

Trabajo Fin de Grado

Desarrollo de un sistema para la regularización del
posicionamiento de un calibrador de cámaras

Development of a positioning adjustment system
of a camera gauge

Autor/es

Miguel Muñío Gay

Director/es

Francisco Javier Brosed Dueso

Desarrollo de un sistema para la regularización del posicionamiento de un calibrador de cámaras

RESUMEN

El proyecto descrito a continuación detalla el proceso de desarrollo de un sistema de regulación mecánica de un calibrador, actualmente llevado a cabo por un robot manipulador que alinea el calibrador en el sistema de referencia de forma automatizada.

La necesidad de desvincular la alineación a través del robot manipulador y la búsqueda de un sistema simple y preciso, da lugar a la creación del prototipo del presente proyecto.

Inicialmente se diseña la estructura y el sistema de regulación para su posterior ensamblaje y uso en los diferentes ensayos de caracterización y verificación. El diseño de esta estructura busca la perpendicularidad de los ejes de referencia del calibrador respecto al eje de desplazamiento. Esta verticalidad entre ejes definirá la correcta alineación siendo alcanzada a través de la regulación del sistema mecánico.

Durante el proceso de caracterización se han desarrollado diferentes ensayos para determinar las características y especificaciones del equipo.

El siguiente paso se define como la aprobación del sistema desarrollado, es decir, desarrollar diferentes ensayos de verificación que alcancen unos resultados cuyos valores no deben de superar los valores límites establecidos.

Finalmente, la aprobación del correcto funcionamiento del sistema da lugar al estudio de líneas futuras que permitan progresar al prototipo inicial descrito en el presente proyecto.



[Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación].

D./D^a. Miguel Muñio Gay

con nº de DNI 17759897X en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado _____, (Título del Trabajo)

Desarrollo de un sistema para la regularización del posicionamiento de un
calibrador de cámaras

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 25 de Noviembre del 2016

Fdo: Miguel Muñio Gay

Índice

1.	Introducción.....	8
1.1.	Objetivo	8
1.2.	Marco	8
1.3.	Alcance	8
2.	Descripción del proceso actual de calibración	9
2.1.	Definición de la calibración del equipo	9
2.2.	Equipamiento	10
2.3.	Procedimiento actual.....	11
3.	Prototipo	13
3.1.	Funcionalidad.....	13
3.2.	Diseño	14
3.2.1.	Concepto.....	14
3.2.2.	Sistemas de regulación	16
3.2.3.	Diseño final	20
3.3.	Ensamblaje y posicionamiento	21
3.4.	Procedimiento de uso.....	24
3.4.1.	Proceso de análisis.....	25
3.4.2.	Procesado de datos	29
3.5.	Limitaciones del prototipo	33
4.	Caracterización	35
4.1.	Definición de ensayos	37
4.2.	Procedimiento de ensayo	39
4.3.	Tratamiento de datos.....	40
4.4.	Resultados.....	42
5.	Verificación	45
5.1.	Modelo de ensayos.....	45
5.2.	Ensayo tipo 1	46
5.2.1.	Procedimiento de ensayo	46
5.2.2.	Tratamiento de datos	47
5.2.3.	Resultados.....	49
5.3.	Ensayo tipo 2	50
5.3.1.	Procedimiento de ensayo	50
5.3.2.	Tratamiento de datos	51
5.3.3.	Resultados.....	53
6.	Conclusiones y líneas futuras	54

7. Bibliografía.....	55
----------------------	----

Anexo I: Equipamiento.

Anexo II: Diseño Prototipo.

Anexo III: Componentes.

Anexo IV: Resultados.

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de modelo de calibración.....	9
Figura 2: Equipo de medición	10
Figura 3: Posicionado del Calibrador	11
Figura 4: Área capturada en imagen.....	11
Figura 5: Procedimiento de captura de imagen	12
Figura 6: Perpendicularidad entre sistemas de referencia	13
Figura 7: Ejes de rotación del calibrador.....	14
Figura 8: Opciones regulación.....	15
Figura 9: Sistema tornillo-tuerca y conjunto muelle	16
Figura 10: Apoyo sistema de regulación	16
Figura 11: Sistema de regulación	17
Figura 12: Sistema de cifrado	18
Figura 13: Marcado de sistema de regulación	19
Figura 14: Rotación eje Z.....	19
Figura 15: Rotación eje X.....	19
Figura 16: Rotación eje Y.....	19
Figura 17: Diseño Final	20
Figura 18: Escuadras puntos de apoyo	21
Figura 19: Posicionado del calibrador	21
Figura 20: Tornillos sistema de regulación	22
Figura 21: Imagen de captura	22
Figura 22: Tornillo auxiliar	22
Figura 23: Fijación equipo de medida	23
Figura 24: Selección de puntos en imágenes.....	25
Figura 25: Dimensiones calibrador.....	26
Figura 26: Ventanas emergentes software.....	26
Figura 27: Ángulo de rotación sobre eje Y.....	27
Figura 28: Ángulo de rotación sobre eje Z.....	27
Figura 29: Ángulo de rotación sobre eje X.....	28
Figura 30: Tabla Excel de procesado de datos	29
Figura 31: Gráfica tipo	30
Figura 32: Gráfica en sistema de referencia relativo	30
Figura 33: Gráfica en sistema de referencia absoluto.....	31
Figura 34: Resolución del valor de rotación gráficamente.....	31
Figura 35: Resolución de rotación línea de regresión	32
Figura 36: Sistema de regulación	35
Figura 37: Calibrador	35
Figura 38: Sistema de medición	35
Figura 39: Fuente de alimentación y controladora	36
Figura 40: Software ESP-Util.....	36
Figura 41: Software PixeLINK	36
Figura 42: Puntos de regulación	37
Figura 43: Esquema ensayos	38
Figura 44: Procedimiento de ensayo	39
Figura 45: Tabla de tratamiento de datos	40
Figura 46: Gráfica de ensayo.....	41
Figura 47: Gráfica conjunta de ensayos	41
Figura 48: Variación de incrementos.....	41

Figura 49: Rotación tornillo 1	42
Figura 50: Rotación tornillo 2	42
Figura 51: Rotación tornillos 3 y 4.....	43
Figura 52: Rotación tornillo 5 y 6	43
Figura 53: Rotación tornillos 3 y 5.....	44
Figura 54: Rotación tornillos 4 y 6.....	44
Figura 55: Tabla ensayos.....	47
Figura 56: Coordenadas puntos A y B	47
Figura 57: Tabla valores de MTP.....	47
Figura 58: Tabla incrementos reales.....	48
Figura 59: Tabla real vs imagen	48
Figura 60: Resumen test tipo 1	49
Figura 61: Tabla de datos	51
Figura 62: Tabla de coordenadas punto A y B	51
Figura 63: Tabla valores MTP.....	51
Figura 64: Tabla valores reales.....	52
Figura 65: Tabla real vs imagen	52
Figura 66: Resumen test tipo 2.....	53

1.1. Objetivo

El objetivo del presente documento “Desarrollo de un sistema para la regularización del posicionamiento de un calibrador de cámaras”, es el proceso de alineación del calibrador respecto al sistema de medición a través de un sistema mecánico de regulación y posicionamiento.

1.2. Marco

El proyecto se enmarca en un sistema de medición por coordenadas formado por un sensor láser de triangulación y un robot manipulador destinado a procesos de calibración en empresas privadas o en la Universidad. En el proceso actual la alineación se lleva a cabo con ayuda de un robot manipulador, punto de estudio para el desarrollo del sistema mecánico que desvincule este proceso del sistema robótico.

1.3. Alcance

Este proyecto es el prototipo inicial para alcanzar el sistema definitivo, se centra en la creación del sistema de regulación y posicionamiento en los tres ejes de rotación y direcciones espaciales primarias. O más en concreto, un sistema intuitivo que permita al usuario realizar todo el proceso de calibración. Esto incluye:

- En primer lugar, el diseño de todo el sistema mecánico de regulación.
 - Diseño mecánico, a través de la herramienta software 3D Inventor.
 - Evaluación de diferentes diseños y valoración de limitaciones.
- En segundo lugar, desarrollo y montaje del sistema, incluyendo:
 - Selección de componentes comerciales, para la estructura y los diferentes sistemas de regulación.
 - Fabricación, a través de impresión 3D, de componentes prototipo diseñados para el sistema. Esa herramienta permite versatilidad de diseño y comprobación de funcionalidad.
 - Montaje e integración del equipamiento.
- Por último, ejecución de ensayos y tratamiento de datos para el desarrollo del procedimiento de ajuste de la posición y verificación del funcionamiento del prototipo.

2. Descripción del proceso actual de calibración

2.1. Definición de la calibración del equipo

En el contexto de visión por ordenador, la calibración de la cámara es el proceso para determinar las características internas, geométricas y ópticas de la cámara y lente (parámetros intrínsecos) y la posición en 3-D del sistema de referencia de la cámara respecto a unas coordenadas de la escena (parámetros extrínsecos).

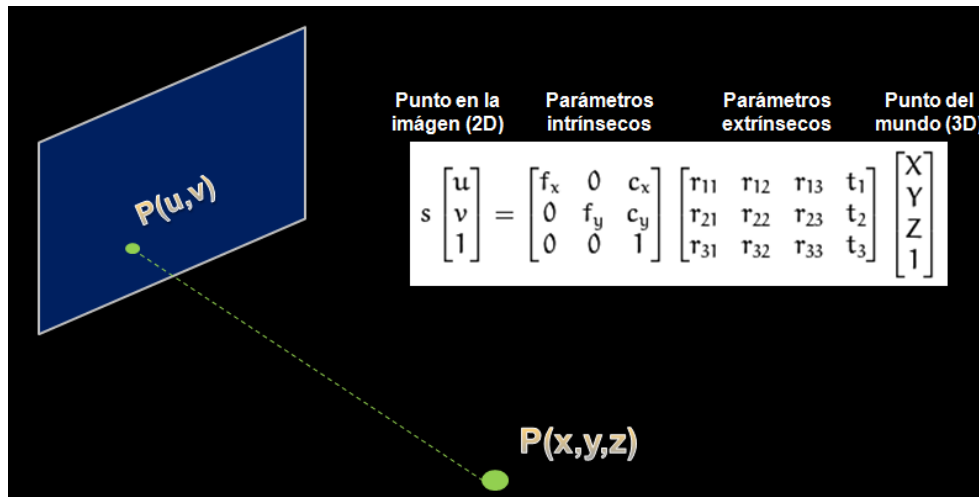


Figura 1: Diagrama de modelo de calibración

Por reconstrucción se entienden los algoritmos matemáticos que permiten calcular puntos en el espacio tridimensional $P(X,Y,Z)$ a partir de la información de dos imágenes y de los datos resultado de una calibración. [1]

Los parámetros son:

- **Intrínsecos:** Describen la geometría y óptica del conjunto cámara y tarjeta de adquisición de imágenes.
- **Extrínsecos:** Definen la orientación y posición de la cámara respecto a un sistema de coordenadas conocido al que se llama sistema del mundo. Tres grados de libertad para la orientación y tres grados de libertad definen el desplazamiento. [1]

Gracias a la calibración se obtienen los parámetros que intervienen en el proceso de formación de imágenes, la calibración es entonces el proceso mediante el cual se establece la relación entre coordenadas tridimensionales de los objetos en el entorno con sus correspondientes proyecciones bidimensionales en la imagen. [2]

2.2. Equipamiento

En este proyecto, la alineación se desarrolla con la ayuda de equipos que se encargan de adquirir las variables involucradas en el proceso.

El equipamiento consiste de una cámara CCD con su óptica, filtro y sistema de iluminación láser. Además, incluye una estación lineal de traslación (ELT) de alta precisión y su control. Sobre el carro de la ELT se sitúan los diferentes componentes. En la figura 2, se muestra una imagen del equipamiento.



Figura 2: Equipo de medición

Las características de los equipos son:

- **Cámara:** Modelo PL-A471, de la marca PixeLinck de 1,3 megapíxeles (1280x1024).
- **Lente cámara:** Modelo 31214 MCN, de la marca Goyo Optical Inc, definida por distancia focal 12mm y ángulos de visión 38.3° horizontal y 26.2° vertical.
- **Láser y lente:** Modelo Sting Ray DS-1014, de la marca COHERENT y lente de plano de apertura 60°.
- **Estación lineal de traslación (ELT):** Modelo ILS250PP, de la marca Newport, con una resolución inferior a una micra.
- **Controladora de la ELT:** Modelo ESP301, de la marca Newport.

En el “Anexo I: Equipamiento”, se muestran las diferentes hojas de características del equipamiento definidas por el fabricante.

2.3. Procedimiento actual

El método actual para el calibrado de los equipos de medida se lleva a cabo con la alineación del calibrador a través de un robot manipulador, unido al robot a través de una brida metálica, dentro del campo visual de los sensores del equipo a calibrar. En la figura 3, se muestra el proceso de posicionado y regulación sobre el sistema de medición del calibrador y el sistema de referencia utilizado.

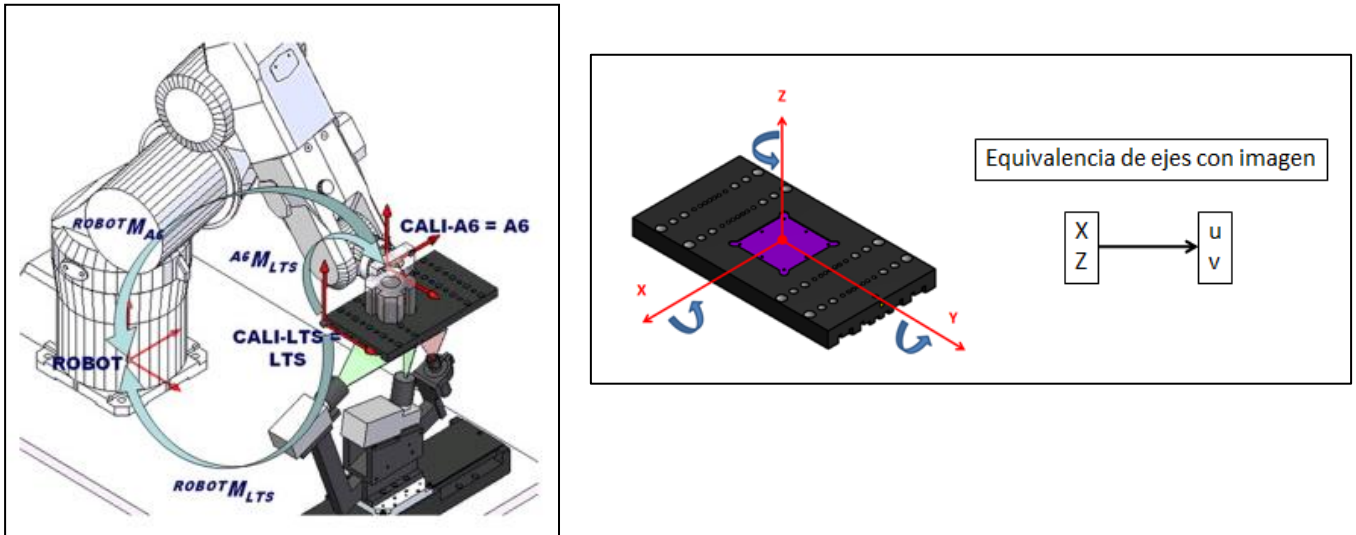


Figura 3: Posicionado del Calibrador

El calibrador, posicionado en el sistema de referencia correcto, es el componente utilizado para calibrar el sistema óptico (cámara y láser: calibración intrínseca) y relacionar los dispositivos que componen el sistema de medición (calibración extrínseca).

El objetivo es la alineación del sistema de referencia del calibrador respecto al eje de movimiento, es decir, alcanzar una perpendicularidad de los ejes [X,Z] del calibrador respecto del eje de desplazamiento Y obtenido con la ELT.

La calibración de este equipo se lleva a cabo con la captura de diferentes imágenes a lo largo de la parte inferior del calibrador, esta zona se denomina "almenas". En la figura 4 se muestra el área capturada a través del sistema de visión.

