

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Carrera de Ingeniería Mecatrónica**



**Sistema de control automático por medio de visión para sistema de arrastre de  
microfilamentos PCL**

**Proyecto de graduación para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica  
con el grado académico de Licenciatura**

**Daniel Andrés Cordero Ramírez**

**Cartago, abril de 2021**



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

## Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente Anteproyecto de Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema y asesoramiento técnico de miembros de la Escuela de Materiales y el Laboratorio Costarricense de Metrología.

Asumo completa responsabilidad sobre el trabajo realizado y por el correspondiente contenido.

A handwritten signature in dark ink, enclosed within a large, loopy oval shape. The signature appears to read "Daniel" followed by a stylized surname.

Cartago, mayo 2020

Daniel Andrés Cordero Ramírez

Céd: 1-1678-0148

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Por lo tanto, este trabajo cuenta con el aval para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Daniel Andrés Cordero Ramírez

Proyecto: Sistema de control automático por medio de visión para sistema de arrastre de microfilamentos PCL

IVAN ARAYA  
MENESES (FIRMA)  Firmado digitalmente por IVAN  
ARAYA MENESES (FIRMA)  
Fecha: 2021.04.12 15:39:04  
-06'00'

---

MSc. -Ing. Iván Araya Meneses

Asesor

Cartago, 19 de abril 2021.

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Daniel Andrés Cordero Ramírez

Proyecto: Sistema de control automático por medio de visión para sistema de arrastre de microfilamentos PCL

**JAIME ALONSO  
MORA  
MELENDEZ  
(FIRMA)**

Digitally signed by  
JAIME ALONSO MORA  
MELENDEZ (FIRMA)  
Date: 2021.04.20  
15:36:35 -06'00'

Miembros del jurado evaluador

**JUAN CARLOS  
BRENES TORRES  
(FIRMA)**

Firmado digitalmente por JUAN  
CARLOS BRENES TORRES (FIRMA)  
Fecha: 2021.04.20 12:47:23 -06'00'

---

MSc. -Ing. Jaime Mora Meléndez

Jurado

---

MSc. -Ing. Juan Carlos Brenes Torres

Jurado

**ANA MARIA MURILLO  
MORGAN (FIRMA)**

Firmado digitalmente por ANA  
MARIA MURILLO MORGAN (FIRMA)  
Fecha: 2021.04.19 16:29:00 -06'00'

---

Ing. Ana María Murillo Morgan

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 19 de abril 2021

## Dedicatoria

*Dedico este trabajo a mis padres, María Guadalupe Ramírez Picado y Geovanny Cordero Gutiérrez quienes siempre estuvieron para mí en todo lo que yo ocupara.*

*A mis amigos, quienes siempre me levantaron el ánimo en los momentos más difíciles.*

*A mi tía abuela Judith, quien espero que me vea de manera orgullosa desde el cielo en el que tanto creía.*

## Agradecimientos

*A mi familia por sus consejos y acompañamiento tanto económico como emocional durante toda la carrera universitaria y, aún más importante, en mi vida.*

*A mis amigos por siempre darme palabras de ánimo en los momentos más difíciles y disfrutar conmigo en los momentos más dulces y quienes también me ayudaron ampliamente en la resolución de dudas y animándome durante este tiempo tan estresante.*

*A la profesora Laura Rojas Rojas por su atención y apoyo durante todo este proceso del proyecto de graduación.*

## Resumen

La Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales es la encargada de diversos proyectos innovadores, entre ellos se encuentra “Desarrollo de un sistema de estudios in-vitro adaptable en equipo de pruebas dinámicas, con miras a generar estímulos biomecánicos sobre cultivos celulares” donde se producen células musculares y osteogénicas para observar su comportamiento a diversos estímulos. Para que las células se desarrollen, se utiliza una estructura de policaprolactona (PCL) para lograr inocular las células. Dicha estructura debe contener filamento de PCL de máximo 0,1 mm de diámetro para que las células se desarrollen exitosamente. Actualmente, los investigadores no cuentan con una manera exacta y precisa de producir el filamento de PCL con estas características.

Este proyecto se enfoca en la medición del filamento y el control del sistema mecatrónico encargado de elongar el filamento. Para la medición del diámetro, observando las especificaciones dadas por los investigadores y comparándolas con las propuestas se decide realizar un sistema de visión con la capacidad que tomar medidas micrométricas. Estas mediciones serán transferidas al microcontrolador de los motores, donde se realizará el control de estos para obtener filamentos con diámetros deseados. Ambas partes se validan con pruebas de hipótesis con resultados positivos en cada una.

**Palabras clave:** Policaprolactona, sistema de visión, sistema de medición, sistema de control.

## Abstract

The projects developed at the School of Science and Engineering of the Materials have proven to be diverse and innovative. One of these projects, the “Development of an in-vitro study system adaptable to a dynamic test equipment, with the purpose of generating biomechanic stimulus over cell cultures”, revolves around producing and experimenting muscular and osteogenic cells. To inoculate these cells, scaffolds made with filaments of polycaprolactone (PCL) are used, which are produced by the personnel of the project. These filaments must have a diameter of 0.1 mm to allow an optimal growth and inoculation of the cells. Currently, the investigators do not have a reliable way to produce the filament with the specifications needed.

This project focuses on the design of a measurement system and the control of the mechatronical system that elongates the filament. For the diameter measurement, the specifications of the investigators were reviewed and comparing them to the different proposals, the vision-based measurement system was chosen. The measure made by the system was then transferred to the motor’s microcontroller, where they will be controlled based on the measurement system data. By statistical hypothesis testing both systems were validated.

**Keywords:** Polycaprolactone, vision-based system, measurement system, control system.

# Índice General

Lista de Figuras .....	IV
Lista de Tablas .....	VI
Lista de abreviados.....	VII
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Entorno del proyecto.....	1
1.2 Definición del problema .....	2
1.2.1 Planteamiento del problema u objeto de estudio.....	2
1.2.2 Síntesis del problema .....	3
1.3 Objetivo general. ....	3
1.4 Objetivos específicos.....	3
1.5 Enfoque de la solución .....	4
1.6 Estructura del documento .....	4
Capítulo 2: Marco Teórico .....	6
2.1 La policaprolactona o PCL.....	6
2.1.1 Descripción general del PCL.....	6
2.1.2 Características de los biopolímeros.....	6
2.1.3 El PCL en la industria médica.....	8
2.2 Visión artificial .....	9
2.2.1 Generalidades de visión artificial.....	9
2.2.2 Factores que afectan la toma de imagen.....	11
2.3 Micrometría .....	15
2.3.1 Definición.....	15
2.3.2 Medición láser por interferometría.....	16
2.3.3 Medición mecánica, el micrómetro .....	17

Capítulo 3: Metodología.....	18
3.1 Estado actual de fabricación .....	18
3.2 Requerimientos .....	20
3.3 Propuestas de solución .....	24
3.3.1 Propuesta 1 .....	24
3.3.2 Propuesta 2 .....	25
3.3.3 Propuesta 3 .....	26
3.4 Selección de solución .....	27
Capítulo 4: Propuesta de Diseño .....	30
4.1 Selección de componentes.....	30
4.2 Diseño de sistema de visión .....	31
4.2.1 Requerimientos del sistema.....	31
4.2.2 Análisis de imagen .....	32
4.2.3 Planteamiento de solución.....	33
4.2.4 Condición de toma de imagen.....	35
4.2.5 Metodología de procesamiento .....	36
4.3 Diseño de sistema de control .....	40
4.3.1 Modelado del filamento de PCL .....	40
4.3.2 Modelado del motor a pasos.....	41
4.3.3 Diseño de controlador .....	45
4.4 Diseño de prototipo .....	48
4.4.1 Posición de la cámara en sistema mecatrónico .....	48
4.4.2 Distancia entre cámara y filamento.....	51
4.4.3 Conexiones dentro del prototipo .....	54
Capítulo 5: Resultados y Análisis .....	56

5.1 Prototipo aplicado.....	56
5.1.1 Espacio del sistema de medición.....	56
5.1.2 Sistema de medición.....	58
5.2 Resultados experimentales .....	61
5.2.2 Sistema de medición.....	61
5.2.3 Comprobación del sistema completo .....	66
5.3 Análisis financiero.....	68
Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones .....	70
6.1 Conclusiones.....	70
6.2 Recomendaciones .....	70
Capítulo 7: Bibliografía.....	71
Anexos.....	76
A.1. Manual de usuario .....	76
A.1.1 Inicio del programa.....	76
A.1.2 Errores comunes .....	81
A.1.2.1 Error de conexión de PuTTY. ....	81
A.1.2.2 Error en la programación.....	82
A.2 Código de programación del sistema completo.....	83
A.2.1 Código de Python en microcontrolador .....	83
A.2.2 Código de microcontrolador de motores .....	86
A.3 Hoja de datos del motor a pasos .....	89

## Lista de Figuras

Figura 1. Etapas de procesamiento en visión artificial.....	10
Figura 2. Ejemplo de captura de una imagen. ....	12
Figura 3. Comparación entre distancia focal y el ángulo de visión del sensor. ....	14
Figura 4. Distorsión de almohadilla y barril de un rectángulo.....	15
Figura 5. Tipos de división por amplitud. ....	17
Figura 6. Forma de micrómetro.....	17
Figura 7. Proceso de desarrollo de un producto. ....	18
Figura 8. Maquinaria para manufactura del filamento.....	19
Figura 9. Matriz de PCL comparado con regla. ....	32
Figura 10. Histograma de matriz de PCL.....	33
Figura 11. División de solución en subsistemas. ....	35
Figura 12. Diferencias iluminación difusa (izq.) y campo oscuro (der.) ....	36
Figura 13. Representación del objeto a medir.....	37
Figura 14. Representación de la detección de contornos. ....	37
Figura 15. Representación de la caja envolvente del objeto a medir. ....	38
Figura 16. Representación de la caja envolvente de objeto circular. ....	38
Figura 17. Representación de puntos medios en rectángulo. ....	39
Figura 18. Representación de medida de rectángulo.....	39
Figura 19. Simulación de motores a pasos.....	44
Figura 20. Valor de L para control de planta ....	45
Figura 21. Valor de T para control de planta. ....	46
Figura 22. Planta junto con su control PID a lazo cerrado.....	47
Figura 23. Respuesta al escalón del sistema con PID. ....	47
Figura 24. Simulación de zona de medición. ....	49
Figura 25. Vista frontal de zona de medición. ....	50
Figura 26. Iluminación dentro de la zona de visión. ....	51
Figura 27. Captura del filamento con distancia focal encontrada. ....	53
Figura 28. Imagen recortada por medio de software.....	54
Figura 29. Esquemático de conexión del sistema. ....	55
Figura 30. Prototipo de sistema de elongación. ....	56

Figura 31. Prototipo de área de sistema de medición.....	57
Figura 32. Vista del área de medición.....	57
Figura 33. Interior de zona de medición. ....	58
Figura 34. Contornos de objeto a medir.....	59
Figura 35. Caja sobre los contornos del filamento.....	60
Figura 36. Medición final del filamento.....	61
Figura 37. Abultamiento en el filamento. ....	66
Figura 38. Menú de PuTTY. ....	76
Figura 39. Usuario y contraseña en PuTTY.....	77
Figura 40. Ejemplo de navegación en documentos.....	78
Figura 41. Ejemplo de llamado a Preview. ....	79
Figura 42. Ejemplo de llamado a PFG3. ....	80
Figura 43. Ejemplo de terminación del algoritmo por medio de Ctrl + C. ....	80
Figura 44. Ejemplo de terminación del algoritmo por reinicio. ....	81
Figura 45. Error de conexión PuTTY-Raspberry Pi. ....	82

## Lista de Tablas

Tabla 1. Necesidades expresadas por Laura Rojas Rojas .....	20
Tabla 2. Necesidades expresadas por Jose Lizano Artavia.....	21
Tabla 3. Necesidades expresadas por Leonardo Rojas Rapso .....	21
Tabla 4. Lista total de necesidades.....	22
Tabla 5. Especificaciones sobre sistema de control y sistema de medición. ....	23
Tabla 6. Resumen sobre propuestas .....	27
Tabla 7. Evaluación de medición mecánica.....	28
Tabla 8. Evaluación de medición láser.....	28
Tabla 9. Evaluación de medición por visión artificial. ....	29
Tabla 10. Ventajas y desventajas de cámaras. ....	30
Tabla 11. Ventajas y desventajas de protocolos de comunicación. ....	34
Tabla 12. Parámetros de motor a pasos.....	44
Tabla 13. Valores de constantes del PID.....	46
Tabla 14. Medidas de filamento por medio del vernier. ....	62
Tabla 15. Medidas del filamento por medio del sistema de visión.....	63
Tabla 16. Medición de filamento estirado.....	67
Tabla 17. Costo de componentes del sistema.....	68

## Lista de abreviados

Palabra o frase abreviada	Significado
PCL	Policaprolactona
LCM	Laboratorio Costarricense de Metrología
fps	Fotogramas por segundo, cuadros por segundo
NA	No aplica
Izq	Izquierda
Der	Derecha

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Entorno del proyecto

El Tecnológico de Costa Rica se caracteriza por su innovación y creación de proyectos que llegan a ser de trascendencia mundial y de alto impacto en la sociedad latinoamericana, especialmente en la sociedad de Centro América. Entre las muchas ramas de proyectos que se desarrollan en la institución, los relacionados con la industria médica se han visto en auge en estos últimos tiempos. La industria médica se ha visto beneficiada del aporte de diferentes disciplinas, en las cuales la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales también ha participado en el impacto de este campo.

El motivo que impulsó esta escuela a entrar en este ámbito es el de investigar los diferentes materiales que pueden ser usados para la industria biomédica y con esto realizar una mejora en los productos existentes. Con esto en mente y en conjunto con la Escuela de Biología, la Escuela de Física y la cooperación de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Queen Mary University of London, se propuso el proyecto [1]. Este proyecto se basa en la reproducción y experimentación de células musculares y osteogénicas, las cuales están inoculadas en estructuras poliméricas en un ambiente controlado. Estos experimentos se hacen con la finalidad de lograr creación de implantes que sean más compatibles con el cuerpo humano.

Para lograr la reproducción de dichas células y para hacer los ensayos necesarios, se necesitará de un medio donde las células se puedan inocular y en donde se puedan observar y analizar los resultados de los experimentos. Para dichos ensayos, se utiliza una estructura que albergue las células que, para propiciar el crecimiento, sea de un material que imite las características mecánicas y físicas del músculo. Por estas características, se usarán microfilamentos de PCL con un diámetro de 0.1 mm y una longitud de 1 m para realizar las estructuras de cada ensayo. Por esta razón, es de máximo interés que los microfilamentos sean fabricados de manera uniforme, precisa e idéntica. Por esta razón, es adecuado realizar un sistema de arrastre con un sistema de medición incorporado y control automático para la fabricación de los microfilamentos, para así asegurar que todas las características mencionadas previamente siempre puedan cumplir.

## 1.2 Definición del problema

### 1.2.1 Planteamiento del problema u objeto de estudio.

La escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales en conjunto con el centro de investigación de Biotecnología trabajan en conjunto en el desarrollo de un sistema monitorizado en donde se puedan realizar pruebas en células musculares u osteogénicas. Para lograr la reproducción de las células es necesario el uso de microfilamentos de policaprolactona (PCL), las cuales serán utilizados como matrices que se asemejan a las células musculares. Este tipo de células comúnmente cuentan con un diámetro en el rango de los micrómetros y un largo variable dependiendo del músculo que se desee replicar. Para realizar una matriz con varias células, los microfilamentos deben tener un diámetro menor de 0.1 mm y una longitud de 1 m. Actualmente, los microfilamentos están siendo fabricados por los investigadores, los cuales no cuentan con un método que pueda producir los filamentos con resultados constantes conforme al diámetro y la uniformidad. Por esta razón, actualmente el microfilamento producido no cumple con las características establecidas para que sean usados en la interacción con las células.

Actualmente, el proceso de fabricación de los microfilamentos se realiza con la extrusora Filabot 3D en donde se introduce material de PCL en forma de pellets. Este se fundirá y será extruido por una boquilla de 1 mm. El microfilamento resultante después será pasado en un sistema de arrastre, el cual reducirá el diámetro del microfilamento. En este sistema para producir el filamento se introducen diferentes valores de velocidad para que el PCL se extruya por medio de una diferencia de velocidad. El PCL producido se almacena enrollado en carruchas.

El problema de este sistema de arrastre se evidencia en la falta de medición del diámetro del PCL. Debido a que no se tiene su medición, no se puede determinar el diámetro final del PCL, haciendo que no se sepa si se llegó al diámetro requerido. Otro problema presente en el sistema actual es que el sistema solamente tiene una dirección, por lo que solo es posible realizar una reducción de diámetro. Cuando el diámetro del microfilamento es revisado por medio de inspección visual por el operador del equipo, la mayoría del tiempo su diámetro será diferente al de las especificaciones. Por lo tanto, para que el PCL cumpla

las especificaciones, este es sometido a un estiramiento manual el cual es realizado por los investigadores.

