



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Desarrollo de un método para corregir la distorsión óptica
de imágenes de motores de combustión con accesos
ópticos complejos

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Ramos Tomas, Alvaro

Tutor/a: Pastor Soriano, José Vicente

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Agradecimientos

Este trabajo representa la culminación de 4 años de esfuerzo en el grado de Ingeniería Aeroespacial. El final de un ciclo que ha representado un parte muy importante de mi vida.

Me gustaría agradecer a mi padre y a toda mi familia el apoyo y la paciencia durante estos 4 años, sin el cuál no habría sido posible llegar hasta aquí.

Agradecer al instituto universitario CMT-Motores Térmicos y a mis tutores Jose Vicente Pastor Soriano y Francisco Jose Tejada Magraner la inestimable ayuda, tiempo y orientación que me han brindado a lo largo de este proyecto.

Por último, agradecer a mis compañeros de piso, que han sido mi nueva familia en Valencia, a mis amigos, y a los compañeros de la carrera, de penas, de sufrimientos y también de alegrías.

Resumen

Para analizar los procesos dentro de la cámara de combustión de los motores alternativos es necesario tomar medidas durante la combustión. Una de las estrategias más fiables es el uso de técnicas ópticas, ya que son técnicas no-intrusivas que ofrecen alta resolución espacial y temporal.

Para conseguir la máxima precisión en los resultados del ensayo es necesario emplear pistones con la misma geometría que los pistones reales. Estos pistones no suelen ser planos, sino que suelen tener geometrías complejas curvas que causan una distorsión importante en las imágenes tomadas a través de ellos. Este estudio pretende desarrollar una metodología flexible empleando MATLAB que permita corregir esta distorsión para obtener medidas precisas. El método se basa en las ecuaciones de la óptica geométrica para calcular las trayectorias de los rayos que provienen de la cámara de combustión y la consiguiente desviación que sufren al atravesar el pistón de cuarzo utilizando la ley de Snell. Para ello se llevo a cabo una calibración de los parámetros de corrección, teniendo en cuenta las distancias entre el plano de medida, el pistón transparente y el sistema de adquisición de imágenes. Mediante esta metodología se podrá calcular el desplazamiento de los puntos en la imagen distorsionada.

Los resultados muestran una correcta corrección de la imagen con errores medios menores a 0.1 mm de desplazamiento entre los puntos finales corregidos y su posición real.

Abstract

To analyze the processes inside the combustion chamber of reciprocating Internal Combustion Engines it is necessary to perform measurements during the combustion. One of the most reliable strategies is to use optical techniques since they are non-intrusive techniques that offer high spatial and temporal resolution.

To achieve the maximum precision in the measurements made it is necessary to employ pistons with the same geometry as the real pistons used in engines. These pistons are not usually flat but have complex and curved geometries which lead to an important distortion of the images taken through them. This study aims to develop a flexible methodology using MATLAB that allows to correct such distortion and perform reliable measurements. The method will be based on the use of optical equations to calculate the trajectories of the rays coming from the combustion chamber and therefore obtain the deviation they experience going through the quartz piston using Snell's law. To do that, the calibration of the correction parameters was performed, taking into account the distances between the measurement plane, the transparent piston and the images acquisition system. This methodology allows to calculate the displacement of the points in the distorted image.

The results show an accurate correction of the images with an average error lower than 0.1 mm of displacement between the final corrected points and its real position.

Índice general

Índice general	VII
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Ensayos en MCIA	2
1.3 Motores ópticos.	2
1.4 Limitaciones del motor óptico.	4
1.5 Estructura del trabajo.	5
2 Distorsión óptica	7
2.1 Ley de Snell	7
2.2 Geometría de los pistones	9
3 Metodología	11
3.1 Modelado de la geometría	12
3.2 Imágenes de calibrado.	15
3.3 Trazado de rayos	17
3.3.1 Hipótesis	18
3.3.2 Rutina de corrección.	18
3.4 Trazado de rayos con retro-proyección de la imagen virtual	24
3.4.1 Hipótesis	26
3.4.2 Rutina de corrección.	26
3.4.3 Calibrado de las funciones β y F	29
3.4.4 Corrección de las imágenes.	32

4 Evaluación del método y discusión de los resultados	37
4.1 Error y rango de validez	37
4.2 Rango de validez de β	41
5 Conclusiones	45
5.1 Conclusiones.	45
5.2 Futuros trabajos y mejoras.	46
A Manual del programador	49
B Planos	57

Índice de figuras

1.1. Esquema de un motor óptico [1]	3
2.1. Refracción de un rayo de luz [2]	8
2.2. Descripción del ángulo límite [2]	8
2.3. Pistón reentrante empleado en el desarrollo de la herramienta	10
3.1. Pasos seguidos para la corrección de la distorsión de las imágenes	11
3.2. Perfil del pistón reentrante obtenido de AutoCAD	12
3.3. Perfil editado del pistón para obtener las funciones de la superficie	13
3.4. Imágenes de modelado	13
3.5. Resultados del modelado: (a)Modelo resultante, (b)ampliación de la zona del bowl de la figura 3.5a	14
3.6. Resultados del suavizado de la geometría: (a)modelado de la geometría resultante tras el suavizado, (b)disminución de los escalones	14
3.7. Disposición de materiales para la toma de fotos de calibrado	15
3.8. Movimiento de la plataforma del pistón a lo largo del rail	16
3.9. (a)Distorsión a 20 mm. (b)Distorsión a 105 mm	17
3.10. Selección del centro del pistón	19
3.11. Puntos de control seleccionados	20
3.12. Resultado del trazado de rayos empleado	21

3.13. Posición de puntos de entrada y su posición corregida tras el trazado de rayos	22
3.14. (a)Imagen original (b)Imagen corregida	23
3.15. Esquema de la metodología de corrección con trazado de rayos y retro-proyección [6]	25
3.16. Trazado de rayos para un punto situado a 25 mm del pistón (z), y a 8 mm del eje óptico (R)	27
3.17. Posición de la imagen virtual para distintos puntos de un plano situado a 25 mm del pistón	29
3.18. Marcas de puntos de control seleccionadas sobre la imagen, a una distancia conocida del centro del pistón	30
3.19. Valores del parámetro β para todo el rango de r' y z . La barra de colores representa los valores de β	31
3.20. Valores del parámetro F para todo el rango de r y z . La barra de colores representa los valores de F	32
3.21. (a)Puntos de control iniciales (azul). (b)Puntos de control tras la corrección	34
3.22. Coordenadas iniciales (cruces azules) y finales (cruces rojas) de los puntos de control	35
3.23. (a) Imagen original a 3 mm del plano de medida. (b) Imagen tras la corrección	36
4.1. Modelado de la rejilla en MATLAB. (a) Imagen ejemplo. (b) Posición de las cruces en el modelo.	38
4.2. (a) Error sistemático de la corrección. (b) Representación 2D del error con el pistón separado 0 mm del plano de medida.	39
4.3. Error relativo a la resolución, la barra de colores a la derecha indica el porcentaje de error con respecto a la resolución.	40
4.4. Error con $z = 10$ mm	42
4.5. Error a distintas z , manteniendo los parámetros de corrección correspondientes a $z = 10$ mm	42
4.6. Error con β y F correspondientes a $z = 10$ mm	43

- 4.7. Evolución del error relativo asumiendo parámetros de corrección constantes y correspondientes a: (a) $z = 30$ mm. (b) $z = 45$ mm. 44

Nomenclatura

<i>TFG</i>	-	Trabajo de Fin de Grado
<i>MCIA</i>	-	Motor de Combustión Interna Alternativo
<i>PMS</i>	-	Punto Muerto Superior
<i>z</i>	-	Distancia entre el pistón y el plano de medida
<i>R</i>	-	Distancia radial en mm de un punto en el plano objeto
<i>R'</i>	-	Distancia radial en píxeles de un punto en el plano objeto
<i>r</i>	-	Distancia radial en mm de un punto en la imagen virtual
<i>r'</i>	-	Distancia radial en píxeles de un punto en la imagen distorsionada
α	-	Parámetro de escala del plano objeto a imagen (pixel/mm)
β	-	Parámetro de escala de la imagen virtual (mm/pixel)
<i>F</i>	-	Función de trazado de rayos

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

Los Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA), son uno de los métodos más populares para obtener energía mecánica. Su uso, especialmente en la industria del transporte, hace que resulte interesante estudiar y mejorar estas máquinas de forma que sean más eficientes.

Sin embargo, estos motores no están libres de contaminantes, sino que el proceso de combustión genera una serie de emisiones. Estos contaminantes se generan a través de diversos mecanismos, como la combustión incompleta del hidrocarburo, la presencia de nitrógeno en la mezcla de la combustión, la composición del combustible o la adsorción de aceite y otros humos y partículas.

Durante los últimos años, el problema de la contaminación se ha acentuado de forma importante. La expansión de la industria del transporte, la mayor demanda energética y el mayor consumo de bienes han supuesto un aumento de las emisiones contaminantes, lo que ha provocado la aparición de nuevas políticas y restricciones que buscan conseguir un desarrollo sostenible.

El sector del transporte es uno de los principales emisores de gases contaminantes, la inmensa mayoría de vehículos emplean los motores de combustión interna como fuente propulsiva. Por este motivo, la reducción de las emisiones contaminantes de esta tecnología resulta imprescindible. Las restricciones impuestas a los fabricantes de motores son cada vez más severas, con la nueva normativa europea Euro 7, la homologación de coches de combustión resultará mucho más complicada, con unas restricciones de hasta 10 veces más severas que las actuales. Es por estos motivos que

resulta indispensable llevar a cabo estudios que permitan obtener una combustión más limpia.

1.2 Ensayos en MCIA

Son muchos y muy variados los procesos y factores causantes de la formación de contaminantes dentro de una cámara de combustión, pasando por la temperatura, el dosado, la mezcla del combustible y el aire, el encendido,... Tanto, que resulta complicado simular con exactitud todos los procesos que suceden dentro de una cámara de combustión. Es por esto que es necesario realizar ensayos experimentales que sirvan de base a las simulaciones teóricas y permitan mejorar los algoritmos de CFD para obtener resultados precisos.

Para poder obtener información válida se realizan ensayos sobre los motores. Hay dos tipos principales de ensayos, los ensayos intrusivos y los no intrusivos.

Los ensayos intrusivos, como su propio nombre indica, consisten en colocar diversos sensores dentro de la cámara de combustión que nos permitan obtener información sobre los procesos que suceden. Sin embargo, estos ensayos conllevan a variaciones del comportamiento del flujo debido a la colocación de los sensores. Además, la implantación de estos sensores no siempre es fácil.

La otra opción es emplear un ensayo no intrusivo. Estos ensayos no alteran el flujo dentro de la cámara de combustión, ya que no hacen uso de sensores. La idea principal consiste en modificar un motor de forma que se creen una serie de accesos ópticos que permitan observar dentro de la cámara de combustión y obtener datos acerca de los procesos de combustión. Este es el tipo de ensayo más relevante para el estudio que se va a llevar a cabo, por lo que se comentarán en más profundidad en el siguiente apartado.

1.3 Motores ópticos

Un motor óptico es un motor auténtico que ha sido modificado de forma que se puedan tener una serie de accesos ópticos a la cámara de combustión que permitan realizar ensayos no intrusivos.

Las técnicas ópticas están basadas en la descripción de un fenómeno físico mediante la detección de la radiación emitida por un fenómeno físico-químico, en este caso, la combustión. Se caracterizan por su alta resolución espacial y temporal, un alto rango dinámico y su sensibilidad espectral. Son capaces de aportar una información fundamental acerca de procesos físicos y químicos, así como del flujo de fluidos. Sin embargo, algunos de sus inconvenientes son el alto precio de los componentes necesarios para

realizar las medidas, además, los equipos se construyen normalmente para realizar un tipo específico de ensayo.

Un motor óptico opera en condiciones muy similares a un motor real, y permite comprender distintos fenómenos.

En un motor convencional, el pistón queda conectado al cigüeñal a través de la biela. En un motor óptico se emplean pistones de materiales transparentes para las longitudes de onda de la radiación que se quiere estudiar, normalmente cuarzo. Además, se coloca una extensión que une la cabeza del pistón metálico con el pistón de cuarzo. Esta extensión tiene un diámetro similar al pistón y es hueca en su interior, en el que se colocará un espejo elíptico a 45° . La figura 1.1 muestra el esquema de un motor óptico, en el que se pueden ver estos componentes.

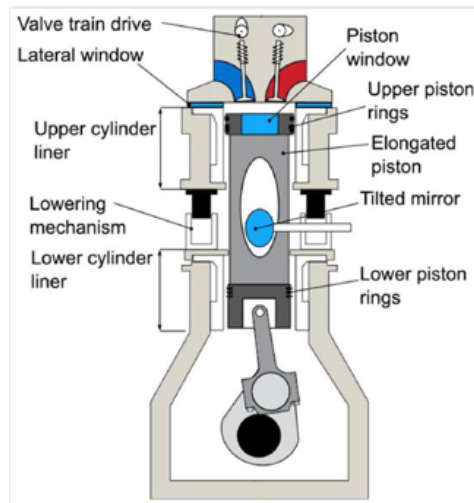


Figura 1.1: Esquema de un motor óptico [1]

El espejo reflejará los rayos de luz salientes de la cámara de combustión, y los dirigirá hacia la cámara, que se encargará de recolectar la radiación. Algunas aplicaciones, como las técnicas laser, necesitan un acceso óptico lateral cerca del PMS (Punto Muerto Superior). Sin embargo, esto no siempre es posible debido a limitaciones mecánicas.

1.4 Limitaciones del motor óptico

A pesar de su similitud con un motor real, los motores ópticos presentan limitaciones importantes a la hora de realizar ensayos.

Al emplear un material distinto en la fabricación del pistón, la transmisión de calor será distinta, la temperatura en la superficie del pistón también variará. Todo esto afectará al proceso de combustión. La extensión colocada entre el pistón y la biela provoca que el sistema sea más inestable y sensible a las vibraciones, lo que puede conllevar a deformaciones mecánicas, por lo que las rpm máximas a las que se pueda realizar el ensayo disminuirán.

En cuanto a los elementos ópticos, las características de los materiales establecen límites de fuerza y temperatura para preservar la integridad del sistema. La relación de compresión deberá disminuir con respecto al original, al igual que la carga del motor no podrá ser tan alta. Al suprimirse la lubricación de la camisa para evitar el ensuciamiento de los accesos ópticos, los segmentos del pistón óptico están formados por materiales sintéticos y no pueden trabajar bajo altas temperaturas, por lo que será necesario integrar un sistema de refrigeración con bajas temperaturas del refrigerante, lo que afectará a la transmisión de calor, además de trabajar en modos de combustión basados en *skip fire*, en los que entre combustiones se dejarán unos ciclos sin quemar para reducir el estrés térmico en los materiales y hacer que las condiciones ambientales entre las distintas combustiones sean iguales.

