4.3.5. Segunda etapa: corrimiento a nivel sub-píxel.

Los algoritmos que se aplican sobre la imagen capturada, de acuerdo al procedimiento definido por la transformada anterior, detectan a nivel sub-píxel con una resolución máxima de 0,5 píxeles. Por otro lado, no es útil para este desarrollo obtener la posición a nivel píxel de la línea, más aún, si el grosor de línea está formado por una cantidad par de píxeles, ya que la transformada elige alguno de los dos, según su peso, variando mucho de imagen a imagen y de medición a medición, introduciendo errores graves según la precisión de este instrumento.

En la primer etapa, ya explicada, el valor central de la línea se obtiene partiendo de los bordes de la misma, que surgen de la detección mediante el filtro de Sobel; situación esquematizada en la Fig. 4.11, donde se muestra la representación de la línea capturada de la Fig. 4.3a, con su respectiva detección central partiendo de los dos bordes escalón que surgen del filtro.

En esta nueva etapa se supera esta resolución inicial, de tal manera que la medición se puede discernir con una calidad superior.

4.3.6. Transformada Hough de niveles de gris sub-píxel (D_{H2}).

Para poder avanzar en la detección sub-píxel, superando los resultados iniciales (resolución 0,5 píxel), no alcanza con aplicar simplemente alguno de los métodos convencionales de detección que derivan de transformada Hough de niveles de gris o de la THC, ya que se volverían a obtener resultados similares.

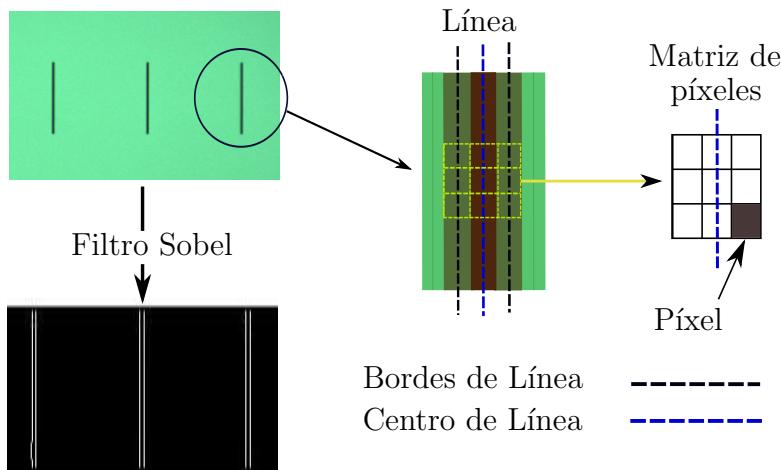


Figura 4.11: Valor sub-píxel de la posición de la línea detectada. Se toma el valor central del píxel de la grilla de píxeles del CCD partiendo de los bordes detectados por el filtro Sobel. Valor de resolución máximo: 0,5 píxeles.

Se presenta a continuación un nuevo método de detección nunca antes propuesto en la literatura de autocolimadores y nunca antes utilizado para este tipo de imágenes metrológicas, en las cuales las líneas poseen un perfil gaussiano como el nombrado en la introducción.

En la transformada usual, presentada por Duda and Hart et al. [29], la información contenida en los niveles de gris se pierde casi en su totalidad cuando se realiza el umbralizado para obtener la imagen binaria (cuando se utiliza el filtro de Sobel en nuestro caso).

Los pre-procesamientos, tanto de umbralizado como de detección de bordes, son necesarios en la transformada Hough convencional, pero pueden obviarse si se crea un nuevo espacio paramétrico que incluya desde un comienzo el valor dado por cada nivel de gris, [27]. Este espacio, denominado “Espacio de conteo de parámetros Hough en escala de grises” (ECPH-EG), permite detectar originalmente bandas lineales (de un sólo nivel de gris) en los diferentes niveles de intensidad de la imagen. Cada una de las bandas está definida como con un conjunto paralelo de líneas con igual orientación y nivel de gris, cuyas características principales a obtener son: el nivel de gris, la orientación, el número total de píxeles y su longitud. Esta aproximación muy útil para aplicaciones como robótica y procesos industriales no es adecuada para las mediciones metrológicas con autocolimadores, en las cuales la posición de una línea debe ser obtenida con precisión sub-píxel (no interesa la banda, sino la posición central de la misma). Por otro lado, las líneas analizadas están conformadas por varios niveles de gris a la misma vez, no son

bandas formadas por un único valor de gris, por lo cual, se debe implementar otro algoritmo.

4.3.7. Espacio de conteo de parámetros Hough en escala de grises.

Partiendo del espacio paramétrico convencional dado por la Ec. (4.11) y mediante un nuevo espacio de imagen dado por (x, y, G) , siendo G , el nivel de gris correspondiente a cada punto (x, y) de la imagen (píxel), se arma un espacio paramétrico ampliado dado por:

$$\rho(G) = x \cdot \cos(\theta(G)) + y \cdot \sin(\theta(G)), \quad (4.24)$$

Esta definición determina la creación de una nueva función de mapeo $f : (x, y, G) \rightarrow H(\rho, \theta, G)$, donde aparecerán acumuladores H_i correspondientes a cada nivel de gris.

En la THC se trabaja con un sólo acumulador H que incluye toda la información correspondiente a la cantidad de líneas de la imagen y por ende, se pierde toda la información que es descartada en la etapa de umbralizado. Ahora, con el nuevo espacio y el conjunto de acumuladores, se puede armar una función densidad que incluye cada detalle de los niveles de gris para luego encontrar el centro de la recta.

Una vez corrido el algoritmo, se tienen $2^{n^{\circ} bits}$ acumuladores, siendo n el número de bits de cuantización de la cámara. La suma, elemento a elemento, de estas matrices definen una matriz $4D$ ya que cada celda de la matriz es un elemento de conteo que está en función de (ρ, θ, G) . La matriz $4D$ se comporta como una densidad de fácil comprensión que puede ser analizada según sus puntos máximos para obtener una localización acertada de la posición de la línea en el espacio (x, y) .

Desde el punto de vista de una estructura geométrica, las líneas que componen las imágenes capturadas (y la simulada) están compuestas por varias líneas rectas paralelas conectadas, que poseen una orientación θ igual, tienen diferentes distancias ρ_i y como se expresó, diferentes niveles de gris (ver Fig. 4.3b). Luego que la transformada a niveles de gris es realizada, cada una de estas líneas es mapeada a un máximo local en su respectivo acumulador H_i . En la Fig. 4.12 se representa el Espacio de conteo de parámetros Hough en escala de grises y los máximos locales del acumulador H_n ; el color negro responde a la región de mayor probabilidad de encuentro de una recta para el tono de gris n . Estos valores máximos van formando los picos mostrados en la Fig 4.13 que luego son buscados para obtener el centro de la línea.

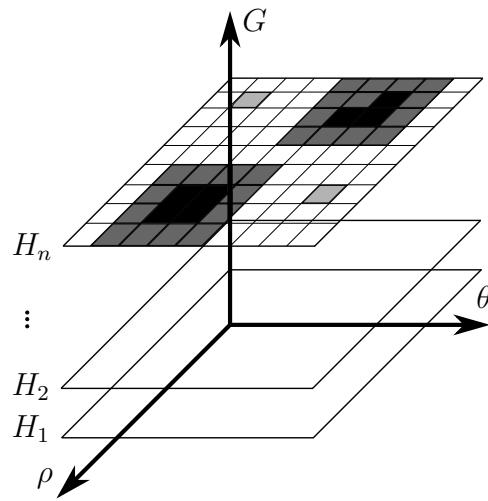


Figura 4.12: Espacio de conteo de parámetros Hough en escala de grises. Existe una secuencia de n matrices que forma la matriz $4D$. Cada celda de las matriz H_n corresponde a un elemento de conteo para el nivel de gris n .

4.3.7.1. Algoritmo Hough sub-píxel.

Para que el nuevo espacio paramétrico (y el conjunto de picos que presenta) sea útil a la hora de encontrar la posición sub-píxel de la línea se creó el siguiente algoritmo:

1. Inicializar cada acumulador $H_i(\rho, \theta, G)$ a 0,
2. Para cada píxel (x, y, G) y $\theta_j = 0^\circ \rightarrow 179^\circ$,
3. Calcular $\rho_j(G_i) = x_i \cdot \cos(\theta_j(G_i)) + y_i \cdot \sin(\theta_j(G_i))$,
4. Conteo y acumulación: $H_i(\rho_j, \theta_j, G_i) = H_i(\rho_j, \theta_j, G_i) + 1$,
5. Creación de matriz final $H_T = H_1 + \dots + H_n$ (ver Fig. 4.13),
6. Obtención del conjunto de puntos del plano paramétrico de mayor probabilidad,
7. Mapear al plano de imagen estos puntos y obtener el centro de la función densidad.

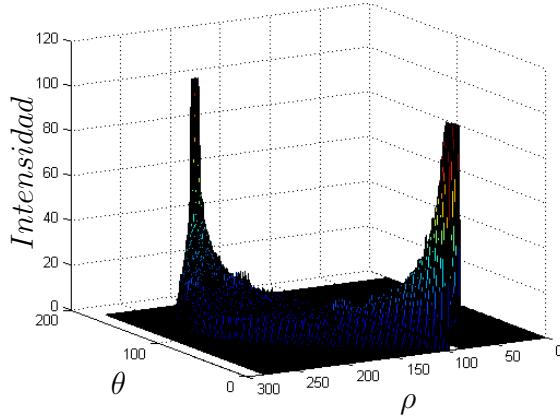


Figura 4.13: Función densidad del plano paramétrico final. Se obtiene de la suma $H_T = H_1 + \dots + H_n$. Los picos presentes en la función densidad corresponden a los centros de las líneas buscadas.

4.3.8. Resultados de simulación con y sin ruido para (D_{H2}).

En esta nueva versión de la transformada Hough se pudo mejorar el filtro Satvizky-Golay que se aplica a la imagen como pre-procesamiento para disminuir el efecto Vignetting, logrando mejorar la S/N hasta los $23dB$, [23]. Este valor tope se utiliza para crear las imágenes ruidosas. Por otro lado, el valor mínimo adoptado, tomando como base la imagen con menor S/N capturada, es de $13dB$. Entre estos valores se crea el conjunto de imágenes simuladas. Para cada nivel de ruido, se crearon 100 imágenes correspondientes a cada una de las posiciones sub-píxel simuladas de la línea. De tal manera que cada corrimiento centesimal posee su propia imagen de una línea. Con estas posiciones conocidas y las detectadas se armaron modelos lineales para determinar el grado de correlación entre los datos, como fue presentado en la Sección 4.2.

En la Tabla 4.2 se expresan los resultados del coeficiente de Pearson para los diferentes niveles de ruido. El valor *clear* corresponde a las 100 líneas creadas sin ruido agregado (que es la que más se acerca al valor unitario del coeficiente).

En las figuras 4.14 y 4.16, respectivamente, se muestra la relación entre las posiciones simuladas y las obtenidas mediante el detector Hough sub-píxel para los casos de las líneas simuladas con una S/N de $23dB$ y sin ruido (Clear). La Fig. 4.15 muestra los residuos en el caso de $S/N = 23dB$ cuyo valor de error cuadrático medio es de 0,06 píxeles. De las curvas anteriores

se obtienen los valores de los coeficientes de Pearson, por lo tanto, cada nivel de ruido tiene una curva similar a estas (no son mostradas en este apartado, quedan expresadas por su r).

Tabla 4.2: Detección Hough sub-píxel: Valores del coeficiente de Pearson para los diferentes niveles de ruido estudiados.

Relación S/N	r_H
13 dB	0,9494
14 dB	0,9512
15 dB	0,9518
16 dB	0,9579
17 dB	0,9645
18 dB	0,9669
19 dB	0,9748
20 dB	0,9804
21 dB	0,9811
22 dB	0,9821
23 dB	0,9846
Clear	0,9864

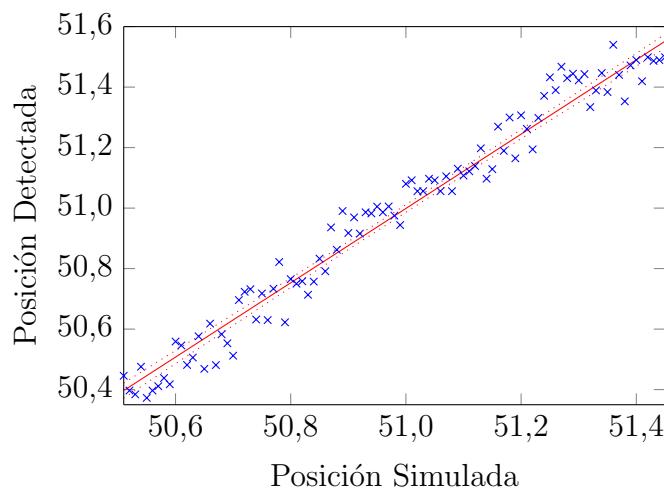


Figura 4.14: Detección Hough sub-píxel: Posición detectada vs. Posición simulada. $r = 0,9846$ ($S/N = 23dB$).

Analizando la Fig. 4.17 que es un resumen del estudio del detector (D_{H2}) se puede llegar a la conclusión que a medida que la S/N aumenta (el ruido disminuye) la detección es mejor. Existe un crecimiento bastante lineal, que

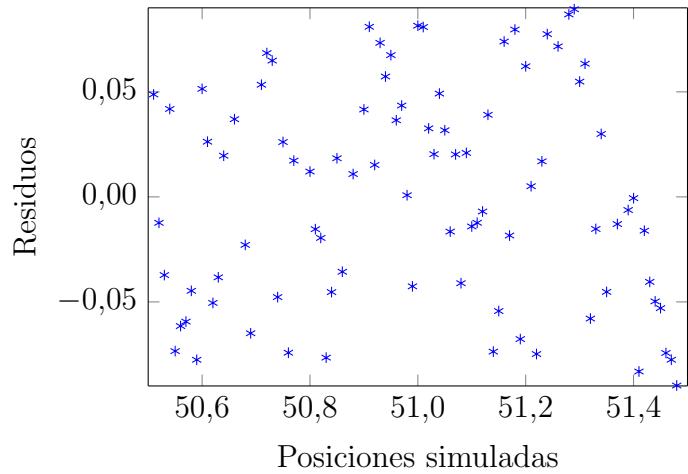


Figura 4.15: Detección Hough sub-píxel: Residuos vs. Posición simulada. $RMSE = 0,06$ píxeles ($S/N = 23dB$).

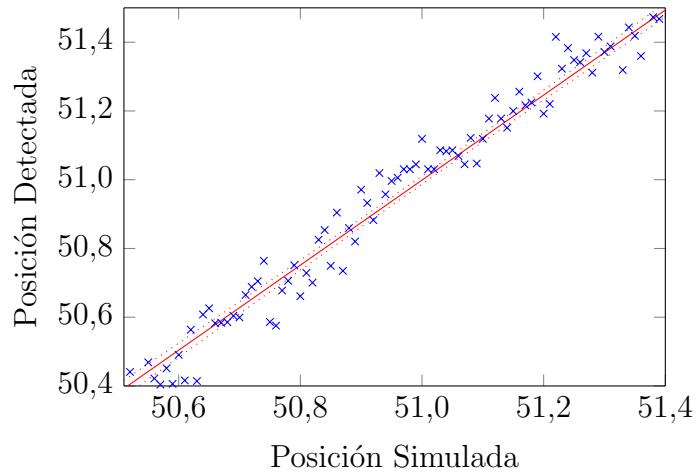


Figura 4.16: Detección Hough sub-píxel: Posición detectada vs. Posición simulada (sin ruido agregado), $r = 0,9864$.

a partir de los $20dB$, empieza a tener un tope y se mantiene en un meseta de leve pendiente positiva. Este comportamiento se debe a que la función densidad posee un tope de información a colectar acerca de las posiciones de las rectas.

El detector tiene un tope de funcionamiento que ronda el valor de r para la imagen sin ruido (0,9864). Esto no significa que el detector es defectuoso, ya que el grado de correlación a los niveles de ruido de trabajo son muy buenos ($r \simeq 0,98$) y no están muy alejados del valor óptimo ideal “clear”.

Más adelante se presentarán resultados sobre las imágenes capturadas que corroborarán estas premisas otorgadas por la simulación.

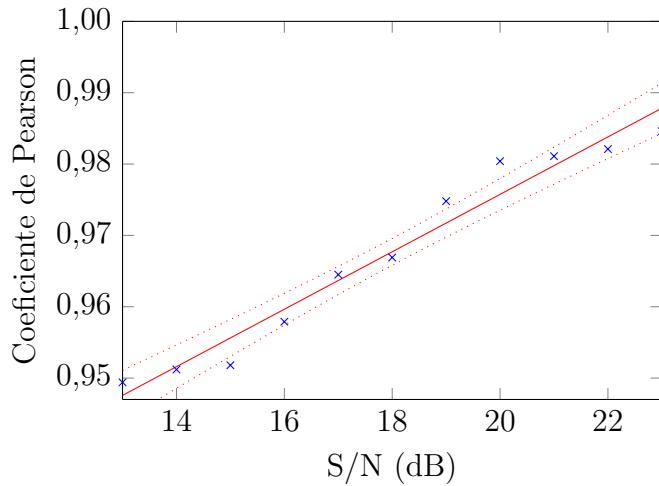


Figura 4.17: Detección Hough sub-píxel: r vs. S/N.

Otro dato importante que surge del análisis de las curvas es que el grado de dispersión de los datos, de acuerdo a la recta de regresión, es aceptable, y como se verá más adelante, permite definir que el detector Hough sub-píxel es uno de los dos detectores que más aumenta la resolución del nuevo instrumento cuando se lo utiliza como base para el programa de la interfaz visual. Por otro lado, las detecciones no arrojan nunca, bajo ningún tipo de cambio en las variables de la simulación, posiciones virtuales o posiciones fuera del rango del valor cuadrático medio del modelo lineal. Esta conclusión final resalta la robustez del algoritmo.

4.4. Detector Gaussiano (D_G)

4.4.1. Análisis Teórico.

Uno de los métodos usuales de detección es aquel que utiliza funciones continuas para ajustar las muestras obtenidas de la vecindad de un borde, ya que la curva ajustada posee más información del mismo. Luego, la posición del borde sub-píxel se encuentra como el punto de inflexión de esta función o como la derivada igual a cero de la curva continua ajustada [9, 51, 52].

El interrogante que se confronta es el siguiente ¿Para qué se necesitaría introducir una detección sub-píxel con funciones continuas si se trabaja con datos discretos? Se podría argumentar que la solución principal tiene raíces en otros problemas, tales como precisión del píxel cuadrado y la resolución de la cámara. El primer pensamiento que surge propone que aumentando la resolución de la cámara se podría detectar con mayor exactitud, ya que el algoritmo Hough sub-píxel podría posicionar mejor el cambio en los niveles de gris a través de una función de densidad con mayor información.

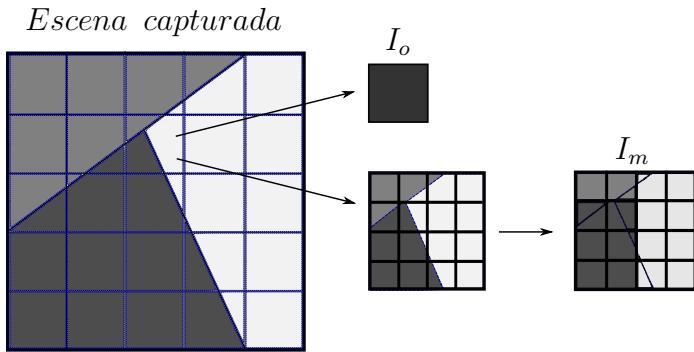


Figura 4.18: Esquema de una escena capturada con diferentes niveles de gris. Para una resolución original, se tiene una intensidad I_o que no distingue ninguno de los cambios de los niveles de gris del píxel analizado. Si se aumenta la resolución hasta cuatro veces (I_m), se mejora el problema, pero siguen existiendo regiones solapadas.

Si bien, la resolución de la cámara es importante, esta por sí sola no soluciona el problema de solapamiento de regiones. Además, el aumentar la resolución tiene un costo significativo. En la Fig. 4.18 se representa el problema del solapamiento de regiones para diferentes resoluciones de cámara y se puede observar claramente que el aumento de resolución espacial no soluciona por completo el problema. Por otro lado, como se va a detallar paso a paso, la utilización de una función continua que ajuste los datos discretos de la matriz de píxeles soluciona con una precisión mayor el problema de medir correctamente la posición de las líneas (vistas como regiones en nuestro caso particular).

Los métodos de ajuste requieren un modelo paramétrico de línea en su etapa inicial de detección. Usualmente, como se explica en Flesia et al. [25], se calcula una imagen de bordes gruesos con los métodos convencionales como los estudiados en la Sección 4.3.2.2. De esta manera se approxima al valor máximo de la línea, utilizando el espacio gradiente de la imagen (vista como una superficie) para luego realizar un muestreo dentro de esa vecindad, que finalmente permitirá crear, mediante un ajuste, la función continua a

trabajar. El modelo paramétrico inicial puede ser también, la *THC* ya vista en la Sección 4.3.2.

Para cada punto de borde grueso obtenido con el modelo paramétrico elegido, en la dirección dada por el gradiente, se realiza un corte en la superficie y se ajusta un modelo de línea que incluya los parámetros que representen la posición sub-píxel del borde, [53]. Esto significa que la línea puede ser modelada con una curva infinitamente diferenciable con un único máximo local ubicado en la posición central ideal de la misma. El estudio de los parámetros de la curva a utilizar permite crear el algoritmo de detección.

4.4.1.1. Modelo de Borde.

Los métodos de ajuste convencionales modelan bordes unidimensionales como un plateau al cual se accede mediante un escalón, una rampa o una curva suave como la función error *erf*, [51]. En la Fig. 4.19 se representan estos métodos generales.

Por ejemplo, la modelización del borde tipo escalón (ver Fig. 4.20), incluiría la caracterización de tres parámetros (que serían los que trabajarían el algoritmo): la intensidad del fondo h , el contraste de la amplitud del borde $k + h$ y la localización del mismo l . La representación de un borde como este estaría dada por la función escalón:

$$f(x) = \begin{cases} h, & x < l \\ h + k, & x \geq l \end{cases} \quad (4.25)$$

Esta definición, que se utilizó en una primera etapa, cuando se trabajó con los detectores de borde Sobel, Canny y la *THC*, no es lo suficientemente precisa para la formación de una curva continua que contenga la posición sub-píxel en sus parámetros morfológicos. Aún una concepción más compleja del borde, tal como lo plantea Hagara et al. mediante una función Erf no permite superar los problemas planteados en la detección, ya que no se está buscando el borde físico de un objeto que hace contraste con un fondo determinado y que en la matriz imagen está comprendido por un fuerte cambio de intensidades, sino que se debe determinar la posición de una línea que vista como superficie posee una función de intensidades regular con forma de campana o parábola.

En nuestro caso, las líneas que conforman la figura no forman un plateau. Si se hace un corte en la dirección de máximo gradiente del borde de línea no se obtiene un escalón, una rampa o una función Erf. En la Fig. 4.21 se describe el perfil que poseen las líneas y sus correspondientes modelos de detección a través del procedimiento por ajuste. Primero se busca un valor grueso del centro con la *THC* para luego ajustar una curva infinitamente

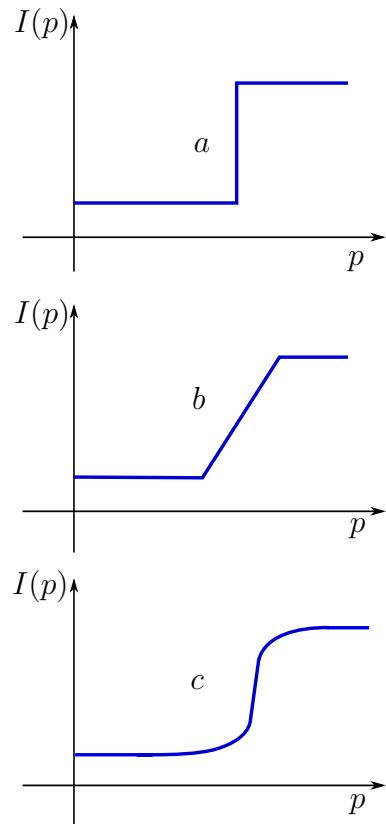


Figura 4.19: Intensidad de la imagen cambiando en forma (a) Escalón, (b) Rampa y (c) curva suave. Siendo p la posición vertical u horizontal en la matriz de píxeles e $I(p)$ la intensidad de acuerdo a la posición.

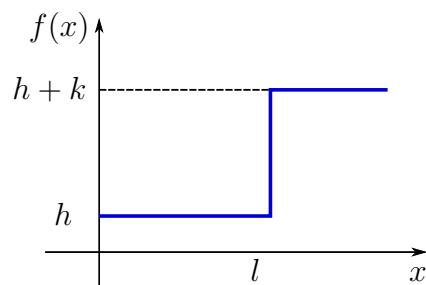


Figura 4.20: Modelo del borde tipo escalón.

diferenciable tipo parábola o campana. Claramente, ninguno de los modelos de borde de la Fig. 4.19 sirve para el tipo de líneas capturadas.