Observando la fabricación actual de los microfilamentos, se pueden observar diversas diferencias con respecto al resultado esperado. Una de estas es la diferencia de diámetro entre los PCL producidos en una carrucha. Esto sucede ya que el microfilamento está siendo estirado manualmente, haciendo que la fuerza aplicada sobre este varíe cada vez que se intente estirar un tramo, produciendo así diferentes diámetros a lo largo del PCL guardado. Otra imperfección que se encontró en el hilo son puntos de abultamiento, donde el microfilamento no tuvo una elongación idónea. Esto sucede cuando los microfilamentos al ser estirados, los puntos desde donde se aplican las fuerzas se verán afectados por la presión que se le ejerce al estirar el hilo, haciendo que se produzca un bulto en medio de dos zonas donde la fuerza de elongación fue aplicada.

### 1.2.2 Síntesis del problema

Se requiere diseñar un sistema de medición del diámetro del microfilamento de PCL además del sistema de control automático del sistema de arrastre, para que al realizar la extrusión del microfilamento este cumpla con las características que fueron dadas por los investigadores del proyecto [1].

### 1.3 Objetivo general.

Diseñar un sistema de medición que permita realizar el control del sistema mecatrónico encargado de la fabricación de microfilamentos de policaprolactona.

### 1.4 Objetivos específicos.

1. Diagnosticar el proceso actual de la fabricación del hilo de policaprolactona.
2. Diseñar un sistema capaz de realizar la medición de los microfilamentos con diámetro menor a 0.1 mm con una desviación de al menos 0,02 mm.

3. Diseñar un sistema capaz de realizar el control automático del nuevo sistema mecatrónico de los filamentos.
4. Validar y verificar los resultados obtenidos con el uso de un prototipo.

## 1.5 Enfoque de la solución

En primera instancia, se propone realizar un diagnóstico formal de los procesos y maquinaria que actualmente se cuenta para fabricar el filamento.

Al haber terminado este estudio, se procedió a diseñar el sistema de medición del hilo. Las partes que componen este sistema serán evaluadas según lo enunciado por [2].

Después, se diseñó el sistema de control del sistema de arrastre donde se tomó en cuenta el precio del controlador, su número de pines, su capacidad de almacenamiento de código y su facilidad de programación.

Por último, la monitorización del proceso se verá dentro del sistema de visión, donde fue calibrado con los estándares de la LCM y se produjo un manual de usuario donde se puedan observar casos típicos de fallos que podrían ocurrirle al sistema, así como el posible mantenimiento que se le deberá dar a la máquina para que pueda seguir con un óptimo funcionamiento.

## 1.6 Estructura del documento

En el presente documento, el capítulo 1 trata sobre la introducción al proyecto de graduación, donde se habla del entorno del proyecto y el problema que se debe resolver. Aparte de esto, también se incluyen los objetivos y enfoque de solución que se le da al problema descrito. El marco teórico está en el segundo capítulo del documento, donde se habla sobre la policaprolactona o PCL, sobre mediciones micrométricas y sobre visión artificial. El tercer capítulo trata sobre las propuestas de diseño del sistema de control automático y visión del sistema de arrastre, mientras que en el siguiente capítulo se trata la descripción del proceso de diseño que se usó para el desarrollo de la propuesta seleccionada.

Para el capítulo 5 del documento, se verán validados los sistemas diseñados por medio de simulaciones y pruebas de conceptos. El sexto capítulo son las conclusiones y recomendaciones del proyecto. La bibliografía se presentará como el séptimo capítulo del documento. En los anexos, se incluirán las programaciones tanto para el sistema de visión como para el sistema de control, así como el manual de usuario.

## Capítulo 2: Marco Teórico

### 2.1 La policaprolactona o PCL

#### 2.1.1 Descripción general del PCL

La policaprolactona o PCL es un polímero sintético utilizado principalmente en la industria médica en el área de biomédica. La historia del PCL comienza a principios de los años 1930 donde [3] estipulan que fue la primera sintetización de PCL. La creación de este polímero fue el resultado de una investigación para crear plásticos que pudieran ser degradados por microorganismos. Las características que destacaron cuando se sintetizó por primera vez fueron su bajo punto de fusión y su alta solubilidad, las cuales hicieron que este material pudiera ser procesado por medio de diversas técnicas de manufacturado y también que fuera altamente utilizado en la industria biomédica de la época.

En las décadas de 1970 y 1980, el PCL empezó a ser utilizado en artefactos para administrar medicamentos. Su velocidad de degradación dentro del cuerpo, así como su facilidad para ser moldeado y manufacturado hizo que sus ventajas fueran mayores a las de los polímeros de la época, pero debido a que había polímeros reabsorbibles con una absorción más rápida, el uso e investigación del PCL fue disminuyendo hasta casi quedar en el olvido. No fue hasta finales de los 1990 y principio de los 2000 que el PCL tuvo de nuevo un auge. Este redescubrimiento del material sucedió debido a la introducción de una nueva parte de la biomédica, la ingeniería de tejidos. La razón del uso del PCL en esta industria se ve justificado en sus propiedades reológicas y viscoelásticas, las cuales hacen que sea un material fácil de manipular para realizar las estructuras que contendrían los tejidos [3].

#### 2.1.2 Características de los biopolímeros

En la ingeniería de tejidos, como fue estipulado anteriormente, los polímeros utilizados en esta rama de la biomédica deben tener ciertas características que posean propiedades físicas comparables a los tejidos que puedan propiciar comportamientos específicos en las células y puedan incrementar la calidad de los tejidos fabricados [4]. Entre

estas características, se encuentran como las más importantes la velocidad de degradación, la biocompatibilidad y las propiedades mecánicas, biológicas y físicas del material.

La velocidad de degradación es importante debido a que los implantes creados deberán de tener una velocidad de degradación similar a la velocidad de regeneración del tejido donde fue implantado. Si la degradación del implante fuera más lenta, esto provocaría que la regeneración del tejido natural se viera obstaculizada. Por otro lado, si fuera más rápida, el implante procedería a desligarse del tejido, haciendo que el proceso de curado del tejido se viera retrasado. Conforme a los factores que influyen en la degradación, la degradación de un material depende del peso molecular, forma, contenido residual de monómeros entre otros. Otro factor que es mencionado es el nivel de pH del medio en el que se encuentra el implante, donde en un medio alcalino el PCL tendrá una mayor tasa de degradación que en un medio ácido. Una cualidad del PCL es su biodegradabilidad ajustable, haciendo que pueda ser utilizado en diversos tipos de tejidos [5].

La biocompatibilidad, es definida por [6] como la habilidad de un material de realizar sus funciones con respecto al tratamiento médico que se esté realizando y que produzca una respuesta deseable en la aplicación a realizar y al interactuar con sistemas vivos, este no tenga ningún riesgo de producir algún daño, intoxicación o rechazo por el sistema inmune del paciente, o que produzca efectos secundarios indeseados o inapropiados. Este término llega a ser crucial en el tema, debido a que los implantes pueden llegar a estar en contacto con sangre, huesos y órganos vitales. Aparte de esto, si el implante está en contacto con el torrente sanguíneo, el material implantado también deberá de poseer otra rama de la biocompatibilidad, la cual es la hemocompatibilidad. Los mismos autores definieron la hemocompatibilidad como una parte de la biocompatibilidad que describe la compatibilidad de los implantes que esté en contacto con la sangre, donde este mantenga el flujo sanguíneo sin ningún efecto adverso, como la formación de trombos o la inserción de sustancias al torrente sanguíneo que provoquen consecuencias que afecten la salud del paciente [6].

Con las propiedades del material, como las mecánicas, físicas y biológicas son importantes debido a que las estructuras de los implantes deben tener propiedades similares a la parte del cuerpo en la que se fue insertado. Un ejemplo es citado por [3] donde en la década de los 1980 se barajó la posibilidad de sustituir los componentes metálicos de los

implantes (tornillos, placas, entre otros) por componentes biodegradables. Uno de los materiales considerados para esto fue el PCL, pero debido a que no lograría soportar las cargas que estas piezas llevan, esta idea fue descartada. Las propiedades mecánicas de un material son aquellas que son asociadas a las cargas y esfuerzos que puede soportar un material y de las deformaciones que son producidas por efecto de éstas [7]. La elasticidad, los esfuerzos de tensión y compresión, viscosidad y deformación son algunas de las propiedades mecánicas que se deben tomar en cuenta al seleccionar un material de implantes. Las propiedades físicas son características que son representadas por magnitudes y que son atribuidas a un objeto [8], en este caso, a un material. Algunos ejemplos sobre las propiedades físicas de un material son la densidad, el peso, su solubilidad, el punto de fusión y el punto de ebullición. Un estudio de las propiedades mecánicas, físicas y biológicas de los biopolímeros puede verse en [9], [10] y un estudio entre diferentes estructuras de tejidos en [11].

### 2.1.3 El PCL en la industria médica

Como lo mencionan en [11], la policaprolactona actualmente tiene un amplio uso en la industria médica por diversas razones, entre las cuales menciona el comportamiento termoelástico, su biodegradabilidad, biocompatibilidad y bajo punto de fusión (60 °C). Este bajo punto de fusión es importante debido a que indica una gran facilidad de manufactura. En la industria médica, actualmente el PCL es usado en dos áreas, en la industria de tejidos y en artefactos para suministrar medicamentos.

En la parte de suministrado de medicamentos, [3] hablan del PCL como un material con buena biocompatibilidad y con una biodegradación de aproximadamente un año, la cual es una biodegradación lenta comparada con otros biopolímeros. Por esta razón, actualmente se usa en medicamentos que deben ser suministrados en un periodo mayor a un año. También, [5] habla de la gran compatibilidad que el PCL tiene con muchas drogas del mercado, haciendo que estas puedan ser distribuidas de manera homogénea en el tiempo. Unos ejemplos dados por este autor sobre las drogas son la doxiciclina, tetraciclina, dexametasona, ketoprofeno entre otros. Se ha estudiado su uso en el suministro de medicamentos para el

tratamiento del cáncer, donde su conclusión se menciona que la artecimina encapsulada en micelas de PCL logra ser liberada de manera lenta y controlada, haciendo que se inhiba el crecimiento de las células cancerígenas, mostrándose como un método prometedor para combatir el cáncer [12].

En la industria de tejidos, el uso del PCL se puede ver en las estructuras de tejido sintético. Para regenerar el tejido perdido, las estructuras utilizadas deben lograr la adhesión de las células, su crecimiento y su diferenciación. Además, deben lograr la migración y transporte de células o sustancias que propicien la regeneración del tejido [5]. También, [13] mencionan que las estructuras deben de contener una arquitectura porosa, porosidad, una degradación controlada y suficiente fuerza mecánica para aguantar la presión ejercida por el crecimiento y diferenciación de las células aledañas. El PCL es idóneo para la ingeniería de tejidos debido a su estabilidad térmica, a la alta capacidad de modificar sus propiedades de degradación como de hidrofobicidad y a su facilidad de procesamiento [13]. Por otra parte, [5] hablan de que, por estas razones, aparte de ser utilizado en la industria de tejidos, se ha empezado a utilizar este material para suturas reabsorbibles, recubrimientos de heridas y en barreras adhesivas.

## 2.2 Visión artificial

### 2.2.1 Generalidades de visión artificial

La visión artificial, como lo mencionan Sánchez y Ricolfe, se basa en encontrar las propiedades y estructuras que el mundo real presentado por medio de una o más imágenes bidimensionales tomadas en este mundo y, que éstas sean procesadas por un computador. También, las imágenes tomadas presentan información importante para realizar el procesamiento; información como brillo, colores, formas, entre otros [14]. Los campos de conocimiento de la visión artificial se componen principalmente de la física del color, óptica, electrónica, geometría, algorítmica y sistemas de computación [15].

Aunque los humanos capturemos las imágenes por medio del medio óptico y sean procesadas por el cerebro, el cual con esa información decide cuál será la siguiente acción de la persona. En aras de replicar la manera en que la naturaleza procesa las imágenes, en visión artificial el algoritmo de procesamiento se divide en cuatro etapas principales: captura, preprocesamiento, segmentación y clasificación. En estas etapas, aunque normalmente tengan un orden lógico, si se necesita, este proceso puede pasar por procesos iterativos entre las diferentes etapas [14]. Un ejemplo de este proceso se puede observar en la figura 1.

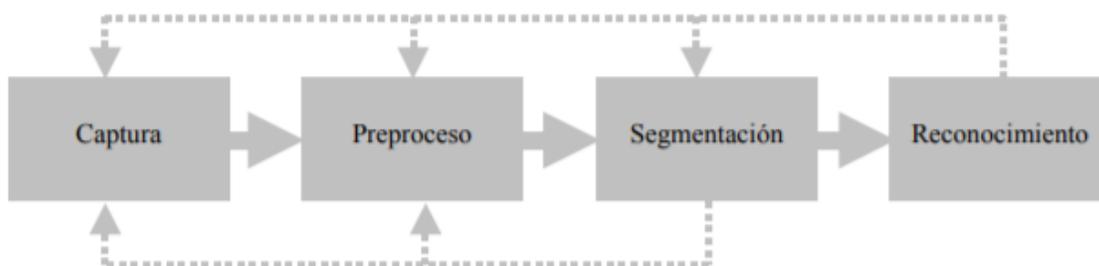


Figura 1. Etapas de procesamiento en visión artificial.

**Fuente:** Vélez et al. Diagrama de bloques de las etapas típicas en un sistema de visión artificial.

La primera etapa es llamada la etapa de captura debido a que en ésta se da la adquisición de las imágenes, las cuales serán capturadas por un sensor. La segunda etapa, llamada como preprocesamiento, se tratan las imágenes mediante filtros y transformaciones para que se eliminen imperfecciones presentes o se resalten las características que serán evaluadas o tratadas en las demás etapas. La siguiente etapa, conocida como la de segmentación, tiene como función la de separar los elementos de interés del resto de la imagen para así poder utilizarlos en la etapa final. La última etapa es la etapa de reconocimiento o clasificación, donde se distinguen los objetos que fueron aislados en la etapa pasada [15]. Con los objetos distinguidos, el siguiente paso es la toma de decisiones sobre el objeto clasificado.

Para la toma de decisiones sobre el objeto clasificado de la imagen, se habla sobre algunas de las diferentes aplicaciones en las que actualmente se usan los sistemas de visión. Entre las aplicaciones mencionadas, se encuentran las de reconocimiento de caracteres, inspección de tolerancias, modelaje en 3D a partir de imágenes en 2D. También se menciona que estas aplicaciones son familiares para los estudiantes y que estos pueden apreciarlas debido a que todas estas son utilizadas en la vida cotidiana [16]. Otra perspectiva de las aplicaciones es dada por parte de [17], donde ellos hablan de tres tipos de aplicaciones que se pueden encontrar en la industria actual. Uno de los ejemplos brindados son las bases de datos que buscan imágenes similares a la suministrada por el usuario. Ellos mencionan que esta aplicación resulta muy útil en búsquedas tanto de referencias para proyectos, como para búsquedas anti-copyright sobre proyectos de logos o diseños. También, mencionan como la industria médica se beneficia de la visión artificial, donde en las imágenes MRI se pueden separar las venas, o las anomalías que estén presentes en esa persona, de las demás partes del cerebro, demostrando la capacidad de esta rama de inteligencia artificial para el diagnóstico de enfermedades [17].

### 2.2.2 Factores que afectan la toma de imagen

Como fue mencionado anteriormente, el primer paso del procesado de imágenes en visión artificial es la captura de imágenes. El proceso de captura de una imagen consiste en que un objeto con algún tipo de iluminación sea captado por un sensor. En la figura 2 se puede observar un ejemplo del caso clásico de la toma de imagen. Para esta fase, diversos factores deben tomarse en cuenta para que la imagen logre retratar las características más importantes del objeto a segmentar. Los factores están divididos en los componentes que componen un sistema de visión artificial, los cuales son la cámara, la iluminación y los lentes.

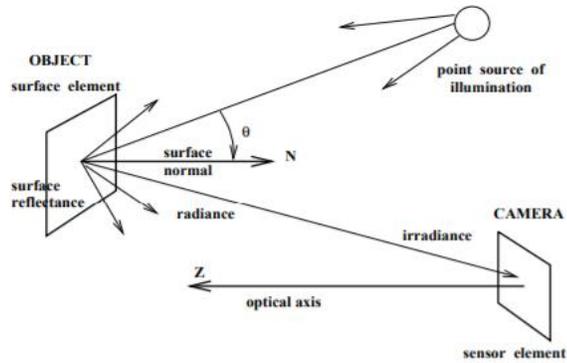


Figura 2. Ejemplo de captura de una imagen.

**Fuente:** Shapiro y Stockman. Reflexión de la radiación recibida por una fuente de iluminación.

La cámara es el dispositivo que producirá la imagen digital. Esta contiene el sensor de imagen, algún tipo de comunicación con otros elementos (por ejemplo, comunicación con un ordenador) y también tiene la función de controlar los parámetros configurables del proceso de captura de imagen [18]. También, [15] definen una cámara como el dispositivo que construye una imagen sobre el plano del sensor compuesto de elementos fotosensibles, la digitaliza y la transmite hacia el procesador. En la actualidad, los sensores utilizados comúnmente en las cámaras usadas para sistemas de visión son los sensores de carga acoplada o CCD por sus siglas en inglés y los CMOS. Estos últimos son utilizados cuando se ocupa un bajo consumo de energía o en espacios reducidos. El problema radica en que el nivel de ruido que estos producen es mayor al de su contraparte CCD, los cuales se recomiendan en aplicaciones donde la calidad de la imagen sea imperiosa [15]. En la actualidad, la mayoría de los dispositivos de captura cuentan con sensores CCD, por lo tanto, se enfocará la investigación más en estos. Vélez y otros (2003) definen que los sensores CCD están hechos de matrices de elementos fotosensibles donde la imagen a capturar estará situada. También hablan de que el área ocupada por estos elementos definirá la resolución espacial de la cámara utilizada. Los sensores CCD, al ser fotosensibles, lo único que recibirán será una cantidad de luz, por lo que su imagen no será a color. Para solucionar eso, en [14] se menciona que se cubre la retícula de celdas con filtros que sólo permiten el paso de las componentes RGB, donde se usan dos filtros de verde para simular la predisposición del ojo

humano a captar estos tonos. Los sensores también se presentan en dos formatos, en el lineal y el formato de área.