En lo referente a las ventanas ópticas aparecen diversos inconvenientes. Algunos de ellos es la acumulación de residuos en las ventanas, como combustible, hollín o materiales de las juntas. Por último, los materiales de los accesos ópticos no son tan resistentes como los de un motor convencional, por lo que deben controlarse las condiciones de operación del motor y los laser empleados para preservar los componentes del motor. Para preservar la pieza, se puede emplear una técnica mencionada anteriormente, el "*skip fire*".

La problemática más importante para este trabajo es la distorsión que la geometría del pistón produce en la imagen. Para obtener los resultados más precisos posibles, se emplean pistones con la misma geometría que los reales. Las superficies curvas de estos pistones generarán una distorsión que provocará error en las medidas.

El objetivo de este trabajo es, precisamente, el desarrollo de un procedimiento de corrección de esta distorsión de las imágenes producida por la geometría compleja del pistón óptico.

1.5 Estructura del trabajo

En cuanto a lo organización del documento se va a seguir la siguiente estructura:

En el Capítulo 2 se explica la distorsión óptica que sufren las imágenes, profundizando en las leyes físicas que permiten entender y corregir esta distorsión.

En el Capítulo 3 se desarrolla la metodología empleada para determinar la distorsión que sufren las imágenes, mediante la toma de imágenes de calibrado y modelado de la geometría del pistón empleado. Asimismo, se explican los procedimientos de corrección de la distorsión empleados, haciendo incapié en sus ventajas y errores. Por último, se muestran los resultados obtenidos por estos procedimientos.

El Capítulo 4 cubre la validación de los resultados obtenidos, mediante una determinación del error cometido en la corrección de las imágenes. Además, incluye un estudio acerca del rango de validez del parámetro de corrección β .

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones de este trabajo y se plantean algunas vías de mejora para abordar en trabajos futuros.

Por último, se incluyen en los anexos los planos del pistón empleado en el desarrollo de la herramienta, así como el manual del programador de todas las rutinas desarrolladas.

Capítulo 2

Distorsión óptica

En este capítulo se van a exponer las causas de la distorsión óptica que se observa en las imágenes tomadas a través de un pistón. De igual forma se describirán las leyes que rigen esa distorsión.

2.1 Ley de Snell

La ley de Snell define la refracción de un rayo de luz al atravesar la superficie que separa dos medios de distinto índice de refracción. Esta refracción consiste en un cambio de dirección que sufren los rayos de luz al cambiar de medio, produciendo un cambio en la velocidad de propagación de la onda. Un ejemplo de este fenómeno es introducir un lápiz en un vaso, se podrá observar que el lápiz parece estar quebrado.

Los índices de refracción son característicos de cada material y están definidos según la Ecuación 2.1, donde c corresponde a la velocidad de la luz en el vacío, y v a la velocidad de la luz en el medio en el que queremos calcular el índice de refracción.

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

La figura 2.1 muestra un esquema del comportamiento de los rayos de luz al refractarse, como se puede observar el ángulo del rayo al salir de la superficie depende del ángulo de incidencia y de los índices de refracción de los dos materiales.

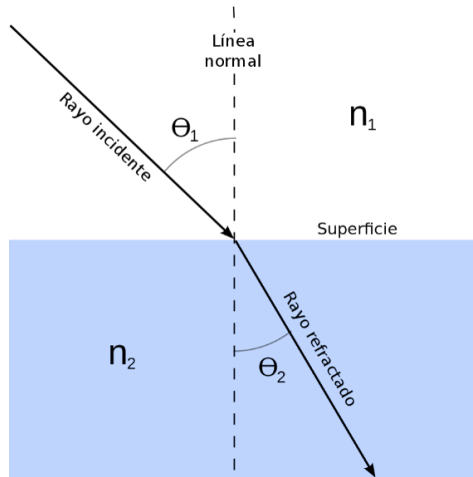


Figura 2.1: Refracción de un rayo de luz [2]

A partir de este esquema, la ley de Snell se define según la Ecuación 2.2.

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

Ambos ángulos están definidos a partir de la recta normal a la superficie en el punto de incidencia del rayo de luz. Interpretando la Ecuación 2.2 se pueden sacar varias conclusiones interesantes que serán útiles a la hora de comprobar la validez de la herramienta del trazado de rayos, estas se comentarán más adelante.

También hay que estar familiarizado con el concepto de ángulo límite. El ángulo límite es aquel ángulo de incidencia máximo que puede tener un rayo de luz a partir del cual se produce reflexión total y se impide que el haz pase al otro medio.

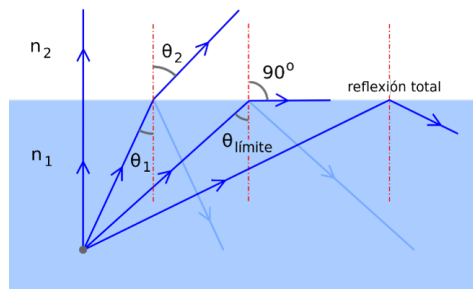


Figura 2.2: Descripción del ángulo límite [2]

Como se puede observar en la figura 2.2, este ángulo límite o crítico se puede obtener igualando el ángulo de salida a 90° , según la Ecuación 2.3:

$$\theta_{critico} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

Este ángulo crítico solo podrá encontrarse al pasar de un medio con un índice de refracción mayor a uno con un índice menor. De esta forma el cociente de los índices de refracción será menor que 1 y se cumplen las condiciones matemáticas del seno.

A partir de estas descripciones se pueden obtener una serie de conclusiones que serán interesantes a la hora de comprobar la validez de la herramienta del trazado de rayos.

- Al pasar a un medio con mayor índice de refracción, el ángulo de salida debe aproximarse a la normal de la superficie. Es decir, el ángulo de salida debe disminuir con respecto al de entrada.
- Lo contrario ocurrirá al pasar a un medio con menor índice de refracción. El rayo refractado deberá tener un ángulo mayor y alejarse de la normal de la superficie.
- Un mayor ángulo relativo entre el rayo de luz y la superficie del pistón aumentará el ángulo de salida de la luz.
- El estudio del ángulo límite solo será útil cuando el rayo salga del pistón, que es cuando el índice de refracción disminuirá de un medio a otro.

La Ley de Snell será empleada para calcular los cambios de dirección que sufran los rayos de luz de la cámara de combustión al atravesar las superficies del pistón. De esta forma será posible programar las rutinas de trazado de rayos necesarias para corregir la distorsión.

2.2 Geometría de los pistones

La optimización de la geometría de la cámara de combustión tiene un alto potencial para disminuir la emisión de ciertos contaminantes, como el hollín. La geometría del bowl del pistón afecta a los procesos de mezcla del aire del aire y el combustible, y por tanto la formación de contaminantes [3].

Dependiendo del tipo de ensayo a realizar, se pueden emplear pistones planos o pistones con la misma geometría que los reales. Este estudio se centrará en el uso de pistones con geometría real. Como se puede observar, los pistones no tienen caras planas, por lo que la curvatura de sus superficies desviarán los rayos de luz debido a la refracción y las imágenes tomadas se verán distorsionadas. En el siguiente capítulo se podrán ver algunas imágenes tomadas a través del pistón.

Para la realización de este estudio se va a emplear un pistón reentrante, cuyo plano se puede ver en el Apéndice A. La figura 2.3 muestra el modelado de dicho pistón en SolidWorks.

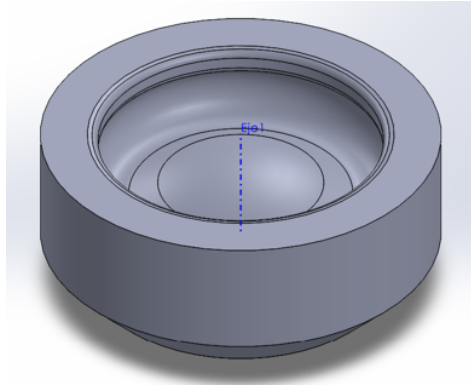


Figura 2.3: Pistón reentrante empleado en el desarrollo de la herramienta

Capítulo 3

Metodología

Este capítulo va a estar dedicado a describir el procedimiento seguido para la corrección de las imágenes distorsionadas tomadas a través del pistón. Se van a describir de forma concisa todas las acciones que se han llevado a cabo, así como una serie de discusiones acerca de las dificultades encontradas.

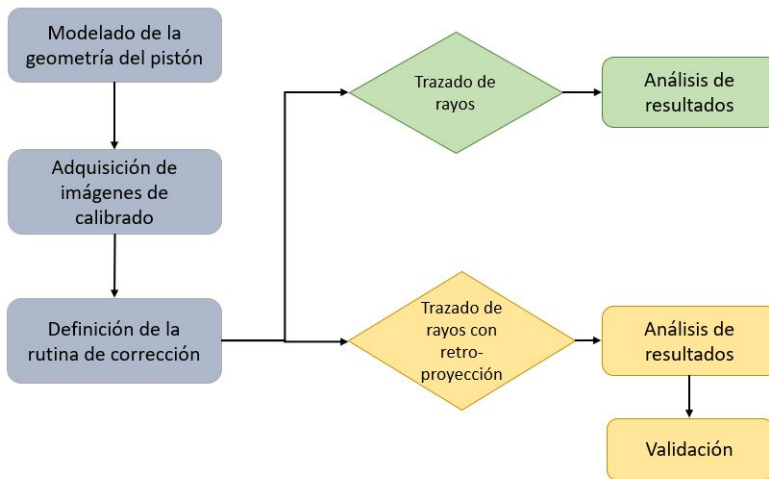


Figura 3.1: Pasos seguidos para la corrección de la distorsión de las imágenes

La figura 3.1 muestra los pasos seguidos para la corrección de la distorsión. Para la definición de la rutina de corrección se han seguido dos métodos, una rutina simplificada aplicando únicamente el trazado de rayos, y una metodología más completa que

emplea el cálculo de la imagen virtual. Estas opciones serán descritas en detalle en los siguientes apartados, discutiendo los resultados y limitaciones de cada una de ellas.

Tanto en el modelado de la geometría como en el desarrollo de las rutinas de corrección se empleará MATLAB. Se ha elegido esta herramienta de programación ya que ofrece todas las herramientas necesarias para llevar a cabo la corrección.

3.1 Modelado de la geometría

En primer lugar, se debe obtener un modelo de la geometría del pistón que se vaya a emplear. Este será el pistón reentrante que se muestra en la figura 2.3. En este paso, es importante desarrollar un método que permita la fácil implementación de distintas geometrías, lo que facilitará futuras investigaciones. Para ello, se decidió obtener una nube de puntos que definan la geometría. El pistón estudiado en este caso se caracteriza por su axisimetría, como se puede observar en los planos del mismo, en el Apéndice A. Esto facilitará de forma significativa el programa, ya que permitirá estudiar únicamente el perfil del pistón, sin tener que modelar toda la superficie, y el resultado será aplicable a cualquier punto sobre su superficie.

Con este objetivo se emplea la función de MATLAB *GetPtsCoord* [4], que permite obtener unos vectores representando las superficies superior e inferior a partir de una foto del perfil del pistón. A partir del plano del pistón reentrante en AutoCAD, es posible obtener una representación del perfil del mismo, que se observa en la figura 3.2.

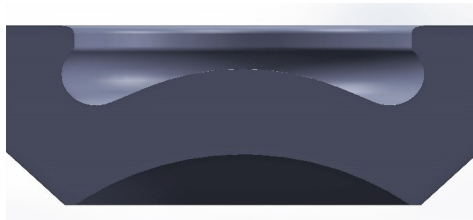


Figura 3.2: Perfil del pistón reentrante obtenido de AutoCAD

No obstante, para el correcto funcionamiento del programa *GetPtsCoord*, debe obtenerse una clara diferenciación entre el corte del pistón y otras superficies, ya que el programa está basado en la diferenciación entre tonos claros y oscuros. Tras la edición del perfil se obtiene el resultado que se observa en la figura 3.3.

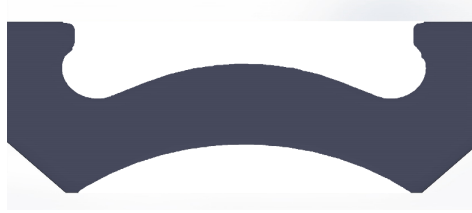


Figura 3.3: Perfil editado del pistón para obtener las funciones de la superficie

Una vez obtenido esto, se introduce en el programa para obtener las funciones de la superficie superior e inferior. Es necesario realizar este proceso dos veces, una para la superficie superior, en la que toda la parte blanca debajo del pistón se coloreará del mismo color que el pistón, y otra para la superficie inferior, en la que se hará lo mismo con la parte blanca de encima. La figura 3.4 muestran las imágenes finales que se introdujeron en el programa. Además, sen el programa se deben introducir algunos datos, como el radio y la altura del pistón en mm y en píxeles. Esto último se encuentra descrito en la misma rutina.



(a) Imagen para el modelado de la superficie superior **(b)** Imagen para el modelado de la superficie inferior

Figura 3.4: Imágenes de modelado

Para conseguir una mayor precisión es recomendable realizar el modelado empleando únicamente medio perfil para cada superficie. De esta forma se pueden conseguir un mayor número de puntos que definan la superficie y los escalones que puedan surgir en la función serán menores. Al ser simétricos los perfiles, para conseguir la nube de puntos del perfil completo solo habría que duplicar los puntos conseguidos al modelar medio perfil.

Los puntos de los vectores obtenidos representan las superficies del pistón, sin embargo, esta presenta numerosos escalones que supondrán un problema a la hora de obtener la pendiente de la superficie en distintos puntos. En la figura 3.5 se observar que el modelado resultante no coincide exactamente con el perfil del pistón, especialmente en la zona del bowl. Esto se debe a que el programa usado no trabaja correctamente en zonas donde hay varios cambios de superficie. Sin embargo los errores en el bowl no son relevantes para la metodología de corrección que se explicará más adelante.

Por otro lado, en la figura 3.5b se pueden observar una serie de escalones resultantes del modelado de la superficie que inducirán error al calcular la pendiente de la misma. Por lo tanto, se deberá aplicar a los vectores de cada superficie un filtro mediante una función integrada de MATLAB, *MovMean*. Esta función está definida por el número de puntos del vector que tiene en cuenta para suavizar una parte de la curva, para ambas superficies se emplean 15 puntos.