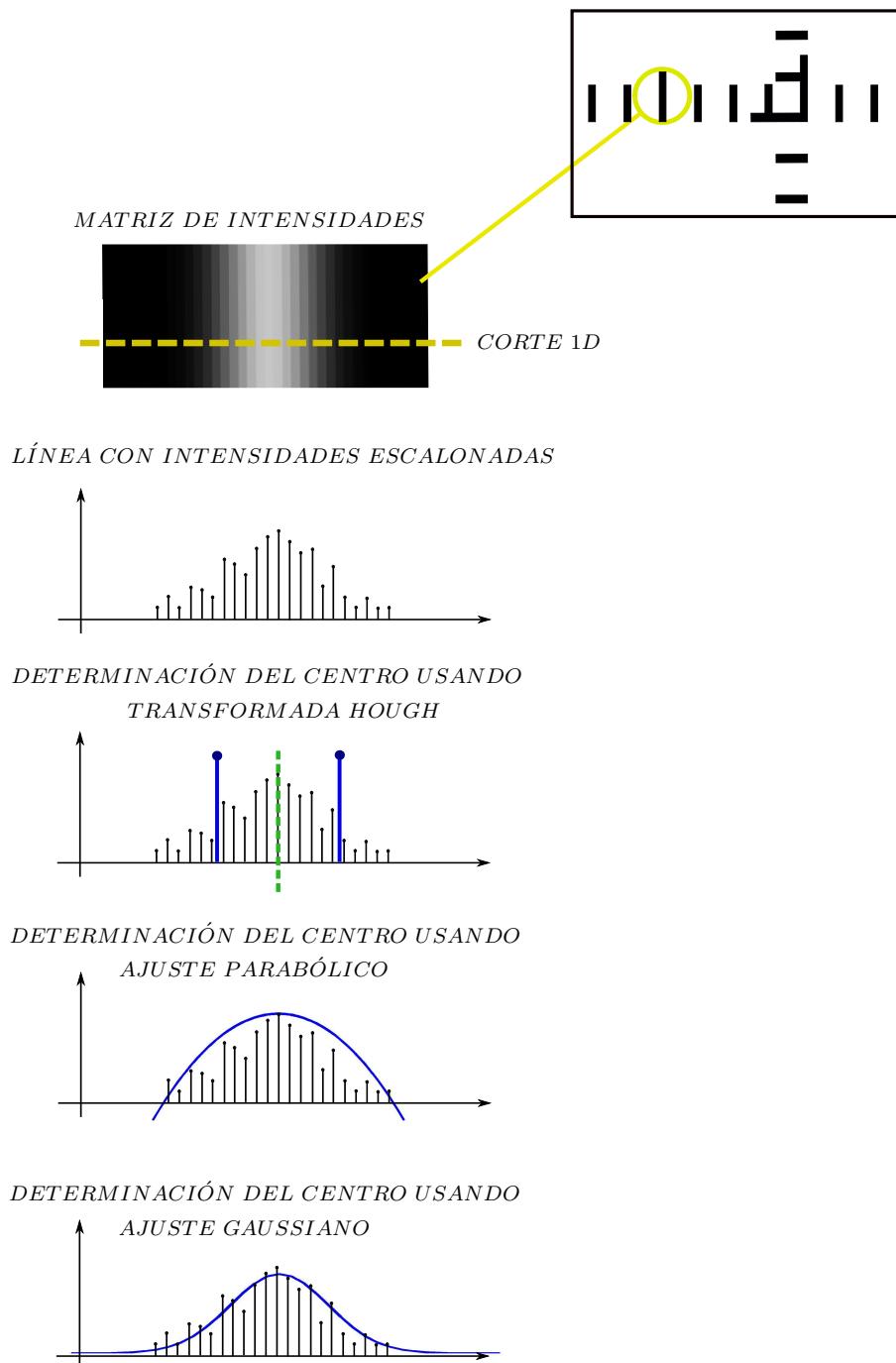


Figura 4.21: Diagrama de flujo que detalla la detección sub-píxel para líneas con perfil gaussiano. Se realiza una detección gruesa con THC y luego se ajustan los datos discretos con una función gaussiana o parabólica continua.

En la literatura [26], los polinomios de segundo orden de una sección de los datos de línea S están parametrizados por los coeficientes (A_1, A_2, A_3) y se escriben como:

$$S_P(x) = A_1 \cdot x^2 + A_2 \cdot x + A_3 \quad x \in L, \quad (4.26)$$

Siendo L la vecindad muestreada para luego obtener la función continua en base a la variable x .

Los polinomios de segundo grado se utilizan para el ajuste cuando se tienen algunas muestras disponibles en la vecindad del borde grueso, [54]. El modelo Facet considera el ajuste de polinomios de segundo grado alrededor del máximo valor de luminancia en el corte ortogonal a la línea, estimando el centro de ésta a nivel sub-píxel con una función de dos parámetros del modelo, [55]. En nuestro caso, los polinomios de segundo orden son muy sensibles al tamaño de la vecindad, así como a la simetría de la zona delimitada por la vecindad del centro de la línea a nivel píxel. Este problema se distingue en la Fig. 4.22 que muestra una curva discreta de la línea detectada, definida en una vecindad de 44 píxeles alrededor de su centro y a través de un ajuste mediante funciones cuadráticas y una gaussiana. Para el ajuste de segundo grado, se observa que para la vecindad centrada y pequeña se obtiene una buena estimación de la posición sub-píxel, pero para la vecindad asimétrica, proporciona una estimación sesgada de la posición. Por otra parte, el ajuste gaussiano demostró ser insensible al tamaño y la simetría de la vecindad.

La función Gaussiana unidimensional, como se expresó, no padece de los problemas de definición del entorno alrededor de la moda que tienen los polinomios de segundo grado. La curva:

$$S_G(x) = a * \exp(-((x - b)/c)^2) \quad x \in L, \quad (4.27)$$

con tres parámetros: a y c que moderan el alto y ancho de la campana, y el centroide b , que define el centro de la misma, ha sido utilizada como modelo de línea en varios trabajos previos para autocolimadores digitales [15, 16, 19]. Esta curva también se utiliza en otras áreas de investigación. Por ejemplo, la línea a detectar a nivel sub-píxel es el contorno de un objeto regular, un espécimen de metal calentado [9], o el contorno de la cavidad de encastre de un giróscopo laser, [52]. En dichos trabajos el ajuste gaussiano fue realizado sobre cortes unidimensionales localmente ortogonales a la curva contorno, usando la dirección del gradiente de la imagen en la posición de un borde “grueso”, calculado previamente mediante un método estándar de detección de bordes tal cual se explicó en el desarrollo aquí mencionado.

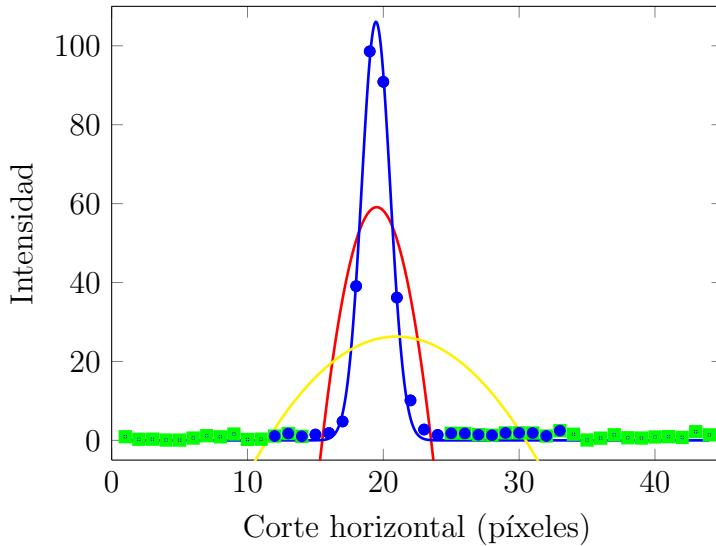


Figura 4.22: Aproximaciones con polinomios de segundo orden a la sección transversal de la línea. En rojo, la aproximación se realiza sobre un entorno simétrico alrededor de la moda (valores no utilizados en verde). En amarillo, aproximación hecha sobre un entorno sesgado (puntos utilizados en azul). El ajuste gaussiano esta dibujado en azul, hecho con todos los datos.

4.4.2. Resultados de simulación con y sin ruido del D_G .

Se armó un algoritmo de detección de acuerdo a la Ec. (4.27) siguiendo el procedimiento de la Fig. 4.21. En primer lugar se obtiene la posición de la línea a nivel píxel con la *THC*, como determina el algoritmo presentado en la Sección 4.3.2, para luego obtener una función continua gaussiana, ajustando los datos obtenidos utilizando una vecindad determinada.

De la misma forma en que se procedió con el detector Hough sub-píxel, se hizo con el D_G . Con el conjunto de imágenes simuladas, se estudió el comportamiento de detección de este nuevo algoritmo. En la Tabla 4.3 se expresan los resultados del coeficiente de Pearson para los diferentes niveles de ruido aplicados. El valor *clear* corresponde a las líneas creadas sin ruido agregado (que es la que más se acerca al valor unitario del coeficiente).

También, al igual que el detector Hough, se crearon los modelos lineales para cada uno de los niveles de ruido. Las figuras 4.23 y 4.25 manifiestan los modelos más importantes (caso $S/N = 23dB$ y sin ruido). A simple vista se pueden ver reflejadas las excelentes capacidades del nuevo algoritmo. La dispersión de los datos para el caso ideal es casi inexistente, mientras que para el punto de trabajo ($23dB$), la dispersión es extremadamente pequeña. Esto se puede ver más claramente a través de las figuras de los residuos

Tabla 4.3: Detección Gaussiana: Valores del coeficiente de Pearson para los diferentes niveles de ruido estudiados.

Relación S/N	r_G
13 dB	0,9803
14 dB	0,9877
15 dB	0,9899
16 dB	0,9922
17 dB	0,9948
18 dB	0,9955
19 dB	0,9963
20 dB	0,9972
21 dB	0,9973
22 dB	0,9980
23 dB	0,9982
Clear	0,9999

4.24 y 4.26. La manifestación de estos resultados se resalta en el incremento notable de la resolución cuando se utiliza este algoritmo sobre las imágenes capturadas.

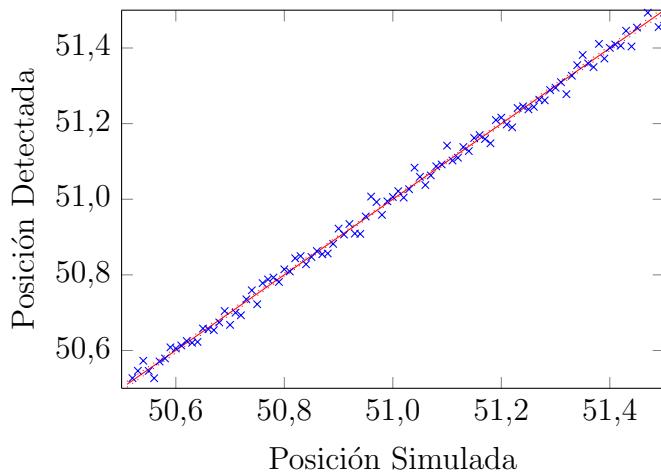


Figura 4.23: Detección Gaussiana: Posición detectada vs. Posición simulada, $r = 0,9982$ ($S/N = 23dB$).

En la Fig. 4.27 se puede ver un resumen del comportamiento del D_G a medida que aumenta la relación S/N . Se presenta un crecimiento asintótico al valor ideal $r = 1$ a medida que disminuye el ruido. De esta forma, si se logra en un futuro mejorar la calidad de las imágenes, la detección de la posición se acercará más a este valor ideal.

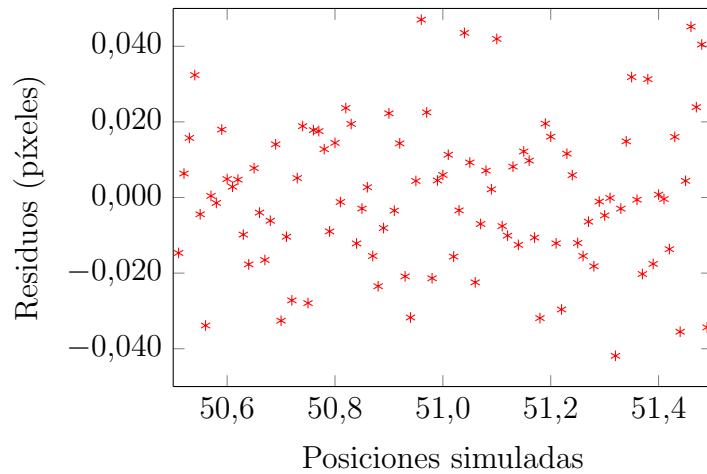


Figura 4.24: Detección Gaussiana: Residuos de la Fig. 4.23. $RMSE = 0,019$ píxeles.

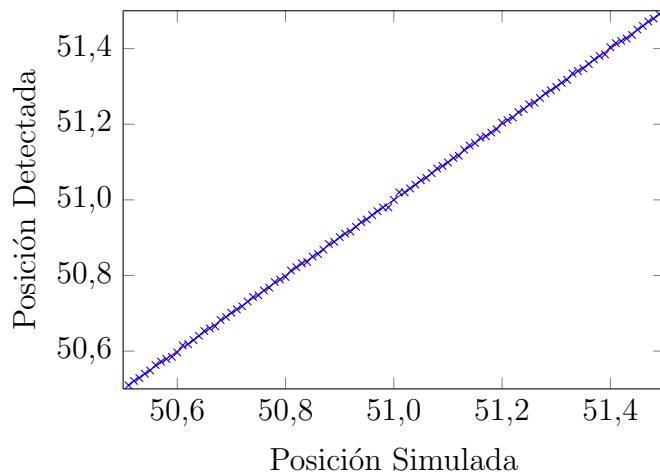


Figura 4.25: Detección Gaussiana: Posición detectada vs. Posición simulada (sin ruido agregado). $r = 0,9999$

Los valores de correlación para este tipo de detector son extremadamente valiosos para una medición de calidad metrológica y remarcan el grado de utilidad de las funciones gaussianas cuando se trabajan este tipo de retículas en donde las líneas que la conforman poseen un perfil como el nombrado.

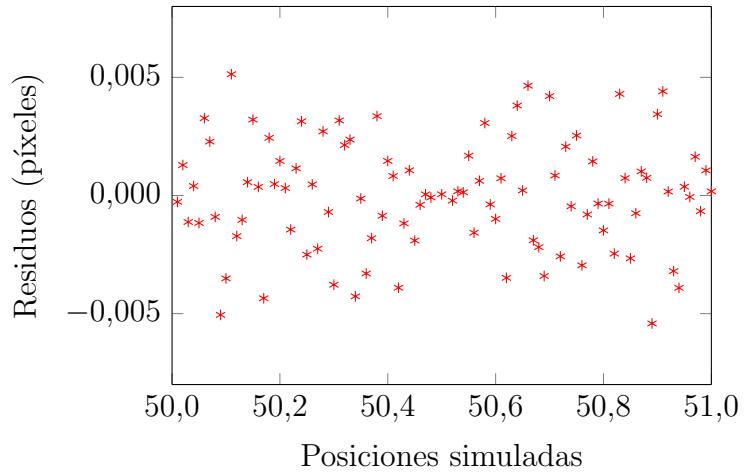


Figura 4.26: Detección Gaussiana: Residuos de la Fig. 4.25. $RMSE = 0,002$ píxeles.

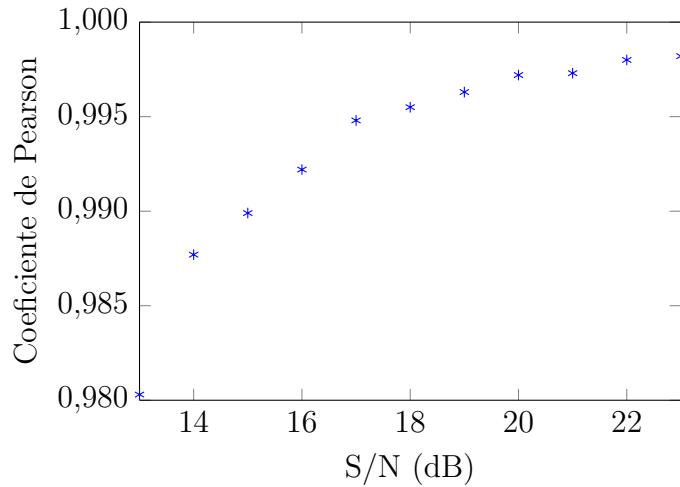


Figura 4.27: Detección Gaussiana: r vs. S/N .

4.5. Detector Probabilístico (D_P)

De acuerdo al perfil muestreado de la línea (ver Fig. 4.28), que tiene forma Gaussiana como ya se expresó, se puede crear otro detector de acuerdo a la media probabilística ponderada.

Siendo cada valor del perfil una muestra x y su amplitud, la ponderación (distribución de probabilidad) $P_{(x)}$, se puede expresar lo siguiente:

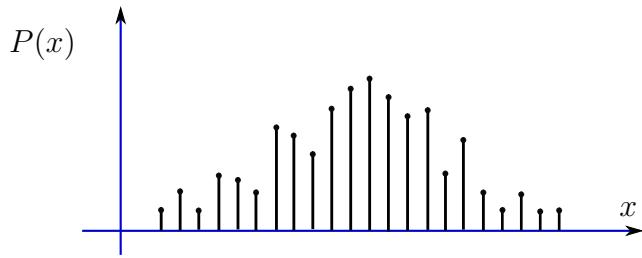


Figura 4.28: Variable x muestreada (píxeles en una dirección determinada del corte de la línea) con sus respectivas probabilidades asociadas.

$$1 = \int P_{(x)} \cdot dx, \quad (4.28)$$

Donde el valor medio ponderado de la variable x según la distribución (4.28) se define como:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot P_{(x)} \cdot dx, \quad (4.29)$$

Aplicando estos conceptos a la variable discreta, siendo cada corte ortogonal de la línea un vector cv y N la cantidad de puntos por corte (longitud del vector), se puede escribir:

$$\langle x \rangle = \sum_{i=1}^N x_i \cdot P_{(x_i)}, \quad (4.30)$$

$$x = (1, \dots, N)', \quad (4.31)$$

$$P = (P_{(x_1)}, \dots, P_{(x_N)})', \quad (4.32)$$

Con cada valor de P_{x_i} dado por:

$$P_{x_i} = \frac{cv}{\sum_{i=1}^N cv_i}, \quad (4.33)$$

Este detector se puede diseñar en un programa siguiendo las ecuaciones mostradas previamente.

4.5.1. Resultados de simulación con y sin ruido para el detector (D_P).

Este detector está muy influenciado por el nivel de ruido agregado, pero tiene algunas cualidades que pueden ser útiles en trabajos futuros. En la Tabla 4.4 se detallan los valores del coeficiente de Pearson para los diferentes niveles de ruido simulados.

Tabla 4.4: Detección probabilística: Valores del coeficiente de Pearson para los diferentes niveles de ruido estudiados.

Relación S/N	r_P
13 dB	0,4627
14 dB	0,5733
15 dB	0,6778
16 dB	0,6801
17 dB	0,7316
18 dB	0,7551
19 dB	0,8062
20 dB	0,8344
21 dB	0,8546
22 dB	0,8674
23 dB	0,9020
Clear	0,9998

En las figuras 4.29 y 4.30 se muestra la relación entre las posiciones simuladas y las obtenidas mediante el detector Probabilístico para los casos de $S/N = 23dB$ y sin ruido. La dispersión en la detección cuando existe ruido es extremadamente alta y lo torna inexacto para una medición de calidad metrológica. Sin embargo, cerca de los valores ideales, la detección tiene un comportamiento similar al detector Gaussiano.

La gráfica de la Fig. 4.31, que resume el comportamiento de este detector, demarca claramente como este logra funcionar mejor a medida que el ruido va disminuyendo (la S/N aumentando). Debido a las características que se presentaron con este detector, se puede decir, sin lugar a dudas, que no es una buena opción para este tipo de imágenes si el ruido presente no permite que el coeficiente de Pearson se acerque al valor ideal $r = 1$.

Los valores de r ante S/N bajas demuestran que la diferencia entre las posiciones detectadas y las posiciones simuladas es muy grande. Además, el grado de correlación máximo, bajo ruido, no supera el valor mínimo esperado de coeficiente de Pearson ($r = 0,95$), cuestión que lo descarta completamente por el momento.

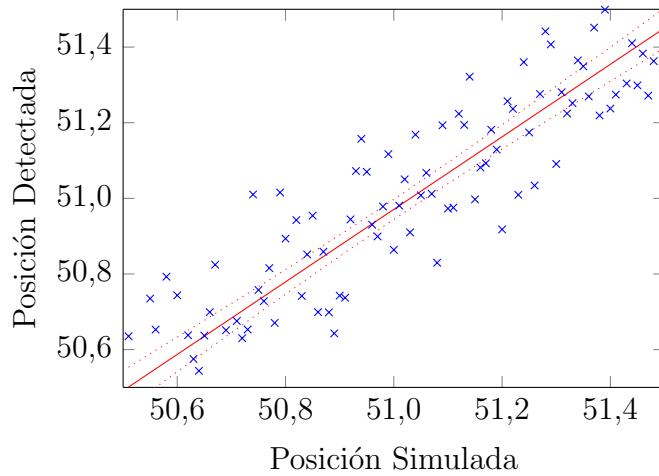


Figura 4.29: Detección Probabilística: Posición detectada vs. Posición simulada. $r = 0,9020$ ($S/N = 23dB$).

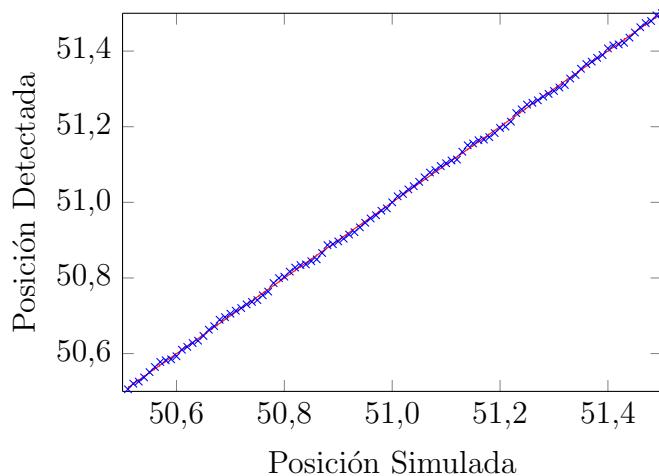
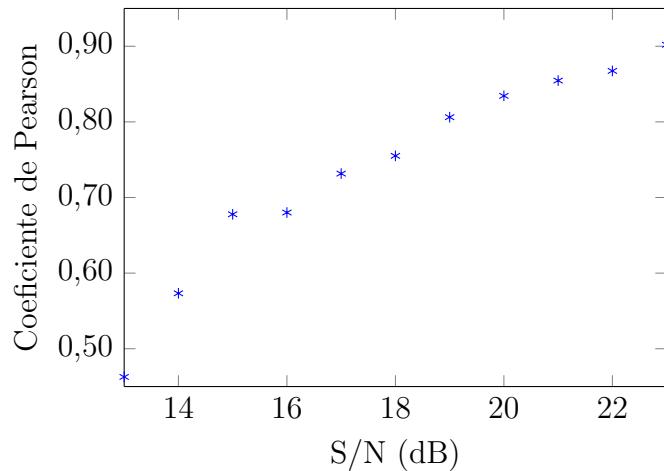


Figura 4.30: Detección Probabilística: Posición detectada vs. Posición simulada (sin ruido agregado), $r = 0,9998$.

Queda abierta la posibilidad de estudiar como mejorar la calidad de la imagen para que este detector pueda ser útil. Si bien la S/N alcanzada de $23dB$ es excelente, esto no indica que, en investigaciones posteriores, se pueda aumentar aún más. La tendencia mostrada en la Fig. 4.31, similar a la de la Fig. 4.27, indica que cerca de los $30dB$ este detector funcionaría correctamente e incluso podría superar a alguno de los otros detectores planteados.

Figura 4.31: Detección Probabilística: r vs. S/N.

4.6. Detector por Mínimos Cuadrados pesados (D_{WLS})

Este detector afronta la detección de la línea de una manera totalmente diferente hasta los ahora presentados. Se aprovecha las características constructivas que tiene la cruz de medición y fue pensado para la detección de la misma.

Utilizando la matriz de intensidades de la imagen, se arman 3 vectores que determinarán una recta de regresión $y = a \cdot x + b$ que pasa por el centro de la línea buscada (ver Fig. 4.32). Se arma una regresión lineal de dos dimensiones con el sector de la imagen por el cual pasa la recta. Como cuando se trabaja con la cruz, sólo se tienen dos líneas, este procedimiento se puede realizar sin problemas de solapamiento. En primer lugar, de la misma manera que con el detector Gaussiano, se busca el sector de la imagen donde está ubicada la línea con la THC . Esta detección gruesa permite tomar una vecindad $2D$ que rodea al valor obtenido para luego aplicar el nuevo método.

Debido a que se realiza una calibración inicial, la explicada en la Sección 3.3.4, que se realiza para que las líneas a detectar estén alineadas a la matriz, el parámetro b de la recta de regresión puede utilizarse para definir el centro de cada una de las líneas a posicionar en la matriz imagen.

Se plantea el método de mínimos cuadrados pesados. Se desea minimizar la suma s de los cuadrados de los residuos dada por:

$$s = \sum_{i=1}^N W_i \cdot (y_i - (a \cdot x_i + b))^2, \quad (4.34)$$

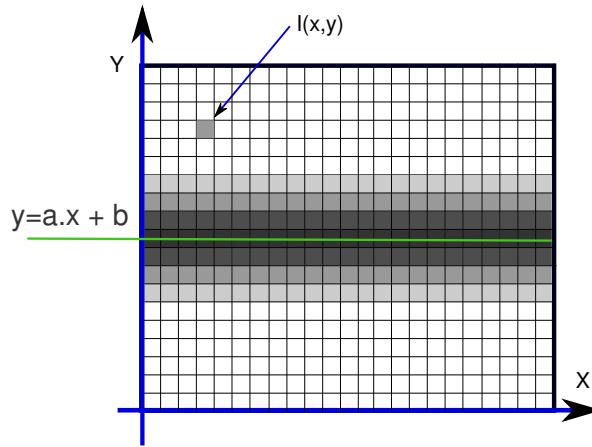


Figura 4.32: Recta de regresión $y = a \cdot x + b$ que pasa por el centro de la línea formada por diferentes valores de gris de una sección de la matriz. Cada píxel tiene un valor de intensidad $I(x, y)$ en función de las coordenadas espaciales (x, y) que sirve como peso para calcular la línea.

Donde cada Peso W_i está dado por:

$$W_i = \frac{I(x, y)}{\sum_{i=1}^N I(x, y)}, \quad (4.35)$$

El resultado de la minimización nos entrega los valores de los parámetros de la recta de regresión a y b . Manteniendo los extremos de la suma entre $i = 1$ y N se obtiene:

$$a = \frac{(\sum W_i \cdot x_i \cdot y_i \cdot \sum W_i) - (\sum W_i \cdot y_i \cdot \sum W_i \cdot x_i)}{(\sum W_i \cdot x_i^2 \cdot \sum W_i) - (\sum W_i \cdot x_i)^2}, \quad (4.36)$$

$$b = \frac{(\sum W_i \cdot x_i^2 \cdot \sum W_i \cdot y_i) - (\sum W_i \cdot x_i \cdot \sum W_i \cdot x_i \cdot y_i)}{(\sum W_i \cdot x_i^2 \cdot \sum W_i) - (\sum W_i \cdot x_i)^2}, \quad (4.37)$$

La clave para obtener estos coeficientes yace en armar bien los dos vectores x e y . Como se está haciendo una regresión con una matriz bidimensional se tienen que declarar los vectores posicionales x unidimensionales de la siguiente manera: asumiendo, a modo de ejemplo, que el corte de la imagen a estudiar es de 5×5 (en la práctica es de 100×100), se escribe el vector posición como una secuencia repetitiva: $x = 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, \dots, 5, 5, 5, 5, 5$. Como interesa la posición de la línea es necesario trabajar con esta información.