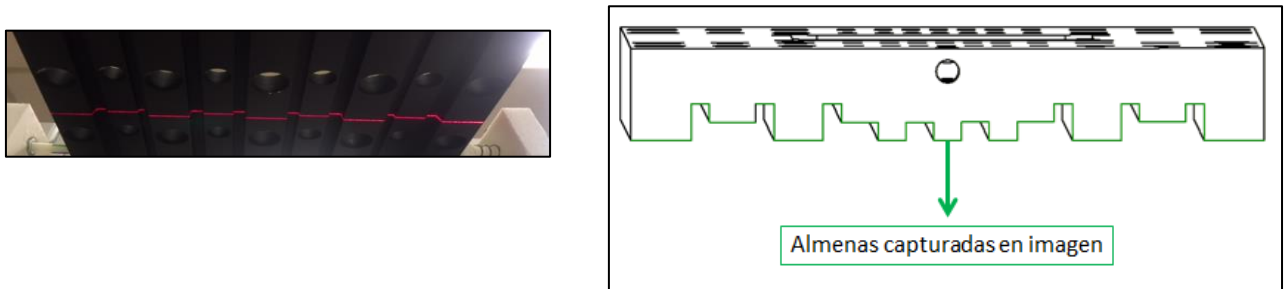


Figura 4: Área capturada en imagen

Para la realización de la alineación se procede a la captura de diferentes imágenes y al análisis de sus coordenadas de posición $[v,u]$. Estas imágenes son capturadas a lo largo del eje Y donde se desplaza el láser y el sistema de visión. La figura 5 muestra el proceso de captura sobre la parte inferior del calibrador.

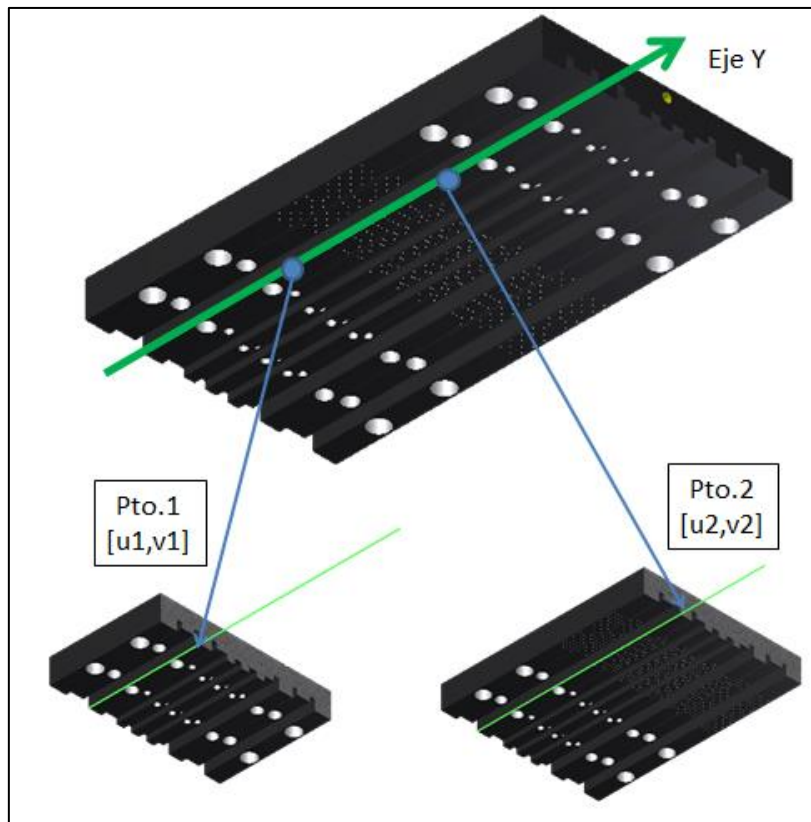


Figura 5: Procedimiento de captura de imagen

En el siguiente paso se procede al análisis de las imágenes, este consiste en:

- Captura de imágenes definidas a lo largo del área inferior del calibrador, formado por las “almenas”, cuyas dimensiones son conocidas.
- Cálculo de los incrementos obtenidos en el eje U y V, es decir, estudio de la variación de las coordenadas de los puntos tratados en las imágenes.
- Posicionamiento del calibrador, con el uso del brazo robótico, para solventar estos incrementos y obtener las mismas imágenes (coordenadas $[v,u]$) a lo largo del eje Y.
- Introducción de Matriz de Transformación de perspectiva (MTP), matriz homogénea de 4×4 que relaciona el sistema de coordenadas globales 3D $[X,Y,Z]$ y el sistema de coordenadas de la imagen 2D $[v,u]$.
- Estudio de los valores de los incrementos en el sistema de coordenadas globales.
- Aceptación de estos valores dentro de los límites para la validación del proceso de alineamiento.

Desarrollo de un primer modelo, para su evaluación y detección de posibles fallos en su funcionamiento. Este prototipo se caracteriza por ser diseñado para cumplir unas funciones y alcanzar unos objetivos deseados, con posibilidad de modificaciones para su correcto funcionamiento.

3.1. Funcionalidad

La función de este prototipo es la creación de un sistema que permita la alineación dentro de unos valores límites establecidos. Es decir, evaluar los ensayos experimentales de alineación sobre un equipo calibrado y comprobar que los resultados se encuentran dentro de los límites.

Este sistema mecánico requiere, en relación al sistema en global una elevada rigidez, dimensiones reducidas y facilidad de regulación. En relación al calibrador, alcanzar una posición totalmente perpendicular entre los ejes X y Z (sistema de coordenadas del calibrador) respecto al eje Y (eje de desplazamiento de la ELT). En la figura 6, se muestra un esquema de la perpendicularidad deseada.

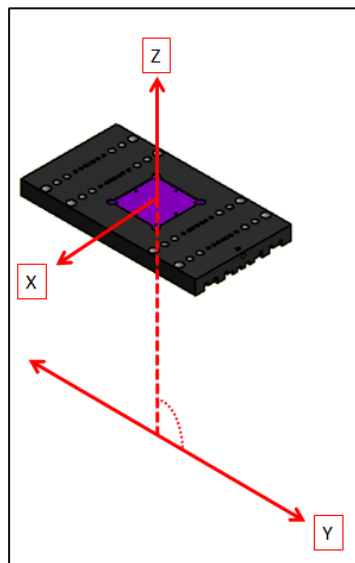


Figura 6: Perpendicularidad entre sistemas de referencia

La función principal de este prototipo, una vez verificado, es su utilización para la alineación de equipos de medida. La versatilidad del diseño permitirá la integración del sistema de medición y su alineación sin necesidad de un posicionado automático, permitiendo su utilización en cualquier área de trabajo.

3.2. Diseño

Utilizando el software de diseño 3D Inventor, se ha desarrollado el concepto y el diseño final alcanzando el sistema de regulación mecánica para el posicionamiento y regulación. El ensamblaje final integra los componentes diseñados, los elementos comerciales y el equipo de medición. En el “Anexo II: Diseño prototipo” se describe más detalladamente el proceso de diseño.

3.2.1. Concepto

El concepto para desarrollar el diseño de este proyecto es la regulación del calibrador en las tres direcciones espaciales, es decir, los tres ejes de rotación y las direcciones espaciales primarias. La figura 7, muestra el concepto general sobre el cual se va a desarrollar el diseño.

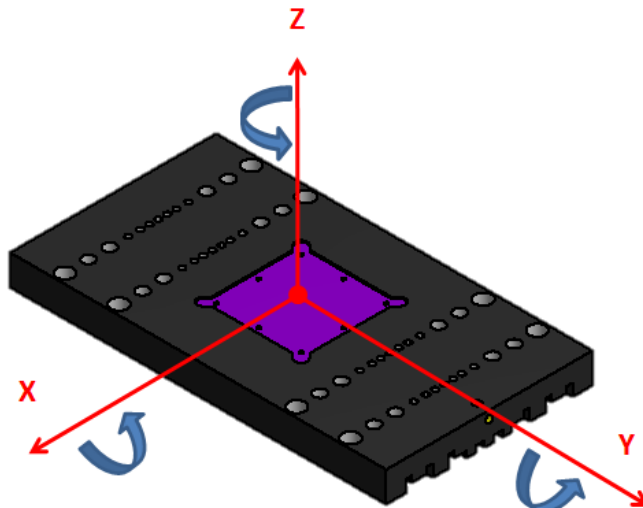


Figura 7: Ejes de rotación del calibrador

Las diferentes opciones de diseño se basan en la integración del sistema mecánico de regulación y búsqueda de puntos de apoyo que permitan una libertad de movimiento.

Se han evaluado diferentes opciones de diseño, basadas en el estudio de los puntos de apoyo situados en la parte superior o inferior del calibrador, dependiendo de las limitaciones de cada área de apoyo.

Los primeros bocetos desarrollados para definir los puntos de apoyo se centran en el área superior, consiguiendo total libertad en la parte inferior donde se encuentra la zona de análisis.

Como conclusión al estudio de esta área se han valorado las dos opciones siguientes:

- **Opción 1:** Regulación con tres puntos de sujeción y un acople circular entre la placa y el sistema de regulación.
- **Opción 2:** Bandeja de apoyo para el calibrador regulada con un elemento de fijación en forma de U y 4 puntos de regulación.

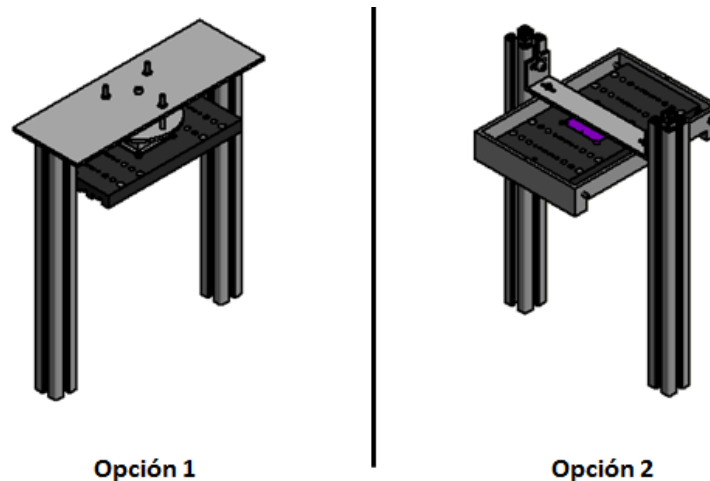


Figura 8: Opciones regulación

Diferentes factores limitantes muestran las opciones nombradas anteriormente, estos son:

- Elevada complejidad de regulación, debido a la concentración en un área pequeña de todos los puntos de regulación para obtener los grados de movilidad.
- La disposición de una masa suspendida sobre los puntos de regulación daría lugar a una regulación más imprecisa debido a que el elemento a calibrar no estaría en contacto directo con los puntos de regulación.
- La estructura carece de rigidez estructural debido a la ausencia de más puntos de fijación.

Teniendo en cuenta los factores definidos anteriormente, la opción de regulación superior no se ha implementado en el desarrollo del presente proyecto.

Las zonas que ofrecen mayor versatilidad y facilidad de reglaje son las caras laterales y las esquinas inferiores del calibrador. A diferencia de la regulación en la parte superior, esta se realiza directamente sobre la mesa de calibración.

3.2.2. Sistemas de regulación

La regulación mecánica estructural está basada en tres sistemas mecánicos: tornillo-tuerca, conjunto muelle y posicionado.

En la figura 9, se muestra el sistema tornillo-tuerca y conjunto muelle, cuya funcionalidad es la de proporcionar un desplazamiento lineal y mantener la posición del calibrador.

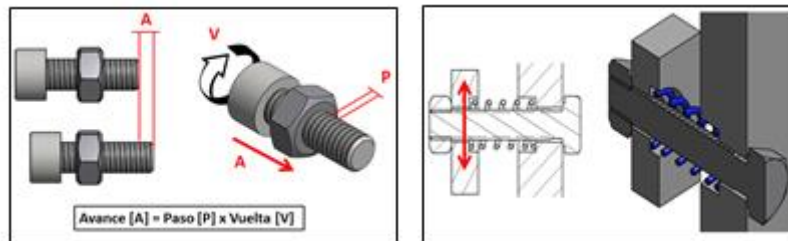


Figura 9: Sistema tornillo-tuerca y conjunto muelle

El desplazamiento lineal a lo largo del eje X y Z se consigue a través de la rotación del tornillo respecto a la tuerca fija, es decir, por cada vuelta de tornillo se obtiene un avance lineal de un milímetro. Se puede simplificar con la siguiente ecuación:

$$\text{Incremento en X } [\Delta x] = \text{Paso del tornillo}[P] \times \text{Rotación del tornillo}[V]$$

$$\text{Incremento en Z } [\Delta z] = \text{Paso del tornillo}[P] \times \text{Rotación del tornillo}[V]$$

En la figura 10 se muestra la adición de un tornillo de regulación, que permite el posicionamiento correcto del conjunto muelle nombrado anteriormente.

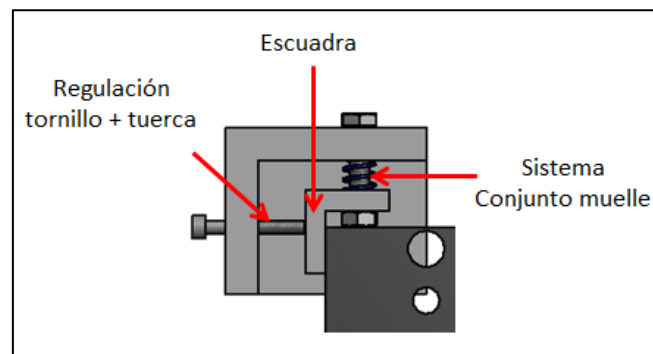


Figura 10: Apoyo sistema de regulación

La integración de estos sistemas de regulación en los puntos de apoyo proporciona un control en el posicionado del calibrador distribuido en ocho zonas, cuatro de ellas situadas en la parte inferior y otras cuatro en los extremos laterales del calibrador. Los sistemas nombrados anteriormente se pueden englobar en dos estructuras denominadas: Escuadra 1 y Escuadra 2.

En la siguiente figura 11, aparece de forma detallada las diferentes áreas de apoyo y como se han integrado estos sistemas.

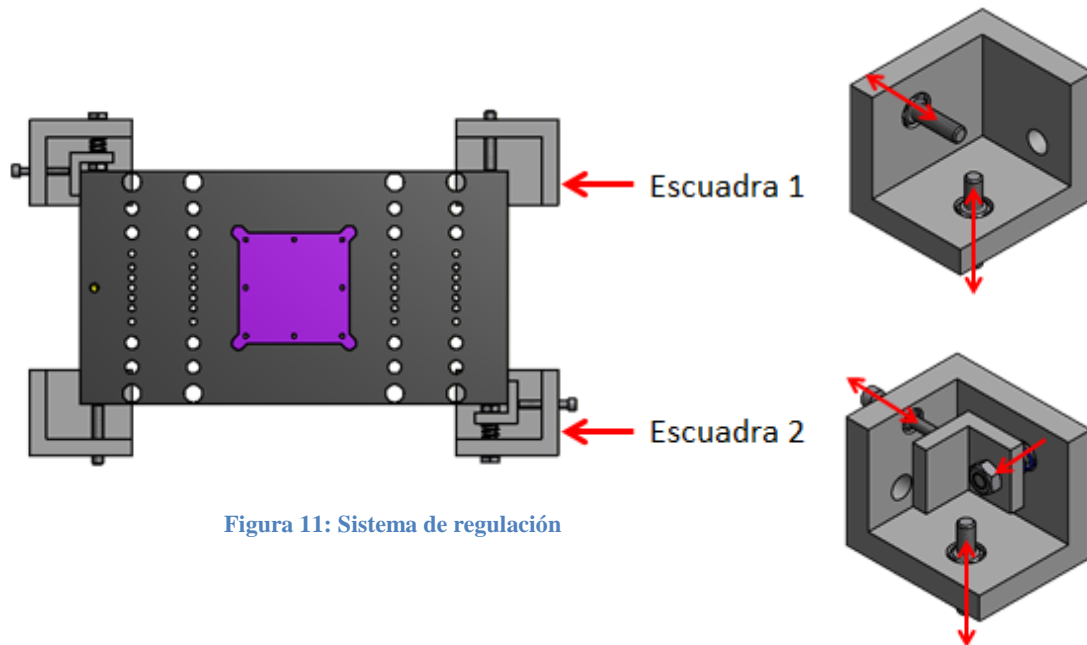


Figura 11: Sistema de regulación

El sistema formado por las escuadras que integran los diferentes sistemas de regulación mecánica, detallados en el “Anexo II: Diseño prototipo”, permite desvincular el posicionamiento del sistema automático actual. Este prototipo busca alcanzar un posicionamiento similar al introducido por el brazo robótico, es decir, alinear el calibrador en el área de trabajo y realizar las modificaciones necesarias para solventar las rotaciones sobre X (aproximadamente U en imagen), sobre Z (aproximadamente V en imagen) y sobre Y (alineación del láser con U en imagen).