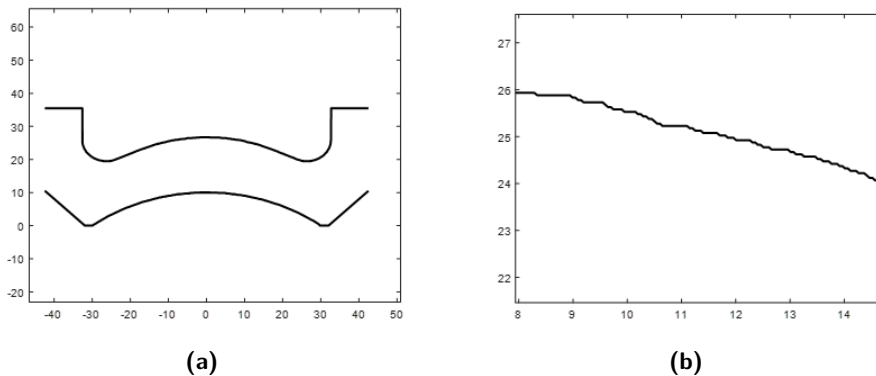


Figura 3.5: Resultados del modelado: (a)Modelo resultante, (b)ampliación de la zona del bowl de la figura 3.5a

Los resultados del suavizado de las superficies se observan en la figura 3.6.

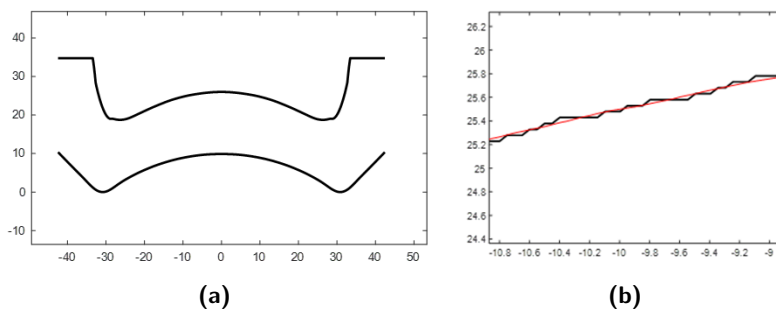


Figura 3.6: Resultados del suavizado de la geometría: (a)modelado de la geometría resultante tras el suavizado, (b)disminución de los escalones

Se puede ver que los escalones presentan un contorno mucho más suave, adecuado para el cálculo de la inclinación de la superficie en los distintos puntos. Sin embargo,

en la figura 3.6a se observan variaciones importantes de la geometría, especialmente en las zonas con cambios importantes de la inclinación. No obstante, estas áreas no serán importantes para el trazado de rayos que se va a realizar, ya que los rayos que pasan por ellas no llegan habitualmente al objetivo de la cámara y, por tanto, quedan excluidos del proceso de corrección. Esto se verá más claramente en los siguientes apartados.

Con este método se acaban obteniendo 4 vectores de valores: dos que definen el radio y la altura de los puntos de la superficie superior, y dos que definen el radio y la altura de los puntos de la superficie inferior.

3.2 Imágenes de calibrado

Para calibrar los distintos parámetros necesarios para realizar la corrección de la distorsión será necesario tomar una serie de fotografías en las que se conozca la distancia entre el pistón óptico y el plano de medida. Más adelante se mostrará el uso que tienen estas imágenes de calibrado.

En la figura 3.7 se muestra la disposición de los materiales que se han empleado en la toma de las imágenes de calibrado.

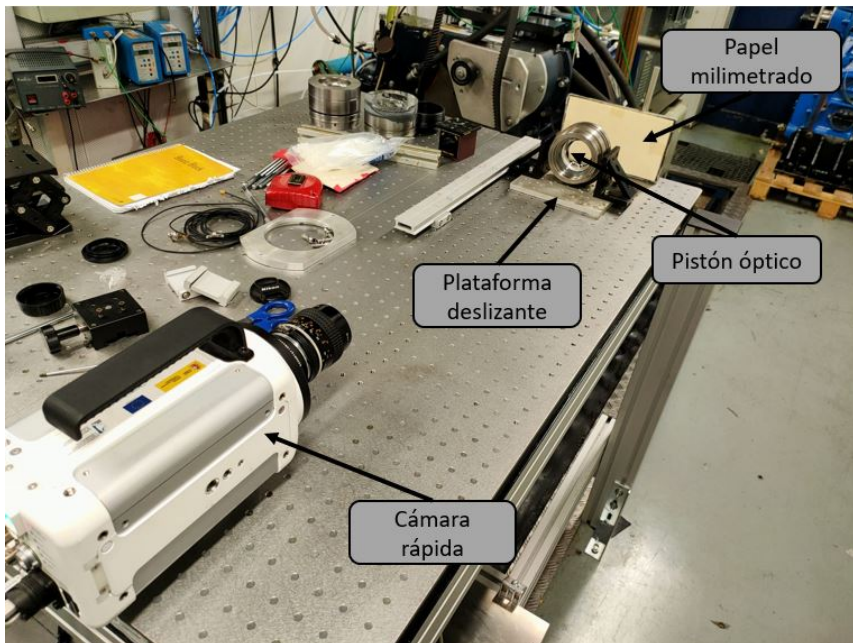


Figura 3.7: Disposición de materiales para la toma de fotos de calibrado

La cámara empleada es el modelo Photron Nova S9. La configuración empleada fue una resolución de 512x512 pix, un frame rate de 50 fps y una velocidad de obturación de 1 ms. Tanto la cámara, como el papel milimetrado y el pistón que se encuentra entre ellos se colocaron alineados, de forma que las fotografías se tomaron siempre con el mismo enfoque. La distancia entre el papel milimetrado y la cámara es de 860 mm, que se corresponde con la distancia que hay entre la cámara y el plano de culata con la disposición experimental para la visualización de la combustión que se realizará en la sala de ensayos. El diámetro del objetivo de la misma cámara es de 21.45 mm. En el papel milimetrado se subrayaron con negro intenso las líneas cada 2 mm, de forma que las cruces que se observan en las imágenes de calibrado se encuentran separadas entre ellas 2 mm.

Para la toma de fotografías se recomienda emplear una luz LED como iluminación. También se debe tener cuidado con la posición de la fuente de luz, para evitar reflejos sobre la superficie del cuarzo. El pistón se colocó sobre un rail móvil que permitía alejarlo y acercarlo al plano de medida (papel milimetrado), manteniendo la alineación de los componentes. La figura 3.8 muestra el movimiento del pistón a lo largo del mismo, las flechas azules muestran el movimiento de la plataforma.

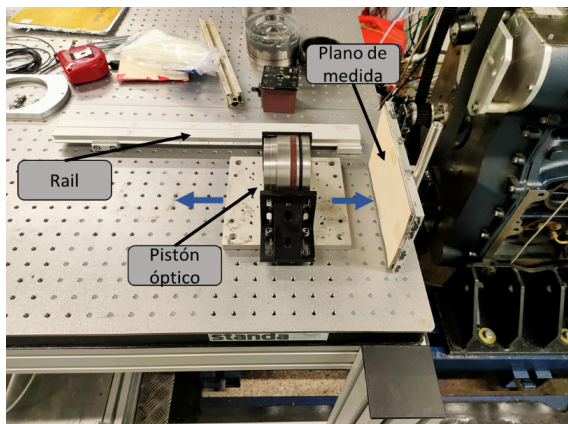


Figura 3.8: Movimiento de la plataforma del pistón a lo largo del rail

Se tomaron capturas desde la posición en la que el pistón se encuentra tocando el plano de medida (0 mm), que simularía la visualización del plano de medida cuando la culata del pistón se encuentra pegada al mismo, hasta una distancia de 120 mm, tomando una captura cada 5 mm de desplazamiento. Con estas características se cubriría sobradamente todo el rango de condiciones, ya que la carrera del motor que se ha tomado como referencia es de 99 mm. En la figura 3.9 se puede ver el resultado de algunas de las fotografías capturadas.

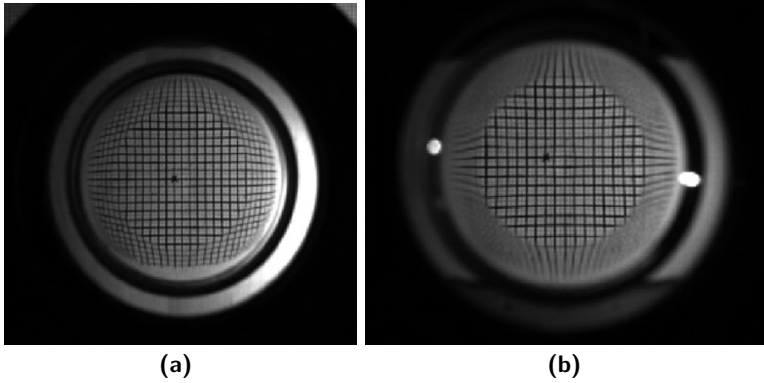


Figura 3.9: (a)Distorsión a 20 mm. (b)Distorsión a 105 mm

Como se puede observar, conforme el pistón se aleja del plano de medida, la distorsión en la periferia se acentúa. Este área será la más complicada de corregir y, si la distancia entre el plano de medida y z es lo suficientemente grande, su corrección será inviable.

3.3 Trazado de rayos

Una vez modelada la geometría y tomadas las imágenes que se van a corregir, el siguiente paso es crear una rutina que corrija la distorsión de las imágenes. En este apartado se discutirá la primera opción aplicada, empleando un método de trazado de rayos más simplificado.

La solución inicial que se propuso al problema de la distorsión parte del trabajo realizado previamente por Vallet, A y Agator, F [1] [4]. Estos proponen aplicar trazado de rayos simplificado para la corrección de la distorsión, sin embargo, ninguno de los estudios consiguió resultados suficientemente satisfactorios en una zona lo bastante amplia de la imagen o para un rango amplio de posiciones del pistón. En este apartado se van a discutir las distintas hipótesis asumidas, la metodología seguida y los resultados obtenidos por este método.

3.3.1 Hipótesis

Como se ha explicado en el Capítulo 1, cuando se realizan ensayos en motor óptico, los rayos de luz procedentes de la cámara de combustión atraviesan el pistón de cuarzo y son reflejados en un espejo para luego ser recogidos por una cámara. Las distancias entre espejo y cámara son grandes (de 10 a 50 veces, dependiendo de la configuración y la técnica óptica empleada) en comparación con los diámetros de los objetivos y espejos (20-60 mm). Por este motivo las fotos base se tomaron con una distancia grande entre el pistón y la cámara.

Cada punto de la cámara de combustión emite un haz de rayos infinitos en todas direcciones, el objetivo del trazado de rayos será encontrar los rayos de cada punto que alcancen el objetivo. Asumiendo que el pistón, los espejos empleados y la cámara se encuentren alineados, y sabiendo que la distancia entre el objetivo y la culata del pistón es alta, se puede considerar que los únicos rayos que alcanzaran el objetivo serán aquellos que incidan perpendicularmente sobre la cámara. Es decir, que al salir del pistón sean totalmente paralelos al eje óptico. Esto permite reducir significativamente el número de rayos a estudiar.

También se considera que el índice de refracción del aire en la cámara de combustión es constante e igual al del aire a densidad atmosférica, es decir, 1. Esta aproximación es razonable si se tiene en cuenta que el índice de refracción de un gas viene dado por la relación de Gladstone-Dale y para las condiciones más desfavorables que podemos encontrar en un motor óptico, con aire a 30 kg/m^3 , el índice de refracción valdría 1.0066. Es decir, el error cometido con esta hipótesis es del orden de un 0.5% en el peor de los casos. Nótese que el índice de refracción del cuarzo utilizado en el pistón es de 1.46.

3.3.2 Rutina de corrección

Datos de la rutina

Los datos que deberán ser introducidos en la rutina serán los siguientes:

- **z:** Distancia entre el pistón y el plano de medidad de la imagen a corregir (mm).
- **n1:** índice de refracción del aire (1).
- **n2:** índice de refracción del pistón (1.46).
- **Radio total:** radio máximo del pistón (mm).
- **Altura total:** distancia entre plano inferior y superior del pistón (mm).
- **Geometría del pistón:** por medio de los vectores de datos obtenidos en la seccion 3.1.

- **Radio de corrección:** en mm, indicará el radio máximo que se corregirá

Funcionamiento

Una vez introducidos todos los datos, se procede a la corrección de la distorsión de la foto. En primer lugar, se abre la imagen en la cual se va a corregir la distorsión. Sobre esta foto se deben seleccionar una serie de puntos de control. Al considerarse el pistón axisimétrico, el único parámetro que nos interesará de estos puntos será sus coordenadas y su distancia al centro, es decir, su radio, que será el parámetro modificado.

Lo primero que el programa solicita es seleccionar 5 puntos localizados en el perímetro del pistón. Empleando la función *circfit* es posible hallar las coordenadas del centro de la lente. La figura 3.10 muestra el resultado de este primer paso.

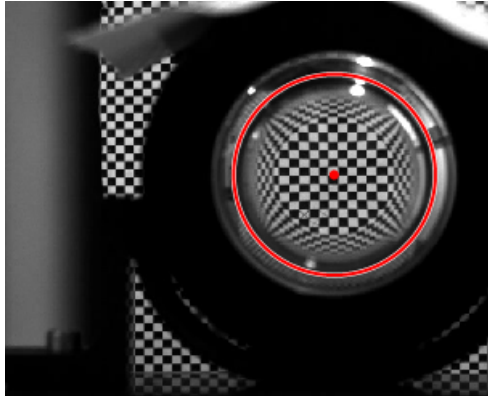


Figura 3.10: Selección del centro del pistón

Una vez obtenido el centro del pistón, se procede a seleccionar un campo de puntos dentro del radio de corrección que se ha introducido al programa. Estos puntos se seleccionaran con un paso de 2 pix, ya que emplear un paso de 1 pix no mejora la calidad de la transformación y aumenta drásticamente el tiempo de procesado. Los puntos seleccionados se muestran la figura 3.11.



Figura 3.11: Puntos de control seleccionados

Conociendo las coordenadas en píxeles de estos puntos y del centro, resulta sencillo averiguar la distancia entre cada uno de ellos y el centro empleando la función integrada de MATLAB *dist*. Sin embargo, esta distancia se encuentra expresada en píxeles, y para trabajar con el trazado de rayos se necesita transformar esta distancia a mm. Para ello, se tiene en cuenta que la geometría del pistón es conocida, así como sus medidas. Conociendo el diámetro del pistón en mm, que corresponde al círculo rojo seleccionado en la figura 3.10 y conociendo a su vez el diámetro en píxeles del mismo círculo, que es un parámetro de salida de la función *circfit*, el programa es capaz de conseguir un parámetro α [pix/mm].

Una vez que se conoce el radio de incidencia del radio con la superficie inferior del pistón, la rutina calcula el trazado de rayos de cada punto para obtener su desplazamiento.

En este punto se debe conocer en todo momento el ángulo de los rayos de luz y de la superficie del pistón con respecto a la vertical para encontrar el ángulo entre la superficie y el rayo incidente. El ángulo de la superficie se calcula ajustando una serie de puntos de los vectores que definen la superficie a una función polinómica de grado 3. Dicha función se obtiene a partir de los puntos colindantes del punto de la superficie donde incide el rayo. El número de dichos puntos debe ser igual o mayor al grado de la función polinómica que será empleada. Calculando la pendiente de dicha función ajustada en el punto de incidencia del rayo es posible calcular la inclinación de la superficie. Esto es aplicable tanto a la superficie inferior como superior del pistón.