Luego, el vector y se arma con los valores de intensidad puestos en un vector, consecutivamente, al igual que x y siguiendo el orden correcto, para que sea unidimensional y correlacionado a las posiciones definidas. Si la matriz de intensidades de 5×5 tiene la siguiente forma:

$$M = \begin{vmatrix} 1,00 & 1,1 & 1,2 & 1 & 1,05 \\ 2,02 & 2,1 & 2,12 & 2 & 2,02 \\ 3 & 3,1 & 3,2 & 3 & 3,05 \\ 2 & 2,07 & 2,2 & 2 & 2,05 \\ 1,04 & 1,1 & 1,1 & 1,01 & 1,01 \end{vmatrix} \quad (4.38)$$

el vector de datos y se escribe como la secuencia de las columnas de M de esta forma $y = c'_1, \dots, c'_5$, de tal manera que todos los pesos sean tenidos en cuenta para la formación de la recta. En el caso ideal, sin ruido en la imagen, todas estas columnas serían iguales.

Una de las ventajas de este método, es la posibilidad de armar un software que detecte la inclinación de la recta rápidamente. Esto permite realizar las calibraciones de la primera etapa con exactitud y rapidez ya que se corre el programa con matrices y vectores.

4.6.1. Resultados de simulación con y sin ruido para el detector (D_{WLS}).

Este detector no está tan influenciado por el nivel de ruido agregado como el detector probabilístico, aunque, por otro lado, no supera, en las detecciones de interés (sin ruido y con $S/N = 23dB$) al detector gaussiano.

En la Tabla 4.5 se pueden leer los valores obtenidos de r para los diferentes niveles de S/N . Los valores presentados son similares a la detección Hough, aunque la dispersión de los datos es un poco mayor y esto se ve reflejado en el análisis final de resolución de la Sección 7.1.

En las figuras 4.33 y 4.34 se muestra la relación entre las posiciones simuladas y las detectadas para los casos de $S/N = 23dB$ y sin ruido.

La Fig. 4.35 representa el resumen del estudio de este detector. Los valores obtenidos son prometedores y pueden ser tenidos en cuenta debido a la rapidez en el procesamiento y a la claridad de la programación que otorga el trabajar con vectores. Aunque la calidad de la detección depende mucho de las características de los datos trabajados. Como la imagen está formada por líneas de perfil gaussiano, este detector puede encontrar el centro de la gaussiana $3D$ que se forma con los valores de intensidad a través de toda

Tabla 4.5: Detección por Mínimos Cuadrados pesados: Valores del coeficiente de Pearson para los diferentes niveles de ruido estudiados.

Relación S/N	r_{WLS}
13 dB	0,8123
14 dB	0,8376
15 dB	0,8442
16 dB	0,8924
17 dB	0,9363
18 dB	0,9382
19 dB	0,9470
20 dB	0,9540
21 dB	0,9574
22 dB	0,9765
23 dB	0,9818
Clear	0,9998

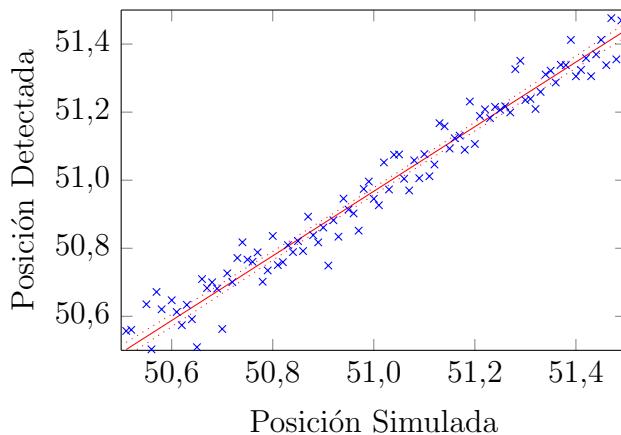


Figura 4.33: Detección por Mínimos cuadrados pesados: Posición detectada vs. Posición simulada, $r = 0,9818$ ($S/N = 23dB$).

la matriz, siempre y cuando esta no tenga datos picos que no se correspondan a la línea en su recorrido. Si los datos por algún problema de ruido poseen valores más pesados en una región que otra, la recta de regresión sufrirá corrimientos grandes con respecto a la posición real. Para solucionar este problema se tiene que recorrer la región de la imagen bajo estudio, la matriz $2D$ obtenida, buscando todo valor superior a un umbral calculado de la matriz. Con este umbral como medida se pueden reemplazar los píxeles erróneos para que el detector no produzca falsas rectas de regresión.

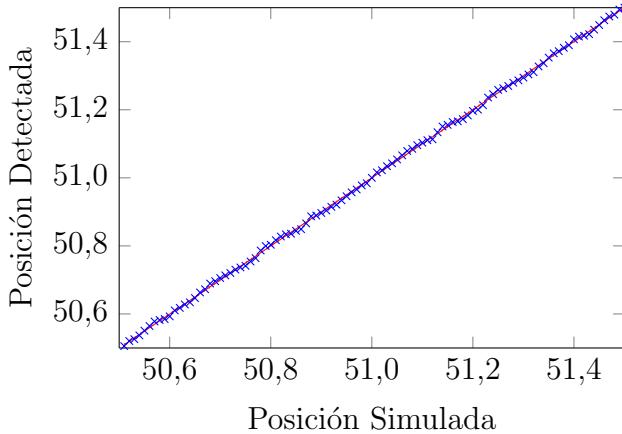


Figura 4.34: Detección por Mínimos cuadrados pesados: Posición detectada vs. Posición simulada (sin ruido agregado), $r = 0,9998$.

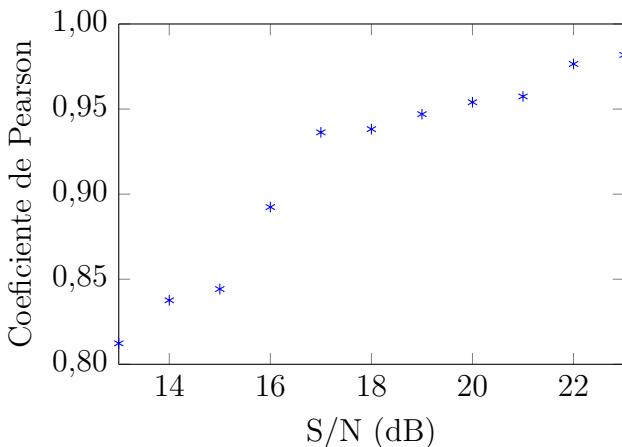


Figura 4.35: Detección por mínimos cuadrados pesados: r vs. S/N.

4.7. Detector valor Máximo (D_M)

En una aproximación inicial se introdujo un análisis del gradiente en las direcciones de interés. Utilizando las Ec. 4.39 y 4.40 para calcular el módulo y la dirección del gradiente se puede definir un máximo que corresponde al borde de la línea:

$$\nabla G = \sqrt{\mathbf{g}_x^2 + \mathbf{g}_y^2}, \quad (4.39)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{\mathbf{g}_y}{\mathbf{g}_x} \right), \quad (4.40)$$

Esta propuesta, que corresponde a los filtros explicados en la sección 4.3.2.2, no soluciona la posición central con precisión como ya se analizó anteriormente. Además, el máximo buscado con estas ecuaciones posee dos valores, ya que el gradiente entrega una recta definida por los dos bordes de la línea gruesa. Por esta razón, para encontrar la derivada de la función en su punto de máximo crecimiento se debe crear un software que busque el máximo de los cortes verticales mostrados en la Fig. 4.28 para toda la secuencia de cortes de una línea para así darle más precisión al detector. Este método se puede aplicar mediante el siguiente algoritmo:

1. Dada una imagen de resolución espacial (m, n) ,
2. Generar n muestreos (secciones transversales a la línea) cv_i ,
3. Obtener los valores máximos de las funciones de corte,
4. Crear vector con los máximos obtenidos M_{cv_i} ,
5. Detección de centro $c_i = (\sum_{i=1}^N M_{cv_i})/N$.

Este algoritmo tiene que tener la alineación previa de los píxeles con respecto a las líneas de la imagen para que el valor del centro se entregue directamente. Esta es una desventaja ya que ante inclinaciones menores, los cálculos del centro sufren desviaciones que tienen que ser calculadas con la posición de cada uno de los centros por separado, de tal manera que se pueda calcular la inclinación con respecto a la matriz de posición.

4.7.1. Resultados de simulación con y sin ruido para el detector (D_M).

Este detector está extremadamente influenciado por el nivel de ruido agregado. En la Tabla 4.6 se puede comprobar lo expresado. La gráfica de la Fig. 4.37 demarca claramente como el detector logra funcionar mejor a medida que el ruido va disminuyendo (la S/N aumentando), sin embargo, no es tan eficiente como los otros ya estudiados. Por otro lado, a pesar de que funciona mejor bajo ruido en comparación con el Detector probabilístico, cuando la

imagen no posee ruido agregado no detecta la posición de la misma. Si la imagen no tiene variación en los píxeles vecinos de la columna siguiente, el detector ubica siempre en el mismo lugar la línea a pesar de que esta tenga un corrimiento sub-píxel. Esto se produce debido a que cada sección de línea cv_i no difiere del siguiente cv_{i+1} a nivel sub-píxel ante el detector sino que parece hacerlo a nivel píxel. Todas estas conclusiones, no hacen más que ratificar, una vez más, que no es correcto trabajar con los máximos del muestreo o con los bordes como si fueran un escalón.

Tabla 4.6: Detección valor Máximo: Valores del coeficiente de Pearson para los diferentes niveles de ruido estudiados.

Relación S/N	r_M
13 dB	0,8761
14 dB	0,8950
15 dB	0,8954
16 dB	0,9163
17 dB	0,9344
18 dB	0,9395
19 dB	0,9344
20 dB	0,9372
21 dB	0,9442
22 dB	0,9487
23 dB	0,9616
Clear	0

En la Fig. 4.36 se muestra la relación entre las posiciones simuladas y las obtenidas mediante el detector de valor máximo para el caso de las líneas simuladas con una $S/N = 23dB$. La dispersión de los datos es bastante grande y aunque el coeficiente de Pearson está por encima del $r = 0,95$, los datos tienen una desviación cuadrática media alta que termina por no aumentar mucho la resolución de la interfaz cuando se utiliza este detector.

La Fig. 4.37 es el resumen de este análisis. El detector tiene un comportamiento bastante errático a medida que se analizan los diferentes niveles de ruido; no se puede apreciar una tendencia funcional como con los detectores anteriores.

Si bien no puede ser utilizado para la medición en sí misma, el detector es muy rápido para entregar una posición del centro de la cruz y por lo tanto puede reemplazar a la THC como detector primario, antes del ajuste con funciones cuadráticas.

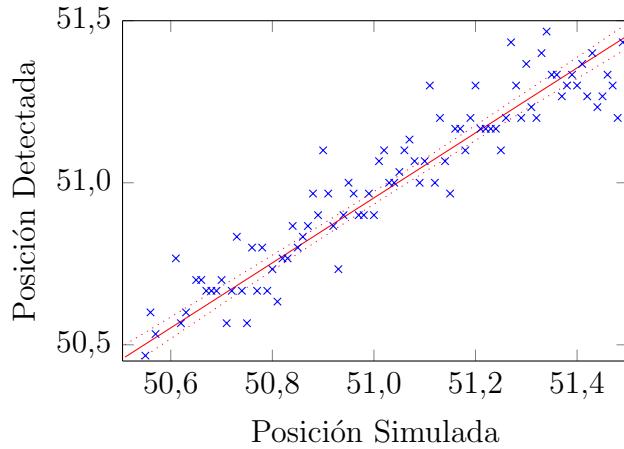


Figura 4.36: Detección de valor máximo: Posición detectada vs. Posición simulada, $r = 0,9616$ ($S/N = 23dB$).

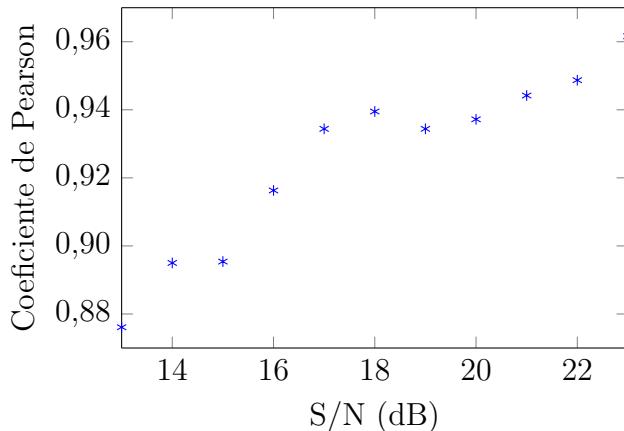


Figura 4.37: Detección valor máximo: r vs. S/N .

4.8. Elección del detector

Se presentó una simulación que comprende el análisis de cinco detectores principales. Cada uno de los detectores fue estudiado partiendo del reconocimiento y posicionamiento de un conjunto de líneas simuladas de acuerdo a las características de los segmentos presentes en las imágenes capturadas de la retícula de medición de un Autocolimador Nikon 6B.

Los detectores fueron expuestos, para asegurar su desempeño en la medición con la interfaz, a los mismos niveles de S/N de las imágenes capturadas. Estas imágenes poseen una relación señal ruido S/N de $13dB$ cuando son capturadas (en el peor de los casos estudiados) y luego de aplicar el filtro

Satvizky-Golay (ver Sección 6.2.1), se llega a una $S/N = 23dB$ final. Para cada nivel de ruido entre estos valores de S/N se crearon 100 imágenes de una línea recta, separadas una de otra a nivel sub-píxel con un paso 1/100. Teniendo en cuenta el valor sub-píxel de los centroides detectados c' con cada uno de los detectores como una función lineal de los centroides simulados c , se utiliza el coeficiente de Pearson r para medir la calidad de la detección.

El detector probabilístico (r_P) y el detector de valor máximo (r_M) están muy influenciados por el nivel de ruido, por esto, las gráficas 4.29 y 4.36, muestran una dispersión muy grande con respecto a la recta de detección óptima. Esto limita directamente el uso de los mismos ya que las imágenes, por el momento, no pueden tener una S/N mayor. El detector de mínimos cuadrados (r_{WLS}) no está tan influenciada por el nivel de ruido como los mencionados, sin embargo, no supera al detector Gaussiano ni al detector Hough en las detecciones que nos interesan en este análisis (sin ruido y con $S/N = 23dB$). En caso de que se lograse una mejora en la S/N este detector puede ser una opción más que aceptable, ya que cuando trabaja a niveles altos de S/N se obtienen resultados como el mostrado en la Fig. 4.34.

El detector de Hough (r_H) obtiene buenos valores para los puntos pertenentes y su dispersión está cercana a la recta de regresión. Además, los valores del coeficiente de Pearson son superiores a 0,95 a partir de una $S/N = 14dB$. Sin embargo, el detector de Gaussiano (r_G) es el que tiene más éxito en obtener el centro de la línea recta a nivel sub-píxel, introduciendo una incertidumbre mucho menor a la medición debido a la baja dispersión de las posiciones obtenidas. Esto se va a profundizar en el análisis de resolución de la Sección 7.1.

El D_G tiene una dispersión muy baja y si se logra mejorar la S/N se lograrán resultados notables, como muestra la predicción de la curva 4.27. Aunque los valores de este último detector son superiores, el Detector Hough puede utilizarse ya que la transformada Hough sub-píxel es un método alternativo fiable; como ya se expresó, valores de $r > 0,95$ son aceptables.

Los resultados resumidos de este estudio se pueden observar en la Fig. 4.38 donde tanto el Detector Gaussiano como el Hough son los mejores a medida que aumenta el ruido, determinado por la relación escalar (N/S), la inversa de la S/N ; siendo el Gaussiano el mejor de todos.

De esta manera, se llega a la conclusión, con datos concretos, que el modelo de línea presentado como gaussiano, y el detector creado de acuerdo a este modelo, son los óptimos para cuando se trabajan con imágenes de la retícula de un autocolimador.

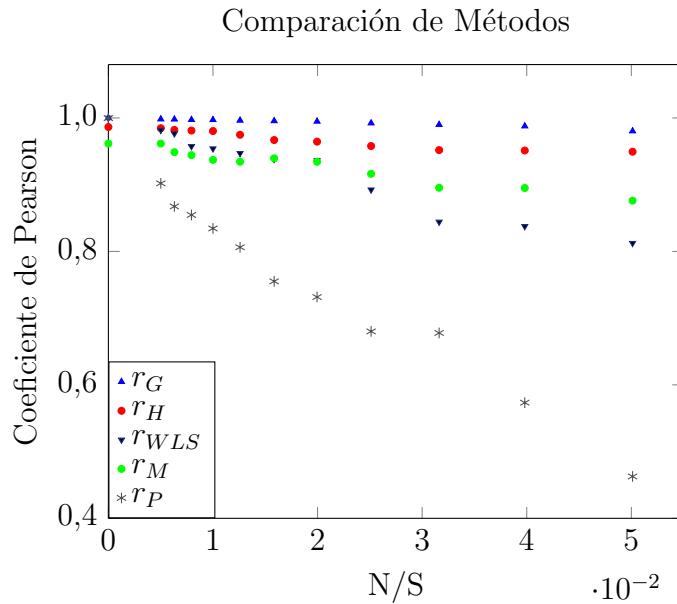


Figura 4.38: Características de Detección de todos los algoritmos de acuerdo al nivel de ruido (N/S) presente.

4.9. Análisis de detección con línea inclinada

De acuerdo al primer análisis comparativo (ver Fig. 4.38), se eligieron los dos detectores de mejor desempeño y se estudió su comportamiento a medida que se inclinaba la línea simulada. Los ángulos estudiados son los que podrían aparecer en la imagen de la cruz con la resolución original de (1234×1624) . En la Fig. 4.39 se esquematiza la creación de los ángulos estudiados. A medida que se incrementa la altura H_p se van creando diferentes inclinaciones de la línea.

La detección de una línea recta es posible en el caso de la Transformada Hough porque esta obtiene, del plano paramétrico, la inclinación θ . Por otro lado, para poder hacer lo mismo con los cortes ajustados mediante la función gaussiana continua, se tiene que realizar un corte por cada columna de la imagen (un corte secuencial). De esta manera se puede obtener una comparación de las posiciones a través de cada columna analizada.

A modo de ejemplo, se escribe en la Tabla 4.7 un conjunto de datos de detección de la columna central de la imagen a medida que se hace el corrimiento a nivel sub-píxel. El coeficiente de Pearson se obtiene al correlacionar las posiciones simuladas centrales de la línea inclinada con las posiciones centrales detectadas con ambos métodos. Cabe destacar que el comportamiento es similar para todas las columnas estudiadas.

En la Fig. 4.40 se puede observar como el detector gaussiano no es afectado por la inclinación, mientras que el detector Hough sufre un deterioro a medida que aumenta el ángulo de inclinación. Por otro lado, se encuentra un valor máximo para el detector Hough para la inclinación creada con $H_p = 3$ píxeles, que conforma un ángulo $\alpha = 0,07^\circ$.

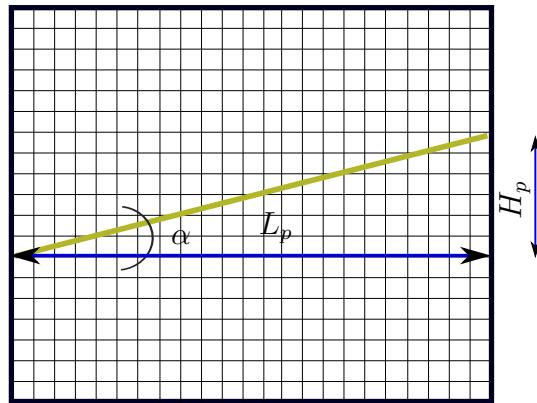


Figura 4.39: Parámetros de la línea inclinada. Variando la altura H_p en píxeles y manteniendo fijo L_p se obtienen diferentes valores de α .

Tabla 4.7: Valores del coeficiente de Pearson para r_H y r_G de acuerdo a las diferentes inclinaciones de la línea simulada.

$\alpha(^{\circ})$	r_H	r_G
0.01	0,9862	0,9999
0.04	0,9864	0,9999
0.05	0,9867	0,9999
0.06	0,9873	0,9999
0.065	0,9875	0,9999
0.07	0,9881	0,9999
0.08	0,9871	0,9999
0.09	0,9863	0,9999
0.10	0,9859	0,9999
0.14	0,9812	0,9999
0.17	0,9773	0,9999
0.21	0,9677	0,9999
0.24	0,9636	0,9999
0.28	0,9611	0,9999
0.31	0,9595	0,9999

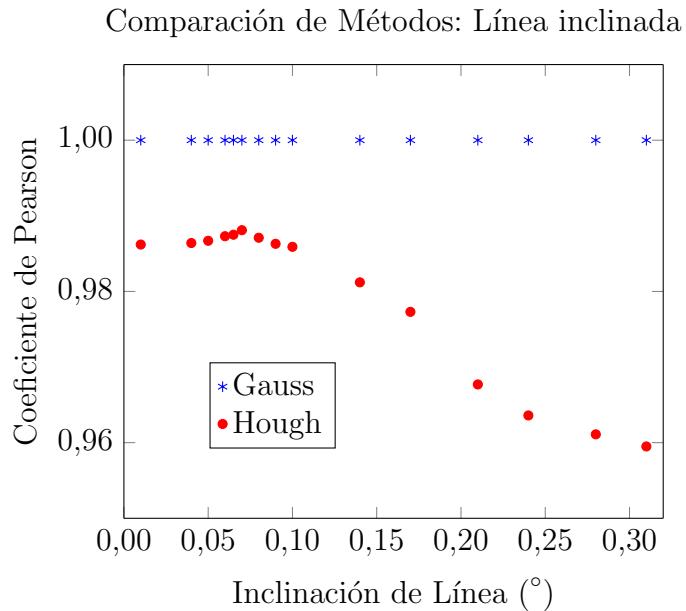


Figura 4.40: Características de detección de los detectores D_{H2} y D_G cuando la línea está inclinada un ángulo α . El detector gaussiano se mantiene inalterable frente a la inclinación, mientras que el Hough sufre un deterioro y posee un máximo para $\alpha = 0,07^\circ$.

Nuevamente, la gráfica concluye que el detector Gaussiano es el que mejor obtiene el centro de la línea a nivel sub-píxel. Este detector trabaja correctamente bajo los efectos del ruido y con la recta inclinada. Aún modificando la inclinación de la recta grandemente, el detector gaussiano ofrece una buena performance que se traduce en un valor de coeficiente de Pearson alto (cercano al ideal 1).

Capítulo 5

Experimento de medición

Para validar el algoritmo propuesto y para testear el comportamiento de la interfaz visual, se diseñó un experimento controlado que permitiera comparar las mediciones realizadas con el nuevo instrumento con otro instrumento de mayor calidad. En busca de este objetivo se generaron un conjunto consecutivo de ángulos pequeños usando la barra larga mostrada en la Fig. 5.1. Esta barra posee en uno de sus extremos un tornillo micrométrico que permite generar pasos verticales regulados y equi-espaciados que se transforman en ángulos de acuerdo a la rotación de la barra, que posee un punto de apoyo fijo en el otro extremo. Las pequeñas desviaciones angulares se midieron simultáneamente con el nuevo sistema (autocolimador + cámara + software) y con un nivel electrónico.



Figura 5.1: Experiencia con Nivel electrónico (N) y Autocolimador (el espejo E permite la medición). La barra generadora de ángulos está situada sobre una mesa de referencia de granito.

El nivel utilizado como referencia es un Mahr Federal EMD-832P-48-W2, Serial Number 2095-06293. Este instrumento, trazable a estándares aceptados internacionalmente, está disponible en el Laboratorio de Metrología

CEMETRO-UTN Córdoba, [21]. Posee una resolución de 0,1 segundos de arco y una exactitud del 2% que lo sitúa como una excelente opción para utilizarlo como referencia.

Tanto la barra, como todos los elementos que componen la medición, fueron situados en una mesa de referencia de granito (ver Fig. 5.1). Esta mesa es un instrumento clave en la medición. Es una superficie extremadamente plana y calibrada, que permite que la medición sea estable y libre de vibraciones externas.

En cuanto a las condiciones de medición, el laboratorio tiene un sistema de aclimatación que mantiene la estabilidad térmica dentro de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ por debajo de los 20°C , permitiendo que las variaciones en las dimensiones del aluminio de la barra, por alteraciones térmicas, no influyan en el resultado final de la medición. Por otro lado, las mediciones se llevaron a cabo bajo condiciones standard de iluminación (760 lux).

5.1. Procedimiento de medición

En primer lugar, se calibró el sistema de acuerdo al método propuesto en el Capítulo 3. Luego se tomaron un total de 200 imágenes de la escala de la retícula manteniendo la iluminación máxima y cuidando que no se formen sombras alrededor del instrumental. Es importante que el efecto Vignetting no se incremente por problemas en la iluminación. Estas imágenes son esenciales para la calibración del software, como se verá en las secciones siguientes y como ya se expresó en la Sección 3.1.

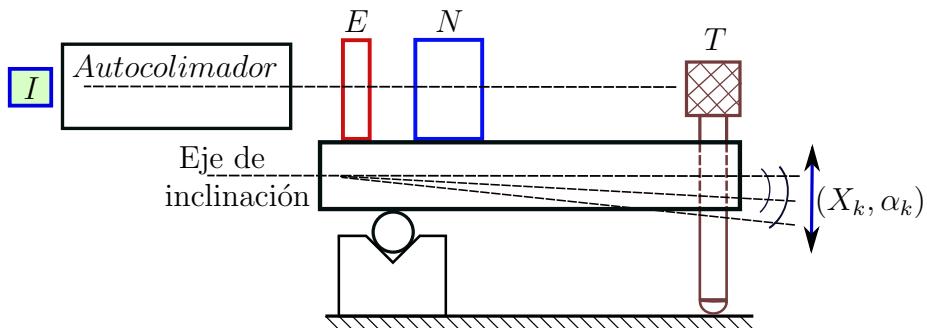


Figura 5.2: Esquema del experimento de medición montado y mostrado en la Fig. 5.1. I representa la interfaz visual. N : Nivel electrónico, E : Espejo reflector y T : Tornillo micrométrico.

Una vez que el conjunto de imágenes de calibración es capturado se pro-

sigue de la siguiente manera: el espejo E y el nivel electrónico N se situaron en el mismo punto de rotación de la barra. Esta situación se grafica mediante la Fig. 5.2 donde se puede cada uno de los elementos y su posición relativa uno con respecto al otro.

Es importante que tanto E como N estén cerca del punto de rotación, para que no introduzcan deformidades por sus pesos relativos. Se corroboró con un nivel Mitutoyo de alta resolución ($0,02\text{mm}/\text{m}$ por división), que la inclinación de la barra no cambiase una vez situados los elementos.