La iluminación en visión artificial es fundamental en el proceso de toma de imagen debido a que una iluminación no controlada dará imágenes con bajo contraste, reflexiones especulares, sombras y destellos [15]. Las técnicas de iluminación utilizados en los sistemas variarán del tipo de problema se intente resolver y del material del objeto a segmentar. Para lograr una iluminación adecuada, [19] habla de comparar diversas disposiciones de luz con respecto al objeto y la cámara. Las comparaciones mencionadas son: iluminación directa contra iluminación difusa, iluminación frontal contra iluminación trasera y los sistemas de campo oscuro contra los de campo claro. La primera comparación habla sobre la concentración de la luz en el objeto, donde la iluminación directa según [15] se trata de uno o varios puntos de luz los cuales estarán iluminando directamente el objeto, mientras que la luz difusa ilumina indirectamente el objeto. La comparación entre la iluminación frontal y trasera habla sobre la posición desde donde será iluminado el objeto comparado con la cámara. Con la frontal, la iluminación estará detrás de la cámara, mientras que, en la trasera, la iluminación estará al frente de esta, donde el objeto a iluminar estará entre estos elementos. Por último, se habla de la comparación entre los sistemas de campo oscuro, el cual se refiere a una iluminación donde el ángulo de incidencia es paralelo al objeto, haciendo que se resalte mejor la textura de la superficie del objeto [15], mientras que en el campo claro su ángulo de incidencia sea diferente al paralelo.

Aunque las cámaras por sí solas son suficientes para lograr capturar una imagen, la calidad de esta aumentará si se agrega a la cámara un conjunto de lentes, también llamada óptica [15]. Algunos ejemplos mencionados en [20] sobre los beneficios de una óptica son: uniformidad en la iluminación, disminución en tiempos de exposición, permitir configurar la relación entre distancias y el campo visual, consideración de la profundidad de campo y mejorar la nitidez de la imagen. Para configurar las relaciones de las distancias, [20] menciona los conceptos de distancia de trabajo y longitud focal y como estas se relacionan con el tamaño del sensor y el campo de visión. La distancia de trabajo se refiere a la distancia existente entre el objeto a medir hasta el centro del lente de la cámara. Por otra parte, la longitud focal, también llamado distancia focal, de una cámara se define como la distancia

entre el lente y el sensor de la cámara. Por otra parte, [15] comenta que la longitud focal también determinará el ángulo de visión, como se puede ver gráficamente en la figura 3.

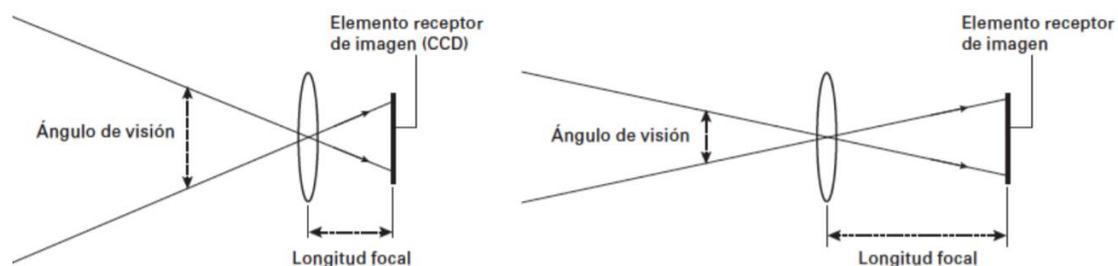


Figura 3. Comparación entre distancia focal y el ángulo de visión del sensor.

**Fuente:** Crespo. Tema 4: Ópticas y lentes.

Como se mencionó anteriormente, las ópticas son un conjunto de lentes, lo que provoca que ocurran diferentes aberraciones cuando una imagen es capturada. Un ejemplo de estas son las aberraciones cromáticas, las cuales son producidas debido a que los grosores de los lentes no son despreciables. Este tipo de aberración sucede porque el índice de refracción es diferente para las diferentes longitudes de onda (colores) que pasarán por el lente para llegar al sensor, haciendo que en los bordes de las imágenes se observen bandas de colores [14]. Otro tipo de aberraciones presentes en la toma de imágenes son las distorsiones espaciales, las cuales según [20] se dividen en dos tipos: distorsión tipo almohadilla y la distorsión tipo barril. Estas distorsiones son provocadas por la diferencia del grosor del lente a lo largo del lente, haciendo que los rayos no atraviesen los lentes de manera homogénea. La figura 4 ilustra la diferencia entre la distorsión de almohadilla y distorsión de barril comparado con una imagen sin distorsionar.

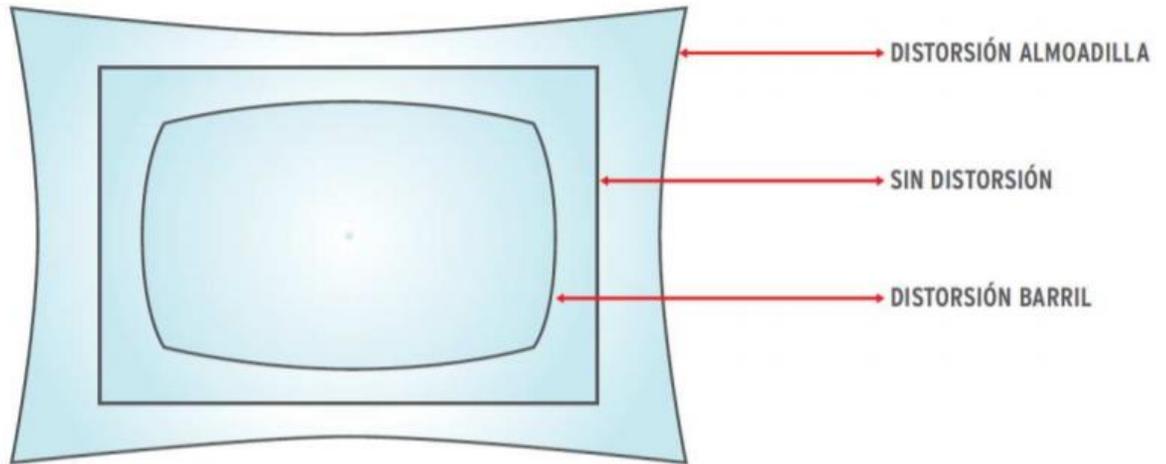


Figura 4. Distorsión de almohadilla y barril de un rectángulo.

**Fuente:** Crespo. Tema 4: Ópticas y lentes.

Con el concepto de longitud focal y distancia de trabajo definidas, en la ecuación 1 se puede observar la relación entre estos conceptos con el campo de visión y el tamaño del sensor.

$$\frac{\text{Distancia de trabajo}}{\text{Campo de visión}} = \frac{\text{Longitud focal}}{\text{Tamaño sensor}} \quad (2.1)$$

## 2.3 Micrometría

### 2.3.1 Definición

Según lo estipulado por [21], la micrometría es la técnica que permite medir objetos microscópicos. Ampliando esta definición, [22] habla que la micrometría está basada también en principios físicos.

### 2.3.2 Medición láser por interferometría

Según [23], para realizar mediciones por interferometría usualmente se necesita una configuración óptica donde dos rayos que viajen por diferentes caminos lleguen a interferir uno con el otro. Uno de estos caminos será el camino de referencia mientras que el otro será el camino de medición. Los dos métodos más utilizados para obtener dos rayos de una sola fuente son la división por frente de onda y la división por amplitud.

La división por frente de onda, como lo define [23], utiliza aperturas para poder lograr la división de los dos rayos. Dentro de esta división, se formarán franjas de interferencia donde los dos rayos reflejados se intersequen. Para evitar que estas zonas interfieran con la división del rayo, se pondrá una pantalla que será la que divida los dos rayos creados. El interferómetro de Rayleigh es un ejemplo del uso de esta técnica para realizar una medición. El funcionamiento de éste se basa en la división de los dos rayos los cuales después se intersecarán en otro punto. El patrón de interferencia que se produzca de la intersección será el parámetro por medir.

El segundo método es la división por amplitud, el cual el rayo se divide por medio de diferentes elementos ópticos. Uno de los elementos utilizados es una placa transparente la cual está recubierta con una capa parcialmente reflectiva, lo cual hace que la mitad del haz de luz se refleje y la otra mitad pase a través del lente. También, la capa parcialmente reflectiva podrá ser utilizada en un prisma, haciendo que el haz de luz se divida en tres secciones. Otro tipo de material utilizado es un prisma polarizado, el cual provocará que cuando el haz de luz lo atraviere, este se divida en dos rayos refractados. En la figura 5, se verá la ejemplificación de estos métodos [23]. Un ejemplo aplicado para la división por amplitud es el del interferómetro de Michelson, donde la medición del objeto, al igual que en el interferómetro de Rayleigh, se basará en el patrón de la interferencia entre el rayo base y el rayo de medición.

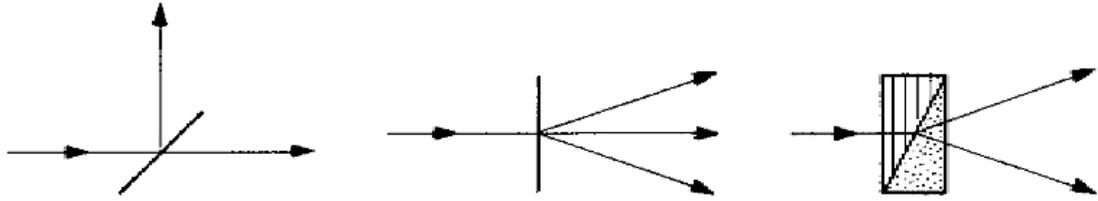


Figura 5. Tipos de división por amplitud.

**Fuente:** Hariharan. Basics of interferometry.

### 2.3.3 Medición mecánica, el micrómetro

El micrómetro, según [24] es un aparato de medida cuyo funcionamiento está basado en el tornillo micrométrico, el cual es un tornillo cuya rosca consiste en un paso de 0.5 mm, lo cual significa que con una vuelta completa del tornillo se realizará un desplazamiento de 0,5 mm. Este instrumento está diseñado para realizar mediciones con una precisión de 0.01 mm. Este instrumento está formado por el tornillo, una regla fija, un tambor cilíndrico que gira alrededor de la regla y un embrague utilizado para cambiar entre un movimiento milimétrico y un movimiento que cubra más espacio. En la figura 6 se puede observar la forma que tiene este instrumento.

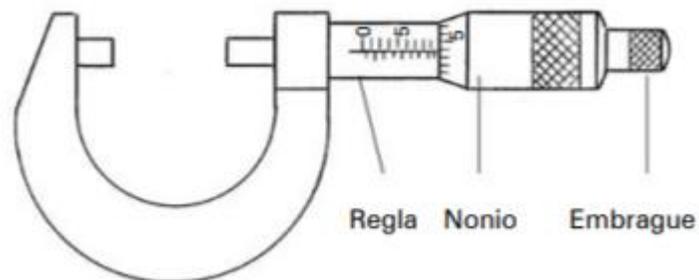


Figura 6. Forma de micrómetro.

**Fuente:** Millán. Procedimientos de mecanizado.

## Capítulo 3: Metodología

Para este proyecto, se seguirá el proceso de diseño de ingeniería descrito por [2], donde en la figura 7 se muestra la ruta a seguir para el desarrollo de un producto.



Figura 7. Proceso de desarrollo de un producto.

**Fuente:** Ulrich y Eppinger. Proceso de desarrollo del producto.

En este proceso, se deberá de recopilar las necesidades de los investigadores del laboratorio, para así poder desglosar el problema a tratar. Con las necesidades obtenidas, se procederá a realizar propuestas de varios diseños las cuales se evaluarán por medio de ventajas y desventajas para lograr llegar a un diseño ganador.

### 3.1 Estado actual de fabricación

El proceso de manufactura actual del microfilamento se divide en cuatro partes, las cuales son la extrusión del PCL, el enfriamiento del material, el estirado del filamento y recolección en carruchas. En la figura 8 se encuentra la maquinaria utilizada para la fabricación de los microfilamentos. Para su primera etapa, la extrusión del PCL se realiza con una extrusora marca “Filabot” y modelo “Ex2”. En ésta, se introduce el material de PCL en forma de pellets, los cuales son pequeñas unidades con forma ovalada. Estos pellets son calentados hasta el punto de fusión donde por medio de un tornillo sin fin, el material en estado líquido será extruido por medio de una boquilla de 1 mm de apertura. Para la parte de enfriamiento, el filamento pasará por la zona azul donde el hilo será enfriado por medio de agua. Seguidamente, el filamento será extruido por medio de una máquina de arrastre, la cual realizará también la recolección del hilo en carruchas. El mecanismo actual funciona por medio de diferencias de velocidades, la cual será encontrada entre los rodillos y la carrucha.

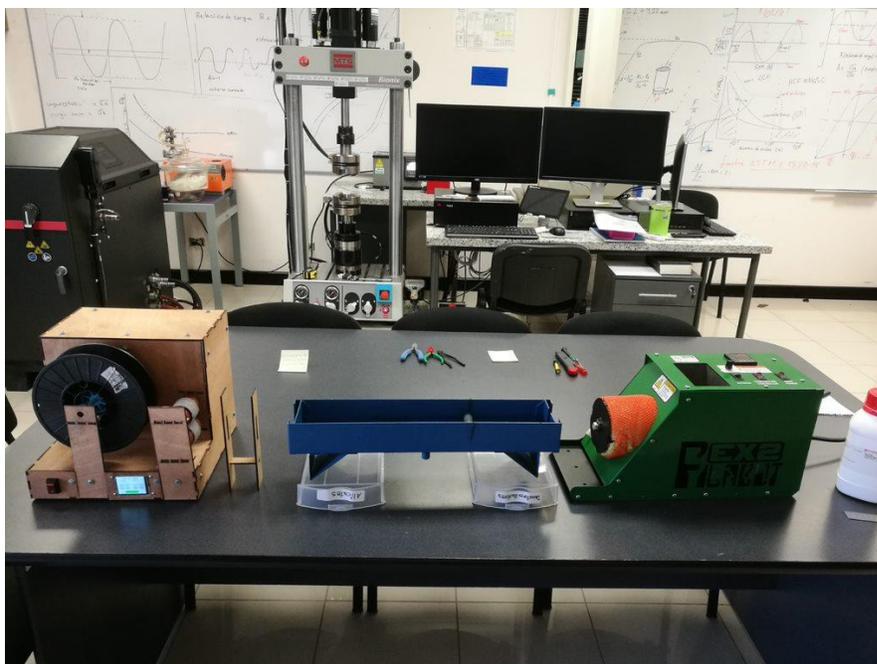


Figura 8. Maquinaria para manufactura del filamento.

**Fuente:** Rojas, L (2018) Desarrollo de un Sistema de Estudios In-Vitro adaptable en equipo de Pruebas Dinámicas [Imagen] Reimpresión autorizada

Evaluando el proceso actual, se encuentra que las desventajas que posee el sistema son mayores a las ventajas encontradas. La ventaja del sistema actual radica en que se logra realizar una fabricación y estirado del filamento. El resultado al final del proceso será un hilo extruido que podrá ser transportado. Aparte de esto, el proceso actual tiene los medios para lograr manufacturar el filamento con el diámetro requerido.

En contraste a estas ventajas, se encuentra que este sistema no posee ninguna comprobación que el hilo producido tenga el diámetro que se necesita. Aunque el hilo logre tener el diámetro necesario, éste no será verificado hasta que se tomen muestras, haciendo que haya la posibilidad que el sistema no cumpla con su propósito. También, la máquina al estirar el hilo por medio de diferencia de velocidades, los investigadores para realizar el estirado deben de introducir la relación de las velocidades y al esto no ser una medida exacta, siempre habrá variaciones entre los lotes de filamento, haciendo que los resultados con la interacción de las células siempre varíen, afectando los resultados del experimento original.

Por la relación desfavorable del sistema original, se plantea la incorporación de un sistema de medición dentro del proceso de manufacturado del hilo, para garantizar la uniformidad en los resultados de [1].

### 3.2 Requerimientos

Para compilar las necesidades de los investigadores, se les realizaron entrevistas tanto a los investigadores de [1] como a profesionales en el área de metrología. De la tabla 1 a la 3 se observarán las necesidades expuestas por los entrevistados.