El posicionamiento del calibrador se regula a través de la rotación de los apoyos (tornillos) sobre un sistema fijo (tuerca) que permiten modificar la posición. Como se ha nombrado anteriormente, se rotarán los tornillos dependiendo del eje en el que se quiere reducir el incremento.

En el sistema de regulación se han diferenciado y definido los puntos de apoyo, añadiendo un cifrado para facilitar el sistema de reglaje y posicionado. Este sistema de cifrado se describe en la figura 12.

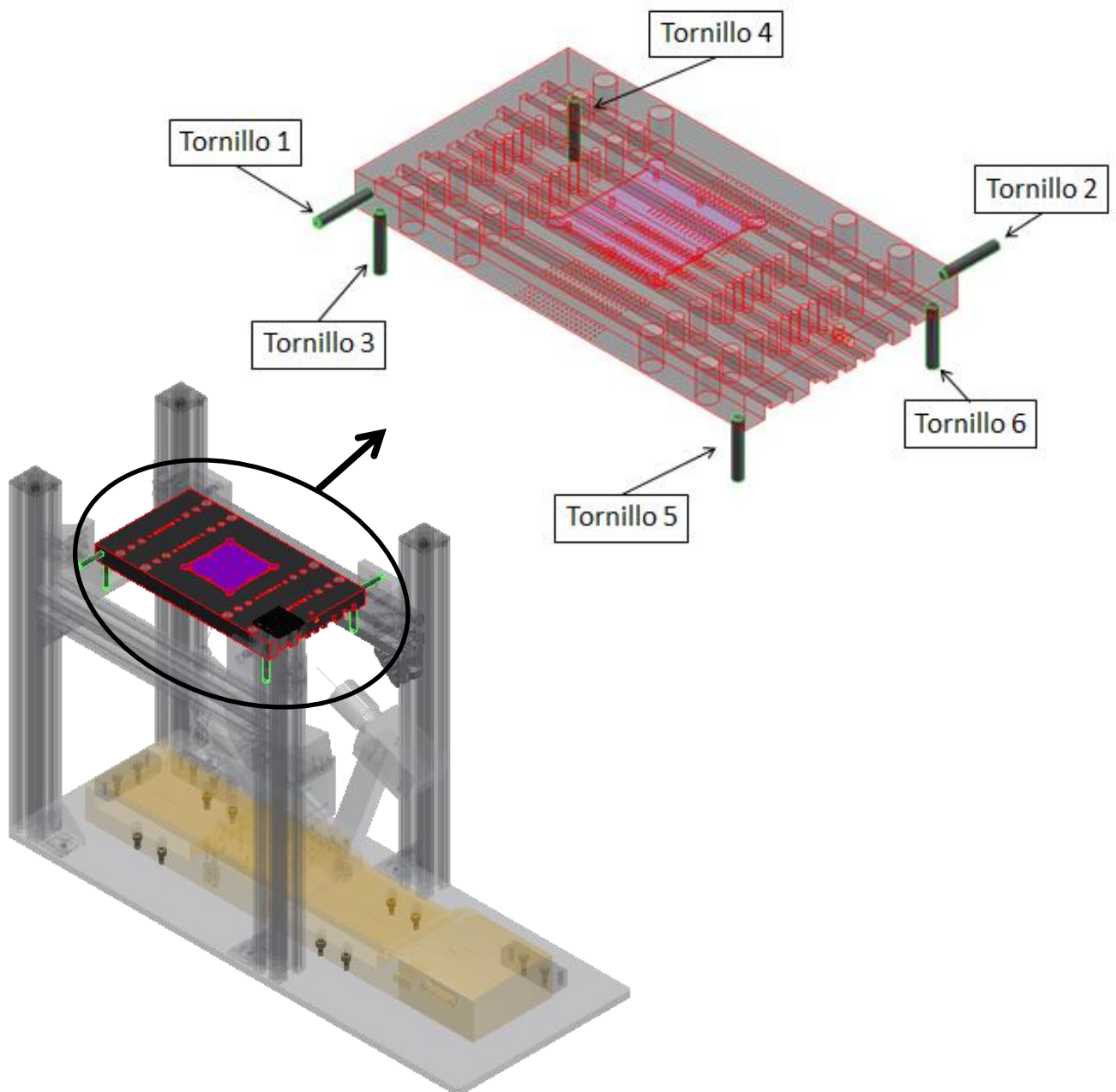


Figura 12: Sistema de cifrado

En este proceso de caracterización del prototipo también se ha integrado un marcado especial para tener un control visual durante el proceso de regulación, ya que en los diferentes ensayos experimentales estos elementos van a sufrir modificaciones respecto a su posición inicial.

El sistema de marcado se ha basado en diferenciar cuatro posiciones del tornillo, es decir, un avance de $\frac{1}{4}$ de vuelta por rotación. Se han utilizado cuatro tonalidades diferentes, aplicadas tanto en el tornillo como en el soporte.

En la figura 13, se muestra un ejemplo del marcado en un tornillo obteniendo un control visual para el usuario que permita obtener una precisión mayor en la rotación y el conocimiento de la posición de cada tornillo.

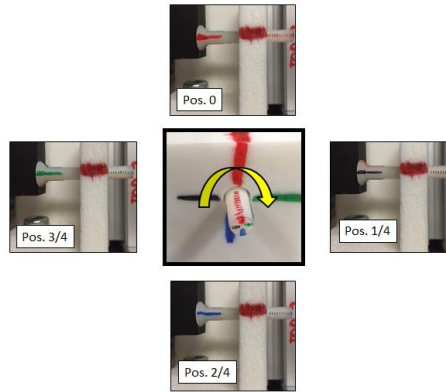


Figura 13: Marcado de sistema de regulación

La funcionalidad de este prototipo permite una regulación práctica y útil del posicionamiento del calibrado. En función del tornillo o tornillos rotados se obtiene un desplazamiento en uno de los 3 ejes de rotación. Las siguientes imágenes muestran la influencia de la rotación del sistema de regulación:

- Rotación eje Z: Rotación de tornillo 1 o tornillo 2.

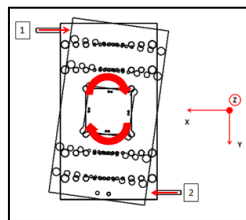


Figura 14: Rotación eje Z

- Rotación eje X: Rotación de tornillos 5-6 o tornillos 3-4.

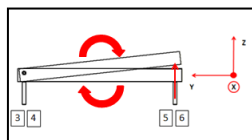


Figura 15: Rotación eje X

- Rotación eje Y: Rotación de tornillos 5-3 o tornillos 6y4.

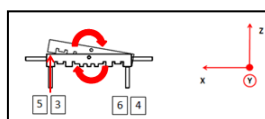


Figura 16: Rotación eje Y

3.2.3. Diseño final

La figura 17 presenta un esquema del diseño final y la integración de todos los componentes necesarios para poder realizar el prototipo.

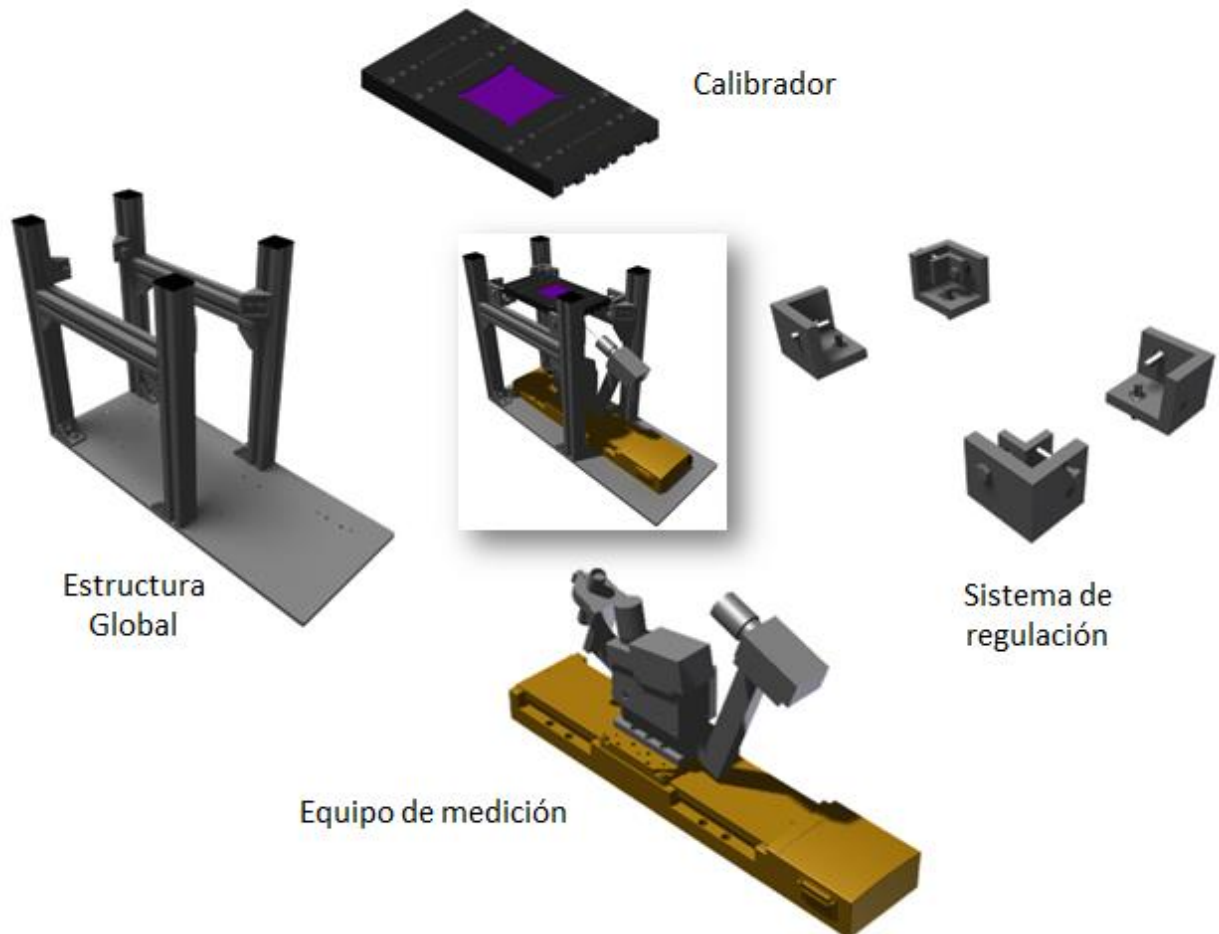


Figura 17: Diseño Final

En este diseño final está incluido:

- **Estructura global:** Desarrollada con diferentes componentes mecánicos y ensamblada para obtener el sistema.
- **Sistema de regulación:** Definido anteriormente, permitiendo la regulación y posicionado.
- **Calibrador:** Pieza patrón en base a la que se desarrolla la calibración.
- **Conjunto de medición:** Equipamiento introducido para capturar imágenes y realizar el desplazamiento en el eje Y.

3.3. Ensamblaje y posicionamiento

Definidas las diferentes partes que conforman el prototipo, el siguiente paso es el ensamblaje de todos los componentes y la integración del equipamiento.

A continuación se define el proceso para obtener el prototipo:

1. Montaje y posicionamiento de los conjuntos de escuadras, utilizando componentes comerciales para su fijación (tornillos, escuadras).

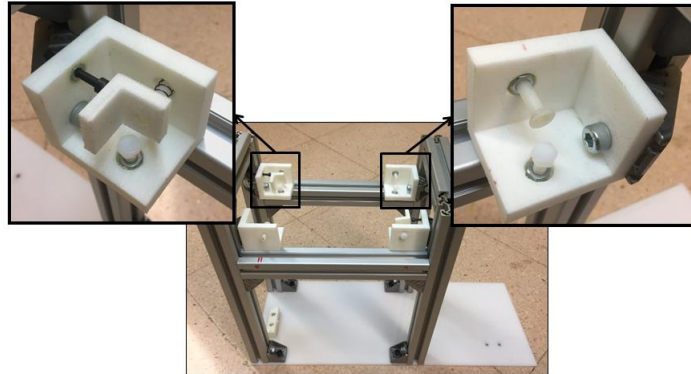


Figura 18: Escuadras puntos de apoyo

2. Posicionamiento del calibrador sobre apoyos.

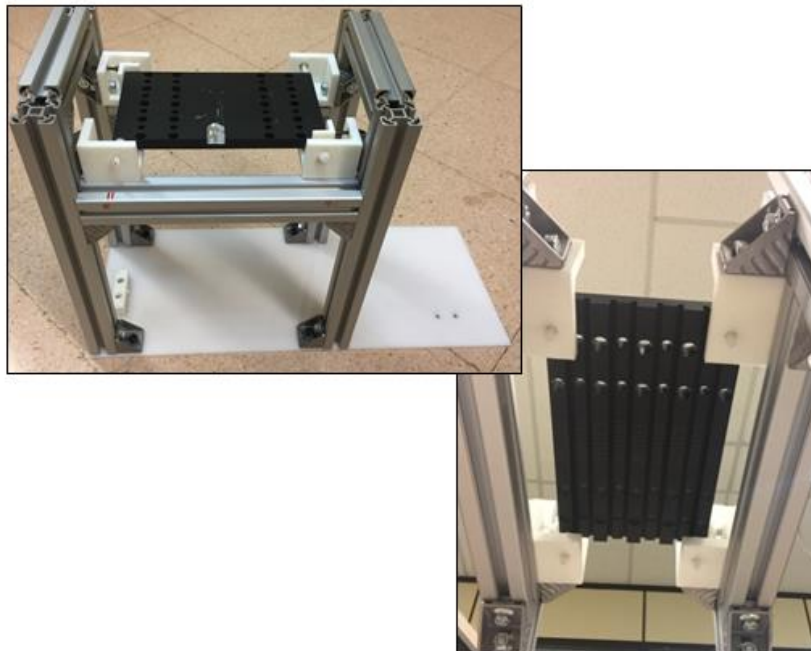


Figura 19: Posicionado del calibrador

3. Ajuste altura y posición de tornillos, a través de los sistemas de regulación nombrados anteriormente.

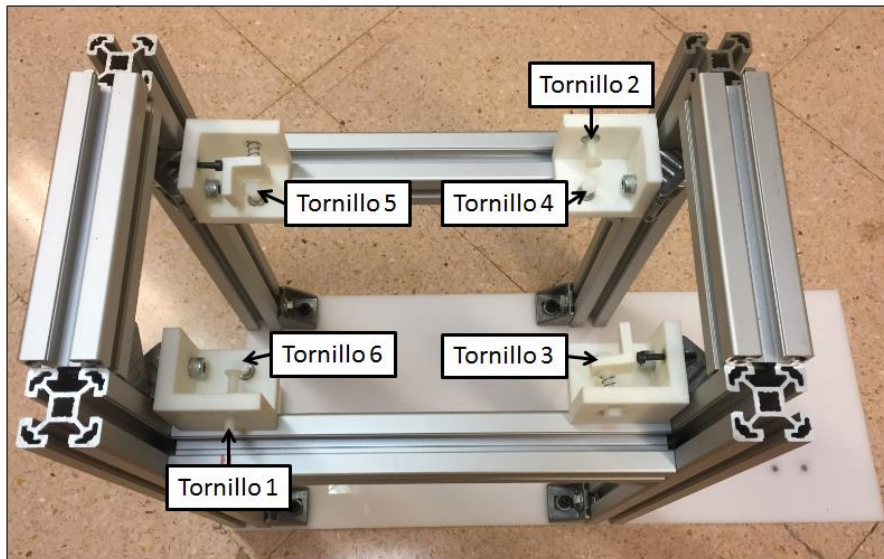


Figura 20: Tornillos sistema de regulación

4. Utilización de software de visualización de imagen de captura para asegurar una imagen centrada, para su posterior captura.