Una vez conocida la inclinación de las superficies se emplea la ley de Snell, explicada en la sección 2.1, para calcular la nueva inclinación de los rayos de luz cuando atraviesen las superficies del pistón. Una parte complicada de este método es encontrar el trazado de rayos dentro del pistón. Para poder calcular la intersección con la superficie superior se tuvo que emplear un bucle que calcula el radio de incidencia con la superficie superior con distintas alturas de desplazamiento dentro del pistón. En el momento que el radio calculado y la distancia vertical viajada dentro del pistón coincide con un punto de la superficie superior (con 0.001 mm de tolerancia) se acepta que ese es el punto de incidencia con la superficie superior.

Siguiendo un procedimiento similar al empleado con la superficie inferior para la superficie superior, se obtiene el ángulo de salida del rayo. Conociendo la distancia entre el pistón y el plano de medida puede calcularse el punto de intersección de los rayos con dicho plano, averiguando así la supuesta posición correcta de cada punto.

Los resultados del trazado de rayos se observan en la figura 3.12. Únicamente se realiza el trazado de los rayos de la zona curva de la superficie inferior, ya que es donde se va a obtener información.

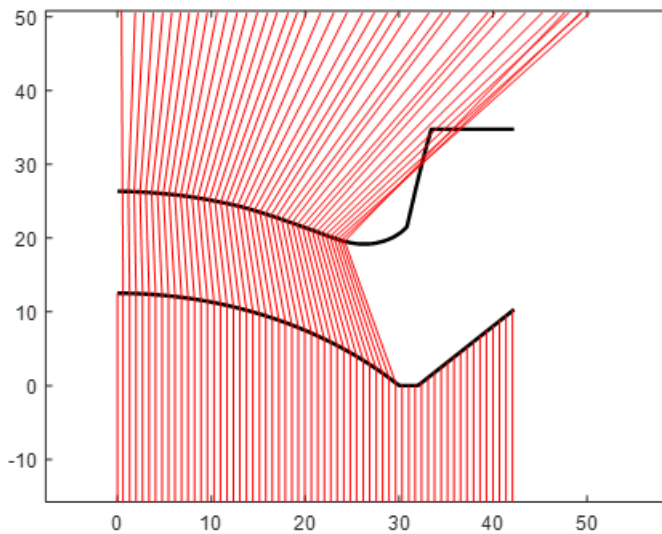


Figura 3.12: Resultado del trazado de rayos empleado

Aquí ya pueden observarse algunos fallos. Aparecen una serie de rayos que vuelven a incidir contra la pared del pistón. Sin embargo, esto son los puntos de la periferia y no se incluirán en el área a corregir de las fotos, por lo que será posible ignorar este error.

Una vez se aplica el trazado de rayos a los puntos seleccionados, se transforma el nuevo radio de cada punto a píxeles, empleando el mismo parámetro α explicado anteriormente, se obtiene el radio en píxeles de los puntos finales. La figura 3.13 muestra los puntos de entrada seleccionados (azul) y su posición corregida (rojo).

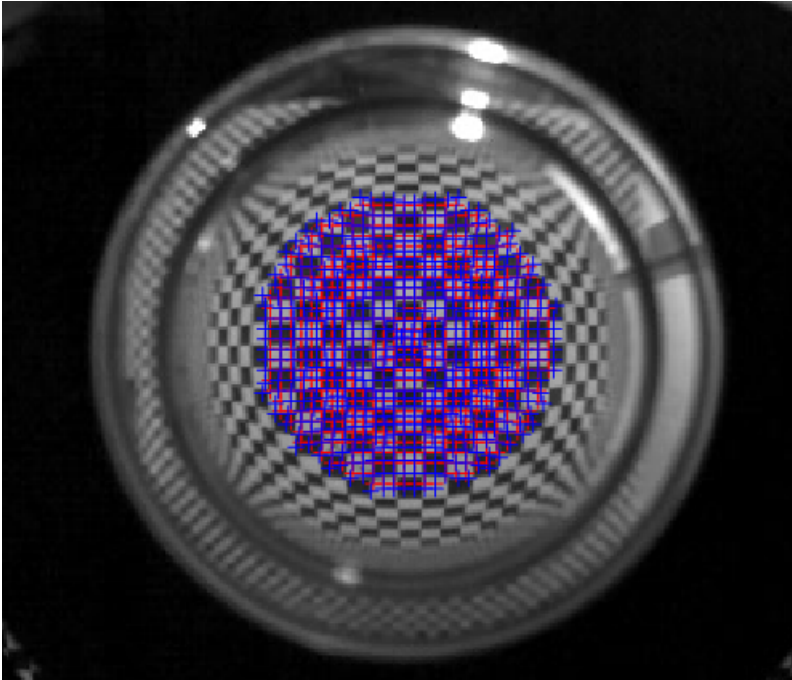


Figura 3.13: Posición de puntos de entrada y su posición corregida tras el trazado de rayos

Resultados

Una vez obtenidos los puntos originales, así como su posición final, se emplea la función *fitgeotrans*, incluida en MATLAB, que crea una matriz de transformación de la imagen. Esta matriz se generará mediante el método *Local Weighted Mean Transformation 2D*, que es el método que ofrece mayor precisión, aunque su coste computacional sea mayor. Se deben elegir el número de puntos locales empleados para obtener la media, que debe ser mayor que 6. En este caso se ha escogido emplear 50 puntos.

Con la matriz de transformación de la imagen, se emplea la función *imwarp* para transformar la imagen original a partir de la matriz que se acaba de obtener. Los resultados de dicha transformación se pueden observar en la figura 3.14.

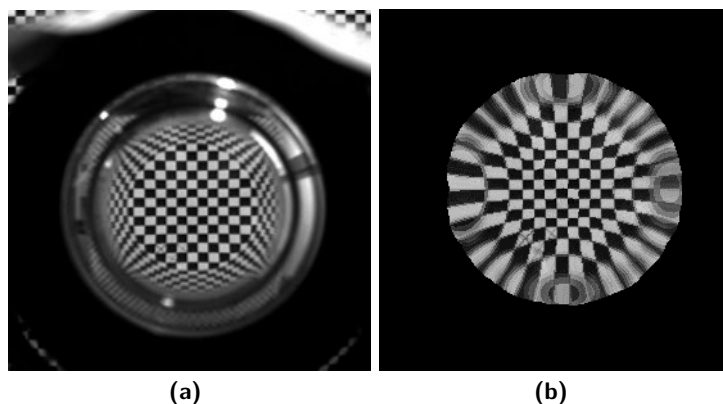


Figura 3.14: (a)Imagen original (b)Imagen corregida

Como se puede observar claramente, la transformación empleando el trazado de rayos no ofrece un resultado satisfactorio. Todo lo contrario, la imagen se ve incluso más distorsionada. La parte central, donde hay menos distorsión y donde el desplazamiento de los puntos según el trazado de rayos es menor, no sufre un cambio importante. Conforme se alejan del centro, los puntos presentan una mayor distorsión.

Fallos de la metodología

El fallo principal de este método es la posición de la imagen virtual que se forma al atravesar los rayos el pistón, que actúa como una lente compleja. La imagen virtual es aquella que forman los rayos divergentes al salir de una lente y se percibe en el punto donde las retroproyecciones de estos rayos convergen. Se trata de un punto irreal, por donde los rayos realmente no han pasado [5]. Cuando se enfoca una cámara para tomar una fotografía, esta enfoca a la posición de la imagen virtual.

En este caso, al asumir los rayos salientes como paralelos al eje óptico, se crea una imagen virtual del plano de medida en el infinito. Esto quiere decir que el sensor de la cámara esta obteniendo la imagen de un plano que está en el infinito, este contiene la imagen virtual (formada por el pistón) del plano objeto. Esta imagen virtual en el infinito no es una representación fiel del plano objeto y, por tanto, induce al error que se ha visto en los resultados.

Las implicaciones físicas de asumir una imagen virtual en el infinito no se discuten en este estudio, pero ya se admite que esta hipótesis presenta errores que pueden ser el causante del pobre resultado obtenido.

Por otro lado, asumiendo rayos paralelos al eje óptico, se obtiene un único rayo de luz que llegue al objetivo partiendo de cada punto del plano de medida. Ya se ha

discutido anteriormente que cada punto emite una gran cantidad de rayos en todas direcciones, por lo que esta hipótesis niega la posibilidad de que otro rayo haya seguido una trayectoria distinta que le permita alcanzar el objetivo.

Por estos motivos, se considera que la hipótesis de asumir rayos salientes paralelos supone una sobresimplificación del problema y se debe desarrollar un nuevo método que tenga en cuenta estas peculiaridades y presente una mejor solución.

3.4 Trazado de rayos con retro-proyección de la imagen virtual

Una vez el trazado de rayos convencional no consigue una solución satisfactoria, y se han analizado los distintos motivos que pueden causar este resultado, se propone una solución alternativa desarrollada por Zha [6].

Este nuevo método propone emplear el trazado de rayos combinado con la retro-proyección de ciertos rayos para hallar la localización de la imagen virtual de los puntos de la imagen tomada por la cámara.

El trazado de rayos funcionará de forma similar al empleado en el método previo, con algunas diferencias que se explicarán en detalle más adelante, mientras que la retro proyección es una idea nueva que no se empleó en el método comentado anteriormente.

Para explicar de forma esquemática el funcionamiento del programa, se puede observar la figura 3.15, que muestra los pasos que seguirá la corrección.

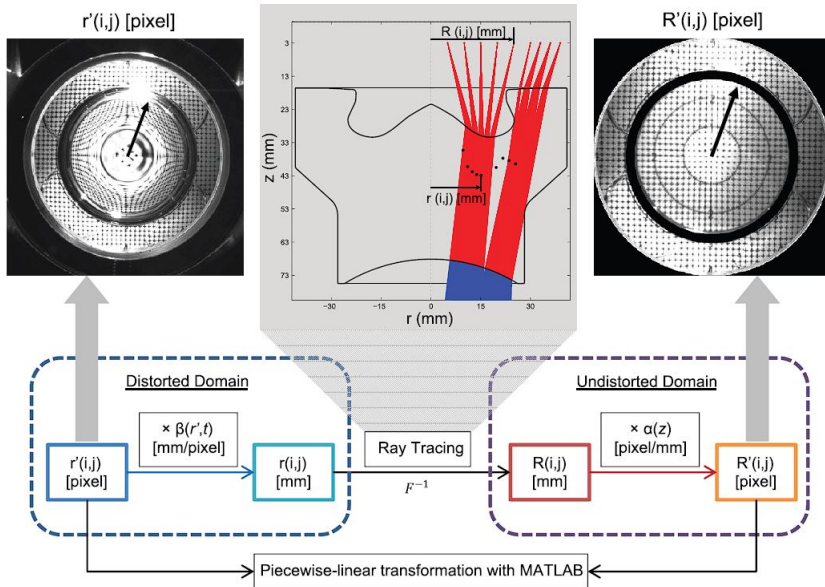


Figura 3.15: Esquema de la metodología de corrección con trazado de rayos y retro-proyección [6]

A partir de este punto del proyecto se empleará una R mayúscula para hacer referencia a radios en el plano objeto sin distorsión, con R expresado en mm y R' expresado en píxeles. Para la imagen distorsionada se utilizará r para radios de la imagen virtual en mm y r' para radios medidos en píxeles de la imagen distorsionada.

La idea de este método es simple, conociendo la distancia de cualquier punto al centro de la imagen distorsionada (r'), se dispondrá de un parámetro β [mm/píxel], dependiente de la distancia del pistón con respecto al plano de medida y la distancia radial r' , que permitirá transformar r' [píxel] a r [mm], la distancia radial de la imagen virtual de dicho punto. Una vez obtenida la posición de la imagen virtual se empleará el trazado de rayos para conocer el radio real, R , de dicho punto inicial. A partir de ahí, empleando un parámetro que se denominará α [píxel/mm], se podrá obtener R' , con lo que se generarán los puntos con las coordenadas corregidas correspondientes al punto inicial seleccionado. Realizando este proceso con una determinada cantidad de puntos de la imagen inicial se podrá obtener la matriz de corrección de la imagen.

Fijándose detenidamente en la figura 3.15, se pueden ver los resultados obtenidos siguiendo esta metodología, por lo que se propone implementar los mismos pasos. En las siguientes secciones se explicarán detenidamente las hipótesis asumidas y los pasos que se han seguido para llevar a cabo esta corrección.

3.4.1 Hipótesis

En primer lugar, se tendrán en cuenta algunas asunciones del método de trazado de rayos anterior. Todos los rayos que lleguen al objetivo formarán la imagen que se tome con la cámara, y por tanto los puntos de los que procedan se verán en la cámara.

La geometría del pistón óptico no varía, por lo que se seguirá considerando axisimétrico y se estudiará el comportamiento de los rayos unicamente en un perfil del pistón.

Se seguirá asumiendo que el índice de refracción de la cámara de combustión es constante e igual a 1.

A pesar de que los puntos de la imagen virtual se encuentren a distintas alturas, como se puede observar en el esquema de la figura 3.15, para simplificar el problema, se ignorará esta diferencia en la localización de los puntos de la imagen virtual y se asumirá que todos los puntos de esta imagen están enfocados.

3.4.2 Rutina de corrección

Trazado de rayos

La función F es la encargada de relacionar un punto sobre la superficie de medida, con la localización de su imagen virtual al pasar a través del pistón. Este calibrado será completamente automático y se llevará a cabo empleando el trazado de rayos y la retro proyección de los rayos que alcancen el objetivo.

El trazado de rayos en este caso varia con respecto al empleado en el método anterior. En esta ocasión se asumirá que de cada punto de la superficie de medida nacen una infinidad de rayos en todas direcciones. Estos rayos se refractarán sobre la superficie del pistón, lo atravesarán, y algunos de ellos alcanzarán el objetivo de la cámara que se encuentra más abajo. Este trazado de rayos funciona de la misma forma que el explicado en el apartado anterior. Mediante la ley de Snell es posible calcular el ángulo de salida de cada rayo al atravesar las superficies superior e inferior del pistón. La inclinación de estas superficies se obtiene de la misma forma que en el trazado de rayos explicado en la subseccion 3.3.2.