Tabla 1. Necesidades expresadas por Laura Rojas Rojas

Enunciado del cliente	Necesidad interpretada
Hacer que el diámetro del filamento disminuya.	El sistema deber ser capaz de realizar la medición del material extruido.
El sistema deber ser robusto, o sea se debe poder mover sin que nada se suelte, mueva o rompa.	El sistema debe ser capaz de cambiar su lugar sin comprometer su integridad ni su funcionamiento.
El exterior de la maquina no es muy agradable ni invita a usarse.	El sistema debe ser atractivo a la vista del personal del laboratorio
El mecanismo debe poder levantarse sin problemas y sin esfuerzos innecesarios.	El sistema mecatrónico junto con el sistema de control y medición deben de cumplir con las normas de seguridad ocupacional referentes al peso.
Es necesario poder usarlo en una mesa del laboratorio sin que sea incómodo y sin miedo que se caiga.	Las dimensiones del sistema mecatrónico junto con el sistema de medición no deberán de exceder las medidas de la mesa del laboratorio.
Es importante que no emita ruidos molestos. Ejemplo: pitidos o sonidos de tuercas sueltas.	El sistema mecatrónico junto con el sistema de control y medición deben de cumplir con las normas de seguridad ocupacional referentes al ruido.
Para las pruebas inoculares es bueno que los filamentos sean caracterizados en sus dimensiones.	El sistema deberá realizar medición de los filamentos de manera precisa y exacta.
Debe ser alimentado conectado a un tomacorriente.	El sistema deberá funcionar con la corriente de la red del laboratorio.
El filamento en general tiene un punto de fusión bajo de 60C y sus características mecánicas son muy susceptibles a calor y temperatura.	El sistema no deberá de emitir el calor suficiente para que el filamento se vea comprometido.

Se cuenta con un presupuesto de ₡ 250000 colones para realizar el prototipo.	El sistema final debe tener un costo inferior al presupuesto dado.
--	--

Tabla 2. Necesidades expresadas por Jose Lizano Artavia

Enunciado del cliente	Necesidad interpretada
Debe tener una buena resolución para poder medir el filamento.	El sistema deberá ser capaz de realizar la medición del material extruido.
El filamento debe ser medido en su totalidad.	El sistema debe lograr una medición continua del filamento.
El sistema debe ser compacto.	El sistema debe ocupar el menor espacio posible dentro del sistema mecatrónico.
Debe ser acoplable al sistema mecatrónico.	El sistema de control debe funcionar dentro del sistema mecatrónico físicamente, así como que los datos medidos puedan ser utilizados por el sistema mecatrónico.
Debe funcionar con la misma tensión que el sistema mecatrónico.	El sistema de control y medición deberá de ser alimentado por el sistema de potencia del sistema mecatrónico.
Se requiere que las mediciones puedan ser calibrables.	El sistema debe poder ser calibrado.

Tabla 3. Necesidades expresadas por Leonardo Rojas Rapso

Enunciado del cliente	Necesidad interpretada
El sistema debe de ser capaz de medir el PCL con un diámetro de manera precisa y exacta.	El sistema deberá ser capaz de realizar la medición del material extruido.
El sistema debe lograr medir el filamento sin comprometer la integridad de este.	El sistema deberá de realizar la medición del filamento sin cambiar las propiedades físicas y dimensiones del material.
El sistema debe de ser lo más económico posible.	El sistema final debe tener un costo inferior al presupuesto dado.
Las mediciones realizadas por el sistema deben ser certificables y verificables.	El sistema deberá de poder verificar la precisión de las mediciones obtenidas.
El sistema puede ser controlado durante el tiempo.	El sistema debe poder ser calibrado.

Observando las necesidades enlistadas, se procede a realizar la lista con todas las necesidades encontradas junto con la prioridad que estas tendrán, donde las necesidades que resultan ser cruciales para el funcionamiento del sistema tendrán un valor de 5; las necesidades que en su ausencia afectarían en gran medida la operabilidad del sistema, un

valor de 4; las necesidades que en su ausencia afectarían considerablemente el funcionamiento, un valor de 3; las necesidades que en su ausencia afectarían mínimamente el funcionamiento del sistema, un 2 y aquellas necesidades que no afecten el funcionamiento tendrán un valor de 1.

Tabla 4. Lista total de necesidades

Necesidad número	Necesidad encontrada	Prioridad de necesidad
1	El sistema deberá ser capaz de realizar la medición del material extruido.	5
2	El sistema debe ser capaz de cambiar su lugar sin comprometer su integridad ni su funcionamiento.	3
3	El sistema debe ser vistoso a la vista del personal del laboratorio	1
4	El sistema mecatrónico junto con el sistema de control y medición deben de cumplir con las normas de seguridad ocupacional referentes al peso.	3
5	Las dimensiones del sistema mecatrónico junto con el sistema de medición no deberán de exceder las medidas de la mesa del laboratorio.	4
6	El sistema mecatrónico junto con el sistema de control y medición deben de cumplir con las normas de seguridad ocupacional referentes al ruido.	3
7	El sistema deberá realizar medición de los filamentos de manera precisa y exacta.	5
8	El sistema deberá funcionar con la corriente de la red del laboratorio.	4
9	El sistema no deberá de emitir el calor suficiente para que el filamento se vea comprometido.	5
10	El sistema final debe tener un costo inferior al presupuesto dado.	5
11	El sistema debe lograr una medición continua del filamento.	4
12	Se ocupa que el sistema ocupe el menor espacio posible dentro del sistema mecatrónico.	3
13	Se ocupa que el sistema de control pueda funcionar dentro del sistema mecatrónico físicamente, así como que los datos medidos puedan ser utilizados por el sistema mecatrónico.	4
14	El sistema de control y medición deberá de ser alimentado por el sistema de potencia del sistema mecatrónico.	4

15	El sistema debe poder ser calibrado.	5
16	El sistema deberá de realizar la medición del filamento sin cambiar las propiedades físicas y dimensiones del material.	3
17	El sistema deberá de poder verificar la precisión de las mediciones obtenidas.	4

Con las necesidades enlistadas y clasificadas por importancia, se procederá a realizar las especificaciones del sistema de control.

Tabla 5. Especificaciones sobre sistema de control y sistema de medición.

Núm. de necesidad	Especificación	Importancia	Unidades	Valor Marginal	Valor Ideal
1, 7, 15	Medición del filamento	5	mm	0.1	0.08-0.07
2	Atenuación de vibraciones	3	Hz	10	5
2	Robustez mecánica	3	kN	100	50
3	Apariencia del sistema	1	Subjetivo	3.5	3.7-5
4	Masa	3	kg	10	< 5
5	Dimensiones en conjunto con sistema mecatrónico	4	m	1 x 2	0.5 x 0.5
6	Ruido producido por el sistema	3	dB	70	30-45
8	Alimentación eléctrica junto con sistema mecatrónico	4	V	240	120-240
9	Calentamiento del sistema	5	°C	50	30-40
10	Precio del sistema	5	€	250 000	< 175 000
11	Frecuencia de toma de medidas del filamento	4	Hz	24	30-35
12, 13	Dimensiones	4	cm	20 x 20	10 x 10
13	Medios de comunicación con sistema mecatrónico	4	NA	1	3
14	Alimentación eléctrica	4	V	5.5	5
15, 17	Calibración del sistema	4	meses	12	6
16	Fuerza aplicada en la medición filamento	3	N	15	0
17	Desviación estándar	5	mm	0.02	0.01

### 3.3 Propuestas de solución

En el capítulo 2, se proponen las opciones posibles para realizar la medición micrométrica del filamento del PCL. En esta sección, se describirá la manera en que se utilizarán los instrumentos para la medición y control del sistema mecatrónico. Los sistemas de medición a revisar serán:

- Medición mecánica con micrómetro.
- Medición láser por interferometría.
- Medición por sistema de visión.

#### 3.3.1 Propuesta 1

Para la medición del hilo, la primera propuesta se centrará en el uso de un micrómetro digital, el cual enviará los datos obtenidos por medio de comunicación serial al microcontrolador donde se estará realizando el control del sistema mecatrónico que realizará la disminución del diámetro del PCL. Para esta medición, se estará realizando el procedimiento cada tres centímetros, donde dependiendo del resultado observado se realizará un ajuste en los parámetros de control para que pueda aumentarse o disminuirse el diámetro del filamento. Por esta razón, para la medición el sistema de disminución de diámetro deberá de detenerse cada vez que realiza una medición. Una variante que se puede realizar de la primera propuesta sería utilizar un micrómetro totalmente mecánico, donde para ingresar los datos, se deberá de introducir los valores encontrados de manera manual al controlador de disminución de hilo. Al igual que su homólogo digital, para la medición del filamento el sistema deberá de estar detenido.

Las ventajas de este sistema se pueden evidenciar en el precio, debido a que según [25], el costo de los micrómetros digitales empieza desde los 140 000 colones en adelante, mientras que los manuales su costo comienza desde los 46 000 colones. Por esta razón, se observa que este sistema de medición se presenta como un sistema accesible y fácil de conseguir localmente. Otra ventaja que presenta este sistema es su uso en el espacio del

sistema mecatrónico, donde el micrómetro se podría colocar en cualquier zona del proceso de disminución de diámetro, dándole versatilidad a la hora de realizar la medición.

Conforme a las desventajas presentes en este sistema, la medida realizada sobre el PCL se verá afectada por el micrómetro. Por la forma en que está diseñado el micrómetro, para poder tomar la medida del hilo este debe de presionarlo, por lo que estará ejerciendo una fuerza de aplastamiento sobre el hilo, modificando así su diámetro y su circularidad. Otro problema presente utilizando este método es la detención de la máquina al realizar la medición. Al realizar el reinicio del proceso de disminución, el filamento se verá afectado, haciendo que pueda poseer tanto diferentes diámetros como bultos de nuevo en su longitud, haciendo que el proceso realizado no sea ni preciso ni exacto.

### 3.3.2 Propuesta 2

La segunda propuesta se basará en el uso de mediciones láser por el principio de interferometría. Las mediciones realizadas serán enviadas al microcontrolador donde se realizará el control automático de la disminución del diámetro del PCL. El medidor láser se colocará al final del proceso de estirado, donde se medirá el diámetro del filamento antes de ser recolectado.

Las ventajas propuestas para este sistema son bastantes, entre estas, la precisión de sus mediciones. Gracias a que la medición es realizada por un fenómeno óptico, el interferómetro puede realizar mediciones en el rango de los nanómetros. Por esta razón, esta propuesta se considera como el sistema que otorgará más precisa y exacta de los tres sistemas a evaluar. Otra ventaja encontrada en estos sistemas es la cantidad de datos que el sistema de control recibirá del de medición. Debido a que se pueden realizar mediciones mientras el hilo está en movimiento, se pueden realizar un sistema de control más preciso y con menos tiempo de estabilización y sobreimpulso.

Las desventajas que esta propuesta presenta se pueden resumir en dos áreas: en precio y espacio ocupado. La razón del precio se puede observar al buscar el costo de uno de estos sistemas. Al ser un sistema de medición muy preciso esto hace que su costo se vea afectado,

haciéndolo un sistema donde se contrasta el precio con la calidad de medición. Según [26], los precios más bajos de estos sistemas de medición rondan entre los 2000 y 2500 dólares. La segunda desventaja presente en el sistema de medición láser es la cantidad de espacio que este sistema puede ocupar dentro del sistema mecatrónico. A las medidas de los interferómetros más pequeños estar rondando entre los 20 centímetros de grosor, 25 centímetros de ancho y 60 centímetros de alto, haciendo que se deban de realizar ajustes en el diseño del sistema mecatrónico para que el filamento pueda pasar por la parte del sistema de medición.

### 3.3.3 Propuesta 3

En la tercera y última propuesta, se utilizaría un equipo de medición basado en visión artificial, donde el PCL pasará por la etapa de visión, para que sus datos después sean procesados para la realización del control automático. Aparte de la medición, también se plantea el uso de una cámara extra para observar la circularidad del filamento extruido. Este sistema se estaría colocando antes de la etapa de recolección, donde se observaría si el diámetro final en ese punto cumple con las especificaciones dadas por los investigadores o si por el contrario se deberá de ajustar el sistema para disminuir el diámetro obtenido.

Las ventajas encontradas en este sistema son variadas, debido a que el precio, tamaño y complejidad de estos sistemas variará dependiendo de la aplicación en que deban ser utilizados. Aun con las diferencias existentes entre diversos sistemas de visión hay una ventaja que siempre se puede observar, la cual es la capacidad de realizar la medición sin tener que parar la producción de hilo. Al utilizarse la captura de imágenes para lograr la medición, el filamento podrá seguir su proceso de manufactura sin tener que verse comprometido debido a un paro de la planta para la toma de mediciones. También, como se indicó anteriormente, Se puede encontrar diferentes cámaras y microcontroladores, haciendo que sea un sistema adaptable al problema a resolver, haciendo que sus diseños siempre se puedan hacer lo más baratos y eficientes posibles.

Las desventajas del sistema de visión se pueden hallar en el ensamblaje del sistema sobre el sistema mecatrónico. Debido a que la precisión de la medida se basará en la calidad

de la toma de imagen, las cámaras deberán estar lo más alineadas posibles, haciendo que la preparación para la captura de las imágenes sea complicada. Además, esta etapa de medición deberá de tener un espacio importante sobre el sistema de estirado, haciendo que también se deba de destinar una parte del sistema de estirado para realizar la medición del hilo.

### 3.4 Selección de solución

En la tabla 6, se encuentra un resumen detallando las ventajas y desventajas encontradas en las propuestas de sistemas de medición micrométricos.

Tabla 6. Resumen sobre propuestas

Número de propuesta	Ventajas	Desventajas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precio accesible.</li> <li>• Fácil acoplo al sistema mecatrónico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detención del proceso de estirado para realizar la medición.</li> <li>• Cambio en el diámetro y forma del hilo debido a la medición.</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precisión nanométrica.</li> <li>• Gran capacidad de toma de datos.</li> <li>• No afecta la integridad del hilo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precio</li> <li>• Espacio a ocupar en sistema de estirado.</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precio.</li> <li>• No afecta la integridad del hilo.</li> <li>• Sistema adaptable a nuevas necesidades.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espacio a ocupar en sistema de estirado.</li> <li>• Complejidad de preparación para medición.</li> </ul>

Observando las especificaciones, se procede a realizar tablas evaluando cada propuesta en contra de las especificaciones encontradas. De la tabla 7 a la 9 se encontrarán los resultados de las evaluaciones realizadas, donde 5 cumple la especificación en su rango ideal, la calificación de 4 a 3 se dará a aquellas especificaciones que se encuentran entre el rango ideal y la especificación marginal, 2 será que llega a cumplir justo la especificación marginal y el 1 será si excede la especificación marginal. El resultado de 0 se dará si la

especificación no aplica para esta propuesta. El apartado de apariencia fue definido en conjunto con los encargados de [1].

Tabla 7. Evaluación de medición mecánica.

Especificación	Importancia	Evaluación	Total
Medición del filamento	5	5	25
Atenuación de vibraciones	3	0	0
Robustez mecánica	3	4	12
Apariencia del sistema	1	2	2
Masa	3	5	15
Dimensiones en conjunto con sistema mecatrónico	4	5	20
Ruido producido por el sistema	3	5	15
Alimentación eléctrica junto con sistema mecatrónico	4	5	20
Calentamiento del sistema	5	3	15
Precio del sistema	5	5	25
Frecuencia de toma de medidas del filamento	4	1	4
Dimensiones	4	5	20
Medios de comunicación con sistema mecatrónico	4	1	4
Alimentación eléctrica	4	0	0
Calibración del sistema	4	5	20
Fuerza aplicada en la medición filamento	3	2	6
Desviación estándar	5	5	25
Total			228

Tabla 8. Evaluación de medición láser.

Especificación	Importancia	Evaluación	Total
Medición del filamento	5	5	25
Atenuación de vibraciones	3	5	15
Robustez mecánica	3	4	12
Apariencia del sistema	1	4	4
Masa	3	4	12
Dimensiones en conjunto con sistema mecatrónico	4	3	12
Ruido producido por el sistema	3	5	15
Alimentación eléctrica junto con sistema mecatrónico	4	5	20
Calentamiento del sistema	5	5	25
Precio del sistema	5	1	5
Frecuencia de toma de medidas del filamento	4	5	20
Dimensiones	4	4	16

Medios de comunicación con sistema mecatrónico	4	5	20
Alimentación eléctrica	4	5	20
Calibración del sistema	4	5	20
Fuerza aplicada en la medición filamento	3	5	15
Desviación estándar	5	5	25
Total			281

Tabla 9. Evaluación de medición por visión artificial.

Especificación	Importancia	Evaluación	Total
Medición del filamento	5	5	25
Atenuación de vibraciones	3	5	15
Robustez mecánica	3	4	12
Apariencia del sistema	1	4	4
Masa	3	4	12
Dimensiones en conjunto con sistema mecatrónico	4	4	16
Ruido producido por el sistema	3	5	15
Alimentación eléctrica junto con sistema mecatrónico	4	5	20
Calentamiento del sistema	5	5	25
Precio del sistema	5	5	25
Frecuencia de toma de medidas del filamento	4	5	20
Dimensiones	4	4	16
Medios de comunicación con sistema mecatrónico	4	5	20
Alimentación eléctrica	4	5	20
Calibración del sistema	4	5	20
Fuerza aplicada en la medición filamento	3	5	15
Desviación estándar	5	2	10
Total			290

Observando las calificaciones de los sistemas, se demuestra que el sistema de visión artificial será la propuesta más adecuada para ser utilizada para la medición del filamento.