La barra generadora de ángulos de la Fig. 5.1 está regulada por un tornillo micrométrico T situado en uno de sus extremos. Se pudieron generar pasos de aproximadamente 8 segundos de arco por medición con este sistema.

El nivel electrónico, para la posición “k” del tornillo, establece una medición angular de referencia, por lo cual el experimento obtiene pares ordenados (X_k, α_k) , siendo X_k , la lectura del nivel y α_k , la del autocolimador con la interfaz.

De acuerdo a la interfaz que se utilizaba, la CMOS o CCD, se pudo mover el rango de medición. La interfaz final posee, como era de esperar, un rango de medición superior, ya que las deformaciones introducidas por el objetivo no limitan tanto el desarrollo como cuando se utiliza el objetivo de bajo costo de la cámara CMOS.

A continuación se explican los algoritmos y cálculos desarrollados sobre las imágenes capturadas con esta experiencia.

Capítulo 6

Procesamiento de Imágenes

Con el algoritmo elegido y la experiencia de medición montada y calibrada, se procedió a capturar un conjunto de imágenes de la escala y de la cruz para llevar adelante el procesamiento de imágenes que permite obtener la medición con la interfaz visual digital.

En primer lugar, se realiza un pasaje del formato RGB de formación del color al formato de niveles de gris, luego se aplicó un procedimiento de susstracción de fondo para reducir el efecto Vignetting y un recortado a todas las imágenes (tanto de la escala como de la cruz) para concentrar la segmentación en las zonas de interés. Luego, partiendo del algoritmo desarrollado a través de la simulación, se detecta el centro de la línea. La técnica desarrollada en [22, 23, 25] explica como encontrar el centro de cada línea con la transformada Hough convencional, como primer paso, para determinar a nivel píxel la posición de cada segmento. Luego se segmenta una vecindad en torno a esta posición y se obtienen los centroides finales a través de un ajuste de funciones gaussianas continuas. Las imágenes capturadas presentan estructuras con un ancho mayor a un píxel, por lo cual, para llegar a una medición con la misma resolución que el autocolimador (o mejor), es necesario modelar la imagen a nivel sub-píxel. Cabe destacar que este algoritmo utiliza una estadística robusta para ajustar los datos, obteniendo una buena localización, incluso con ruido y blur presentes.

A pesar de que el análisis fundamental de la imagen se realiza con el detector Gaussiano, se presentan los resultados obtenidos con los otros detectores para ratificar los resultados de la simulación. Por otro lado, se presenta un estudio del comportamiento de la imagen de acuerdo a su codificación RGB, para comprobar si la medición sufre algún tipo de cambio al utilizar la transformación a niveles de gris al inicio del algoritmo.

El análisis del algoritmo sobre las imágenes capturadas va a incluir las dos interfaces creadas (CMOS y CCD). De esta manera se subraya una vez

más la importancia de la elección adecuada de la cámara para la interfaz.

6.1. RGB a niveles de gris

La cámara Basler y la cámara CMOS utilizan el modelo RGB para formar la imagen. Estas cámaras tienen un filtro RGB entre el lente y el sensor. Dada esta característica, antes de pasar a la sección siguiente, es necesario hacer un análisis del comportamiento de las líneas cuando se pasa del formato RGB al de niveles de gris.

El modelo RGB o formato RGB es un modelo de color aditivo en el cual los rayos de luz rojos, verdes y azules se suman en varias combinaciones que reproducen una amplia gama de colores. El nombre de este modelo surge de las iniciales de los tres colores primarios en inglés, rojo (red), verde (green) y azul (blue).

En la práctica, para que la cámara monocromática pueda lograr esta gama de colores, se utiliza un filtro Bayer, un “color filter array” (CFA) que está formado por un conjunto de filtros en grilla, alineados con los fotodetectores del sensor. El patrón de color contiene un 50 % de verde, 25 % de rojo y un 25 % de azul. La razón por la cual se usa mayor cantidad de puntos verdes en la grilla es porque el ojo humano es más sensible a este color.

En la Fig. 6.1 se puede ver el posicionamiento de este filtro con respecto a la matriz de fotodetectores del CCD y el comportamiento de este para el caso del color azul (para los otros colores el comportamiento es similar).

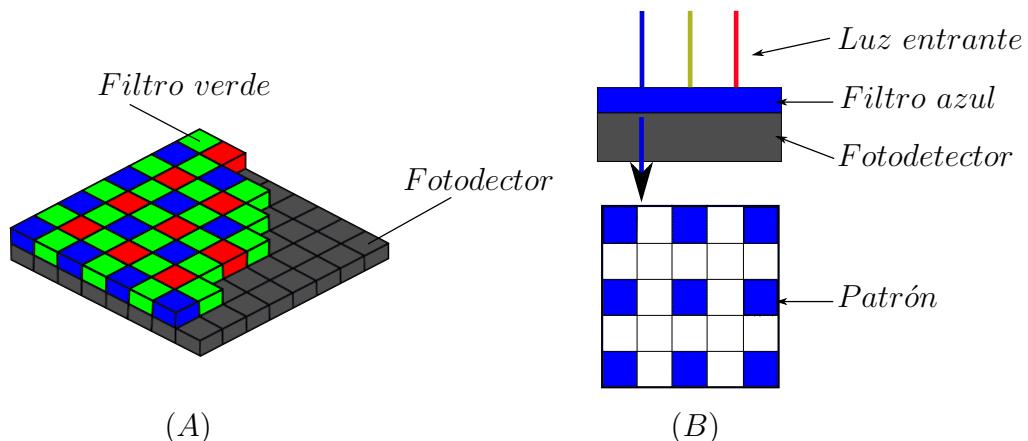


Figura 6.1: (A) Esquema del filtro ubicado sobre la grilla de fotodetectores. (B) Comportamiento del Filtro para el caso del color azul.

La conclusión a la que se tiene que arribar es si se introduce algún tipo de corrimiento posicional en la detección cuando se hace la transformación de

RGB a niveles de gris. Para tal transformación se utiliza el método propuesto por Kumar et al. [56] que prueba ser mejor que el método Braun et al, [57]. Como interesan las intensidades de los píxeles que determinan luego la formación de la función gaussiana de la Fig. 4.2, se utiliza la fórmula siguiente:

$$I_g = 0,333.F_r + 0,5.F_v + 0,1666.F_a, \quad (6.1)$$

Los valores (F_r, F_v, F_a) son los valores de intensidad para un píxel determinado de acuerdo a los canales de colores rojo, verde y azul en ese píxel en particular, mientras que I_g es el valor de intensidad para el nivel de gris. Los valores de (F_r, F_v, F_a) otorgados al píxel dependen, por supuesto, del algoritmo previo de formación del color. Originalmente, cada celda, como muestra la Fig. 6.1-A, posee un sólo color.

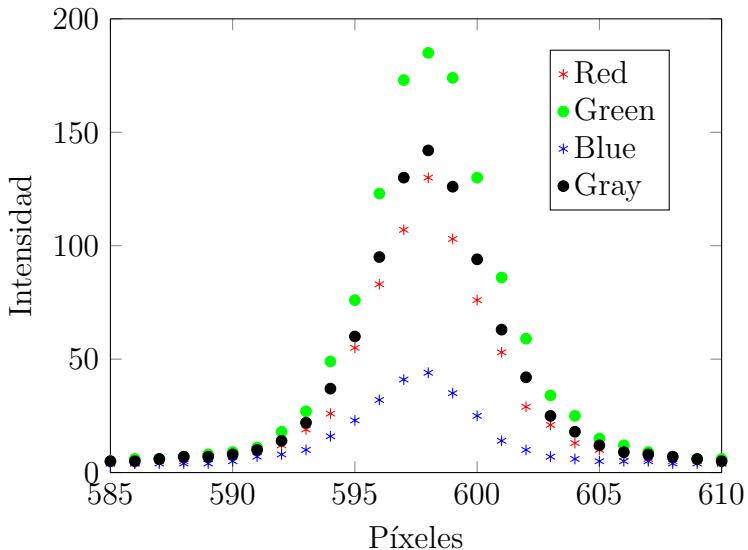


Figura 6.2: Perfil de una línea con sus diferentes componentes de color del filtro Bayer (Rojo, Verde y Azul). En negro se muestra la posición de la línea para cuando se trabaja con niveles de gris luego de utilizar la Ec. (6.1). Las posiciones centrales son similares para cada uno de los casos.

Se planteó una comparación en la detección cuando se utiliza cada componente del filtro de Bayer y cuando se utiliza la Ec. (6.1). En la Fig. 6.2 se puede ver un corte de la línea para cada uno de los colores. La posición del centro sub-píxel es similar, más aún cuando se ajustan las gaussianas sobre los datos discretos de cada color. Cabe destacar que esta figura corresponde a

un sólo corte de todo el recorrido de la línea, mientras que el programa de detección construye la posición utilizando todos los cortes de línea, aumentando la robustez del método.

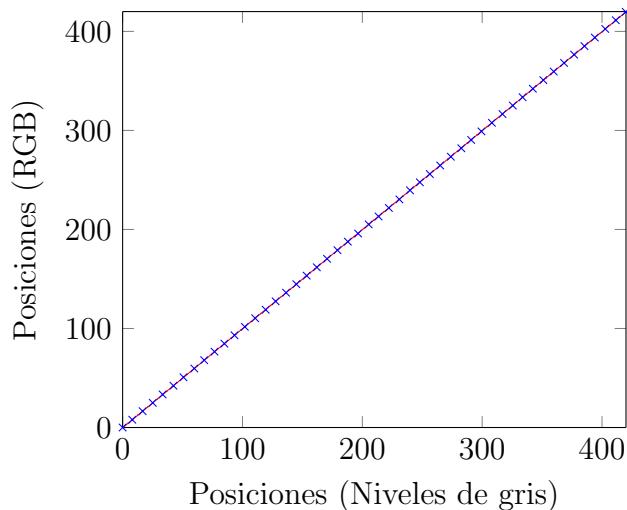


Figura 6.3: Modelo lineal para comparar las posiciones de la línea detectada con el detector Gaussiano trabajando con los niveles de gris de la imagen y con los colores RGB, $r = 0,9999$.

Finalmente, en una medición comparativa, trabajando con los niveles de gris y con los colores RGB por separado (promediando los centros obtenidos para cada color) se pudo corroborar que es igual trabajar con ambos métodos y que la utilización de la Ec. 6.1 no influye en la medición. La Fig. 6.3 detalla el modelo lineal de este enfoque. El modelo denota una recta de regresión de excelente calidad con un coeficiente de Pearson igual a 0,9999. La medición fue realizada con las imágenes capturadas en la experiencia de medición propuesta en el capítulo anterior.

6.2. Reducción del Efecto Vignetting

En la sección 3.3.1 se explicó el desarrollo teórico del Efecto Vignetting. Ahora se va a proceder a explicar como influye en las imágenes capturadas y su posterior reducción a través del Filtro Savitzky-Golay.

En la Fig. 6.4 se representa un corte de ocho segmentos lineales de la imagen de la escala de la retícula; se puede observar claramente como se deforman los mismos debido a la curvatura que introduce este fenómeno óptico. Los segmentos sufren un offset en todo su recorrido de 3 dimensiones.

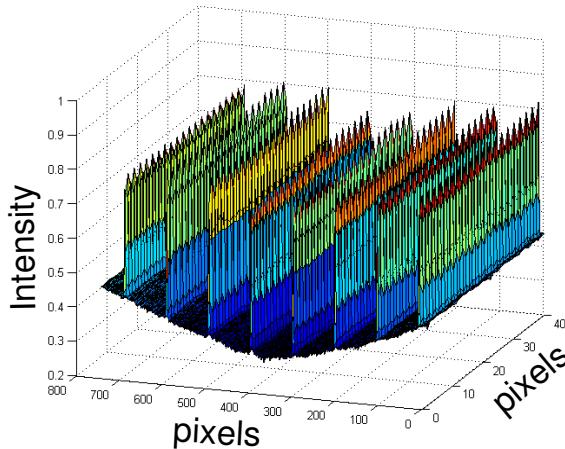


Figura 6.4: Efecto Vignetting sobre un sector de la retícula de medición (Función de intensidad 3D). Se ven 8 segmentos definidos por sus funciones gaussianas 3D que están afectados por un fondo parabólico.

Como el Efecto refiere a una pérdida gradual de la iluminación en los extremos de la imagen, debido a un bloqueo de una parte del haz de luz incidente producido por los diafragmas de los lentes o entre los lentes, se genera una situación no deseable en la imagen: esto se traduce en un cambio de posición de los picos de cada segmento a medida que se observa hacia la periferia de la imagen, [58]. Es por esta razón que los ocho segmentos de la Fig. 6.4 están sobre un fondo tipo parabólico que se comporta como un offset para los segmentos que se van alejando del centro de la imagen.

Dado el carácter suave del crecimiento de este fondo, el filtro Savitzky-Golay es un método ideal para reducir este desplazamiento. El filtro está diseñado para datos que tienen este comportamiento, [59]. Aumenta la relación señal-ruido de la señal (en este caso la imagen) permitiendo que la información contenida en la misma mantenga su calidad.

6.2.1. Filtro Savitzky-Golay.

El filtro digital Savitzky-Golay (S-G) puede ser aplicado a un conjunto de datos digitales con el fin de suavizar los puntos del conjunto, es decir, para aumentar la relación señal-ruido en gran medida sin distorsionar la señal. Esto se logra a través de una convolución de los datos, mediante el ajuste de los sucesivos sub-conjuntos de puntos adyacentes, con un polinomio de grado bajo y por el método de mínimos cuadrados.

Cuando los puntos están igualmente espaciados se puede encontrar una solución analítica para las ecuaciones de mínimos cuadrados en forma de

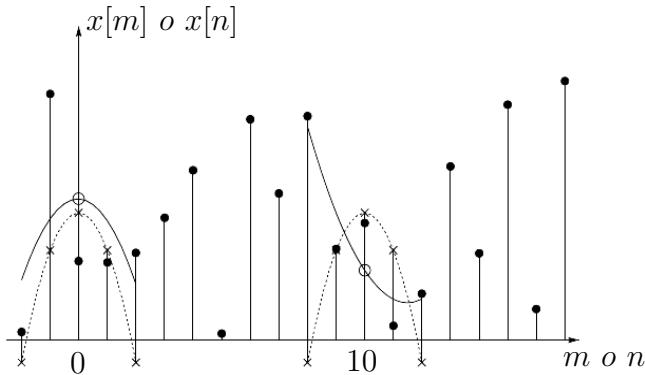


Figura 6.5: Gráfica del suavizado a través del método de mínimos cuadrados a mediante el ajuste local de un polinomio de segundo grado (línea sólida) a cinco muestras de entrada: ● representa a las muestras de entrada, ○ corresponde a las muestras de salida obtenidas de mínimos cuadrados, y x representa a las muestras respuesta tipo impulso (constantes de peso). La línea punteada grafica los polinomios de aproximación centrados en el impulso unitario.

un único conjunto de coeficientes de convolución. Estos se pueden aplicar a todos los sub-conjuntos de datos para dar estimaciones de la señal suavizada (o derivadas de la señal suavizada) en el punto central de cada subconjunto, [60].

Savitzky-Golay et al. demostraron en [60] que ajustar un polinomio a un conjunto de puntos para luego evaluar el polinomio resultante en un solo punto dentro del intervalo de aproximación es equivalente a la convolución discreta con una respuesta de impulso fija.

La idea básica detrás del suavizado polinomial mediante mínimos cuadrados está expresada en la Fig. 6.5, que muestra una secuencia de $x[n]$ muestras de una señal (puntos sólidos), [59]. Considerando el grupo de $2M+1$ muestras centradas en $n = 0$ se obtienen los coeficientes de un polinomio:

$$p(n) = \sum_{k=0}^N a_k \cdot n^k, \quad (6.2)$$

que minimizan el error de aproximación de mínimos cuadrados para el grupo de muestras de entrada centradas en $n = 0$:

$$\begin{aligned}\epsilon_N &= \sum_{n=-M}^M (p(n) - x[n])^2 \\ &= \sum_{n=-M}^M \left(\sum_{k=0}^N a_k \cdot n^k - x[n] \right)^2,\end{aligned}\quad (6.3)$$

El análisis es igual para todo grupo de de $2M+1$ muestras. M corresponde a la mitad de la anchura del intervalo de aproximación. En la Fig. 6.5, donde $N = 2$ y $M = 2$, la curva sólida de la izquierda es el polinomio evaluado entre -2 y 2 y la salida suavizada se obtiene de evaluar $p(n)$ al valor central $n = 0$; o sea, en $y[0]$, la salida para $n = 0$, es igual a:

$$y[0] = p(0) = a_0, \quad (6.4)$$

De esta manera, el valor de salida es igual al coeficiente 0 del polinomio. En general, el polinomio de aproximación tiene que ser simétrico en relación al punto evaluado.

La salida para la siguiente muestra se obtiene corriendo el intervalo bajo análisis una muestra hacia la derecha. Se redefine el origen para pasar a ser la posición de la muestra central del nuevo bloque de $2M + 1$ muestras. Se repite el ajuste y evaluación del polinomio a la muestra central. Esto se repite para cada muestra de entrada, y cada vez se produce un nuevo polinomio y un nuevo valor de la secuencia de salida $y[n]$.

En el artículo original de Savitzky y Golay [60] se demostró que en cada posición, el valor de salida suavizado obtenido por el muestreo del polinomio ajustado es idéntico a fijar una combinación lineal de las muestras de entrada; es decir, el conjunto de muestras de entrada dentro del intervalo de aproximación $2M + 1$ son efectivamente combinadas por un conjunto fijo de coeficientes ponderados. Estos coeficientes se pueden calcular una sola vez para un polinomio de orden N y para un intervalo de aproximación de longitud $2M + 1$. Esto es, las muestras de salida pueden ser calculadas por una convolución discreta de la forma:

$$\begin{aligned}y[n] &= \sum_{m=-M}^M h[m] \cdot x[n-m] \\ &= \sum_{m=n-M}^{n+M} h[n-m] \cdot x[m],\end{aligned}\quad (6.5)$$

Los valores marcados con una x en la Fig. 6.5 son las respuesta tipo impulso corridas $h[0 - m]$ y $h[10 - m]$ que pueden ser usadas para calcular las salidas marcadas con \circ . De esta manera se puede reemplazar el proceso de ajuste de polinomios para cada muestras con una única evaluación de la Ec. (6.5).

6.2.2. Resultados de la aplicación del Filtro.

En la Fig. 6.6 se muestra una de las secciones transversales de la Fig. 6.4, a la cual se le hace el filtrado con S-G. Los ocho segmentos en rojo están severamente afectados por el Vignetting, que introduce, como se explicó, un corrimiento en la detección final. Luego del filtrado, curva en azul, los segmentos disminuyen su offset original notablemente.

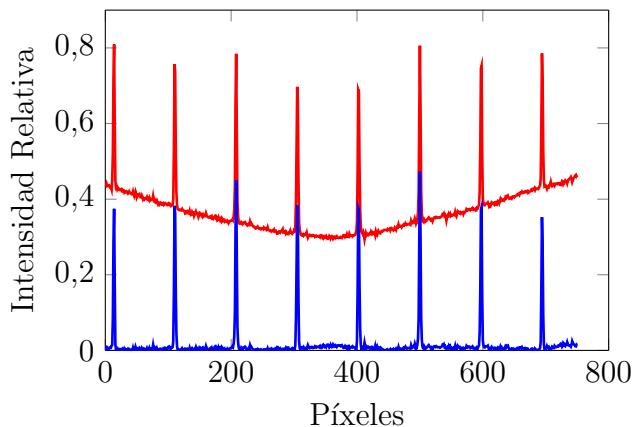


Figura 6.6: Secciones transversales de la función intensidad mostrada en la Fig. 6.4: en rojo, curva original afectada por el Vignetting; en azul, la misma curva luego del filtrado con el filtro Savitzky-Golay.

6.2.3. Correcciones posteriores del Vignetting.

Luego del filtrado, un fondo residual afecta a la imagen. En la Fig. 6.7 se esquematiza, ex professo, en forma exagerada, el comportamiento final de los segmentos.

El efecto de este offset sobre la posición de las líneas de la imagen se puede cuantificar de la siguiente manera: como ya se sabe que el perfil de las líneas es Gaussiano, y que el fondo residual, luego del filtrado, tiene la forma de una recta:

$$y_B = s_B \cdot x + b_B, \quad (6.6)$$

el parámetro que caracteriza al centroide está corrido en una aproximación de primer orden dada por:

$$\Delta_B = \frac{s_B * \sigma^2}{A}, \quad (6.7)$$

donde s_B es la pendiente del fondo residual, σ la anchura de la función gaussiana descripta por los perfiles de línea y A su amplitud.

En la práctica $\sigma = 5$ píxeles, $s_B = 0,03$ (1/píxeles) y $A = 100$, que resulta en $\Delta_B = 0,0075$ píxeles. El valor de Δ_B será muy importante para la discusión de la incertidumbre que se explicará en la sección 7.2.

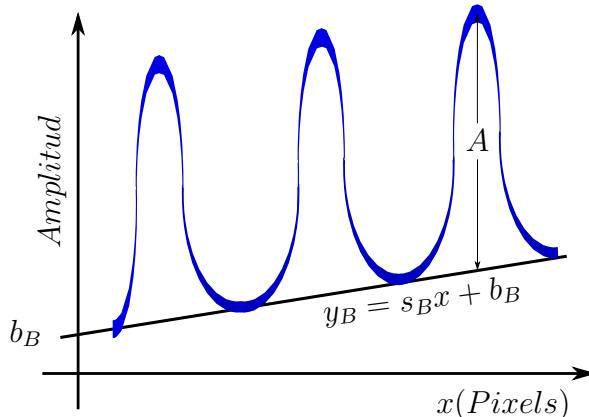


Figura 6.7: Fondo residual $y_B = s_B.x + b_B$ afectando la posición y altura de cada línea representada por su perfil gaussiano.

6.3. Interfaz con cámara CMOS

A continuación se desarrollan todos los algoritmos y cálculos que permiten obtener una medición con la interfaz visual con cámara CMOS, tal cual fue estudiado en Schuerrer et al., [22]. Si bien, la cámara utilizada es de bajo costo y de características limitadas, las investigaciones llevadas adelante con la misma permitieron definir todos los parámetros y procedimientos que se utilizaron luego con la cámara CCD.

6.3.1. Procesamiento de la imagen de la escala.

En esta etapa se introduce el cálculo del valor medio estimado para la relación píxel/división de la retícula del instrumento, en otras palabras, cuántos

píxeles se miden entre dos segmentos consecutivos de la escala cuando la imagen es tomada con la cámara CMOS (ver Fig. 3.11b). Para esto, se estudiará esta imagen en particular, dejando de lado momentáneamente la cruz, y se realizará el cálculo del parámetro Δ_{XY} que representa la relación píxel/división buscada. Este parámetro se presentó en la Fig. 3.2.

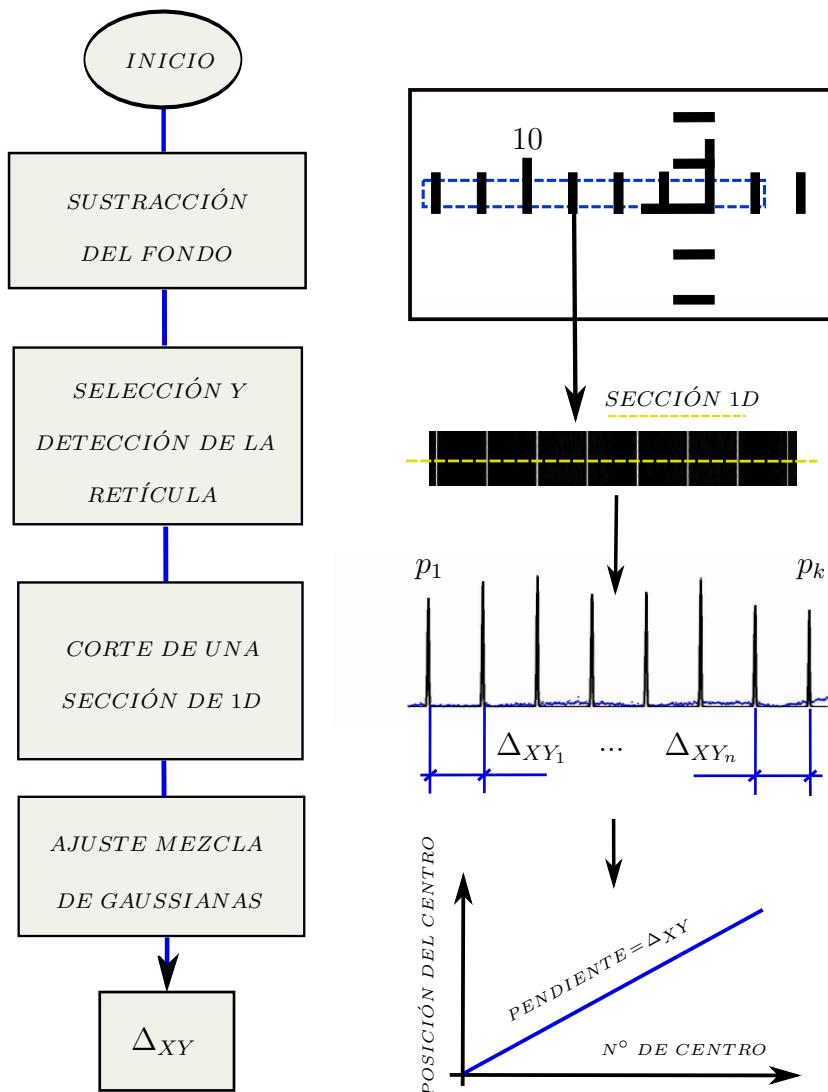


Figura 6.8: Diagrama de flujo que detalla el método de procesamiento de imágenes para la escala.

Este procesamiento se lleva adelante una sola vez, como parte de la calibración de la cámara. En la Fig. 6.8 se detalla el algoritmo desarrollado para detectar la posición central de los segmentos que conforman la escala que

deriva en el cálculo del paso medio Δ_{XY} . El algoritmo explica, a modo de ejemplo, el caso del corte horizontal de los segmentos de la escala (se realiza lo mismo para los verticales). Para realizar el proceso, se promediaron un total de 200 imágenes de la escala, obteniéndose así, una imagen final con sus características realizadas; luego, se le sustrajo el fondo producido por el Vignetting mediante el filtro S-G y se recortó la zona central de la escala en dirección horizontal. De la imagen recortada se obtuvo una función discreta unidimensional a través de un corte en la dirección del máximo gradiente sobre los segmentos lineales, que al ser ajustada, forma los 8 picos gaussianos (p_1, \dots, p_k) con $k = 8$. Esos 8 picos definen un paso final Δ_{XY} .

A continuación se describen los cálculos realizados para los cortes horizontales y verticales de la escala, que permiten obtener la calibración final para la cámara CMOS.