Figura 21: Imagen de captura

5. Uso de los tornillos auxiliares para centrar el calibrador (situados en escuadra 2).

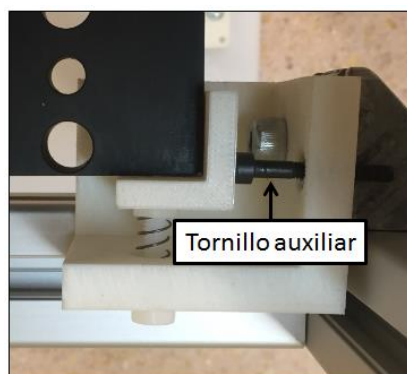


Figura 22: Tornillo auxiliar

6. Comprobación del contacto entre tornillos y mesa de calibración.

7. Posicionamiento y fijación del equipo de medida, utilizando topes mecánicos y adhesivos (plastilina) en la zona frontal y lateral.

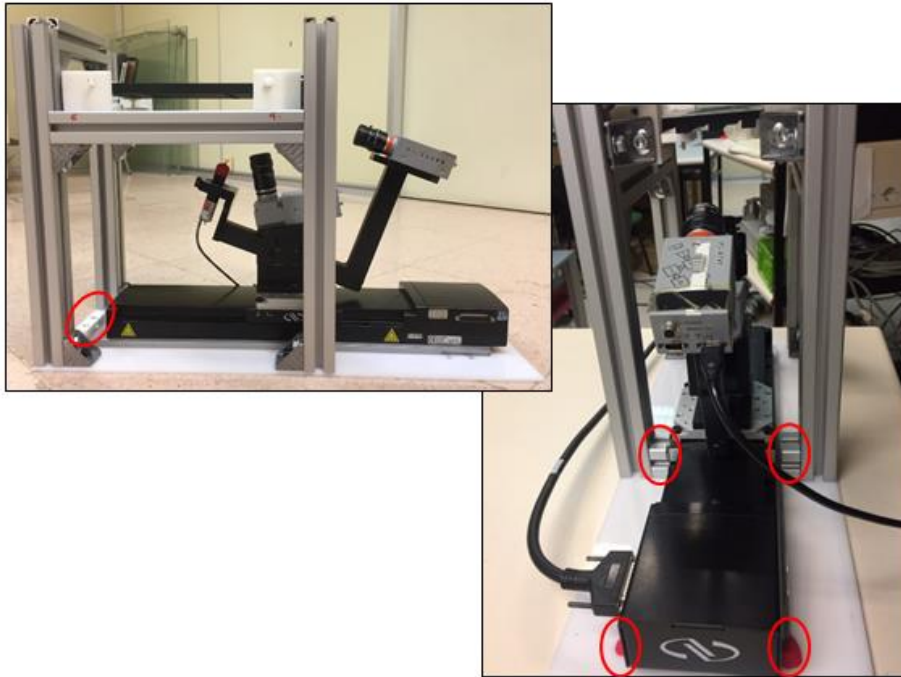


Figura 23: Fijación equipo de medida

8. Conjunto ensamblado y posicionado para su utilización.

3.4. Procedimiento de uso

Se ha integrado en el prototipo un procedimiento de uso aplicado sobre las diferentes imágenes capturadas con el equipo de medida. A través de la herramienta MATLAB se procesan las imágenes y posteriormente se realiza el tratamiento de datos con la ayuda de la herramienta Excel.

El objetivo es la creación, a partir de los datos obtenidos, de una herramienta que permita en base a unos incrementos conocidos obtener la rotación necesaria de los sistemas de regulación para la alineación del calibrador.

El procedimiento a desarrollar se puede definir como un proceso inverso, es decir, inicialmente integramos nuestro prototipo en un sistema calibrado para comprobar y testear su funcionalidad. Una vez realizado este proceso, este prototipo es utilizado para la calibración de sistemas de visión.

Este procedimiento resume en los siguientes pasos:

- Posicionamiento inicial del calibrador.
- Captura de dos imágenes iniciales a lo largo del eje Y a una distancia definida, para adquirir los datos iniciales.
- Introducción de valores conocidos del tornillo/s y captura de dos imágenes por cada modificación de rotación del tornillo/s.
- Selección de dos puntos en cada imagen a través de la herramienta MATLAB, proceso definido en apartado “3.4.1. Proceso de análisis”
- Obtención de incrementos en los ejes de la imagen [v,u].
- Se propone repetir varias veces un ensayo tipo e ir modificando uno a uno los diferentes parámetros que puedan afectar al resultado. De esta manera se conocerá la influencia de cada uno de ellos sobre la repetibilidad de la máquina.
- Obtención de una recta de regresión que permite relacionar los incrementos en los eje U y V con la rotación del sistema de regulación.
- Uso de la recta de regresión para obtener los valores de rotación a partir de unos incrementos conocidos.

3.4.1. Proceso de análisis

Dentro del prototipo se ha integrado un código definido en el software MATLAB que posibilita la adquisición de diferentes puntos sobre las imágenes obtenidas para su examen posterior. Este código de MATLAB trabaja con la comparación de dos imágenes consecutivas a lo largo del eje Y de la ELT obtenidas sobre el calibrador.

Para el análisis de los diferentes incrementos en los ejes X, Y y Z se procede a la selección manual de los puntos sobre las imágenes capturadas, siendo tratadas a través del código de MATLAB. La figura 26, describe el proceso de selección de puntos en el interfaz de MATLAB.

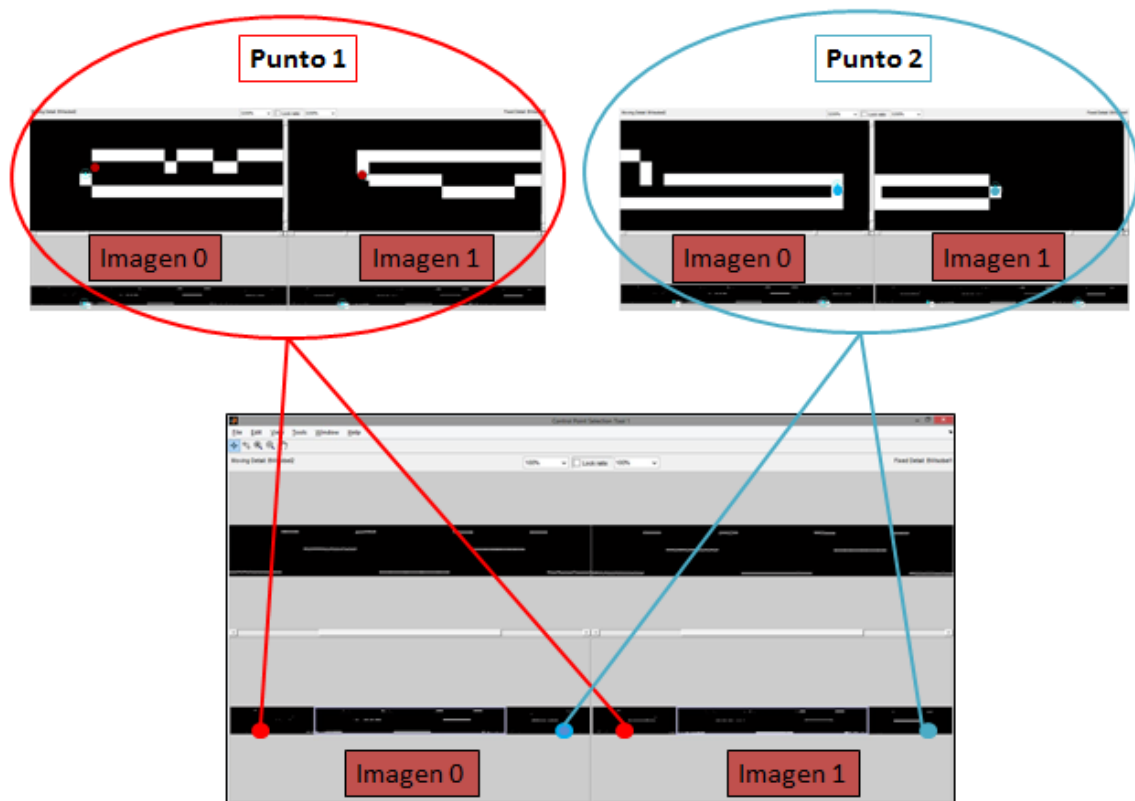


Figura 24: Selección de puntos en imágenes

El proceso de selección de puntos mostrado en la figura 26, donde todos los puntos son seleccionados la zona intermedia de la imagen, se define como:

- Selección punto 1 en imagen 0.
- Selección punto 1 en imagen 1.
- Selección punto 2 en imagen 0.
- Selección punto 2 en imagen 1.
- Cerrar herramienta de selección de puntos.

La distancia entre los puntos en el eje X está definida por las dimensiones del calibrador y las distancias entre “almenas”.

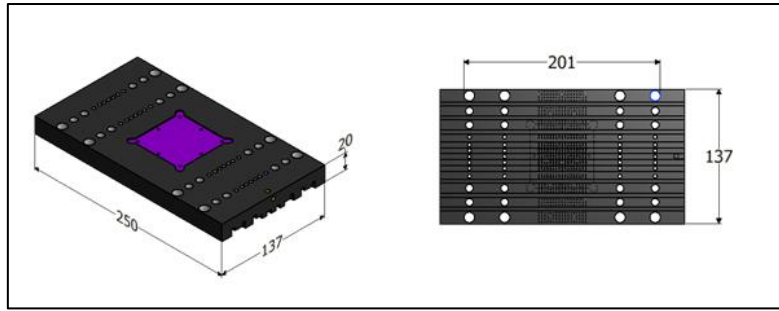
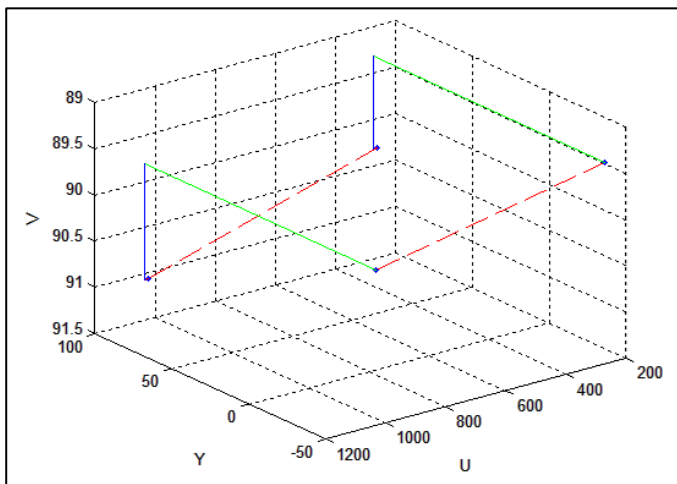


Figura 25: Dimensiones calibrador

Una vez definidos los dos puntos en cada uno de las imágenes a tratar, el código nos muestra por pantalla un esquema en tres dimensiones de los puntos seleccionados y los valores de las coordenadas de los diferentes puntos con los datos de los diferentes incrementos obtenidos en cada eje. La figura 28, muestra el esquema y los valores mostrados por la pantalla.



```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

puntoA1 =
  86 402
puntoB1 =
  91.0000 904.0000
puntoA2 =
  90 391
puntoB2 =
  91.0000 893.0000

ans =
  2.0000 0.1820 11.0000 1.7749 -1.0000 -0.0910

>> [IncV, IncZ, IncU, IncX, IncVY, IncZY]
  
```

Figura 26: Ventanas emergentes software

El proceso de análisis de los datos para obtener la rotación en los ejes se realiza automáticamente a través del código, sin embargo, a continuación se describe el proceso teórico para la obtención de los ángulos de rotación en cada eje.

- **Ángulo de rotación sobre eje Y (α):**

Este ángulo de rotación se obtiene del análisis de una sola imagen tomando dos puntos a lo largo del eje X y analizando sus coordenadas U y V, y estudiando su variación. La figura 27 muestra el concepto para el cálculo del ángulo de rotación respecto al eje Y.

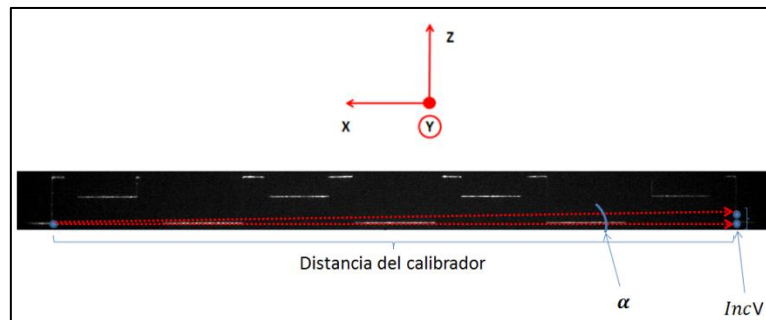


Figura 27: Ángulo de rotación sobre eje Y

El cálculo de este en ángulo se calcula de forma teórica a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Angulo } \alpha = \cot \frac{\text{IncV} * \text{Resolución Eje X}}{\text{Distancia del calibrador}} = \cot \frac{\text{IncZ}}{\Delta x}$$

- **Ángulo de rotación sobre eje Z (β):**

Este ángulo de rotación se obtiene del análisis de dos imágenes a una distancia Y definida (ΔY). Utilizando esta distancia de desplazamiento conocida de la ELT y el incremento en el eje X se obtiene el ángulo. La figura 28 muestra el concepto para el cálculo del ángulo de rotación respecto al eje Z.

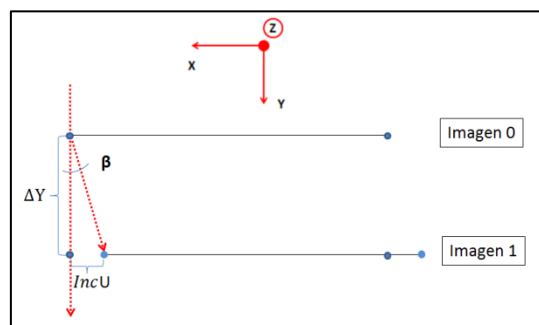


Figura 28: Ángulo de rotación sobre eje Z

El cálculo de este en ángulo se calcula de forma teórica a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Angulo } \beta = \cot \frac{\text{IncU} * \text{Resolución Eje X}}{\Delta Y} = \cot \frac{\text{IncX}}{\Delta Y}$$

- Ángulo de rotación sobre eje X (θ):

Este ángulo de rotación se obtiene del análisis de dos imágenes a una distancia Y definida (ΔY). Utilizando esta distancia de desplazamiento conocida de la ELT y el incremento en el eje Z se obtiene el ángulo. En esta orientación de análisis las imágenes son perpendiculares al propio eje X. La figura 29, muestra el concepto para el cálculo del ángulo de rotación respecto al eje X.

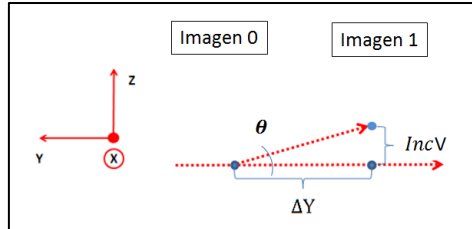


Figura 29: Ángulo de rotación sobre eje X

El cálculo de este en ángulo se calcula de forma teórica a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Angulo } \theta = \cot \frac{\text{IncV} * \text{Resolución Eje Z}}{\Delta Y} = \cot \frac{\text{IncZ}}{\Delta Y}$$

3.4.2. Procesado de datos

Con la adquisición de los datos nombrados en el apartado anterior, el siguiente paso es el estudio de todos los datos obtenidos y su procesamiento. Este proceso se lleva a cabo con la utilización del software Excel, permitiendo la importación de los datos y su posterior análisis para el estudio de los aspectos deseados y la obtención del procedimiento.