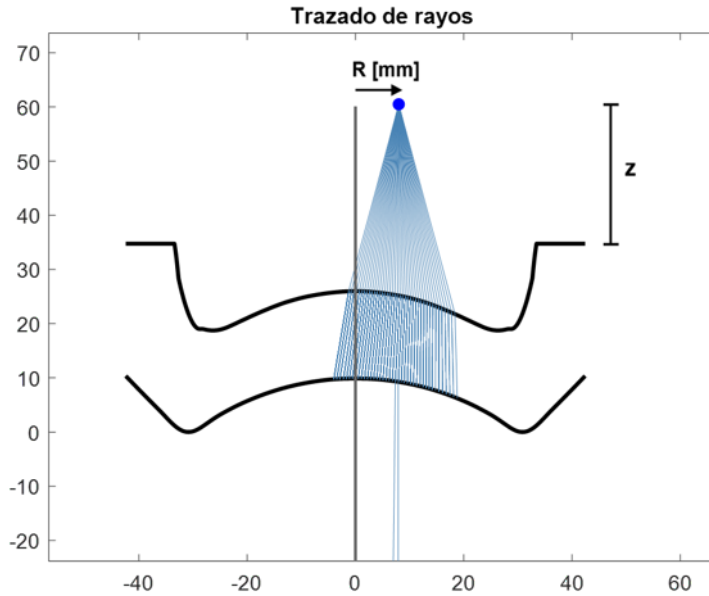


Figura 3.16: Trazado de rayos para un punto situado a 25 mm del pistón (z), y a 8 mm del eje óptico (R)

La figura 3.16 muestra un esquema del funcionamiento del trazado de rayos para este método. De un punto de la imagen real a una distancia R del centro del pistón, salen una serie de rayos con distintos ángulos de inclinación. Se realiza el trazado de rayos de estos ángulos y se averigua cuáles de ellos alcanzaran el objetivo. Esto es una representación simplificada del funcionamiento de la rutina de MATLAB, la rutina real tiene un paso mucho más pequeño para los ángulos de los rayos que salen y más rayos alcanzan el objetivo, sin embargo, este esquema es muy ilustrativo, ya que un número muy pequeño de rayos alcanzan el objetivo en comparación con los que salen de un punto del plano de medida.

La línea vertical representa el eje óptico. La culata del pistón es una lente divergente por lo que, como se puede apreciar, los rayos que alcanzan el objetivo no son paralelos al eje óptico ni entre ellos, sino que divergen, lo que permitirá hallar la imagen virtual.

Para disminuir el tiempo de la computación, deben seleccionarse unos ángulos límite a partir de los cuales no se seguirá comprobando si los rayos llegan al objetivo. Para ellos se indica un número máximo de rayos seguidos cuyo trazado se puede calcular sin que consigan llegar al objetivo. Este límite dependerá de la distancia radial R del punto en cuestión. Para que el trazado de rayos sea correcto, aquellos puntos con un R mayor deben tener un límite mayor, ya que resulta más complicado que alcancen

el objetivo. Además, el programa se basa en el cálculo del trazado en 3 áreas, de la superficie de medida a la cara superior del pistón, el trazado dentro del pistón, y el trazado del pistón al objetivo. Si en cualquiera de esas 3 áreas el rayo supera el radio del pistón, es descartado automáticamente.

Como resultado se obtienen la posición de los puntos de salida sobre la superficie inferior de los rayos que alcanzan el objetivo. También se conoce la inclinación que estos rayos tienen al salir del pistón. Estos datos se emplearán a continuación para calcular la posición de la imagen virtual de los puntos del plano real.

Retro-proyección

A continuación, se emplearán los valores de la inclinación y puntos de salida de los rayos que llegan al objetivo para calcular la posición de la imagen virtual. Como ya se ha mencionado, el haz de rayos que llegan al objetivo representado en la figura 3.16 está formado por una cantidad determinada de rayos que se emplearán para el cálculo.

En las diversas pruebas realizadas, se han obtenido un número de rayos entre 20 y 70. Se propusieron varias estrategias de intersección, como emparejar los rayos desde los que se encuentran en los extremos, con mayor ángulo e ir cogiendo parejas de ángulos menores, o calculando únicamente la intersección de los rayos más alejados. Al final se descubrió que el método que resultaba más adecuado era realizar todas las combinaciones de rayos posibles, calculando la intersección de todas ellas. El resultado de este método era el siguiente, si k rayos alcanzaban el objetivo, el número total de intersecciones calculadas era $k \cdot (k-1)/2$.

Cada una de estas intersecciones se encuentran a una altura distinta, esto significaría que no todos ellos podrían estar enfocados en la cámara. Tal y como se ha indicado en las hipótesis asumidas, y para seguir la metodología indicada por Zha et al. [6], se asumirá que todos los puntos de la imagen virtual están enfocados, y solo se tendrá en cuenta su distancia radial al centro.

A continuación, se divide el diámetro total del pistón en segmentos de $50 \mu\text{m}$. La rutina dividirá todos los puntos de la imagen virtual asignándolos a su correspondiente segmento. Una vez todos los puntos han sido asignados, se seleccionan los 5 segmentos con más concentración de puntos. Por último, la posición final de la imagen virtual se calculará a partir de la media de estos 5 segmentos, teniendo en cuenta la concentración de puntos de cada uno de ellos. El resultado de la posición final de la imagen virtual se puede observar en la figura 3.17. En esta, los puntos rojos representan la localización de la imagen virtual de los puntos azules.

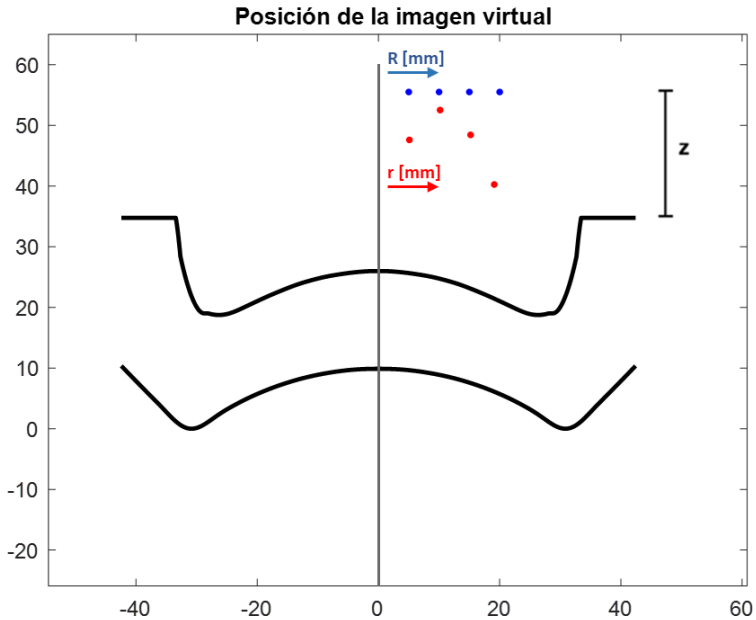


Figura 3.17: Posición de la imagen virtual para distintos puntos de un plano situado a 25 mm del pistón

Como se había indicado anteriormente, los distintos puntos de la imagen virtual calculados por este método realmente no se encuentran a la misma altura, pero se asumirá que todos ellos se encuentran enfocados.

3.4.3 Calibrado de las funciones β y F

Una vez que las funciones del trazado de rayos y la retroproyección están definidas, el siguiente paso es la calibración de la función β y F . Para ello se emplearán una serie de fotografías de calibrado como las que se observan en la sección 3.2.

Datos del programa

- **z:** Distancia entre el pistón y el plano de medidad de la imagen a corregir.
- **n1:** índice de refracción del aire (1).
- **n2:** índice de refracción del pistón (1.46).
- **Radio total:** radio máximo del pistón.

- **Altura total:** distancia entre plano inferior y superior del pistón.
- **Geometría del pistón:** por medio de los vectores de datos obtenidos en la sección 3.1.

Funcionamiento del programa

Para entender el funcionamiento de la rutina de calibrado conviene recordar el esquema de la figura 3.15. En primer lugar, se crea un vector del radio R [mm] de los puntos del plano real que se van a emplear, en este caso sería 2,4,6,8, ... A continuación, se emplean las cruces marcadas para seleccionar puntos en la imagen correspondientes a los radios reales ya elegidos. La figura 3.18 muestra la selección de puntos de una imagen de calibrado, junto con el centro, marcado en verde. Asimismo, el programa también solicita se que indique la distancia entre el pistón y el plano de medida en la imagen seleccionada.

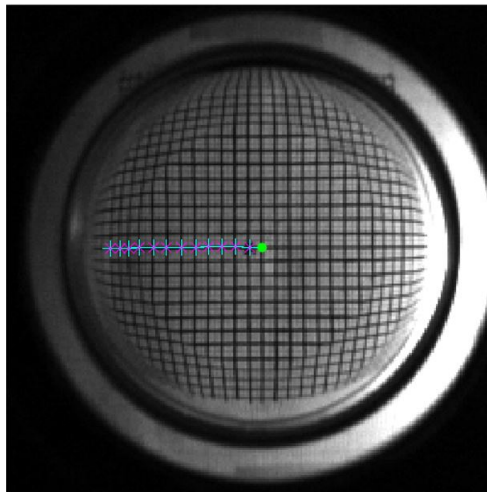


Figura 3.18: Marcas de puntos de control seleccionadas sobre la imagen, a una distancia conocida del centro del pistón

Conforme se seleccionen puntos en imágenes con mayor distancia entre el pistón y el plano de medida, resultará más difícil distinguir las cruces en la periferia. Esto se observa claramente en la figura 3.9. Por lo tanto, para las distancias z más grandes será imposible corregir la distorsión en la periferia, aunque eso no es un problema, ya que la zona de mayor interés para ensayos en motor óptico es la zona central.

Por tanto, ya se han seleccionado una serie de puntos de los que se conoce su radio en el plano real, R ; y su radio en píxeles en la imagen distorsionada, r' . Se emplean ahora las funciones de trazado de rayos con la retro-proyección para obtener la posición de la

imagen virtual de cada uno de los puntos del vector R , teniendo en cuenta la distancia entre el pistón y el plano de medida, z , que se le indica al programa previamente.

Finalmente, una vez almacenados los valores de r' [pix], r [mm] y R [mm]. El cálculo de los valores de la función F de trazado de rayos y β es simple.

$$\beta = \frac{r(mm)}{r'(pix)}$$

$$F = \frac{R(mm)}{r(mm)}$$

El programa lleva a cabo un barrido a lo largo de la carpeta que contiene todas las fotos de calibrado tomadas y el proceso se repite para cada una de ellas. Los valores de β y F se van almacenando en su correspondiente variable que el programa guarda una vez finalizado su cálculo. En las figura 3.19 y figura 3.20 se muestran los valores de los parámetros β y F . La barra de colores de la gráfica de contorno representa los valores que asumen estos parámetros.

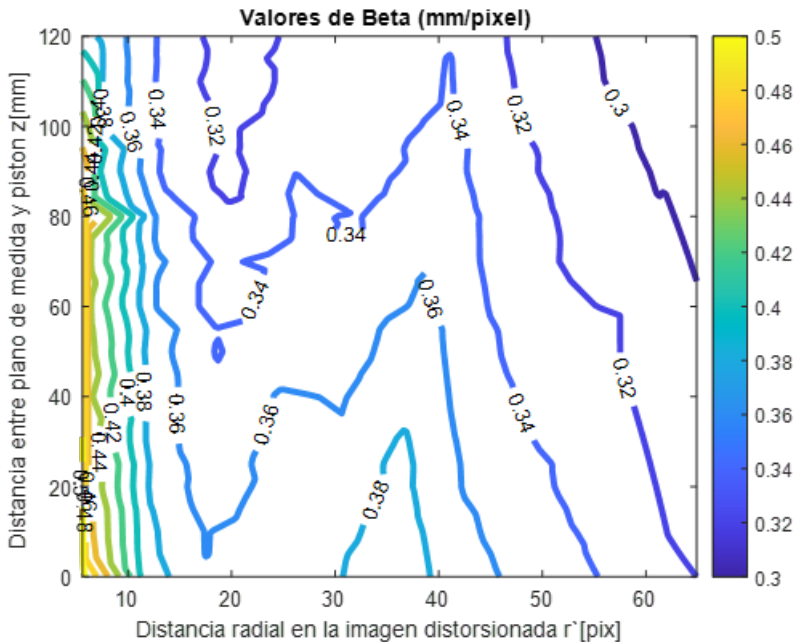


Figura 3.19: Valores del parámetro β para todo el rango de r' y z . La barra de colores representa los valores de β

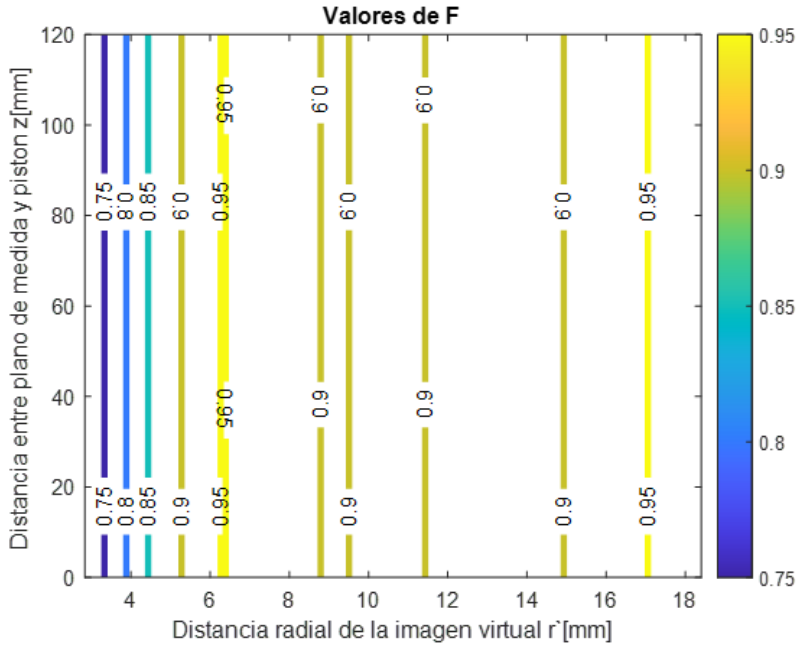


Figura 3.20: Valores del parámetro F para todo el rango de r y z . La barra de colores representa los valores de F

Estos valores se almacenarán para emplearlos en la corrección de las imágenes más adelante.

3.4.4 Corrección de las imágenes

Una vez se han calibrado correctamente los parámetros necesarios para la corrección de la imagen se puede corregir la distorsión. El funcionamiento de esta rutina compartirá algunas características con el trazado de rayos explicado en la subsección 3.3.2.

Datos del programa

Los datos que deberán ser introducidos en la rutina serán los siguientes:

- **z:** distancia entre el pistón y el plano de medida de la imagen a corregir (mm).
- **Radio total:** radio máximo del pistón (mm).
- **Altura total:** distancia entre plano inferior y superior del pistón (mm).

- **Geometría del pistón:** por medio de los vectores de datos obtenidos en la sección 3.1.
- β y F : las matrices creadas en la subsección 3.4.3.