6.3.1.1. Corte horizontal.

El corte horizontal es una curva S_H (sección horizontal) con N modas que corresponde a una sección unidimensional de la imagen recortada de la escala como se muestra en la Fig. 6.8.

Se puede modelar cada Gaussiana del corte independientemente, estimando primero el entorno de la moda, y ajustando en dicho entorno una curva. Como es necesario calcular la diferencia entre las N modas, es más eficiente parametrizar toda la curva como una suma de N gaussianas:

$$S_H = a_1 * \exp(-((x - b_1)/c_1)^2) + \dots + a_N * \exp(-((x - b_N)/c_N)^2) + \epsilon, \quad (6.8)$$

$$\epsilon \sim N(0, \sigma_x), \quad (6.9)$$

y estimar los parámetros a_i, b_i, c_i con $i = (1, \dots, N)$ por medio de una regresión robusta con la función *bisquare*, [61], usando las rutinas del Curve Fitting Toolbox de Matlab ®. $N(0, \sigma_x)$ representa al ruido con distribución normal, media nula y ancho σ_x .

En la Fig. 6.9, se muestra el ajuste realizado sobre las muestras del corte horizontal, situado en la matriz de píxeles en $(c, f = 57)$ ($f = \text{fila}$ y $c = \text{columna}$). Se pueden ver claramente 5 funciones gaussianas completas que corresponden a 5 segmentos de la escala. Luego, en la Fig. 6.10, se muestra el modelo lineal que ajusta la posición de cada uno de los centros de los segmentos y sus residuos correspondientes.

La fórmula de ajuste infiere valores para los centroides b_k , $k = (1, \dots, N)$, los cuales son, teóricamente, valores equiespaciados con diferencia (paso de

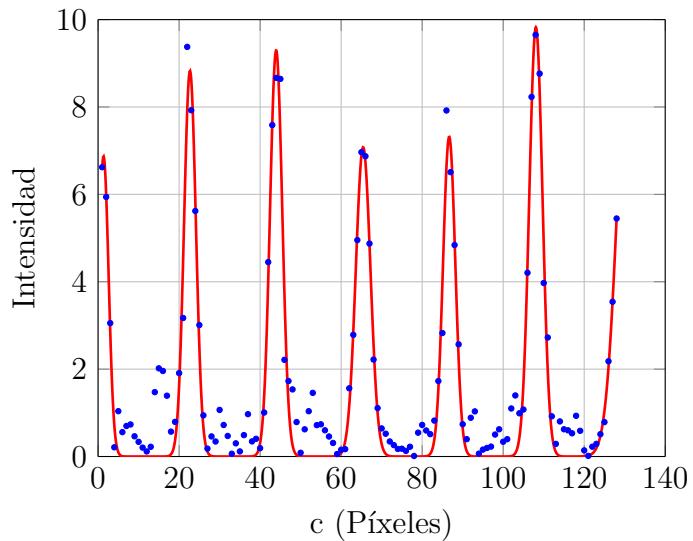


Figura 6.9: Corte horizontal de la sección de imagen en $(c, f = 57)$.

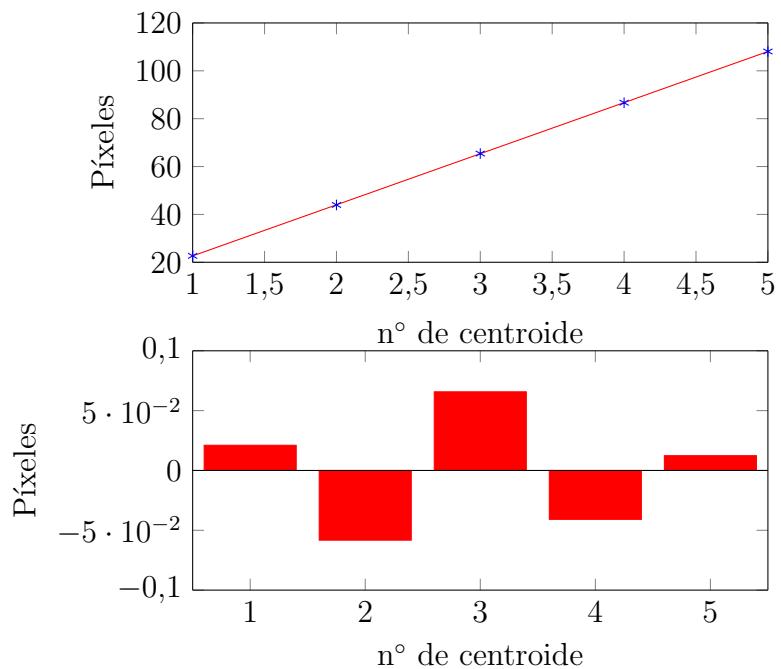


Figura 6.10: Primer panel: Recta de regresión calculada sobre los centroídes del ajuste de suma de Gaussianas de la Fig. 6.9. Segundo panel: sus respectivos residuos.

la escala) Δ_{XY} . Dicha diferencia es estimada en la dirección horizontal como la pendiente Δ_x de un modelo de regresión simple entre los valores b_k y las posiciones de dichos valores k :

$$b_k = \Delta_x \cdot k + \epsilon \quad k = 1, \dots, N \quad \epsilon \sim N(0, \sigma_x), \quad (6.10)$$

La incertidumbre asociada a dicha estimación está dada por el intervalo de confianza normal del 95 %. Para estas imágenes, el valor inferido del paso horizontal fue:

$$\Delta_x = (21, 36 \pm 0, 06) \text{ pixeles/división} \quad (95 \% \text{ de confianza}), \quad (6.11)$$

6.3.1.2. Corte vertical.

El corte vertical se modela de forma similar al corte horizontal. En la Fig. 6.11, se muestra la curva S_V correspondiente a los valores $(c = 57, f)$ de la matriz de píxeles, modelada con una suma de 6 gaussianas ajustadas mediante una regresión robusta dada por (6.12). En la Fig. 6.12 está graficado el modelo de regresión con sus respectivos residuos.

$$S_V = a_1 * \exp(-((x - b_1)/c_1)^2) + \dots + a_N * \exp(-((x - b_N)/c_N)^2) + \epsilon, \quad (6.12)$$

$$\epsilon \sim N(0, \sigma_y), \quad (6.13)$$

La fórmula de ajuste infiere valores para los centroides b_k con los cuales se estima el centro de cada línea de la escala.

El ajuste líneal por mínimos cuadrados (regresión simple) de los centroides b_k contra sus posiciones k :

$$b_k = \Delta_y \cdot k + \epsilon \quad k = 1, \dots, N \quad \epsilon \sim N(0, \sigma_y), \quad (6.14)$$

estima el paso de la escala de la retícula en la dirección vertical con la pendiente Δ_y del ajuste, siendo su incertidumbre el semi-intervalo de confianza normal del 95 % asociado a dicha estimación, redondeado a la primera cifra significativa. Para estas imágenes el valor obtenido fue:

$$\Delta_y = (21, 26 \pm 0, 06) \text{ pixeles/división} \quad (95 \% \text{ de confianza}), \quad (6.15)$$

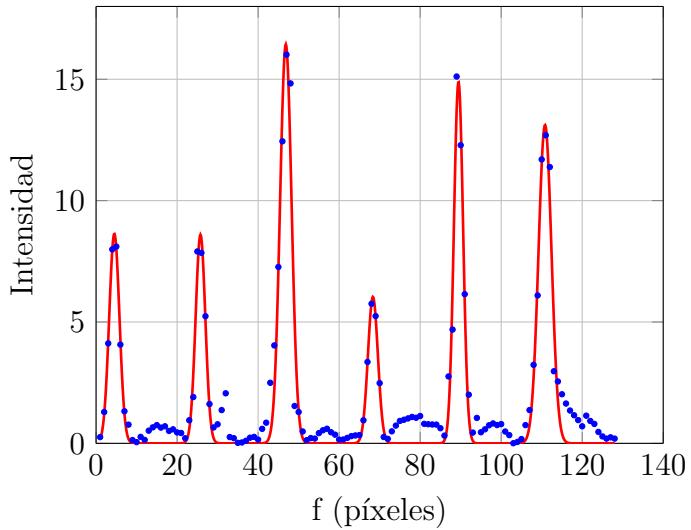


Figura 6.11: Corte vertical de la imagen en $(c = 57, f)$.

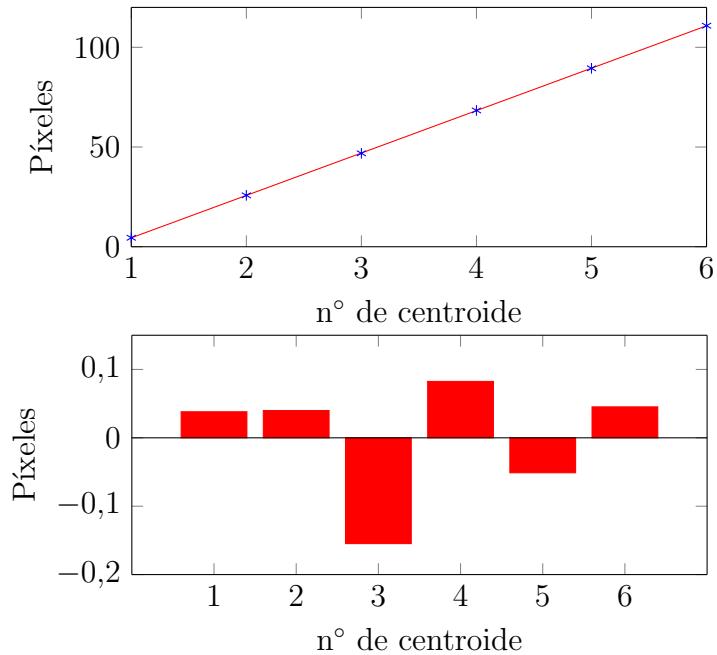


Figura 6.12: Primer panel: recta de regresión calculada sobre los centroides del ajuste de suma de Gaussianas de la Fig. 6.11. Segundo panel: residuos.

6.3.1.3. Valor medio estimado para la relación píxel/segundo de arco.

Los valores sub-píxel estimados para cada eje para el paso de la escala del autocolimador coinciden dentro del intervalo de confianza del 95 %, razón

por la cual se puede concluir que las escalas son lineales dentro de una incertidumbre de 0,06 píxeles/div para ambos ejes, y se puede fijar un valor medio para la calibración de la escala de:

$$\Delta_{XY} = (21,31 \pm 0,06) \text{ pixeles/división (95 \% de confianza)}, \quad (6.16)$$

6.3.2. Estimación de mediciones: Procesamiento de la imagen de la cruz.

El procesamiento de la sección anterior permitió conocer cuantos píxeles tiene el paso de la escala del autocolimador. El procesamiento de la cruz va a estimar la medición realizada con el autocolimador en cada ángulo generado en la experiencia de medición.

En la Fig. 6.13 se muestra un diagrama de flujo del algoritmo propuesto para el procedimiento de medición con la interfaz visual. Este consiste en la captura de 20 imágenes de la cruz por cada posición generada, las cuales se promedian para realzar las características de la imagen obtenida. A esta se le sustrae el fondo mediante el filtro S-G para mejorarle la relación S/N y se procede a la selección de n cortes independientes de las líneas en la dirección del máximo gradiente. Con cada corte se realiza un ajuste gaussiano como el mostrado en la Fig. 6.14, para luego obtener el promedio, usando todos los cortes, de la posición sub-píxel de la línea calculada como centroide de estas curvas.

En la Fig. 6.14 se muestra, a modo de ejemplo, el ajuste realizado al corte de la imagen en la dirección vertical, ubicado en la matriz de píxeles en $(f, c = 60)$. La posición de línea unidimensional se estima con el centroide de una Gaussiana, como en el caso de la escala, al cual se denota como B .

De acuerdo a la experiencia de medición propuesta en el Capítulo 5 se tomaron varias mediciones cercanas al centro de la retícula, donde las aberraciones del lente de la cámara CMOS son menores. En forma paralela se tomaron las mismas mediciones con el nivel electrónico (instrumento de referencia). El centroide B_1 corresponde al valor 0 del nivel (referencia inicial).

La posición relativa α_k (B_k) respecto al centroide B_1 es convertida a segundos de arco mediante la fórmula:

$$\alpha_k = \frac{(B_k - B_1) * 60}{\Delta_{XY}} = \frac{(B_k - B_1) * 60}{21,31}, \quad (6.17)$$

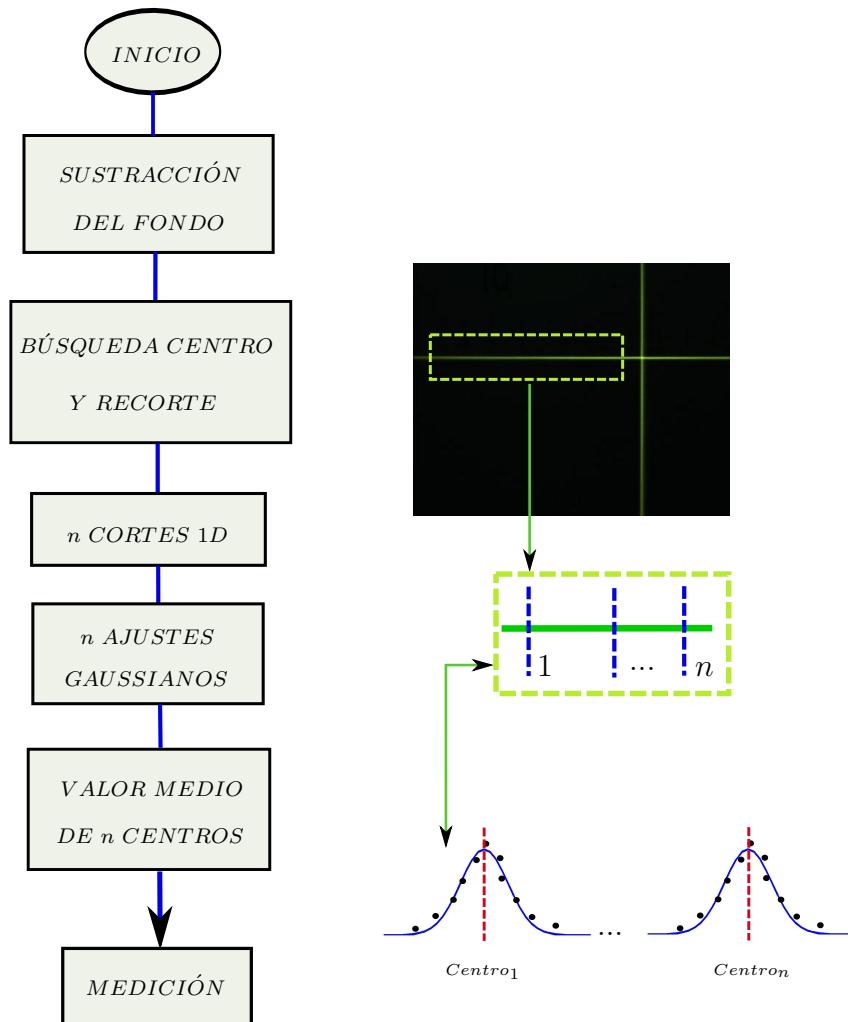


Figura 6.13: Diagrama de flujo del método de cálculo en unidades sub-píxel de la posición de la cruz.

6.3.2.1. Incertidumbre en la medición debida al Software.

La incertidumbre u de la medición angular introducida por el software propuesto, definida inicialmente como el valor en el que puede diferir la posición de la línea y de acuerdo a JCGM, está dada por:

$$u_{\alpha_k} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (6.18)$$

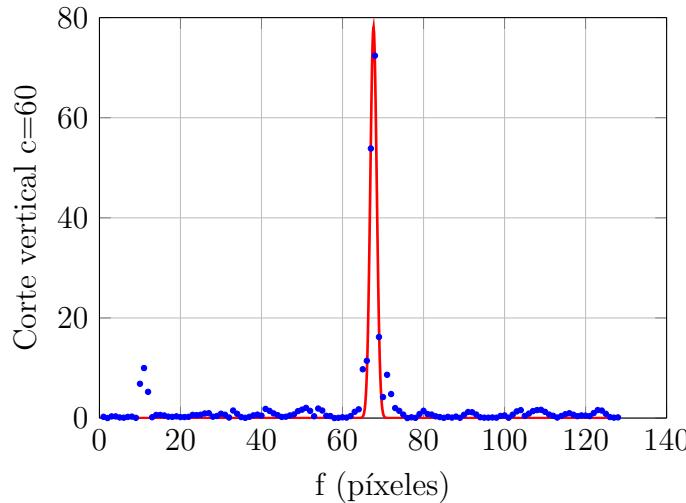


Figura 6.14: Corte de la imagen de la cruz en $(f, c = 60)$. La posición de la moda del ajuste gaussiano (parámetro centroide B), señala la medición del ángulo de cabeceo del autocolimador en unidades sub-píxel.

Calculando usando la Ec. (6.17):

$$\begin{aligned} u_{\alpha_k} &= \sqrt{\left| \frac{\partial \alpha}{\partial \Delta_{XY}} \right|^2 \cdot u_{\Delta_{XY}}^2 + \left| \frac{\partial \alpha}{\partial B_k} \right|^2 \cdot u_{B_k}^2 + \left| \frac{\partial \alpha}{\partial B_1} \right|^2 \cdot u_{B_1}^2} \\ &= \sqrt{\left| \frac{(B_k - B_1) * 60}{\Delta_{XY}^2} \right|^2 \cdot u_{\Delta_{XY}}^2 + \left| \frac{60^2}{\Delta_{XY}^2} \right| \cdot (u_{B_k}^2 + u_{B_1}^2)}, \end{aligned} \quad (6.19)$$

Siendo $u_{\Delta_{XY}}^2 = 0,06$ píxeles/div y $u_{B_k}^2 = u_{B_1}^2 = 0,047$ div, de acuerdo a un rango de 5 divisiones de medición, se llega a una incertidumbre en la medición $u_{\alpha_k} = 0,19$ segundos de arco (para un intervalo de confianza del 68 %).

6.3.3. Comparación de mediciones entre interfaz visual + autocolimador y nivel electrónico.

Utilizando el sistema descrito en el Capítulo 5, se realizaron 10 experiencias de medición. Moviendo el tornillo micrométrico se generaron ángulos que fueron medidos simultáneamente por el nivel electrónico y el sistema (cámara + autocolimador + software). Debido a que el lente de la cámara CMOS introducía grandes deformaciones se mantuvo el rango de medición muy cerca del centro óptico.

Para realizar estas estimaciones se procesaron un total de 200 imágenes de la cruz (20 por ángulo medido), y 200 de la escala en la etapa de calibración de la cámara. En la tabla 6.1 se muestran los valores de las mediciones tomadas para el nivel (X_k), para el sistema de visión (α_k), y las discrepancias $D = \alpha_k - X_k$ calculadas.

Tabla 6.1: Medición con Nivel y cámara CMOS.

Nivel X_k (")	Cámara α_k (")	$(\alpha_k - X_k)$ (")
0	0	0
0.9000	1.0423	0.1423
0.2000	0.2151	0.0151
1.4000	1.6637	0.2637
1.9000	2.3245	0.4245
2.7000	2.8941	0.1941
-1.0000	-1.0249	-0.0249
-2.2000	-2.2342	-0.0342
-3.9000	-4.1747	-0.2747
-5.2000	-5.3223	-0.1223

El error cuadrático medio de dicha discrepancia es de:

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_k D_k^2}{10}} = 0,2", \quad (6.20)$$

Como este valor es muy próximo al valor de la incertidumbre u_{α_k} , es razonable estimar el incremento de la ganancia en resolución G del sistema de visión con respecto a la resolución original del autocolimador ($R = 0,5"$), como el cociente entre ambas:

$$G = \frac{R}{u_{\alpha_k}} = \frac{0,5}{0,19} = 2,63 \sim 3, \quad (6.21)$$

Se logra una mejora de aproximadamente 3 veces la resolución de un autocolimador Nikon 6B, reemplazando el operario por una medición automática con una interfaz con cámara de CMOS de bajo costo.

Estudiando la correlación entre las discrepancias D y los valores de nivel electrónico X_k (ver Fig. 6.15), se observa que existe una recta de pendiente no nula que ajusta a los datos con un coeficiente de Pearson $r = 0,72$.

Los errores en la medición con esta cámara dependen de la amplitud de los ángulos a medir, aunque, como se puede ver en la Fig. 6.15, todos estas

discrepancias se encuentran dentro del rango de resolución del autocolimador Nikon 6B ($0,5''$). Estos errores provienen de los defectos en la lente de la cámara y/o de un error de calibración de la escala del autocolimador; errores que se acentúan en ángulos cercanos a los límites del rango de medición.

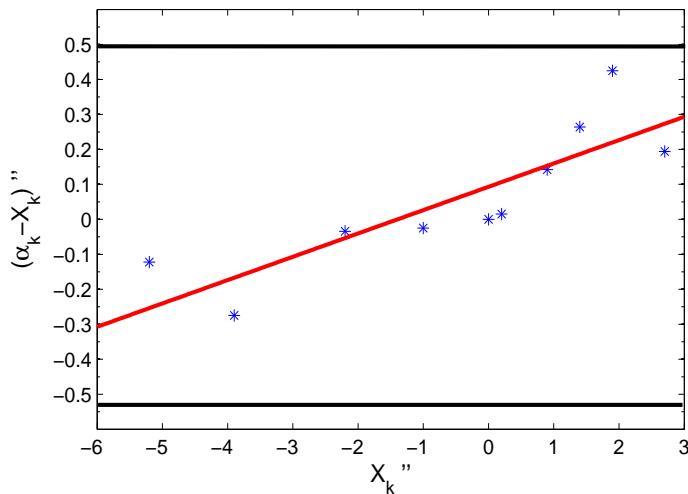


Figura 6.15: Gráfico de correlación entre mediciones del nivel electrónico X_k contra la discrepancia $D = (\alpha_k - X_k)$ entre dichas mediciones y las realizadas con el autocolimador+interfaz (α_k). Tanto X_k como D se muestran en segundos de arco. Los ángulos medidos fueron generados en diez posiciones diferentes de la barra generadora.

6.3.4. Conclusiones Cámara CMOS

En esta primera aproximación, se describen las características de medición de una interfaz visual de medición que consta de una cámara web con sensor CMOS. Dicha medición se realizó procesando dos grupos de imágenes obtenidas independientemente, imágenes de la escala de la retícula e imágenes de la cruz, capturadas durante la medición de ángulos. El procesamiento de las imágenes de la escala se realiza una sola vez, pues depende sólo de la resolución del sensor de la cámara y no de las mediciones a realizarse.

El punto clave del cálculo de los ángulos es el modelado de cortes transversales de las líneas de la imagen como funciones gaussianas, tal cuál se demostró en la simulación previa. La posición central de la función continua infiere la posición de la línea a nivel sub-píxel.

Usando este modelo sub-píxel, en esta primera etapa del trabajo, sólo se reporta la mejora en la resolución, en la próxima etapa se estudia la resolución

profundamente y se introduce un estudio detallado de las componentes de incertidumbre en el cálculo del ángulo, utilizando un protocolo basado en la ISO-GUM.

Los resultados obtenidos con una cámara web con sensor CMOS permiten establecer que la línea de trabajo es correcta. Con una cámara de muy bajo costo se logró implementar un sistema que permite mejorar 3 veces la resolución de un autocolimador Nikon 6B/6D, reemplazando el operario por una medición automática. Sin embargo, el proceso de toma de imágenes queda limitado grandemente por el objetivo y el sensor de la cámara web.

El diseño siguiente de la interfaz posee una cámara con sensor CCD. El objetivo de la nueva cámara tiene una calidad óptica mejor, en otras palabras, las aberraciones son menores.

6.4. Interfaz con cámara CCD

Con la cámara CCD se hicieron, como era de esperar, las mediciones y las calibraciones finales. En esta etapa se pudo introducir el cálculo de incertidumbre y se expresó la ganancia en resolución que el instrumento presenta actualmente. Por otro lado, el estudio presentado fundamenta futuras mejoras.

El método de procesamiento se basa en aquel utilizado para la escala y la cruz cuando se armó la interfaz con la cámara CMOS.

6.4.1. Procesamiento de la imagen de la escala.

Usando el mismo algoritmo que con la cámara CMOS, mostrado en la Fig. 6.8 y en base a un experimento de medición similar, pero con más puntos capturados, se procedió a calcular la calibración inicial que permite obtener el valor Δ_{XY} .

En procesos separados se localizan las marcas verticales y horizontales de la escala a nivel sub-píxel con el ajuste gaussiano propuesto. Se estima, con los datos obtenidos, la pendiente del siguiente modelo de regresión,

$$b_k = \Delta_X * k + \epsilon, \quad k : 1, \dots, 8, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma), \quad (6.22)$$

que permite determinar los valores Δ_X y Δ_Y correspondientes a cada eje.

La estimación, tanto en la dirección vertical como horizontal de la escala, fueron coincidentes en un intervalo de confianza del 95 %. De esta manera,

el valor de calibración fue fijado a:

$$\Delta_{XY} = (97,31 \pm 0,02) \text{pixels/division (95 \% de confianza)}, \quad (6.23)$$

Este valor permite concluir que las escalas son lineales con un margen de incertidumbre de 0,02 píxeles/div. Se observan una mejora con respecto a los valores obtenidos con la cámara CMOS de la Ec. (6.16).

Como cada división corresponde a 60 segundos, la Ec. (6.23) se puede interpretar como que cada píxel corresponde a 0,62''.

6.4.2. Estimación de mediciones: Procesamiento de la imagen de la cruz.

Aplicando el algoritmo esquematizado en la Fig. 6.13, la posición de una línea recta unidimensional fue estimada con el centroide B_k del ajuste gaussiano a la sección transversal determinado por la vecindad centrada en la detección inicial a nivel píxel.

El valor α_k es la posición relativa con respecto al centroide B_1 , correspondiente al valor de referencia que surge de la primera medición con la interfaz y el nivel electrónico. La medición se convierte a segundos de arco mediante:

$$\alpha_k = \frac{(B_k - B_1) * 60}{\Delta_{XY}} = \frac{(B_k - B_1) * 60}{97,31}, \quad (6.24)$$

Los estudios que surgen del análisis de estos datos, están expresados en el siguiente capítulo.

Capítulo 7

Incertidumbre y resolución

7.1. Resolución

En un análisis inicial, utilizando los datos de la simulación, se procede a determinar cual es el paso mínimo que resuelve el software cuando se utiliza el detector Gaussiano para cada nivel de ruido y de acuerdo a la resolución en intensidad de la cámara (8 bits).