## Capítulo 4: Propuesta de Diseño

### 4.1 Selección de componentes

Los componentes de un sistema de visión pueden ser divididos en dos grandes ámbitos, en la cámara y la computadora o microcontrolador que realizará el proceso. Para la selección de cámara, se seleccionaron modelos con un valor máximo de 250 dólares, lo cual se traduce en aproximadamente 130 000 colones. En la tabla 10 se podrán apreciar las ventajas y desventajas encontradas para los modelos de cámara propuestos.

Tabla 10. Ventajas y desventajas de cámaras.

Modelos de cámaras	Ventajas	Desventajas
Visión Datum EX1400CPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resolución de 4608x3288</li> <li>• Utilizada ampliamente en la industria.</li> <li>• Lentes intercambiables, capacidad de cambiar el aumento de lentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precio alto</li> <li>• Baja cantidad de fps (3 según [27]).</li> <li>• Lentes extra aumenta su precio.</li> </ul>
Arducam Raspberry Pi Camera	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lentes intercambiables, capacidad de cambiar el aumento de lentes.</li> <li>• Máxima resolución de video de 1080 a 30 fps.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lentes extra aumenta su precio.</li> <li>• Solo puede ser utilizada en Raspberry.</li> </ul>
OpenMV Cam H7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precio cómodo.</li> <li>• Procesador integrado en la cámara</li> <li>• Lentes intercambiables, capacidad de cambiar el aumento de lentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja capacidad de procesamiento.</li> <li>• Lentes extra aumenta su precio.</li> <li>• Biblioteca de funciones incompleta.</li> </ul>

Observando las ventajas y desventajas de las cámaras propuestas, se determina que la cámara que se utilizará será la Arducam Raspberry Pi Camera. La escogencia de esta cámara se justifica al sopesar las diferentes desventajas presentes en las cámaras. Comenzando con las desventajas de la Datum, se encuentra que, según [27], su precio ronda por los \$220 sin tomar en cuenta el cobro del envío. Además, para realizar mediciones constantes, se necesita un mínimo de 24 fps, haciendo que no logre dar el mínimo de fps. Por otro lado, aunque en su máximo de fps se pueda cumplir con la especificación encontrada, el procesador integrado

de las OpenMV no es lo suficientemente capaz para lograr mantener esta cantidad de fps junto con el procesamiento total de las imágenes. Haciendo que la opción más viable para la cámara sea la Arducam Raspberry Pi Camera. También, al este tipo de cámaras solo funcionar con los microprocesadores de la marca Raspberry, se utilizará esta marca para realizar el procesamiento de las imágenes.

Para la selección de microcontrolador, se decidirá entre los dos modelos que son compatibles con esta cámara, las cuales son la Raspberry Pi 3 y la Raspberry Pi 4, donde según [28], por una diferencia no tan amplia en el precio, se observa una mejora en el procesador y la RAM de la placa, así como mejoras en las conexiones con dispositivos externos con los puertos USB 3.0. Por estas razones, el microcontrolador elegido para las cámaras será la Raspberry 4.

## 4.2 Diseño de sistema de visión

### 4.2.1 Requerimientos del sistema

Para diseñar el algoritmo que podrá medir el hilo, se deben de determinar los requerimientos que deberá tener la programación para que logre satisfacer las necesidades expresadas por los investigadores. Para la toma de medidas, se define que en el video aparecerán los diferentes tramos del hilo en movimiento. Así, al analizar el requerimiento de tiempo, se estipula que la velocidad de toma y procesamiento de las imágenes no debe ser menor a la velocidad que se estará moviendo el hilo, lo que implica que su velocidad mínima variará conforme con la tasa de disminución de diámetro del filamento. Por esta razón, se define 10 cuadros por segundo como la frecuencia mínima de toma de datos de la cámara.

Conforme al fondo y la manera de detectar el filamento, en la figura 9 se puede observar una matriz de PCL y su tamaño. Viendo que el filamento producido se observa con un color claro, el fondo a utilizar deberá ser de un fondo de una tonalidad oscura, para que de esta manera se pueda resaltar la diferencia el objeto a segmentar y el resto de la imagen.



Figura 9. Matriz de PCL comparado con regla.

**Fuente:** Rojas, L (2018) Desarrollo de un Sistema de Estudios In-Vitro adaptable en equipo de Pruebas Dinámicas [Imagen] Reimpresión autorizada

#### 4.2.2 Análisis de imagen

En la figura 10 se puede observar el histograma de una imagen donde solo se toma la matriz de la figura 9. La figura también fue pasada a escala de grises para un procesamiento de la imagen más eficiente. Observando el histograma, se aprecian dos zonas donde se acumulan los valores de las tonalidades de la imagen. La primera zona, en la cual se observa la mayor cantidad de conteo de píxeles, es donde se encuentran las tonalidades oscuras de la imagen, mientras que la segunda región se visualizan las tonalidades claras. Aunque la segunda zona no sea tan pronunciada como la primera, se puede definir claramente la diferencia entre ambas zonas, por lo que una separación por medio de segmentación binaria entre el filamento, objeto a procesar, y el fondo es posible.

Como la finalidad del procesamiento de las imágenes tomadas es la medición del diámetro, las partes más importantes del objeto a segmentar serán sus bordes. También, el hilo al tener un diámetro pequeño, la posición del lente jugará un papel importante para que se pueda realizar una medición con una incertidumbre que cumpla las especificaciones encontradas en la sección 3.1.

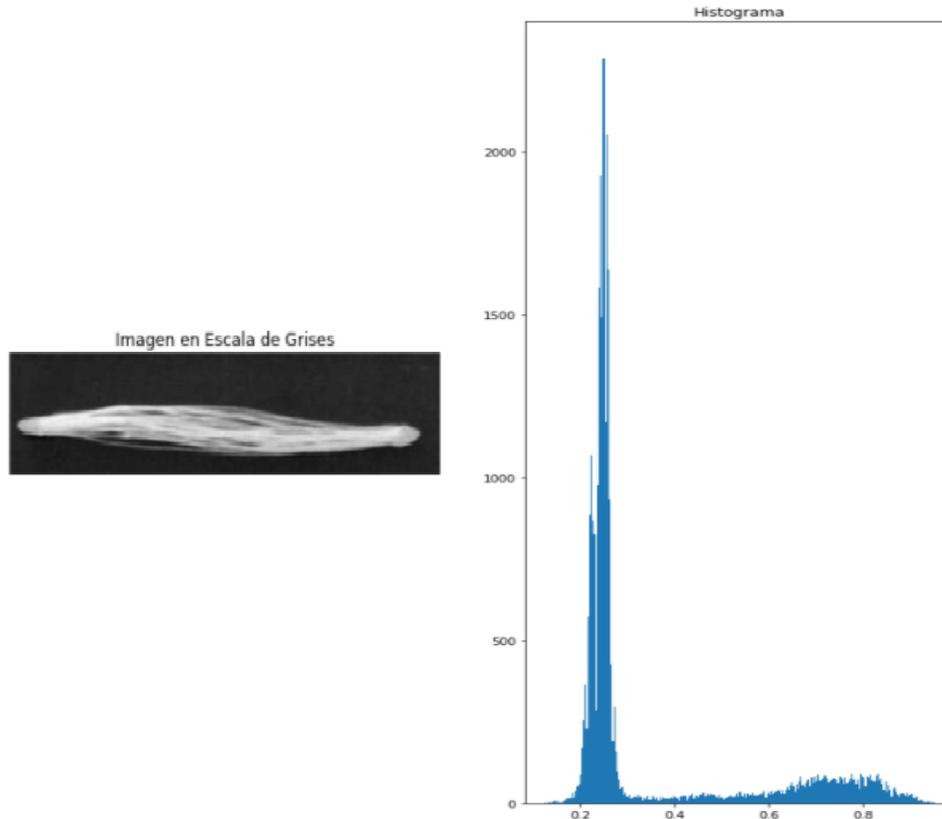


Figura 10. Histograma de matriz de PCL.

**Fuente:** Propia.

#### 4.2.3 Planteamiento de solución

Para realizar la medición de cualquier ítem, se debe de primero localizar los objetos a medir, después, se deberá poder segmentar los objetos a medir y por medio de conteo de píxeles lograr medir el ancho y el alto del elemento seleccionado. Después, esta medición deberá de poder ser enviada al microcontrolador que estará realizando el control del estirado del filamento.

Para la localización de los objetos, estos se pueden realizar de diversas maneras, ya sea sabiendo la forma de los elementos a medir o con la localización de los contornos de estos. Sabiendo si los objetos a segmentar tienen formas regulares y repetidas, se podrían procesar por medio de su forma, mientras que por medio de contornos se puede encontrar los

puntos medios del objeto y con eso realizar el procesamiento. En ambos resultados, la medición se realizará por el conteo de píxeles y teniendo una referencia, se procede realizar una regla de tres para lograr las medidas de ancho y largo. Como el objeto a medir tiene un diámetro en el rango de los micrómetros, el lente de la cámara debe de no tener un gran índice de aberraciones espaciales, como la distorsión de barril. Para evitar que estos errores causen un impacto tangible en las mediciones, el objeto a segmentar deberá de estar lo más centrado en la cámara, donde este tipo de distorsiones tienen un menor efecto en la imagen.

Para la comunicación con el microcontrolador de los motores, se compararon los tres tipos de protocolos de comunicación más usados, los cuales son UART, I2C y SPI. En la tabla 11 se enlistan las ventajas y desventajas de utilizar cada uno de los protocolos.

Tabla 11. Ventajas y desventajas de protocolos de comunicación.

Protocolo de comunicación	Ventajas	Desventajas
UART	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No ocupa timers.</li> <li>• Sencillo de operar y altamente documentado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmisión de datos pequeña (9 bits).</li> <li>• Baja velocidad de transmisión de datos</li> </ul>
I2C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Direccionamiento simple.</li> <li>• El costo y la complejidad son fijos al aumentar el número de dispositivos.</li> <li>• Buena comunicación con periféricos de velocidad lenta o media.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de transmisión de datos baja (comparado con SPI).</li> <li>• Mayor complejidad en el software de comunicación.</li> </ul>
SPI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altas velocidades de transmisión de datos.</li> <li>• Buena comunicación con periféricos de velocidad lenta o media.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre mayor componentes estén conectados, mayor dificultad de programación.</li> <li>• Necesita gran cantidad de puertos para funcionar (4)</li> </ul>

Para decantarse por un método de comunicación con otro, se consideran las desventajas de cada método. Como UART es un sistema que envía una cantidad de bits definidos y estos bits no son suficientes para enviar el diámetro al sistema mecatrónico, por lo que se descarta su uso. Por otro lado, aunque la velocidad de transmisión de datos del SPI

sea mayor al de I2C, la cantidad de pines que se ocupa para realizar la transmisión de datos en el SPI es el doble que en el I2C y sabiendo que el microcontrolador del sistema mecatrónico no tendrá tantos pines para utilizar, la comunicación I2C será la utilizada para enviar las dimensiones obtenidas del sistema de medición al microcontrolador encargado de los motores. Cabe destacar que, aunque se realizará el control del sistema mecatrónico, este control funcionará dentro del controlador de los motores, por lo que no estará junto al sistema de medición.

En la figura 11, se presenta el subsistema que formará la solución de la medición del filamento.

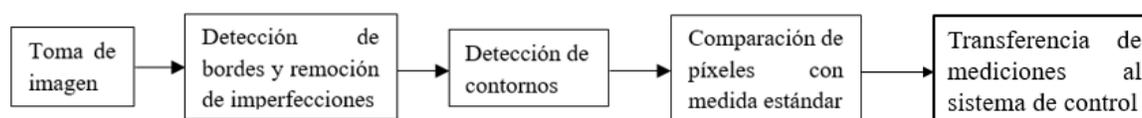


Figura 11. División de solución en subsistemas.

**Fuente:** Autor. Word

#### 4.2.4 Condición de toma de imagen

Para las pruebas de concepto, se realizaron pruebas para observar la diferencia de iluminaciones que se pueden utilizar sobre el objeto a medir. Para esto, se consideraron tres tipos de iluminación. La primera iluminación que se utiliza para observar el filamento es de tipo frontal. En ésta, se colocó una fuente de iluminación detrás de la cámara, haciendo que la mayor cantidad de iluminación pueda llegarle al hilo. Con los resultados de esta prueba se determinó que este tipo de iluminación sería descartada debido a que el fondo utilizado también se vería iluminado, haciendo que no se lograra distinguir de manera más precisa los bordes del objeto. Con esto, se realizaron después dos pruebas tanto con luz difusa proveniente del entorno donde se realizó la prueba y también posicionar la luz para que se cree un campo oscuro. La figura 12 detalla las diferencias entre ambas pruebas, siendo la prueba de iluminación difusa la de la izquierda y la prueba de iluminación de campo oscuro la derecha.

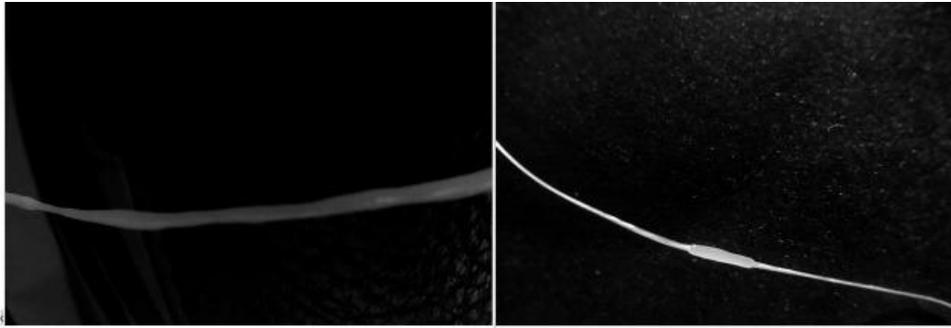


Figura 12. Diferencias iluminación difusa (izq.) y campo oscuro (der.)

**Fuente:** Propia. Python

Como se logra visualizar, los bordes del objeto en las imágenes se pueden distinguir mejor por medio de la iluminación de tipo campo oscuro debido a que el filamento al ser de un color transparente, al iluminarse de esta manera la luz por el efecto de refracción resaltará el color del hilo, haciendo que la imagen tenga una mejor definición y la medición tenga una mayor precisión.

#### 4.2.5 Metodología de procesamiento

Para el sistema de medición, la primera parte consta de inicializar la cámara y tomar cada imagen del video para así lograr el procesamiento de cada fotograma. En la figura 13 se observa un ejemplo de lo que se vería en la cámara, donde el rectángulo verde será el objeto a medir.

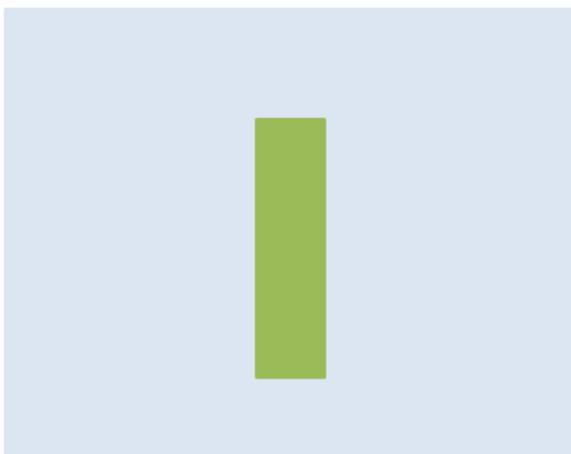


Figura 13. Representación del objeto a medir

**Fuente:** Autor. Elaboración propia.

Con esta imagen, se procede a preprocesar la imagen por medio de un filtro Gaussiano y a tomar los bordes de la figura a medir. Por medio de los bordes, se detectan los contornos de esta. En la figura 14 se puede observar los bordes de la figura 13.

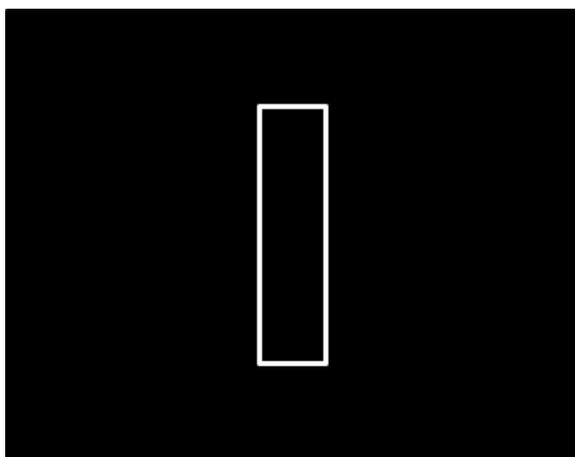


Figura 14. Representación de la detección de contornos.

**Fuente:** Autor. Elaboración propia

Con los contornos del objeto identificados, se toman las esquinas de la figura formando una caja, la cual será representada con el color azul. En la figura 15, se puede ver ejemplificado el proceso de la creación de la caja. Para una mejor representación visual, la caja se dibuja sobre la imagen original.

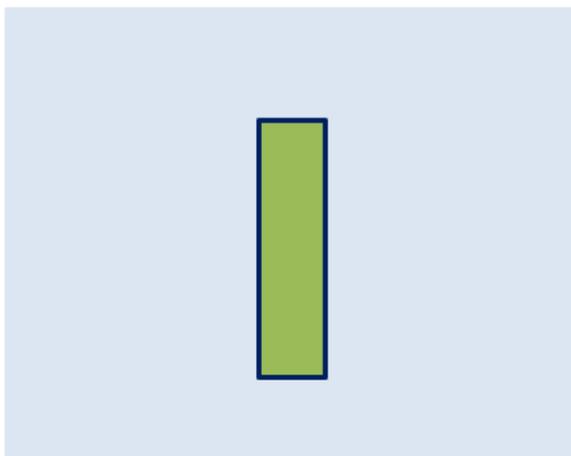


Figura 15. Representación de la caja envolvente del objeto a medir.