Funcionamiento del programa

La selección del centro del pistón se lleva a cabo de la misma forma que en el trazado de rayos explicado en sección 3.3, así como la selección de puntos a corregir. Una vez seleccionados todos los puntos en la imagen distorsionada, es relativamente fácil calcular su radio, ya que la posición del centro es conocida. Con los radios de cada punto (r' [pix]) se pasa a obtener los valores necesarios de β y F ya calibrados.

En primer lugar, se necesita β . Para este factor de conversión, se ha almacenado un vector con una serie de valores de β correspondientes a distintas distancias radiales r' . Esto se repite para todas las distancias de las fotos de calibrado tomadas. Para conseguir el valor de beta correcto se interpola linealmente en cada uno de los vectores de β de cada distancia para sacar el valor de beta correspondiente a la distancia radial r' del punto a cada altura z . El resultado es un único vector de β para la distancia radial r' pero a distintas distancias z . Por tanto, solo queda realizar una segunda interpolación lineal en este único vector, empleando la distancia a la que fue tomada la foto (un dato introducido anteriormente), para conseguir la β resultante. De esta manera, se puede obtener el radio de la imagen virtual r [mm].

$$r(mm) = \beta \cdot r'(pix)$$

El siguiente paso es obtener el radio R [mm] del punto en el plano real, por lo que se empleará la función del trazado de rayos, F , ya calibrada. Esta es almacenada de forma similar a beta, con un vector de F correspondiente a distintas distancias radiales r [mm] para cada distancia entre el plano de medida y el pistón. Por lo tanto, se procede de la misma manera, realizando una doble interpolación lineal, primero para sacar el valor de F para la distancia radial correspondiente, y la segunda para conseguir el de la altura adecuada. De esta manera se consigue el radio del punto corregido en el plano real.

$$R(mm) = F \cdot r(mm)$$

El último paso, es convertir este radio a píxeles, para poder obtener la transformación de la imagen. Si se observa la figura 3.15, este parámetro se llamará α y dependerá únicamente de la distancia entre el plano de medida y el PMS, por lo que será constante para todos los puntos de una determinada imagen tomada. El calibrado de este parámetro es bastante sencillo, se retira el pistón de la configuración que se muestra en la figura 3.7 y se toman varias fotos con la cámara a distintas distancias del papel

milimetrado. Usando los cuadraditos marcados se puede conocer para cada distancia la relación pixel/mm. En este estudio no se ha calculado la función de α , sino que se halló el valor de α correspondiente a una única distancia entre plano de medida y cámara y que se muestra en subsección 3.4.4. Una vez conocido α se consiguen los radios finales de los puntos de control en la imagen corregida.

$$\alpha = 3,64(\text{pix}/\text{mm})$$
$$R'(\text{pix}) = \alpha \cdot R(\text{mm})$$

Este proceso se repite para todos los puntos iniciales seleccionados, de forma que si se muestran las coordenadas finales sobre la imagen queda según se muestran en la figura 3.21b.

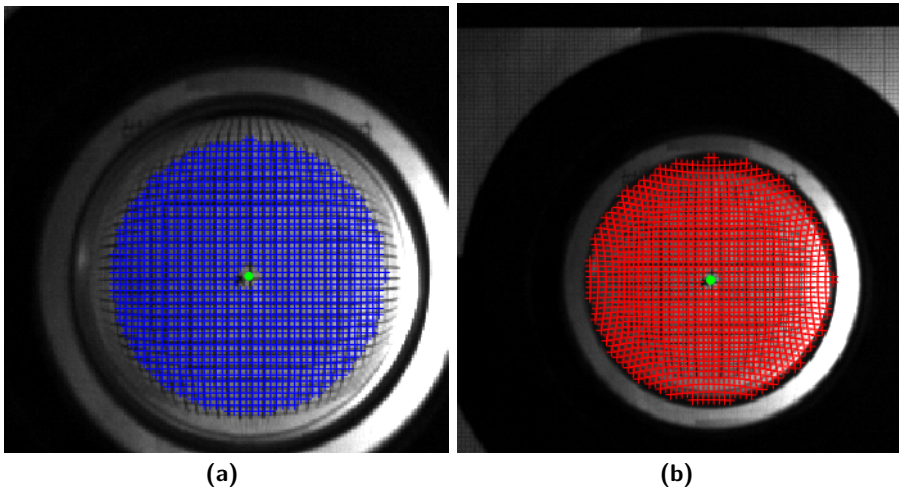


Figura 3.21: (a)Puntos de control iniciales (azul). (b)Puntos de control tras la corrección (rojo)

Si se eliminan algunos de los puntos (para poder ver con más claridad la imagen) y se superponen los puntos, se puede observar claramente la transformación que sufren los puntos. Véase figura 3.22.

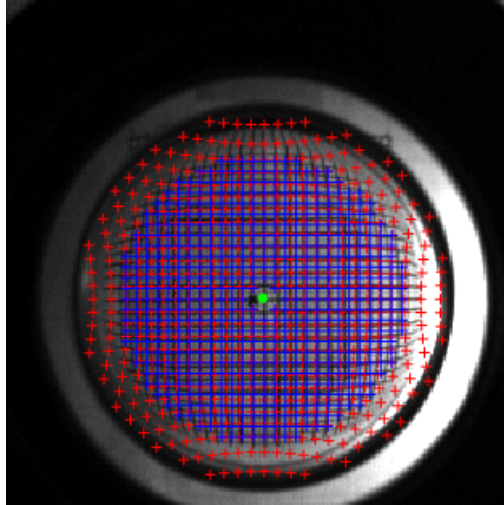


Figura 3.22: Coordenadas iniciales (cruces azules) y finales (cruces rojas) de los puntos de control

La rutina se encarga de eliminar los puntos de control que no es capaz de transformar, por ese motivo se observará como la periferia de las fotos tomadas a mayores distancias no será corregida. Esto es debido a que es imposible calibrar los parámetros de corrección β y F .

Con estas coordenadas ya se puede crear la matriz de transformación de la imagen empleando la función incluida en MATLAB *fitgeotrans*. Zha et al. recomendaban usar una transformación lineal Piecewise para obtener esta matriz, pero en este proyecto se ha decidido emplear un *Local Weighted Mean Transformation*. Esta última ofrece una mayor precisión ya que crea un polinomio de transformación en cada punto de control empleando los puntos de control que se encuentran a su alrededor. Para seleccionar el número de puntos para calcular la media de este método, se ha comprobado que un valor mayor de 50 ofrece buenos resultados, en este proyecto se han empleado 80 puntos para el cálculo de la media.

Una vez obtenida la matriz de transformación, se emplea la función *imwarp*, en esta se escoge la opción *nearest* para la relación de los puntos de matriz de transformación y los puntos de la imagen. En la siguiente sección se discuten los resultados de la transformación.

Resultados

Por último, se aplican los pasos descritos anteriormente para corregir una imagen. La fotografía original y la corregida se pueden ver en la figura 3.23.

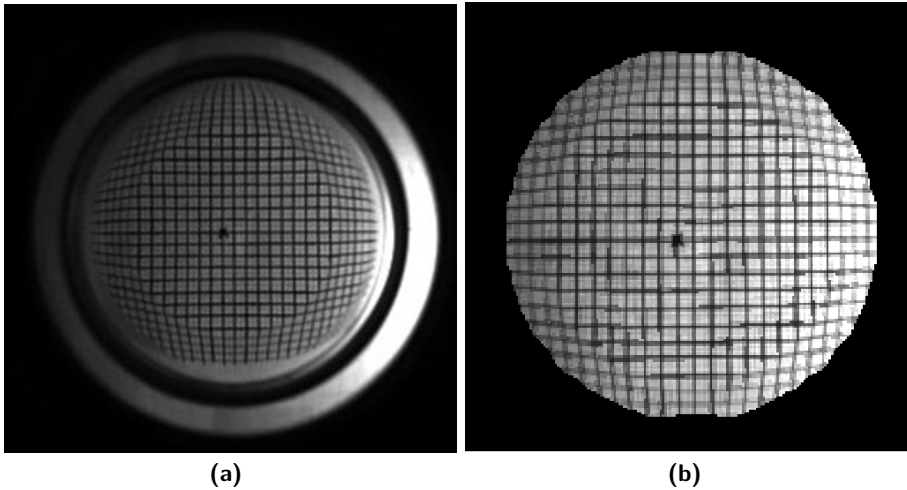


Figura 3.23: (a) Imagen original a 3 mm del plano de medida. (b) Imagen tras la corrección

A primera vista si se observa una mejora en la imagen, con una reducción de la distorsión importante. No obstante, esto no es suficiente para determinar la calidad de la corrección y no es posible sacar resultados concluyentes unicamente de esta imagen. En el Capítulo 4 se discutirá la precisión de la metodología propuesta.

Capítulo 4

Evaluación del método y discusión de los resultados

En esta sección se analizará el funcionamiento de la estrategia de corrección de la distorsión, determinando su nivel de precisión y las situaciones en que los resultados obtenidos no son fiables. Para ello, se determinará la diferencia entre la posición de ciertos puntos tras aplicar la corrección y su supuesta posición real.

4.1 Error y rango de validez

Como se ha visto durante todo el estudio, se ha trabajado con dos unidades fundamentales, en píxeles y en milímetros. Para este estudio de validez de la corrección se emplearán valores en milímetros. Esto se debe a que la transformación de milímetros a píxeles se realiza por medio de una constante que únicamente varía según la distancia entre el pistón y el plano de medida. Por tanto, para obtener el error en píxeles únicamente habría que multiplicar los errores por su constante correspondiente.

Por otro lado, las cruces marcadas en el papel milimetrado separadas 2 mm entre sí, se emplearán como puntos de control para determinar el error del método.

En primer lugar, se modela la posición de las cruces en el plano real, colocándolas en su supuesta posición si fuera posible verlas a través del pistón óptico sin distorsión. En la figura 4.1 se observan las cruces en su posición real. Ya que las fotos fueron tomadas con el pistón alineado con la rejilla, el centro del mismo coincide con una de las cruces. Este centro no es el que se ve marcado en las imágenes tomadas, sino el punto situado justo a su derecha.

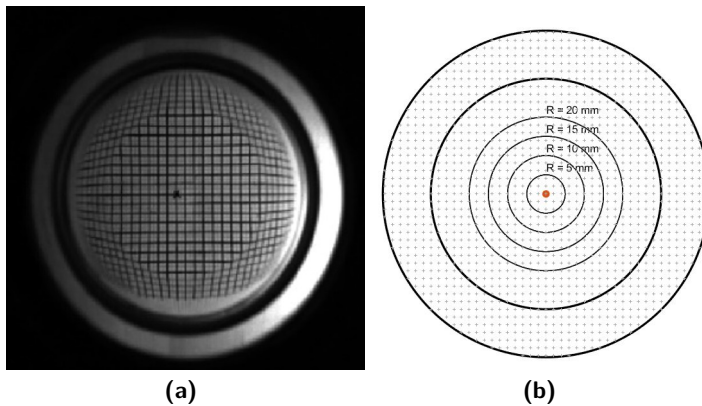


Figura 4.1: Modelado de la rejilla en MATLAB. (a) Imagen ejemplo. (b) Posición de las cruces en el modelo.

A continuación deben seleccionarse los puntos correspondientes a las cruces en la imagen tomada. Seleccionar de forma manual todas las cruces resulta demasiado laborioso, y además, se introduce el error humano, ya que el centro de las cruces no se elegiría de la misma forma para todos los radios. Por esta razón, se ha optado por hacer uso de la axisimetría del problema y únicamente seleccionar los puntos en un radio del pistón, de forma similar a la metodología de mapeo de β y F , como se muestra en la figura 3.18. Los datos que se obtengan de estos radios serán extrapolables al resto de intersecciones de la rejilla.

Una vez seleccionados dichos puntos, se realiza todo el proceso de corrección explicado en secciones anteriores y se obtiene el radio final de los puntos, que en este caso no serán transformados a píxeles, sino que serán empleados en mm. Una vez hecho esto, es posible extrapolar los resultados a todas las intersecciones, y de esta forma averiguar la diferencia entre la posición real de los puntos y su posición tras la corrección. Tras probar varios métodos, se ha determinado que una extrapolación lineal es suficiente para conseguir buena precisión a la hora de determinar el error en el resto de los puntos.

En la figura 4.2 se observa el resultado del cálculo del error. Los vectores de la figura 4.2 (b) indican el desplazamiento desde la posición real del cruce de la rejilla hasta la posición del punto tras aplicar la corrección. En la gráfica contorneada se puede analizar la evolución del error para cualquier posición del pistón y cualquier radio de la imagen, donde la barra de colores representa la magnitud del error absoluto.

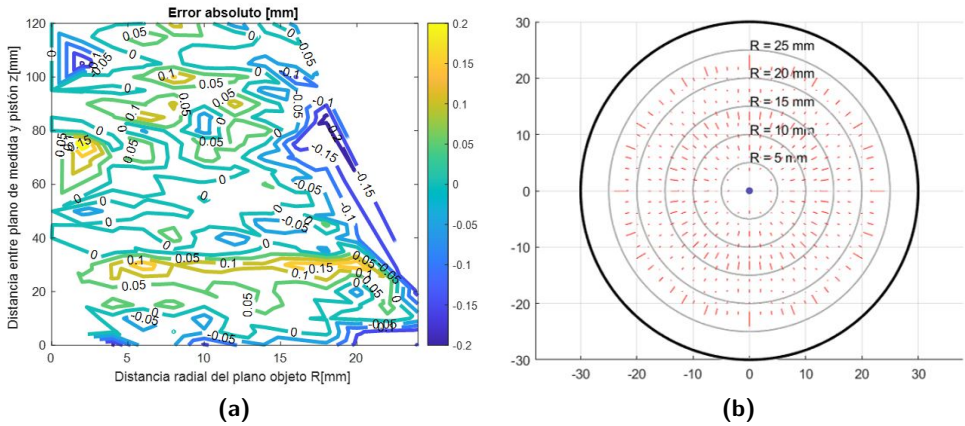


Figura 4.2: (a) Error sistemático de la corrección. (b) Representación 2D del error con el pistón separado 0 mm del plano de medida.

A los vectores en la figura 4.2 (b) se les ha quintuplicado su módulo para poder visualizarlo, el error es realmente menor. Analizando con más detalle la distribución de error en la gráfica contorneada, se puede observar que los valores máximos no sobrepasan los 0.2 mm, aunque en la mayor parte los errores son mucho menores. Por otro lado, no hay ninguna evolución aparente del error dependiendo del radio o de la distancia entre el plano de medida y el pistón. También es interesante comprobar que el error puede obtener valores negativos y positivos. Las zonas con un error negativo corresponden a puntos que terminan con un radio menor que el real. Mientras que el error positivo se da en zonas donde la corrección otorga a los puntos un radio mayor que el real.