Los datos obtenidos a través del software son:

[*IncV*, *IncZ*, *IncU*, *IncX*, *puntoA1*, *puntoB1*, *puntoA2*, *puntoB2*]

- *IncV* e *IncU*: Incrementos obtenidos en valores de píxeles de las imágenes.
- *IncZ* e *IncX*: Incrementos obtenidos en milímetros a partir de la resolución y los incrementos en píxeles.
- *Punto A1* y *B1*: Puntos de “Imagen 0” definidos por las coordenadas [u,v].
- *Punto A2* y *B2*: Puntos de “Imagen 1” definidos por las coordenadas [u,v].

Estos datos son obtenidos para cada uno de los ensayos realizados sobre dos imágenes consecutivas en el eje Y. Posteriormente introducidos en el software Excel destinado al análisis y graficado. La figura 30 muestra la tabla donde son introducidos cada uno de los parámetros del ensayo.

"Nombre Ensayo"															
Posiciones tornillo	Rotación del tornillo	Incrementos						puntoA1		puntoB1		puntoA2		puntoB2	
		IncV_1	IncZ	IncU_1	IncX	IncVAB	IncZ_B	v	u	v	u	v	u	v	u
0	0,00														
1	0,25														
2	0,50														
3	0,75														
4	1,00														
5	1,25														
6	1,50														
7	1,75														
8	2														
9	2,25														
10	2,5														
11	2,75														
12	3														

1

2

3

4

Figura 30: Tabla Excel de procesado de datos

Esta tabla se divide en:

- Posiciones definidas del tornillo/s [1].
- Variación de la rotación del tornillo/s [2].
- Incrementos en los diferentes ejes en las coordenadas de la imagen y en coordenadas reales (utilizando el factor de resolución de la cámara) [3].
- Coordenadas (u,v) de los puntos seleccionados manualmente con el código de MATLAB. [4]

Dependiendo del eje de rotación a estudiar se procede a graficar los incrementos obtenidos en cada posición del tornillo en relación con la rotación del tornillo. La figura 31 muestra un ejemplo de la gráfica a desarrollar.

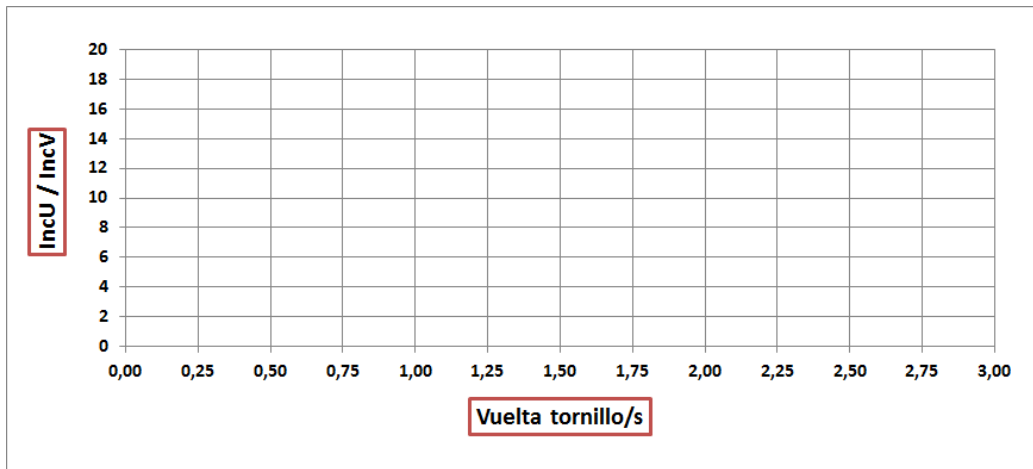


Figura 31: Gráfica tipo

Después del procesado de datos, la introducción en la herramienta Excel y el graficado de cada ensayo, se procede a la obtención de una recta de regresión que nos permita alcanzar una relación entre los incrementos en los ejes y la rotación del sistema de regulación. Esta recta mostrada en la figura 32 está posicionada en el sistema de referencia relativo.

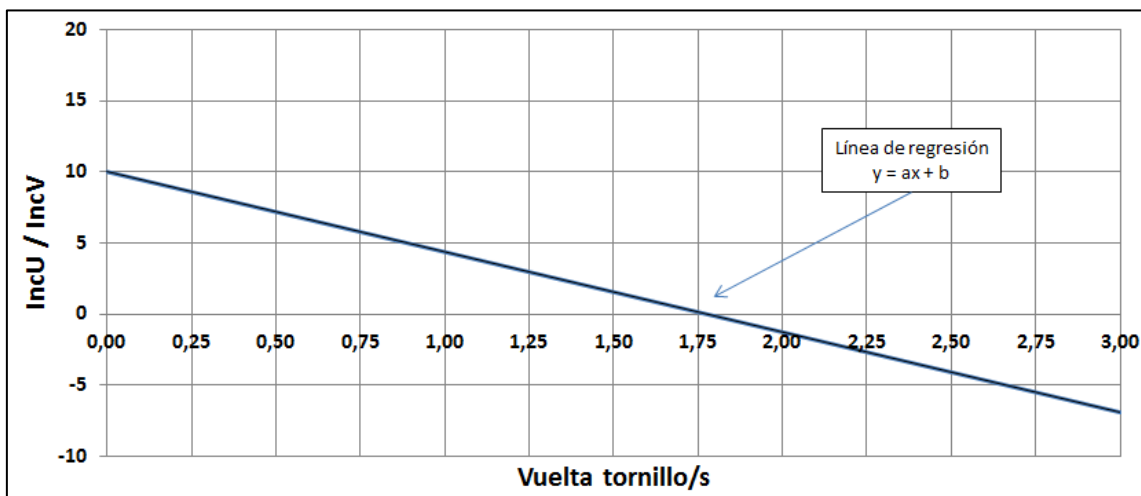


Figura 32: Gráfica en sistema de referencia relativo

El siguiente paso es trasladar los datos al sistema de referencia absoluto, consiste en situar el origen cuando el valor del eje de ordenadas es cero (IncU/IncV).

La figura 33 muestra la nueva recta de regresión en el sistema de referencia absoluto.

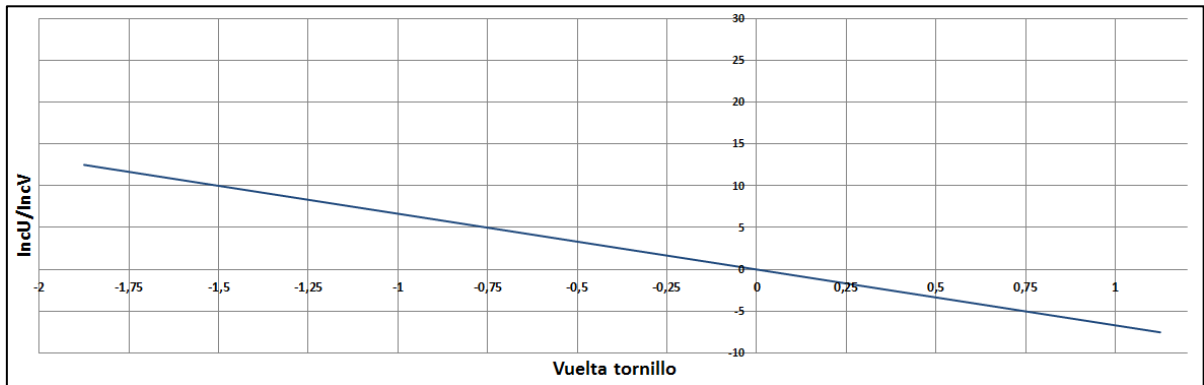


Figura 33: Gráfica en sistema de referencia absoluto

Esta recta de regresión engloba todos los ensayos realizados se puede definir como el valor medio de la variación de amplitud de los ensayos. Esta amplitud se debe al grado de imprecisión del equipo impidiendo la repetición exacta del mismo ensayo.

El proceso de utilización de esta recta de regresión consiste en, a partir de los datos conocidos de incrementos (tanto en U como en V), la obtención de la rotación del sistema de regulación.

El proceso de obtención del valor de rotación se puede procesar a través de:

- **Gráficamente**

Conocido el incremento de U o V y la utilización de la representación gráfica de la recta de regresión, se obtiene el valor de rotación del sistema de regulación. La figura 34 muestra un ejemplo del proceso.

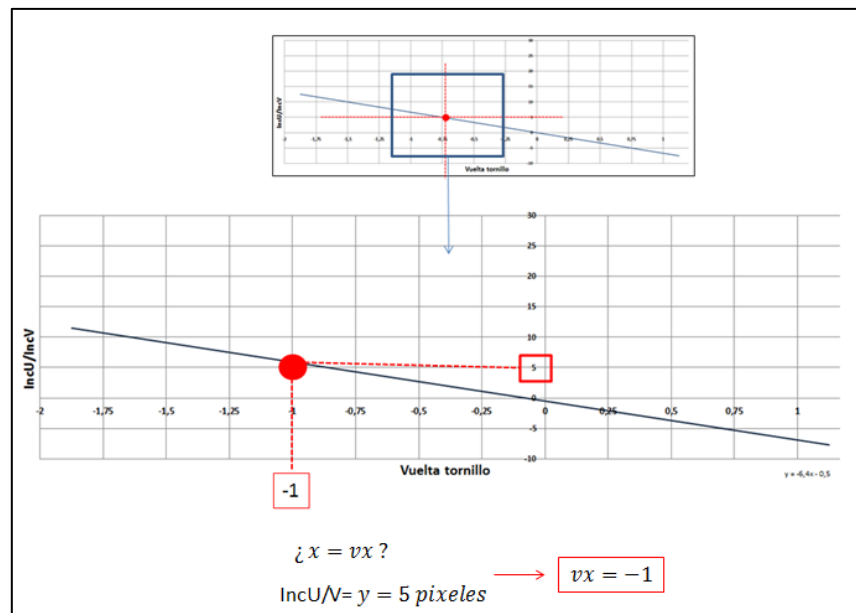


Figura 34: Resolución del valor de rotación gráficamente

○ **Línea de regresión**

Consiste en la obtención del valor de rotación utilizando la ecuación de la recta de regresión.

En la figura 35 se muestra un ejemplo del proceso a través de la línea de regresión.

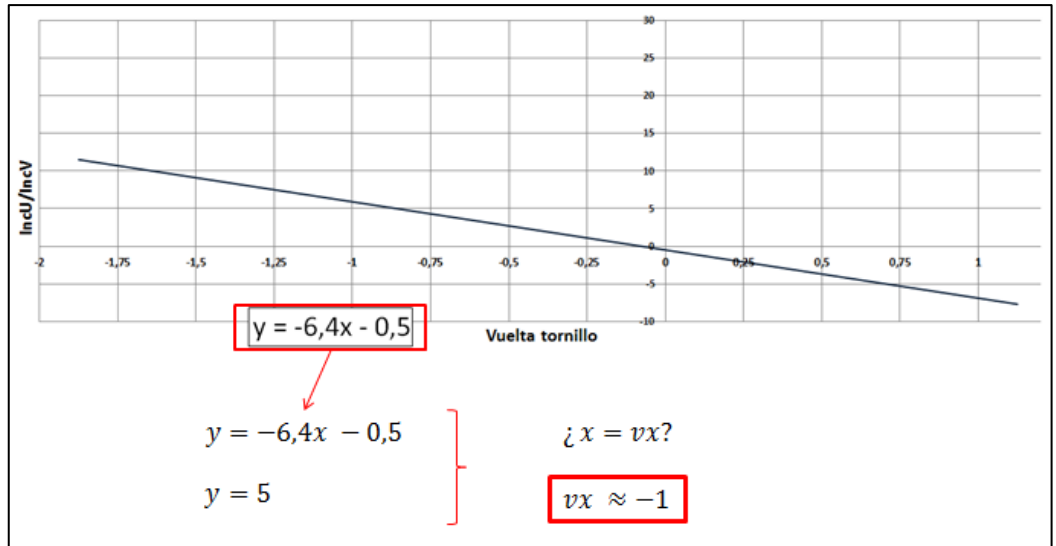


Figura 35: Resolución de rotación línea de regresión

3.5. Limitaciones del prototipo

Una vez finalizado el proceso de diseño y ensamblaje del prototipo deseado, se deben evaluar las diferentes limitaciones. Estas limitaciones son debidas a diferentes factores que engloban la propia definición de prototipo:

“Ejemplar original o primer molde en que se fabrica una figura u otra cosa” [5], es decir, desarrollo de un concepto inicial que intenta alcanzar unos resultados deseados con la posibilidad de ser modificado o mejorado.

En este prototipo las diferentes limitaciones se pueden dividir en:

- Fabricación y materiales:
 - Impresión 3D: Es el método de fabricación utilizado para producir los soportes para los puntos de apoyo. Este proceso de fabricación aporta libertad y rapidez de diseño, aunque su baja precisión y resistencia limitan su utilización como proceso de fabricación para el modelo definitivo.
 - PLA: Material utilizado en el proceso de impresión, facilidad de fundición y modelado, aunque añade una baja rigidez permitiendo pequeñas deformaciones bajo esfuerzos.
 - Policarbonato: Material utilizado en la mesa base, fácil mecanizado y adaptación al prototipo, no obstante, es un material maleable con posibilidad de rugosidad en la superficie que influencia en el posicionado de la ELT.
 - Nylon: Material utilizado en tornillos y tuercas, de elevada resistencia, sin embargo, puede deformarse o deteriorarse con el uso. Incluyendo la limitación de métricas y longitudes de valores estándar y poca variedad.
- Ensamblaje:
 - Estructura de perfiles: La limitación en este proceso se debe a la posible imprecisión en el corte de los perfiles, como consecuencia de ello, el área de apoyo entre perfiles o placa inferior puede no llegar a poseer la perpendicularidad deseada.
 - Elementos de conexión: Las escuadras utilizadas para la unión entre los perfiles, mesa base o escuadras, han añadido facilidad en el montaje, aunque el proceso de ajuste puede ser impreciso debido a la posible rotación en el apriete o libertad de movimiento en el alojamiento del tornillo.
 - Ajuste: El ajuste correcto (apriete) en el montaje de los componentes puede crear diferencias en los ensayos, debido a que el sistema se manipula constantemente para modificar los sistemas de regulación.
 - Fijación: La ELT puede desplazarse durante el proceso de posicionado a lo largo del eje Y. La fijación no correcta de este equipo puede proporcionar distorsión en los ensayos experimentales.

- Regulación:
 - Posición inicial: El sistema de medición esta creado para analizar sobre un área de ± 0.1 mm, por lo tanto el área de las “almenas” deben de situarse en este rango de medición.
 - Posicionado tornillos: La rotación es llevada a cabo manualmente por el usuario, esta regulación se controla de manera visual a través del sistema de marcado. La imprecisión en el alcance de la posición deseada es elevada, siendo mayor cuando la regulación se realiza con dos tornillos a la vez (regulación apoyos inferiores del calibrador).
 - Tuercas: Para el desarrollo del concepto de los sistemas de regulación (nombrados anteriormente), se han tenido que incorporar en las escuadras fabricadas unas tuercas, debido a la limitación en el proceso de fabricación por impresión 3D. Estas tuercas han sido posicionadas y adheridas con un adhesivo en los alojamientos. Este proceso después de su secado y uso puede producir una desviación mínima en la alineación del tornillo con el calibrador.
 - Sistema tornillo-tuerca: La diferencia de materiales entre los componentes (tuerca metálica y tornillo de nylon) dan lugar a una posible falta de contacto entre los filetes del tornillo y el orificio roscado, es decir, que su posicionado final puede variar entre diferentes valores.
 - Sistema tornillo-muelle: Permite la recuperación de la posición inicial, sin embargo, esta recuperación puede ser errónea por la posible falta de alineamiento y posible enclavamiento del sistema.
 - Contacto apoyos: La posible de falta de contacto entre sistemas de apoyo y calibrador puede crear intervalos en los ensayos experimentales de valores erróneos.

- Procesado de datos
 - Código MATLAB: La selección de los puntos a tratar en el código se realiza manualmente, utilizando la herramienta zoom para obtener el punto deseado. Este proceso aporta una imprecisión en el proceso de análisis de contorno de imágenes.
 - Línea de regresión: Es la recta que define el valor medio de todos los ensayos “n” realizados. El ajuste de esta recta a la nube de puntos varía en función de la imprecisión del sistema.