**Fuente:** Autor. Elaboración propia

Si la figura a medir fuera un círculo, igual se tendría un cuadrado alrededor de ella, como se muestra en la figura 16.

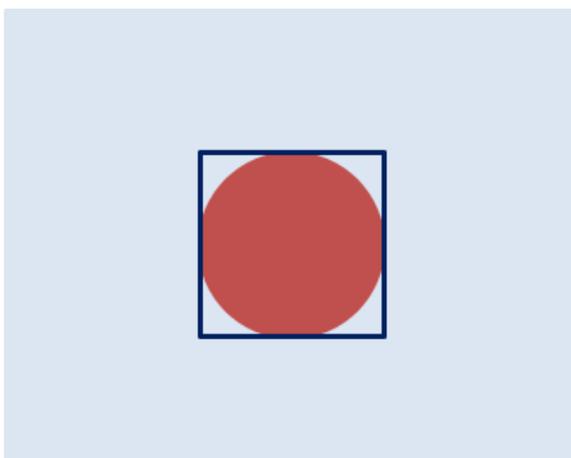


Figura 16. Representación de la caja envolvente de objeto circular.

**Fuente:** Autor. Elaboración propia

Con la caja sobre el objeto a medir, se toma el punto medio entre cada una de sus esquinas, dando así los puntos medios de cada uno de los lados de la figura cuadrangular. Visualmente, la figura 17 responde como se verían los puntos medios del rectángulo sobre la imagen original.

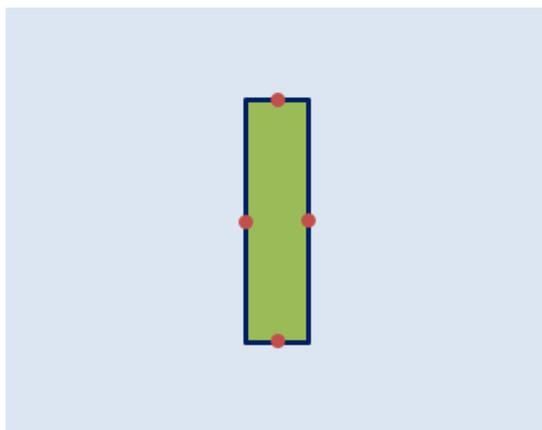


Figura 17. Representación de puntos medios en rectángulo.

**Fuente:** Autor. Elaboración propia

En los puntos medios, se computa la distancia entre los puntos intermedios de los lados opuestos, dando así el ancho y el largo del objeto. En la figura 18 se observa la medida del ancho del objeto.

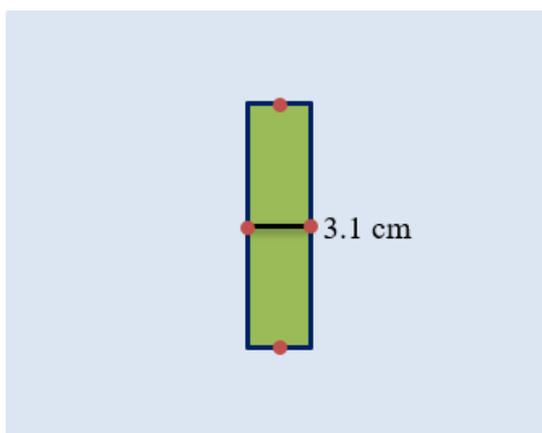


Figura 18. Representación de medida de rectángulo.

**Fuente:** Autor. Elaboración propia

Como el diámetro del filamento es la medida que se busca obtener, toma el ancho del objeto medido y se envía al microcontrolador de los motores para su uso en el control.

### 4.3 Diseño de sistema de control

Para el sistema de control, se realizó un modelado de manera matemática de la planta. Esta se realizó con la planta que fue diseñada junto con el sistema de medición. Al estar trabajando en la zona plástica del material, este modelo será solo una aproximación del modelo que se presentaría en la práctica.

#### 4.3.1 Modelado del filamento de PCL

Sabiendo que se utilizarán motores a pasos, la salida del sistema estará representada con el número de pasos necesarios para lograr llegar el hilo a cierto diámetro. Por otra parte, la entrada de la planta será el diámetro inicial del filamento, el cual deberá cambiar al final del proceso. Para lograr llegar al diámetro final, el hilo se deberá de deformar lo suficiente para cumplir con el diámetro final, por lo tanto, la fórmula de la deformación transversal será.

$$\delta_t(\varphi_i) = \varphi_f - \varphi_i \quad (4.1)$$

Donde  $\varphi_i$  será el diámetro inicial y  $\varphi_f$  será el diámetro final del PCL. La relación entre la deformación transversal y la deformación estará dada por el módulo de Poisson  $\nu$ , la cual está representada en la siguiente ecuación [29].

$$\nu = -\frac{\frac{\delta}{L}}{\frac{\delta_t(\varphi_i)}{\varphi_i}} \quad (4.2)$$

$$\nu = -\frac{\delta * \varphi_i}{L * \delta_t(\varphi_i)} \quad (4.3)$$

Donde  $\delta$  es la deformación longitudinal del filamento y L su longitud inicial. También, sabiendo que la deformación del filamento se trata de la distancia obtenida multiplicando el ángulo necesario para elongar el filamento al diámetro requerido por la distancia  $r$  entre el centro del eje del motor y el área de contacto con el filamento. Con esto, se podrá encontrar la variable de entrada del control del motor a pasos.

$$v = -\frac{r * \theta_m * \varphi_i}{L * \delta_t(\varphi_i)} \quad (4.4)$$

$$v = -\frac{r * \theta_m * \varphi_i}{L * (\varphi_f - \varphi_i)} \quad (4.5)$$

$$\theta_m = \frac{L * (\varphi_i - \varphi_f)}{r * v * \varphi_i} \quad (4.6)$$

$$\theta_m = \frac{L}{r * v} \left(1 - \frac{\varphi_f}{\varphi_i}\right) \quad (4.7)$$

#### 4.3.2 Modelado del motor a pasos

Para el modelado del motor a pasos, se utilizarán las ecuaciones listadas por [30] y [31]. Aunque [32] hable de que, para simplificar el análisis y modelado de la planta, obviando las pérdidas producidas por las corrientes de Eddy, así como las fuerzas electromotrices, [31] demuestra que el modelo dinámico realizado con estas ecuaciones muestra resultados realistas del comportamiento ante una carga de un motor a pasos. En la ecuación (4.8), se describirá la relación de la tensión ( $U_j$ ) y la corriente ( $i_j$ ) de la fase j del motor a pasos.

$$U_j = e_j + R * i_j(t) + L * \frac{di_j(t)}{dt} \quad (4.8)$$

Donde R y L son la resistencia y la inductancia por fase respectivamente y  $e_j$  se refiere a la fuerza electromotriz inducida en la fase j, el cual, para dos fases, puede ser expresado de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} e_1 &= -K_m * \omega_m * \text{sen}(n * \theta(t)) \\ e_2 &= K_m * \omega_m * \text{cos}(n * \theta(t)) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Donde  $\theta_{0j}$  es la localización inicial de la fase en el motor,  $n$  es el número de dientes del rotor y  $K_m$  es la constante par del rotor, la cual se puede expresar como [33].

$$K_m = \frac{K_T}{\sqrt{R}} \quad (4.10)$$

Donde  $K_T$  es la constante de torque. Juntando las ecuaciones (4.8), (4.9) y (4.10) se tendrán las relaciones entre las corrientes con su voltaje.

$$\begin{aligned} \frac{di_1(t)}{dt} &= \frac{1}{L} \left( U_1 + \frac{K_T}{\sqrt{R}} * \omega_m * \text{sen}(n * \theta(t)) - R * i_1(t) \right) \\ \frac{di_2(t)}{dt} &= \frac{1}{L} \left( U_2 - \frac{K_T}{\sqrt{R}} * \omega_m * \text{cos}(n * \theta(t)) - R * i_2(t) \right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Las ecuaciones mecánicas del motor podrán ser encontradas por medio de las ecuaciones de movimiento de este, dado como resultado:

$$\sum_{j=1}^N T_{mj} = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + \tau_f \quad (4.12)$$

Donde  $T$  es la sumatoria del torque producido por cada fase  $j$  del motor,  $J$  es su momento de inercia,  $B$  es su coeficiente de roce o amortiguamiento y  $\tau_f$  será el torque producido por la fricción de Coulomb o par de detención [34], el cual su fórmula será representada a continuación.

$$\tau_f = T_f * \text{sen}(2 * n * \theta(t)) \quad (4.13)$$

Donde  $T_f$  es la amplitud del torque de detención. También, los torques de las fases podrán ser representados por las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} T_{m_1} &= -K_m * i_1(t) * \text{sen}(n * \theta(t)) \\ T_{m_2} &= K_m * i_2(t) * \text{cos}(n * \theta(t)) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Sabiendo que el motor utilizado tiene dos fases, la ecuación de movimiento quedará de la siguiente manera.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left( \frac{K_T}{\sqrt{R}} * i_2(t) \cos(n * \theta(t)) - \frac{K_T}{\sqrt{R}} * i_1(t) \sin(n * \theta(t)) - B\omega_m - T_f \sin(2n * \theta(t)) \right) \quad (4.15)$$

Con estas ecuaciones, se procede a plantear las ecuaciones de estado del motor a pasos.

$$\begin{aligned} x_1 &= i_1 \\ x_2 &= i_2 \\ x_3 &= \theta \\ x_4 &= \omega_m \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{L} \left( U_1 + \frac{K_T}{\sqrt{R}} * x_4 * \sin(n * x_3) - R * x_1 \right) \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{L} \left( U_2 - \frac{K_T}{\sqrt{R}} * \omega_m * \cos(n * \theta(t)) - R * i_2(t) \right) \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{J} \left( \frac{K_T}{\sqrt{R}} * x_2 * \cos(n * x_3) - \frac{K_T}{\sqrt{R}} * x_1 * \sin(n * x_3) - Bx_4 - T_f * \sin(2n * x_3) \right) \end{aligned} \quad (4.17)$$

Con las ecuaciones de estado y utilizando las constantes de la tabla 12, se procede a realizar la simulación de la planta, con las ecuaciones de estado, donde se utilizarán varios pasos para observar la reacción del sistema. En la figura 19 se observará el resultado teórico obtenido. Las referencias de donde se obtuvieron los valores de los parámetros se observan en el anexo A.3.

Tabla 12. Parámetros de motor a pasos.

Parámetro del motor	Valor
Tensión (V)	4
Corriente (A)	1.2
Resistencia por fase ( $\Omega$ )	3.3
Inductancia por fase (mH)	2.8
Par de detención (Nm)	0,0196
Inercia del rotor ( $\text{kg m}^2$ )	$6.8 \times 10^{-6}$
Constante de torque (Nm/A) [35]	0.056

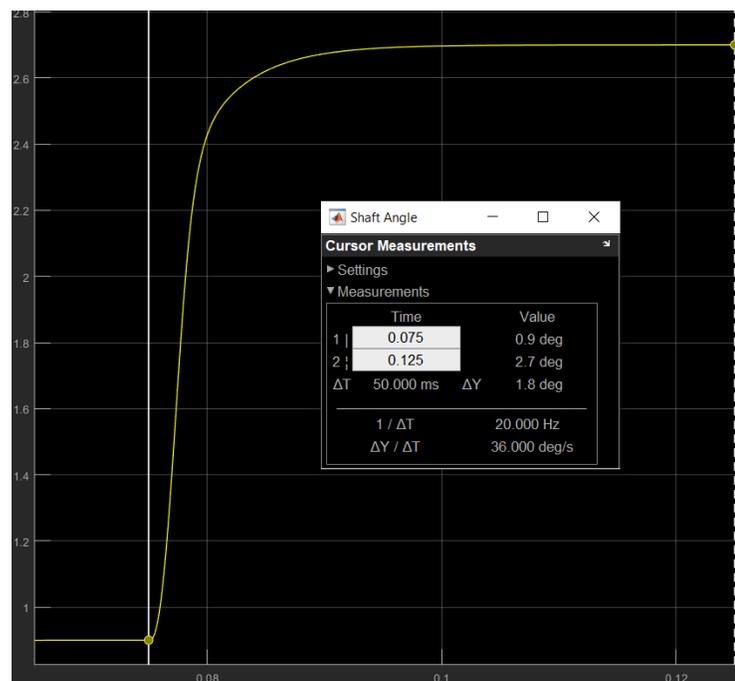


Figura 19. Simulación de motores a pasos.

**Fuente:** Autor. Matlab.

Como se puede observar en la figura 19, el paso de estos tipos de motor no provocará un sobreimpulso y su tiempo de estabilización al 90% se dará antes que empiece a cambiar de nuevo de ángulo, por lo que se considera que esta planta solo se le realizará el control PID para que el filamento alcance los diámetros requeridos.

### 4.3.3 Diseño de controlador

Para obtener la función del control proporcional del sistema, se tomarán los valores de T, L y K de la figura 19. De la figura 20 a la 21, se observan las medidas tomadas para realizar el control por el método de Ziegler-Nichols.



Figura 20. Valor de L para control de planta

**Fuente:** Autor. Matlab.

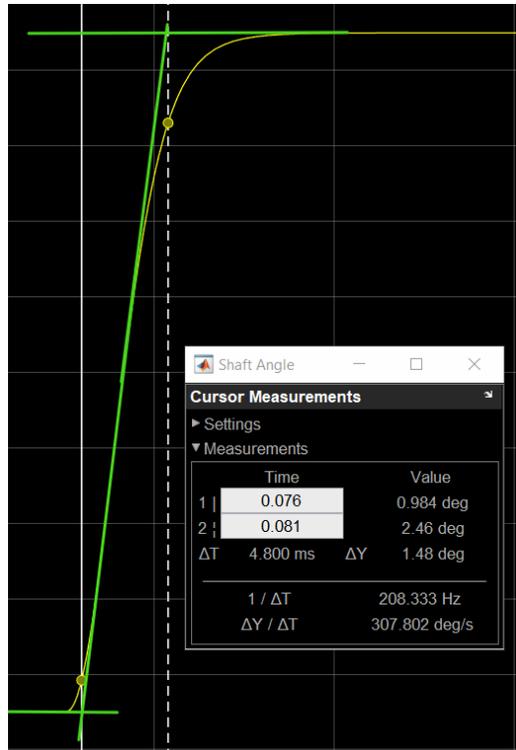


Figura 21. Valor de T para control de planta.

**Fuente:** Autor. Matlab.

Con estos valores y con K pudiendo ser obtenida desde la figura 19, se obtendrán los valores para las constantes del PID, los cuales quedarán evidenciados en la tabla 13.

Tabla 13. Valores de constantes del PID

Parámetro	Kp	Ti	Td
Fórmula	$\frac{1.2 * T}{K * L}$	$2 * L$	$0.5 * L$
Valor numérico	3.2	$2 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-4}$

Utilizando estos valores en el bloque de PID de Matlab, el sistema a probar se observa en la figura 22, mientras que su respuesta a un escalón se encontrará en la figura 23.

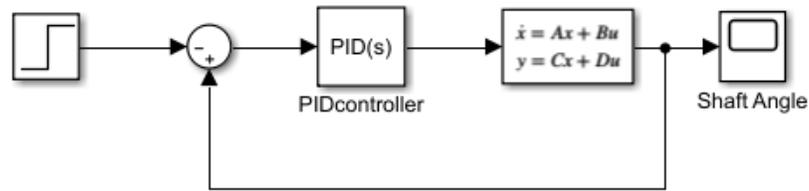


Figura 22. Planta junto con su control PID a lazo cerrado.

**Fuente:** Autor. Matlab.

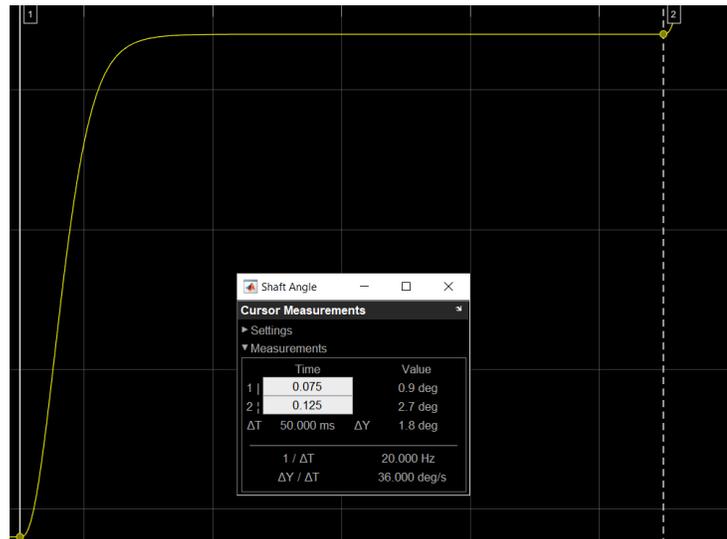


Figura 23. Respuesta al escalón del sistema con PID.

**Fuente:** Autor. Matlab.

En esta última figura, se denota un menor tiempo muerto, manteniendo la característica de no tener sobreimpulso, mejorando así la señal enviada a los motores.