Dados los valores del coeficiente de Pearson r_G de la tabla 4.3 en función de la relación $X = N/S$, inversa de la relación señal ruido, que se utiliza como medida de ruido en la imagen, se arma la curva de regresión determinada por la ecuación empírica:

$$r_G = 1 + 0,0658 \cdot X \cdot \ln(X), \quad X = N/S, \quad (7.1)$$

En la Fig. 7.1 se detalla el comportamiento de esta curva. Ahora bien, si se tiene una intensidad máxima de 2^n por píxel (cámara de n bits) la mejor relación ruido-señal que se puede esperar es:

$$\frac{N}{S} = \frac{1 \text{ pixel}}{2^n \text{ pixeles}}, \quad (7.2)$$

Por ende, se puede calcular para distintos números de bits cual es la N/S más pequeña, simplemente variando n . Una vez que se tiene el valor de N/S de acuerdo al número de bits de la cámara, con la Ec. (7.1) se puede obtener el correspondiente valor de r_G .

Por otro lado, si se tienen N_0 puntos equiespaciados en el eje X de la Fig. 7.1 con sus correspondiente Y_i (con $i = 1, \dots, N_0$), se obtiene un intervalo de análisis $L = X_{N_0} - X_1$.

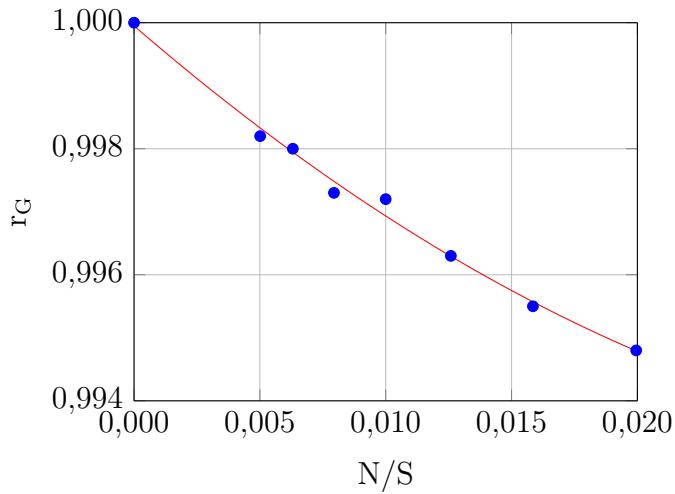


Figura 7.1: Valores de r_G en función de la relación ruido/señal.

Cada valor de r_G , de acuerdo a la curva de regresión de la Fig. 7.1, tiene una media cuadrática s descrita por:

$$s = L \cdot \frac{1}{\sqrt{12}} \sqrt{\frac{N_0}{N_0 - 2}} \sqrt{\frac{1}{r_G^2} - 1}, \quad (7.3)$$

L es el ancho del intervalo de simulación y está conformado por 1 segundo de arco para la experiencia simulada; y N_0 es el número de puntos utilizados (100). Utilizando la Ec. (7.3) y dado que el valor del coeficiente r está ligado directamente a la desviación estándar, se puede calcular el valor de s para cada r_G obtenido de la Ec. (7.1) y del nivel de ruido N/S de la Ec. (7.2).

El criterio de Rayleigh (en óptica, [58, p. 472]) establece que dos líneas pueden distinguirse, sin solapamiento, si están separadas al menos por la suma de sus semi-anchos. Usando este criterio, universalmente aceptado, y extendiéndolo al caso estudiado, se puede definir la mínima resolución obtenida con el detector como:

$$R_n \approx s, \quad (7.4)$$

En la Fig. 7.2 se puede observar como dos líneas que se desplazan una de otra están separadas, en relación a su perfil gaussiano, de acuerdo a la suma de sus semi anchos. Esta distancia está dada por la dispersión cuadrática media (s). Esta cantidad incluye las propiedades del algoritmo, la resolución espacial

de la cámara, el ancho relativo de la línea, y la resolución en intensidad de la cámara; o sea, todas las propiedades de la imagen y del procesamiento.

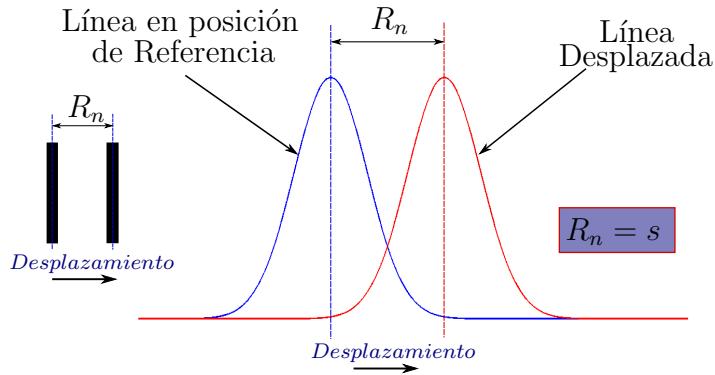


Figura 7.2: Resolución definida por Rayleigh. Dos líneas se distinguen si están distanciadas una de otra por la suma de sus semi-anchos (en este caso “s”).

Para la cámara de la interfaz de 8bits y para el detector Gaussiano:

$$R_{nG} = 0,012'', \quad (7.5)$$

Este análisis se puede extender de acuerdo al número de bits de la cámara para poder averiguar que R_{nG} se tendría. Por ejemplo, si se tuviera una cámara de $n = 12$ bits, se logra una $R_{12} = 0,0060$ segundos de arco.

El resto de los defectos, óptica del autocolimador, óptica de la cámara, posibles desalineaciones de la misma y la alinealidad del CCD en (X, Y) participan en la incertidumbre de la medición (sección 7.2). Es decir hacen crecer la incertidumbre o la inexactitud de la medida.

7.1.1. Ganancia en resolución.

Calculada la nueva resolución del instrumento + interfaz, se pasa a analizar si concuerda con los valores medidos en la experiencia de medición con cámara CCD.

Los datos provenientes de la experiencia de medición forman los pares (X_k, α_k) para $k = (1, \dots, 25)$. Estos datos fueron ajustados con un modelo de regresión lineal definido por:

$$\alpha_k = a * X_k + b + \epsilon, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma), \quad (7.6)$$

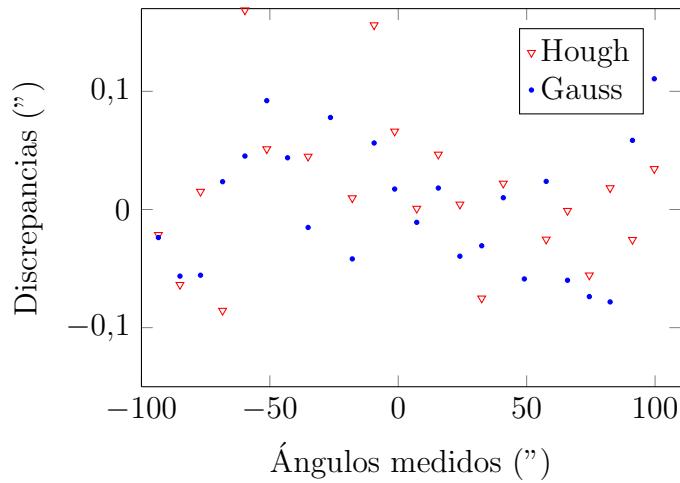


Figura 7.3: Características de detección sobre la imagen capturada con la cámara CCD para los detectores Gaussiano y Hough sub-píxel de acuerdo al nivel de ruido presente dado por la relación N/S . El detector Gaussiano presenta discrepancias globales menores y se mantiene dentro del rango $\pm 0,1''$ segundos de arco. El rango del detector Hough está dentro de los $\pm 0,15''$.

Las discrepancias de este modelo están definidas por:

$$D_k = \alpha_k - (a * X_k + b), \quad (7.7)$$

En la Fig. 7.3 se puede ver la gráfica de las discrepancias para los dos mejores detectores estudiados: el Gaussiano y el Hough sub-píxel. El estudio de los rangos de las discrepancias va a dar la información de la ganancia en la resolución que se busca.

7.1.1.1. Ganancia de Resolución del Detector Gaussiano.

El valor cuadrático medio (D_{rms}) de las discrepancias que fue calculado para esta experiencia:

$$D_{rmsG} = \sqrt{\frac{\sum_k D_k^2}{25}} = 0,04'', \quad (7.8)$$

es la estimación de la exactitud del instrumento (autocolimador + interfaz) como así es definido en el Vocabulario Internacional de Metrología VIM-2008 (item 2.3 Note 3), [62].

La definición de resolución previa (R_{nG}) satisface $R_{nG} < D_{rmsG}$, por lo tanto puede ser utilizada para estimar la ganancia en resolución G del sistema de visión propuesto con respecto a la resolución propia del instrumento:

$$G_G = \frac{R}{R_{nG}} = \frac{0,5''}{0,012''} = 41 \approx 40, \quad (7.9)$$

Los resultados muestran un incremento notable en la resolución del instrumento cuando el operario es reemplazado por una medición automática con la interfaz visual propuesta.

7.1.1.2. Ganancia de Resolución del Detector Hough

En cuanto al detector Hough, transformando el valor cuadrático medio de la Fig. 4.15 a segundos de arco:

$$R_{nH} = 0,036'', \quad (7.10)$$

Por otro lado, el valor cuadrático medio (D_{rmsH}) fue:

$$D_{rmsH} = \sqrt{\frac{\sum_k D_k^2}{25}} = 0,09'', \quad (7.11)$$

Nuevamente $R_{nH} < D_{rmsH}$, entonces se puede calcular la Ganancia de Resolución para el detector Hough G_H :

$$G_H = \frac{R}{R_{nH}} = \frac{0,5''}{0,036''} = 13,51 \approx 13, \quad (7.12)$$

Es importante remarcar que a pesar que la resolución de este detector es menor que la del Gaussiano, la medición es totalmente confiable. Esto queda demostrado por la linealidad con la cual están relacionados ambos métodos de medición. Aplicando un modelo lineal y obteniendo el coeficiente de Pearson para el mismo, se obtuvo un excelente grado de correlación ($r = 0,999$). En la Fig. 7.4 se muestra el modelo.

Ante las evidencias presentadas mediante la medición propuesta y con un grado de confiabilidad alto, ya que se usaron instrumentos trazables internacionalmente, se puede definir que el detector Hough es una alternativa confiable en una medición de este calibre.

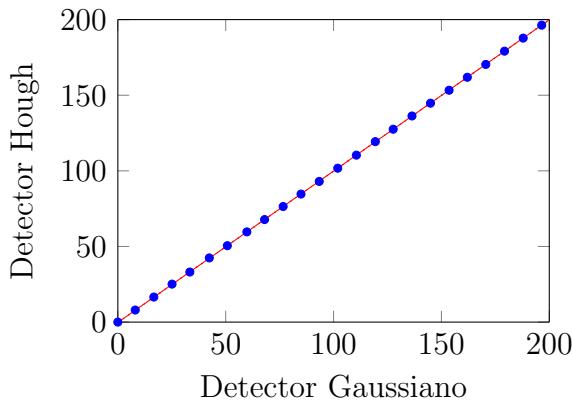


Figura 7.4: Comparación entre los métodos Gaussiano y Hough-subpíxel: Modelo lineal de la misma medición realizada con ambos métodos.

7.1.1.3. Ganancia en resolución de los detectores restantes.

En la Fig. 7.5 se grafican las características de detección con los detectores D_M , D_{WLS} y D_P . Si se lleva adelante el análisis anterior, se obtienen las siguientes ganancias en resolución: ($G_P = 4$), ($G_M = 6$) y ($G_{WLS} = 7$). A simple vista parecería que también se gana en resolución con estos detectores, sin embargo, el rango de discrepancias mostrado en la Fig. 7.5 indica que se está muy cerca de la resolución nativa del instrumento, cuestión que limita directamente su uso.

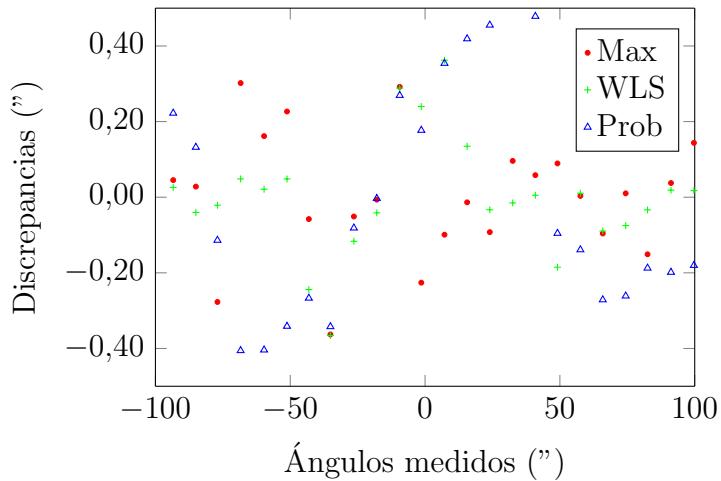


Figura 7.5: Características de detección de los detectores (D_M), (D_{WLS}) y (D_P). El rango de los detectores está muy cerca de los $\pm 0,5''$.

Los resultados de la Sección 4.8 se confirman. Si no se logran mejoras en

el filtro S-G, no pueden ser utilizados como parte del software de detección de líneas a nivel sub-píxel.

7.2. Incertidumbre

En esta sección se estudian los elementos que agregan incertidumbre a la medición y se presentan las correcciones a tener en cuenta para disminuirla. Este análisis permite determinar las características de la lente de la cámara en conjunto con el autocolimador y permite obtener la proyección correcta para futuras mejoras del sistema. En la misma línea, provee un procedimiento adecuado para que otros laboratorios puedan definir su propia interfaz. Entonces, este estudio se suma al ya explicado en la sección 3, comprendiendo todos los puntos necesarios para la creación de la interfaz.

De acuerdo al JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) [62], la incertidumbre combinada $u_c^2(y)$ está dada por:

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \\ &= u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_N^2; \quad u_i = \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| . u_{(x_i)}, \end{aligned} \quad (7.13)$$

Para poder aplicar Ec. (7.13) es necesario calcular cada una de las contribuciones a la incertidumbre que aparecen en el nuevo instrumento interfaz visual + autocolimador. En el caso ideal, la medición de interés está relacionada a n independientes y no correlacionadas “cantidades de influencia” x_k , $k = 1, 2, \dots, n$, a través de la relación funcional $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

En la práctica, en un procedimiento para determinar Y , las cantidades x_k tienen que ser medidas directamente, o simplemente estimadas, siempre y cuando ninguna de las mismas tenga una naturaleza aleatoria. Cualquier sea la aproximación abordada (medición o estimación) se tiene que llegar al conjunto de distribuciones de probabilidad, con sus varianzas asociadas $u^2(x_i)$, de la Ec. (7.13).

Dentro de las cantidades x_k que posee todo el sistema, se presentan:

- x_1 = Aproximación entre α y $\text{tg}(\alpha)$.
- x_2 = Temperatura.
- x_3 = Paralelismo del haz + Planitud espejo + Óptica del autocolimador.

- x_4 = Software + Ruido + Enfoque.
- x_5 = Filtro Savitzky-Golay (efecto Vignetting).
- x_6 = Posición de los píxeles en el CCD.
- x_7 = Linealidad de la escala + Óptica del autocolimador + Óptica de la cámara + Alineación de eje óptico.
- x_8 = Orientación de la matriz de píxeles respecto a la cruz.
- x_9 = Turbulencias del aire.
- x_{10} = Fuente luminosa + Fuente de alimentación.
- x_{11} = Procedimiento de Calibración (Incertidumbre de los patrones).

La Fig. 7.6 es un diagrama en bloques de las contribuciones principales. Algunas de las contribuciones no se pueden separar debido a que la línea que las delimita es difusa o totalmente inexistente debido a la complejidad del nuevo instrumento: autocolimador + interfaz, [63]. Sin embargo, se podrá presentar un estudio detallado de la mayoría de las componentes nombradas (excepto la x_{11} que se explicará en las conclusiones).

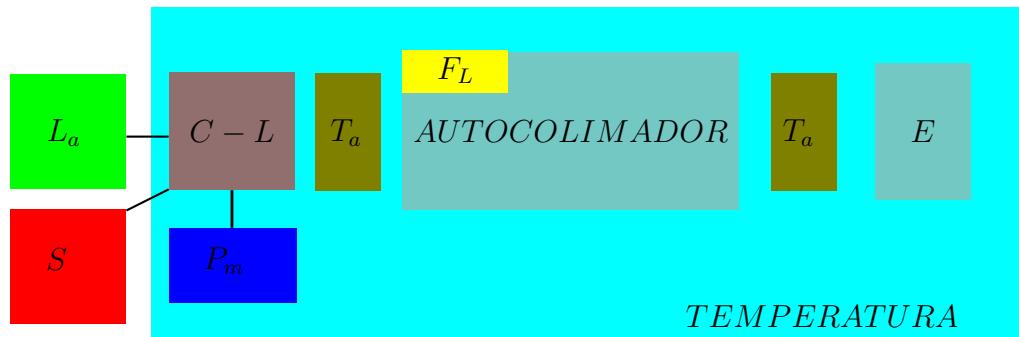


Figura 7.6: Diagrama en bloques de los factores que contribuyen a la incertidumbre final de la medición. L_a : línea de alimentación, $C - L$: conjunto Cámara-Lente, T_a : turbulencias en el aire, P_m : posicionamiento mecánico, S : software de detección, E : Espejo reflector y F_L : Fuente lumínica del autocolimador.

7.2.1. Aproximación entre α y $\operatorname{tg}(\alpha)$.

El autocolimador realiza la medición de acuerdo a la Ec. (7.14):

$$\tan(2 \cdot \alpha) = \frac{d}{f}, \quad (7.14)$$

Pero el software trabaja con la aproximación de esta ecuación. Como se miden ángulos pequeños, la tangente se puede aproximar como:

$$\alpha = \frac{d}{2f}, \quad (7.15)$$

Siendo d la lectura de las divisiones de la escala y f el foco del instrumento. Con un $\alpha = 30$ minutos (fondo de escala) se obtiene:

$$0,008 \text{ rad} = \frac{d}{2 \times 490 \text{ mm}} \Rightarrow d \approx 8 \text{ mm}, \quad (7.16)$$

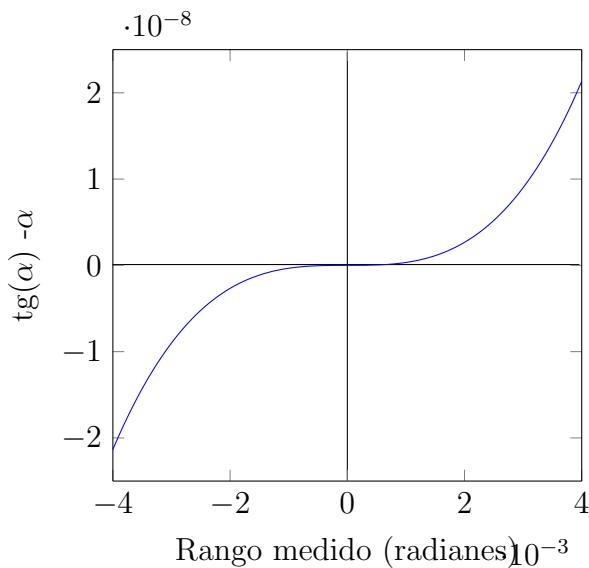


Figura 7.7: Gráfica de la función $\operatorname{tg}(\alpha) - \alpha$ en función de todo el rango del autocolimador.

Para averiguar la incertidumbre máxima se tiene que determinar cuál es la medición que la introduce. Midiendo a fondo de escala y trabajando en

radianes, para luego transformar en segundos, se puede determinar cual es el error máximo de la aproximación:

$$\epsilon_{\alpha_{MAX}} = \operatorname{tg}(\alpha) - \alpha = 0,046'', \quad (7.17)$$

La Fig. 7.7 es la gráfica del error $\epsilon_{\alpha_{MAX}}$ de la Ec. 7.17 para los diferentes ángulos medidos en todo el rango del instrumento. Para corregir esta incertidumbre (calibrar), se realiza lo siguiente:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{d}{2f} \right), \quad (7.18)$$

De este modo u_1 desaparece.

7.2.2. Temperatura.

Como ya se expresó, el laboratorio tiene un sistema de aclimatación que mantiene la estabilidad térmica con una variación de $\pm 0,5^\circ C$ y centrado en $20^\circ C$. Oscila en su comportamiento tal como lo muestra la Fig. 7.8.

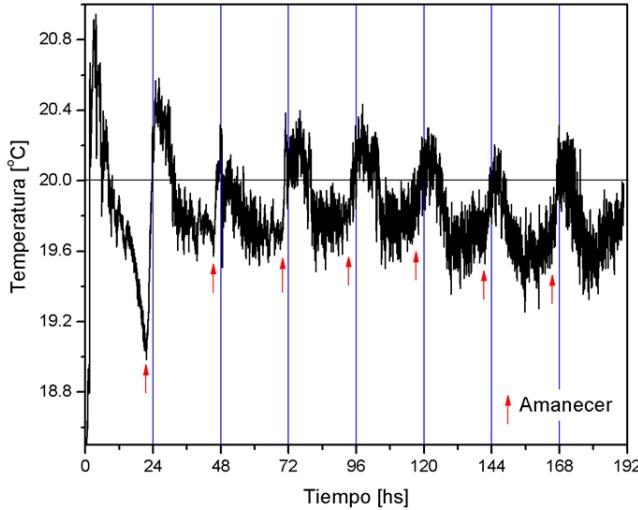


Figura 7.8: Comportamiento de la temperatura en el Laboratorio CEME-TRO.

En el peor de los casos, se tiene un gradiente de temperatura en función del tiempo determinado por:

$$G_{T_{MAX}} = \frac{0,05^\circ C}{min}, \quad (7.19)$$

Dados los coeficientes de dilatación de los materiales principales que conforman la cámara y el autocolimador:

- $\alpha_{acero} = 10 \times 10^{-6} \text{ } 1/\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\alpha_{aluminio} = 21 \times 10^{-6} \text{ } 1/\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\alpha_{silicio} = 2 \times 10^{-6} \text{ } 1/\text{ }^{\circ}\text{C}$

se puede calcular que tanto se dilatarían con respecto a la temperatura en una medición estándar, que dura aproximadamente 5 minutos. Este tiempo es el estimado para tomar dos puntos, referencia y desplazamiento angular. Con la Ec. (7.20) se pueden calcular las dilataciones de cada material. La variación máxima de temperatura en 5 minutos de medición, según Ec. (7.19) es $\Delta T = 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$L_f = L_0(20\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (1 + \alpha_{mat} \cdot \Delta T), \quad (7.20)$$

A partir de la Ec. (7.15), considerando a α y f como funciones de la temperatura y con valores $f = 490\text{mm}$ y $d = \alpha_{max} * 2 * f \approx 8\text{mm}$, se puede calcular la siguiente fórmula:

$$u_2 = \sqrt{\left| \frac{\partial \alpha}{\partial d} \cdot \frac{\partial d}{\partial T} \right|^2 \cdot u_T^2 + \left| \frac{\partial \alpha}{\partial f} \cdot \frac{\partial f}{\partial T} \right|^2 \cdot u_T^2}, \quad (7.21)$$

Siendo:

$$\frac{\partial d}{\partial T} = \alpha_{silicio}; \quad \frac{\partial f}{\partial T} = \alpha_{acero} \text{ y } u_T = \Delta T,$$

Se obtiene:

$$u_2 = 0,0001'', \quad (7.22)$$

Por otro lado, la cámara, según el fabricante, no debe superar los $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante su operación, por lo tanto, el sistema de aclimatación del laboratorio no introduce derivas térmicas que modifiquen la temperatura de trabajo de la cámara.

7.2.3. Paralelismo del haz + Planitud espejo + Óptica del autocolimador.

La planitud del espejo pulido, como toda superficie, no es perfecta. Estas imperfecciones en la planitud pueden afectar la imagen de la cruz, haciendo que esta aparezca fuera de foco. Esto se debe al paralaje óptico, que produce que no haya coincidencia entre el plano de la cruz y el plano focal del objetivo. Esta desalineación, si no se corrige, produce resultados incorrectos en todas las mediciones. Para corregir la incertidumbre introducida por este paralaje, el autocolimador posee en su sistema óptico un dispositivo compensador de paralaje, (ver Fig. 7.9).

De acuerdo al siguiente método de calibración se reduce esta incertidumbre: cuando se trabaja con el espejo otorgado por Nikon, se posiciona la escala del anillo compensador en la división número 100 y se mueve a partir de allí en un rango de $\pm 0,5$ divisiones hasta que el haz aparece en foco. Con esta corrección, la incertidumbre u_3 de la planitud del espejo queda incorporada en la incertidumbre de la imagen (ver Sección 7.2.4).



Figura 7.9: Anillo compensador de paralaje del autocolimador Nikon 6B. Se puede observar como el valor 100 de la escala ha sido desplazado en 0,5 divisiones para calibrar la incertidumbre nombrada.

7.2.4. Software de Detección + Ruido + Enfoque.

Las incertidumbres estudiadas de acuerdo al detector Gaussiano indican que el menor ángulo que resuelve el software es 0,012 segundos de arco. En otras palabras, la dispersión cuadrática media del software para cada medición es $s = 0,012''$.

Como las imágenes se promedian N veces ($N = 20$):

$$u_4 = \frac{s}{\sqrt{N}} = 0,0025'', \quad (7.23)$$

7.2.5. Filtro Savitzky-Golay (Efecto Vignetting).

Usando la Ec. (6.7), que corresponde al corrimiento del centroide (Δ_B) por los efectos del Vignetting, u_5 se puede estimar en segundo de arco, como:

$$u_5 = \frac{2 * \Delta_B}{7} = 0,001'', \quad (7.24)$$

El factor 7 se introduce en base a que el corrimiento afecta de forma simultánea a los 8 segmentos por corte ortogonal cuando se segmenta la escala.

7.2.6. Posición de los píxeles en el CCD.

La construcción de la matriz de píxeles sufre de pequeñas irregularidades que derivan en una posición dispar de los píxeles en el sensor. En Just et al. [64], se estudió esta deriva a través de un procedimiento de medición realizado con un comparador. En este trabajo se toman pasos regulados de medición que determinaron las irregularidades en las líneas de píxeles, concluyendo que se llegan a introducir incertidumbres similares a los 0,002 segundos de arco. Se toma este valor como representativo:

$$u_6 = 0,002'', \quad (7.25)$$

7.2.7. Linealidad de la escala + Óptica del autocolimador + Óptica de la cámara + Alineación de eje óptico.

Se estudió el comportamiento del conjunto óptica del autocolimador, óptica de la cámara y su correspondiente sistema de posicionamiento mecánico. El análisis se tiene que dividir en el comportamiento del sistema cuando se traslada la cámara en un plano (δ_x, δ_y) como muestra la Fig 7.10 (manteniendo el desplazamiento angular (α, β) fijo) y cuando la cámara tiene un desplazamiento angular manteniendo el desplazamiento (δ_x, δ_y) fijo.