4. Caracterización

La caracterización es un conjunto de operaciones que determinan las diferentes características y especificaciones del equipo, con el propósito de documentar mediante diferentes pruebas la funcionalidad del sistema de regulación y su correcta aplicación.

Este proceso experimental del sistema, consiste en la integración de un sistema calibrado dentro de la estructura desarrollada. A partir de este sistema calibrado y el posicionado del calibrador dentro de la estructura, se realizan “n” ensayos experimentales para el estudio de la repetibilidad.

Los diferentes ensayos experimentales se desarrollan utilizando los siguientes componentes:

- Prototipo de sistema de regulación.

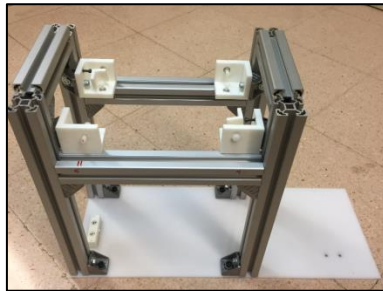


Figura 36: Sistema de regulación

- Calibrador.

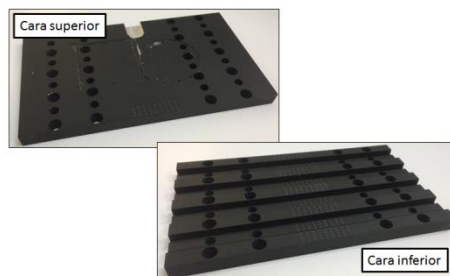


Figura 37: Calibrador

- Sistema de medición.



Figura 38: Sistema de medición

- Fuente de alimentación de los sistemas de medida y controladora ELT.



Figura 39: Fuente de alimentación y controladora

- PC
- Software de control ELT y sistema de captura de imágenes:
 - ESP-Util: Control de la ELT, desplazamiento en eje Y.

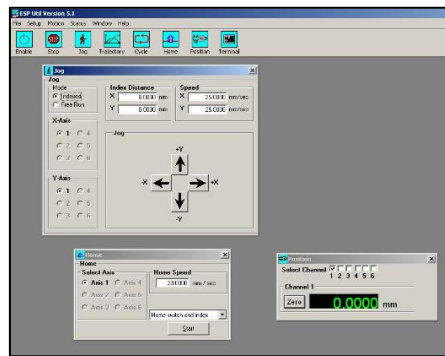


Figura 40: Software ESP-Util

- PixelINK: Visualización y captura de imágenes

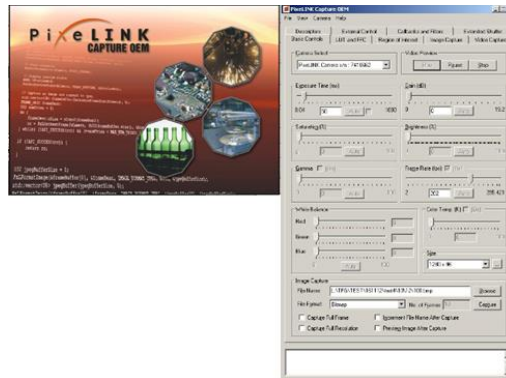


Figura 41: Software PixelINK

- Software de tratamiento de imágenes y datos:
 - MATLAB: Comparación de imágenes y obtención de datos de incrementos en los diferentes ejes.
 - Excel: Tratamiento y análisis de datos.

4.1. Definición de ensayos

Los ensayos se han definido en relación a las necesidades de la caracterización, con la finalidad de obtener las rectas de regresión.

Cada ensayo nos permite obtener unos datos que, analizados posteriormente, permiten alcanzar el resultado final.

Primero se describe la esquematización de los 6 ensayos realizados, definidos como “test”. Estos 6 ensayos permiten el estudio de la rotación en cada uno de los ejes, cada uno relacionado con la rotación de uno o varios tornillos de los puntos de apoyo. Se pueden definir como:

- Test 1: Rotación tornillo 1 (Rotación respecto a eje Z).
- Test 2: Rotación tornillo 2 (Rotación respecto a eje Z).
- Test 3: Rotación tornillos 3 y 4 (Rotación respecto a eje X).
- Test 4: Rotación tornillos 5 y 6 (Rotación respecto a eje X).
- Test 5: Rotación tornillos 3 y 5 (Rotación respecto a eje Y).
- Test 6: Rotación tornillos 4 y 6 (Rotación respecto a eje Y).

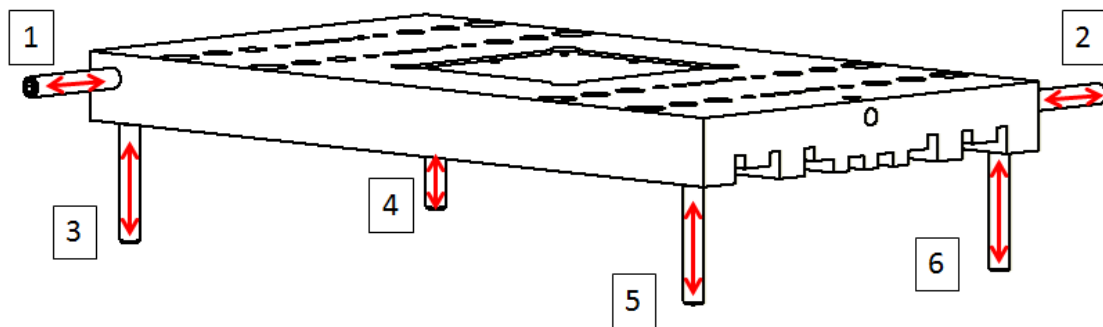


Figura 42: Puntos de regulación

Cada test consta de 10 ensayos totalmente similares para obtener la repetibilidad del sistema. Cada ensayo se puede definir como:

- 12 posiciones de tornillo, desde la posición inicial (siempre en contacto el tornillo y la mesa de calibración) hasta 3 vueltas de tornillo avanzando de $\frac{1}{4}$ de vuelta en $\frac{1}{4}$ de vuelta.
- Captura de dos imágenes por cada una de las posiciones anteriores.
 - Imagen 0: ELT en posición absoluta -50 mm en eje Y.
 - Imagen 1: ELT en posición absoluta 100 mm en eje Y.

*Esta distancia de 150 mm entre imágenes en el eje Y permite obtenerlas lo más cercanas a los puntos de apoyo inferiores.

El siguiente esquema (tomando como ejemplo el test 1) permite mostrar una idea general de la esquematización de los ensayos realizados.

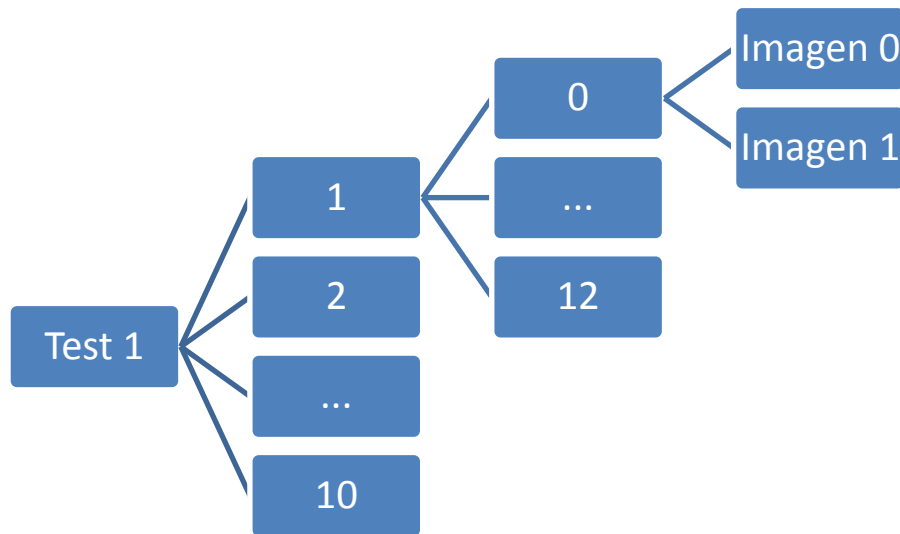


Figura 43: Esquema ensayos

Por último, se procede a definir el proceso a desarrollar en la realización de cada uno de los ensayos. Cada ensayo consiste en:

1. Posicionamiento inicial, proceso descrito en el apartado anterior.
2. Evaluación de los puntos de apoyo, es decir, comprobación de su posición inicial respecto al marcado y asegurar contacto entre la superficie de la cabeza del tornillo y el calibrador.
3. Posición inicial alcanzada con la regulación a través del software de la ELT, es decir, posición inicial de -50 milímetros en el eje Y.
4. Captura “Imagen 0” con la ayuda del software de la cámara de medición.
5. Desplazamiento ELT al punto final definido como el avance hasta los 100 milímetros en el eje Y.
6. Captura “Imagen 1” con la ayuda del software de la cámara de medición.
7. Recuperación de la posición inicial de la ELT.
8. Rotación del tornillo correspondiente al ensayo en proceso, por ejemplo: en el test 1, el tornillo 1 debería ser rotado un cuarto de vuelta hasta alcanzar la siguiente posición del ensayo.
9. Repetición de los puntos 4, 5, 6, 7 y 8, hasta la rotación de 3 vueltas del tornillo/s. Es decir, realizar la adquisición de las dos imágenes en las 12 posiciones definidas.
10. Para terminar el ensayo, el tornillo/s deben de rotarse hasta la posición inicial con ayuda del marcado definido en el apartado “3.2.2. Sistema de regulación”.

4.2. Procedimiento de ensayo

El procedimiento del ensayo tipo implementado para la caracterización del prototipo es el siguiente:

- Posicionamiento y fijación de ELT.
- Conexión de los diferentes equipos para el flujo de datos.
- Posicionamiento del calibrador sobre el sistema de regulación.
- Comprobación del correcto funcionamiento de los sistemas de medición, es decir, chequeo visual de haz del láser e imagen en software.
- Definición del punto inicial del posicionamiento de ELT (-50 mm eje Y).
- Captura “Imagen 0”.
- Desplazamiento de la ELT a posición final (100mm eje Y).
- Captura “Imagen 1”.
- Recuperación posición inicial de la ELT.
- Análisis de imágenes a través de código MATALAB, apartado “3.4.1. Proceso de análisis”.
- Cálculo del valor de rotación del sistema de regulación proceso definido en el apartado “3.4.2. Procesado de datos”.
- Introducción de la rotación del sistema de regulación obtenido en el apartado anterior.
- Captura “Imagen 0” en posición inicial de la ELT.
- Captura “Imagen 1” en posición final de la ELT.
- Análisis de imagen a través de código MATALAB, obteniendo los diferentes incrementos.
- Comprobación en la reducción de los incrementos en los tres ejes.

La figura 44 muestra un resumen del procedimiento nombrado anteriormente.

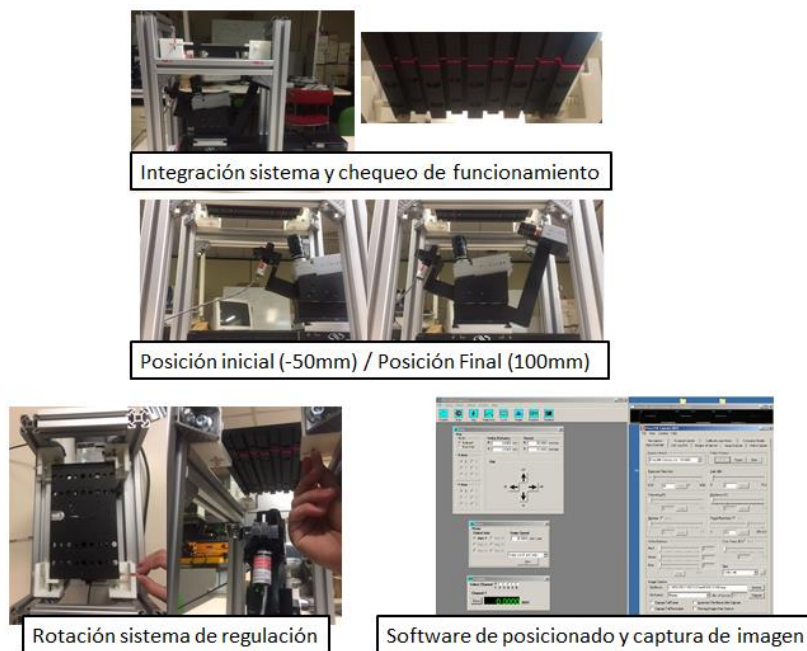


Figura 44: Procedimiento de ensayo

4.3. Tratamiento de datos

Una vez obtenidos los datos de los ensayos realizados, el siguiente proceso es el tratamiento y evaluación de estos para el análisis y la obtención de resultados.

Los datos obtenidos a través del software son:

[IncV, IncZ, IncU, IncX, puntoA1, puntoB1, puntoA2, puntoB2]

- IncV e IncU: Incrementos obtenidos en valores de píxeles de las imágenes.
- IncZ e IncX: Incrementos obtenidos en milímetros a partir de la resolución y los incrementos en píxeles.
- Punto A1 y B1: Puntos de la imagen 0 definidos por las coordenadas [u,v].
- Punto A2 y B2: Puntos de la imagen 1 definidos por las coordenadas [u,v].

Estos datos son obtenidos para cada uno de los ensayos realizados en las 12 posiciones de rotación del tornillo, posteriormente introducidos en el archivo del software Excel destinado a cada uno de los test.

En la figura 45, se muestra un ensayo donde se han implementado 10 ensayos similares (1) para la obtención de la repetibilidad del proceso de alineamiento. Dentro de todos los datos mostrados en cada una de las tablas se procede a realizar el estudio de diferentes áreas del archivo.

Primero, se realiza un estudio de los incrementos (IncU/IncV) en valores de píxeles. Sobre estos incrementos se realiza un estudio de los valores obtenidos y su evolución en las 12 opciones de posición (2). Este promedio aporta una información sobre el salto de valor y su evolución constante.

El siguiente análisis se centra en el estudio de los puntos seleccionados manualmente en MATLAB para comprobar la linealidad sobre el eje Y. Se calcula el incremento tanto de la coordenada U como la coordenada V, verificando que: las coordenadas en U se mantienen constantes en la rotación en el eje Z y las coordenadas en V en la rotación en el eje X.(3).

Para finalizar con el estudio del ensayo se procede al graficado (4), consiste en insertar un gráfico de dispersión de líneas suavizadas mostrando en el eje de abscisa la rotación de los tornillos y en el de ordenadas los incrementos.

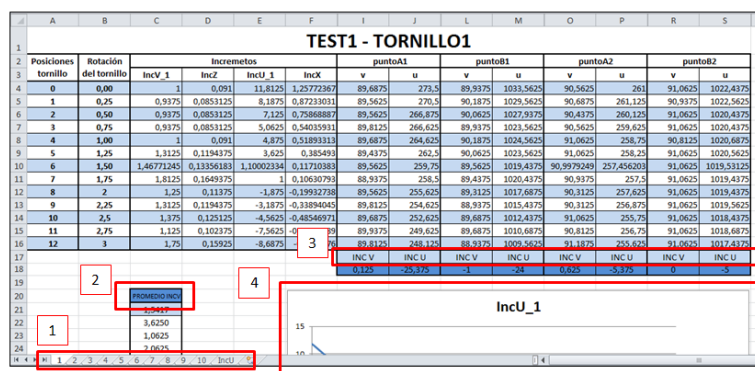


Figura 45: Tabla de tratamiento de datos

La figura 46, presenta el ejemplo del graficado de un ensayo en las 12 posiciones definidas.