Una representación interesante del error cometido es compararlo con la resolución que se puede obtener de la metodología y las imágenes. Para calcular esta resolución se emplean los parámetros de corrección utilizados para cada punto, de forma que la resolución quede definida de la siguiente manera.

$$\text{Resolución} = 1/\alpha = 0,275 \text{ mm}/\text{pix}$$

Una vez obtenida esta resolución es posible obtener el error relativo a través del cociente, transformando el valor a porcentaje:

$$E_{rel} = \frac{E_{abs}}{\text{Resolución}} \cdot 100$$

Si se expresan los resultados de esta transformación en un gráfico, se observan los resultados en la figura 4.3.

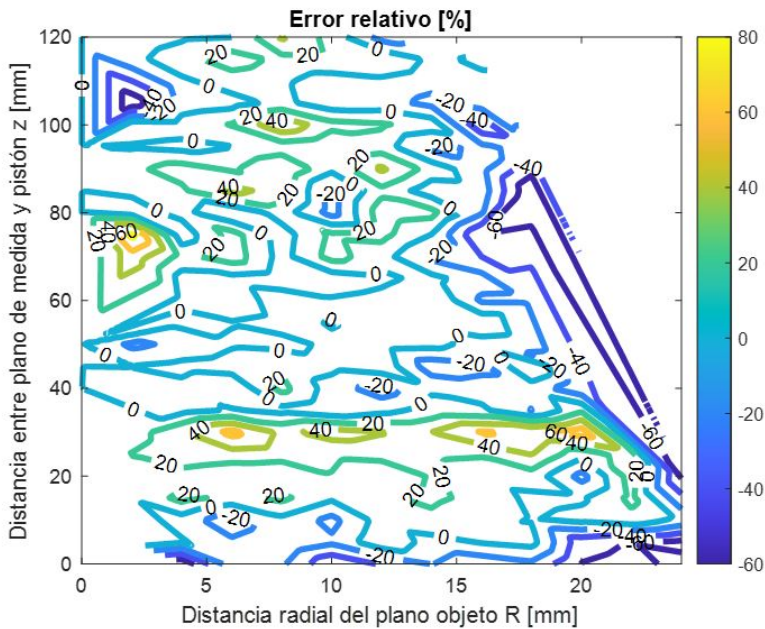


Figura 4.3: Error relativo a la resolución, la barra de colores a la derecha indica el porcentaje de error con respecto a la resolución.

Como se puede observar, en ningún punto toma el error relativo valores superiores al 100 %, lo que indica que el error siempre será menor que la resolución que se obtiene con la cámara y el método. Esto indica que la metodología usada es lo suficientemente precisa para obtener resultados fiables. Asimismo, hay una amplia zona donde el error relativo es 0, esto no es del todo cierto, sino que son zonas donde el error es mucho menor que la resolución.

Estudiando el error relativo, tampoco puede determinarse una dependencia clara con la distancia respecto al plano de medida, z ; o la posición radial de los puntos, R . Por tanto, se determina que el error cometido en cada corrección depende únicamente de la precisión en el calibrado de los parámetros β y F .

Otra característica de la metodología que resulta interesante conocer es el radio máximo que es posible corregir para las diferentes posiciones del pistón con respecto al plano de medida. Esta distancia máxima de corrección disminuye con la distancia. Ese

radio máximo debe tenerse en cuenta a la hora de recopilar información de una imagen corregida, para conocer en que áreas la información de la imagen deja de ser fiable.

Por tanto, se puede concluir que la metodología empleada para el calibrado y la corrección es adecuada, ya que los errores cometidos son pequeños y representan una fracción de la resolución que se obtiene con el método.

4.2 Rango de validez de β

La mayor utilidad de esta metodología consiste en calibrar los parámetros de la corrección, β y F , en una serie de imágenes base tomadas a distintas distancias al plano de medida. Una vez este realizado este calibrado, se espera poder asumir β y F constantes para pequeñas variaciones de la distancia a la que se toma la imagen, z . De esta forma, se puede ahorrar una gran cantidad de tiempo al no tener que calibrar dichos parámetros para cada imagen tomada.

En este apartado se va a estudiar la evolución del error al asumir unos parámetros de corrección constantes para imágenes tomadas a distintas alturas. El objetivo es discernir hasta que punto resulta aceptable asumir estos parámetros como constantes.

En los ensayos en motor óptico, la mayor parte de la información se recauda con el pistón cercano al PMS (Punto Muerto Superior), por lo que este estudio se va a centrar en distancias cercanas al plano de medida.

En primer lugar, se cogerán los valores de β y F correspondientes a una imagen tomada a 10 mm del plano de medida. Manteniendo los mismo constantes, se aplicará la corrección a imágenes tomadas a mayor y menor distancia, es decir a 0 mm, 5 mm, 15 mm y 20 mm. En las siguientes imágenes se pueden observar los resultados.

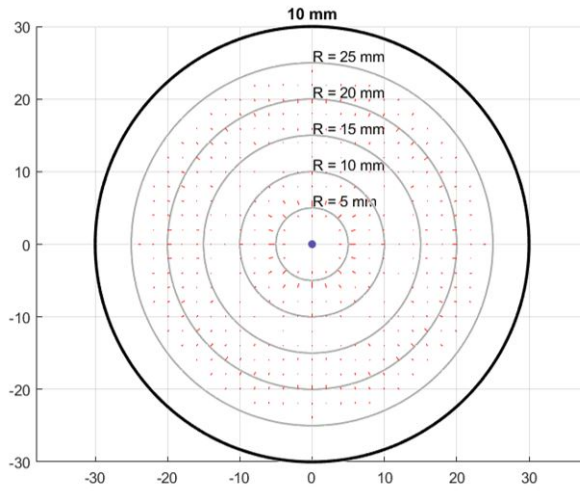


Figura 4.4: Error con $z = 10$ mm

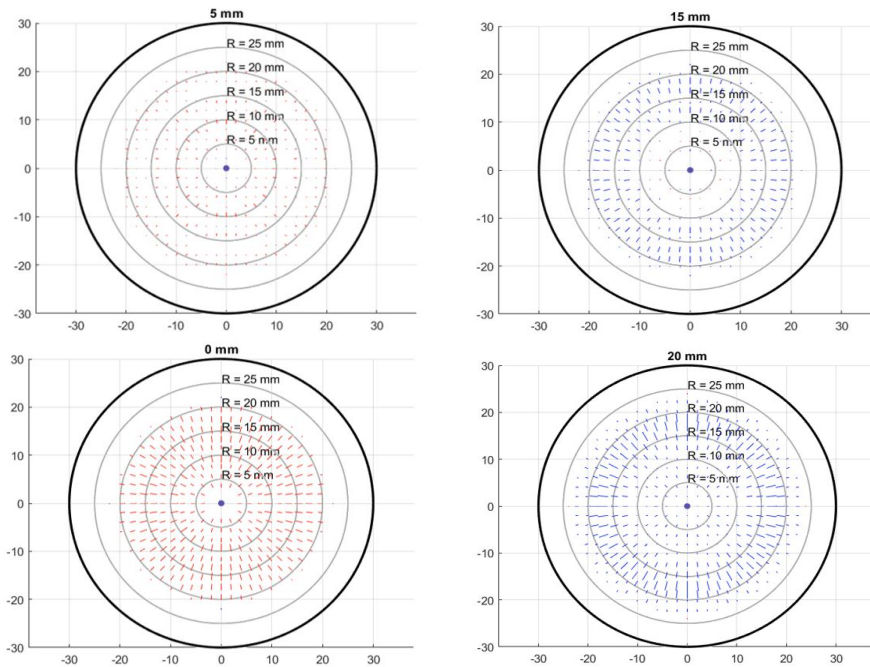


Figura 4.5: Error a distintas z , manteniendo los parámetros de corrección correspondientes a $z = 10$ mm

En figura 4.5 se puede visualizar claramente como el error aumenta a medida que aumenta la diferencia entre la distancia a la que corresponden los parámetros β y F escogidos y la distancia de la imagen que se está corrigiendo. La evolución del error relativo para este caso de estudio se puede observar en la figura 4.6.

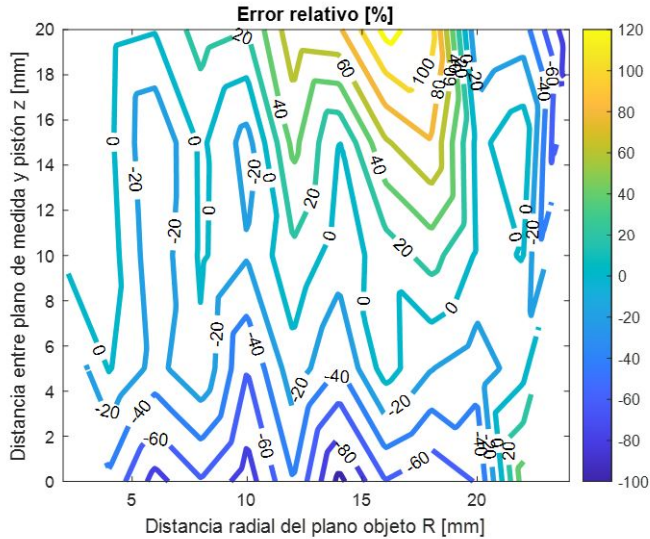


Figura 4.6: Error con β y F correspondientes a $z = 10$ mm

Si que se puede observar un aumento importante del error relativo, que será mayor conforme se corrijan imágenes tomadas a una distancia z más alejada de aquella a la que corresponden los valores de β y F .

A continuación, se va a emplear la misma metodología para comparar los resultados del error al asumir unos parámetros constantes correspondientes a cierta distancia z al aplicarlos a imágenes capturadas a distancias cercanas. La figura 4.7 muestra algunos casos en los que se aplican estas condiciones.

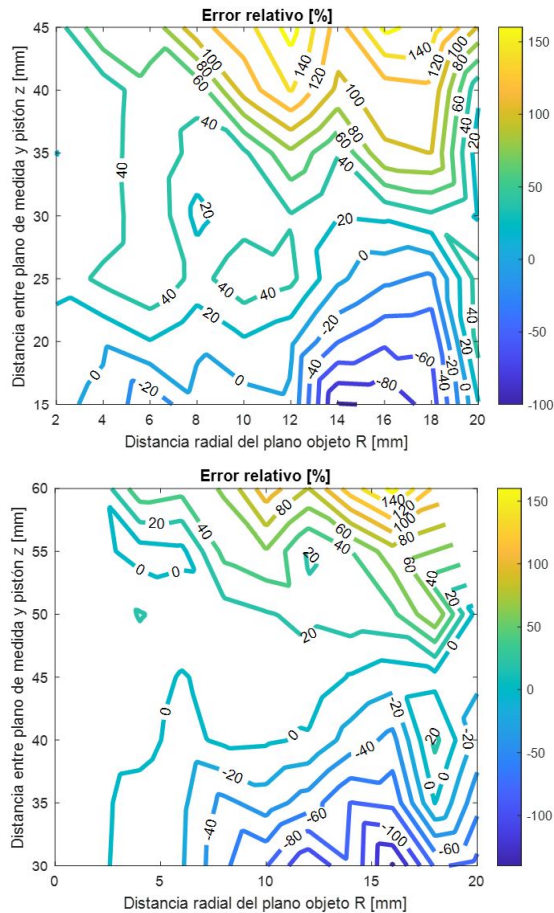


Figura 4.7: Evolución del error relativo asumiendo parámetros de corrección constantes y correspondientes a: (a) $z = 30$ mm. (b) $z = 45$ mm.

Como se esperaba, el error aumenta conforme se corrigen fotos más distanciadas de las correspondientes a los parámetros de corrección escogidos. Este error se ve aun más acentuado para puntos con mayor distancia radial, que son las zonas donde la distorsión evoluciona de manera más pronunciada para el pistón utilizado en el desarrollo del método.

Dependiendo de la precisión requerida en las mediciones se pueden elegir los intervalos en los que tomar las imágenes de calibrado.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Conclusiones

A lo largo de este proyecto se ha alcanzado el objetivo principal, el desarrollo de una herramienta que permita corregir la distorsión en una imagen de forma fiable. Se ha conseguido aplicar un método sencillo de modelado de la geometría que puede ser aplicado a distintos pistones. El método de calibrado de los parámetros de corrección permite ahorrar tiempo en la corrección de la distorsión. Por último, los errores obtenidos por el método son bastante menores a la resolución del estudio.

Los resultados finales del proyecto se recogen en los siguientes puntos:

- El método desarrollado ofrece una forma fiable y rápida de corregir la distorsión en imágenes tomadas en cualquier punto de la carrera del pistón.
- Una de las mayores ventajas que ofrece la metodología es la posibilidad de asumir los parámetros de corrección constantes en pequeños intervalos.
- Teóricamente, la metodología descrita permite adaptar rápidamente la rutina para corregir imágenes tomadas a través de pistones de distintas geometrías.
- Cuanto menor sea el intervalo de la distancia entre las imágenes de calibrado mayor precisión tendrá la corrección. Un intervalo entre 0.5 y 1 cm es suficiente para obtener un error aceptable.
- Los errores obtenidos con un intervalo de 0.5 cm en las imágenes de calibrado son en todo momento inferiores a la resolución obtenida.

Por tanto, se puede confirmar que el objetivo del proyecto ha sido cumplido y esta herramienta podrá tener un papel importante en futuras investigaciones realizadas en el IUI CMT-Motores Térmicos.

5.2 Futuros trabajos y mejoras

Si bien se han conseguido los objetivos del estudio, quedan algunas comprobaciones que serían interesantes llevar a cabo para asegurar el funcionamiento correcto del programa. Sin embargo, estas comprobaciones quedan fuera del alcance de este estudio.

La comprobación principal que podría hacerse es aplicar esta metodología a un estudio, para asegurar que los resultados obtenidos al corregir la distorsión corresponden con los reales. De esta forma se validará la precisión del método.

Por otro lado, también sería interesante probar el funcionamiento de la metodología al cambiar el pistón. Esto permitirá comprobar los errores que puedan surgir en el programa al enfrentarse a un perfil geométrico distinto.

Bibliografía

- [1] Axel Vallet. “Desarrollo de una herramienta para la corrección de la distorsión de imágenes en motores de combustión con accesos ópticos complejos”. Trabajo Fin de Grado. Universitat Politècnica de Valencia, 2022.
- [2] *Ley de Snell*. 2022. URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Snell (visitado 29-04-2022).
- [3] Gaurav Mittal y Manoj Gwalwanshi. “Influence of reentrant piston bowl geometry on combustion in CI engine”. En: *Materials Today: Proceedings* 46 (2021), pp. 11011-11014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.098>.
- [4] Florian Agator. “Measurement of the flow in optical motor cylinder with laser techniques”. École centrale de Nantes. Report of Stage at CMT-Motores Térmicos, 2018. Universitat Politècnica de Valencia.
- [5] Foxit PDF Editor, ed. *Óptica geométrica*. Foxit Software Company, 2007.
- [6] Cheolwoon Park Kan Zha Stephen Busch y Paul Miles. “A novel method for correction of temporally- and spatially-variant optical distortion in planar particle image velocimetry”. En: *Measurement Science and Technology* 27.085201 (2016). DOI: 10.1088/0957-0233/27/8/085201.