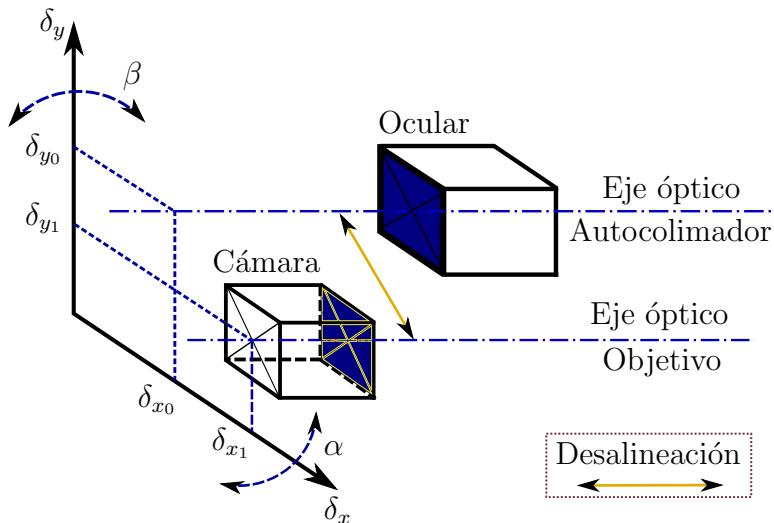
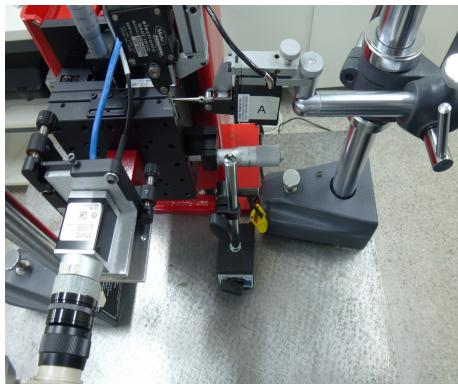


Figura 7.10: Esquema del montado de las mediciones de la incertidumbre u_7 . Los planos en color caracterizan al plano CCD y al plano imagen virtual del autocolimador. El punto $(\delta_{x0}, \delta_{y0})$ corresponde a la referencia inicial. Al correrse la cámara hacia $(\delta_{x1}, \delta_{y1})$ se produce la desalineación. Los planos (δ_x, δ_y) y (α, β) se estudian por separado.

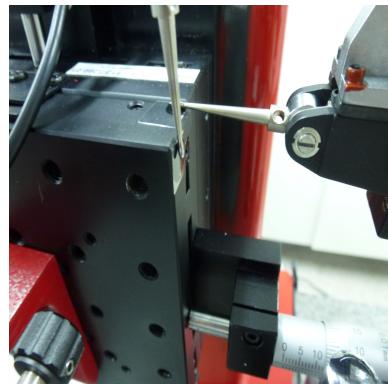
7.2.7.1. Análisis del desplazamiento translacional (δ_x, δ_y) .

El experimento montado para este análisis se puede ver en la Fig. 7.11. Se midieron los desplazamientos del plano (δ_x, δ_y) de la cámara + Lente con un conjunto de 3 palpadores de alta resolución Mahr-Federal LVDT. Estos palpadores (gage head) pueden medir en un rango de $\pm 0,250mm$ con una resolución de $100nm$. El tamaño del píxel de nuestra cámara es $4400nm$, por lo cual estos palpadores pueden medir desplazamientos a nivel sub-píxel.

La primera cuestión a trabajar cuando se configura una medición con este tipo de instrumental está relacionada a la rugosidad de las superficies



(a) Conjunto de palpadores para medir traslación.



(b) Vista de los palpadores Mahr Federal.

Figura 7.11: Experimento de medición para el cálculo de la incertidumbre translacional de la cámara.

a medir. La resolución de los palpadores es muy alta y si no se tienen las precauciones necesarias, la experiencia de medición incluye el desplazamiento buscado más la propia rugosidad del material en contacto con el palpador. Dado que se buscan medir pasos regulares, si no se tiene en cuenta esta situación, la medición es errónea. En la Fig. 7.11b se puede ver como se agregó vidrio pulido de $0,3\text{mm}$ de espesor en la superficie en contacto con cada “gage head” para minimizar al máximo la rugosidad del material.

El sistema translacional se movió en un rango de $\pm 0,15\text{mm}$, tanto vertical como horizontalmente, armando una grilla de captura mecánicamente, manteniendo la cámara en foco y asegurando que el campo visual de la misma no capture el borde del ocular (cuestión que introduce sombras indeseadas). Con cada movimiento, se fue capturando en forma de matriz, un conjunto de 121 puntos (incluido el centro) que corresponden a 121 imágenes de la escala. En la Fig. 7.12 se marcan los puntos que se estudiaron para cada captura. Estas capturas sirvieron para averiguar si la detección de los segmentos $(x_1, x_2, \dots, x_{15})$ y $(y_1, y_2, \dots, y_{12})$ de la escala sufrían algún tipo de corrimiento a medida que se movía el eje óptico de la cámara con respecto al eje óptico del instrumento. Con este objetivo en mente, se armó un software que identificara cada uno de los segmentos a medida que se presentaba un corrimiento. De esta manera se pudo estudiar el comportamiento general de la escala.

Estos puntos de la imagen se pueden determinar para cada posición de la cámara. Los desplazamientos de la cámara se definen con δx y δy . Se parte de $\delta x = 0\text{mm}$ y $\delta y = 0\text{mm}$ (posición inicial de la cámara, como se describe en la Fig. 7.10). Los incrementos de los δ son de $0,1\text{mm}$ y sus signos

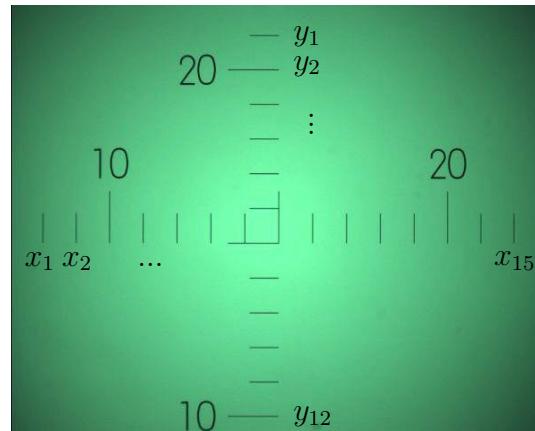


Figura 7.12: Puntos de la escala de medición estudiados para poder comprender el desplazamiento que sufre cada segmento de la escala a medida que la cámara está desalineada con respecto al ocular del autocolimador. Se estudian 12 segmentos verticales y 15 segmentos horizontales. Los segmentos pertenecen al plano (X, Y) del CCD.

dependen según se corra a la izquierda o la derecha de $\delta x = 0$ (lo mismo con la referencia y).

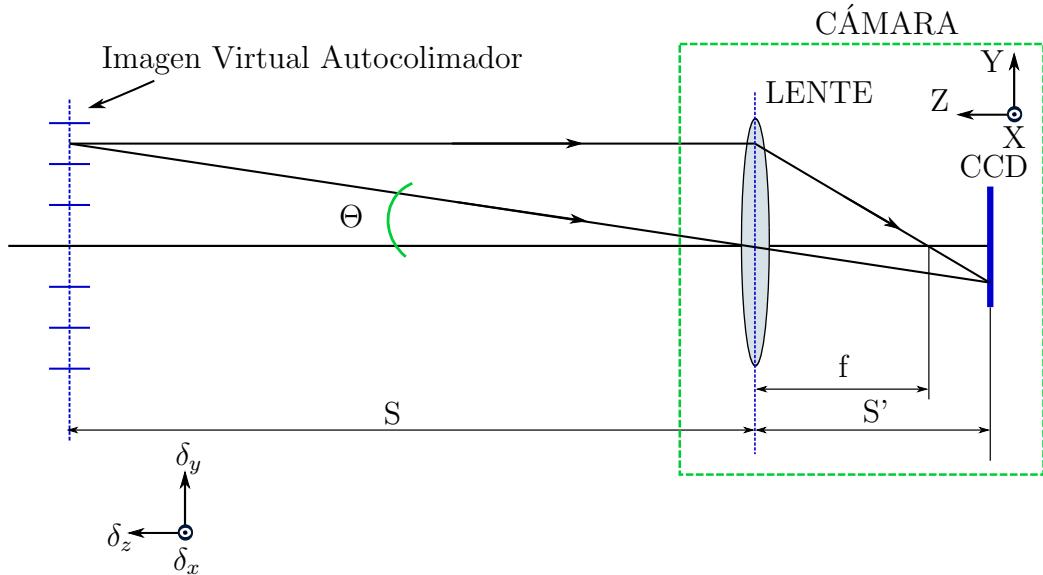


Figura 7.13: Esquema óptico de la experiencia de medición realizada.

Con la Fig. 7.13 se expresa el significado óptico de la experiencia: el sistema de coordenadas $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ está fijo al laboratorio. Como el autocolimador está referenciado al laboratorio, la imagen virtual del mismo lo está también.

Por lo tanto, si se mueve en forma controlada la cámara, el sistema $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ permite medir las variaciones de posición relativa de la imagen capturada por la cámara respecto de la imagen virtual del autocolimador. Se supone $\delta_z = cte$ (no sufre variaciones distinguibles en la medición), en otras palabras, la distancia cámara-ocular del autocolimador permanece invariante durante el experimento, lo cual equivale a suponer que el eje δ_z es paralelo al eje óptico del autocolimador. Finalmente, el sistema de coordenadas (X, Y, Z) está fijo al CCD de la cámara.

Con estas convenciones se trabajan los datos de posición para construir las siguientes funciones:

$$\begin{aligned} F_1(\delta_x, \delta_y) &= X_1(\delta_x, \delta_y) - X_1(0, 0), \\ F_2(\delta_x, \delta_y) &= X_2(\delta_x, \delta_y) - X_2(0, 0), \\ &\vdots \\ F_n(\delta_x, \delta_y) &= X_n(\delta_x, \delta_y) - X_n(0, 0), \end{aligned} \quad (7.26)$$

$F_n(\delta_x, \delta_y)$ es una función que graficada corresponde a una superficie en el espacio 3D. La superficie graficada, como ya se expresó, estará representada por 121 puntos.

Por ejemplo, si se analiza F_1 , esta describe como se corre la primera marca del eje X del CCD (x_1) cuando se desalinea translacionalmente la cámara. De esta manera, cuando los ejes X y δ_x están espacialmente en la misma dirección se cumple:

$$\frac{\partial F_1}{\partial \delta_x} \Big|_{\delta_x, \delta_y} \neq 0, \quad (7.27)$$

y

$$\frac{\partial F_1}{\partial \delta_y} \Big|_{\delta_x, \delta_y} = 0, \quad (7.28)$$

Esta particularidad se produce porque la gráfica 3D posee forma de plano y está definida por:

$$F(\delta_x, \delta_y) = a_i + b_i \cdot \delta_x + c_i \cdot \delta_y, \quad (7.29)$$

A modo de ejemplo, la Fig. 7.14 muestra el plano que se produjo luego de hacer la medición y ver el comportamiento del punto y_1 en particular.

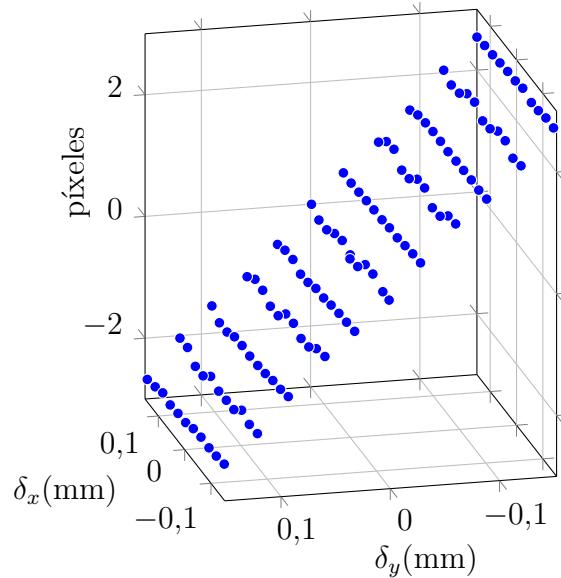


Figura 7.14: Plano obtenido al medir el comportamiento del punto y_1 luego de producirse un corrimiento de la cámara en el plano (δ_x, δ_y) de la Fig. 7.10.

Por otro lado, aplicando la Ec. (7.27), a la Ec. (7.29) se obtiene:

$$\frac{\partial F_i}{\partial \delta_x} = b_i, \quad (7.30)$$

El análisis de todos los valores b_i de la Ec. (7.30) arroja resultados cruciales. Debido a que los movimientos son todos relativos, las funciones $F_n(\delta_x, \delta_y)$ definidas anteriormente se pueden interpretar como la variación de la posición de la imagen sobre el CCD cuando se realizan variaciones de la posición de la imagen virtual de la escala del autocolimador (dejando fija la cámara). O sea, es como si se rotara el espejo E (ver Fig. 2.4).

Tal como se mostró anteriormente (ver Fig. 7.14) las funciones $F_n(\delta_x, \delta_y)$ son funciones lineales para pequeñas variaciones de δ_x y δ_y , que graficadas, tienen forma de plano. Esto permite determinar experimentalmente las Ec. 7.27 y 7.28. Si se elige $\delta_y = 0$ y se observan las variaciones en la dirección δ_x se puede construir el gráfico de la Fig. 7.15. Los puntos en azul indican la derivada parcial en δ_x (Ec. 7.27) para cada una de las líneas de la escala del autocolimador en la dirección δ_x . La línea roja es un ajuste por cuadrados mínimos mediante el polinomio:

$$\frac{\partial F}{\partial \delta_x} = A_0 + A_1(X - X_0) + A_2(X - X_0)^2 + A_3(X - X_0)^4, \quad (7.31)$$

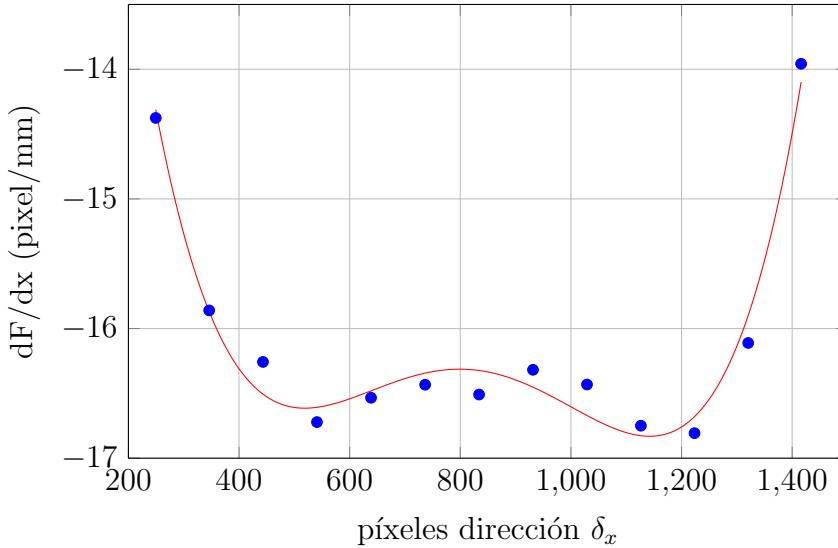


Figura 7.15: Análisis del conjunto de planos obtenidos para la medición translacional (δ_x, δ_y). Curva de calibración para este tipo de desplazamiento.

Los valores de X corresponden a píxeles en la dirección X del CCD.

Un sistema óptico ideal (autocolimador + cámara) debería satisfacer $\partial F/\partial\delta_x = cte$, sin embargo, como aparecen aberraciones ópticas en cada una de las lentes del sistema, es natural pensar a la función F como un polinomio en función de la distancia radial ρ entre el eje óptico y un punto sobre la imagen [58, p. 253]. Esto se debe a que cada rayo del haz de luz que pasa por la periferia de los lentes no es enviado al foco exacto como muestra la Fig. 7.13, sino que sufre un corrimiento, distorsionando la imagen capturada por el CCD, [65, p. 233]. Esto se ve claramente en la Fig. 7.15 que tiene la forma de las aberraciones esféricas de la lente.

Para nuestro caso, $\rho = a(X - X_0)$ donde a es el tamaño del píxel ($a = 4,4\mu m$). Utilizando este parámetro, los valores de los coeficientes obtenidos, con un 95 % de confianza son:

$$\begin{aligned} X_0 &= (820 \pm 20) \text{ pixels}, \\ A_0 &= (-16,3 \pm 0,2) \text{ pixels/mm}, \\ A_1 &= (-3 \pm 5) \times 10^{-4} \text{ 1/mm}, \\ A_2 &= (-8 \pm 3) \times 10^{-6} \text{ 1/(pixels.mm)}, \\ A_3 &= (4,3 \pm 0,9) \times 10^{-11} \text{ 1/(pixels}^3.\text{mm}), \end{aligned}$$

Para que estos valores resulten útiles para hacer una estimación de la calibración del autocolimador es necesario transformarlos. Si se elige un valor

máximo de desplazamiento de la cámara $\delta_x = 1\text{mm}$, sobre el CCD se tiene un corrimiento de la línea central de la escala igual a $\Delta X = 16,3$ píxeles. De acuerdo al valor de calibración de la escala para la cámara CCD dada por la Ec. (6.23), se sabe que cada píxel equivale a una rotación del espejo de $0,62''$. Por lo tanto, el desplazamiento lineal de 1mm de la escala equivale a una rotación del espejo de:

$$\alpha = 16,3 \times 0,62'' = 10,06'', \quad (7.32)$$

Con este valor de α es posible transformar las unidades de $\partial F/\partial\delta_x$ de píxeles/mm a píxeles/arcseg:

$$\frac{\partial F}{\partial\alpha} = \frac{\partial F}{\partial\delta_x} \frac{\partial\delta_x}{\partial\alpha} = \frac{1\text{mm}}{10,06''} \frac{\partial F}{\partial\delta_x}, \quad (7.33)$$

Como se desea obtener una calibración del autocolimador, se debe obtener la función $\Delta\alpha(X) = \alpha(x) - \alpha(0)$, la cual, a partir de la función inversa de la $\partial F/\partial\alpha$ resulta:

$$\Delta\alpha(X) = \int_0^X \left[\frac{\partial F}{\partial\alpha} \Big|_{X'} \right]^{-1} dX' = \int_0^X \frac{1}{\frac{\partial F}{\partial\alpha}} dX', \quad (7.34)$$

Después de transformar los datos para obtener:

$$\left[\frac{\partial F}{\partial\alpha} \Big|_{X'} \right]^{-1},$$

y ajustar nuevamente un polinomio (como el indicado anteriormente) se obtiene, con un 95 % de confidencia el polinomio:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial X} = C_0 + C_1(X - X_0) + C_2(X - X_0)^2 + C_3(X - X_0)^4, \quad (7.35)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} X_0 &= (820 \pm 20) \text{ pixels}, \\ C_0 &= (-0,617 \pm 0,008) \text{ arcseg/pixel}, \\ C_1 &= (1 \pm 2) \times 10^{-5} \text{ arcseg/pixel}^2 \\ C_2 &= (4 \pm 1) \times 10^{-7} \text{ arcseg/pixel}^3 \\ C_3 &= (-1,8 \pm 0,4) \times 10^{-12} \text{ arcseg/pixel}^5, \end{aligned}$$

Insertando este polinomio en el integrando de la Ec. (7.34) resulta la función de calibración:

$$\Delta\alpha(X) = C_0(X - X_0) + \frac{1}{2}C_1(X - X_0)^2 + \frac{1}{3}C_2(X - X_0)^3 + \frac{1}{5}C_3(X - X_0)^5, \quad (7.36)$$

El término $C_0(X - X_0)$ es el término lineal correspondiente al centro de la escala y es el único que se tendría si el sistema fuese ideal. Gráficamente, en la Fig. 7.16, se puede apreciar el apartamiento de la linealidad $\Delta\alpha$ (tres últimos términos de la derecha de la Ec. (7.36)) y se observa la asimetría en la óptica en la dirección analizada: $\Delta\alpha(X = 350) \neq \Delta\alpha(X = 1300)$.

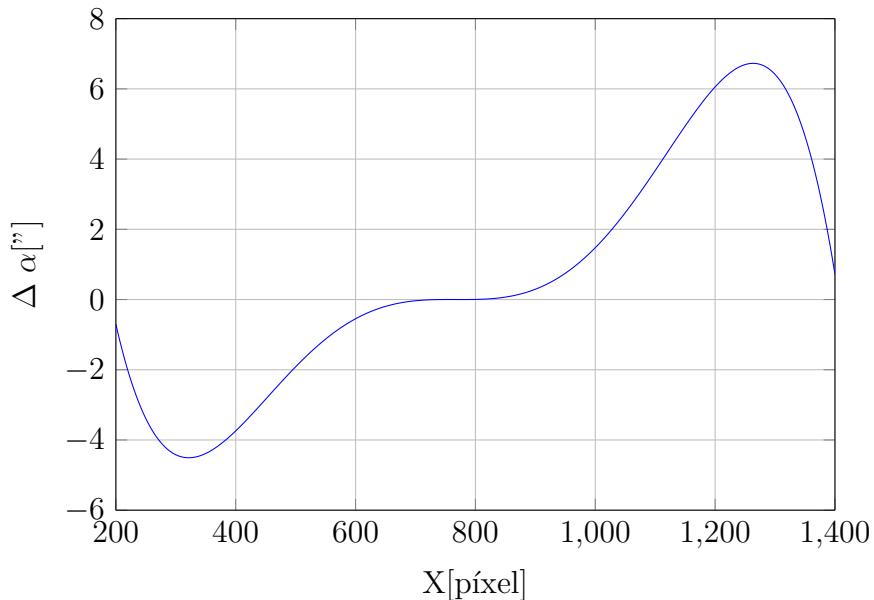


Figura 7.16: Gráfica de $\Delta\alpha$ que indica el apartamiento de la linealidad del lente.

Otra conclusión muy importante que arroja la Fig. 7.16 es que el método de centrado de la imagen a medir usando el efecto del Vignetting como parámetro, es correcto. El centro del CCD esta en 800 píxeles y el del ajuste se sitúa en 820. Los 20 píxeles representan casi $90\mu m \simeq 0,1mm$, con lo cual, si se fabrica en el futuro un montaje que deje concéntrico el autocolimador con las lentes dentro de los $0,02mm$ (valor de referencia de fabricación) la medición se podrá llevar adelante dentro de los rangos esperados.

Finalmente es importante subrayar que se debe mejorar la lente de la cámara, la cual posee un 3 % de distorsión según el fabricante. Se deberá su-

plantar por una lente de 0,1 % de distorsión (aún cuando su costo sea alto). Reemplazar la lente de 3 % de distorsión por una de 0.1 % permitirá pasar de los 3" a los 0,1" de alinealidad (una cantidad acorde a las mediciones con autocolimadores digitales). Por otro lado, si se realiza una calibración lineal de la escala, las incertidumbres asociadas pueden igualarse a los apartamientos de la linealidad mostrados en la Fig. 7.16.

Del estudio anterior surge la incertidumbre u_7 , que posee los siguientes valores:

$$\begin{aligned} u_7 &= 0,2'' \quad |\Delta\alpha| < 60'' \\ &= 6'' \quad \text{Toda la escala,} \end{aligned} \quad (7.37)$$

7.2.7.2. Análisis del desplazamiento angular.

Para esta experiencia se siguió un procedimiento similar al desplazamiento translacional. En la Fig. 7.17 se puede ver la configuración planteada. Se utilizó la pieza de montaje cuadrada de Edmund Optics que proporciona una variación angular mediante 3 tornillos. Dejando uno fijo, se movieron los otros dos para crear los dos desplazamientos (α, β) y se armó una grilla de captura de corrimiento angular que incluyera un desplazamiento simultáneo de los dos ángulos del nuevo plano (α, β) de la Fig. 7.10.



(a) Montaje para medir desplazamientos angulares.



(b) Vista de los palpadores Mahr Federal.

Figura 7.17: Experimento de medición para el cálculo de la incertidumbre angular de la cámara.

El objetivo principal de este montaje fue determinar si este tipo de desplazamiento angulares de la cámara con respecto a su referencia introducía

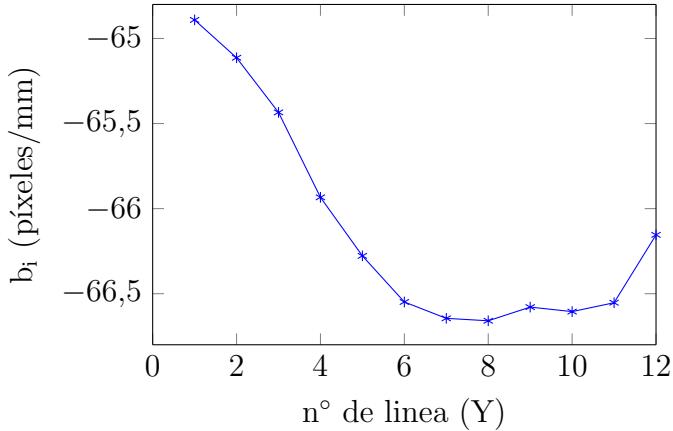


Figura 7.18: Análisis del conjunto de planos obtenidos para la medición angular (α, β). Curva de calibración para este desplazamiento.

algún tipo de alinealidad que limitara la medición. La forma general de los planos resultó ser la misma que los presentados anteriormente para el desplazamiento translacional, por lo cual, se pudo armar una curva representativa de la alinealidad. En esta se puede observar nuevamente el comportamiento del lente de acuerdo a sus aberraciones esféricas (Fig. 7.18).

7.2.8. Orientación de la matriz de píxeles respecto a la cruz.

En la Sección 3.3.4 se explicó el procedimiento de alineación de la cruz con respecto a los píxeles del CCD y en la Sección 4.9 se hizo un estudio de la detección a medida que se inclinaba la línea. Queda determinar, para el peor de los casos de calibración, correspondiente a una inclinación de 2 píxeles, si el ángulo medido varía, introduciendo una incertidumbre en toda la escala. Para esto, la Fig. 7.19 explica la problemática: la cruz con líneas de trazo entrecortado corresponde a la posición ideal, mientras que la cruz inclinada, en trazo continuo, es la que tiene una inclinación α producida por la desalineación de 2 píxeles. Esta inclinación produce una diferencia d en la medición del autocolimador. Haciendo el cálculo correspondiente para una medición de fondo de escala, se obtiene:

$$u_8 = 0,0006'', \quad (7.38)$$

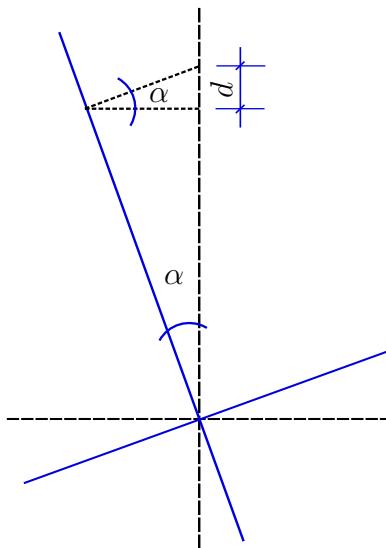


Figura 7.19: Alineación final de la cruz con un offset de 2 píxeles que produce un ángulo α de inclinación.