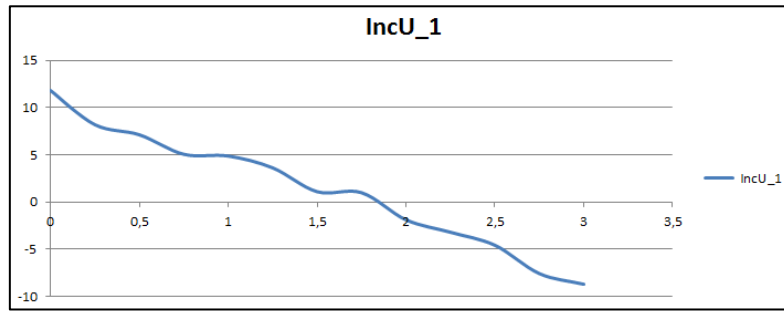


Figura 46: Gráfica de ensayo

Una vez analizados y graficados todos los ensayos del test, se procede a insertar todos los ensayos en una conjunta para proceder a la obtención de la línea de regresión cuya funcionalidad ha sido descrita en el apartado “3.4.2. Procesado de datos”. La figura 47 muestra los 10 ensayos graficados y la recta de regresión obtenida.

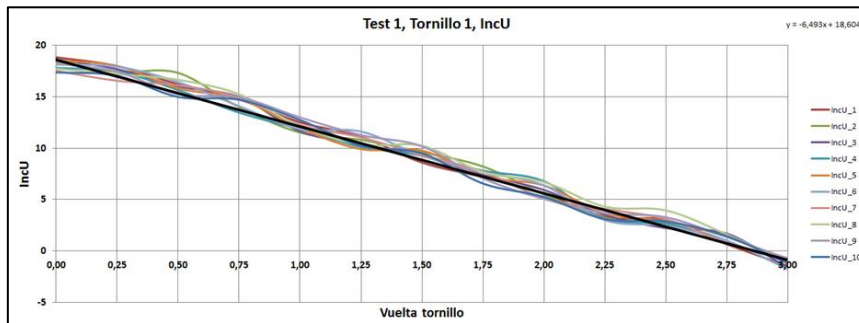


Figura 47: Gráfica conjunta de ensayos

La línea de recta obtenida se puede definir como el promedio de todos los ensayos, teniendo en cuenta la variación de valores en los diferentes ensayos. Esta variación obtenida en cada posición para cada ensayo se debe a la precisión del prototipo desarrollado y sus limitaciones, descritas anteriormente en el apartado “3.5. Limitaciones del prototipo”. En la figura 48, se muestra más detallado el rango de medidas en una posición de tornillo para los diferentes ensayos.

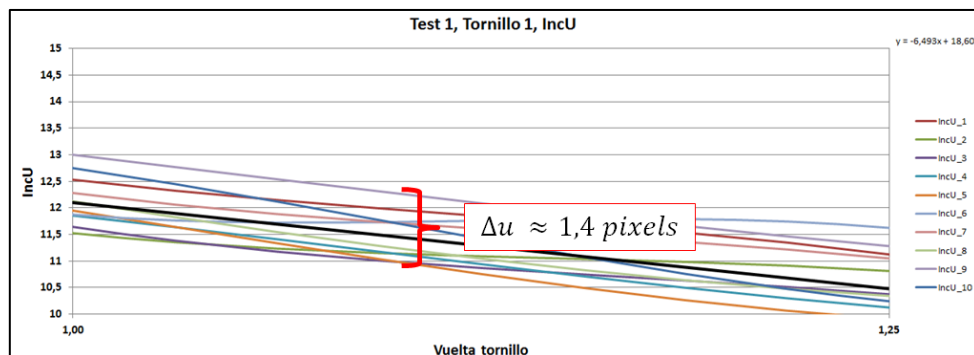


Figura 48: Variación de incrementos

Estas limitaciones son admisibles debido a que el desarrollo del proyecto se centra en un prototipo, dentro del cual se pueden añadir futuras mejoras que permitirán reducir la imprecisión y obtener un sistema de mayor exactitud y detalle.

4.4. Resultados

En apartado anterior se ha descrito el proceso de verificación utilizando uno de los seis test efectuados. En el “Anexo IV: Resultados”, se muestran más detallados todos los datos y su análisis para alcanzar el resultado final.

Los resultados obtenidos para los ensayos son los siguientes:

- Test 1: Rotación tornillo 1 (rotación respecto a eje Z).

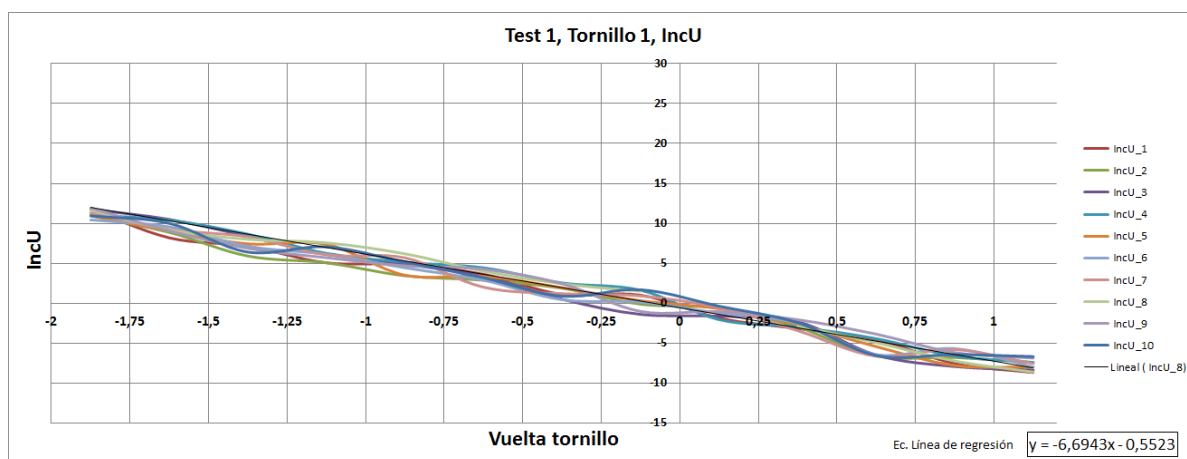


Figura 49: Rotación tornillo 1

- Test 2: Rotación tornillo 2 (rotación respecto a eje Z).

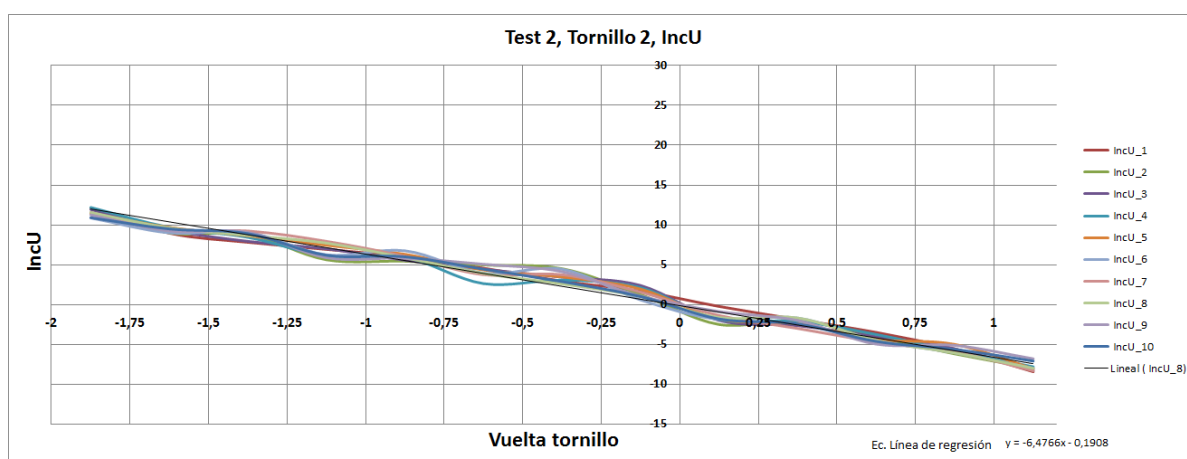


Figura 50: Rotación tornillo 2

- Test 3: Rotación tornillos 3 y 4 (rotación respecto a eje X).

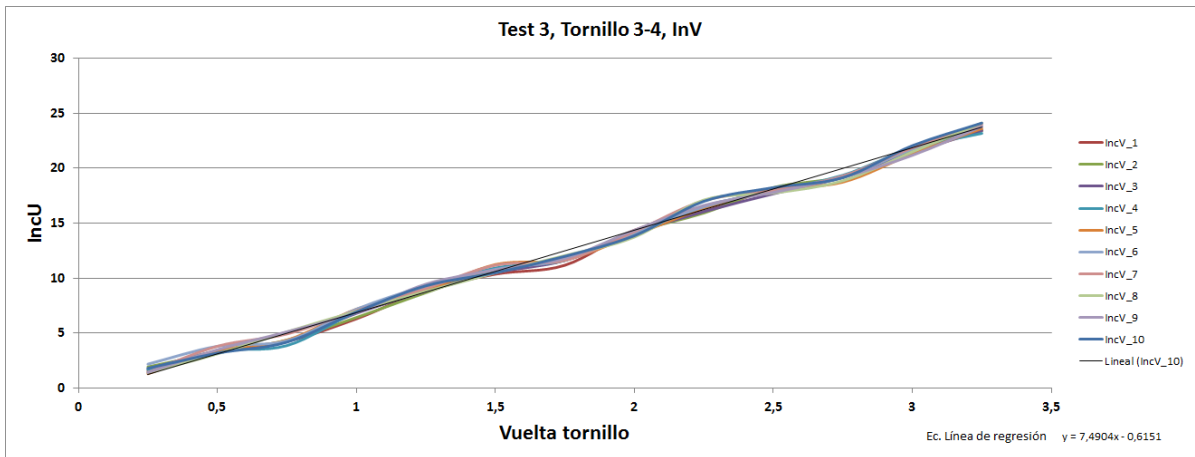


Figura 51: Rotación tornillos 3 y 4

- Test 4: Rotación tornillos 5 y 6 (rotación respecto a eje X).

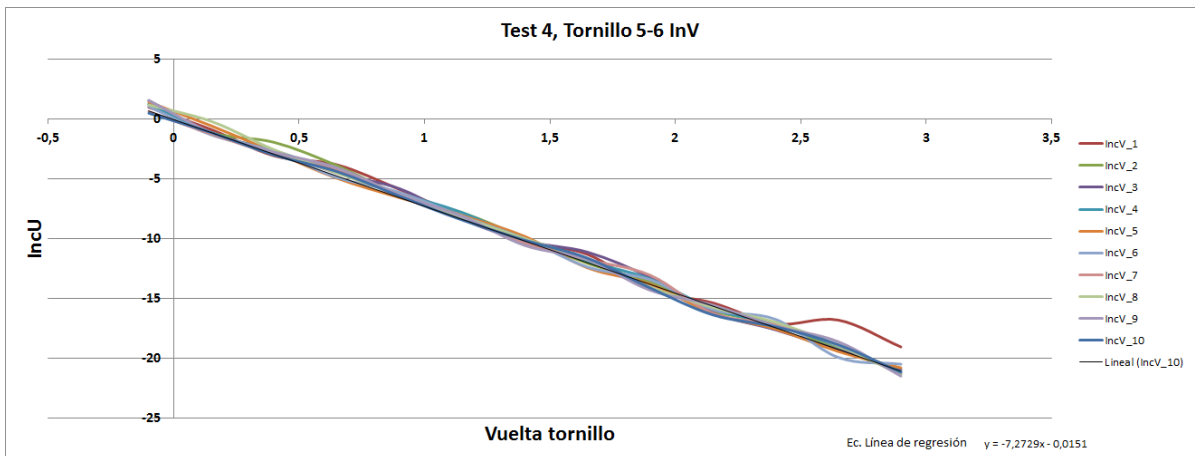


Figura 52: Rotación tornillo 5 y 6

- Test 5: Rotación tornillos 3 y 5 (rotación respecto a eje Y).

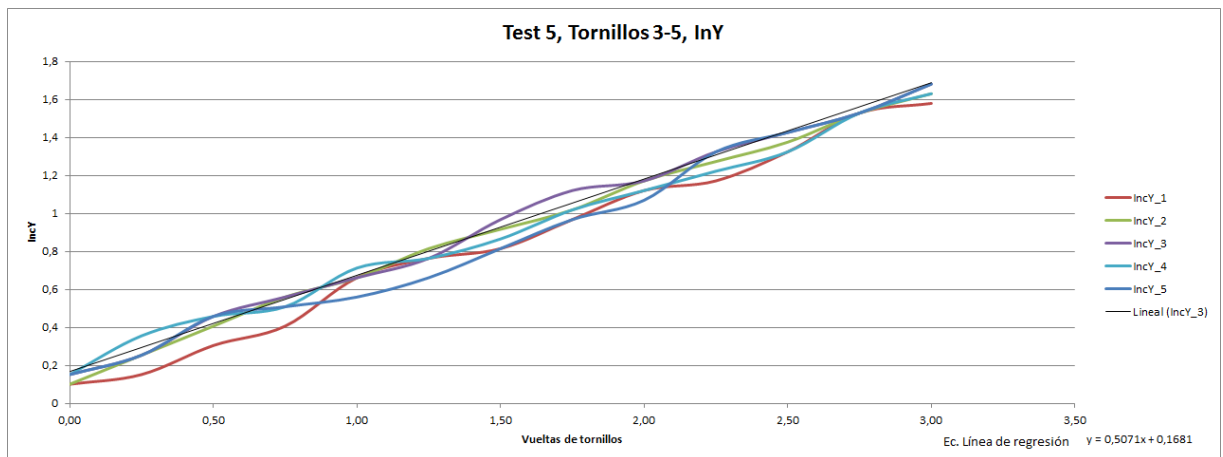


Figura 53: Rotación tornillos 3 y 5

- Test 6: Rotación tornillos 4 y 6 (rotación respecto a eje Y).

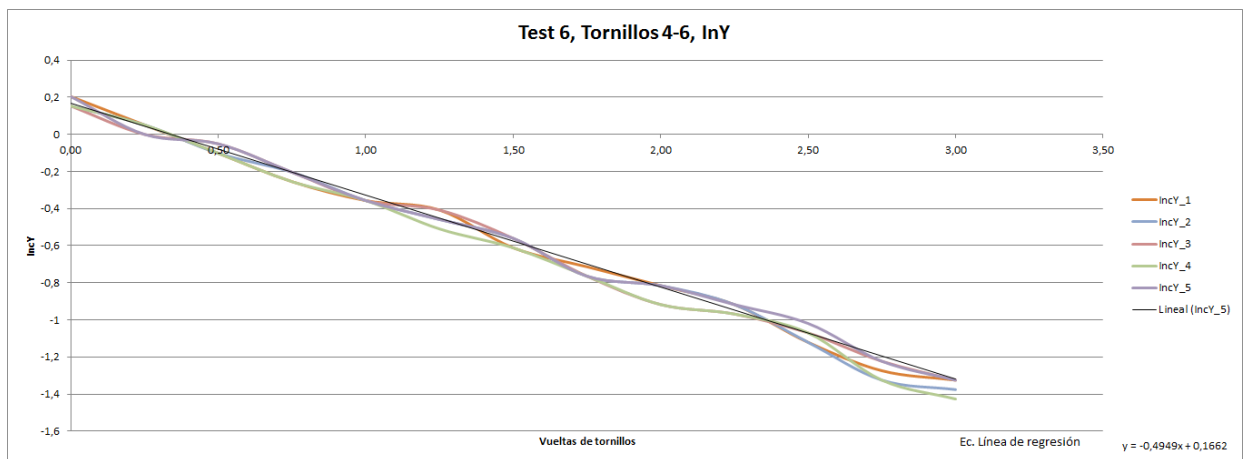


Figura 54: Rotación tornillos 4 y 6

5. Verificación

Proceso para garantizar que un diseño cumple con los requisitos. La verificación confirma que el prototipo refleja los requisitos especificados para cada caso concreto, garantizando un desarrollo correcto del sistema.

Esta verificación permite la obtención de los incrementos en los ejes principales, y su evaluación para la comprobación de la alineación.

Los diferentes ensayos de verificación se desarrollan utilizando los mismos componentes descritos en el apartado “4. Verificación”, modificando alguno de los pasos seguidos en el procedimiento de caracterización.

5.1. Modelo de ensayos

Para alcanzar la verificación del prototipo se ha procedido a la realización de tres tipos de ensayos, se describen a continuación:

- Ensayos tipo 1:

Se caracterizan por la posición inicial similar a lo largo de los diferentes ensayos, es decir, los sistemas de regulación recuperan siempre la misma posición inicial.