## 4.4 Diseño de prototipo

En esta sección se desarrolla el diseño del prototipo del sistema de visión y el control del sistema mecatrónico. Como los componentes ocuparán un espacio en el sistema mecatrónico, se estará realizando este diseño en conjunto con este sistema.

### 4.4.1 Posición de la cámara en sistema mecatrónico

Para realizar la construcción del prototipo, se tomaron en cuenta los parámetros vistos en la sección 4.2. En esta, se obtiene el modelo de la cámara a utilizar, la iluminación y el fondo que se deberá tener. El primer paso para la creación del prototipo será acondicionar una zona dentro del sistema mecatrónico donde se pueda realizar la medición del filamento. Al hablar con personal de la LCM, se recomendó el uso de dos cámaras para asegurar la circularidad del filamento, pero como se observa en la figura 24, el diseño del sistema mecatrónico impide el uso de dos cámaras de medición, por lo que esta función no se puede implementar, aunque sea para el diseño actual.

Para asegurar una iluminación constante en todo momento, se decide hacer una zona cerrada donde estará la cámara y el filamento debe pasar lo más al centro de la cámara posible. El filamento debe de hacer esto para, como se mencionó anteriormente, evitar tener distorsiones de barril en la imagen y con esto afectar la medición.

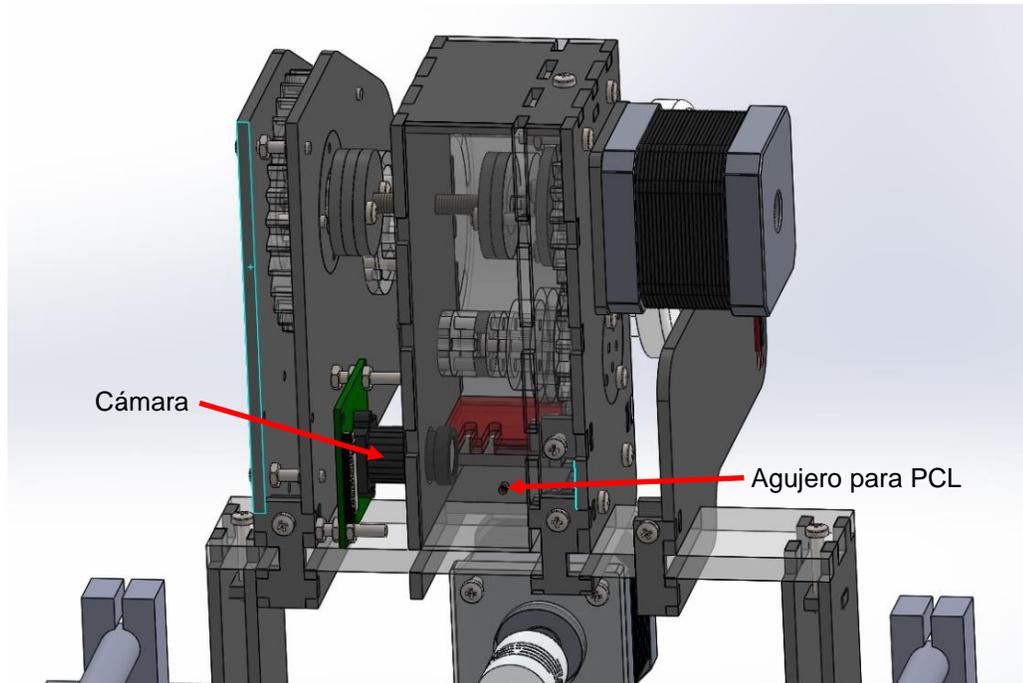


Figura 24. Simulación de zona de medición.

**Fuente:** Jose Lizano Artavia. SolidWorks.

Como se puede observar, la cámara fue agregada a la par de la zona móvil del sistema de elongación del material. La finalidad de esto es tener la cámara en un lugar cercano en donde la parte final del filamento se esté elongando, de esta manera asegurando que la totalidad del filamento ha llegado al diámetro indicado. La figura 25 muestra una mejor posición de donde pasaría el filamento y su posición con respecto a la cámara. En esta, se observa un agujero que pasa con las placas de color rojo, las cuales mantendrán el filamento en su lugar mientras es elongado. Por ende, el filamento pasará cercano a la mitad de la cámara, haciendo que se evite la distorsión de barril.

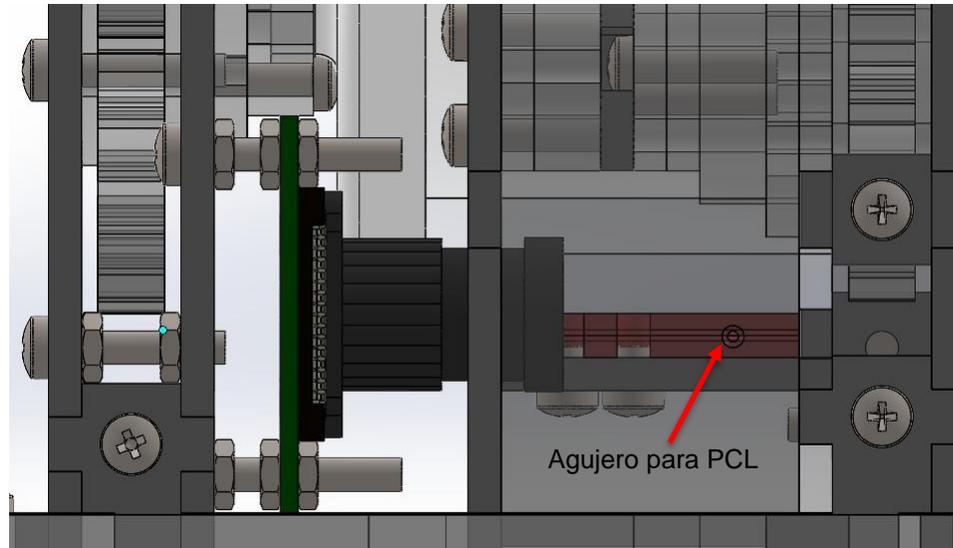


Figura 25. Vista frontal de zona de medición.

**Fuente:** J. Lizano. SolidWorks.

En la sección 4.2.4, se menciona que la iluminación que llega al filamento debe ser de campo oscuro, por lo que la iluminación debe estar colocada paralela al fondo de la imagen. Por lo tanto, los posibles lugares para la luz serán enlistados a continuación.

- Pared superior de la zona de visión.
- Pared inferior de la zona de visión.
- Paredes desde donde entra el filamento a la zona de medición.

Observando la figura 25, se nota que la menor distancia posible entre la iluminación, el filamento y la cámara se logrará colocando la iluminación en la pared donde entra el filamento al área de medición. En la figura 26 se observa cómo está colocada la iluminación en la zona de medición.

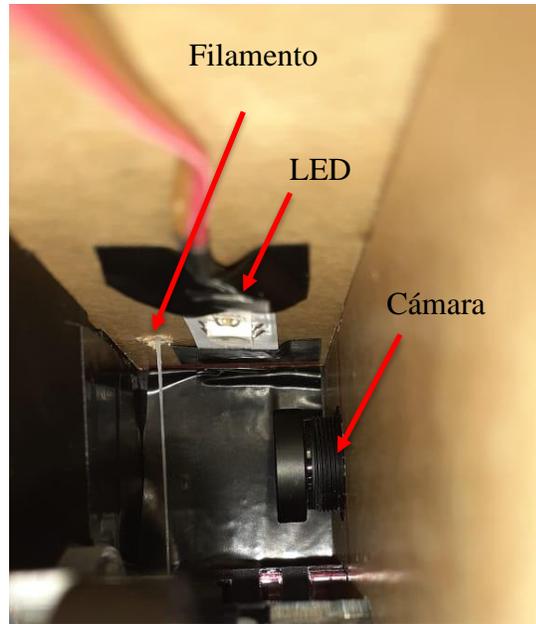


Figura 26. Iluminación dentro de la zona de visión.

**Fuente:** Autor. Elaboración propia.

#### 4.4.2 Distancia entre cámara y filamento

Para encontrar la distancia a la que debe de encontrarse la cámara del filamento, se recurrirá a la fórmula (1) junto con las especificaciones de la cámara encontradas en [36]. Sabiendo que la resolución del video es de 1920 x 1080 y que el tamaño del sensor es de 3,674 x 2,760 mm, con las siguientes ecuaciones se encontrará el tamaño de cada píxel.

$$píxel = \frac{sensor}{resolución} \quad (4.18)$$

$$píxel = \frac{2,760}{1080} = 2,56 \times 10^{-3} mm = 2,56 \mu m \quad (4.19)$$

Conociendo el tamaño del píxel, se debe de asegurar que:

- Se pueda realizar la medición de objetos de un mínimo de ancho de 50  $\mu m$  y un máximo de 400  $\mu m$ .
- La distorsión espacial no afecte la exactitud de los datos.
- Sea posible el enfoque del objeto.

- Sea posible el posicionamiento de la cámara.

Para asegurar estas mediciones, el campo de visión de la cámara debe ser mayor a 400  $\mu\text{m}$  tanto para el ancho como para el largo. Pero, debido a las limitaciones del enfoque de la cámara, las restricciones de posicionamiento por el espacio dejado en el diseño mecatrónico y distancia mínima en donde la distorsión espacial no afecte, la cámara no podrá estar situada de lo más cercana posible al filamento. Por esta razón, se asegura un campo de visión donde pueda haber una relación de un píxel cada aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ . Con esto, reformulando la ecuación 19 se tendrá el campo de visión de la cámara.

$$\text{píxel} = \frac{\text{campo de visión}}{\text{resolución}} \quad (4.20)$$

$$\text{campo de visión} = 10 * 1080 = 10800 \mu\text{m} = 10.80 \text{ mm} \quad (4.21)$$

Utilizando una distancia focal de 4 mm como recomienda el fabricante [36], con la fórmula (2.1) se tendrá la distancia de trabajo.

$$\frac{\text{Distancia de trabajo}}{\text{Campo de visión}} = \frac{\text{Longitud focal}}{\text{Tamaño sensor}} \quad (2.1)$$

$$\frac{\text{Distancia de trabajo}}{10,80} = \frac{4}{2,760} \quad (4.22)$$

$$\text{Distancia de trabajo} = 15.65 \text{ mm} \quad (4.23)$$

En la figura 27 se observará la imagen que estará dando la cámara con la distancia de trabajo y la longitud focal encontradas.



Figura 27. Captura del filamento con distancia focal encontrada.

**Fuente:** Autor. Python

Como se puede observar, gran parte de la imagen no se está aprovechando debido a la posición de la cámara, además, el reflejo provocado por la iluminación podría ser el causante de datos erróneos. Por esta razón, en el algoritmo de medición se recorta la imagen para continuar teniendo la misma cantidad de píxeles, pero aprovechando la mayor cantidad de espacio posible. Un ejemplo de cómo se verá la nueva imagen está presente en la figura 28.

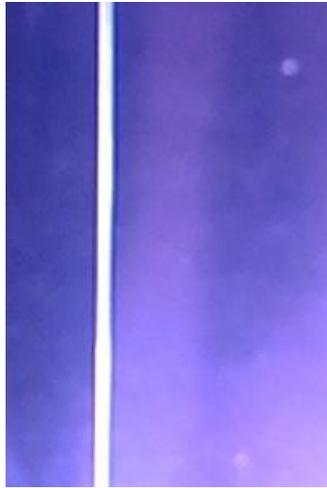


Figura 28. Imagen recortada por medio de software.

**Fuente:** Autor. Python

#### 4.4.3 Conexiones dentro del prototipo

En la figura 11, se observó la división presente en los subsistemas donde hasta el último subsistema todo el proceso se hace dentro del microcontrolador encargado del sistema de visión. Después del envío de los datos al microcontrolador del sistema de control, este envía la posición requerida de los motores a los controladores. Para que todo el sistema funcione, se conectarán el microcontrolador del sistema mecatrónico, el controlador del motor y el motor a una fuente de poder. En la figura 29 se podrá ver el esquemático de la conexión del sistema completo.

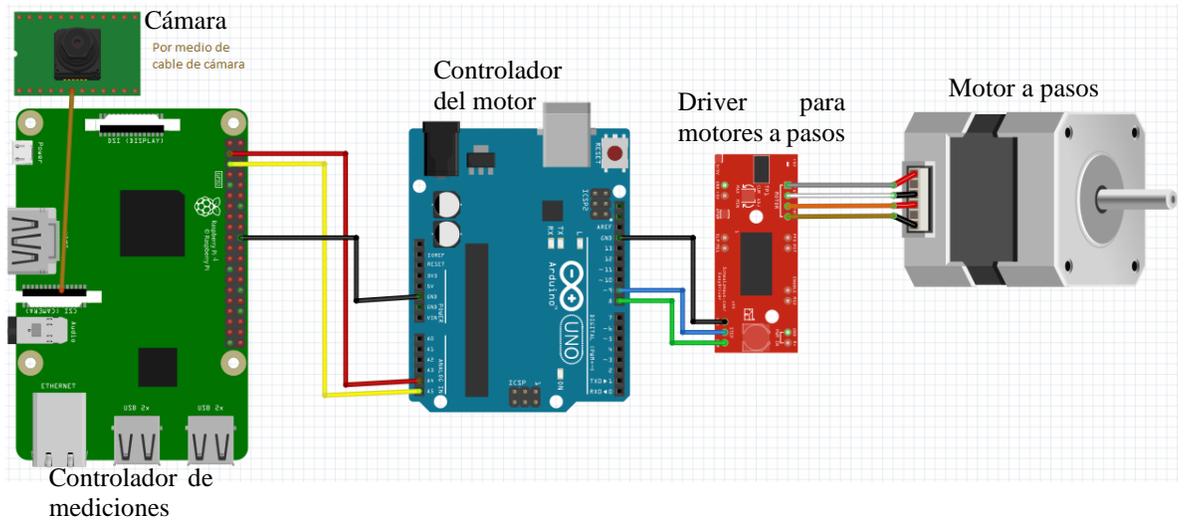


Figura 29. Esquemático de conexión del sistema.

**Fuente:** Autor. Fritzing.

## Capítulo 5: Resultados y Análisis

### 5.1 Prototipo aplicado

#### 5.1.1 Espacio del sistema de medición

En la figura 30 se observa el prototipo del sistema de elongación completo con la cámara incorporada dentro de él.

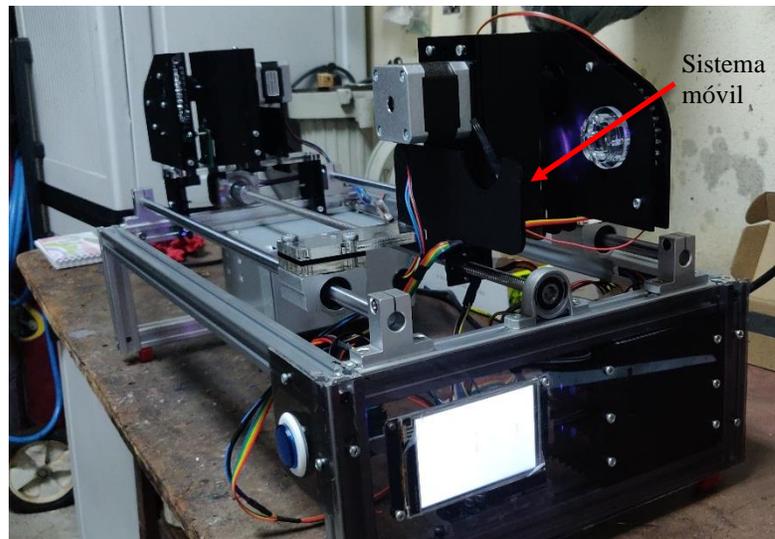


Figura 30. Prototipo de sistema de elongación.

**Fuente:** J. Lizano. Elaboración Propia.

En esta imagen, se puede apreciar el mecanismo general de alargamiento, el cual funciona prensando el filamento y alargándolo por medio de los motores a pasos. La zona de medición del prototipo se podrá apreciar de una mejor manera en la figura 31. El filamento estará sujeto entre las dos zonas de sujeción del material, las cuales se encuentran dentro de las zonas negras que sobresalen del mecanismo.

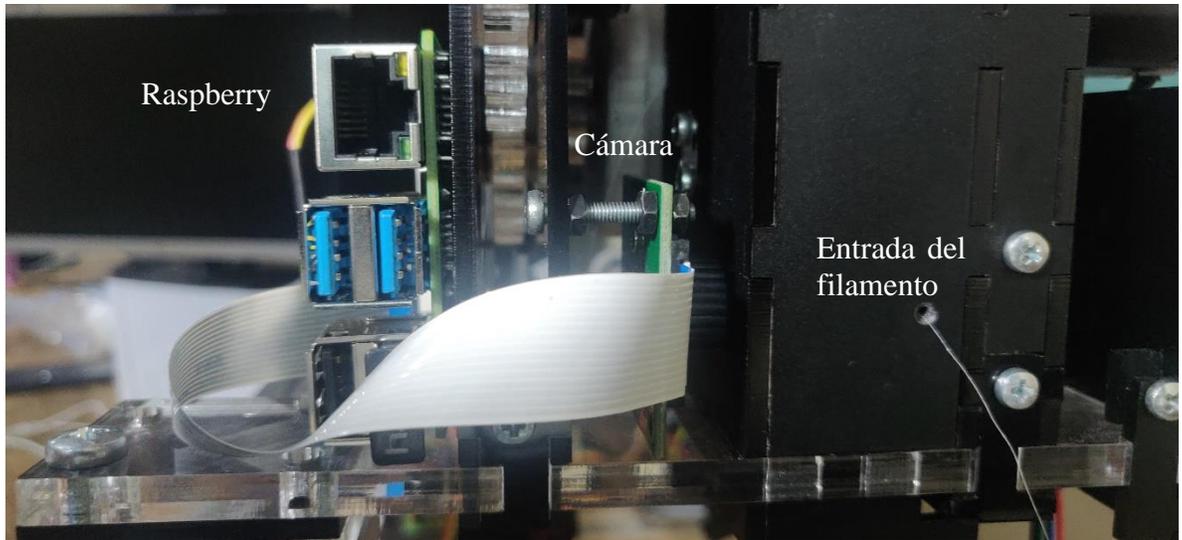


Figura 31. Prototipo de área de sistema de medición.