7.2.9. Turbulencias en el aire + Espejo reflector.

Para corroborar si las turbulencias del Aire en conjunto con el espejo reflector introducían algún tipo de incertidumbre se realizó una experiencia de captura que permitiera tomar una secuencia de imágenes de la cruz a través del tiempo con el objetivo de estudiar si la posición de la misma cambiaba por efectos de las corrientes de aire en el laboratorio.

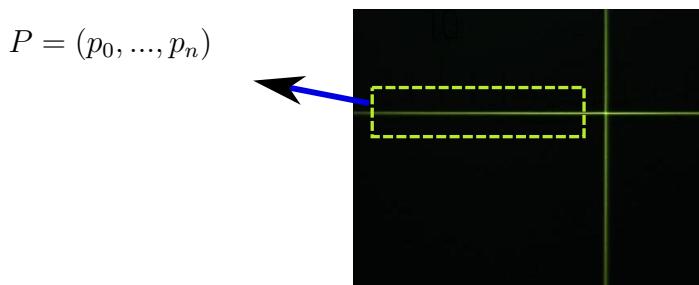


Figura 7.20: Detección de las posiciones horizontales de la cruz para estudiar el comportamiento de la incertidumbre de acuerdo a las turbulencias del aire y la reflexión en el espejo. Se miden n posiciones a través del tiempo.

Se mantuvo el espejo fijo en una posición angular determinada, a medio metro del autocolimador y se tomaron 50 imágenes espaciadas una de la otra en un tiempo $t = 5\text{seg}$. Se tenía que corroborar que la posición de la cruz no

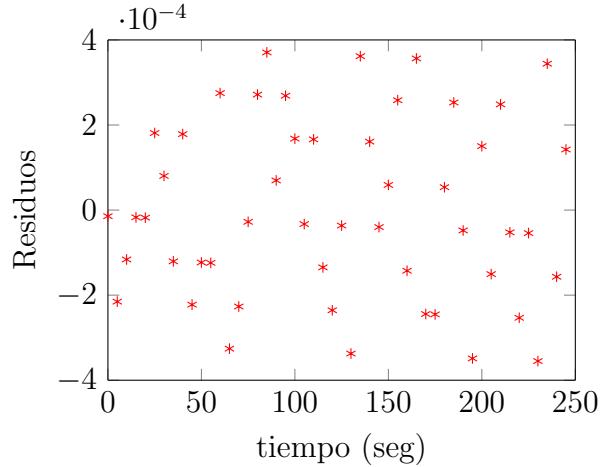


Figura 7.21: Gráfica de los residuos obtenidos luego de definir un modelo lineal para los datos de posición de la línea horizontal bajo supuestas turbulencias del aire.

sufría cambios. En la Fig. 7.20 se muestra la captura de la línea horizontal y sus n posiciones detectadas a través del tiempo y en la Fig. 7.21 se grafican los residuos luego de definir un modelo lineal para los datos de la medición. Las posiciones sólo variaron en el cuarto decimal, cuestión que se nota en los valores de los residuos. La variación de la posición obtenida con esta experiencia fue de $\pm 0,002$ segundos de arco, por lo cual:

$$u_9 = 0,002'', \quad (7.39)$$

7.2.10. Fuente luminosa + Fuente de alimentación.

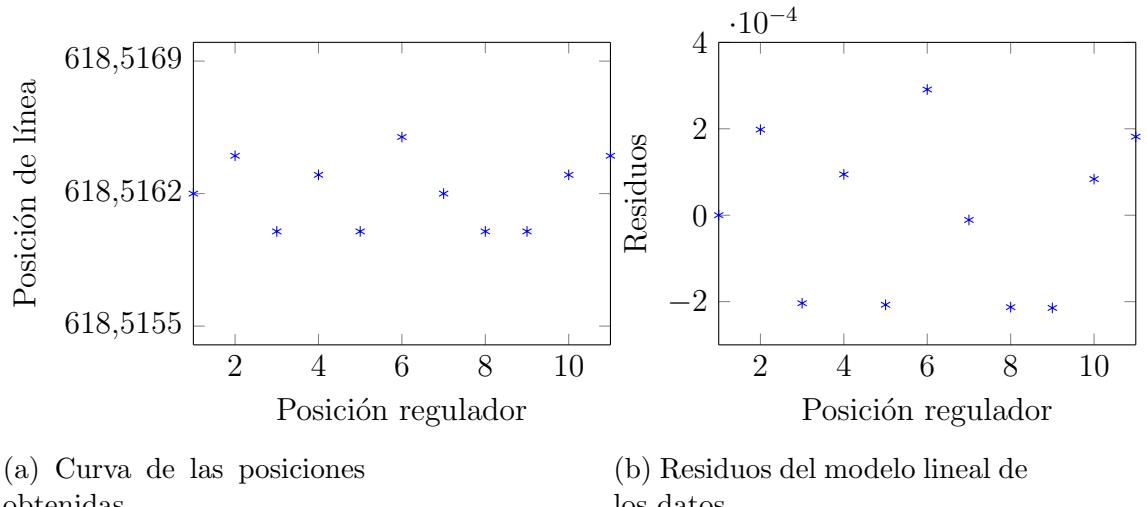
El autocolimador Nikon posee una fuente luminosa regulable, encargada de generar el haz de luz de la cruz. En este estudio se calcula la incertidumbre introducida por la variación en intensidad del haz. En la Fig. 7.22 se pueden distinguir tanto la fuente como su regulador. A través del regulador se pueden formar 11 diferentes anchos de la cruz.

Se midió la posición de la cruz en un ángulo arbitrario para cada una de las 11 posiciones del regulador. En la Fig. 7.23 se muestran los datos obtenidos y los residuos del modelo lineal aplicado a los mismos. La desviación cuadrática media del modelo es de $\pm 0,0001''$, por lo cual:

$$u_{10} = 0,0001'', \quad (7.40)$$



Figura 7.22: Autocolimador Nikon en el cual se resalta la fuente generadora del haz y su regulador.



(a) Curva de las posiciones obtenidas.

(b) Residuos del modelo lineal de los datos.

Figura 7.23: Posiciones obtenidas de la línea horizontal de la cruz a medida que se cambia la intensidad de la fuente luminosa junto con los residuos que surgen de aplicar un modelo lineal.

Cabe destacar que la línea de alimentación no introduce variaciones en las capturas realizadas con la cámara CCD. La fuente de alimentación de la cámara funciona establemente con 12 VDC ($\pm 10\%$) y un ripple $< 1\%$. Dentro de estos rangos, las imágenes nos sufren distorsiones ya que los datos generados en el ADC poseen la calidad descrita en la hoja de datos entregada por el fabricante.

7.2.11. Incertidumbre final.

La incertidumbre final, definida por la Ec. (7.13), es la suma de cada una de las contribuciones de la siguiente lista:

- $x_1 = \text{Aproximación entre } \alpha \text{ y } \text{tg}(\alpha) \Rightarrow u_1 = 0.$
- $x_2 = \text{Temperatura} \Rightarrow u_2 = 0,0001''.$
- $x_3 = \text{Paralelismo del haz} + \text{Planitud espejo} + \text{Óptica del autocolimador} \Rightarrow u_3 = \text{Incluída en } u_4.$
- $x_4 = \text{Software} + \text{Ruido} + \text{Enfoque} \Rightarrow u_4 = 0,0025''.$
- $x_5 = \text{Filtro Savitzky-Golay (efecto Vignetting)} \Rightarrow u_5 = 0,001''.$
- $x_6 = \text{Posición de los píxeles en el CCD} \Rightarrow u_6 = 0,002''.$
- $x_7 = \text{Linealidad de la escala} + \text{Óptica del autocolimador} + \text{Óptica de la cámara} + \text{Alineación de eje óptico} \Rightarrow u_7 = 0,2'' \text{ para rango de 1 minuto y } 6'' \text{ para todo el rango restante.}$
- $x_8 = \text{Orientación de la matriz de píxeles respecto a la cruz} \Rightarrow u_8 = 0,0006''.$
- $x_9 = \text{Turbulencias del aire} \Rightarrow u_9 = 0,002''.$
- $x_{10} = \text{Fuente luminosa} + \text{Fuente de alimentación} \Rightarrow u_{10} = 0,0001''.$

Entonces, para el rango de 1 minuto:

$$u_c \approx (0,0073'') + (0,2'') \approx 0,2'', \quad (7.41)$$

El primer término de la suma corresponde a todas las x_k menos la x_7 (que se expresa por el segundo término). Claramente los errores por alinealidad introducidos por la óptica son los que determinan el valor de la incertidumbre final (que aumenta hasta los $6''$ para el rango superior al minuto de arco). Si se mejora la calidad de la lente, la u_c disminuirá notablemente.

Es importante mencionar el análisis no incluyó la incertidumbre de calibración u_{11} relacionada a los patrones angulares, ya que este trabajo se centró en el estudio detallado del funcionamiento del autocolimador + interfaz visual.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo futuro

La interfaz se creó para mejorar la resolución de las mediciones realizadas con un Autocolimador Nikon 6B/6D de campo oscuro así como también para eliminar los errores de paralaje y sistemáticos introducidos por el operario humano. Los resultados indican que el incremento en la resolución es de hasta 40 veces más que la del instrumento sin interfaz visual.

La clave para la medición del ángulo digitalmente, a través de un procesamiento de imágenes, es el uso de secciones transversales de la imagen, que corresponden a los datos de la matriz que incluyen la información de las líneas que componen la retícula de medición. Estas secciones se modelaron a través de un ajuste con funciones gaussianas continuas.

Para obtener el perfil de las líneas se realiza un corte de las mismas en la dirección de máximo gradiente, tomando una vecindad de acuerdo a una detección gruesa inicial con la Transformada Hough Convencional u otro método de los propuestos en todo este trabajo. Las funciones gaussianas continuas que se obtienen con el ajuste poseen tres parámetros de utilidad. El más importante de ellos, el centroide b , permite determinar la posición de cada línea de la escala y de la cruz de la retícula de medición con una resolución a nivel sub-píxel. Esta implementación permite superar la barrera impuesta por la resolución espacial a nivel píxel de la cámara utilizada, aumentando directamente las prestaciones del sensor sin necesidad de cambiarlo.

La creación de este algoritmo se llevó a cabo mediante un riguroso proceso de análisis, utilizando una simulación general. En esta se estudió detalladamente el comportamiento de varios detectores de líneas a nivel sub-píxel y se crearon un conjunto de líneas simuladas con un corrimiento a la centésima de píxel con diferentes niveles de ruido y con inclinaciones varias (emulando así el comportamiento de las líneas de la retícula de medición del instrumento). La elección, utilizando toda la información recopilada, permitió la definición del algoritmo óptimo y además, dejó expresado el margen de crecimiento para

los otros estudiados.

Por otro lado, en este procedimiento de simulación, se presentó por primera vez la Transformada Hough a niveles de gris sub-píxel, que por sí misma, permite una ganancia en resolución de 13 veces la resolución nativa del instrumento sin interfaz, que como se demostró, está íntimamente relacionada a la resolución espacial de la cámara (con una cámara de mayor resolución se obtiene una función densidad de mayor información, por lo cuál la resolución final es mayor).

Para corroborar todos los desarrollos introducidos en la simulación, se desarrolló una experiencia controlada utilizando instrumentos trazables a estándares internacionales. De esta manera, mediante el uso de un nivel electrónico se pudo comparar la eficiencia del nuevo instrumento. Se generaron varias inclinaciones angulares y se midieron simultáneamente con el nivel electrónico y con el conjunto interfaz visual + autocolimador.

Con los datos obtenidos en la experiencia de medición se efectuó un estudio del comportamiento de la detección cuando se pasa de los niveles RGB de formación del color a los niveles de gris (con los cuales trabajan los algoritmos). La detección no varía por este cambio de formato. Esto nos permite concluir que no hace falta comprar una cámara con un filtro Bayer sino que es más adecuado invertir el dinero en la resolución espacial y en intensidad de la cámara monocromática.

En cuanto a la mejora de la imagen mediante el filtro Savitzky-Golay, se obtuvieron imágenes con valores de S/N cercanos a los 24dB luego de utilizar el procedimiento (cuando en su estado original las imágenes podían estar cerca de los 13dB). Si bien existe un margen de mejora, la relación señal ruido obtenida luego de la reducción del Vignetting es excelente para el detector Gaussiano.

Los trabajos realizados con la detección sub-píxel permiten armar una base sólida para la comunidad metrológica, de tal manera que todo laboratorio que necesite mejorar su instrumental óptico que conste con este tipo de retículas, puede utilizar este estudio. Fueron publicados todos los avances en tres revistas internacionales y en varias presentaciones a en congresos.

El desarrollo se ve respaldado por un análisis de incertidumbre inicial, nunca antes propuesto, que expresa resultados importantes en cuanto a la elección del lente de la cámara a elegir. La metodología introducida en la medición de las aberraciones (deformaciones) de la óptica de la cámara permite realizar una calibración que deriva en la obtención de las correcciones necesarias para todo el campo de medición ($\pm 15'$), a condición de tener un valor de referencia para la zona central de la retícula.

8.1. Trabajos Futuros

Como primer etapa, es necesario mejorar la interfaz presente con un conjunto cámara-lente de mayor calidad y baja distorsión como se expresó en la sección 7.2.7.1, de esta manera el instrumento estará en su etapa final de desarrollo.

Una calibración muy precisa, incluyendo u_{11} , serviría para corregir las alinealidades con una exactitud mayor, siempre y cuando se tenga la nueva óptica para la cámara y el sistema esté montado solidario al autocolimador mediante una pieza mecánica de alta calidad. Para esta etapa se debería trabajar con una barra generadora de ángulos de gran exactitud (al menos 5 veces más chica que la incertidumbre final). Esta barra debería moverse a pasos regulares conocidos para poder medir con el autocolimador y corroborar si se miden los ángulos generados. En este caso, la barra generadora sería el instrumental de referencia, reemplazando al nivel electrónico ya utilizado.

Por otro lado, quedaría implementar este mismo procedimiento sobre otros instrumentos ópticos con retículas de medición similares para corroborar las bondades de la interfaz creada para este autocolimador. Para esto es necesario hacer mejoras en el software de detección de tal manera que se adecue a las nuevas aplicaciones.

Bibliografía

- [1] L. A. Fernandes and M. M. Oliveira, “Real-time line detection through an improved hough transform voting scheme,” *Pattern Recognition*, vol. 41, no. 1, pp. 299 – 314, 2008.
- [2] L. A. F. Fernandes, M. M. Oliveira, and R. d. Silva, “Uncertainty propagation: Avoiding the expensive sampling process for real-time image-based measurements,” *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 52, no. 7, pp. 3852–3876, Mar 2008.
- [3] M. Tuceryan and A. K. Jain, “Handbook of pattern recognition and computer vision,” C. H. Chen, L. F. Pau, and P. S. P. Wang, Eds. World Scientific Publishing Co., Inc., 1993, ch. Texture Analysis, pp. 235–276.
- [4] T. Lindeberg, “Edge detection and ridge detection with automatic scale selection,” in *Computer Vision and Pattern Recognition, 1996. Proceedings CVPR '96, 1996 IEEE Computer Society Conference on*, Jun 1996, pp. 465–470.
- [5] R. Maini and H. Aggarwal, “Study and comparison of various image edge detection techniques,” *International journal of image processing (IJIP)*, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, 2009.
- [6] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing (3rd Edition)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2006.
- [7] N. Senthilkumaran and R. Rajesh, “Edge detection techniques for image segmentation—a survey of soft computing approaches,” *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 1, no. 2, 2009.
- [8] M. A. Oskoei and H. Hu, “A survey on edge detection methods,” *University of Essex, UK*, 2010.

- [9] A. Fabijanska and D. Sankowski, “Computer vision system for high temperature measurements of surface properties,” *Machine Vision and Applications*, vol. 20, no. 6, pp. 411–421, 2009.
- [10] J. Park, J. Lee, M. Lee, and E. Lee, “A glass thickness measuring system using the machine vision method,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 12, no. 5, pp. 769–774, 2011.
- [11] R. Soufli, M. Fernández-Perea, S. L. Baker, J. C. Robinson, E. M. Gullikson, P. Heimann, V. V. Yashchuk, W. R. McKinney, W. F. Schlottter, and M. Rowen, “Development and calibration of mirrors and gratings for the soft x-ray materials science beamline at the linac coherent light source free-electron laser,” *Applied Optics*, vol. 51, no. 12, pp. 2118–2128, Apr 2012.
- [12] K. Li, C. Kuang, and X. Liu, “Small angular displacement measurement based on an autocollimator and a common-path compensation principle,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 84, no. 1, 2013.
- [13] A. Kirsanov, T. Barmashova, V. Zelenogorskii, and A. Potemkin, “Computer-aided two-coordinate autocollimator for measuring small angular deviations,” *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 52, no. 1, pp. 141–143, 2009.
- [14] T. Quinn and J. Kovalevsky, “The development of modern metrology and its role today,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 363, no. 1834, pp. 2307–2327, 2005.
- [15] J. Yuan and X. Long, “CCD-area-based autocollimator for precision small-angle measurement,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 74, no. 3, pp. 1362–1365, 2003.
- [16] T. B. Arp, C. A. Hagedorn, S. Schlamming, and J. H. Gundlach, “A reference-beam autocollimator with nanoradian sensitivity from mhz to khz and dynamic range of 10⁷,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 84, no. 9, pp. 095 007–095 007–7, Sep 2013.
- [17] S. G. Alcock, K. J. Sawhney, S. Scott, U. Pedersen, R. Walton, F. Siewert, T. Zeschke, F. Senf, T. Noll, and H. Lammert, “The diamond-nom: A non-contact profiler capable of characterizing optical figure error with sub-nanometre repeatability,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 616, no. 2–3, pp. 224 – 228, 2010.

- [18] J.-b. Tan, L. Ao, J.-w. Cui, and W.-j. Kang, “Further improvement of edge location accuracy of charge-coupled-device laser autocollimators using orthogonal fourier-mellin moments,” *Optical Engineering*, vol. 46, no. 5, pp. 057007–057007–12, 2007.
- [19] J. Yuan, X. Long, and K. Yang, “Temperature-controlled autocollimator with ultrahigh angular measuring precision,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 76, no. 12, 2005.
- [20] Davidson-Optronics. [Online]. Available: <http://davidsonoptronics.com/products/autocollimators/d652/>
- [21] CEMETRO-LAB. [Online]. Available: <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cemetro/laboratorio.html>
- [22] C. Schurrer, A. G. Flesia, G. Bergues, G. Ames, and L. Canali, “Interfaz visual para un autocolimador nikon 6d mediante procesamiento de imágenes con precisión sub-píxel: un caso de estudio,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial - RIAI*, vol. 11, no. 3, pp. 327–336, 2014.
- [23] G. Bergues, G. Ames, L. Canali, C. Schurrer, and A. G. Flesia, “External visual interface for a nikon 6d autocollimator,” in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International*, May 2014, pp. 35–39.
- [24] G. Bergues, L. Canali, C. Schurrer, and A. Flesia, “Electronic interface with vignetting effect reduction for a nikon 6b/6d autocollimator,” *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, no. 99, 2015.
- [25] A. G. Flesia, G. Ames, G. Bergues, L. Canali, and C. Schurrer, “Sub-pixel straight lines detection for measuring through machine vision,” in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International*, May 2014, pp. 402–406.
- [26] A. Fabijańska, “A survey of subpixel edge detection methods for images of heat-emitting metal specimens,” *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 22, no. 3, pp. 695–710, 2012.
- [27] R.-C. Lo and W.-H. Tsai, “Gray-scale hough transform for thick line detection in gray-scale images.” *Pattern Recognition*, vol. 28, no. 5, pp. 647–661, 1995.

- [28] N. Aggarwal and W. C. Karl, "Line detection in images through regularized hough transform," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 3, pp. 582–591, 2006.
- [29] R. O. Duda and P. E. Hart, "Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures," *ACM*, vol. 15, no. 1, pp. 11–15, 1972.
- [30] H. Zhuang and K. S. Low, "Real time runway detection in satellite images using multi-channel pcnn," in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2014 IEEE 9th Conference on*, June 2014, pp. 253–257.
- [31] G. Wu, Y. Tan, Y. Zheng, and S. Wang, "Walking goal line detection based on machine vision on harvesting robot," in *Circuits, Communications and System (PACCS), 2011 Third Pacific-Asia Conference on*, July 2011, pp. 1–4.
- [32] R. Tara and T. Adji, "Robust and low-cost proximity sensor for line detection robot using goertzel algorithm," in *Instrumentation Control and Automation (ICA), 2011 2nd International Conference on*, Nov 2011, pp. 340–343.
- [33] J. Janesick, *Scientific Charge-coupled Devices*, ser. Press Monographs. Society of Photo Optical, 2001.
- [34] S. Howell, *Handbook of CCD Astronomy*, ser. Cambridge Observing Handbooks for Research Astronomers. Cambridge University Press, 2006.
- [35] Y. Wonpil, "Practical anti-vignetting methods for digital cameras," *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 4, pp. 975–983, Nov 2004.
- [36] F. Jenkins and H. White, *Fundamentals of Optics*, ser. International student edition. McGraw-Hill, 1976.
- [37] N. T. Goldsmith, "Deep focus; a digital image processing technique to produce improved focal depth in light microscopy," *Image Analysis and Stereology*, vol. 19, no. 3, pp. 163–167, 2011.
- [38] R. J. Pieper and A. Korpel, "Image processing for extended depth of field," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 10, pp. 1449–1453, May 1983.
- [39] S. A. Sugimoto and Y. Ichioka, "Digital composition of images with increased depth of focus considering depth information," *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 14, pp. 2076–2080, Jul 1985.

- [40] D. Vollath, “The influence of the scene parameters and of noise on the behaviour of automatic focusing algorithms,” *Journal of Microscopy*, vol. 151, no. 2, pp. 133–146, 1988.
- [41] M. Born, E. Wolf, and A. Bhatia, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge University Press, 1999.
- [42] E. B. Niven and C. V. Deutsch, “Calculating a robust correlation coefficient and quantifying its uncertainty,” *Computers and Geosciences*, vol. 40, no. 0, pp. 1–9, 2012.
- [43] G. Bergues, G. Ames, L. Canali, C. Schurrer, and A. Flesia, “Modelado de la retícula de medición de un autocolimador nikon 6b/6d mediante transformada hough,” in *presented at the XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPIC)*, 2013.
- [44] ——, “Detección de líneas en imágenes con ruido en un entorno de medición de alta precisión,” in *Biennial Congress of Argentina (ARGEN-CON), 2014 IEEE*, June 2014, pp. 582–587.
- [45] T. Hermosilla, E. Bermejo, A. Balaguer, and L. A. Ruiz, “Non-linear fourth-order image interpolation for subpixel edge detection and localization,” *Image Vision Comput.*, vol. 26, no. 9, pp. 1240–1248, Sep. 2008.
- [46] D. Ziou, S. Tabbone *et al.*, “Edge detection techniques—an overview,” *Pattern Recognition and Image Analysis C/C of Raspoznavaniye Obrazov I Analiz Izobrazhenii*, vol. 8, pp. 537–559, 1998.
- [47] J. Canny, “A computational approach to edge detection,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679–698, Nov 1986.
- [48] D. I. Processing, “Image analysis and understanding.” [Online]. Available: <http://user.engineering.uiowa.edu/dip/LECTURE/contents.html>
- [49] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, “Digital image processing,” pp. 176–178, 2002.
- [50] B. A. Martínez, “Librería de operadores para restauración de imágenes en ambiente distribuido,” Ph.D. dissertation, Universidad de las Ameritas-Puebla, May 2002.

- [51] M. Hagara and P. Kulla, "Edge detection with sub-pixel accuracy based on approximation of with erf function." *Radioengineering*, vol. 20, no. 2, pp. 516–524, Jun. 2011.
- [52] L. Ma, S. Zhou, H. Ouyang, Z. He, W. Rong, and L. Sun, "Image subpixel recognition method for optical precise adjustment," in *Mechatronics and Automation (ICMA), 2012 International Conference on*, Aug 2012, pp. 1439–1444.
- [53] H. Canabal, J. Alonso, and E. Bernabeu, "Laser beam deflectometry based on a subpixel resolution algorithm," *Optical Engineering*, vol. 40, no. 11, pp. 2517–2523, 2001.
- [54] P. Zhao, W. Zhao, Z. Duan, and W. Zhao, "Subpixel-precise edge extraction algorithm based on facet model," in *Computational and Information Sciences (ICCIS), 2012 Fourth International Conference on*, Aug 2012, pp. 86–89.
- [55] L. Sui and W. Sheng, "Edge detection algorithm based on facet model," *Computer Engineering*, vol. 35, no. 11, pp. 187–189, 2009.
- [56] T. Kumar and K. Verma, "Article: A theory based on conversion of rgb image to gray image," *International Journal of Computer Applications*, vol. 7, no. 2, pp. 7–10, September 2010.
- [57] R. Bala and K. M. Braun, "Color-to-grayscale conversion to maintain discriminability," in *Electronic Imaging 2004*. International Society for Optics and Photonics, 2003, pp. 196–202.
- [58] E. Hecht, *Optics (4th Edition)*, 4th ed. Addison Wesley, Aug. 2002.
- [59] R. W. Schafer, "What is a savitzky-golay filter? [lecture notes]," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 28, no. 4, pp. 111–117, July 2011.
- [60] A. Savitzky and M. J. E. Golay, "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures." *Analytical Chemistry*, vol. 36, no. 8, pp. 1627–1639, 1964.
- [61] R. Maronna, D. Martin, and V. Yohai, *Robust Statistics: Theory and Methods*, ser. Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley, 2006.
- [62] JCGM, "Jcgm 100: Evaluation of measurement data - guide to the expression of uncertainty in measurement," JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology), Tech. Rep., 2008.

- [63] W. ESTLER, "Uncertainty analysis for angle calibrations using circle closure," *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 103, no. 2, pp. 141–151, 1998.
- [64] A. Just, M. Krause, R. Probst, and R. Wittekopf, "Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator," *Metrologia*, vol. 40, no. 5, p. 288, 2003.
- [65] M. Born and W. Wolf, *Principles of optics (6rd Edition)*. Cambridge University Press, 1998.