- Ensayo tipo 2:

Se caracterizan por la modificación de la posición inicial mediante el cambio de posición de la ELT.

5.2. Ensayo tipo 1

Los ensayos definidos en este tipo 1 se fundamentan en aplicar un procedimiento de ensayo para obtener, a partir del análisis de los datos, la reducción de los incrementos a partir de una posición inicial fija.

5.2.1. Procedimiento de ensayo

En el desarrollo de este tipo de ensayo para la verificación se puede definir el siguiente procedimiento:

- Posicionado de calibrador en estructura.
- Integración del sistema de medición en la parte inferior, situándolo aproximadamente en la posición correcta definida en la placa base.
- Comprobación del contacto de todos los puntos de apoyos con el calibrador. Esta posición se define como la inicial para todos los ensayos a realizar.
- Captura “Imagen 0” en posición inicial de la ELT (-50mm).
- Captura “Imagen 1” en posición final de la ELT (100mm).
- Selección de puntos y obtención de incrementos a través del código MATLAB.
- Cálculo de rotación del sistema de regulación con la utilización de la línea de regresión, proceso definido en apartado “3.4.2. Procesado de datos”, para alcanzar un valor de incrementos lo más próximo a cero.
- Rotación de los tornillos según valores definidos.
- Repetición de capturas de las dos imágenes después de la rotación del tornillo/s.
- Selección de puntos y obtención de los nuevos incrementos a través del código MATLAB.
- Análisis de los nuevos incrementos y valoración de la variación respecto a los valores iniciales y al valor próximo a incremento “0” a alcanzar.
- Realización de diversas iteraciones para obtener la mayor precisión en los valores de rotación.
- En cada iteración se repite el proceso de ajuste de tornillo, captura de imágenes y evaluación de los incrementos obtenidos.
- Una vez alcanzado un valor, lo más preciso al valor deseado, se define como la iteración final.
- Aplicación de la matriz de transformación de perspectiva (MTP), una vez alcanzado el valor más próximo (precisión acotada por limitaciones de prototipo).
- Evaluación de los incrementos en los ejes globales [X, Y, Z].

5.2.2. Tratamiento de datos

Aplicando el procedimiento de ensayo en los ensayos tipo 2, se obtienen los siguientes datos globales a través del software:

[*IncV*, *IncZ*, *IncU*, *IncX*, *puntoA1*, *puntoB1*, *puntoA2*, *puntoB2*]

- *IncV* e *IncU*: Incrementos obtenidos en valores de píxeles de las imágenes.
- *IncZ* e *IncX*: Incrementos obtenidos en milímetros a partir de la resolución y los incrementos en píxeles.
- *Punto A1* y *B1*: Puntos de “Imagen 0” definidos por las coordenadas [u,v].
- *Punto A2* y *B2*: Puntos de “Imagen 1” definidos por las coordenadas [u,v].

A partir de estos datos, el primer punto es la aplicación de la línea de regresión para obtener los valores de rotación. A continuación se evalúa la posición inicial, se introduce la rotación calculada y se aplican “n” iteraciones sobre la regulación para mejorar la precisión de posicionado del sistema de rotación.

La figura 55, muestra un ejemplo de los datos de cada uno de los ensayos.

Ensayo 1	Vueltas tornillo/s		Incrementos				Punto A1		Punto A2		Punto B1		Punto B2	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	v	u	v	u	v	u	v	u
Inicial														
Iteración 1														
Iteración 2														
Iteración 3														

Figura 55: Tabla ensayos

A partir de estos datos se procede a analizar los siguientes puntos:

- Análisis de coordenadas de los puntos capturados.

Punto A vs Punto B		
IncU1	IncU2	promedio

Figura 56: Coordenadas puntos A y B

- Integración de la matriz de transformación de perspectiva (MTP).

Valores en coordenadas globales (MTP)					
X	Y	Z	Δx	Δy	Δz
	A				Punto A
	B				Punto B

Figura 57: Tabla valores de MTP

- Cálculo de los incrementos reales obtenidos después de las iteraciones.

IncX	IncY	IncZ

Figura 58: Tabla incrementos reales

- Comparación datos reales calculados y obtenidos con MATLAB.

InX	InZ

Figura 59: Tabla real vs imagen

5.2.3. Resultados

En el siguiente apartado se muestra un resumen de los resultados obtenidos en los 5 ensayos de verificación implementados. En el “Anexo IV: Resultados”, se muestran más detallados todos los datos y su análisis para alcanzar el resultado final.

En la figura 60, se adjuntan los 5 ensayos tipo 1 realizados e implementados.

TEST TIPO 1											
Ensayo 1	Vueltas tornillo/s		Incrementos				PROMEDIO			Imagen vs Real	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	IncX	IncY	IncZ	InX	InZ
Inicial	0.83	0.15	1.0625	0.0966875	5.375	0.5710308	-0.0117	0.0125	-0.03505	-0.011596024	0.000925
Iteración 1			-0.125	-0.011375	-1.0625	-0.11305446					
Iteración 2			-0.3125	-0.0284375	2.125	0.2267602					
Iteración 3			-0.375	-0.034125	-0.21875	-0.02329602					
Ensayo 2	Vueltas tornillo/s		Incrementos				PROMEDIO			Imagen vs Real	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	IncX	IncY	IncZ	InX	InZ
Inicial	0.81	0.14	1	0.091	5.34375	0.56782726	0.06165	0.00615	-0.01655	0.00508809	0.0005125
Iteración 1			0.25	0.02275	-0.65625	-0.07017619					
Iteración 2			0.4375	0.0398125	0.875	0.09351807					
Iteración 3			-0.1875	-0.0170625	0.625	0.06673809					
Ensayo 3	Vueltas tornillo/s		Incrementos				PROMEDIO			Imagen vs Real	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	IncX	IncY	IncZ	InX	InZ
Inicial	0.83	0.9	1.0625	0.0966875	5.84375	0.62070267	0.06165	0.00615	-0.01655	0.00508809	0.0005125
Iteración 1			0.9375	0.0853125	5.375	0.57093695					
Iteración 2			0.375	0.034125	0.875	0.09347952					
Iteración 3			-0.1875	-0.0170625	0.625	0.06673809					
Ensayo 4	Vueltas tornillo/s		Incrementos				PROMEDIO			Imagen vs Real	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	IncX	IncY	IncZ	InX	InZ
Inicial	0.83	0.32	1	0.091	2.0625	0.22007288	0	0	0	0.006661184	0.0056875
Iteración 1			0.375	0.034125	1.9375	0.20588718					
Iteración 2			-0.0625	-0.0056875	0.0625	0.00666118					
Iteración 3											
Ensayo 5	Vueltas tornillo/s		Incrementos				PROMEDIO			Imagen vs Real	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	IncX	IncY	IncZ	InX	InZ
Inicial	0.1	0.32	0.6875	0.0625625	2.0625	0.22012725	0.0135	0.0112	-0.0314	-0.000161176	0.0314
Iteración 1			0.5625	0.0511875	0.21875	0.02330937					
Iteración 2			0	0	1	0.10671937					
Iteración 3			0	0	0.125	0.01333882					

Figura 60: Resumen test tipo 1

5.3. Ensayo tipo 2

Los ensayos definidos en este tipo 2 se fundamentan en aplicar un procedimiento de ensayo para obtener, a partir del análisis de los datos, la reducción de los incrementos a partir de una posición inicial fija.

5.3.1. Procedimiento de ensayo

En el desarrollo de este tipo de ensayo para la verificación se puede definir el siguiente procedimiento:

- Posicionado de calibrador en estructura.
- Integración del sistema de medición en la parte inferior, situándolo aproximadamente en la posición correcta definida en la placa base.
- Rotación de la ELT respecto a su posición inicial “X” grados en cada ensayo.
- Captura “Imagen 0” en posición inicial de la ELT (-50 mm).
- Captura “Imagen 1” en posición final de la ELT (100 mm).
- Selección de puntos y obtención de incrementos a través del código MATLAB.
- Cálculo de rotación del sistema de regulación con la utilización de la línea de regresión, proceso definido en apartado “3.4.2. Procesado de datos”, para alcanzar un valor de incrementos lo más próximo a cero.
- Rotación de los tornillos según valores.
- Repetición de capturas de las dos imágenes después de la rotación del tornillo/s.
- Selección de puntos y obtención de los nuevos incrementos a través del código MATLAB.
- Comprobación de la precisión en el alcance del cero en los incrementos.
- Realización de iteración donde se repite el proceso de ajuste de tornillo, captura de imágenes y evaluación de los incrementos obtenidos.
- Aplicación de la matriz de transformación de perspectiva (MTP), una vez alcanzado el valor más próximo (precisión acotada por limitaciones de prototipo).
- Evaluación de los incrementos en los ejes globales [X, Y, Z].

5.3.2. Tratamiento de datos

Aplicando el procedimiento de ensayo en los ensayos tipo 2, se obtienen los siguientes datos globales a través del software:

[*IncV*, *IncZ*, *IncU*, *IncX*, *puntoA1*, *puntoB1*, *puntoA2*, *puntoB2*]

- *IncV* e *IncU*: Incrementos obtenidos en valores de píxeles de las imágenes.
- *IncZ* e *IncX*: Incrementos obtenidos en milímetros a partir de la resolución y los incrementos en píxeles.
- *Punto A1* y *B1*: Puntos de “Imagen 0” definidos por las coordenadas [u,v].
- *Punto A2* y *B2*: Puntos de “Imagen 1” definidos por las coordenadas [u,v].

A partir de estos datos, el primer punto es la aplicación de la línea de regresión para obtener los valores de rotación. A continuación se evalúa la posición inicial, se introduce la rotación calculada y se aplican “n” iteraciones sobre la regulación para mejorar la precisión de posicionado del sistema de rotación.

La figura X, muestra un ejemplo de los datos de cada uno de los ensayos.

Ensayo 1	Vueltas tornillo/s		Incrementos				Punto A1		Punto A2		Punto B1		Punto B2	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	v	u	v	u	v	u	v	u
Inicial														
Iteración 1														
Iteración 2														
Iteración 3														

Figura 61: Tabla de datos

A partir de estos datos se procede a analizar los siguientes puntos:

- Análisis de coordenadas de los puntos capturados.

Punto A vs Punto B		
IncU1	IncU2	promedio

Figura 62: Tabla de coordenadas punto A y B

- Integración de la matriz de transformación de perspectiva (MTP).

Valores en coordenadas globales (MTP)					
X	Y	Z	Δx	Δy	Δz
A			Punto A		
B			Punto B		

Figura 63: Tabla valores MTP

- Cálculo de los incrementos reales obtenidos después de las iteraciones.

IncX	IncY	IncZ

Figura 64: Tabla valores reales

- Comparación datos reales calculados y obtenidos con MATLAB.

lnX	lnZ

Figura 65: Tabla real vs imagen

5.3.3. Resultados

En el siguiente apartado se muestra un resumen de los resultados obtenidos en los 5 ensayos de verificación implementados. En el Anexo IV, se muestran más detallados todos los datos y su análisis para alcanzar el resultado final.

En la figura 66, se adjuntan los 5 ensayos tipo 1 realizados e implementados.

TEST TIPO 2											
Ensayo 1	Vueltas tornillo/s		Incrementos				PROMEDIO			Imagen vs Real	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	IncX	IncY	IncZ	InX	InZ
Inicial	0.85	0.13	0.9375	0.0853125	5.53125	0.58828151	0.0585	-0.020585	-0.00515	0.004809909	0.0005375
Iteración 1			-0.125	-0.011375	1.46875	0.15619755					
Iteración 2			-0.06058979	-0.00551367	1.14365052	0.121862					
Iteración 3			-0.0625	-0.0056875	0.59375	0.06330991					
Ensayo 2	Vueltas tornillo/s		Incrementos				PROMEDIO			Imagen vs Real	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	IncX	IncY	IncZ	InX	InZ
Inicial	1.55	-0.1	-0.4375	-0.0398125	10.125	1.07601476	-0.03375	-0.01025	0.02825	-0.002809868	0.0001875
Iteración 1			0.4375	0.0398125	0.5625	0.05991126					
Iteración 2			0.125	0.011375	0.5625	0.05983258					
Iteración 3			0.3125	0.0284375	-0.34375	-0.03655987					
Ensayo 3	Vueltas tornillo/s		Incrementos				PROMEDIO			Imagen vs Real	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	IncX	IncY	IncZ	InX	InZ
Inicial	1.8	0.03	0.25192852	0.0229255	11.7372968	1.24825946	0.08955	0	0.00085	0.006993682	0.00085
Iteración 1			-0.0625	-0.0056875	0.96875	0.1030917					
Iteración 2			0.625	0.056875	-0.4375	-0.04665515					
Iteración 3			0	0	0.90625	0.09654368					
Ensayo 4	Vueltas tornillo/s		Incrementos				PROMEDIO			Imagen vs Real	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	IncX	IncY	IncZ	InX	InZ
Inicial	1.9	0.07	0.5	0.0455	12.0625	1.28413262	-0.02785	-0.0041	0.01115	-0.002102041	0.000225
Iteración 1			-0.25	-0.02275	-0.75	-0.07986199					
Iteración 2			0.125	0.011375	-0.28125	-0.02995204					
Ensayo 5	Vueltas tornillo/s		Incrementos				PROMEDIO			Imagen vs Real	
	Torn1	Torn5-6	IncV	IncZ	IncU	IncX	IncX	IncY	IncZ	InX	InZ
Inicial	2.1	0.07	0.5625	0.0511875	13.6875	1.45736636	-0.0031	0	0	-0.000231023	0
Iteración 1			0	0	-0.03125	-0.00333102					

Figura 66: Resumen test tipo 2

6. Conclusiones y líneas futuras

El objetivo principal de este proyecto era el desarrollo de un sistema mecánico de alineación del calibrador. Para cumplir dicho objetivo se ha generado un procedimiento de uso, una caracterización del sistema y una verificación de funcionalidad para determinar el prototipo como apto.

A la vista está que los resultados obtenidos son favorables y podrían utilizarse como prototipo inicial para implementar líneas futuras que permitan mejorar las características iniciales.

En lo que se refiere a la experimentación, se puede concluir que el prototipo ha funcionado correctamente dentro de las limitaciones de precisión y sensibilidad.

Los resultados de los procesos de verificación del prototipo se encuentran dentro del límite establecido en proyectos anteriores, por lo tanto, el prototipo se puede definir como apto para desempeñar la función definida.

Las tareas a realizar para mejorar el prototipo actual son las siguientes::

- Mejorar la precisión en el sistema de regulación mecánico integrando la utilización de tornillos micrométricos.
- Proceso de fabricación de los componentes que aporten una mayor resistencia y precisión. Agregando al sistema mayor precisión tanto en el montaje como en la regulación del sistema de rotación
- Utilización de equipamiento metálico, tanto tornillos como tuercas, con su adecuada protección para evitar el daño del calibrador. Aportará una mayor precisión debido al constante contacto entre filetes del tornillo y el orificio roscado.
- Mejora en el código de MATLAB para el análisis de los resultados, es decir, añadir detección automática de bordes de imágenes para evitar la selección manual de los puntos a tratar y aumentar la sensibilidad del conjunto.
- Anclaje y fijación de la ELT con la utilización de un sistema mecánico para evitar el uso de topes mecánicos y adhesivos exteriores.

7. Bibliografía

- [1] José Gabriel Hoyos Gutiérrez, Jaiber Evelio Cardona Aristizábal, Luís Miguel Capacho Valbuena y Luis Felipe Orozco, Técnicas de Calibración de Cámaras para visión estéreo y reconstrucción, http://gdsproc.com/congreso/capacho_stsiva_2010_1.pdf, 2010.
- [2] Pomares J. y Torres F., Robots y sistemas sensoriales. Editorial Pearson. 2002.
- [3] F.J. Brosted, J. Santolaria, J.J. Aguilar y D. Guillomía, Laser triangulation sensor and six axes anthropomorphic robot manipulator modelling for the measurement of complex geometry products, Sience Direct, 2012.
- [4] F.J. Brosted, J. Santolaria, J.J. Aguilar y D. Guillomía, 3D Geometrical Inspection of Complex Geometry Parts Using a Novel Laser Triangulation Sensor and a Robot, Senors, 2011