Apéndice A

Manual del programador

1. Mapeo_beta

Este programa se encarga de calibrar los parámetros de corrección de distorsión β y F a partir de las imágenes de calibrado.

Datos a introducir (líneas 29-36)

- htotal: Distancia entre plano inferior y superior del pistón.
- rtotal: radio máximo del pistón.
- Distancia entre plano de medida y el pistón de la imagen a corregir (lo pide el programa para cada foto).
- distancia_camara: distancia entre el papel milimétrico y la cámara al tomar las imágenes de calibrado
- diametro_objetivo: diámetro del objetivo de la cámara
- n1: índice de refracción del aire
- n2: índice de refracción del pistón
- x: puntos para obtener la inclinación de la superficie del pistón. Este parámetro indica cuantos puntos a izquierda y derecha del punto donde el rayo incide sobre la superficie del pistón se tomarán para crear una función de la superficie que permita calcular la inclinación.
- puntos: puntos de calibrado en cada imagen, seleccionados en cada imagen a distancias conocidas del centro del pistón.

Geometría del pistón (líneas 13-14)

Introducir el directorio de la carpeta con los datos sobre la geometría del pistón.

Estos datos se habrán obtenido únicamente para la mitad del perfil del pistón, para conseguir mayor precisión. El programa se encargará de duplicarlos y conseguir el perfil del pistón entero. Estos datos corresponderán a 4 vectores, dos representando la superficie inferior, con radio y altura de esa superficie, los otros dos representando el radio y la altura de la superficie superior. Todos los valores de esos vectores deben ser positivos o 0, y es importante que no se superpongan las superficies inferior y superior de los pistones. Si los datos se han obtenido del programa *GetPtsCoord* de Florian Agator hay que sumar a la altura de la superficie superior, la altura total del pistón (*htotal*).

Carpeta de fotos (líneas 40-51)

Línea 40: introducir el directorio con la carpeta donde se encuentran las carpetas de todas las fotos de calibrado.

Línea 51 y 87: Cambiar el directorio al mismo de la línea 40 + *folder_name*, para elegir las distintas carpetas donde se guardan cada una de las fotos.

Otros directorios (líneas 78 y 155)

Incluir el directorio con la carpeta que incluya los siguientes programas: *circfit.m*, *dist.m*, *ray_tracing_back_projection*, *Probamos_backProjection*, *salida_reverse.m*, *trazado_dentro_piston.m*, *inclinacion.m*.

Líneas 147-153

Estas líneas de código crean un vector R_{mm} que corresponde a las distancias radiales en mm de los puntos en el plano real que corresponden a los seleccionados en la imagen. Solo debe cambiarse si la distancia entre los puntos es distinta a 2 mm o si se van a emplear más de 13 puntos de calibrado.

Resultados

El programa creará dos variables, *beta* y *F*. Estas variables son tipo *struct* y el programa no las guarda en ningún lado, deben ser almacenadas manualmente en el directorio que se elija.

beta: consta de 3 campos, título, *r_pix* y *beta* para cada fila.

El título indica la distancia entre pistón y plano de medida en que se ha calibrado *beta*.

r_pix es un vector que representa la distancia radial en píxeles de los puntos que se han calibrado.

β es un vector de la misma longitud que r_{pix} que almacena los valores correspondientes de β para cada valor de r_{pix} .

F : consta de 3 campos, título, r_{mm} y F para cada fila.

El título indica la distancia entre pistón y plano de medida en que se ha calibrado F .

r_{mm} es un vector que representa la distancia radial en mm de la imagen virtual de los puntos seleccionados anteriormente r_{pix} .

F es un vector de la misma longitud que r_{mm} que almacena los valores correspondientes de F para cada valor de r_{mm} .

2. correccion_distorsion

Este programa se encarga de corregir la distorsión de una foto seleccionada, generando puntos de control y aplicando la corrección usando los parámetros β y F ya calibrados y devuelve la imagen final ya corregida tras aplicar la transformación.

Datos a introducir (líneas 7-23)

- r_{total} : radio máximo del pistón, en mm.
- r_{cor} : radio en mm del área de la imagen que se busca corregir.
- α : relación pix/mm, obtenido de una imagen del papel milimétrico.
- $step$: distancia entre los puntos de control que selecciona el programa en la imagen a corregir, en píxeles.
- dir : directorio de la carpeta donde se encuentra la imagen a corregir.
- z : distancia entre el pistón y el plano de medida en la imagen tomada para corregir, en mm.

Introducir β y F (líneas 26-27)

Introducir el directorio donde se encuentren almacenados β y F .

Selección de los puntos de control (líneas 64-76)

Selección de los puntos de control en la imagen distorsionada con un paso igual al introducido como variable $step$.

Corrección de los radios (líneas 99-147)

Se corrigen los radios de los puntos de control seleccionados navegando por toda la matriz de β y F .

β y F constante para una altura (líneas 148-168)

Seleccionar esta opción cuando se quiere realizar una corrección asumiendo una β y F constantes y correspondientes a una altura determinada. En este caso se deben indicar la fila en las matrices de β y F que corresponde con la altura elegida.

Eliminar valores erróneos (líneas 206-220)

Elimina los puntos que no han podido ser corregidos por cualquier error, tanto en las coordenadas iniciales como en las corregidas. Si se quiere ver que puntos el programa no es capaz de corregir, se debe parar la rutina antes de que ejecute estas líneas.

3. Probamos_backprojection

Función que calcula la posición de la imagen virtual de un punto a partir de la intersección de todos los rayos que salen de ese punto y alcanzan el objetivo de la cámara.

Datos de entrada

- $htotal$: Distancia entre plano inferior y superior del pistón.
- $rtotal$: radio máximo del pistón.
- Distancia entre plano de medida y el pistón de la imagen a corregir (lo pide el programa para cada foto).
- $distancia_camara$: distancia entre el papel milimétrico y la cámara al tomar las imágenes de calibrado.
- $diametro_objetivo$: diámetro del objetivo de la cámara.
- $n1$: índice de refracción del aire.
- $n2$: índice de refracción del pistón.
- R : radio en mm del punto en el plano objeto del que se va a calcular la posición de la imagen virtual.
- z : distancia entre el pistón y el plano de medida en la imagen tomada para corregir, en mm.

- r_top , r_bot , h_top , h_bot : vectores que definen la geometría del pistón, introducidos con el mismo formato que el explicado en la geometría del pistón en el programa *mapeo_beta*.

En las líneas 22 y 24 se pueden modificar el ángulo desde el que se empieza a hacer el barrido de rayos (*angle_start1*) y la variación del ángulo entre dos rayos de luz consecutivos *step*.

Resultados

projected_r: el radio de la imagen virtual del punto, en mm. Si ningún rayo llega al objetivo el resultado es 0.

4. ray_tracing

Esta función calcula el trazado de rayos de un solo rayo. Comprueba que dicho rayo llegue al objetivo y devuelve los parámetros necesarios para calcular la retro proyección de la imagen virtual.

Datos de entrada

- *htotal*: Distancia entre plano inferior y superior del pistón.
- *h*: Distancia entre plano de medida y el pistón de la imagen a corregir.
- *d*: distancia entre la culata del pistón y la cámara al tomar las imágenes de calibrado.
- *n1*: índice de refracción del aire.
- *n2*: índice de refracción del pistón.
- *r*: radio en mm del punto en el plano objeto del que parten los rayos de luz.
- *x*: puntos para obtener la inclinación de la superficie del pistón. Este parámetro indica cuantos puntos a izquierda y derecha del punto donde el rayo incide sobre la superficie del pistón se tomarán para crear una función de la superficie que permita calcular la inclinación.
- r_top_trim , r_bot_trim , h_top_trim , h_bot_trim : vectores que definen la geometría del pistón, introducidos con el mismo formato que el explicado en la geometría del pistón en el programa *mapeo_beta*.

Resultados

- *r_final*: radio del punto donde el rayo de luz incide sobre el objetivo.

- `ang_final`: ángulo con respecto de la vertical que tiene el rayo que sale de la culata del pistón y llega al objetivo.
- `rbot` y `hbot`: punto sobre la superficie inferior del pistón por el que sale el rayo que alcanza el objetivo.

En caso de que el rayo de luz del que se ha calculado su trazado no alcance el objetivo, todos los resultados serán *NaN*.

Todas las variables expuestas pueden ser una serie de vectores con los datos de todos los rayos que salen del punto del plano objeto y consiguen alcanzar el objetivo de la cámara.

5. inclinacion

Calcula la inclinación con respecto a la vertical en grados de la recta normal al punto de la superficie sobre el que incide el rayo. Una recta inclinada hacia la derecha tendrá una inclinación positiva, y hacia la izquierda una inclinación negativa.

Datos de entrada

- `r`: radio en mm del punto sobre la superficie del pistón del que se calculará la inclinación, en mm.
- `x`: puntos para obtener la inclinación de la superficie del pistón. Este parámetro indica cuantos puntos a izquierda y derecha del punto donde el rayo incide sobre la superficie del pistón se tomarán para crear una función de la superficie que permita calcular la inclinación.
- `r_vec`, `h_vec`: vectores que definen la geometría del pistón, introducidos con el mismo formato que el explicado en la geometría del pistón en *mapeo_beta*, en este caso solo de la superficie sobre la que incide el rayo, no ambas.

Línea 22-48: Seleccionan los puntos que se van a emplear para la aproximación polinómica, se puede modificar para seleccionar más o menos puntos. Con cambiar el valor de `x` será suficiente.

Línea 55: realiza la aproximación polinómica de los puntos de la superficie seleccionados con `x`, se puede modificar `x` y el grado del polinomio para obtener la precisión deseada.

Resultados

- `inc`: la inclinación con respecto a la vertical, en grados, de la recta normal a la superficie del pistón en el punto sobre el que incide el rayo.

6. salida_reverse

Emplea la ley de Snell para calcular la inclinación del rayo (en grados), con respecto a la vertical tras atravesar una superficie de cambio de medio. De aire a pistón y de pistón a aire.

Datos de entrada

- ang_rayo: inclinación del rayo con respecto a la vertical en grados.
- n1: índice de refracción del aire.
- n2: índice de refracción del pistón.
- inc: inclinación (en grados) con respecto a la vertical de la normal de la superficie del pistón en el punto donde incide el rayo.

Resultados

- ang_2: la inclinación con respecto a la vertical en grados del rayo saliente tras atravesar la superficie de cambio de medio.

7. trazado_dentro_piston

La función calcula la trayectoria del rayo dentro del pistón, devolviendo el punto con el que choca con la superficie de salida del pistón tras atravesar el mismo.

Datos de entrada

- ang: inclinación, en grados, con respecto a la vertical del rayo de luz dentro del pistón, tras atravesar la superficie de entrada.
- r: radio del punto de entrada al pistón del rayo de luz.
- h_ini: altura de la superficie del pistón en el punto donde el rayo entra al mismo.
- httotal: distancia entre plano inferior y superior del pistón.
- r_vec, h_vec: vectores que definen la geometría del pistón, introducidos con el mismo formato que el explicado en la geometría del pistón en *mapeo_beta*, en este caso solo de la superficie por la que el rayo debe salir.

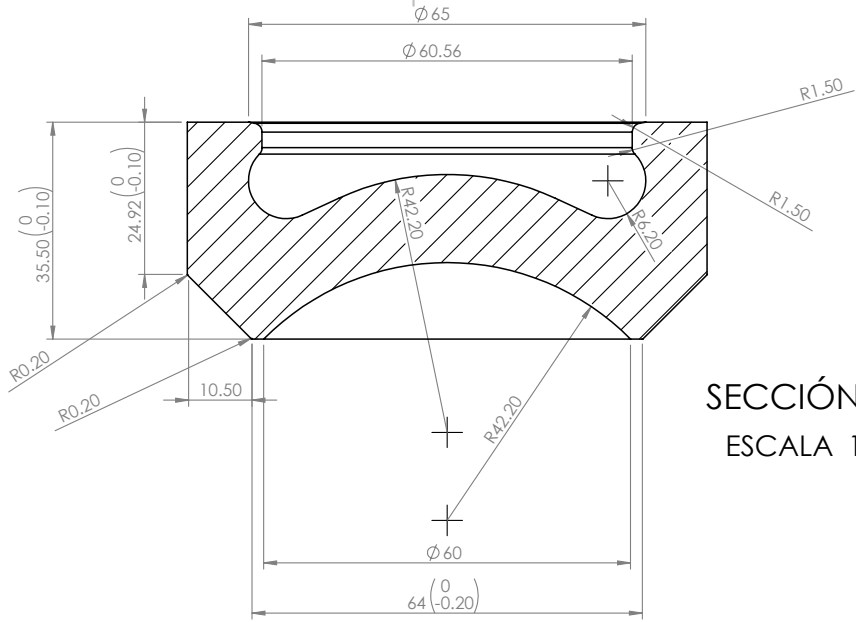
Resultados

- var_r: diferencia de radio entre el punto de entrada al pistón y el punto de salida.

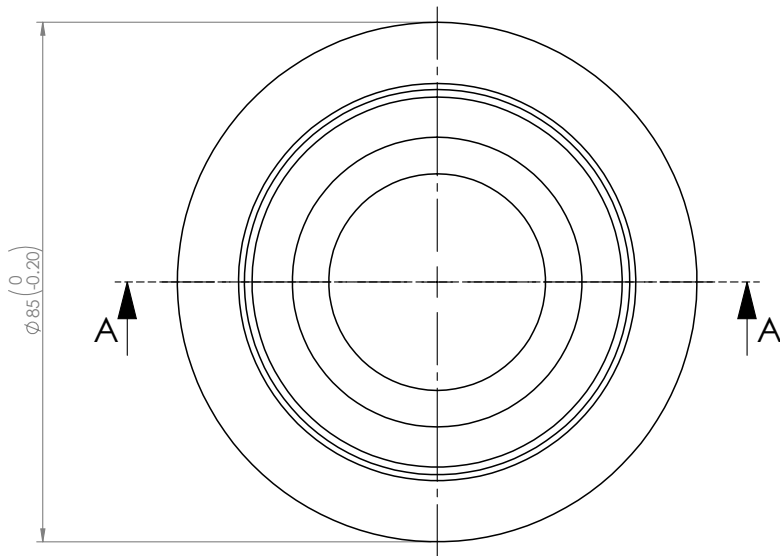
- r_{last} : radio del punto del pistón de salida del rayo.
- h_{last} : altura del punto del pistón de salida del rayo. Estos dos último datos indican la posición del punto de salida del rayo de luz.

Apéndice B

Planos



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1



PROYECTO:

Duramax

AUTOR:



MATERIAL:

Cuarzo

TÍTULO:

Pistón base line

A4

FECHA:

25/10/2019

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1