**Fuente:** J. Lizano. Elaboración Propia.

En la imagen se puede apreciar el orificio por donde el filamento entraría al sistema de medición, la cámara y como está sujeta y también su conexión con la Raspberry Pi. Otro ángulo de esta área del prototipo se encuentra en la figura 32.



Figura 32. Vista del área de medición.

**Fuente:** J. Lizano. Elaboración Propia.

En esta vista, se logra apreciar el montaje de la Raspberry Pi junto con la conexión a la cámara. La Raspberry estará conectada al Arduino por medio de los tres cables que se requieren para la comunicación I2C, los cuales se observan de color amarillo, rojo y naranja. Estos cables rojo y naranja llegarán a las terminales A4 y A5 respectivamente del Arduino, mientras que el amarillo llegará a la tierra común del sistema. La figura 33 se logra observar el interior de la zona de la cámara, y cómo se realizaría la medición del filamento.

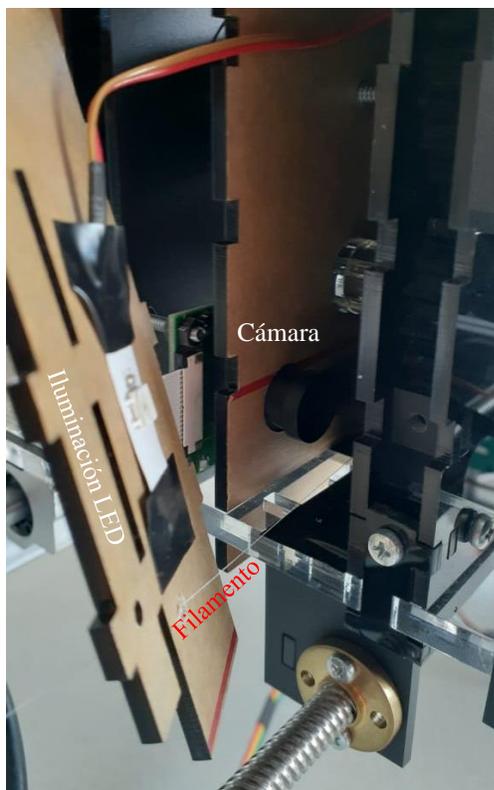


Figura 33. Interior de zona de medición.

**Fuente:** Autor. Elaboración Propia.

En esta, se puede observar aproximadamente por donde pasaría el filamento al área de medición y como se procede a calcular su diámetro.

### 5.1.2 Sistema de medición

Realizando los pasos visualmente como se demuestran en la sección 4.2.5, se demostrará el funcionamiento del algoritmo de medición paso a paso.

En la figura 28 se presentó la imagen que será medida por la Raspberry Pi. A esta imagen, se le realiza la detección de contornos, así como es evidenciado en la figura 34.

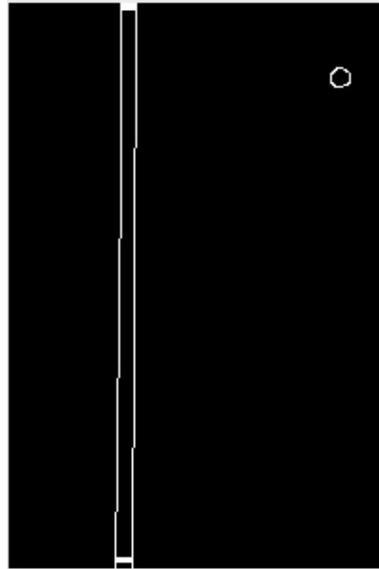


Figura 34. Contornos de objeto a medir.

**Fuente:** Autor. Python.

Como se observa, esta imagen tiene un pequeño círculo en su parte inferior. Este tipo de ruido será ignorado haciendo que el algoritmo solo tome las mediciones de áreas grandes. En esta imagen, se procede a dibujar la caja con las esquinas del objeto, como se denota en la figura 35.

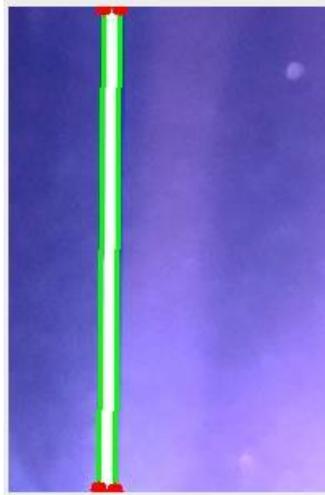


Figura 35. Caja sobre los contornos del filamento.

**Fuente:** Autor. Python

Como se puede observar, la caja siempre seguirá el contorno del objeto a medir, por lo que este podrá estar en cualquier posición a la hora de ser medido. Con esta imagen, se realiza el conteo de píxeles entre los puntos medios del ancho y el largo de la caja y, por medio de un factor de escalamiento, se procede a dar la medida en micrómetros del ancho del objeto. En la figura 36 se puede ver el ejemplo que como se ve la medición final del filamento.



Figura 36. Medición final del filamento.

**Fuente:** Autor. Python.

Esta medición será enviada al Arduino, donde se utilizará esta medida para el control de los motores.

## 5.2 Resultados experimentales

### 5.2.2 Sistema de medición

Con el sistema de medición montado dentro del prototipo del sistema mecatrónico, se procedió a realizar la comprobación de la fiabilidad de las mediciones realizadas. Para esto, se utilizará la prueba de hipótesis, la cual es mencionada por [37]. Al estar trabajando con muestras, se utilizará la t-student para los cálculos

En esta prueba, se verificarán las medidas de un filamento por medio de un pie de rey con un margen de error de 0.01 mm y se compararán con las medidas obtenidas del sistema de visión. Para esto, se planteará la hipótesis realizando una comparación de sus medias con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.01\%$ .

$$\begin{aligned}
 H_0: \mu_p &= \mu_v \\
 H_1: \mu_p &\neq \mu_v
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Para esto, primero se calculan los grados de libertad que tendrá el experimento. Con varianzas iguales y según la tabla A9 de [37], con 28 medidas en cada una de las tablas, con un  $\beta=0,1$ ; se tendrán los siguientes grados de libertad.

$$\gamma = (n_v + n_p) - 2 = 54
 \tag{5.2}$$

Con estos grados de libertad, se procedió a sacar el nivel de confianza del experimento, donde se encuentra por medio de la tabla A.4 de [37], que  $t = 2,660$ , haciendo que el intervalo de confianza sea de  $-2,660$  hasta  $2,660$ . En las tablas 14 y 1 se presentan las medidas realizadas por el vernier y por el sistema de visión respectivamente.

Tabla 14. Medidas de filamento por medio del vernier.

Muestra	Valor ( $\pm 0.01$ mm)
1	0,13
2	0,15
3	0,13
4	0,18
5	0,12
6	0,12
7	0,13
8	0,14
9	0,11
10	0,15
11	0,12
12	0,11
13	0,14
14	0,13
15	0,14
16	0,11

17	0,21
18	0,13
19	0,12
20	0,12
21	0,14
22	0,13
23	0,14
24	0,13
25	0,12
26	0,13
27	0,12
28	0,13
Media	0,1332
Desviación estándar	0,02091491961

En micrómetros, la media de las medidas sería de 133,2  $\mu\text{m}$  con una desviación de 20,91491961  $\mu\text{m}$ .

Tabla 15. Medidas del filamento por medio del sistema de visión.

Muestra	Valor ( $\mu\text{m}$ )
1	145,9
2	150,8
3	155,1
4	230,1
5	120,1
6	145,1
7	150,1
8	170,1
9	155,1
10	160,1

11	130,1
12	150,1
13	110,1
14	125,1
15	120,1
16	115,1
17	150,1
18	145,1
19	155,1
20	160,1
21	125,1
22	105,1
23	150,1
24	120,1
25	110,1
26	115,1
27	120,1
28	130,1
Media	139,97
Desviación estándar	25,5297158

Con esto, se procede a calcular el valor estadístico, el cual está basado en la siguiente fórmula.

$$t_e = \frac{\bar{x}_v - \bar{x}_p}{\sigma_{\bar{x}_v - \bar{x}_p}} \quad (5.3)$$

Donde el error estándar de la diferencia de medias se calcula como:

$$\sigma_{\bar{x}_v - \bar{x}_p} = S \sqrt{\frac{1}{n_v} + \frac{1}{n_p}} \quad (5.4)$$

Donde:

$$S = \sqrt{\frac{(n_v - 1)s_v^2 + (n_p - 1)s_p^2}{n_v + n_p - 2}} \quad (5.5)$$

En el cual  $s_v$  y  $s_p$  simbolizan la desviación estándar de las mediciones del sistema de visión y el pie de rey respectivamente y  $n_v$  y  $n_p$  sus números de muestras. Utilizando los resultados de la tablas 13 y 14, se tendrán los siguientes cálculos.

$$S = \sqrt{\frac{(n_v - 1)s_v^2 + (n_p - 1)s_p^2}{n_v + n_p - 2}} = \sqrt{\frac{(28 - 1) * 25,53^2 + (28 - 1) * 20,91^2}{28 + 28 - 2}} \quad (5.6)$$

$$S = 23.33 \quad (5.7)$$

Teniendo el resultado de S, se realiza el cálculo del error estándar.

$$\sigma_{\bar{x}_v - \bar{x}_p} = S \sqrt{\frac{1}{n_v} + \frac{1}{n_p}} = 23.33 \sqrt{\frac{1}{28} + \frac{1}{28}} \quad (5.8)$$

$$\sigma_{\bar{x}_v - \bar{x}_p} = 6.235204774 \quad (5.9)$$

Con este resultado, se procede a calcular el resultado de  $t_e$ .

$$t_e = \frac{\bar{x}_v - \bar{x}_p}{\sigma_{\bar{x}_v - \bar{x}_p}} = \frac{139,97 - 133,2}{6.235204774} = 1.08577 \quad (5.10)$$

Al este valor de  $t_e$  estar dentro del rango del rango de confianza, se logra asegurar con una confiabilidad del 99% que las medidas tomadas por el sistema de visión tienen una precisión de, aunque sea, 0.01 mm. Conforme a los datos medidos, tanto por el sistema de visión como por el vernier, se ve una gran variedad de datos debido a que el diámetro del filamento que se utilizó no era del todo uniforme. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 37. donde se aprecia un punto de abultamiento al momento de tomar la medida, haciendo que, aunque las medidas de los puntos siguientes sean menores, a la hora de la medición se tome el diámetro mayor, provocando que los datos encontrados varíen y con esto aumentar la desviación estándar de las mediciones. Un ejemplo de un diámetro uniforme del filamento se puede apreciar en la figura 36.

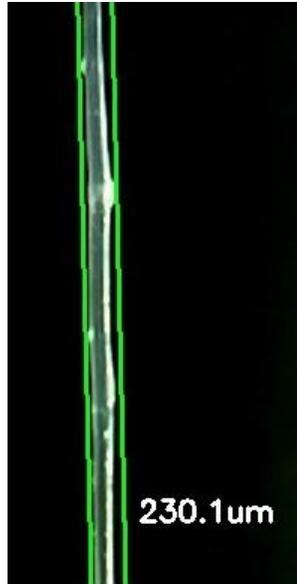


Figura 37. Abultamiento en el filamento.

**Fuente:** Autor. Python.

### 5.2.3 Comprobación del sistema completo

Para comprobar que el sistema puede elongar el filamento a un diámetro de al menos 0.1 mm, se procederá a realizar otra prueba de hipótesis donde con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.01\%$ , se compararán las muestras de diferentes tractos del filamento.

$$\begin{aligned} H_0: \mu_f &= 0.1 \\ H_1: \mu_f &< 0.1 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Para comprobar la medición del filamento estirado se utilizarán 28 muestras, como lo expresa [37], medidas por el pie de rey, lo cual tendrá una desviación estándar de 0.01 mm por muestra. Con el nivel de significancia de 0.01%, se procedió a sacar el nivel de confianza del experimento, donde se encuentra que para 27 grados de libertad el valor de  $t$  es  $= 2,473$ . Con este valor, se tendrá que el intervalo de confianza será de  $-2.473$  hasta el infinito. En la tabla 16 se desglosan los resultados de las mediciones.

Tabla 16. Medición de filamento estirado.

Muestra	Valor ( $\pm 0.01$ mm)
1	0,08
2	0,09
3	0,07
4	0,08
5	0,10
6	0,11
7	0,08
8	0,09
9	0,10
10	0,11
11	0,08
12	0,09
13	0,10
14	0,10
15	0,06
16	0,08
17	0,09
18	0,07
19	0,10
20	0,11
21	0,09
22	0,09
23	0,08
24	0,07
25	0,08
26	0,09
27	0,08
28	0,08

Media	0,09
Desviación estándar	0,01294576

Con estos datos, se procede a sacar calcular el resultado de  $t_e$ .

$$t_e = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = \frac{0.09 - 0.1}{\frac{0.00129}{\sqrt{28}}} = -5,10930253 \quad (5.12)$$

Comparando el resultado de  $t_e$  con el intervalo de confianza, se observa que  $Z_e$  se encuentra fuera del intervalo. Debido a esto, con un nivel de confianza de 99%, se rechaza la hipótesis  $H_0$ , que el cable tenga un diámetro igual a 0.1 mm y se acepta que tenga un diámetro menor.

### 5.3 Análisis financiero

En esta sección se muestra el detalle económico costo/beneficio total del desarrollo del proyecto. En la tabla 17 se encontrarán los costos de los componentes utilizados para armar el prototipo del sistema de control. Debido a una iteración del diseño mecatrónico que se realizó después de hacer el pedido de las compras, la idea original de utilizar dos cámaras fue desechada debido a la falta de espacio para su colocación, por lo que en el prototipo se utiliza una cámara.

Tabla 17. Variables económicas costo/beneficio del sistema

Costos de materia prima				
Producto	Marca	Precio por unidad (\$)	Cantidad	Precio total (\$)
Raspberry Pi 4	Raspberry	56.50	2	113.00
Pi camera	Arducam	18.99	2	37.98
Módulo de lente	Arducam	12.99	2	25.98
Micro SD	Kingston	11,95	2	23.90
Cargador Tipo C	Huawei	16,32	1	16.32
Total de costos				217.18

Con esto, pasando el precio total de los componentes a colones, se tendrá que el costo del sistema completo fue de ₡133 343. Viendo el precio ideal indicado en la tabla 5, se cumple con la especificación dada para los costos.

Aparte de estos gastos, se deben contar las horas invertidas en el desarrollo del proyecto, las cuales se calcula que se trabajaron 6 horas por día, tanto en el sistema como en el documento, por el transcurso de las 19 semanas del semestre pasado y 7 semanas otorgadas por medio de la prórroga, se tendrá un total de 156 horas. Comparado a las hora invertidas, el sistema final ayuda en el ahorro de las horas asistente necesarias para elongar el filamento manualmente. Si según los investigadores de [1], se requieren de 3 asistentes para elongar las carruchas con el filamento y su comprobación del diámetro requerido, en lo cual se destinan 16 horas por cada asistente en la semana que se produce el hilo. Con el nuevo sistema estas horas serán invertidas en otros campos, logrando un ahorro en las horas asistentes.

Otro beneficio producido por el sistema se observa en la cantidad de material que será ahorrado. Actualmente, no todo el material que se extruye se puede utilizar para el desarrollo de las células, debido tanto a un error en la parte de extrusión, así como errores en la parte de la elongación. Con el nuevo sistema, los errores en la parte de elongación se verán nulificados, haciendo que se aproveche una mayor cantidad de PCL.

Además, con este nuevo sistema, se podrá producir nuevo conocimiento, siendo posible la publicación de un artículo científico sobre la fabricación del filamento en el laboratorio, así como la publicación que pueda comprobar la relación entre la tasa de elongación del material con la fuerza aplicada al PCL. Con estas publicaciones, se podrá dar visibilidad al proyecto principal, así como lograr la atracción de diversos fondos para financiar más investigaciones similares.

## Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

1. Se determinan las deficiencias presentes en el actual sistema de elongación del PCL.
2. Por medio de una prueba de hipótesis, se valida la capacidad del sistema de visión de realizar mediciones micrométricas con una incertidumbre de al menos 0,02 mm.
3. Se valida por medio de la prueba de hipótesis la capacidad del sistema de control para elongar el filamento a un diámetro menor a 0,1 mm.
4. El prototipo del sistema logra comprobar la validez de los resultados de las mediciones y el control de los motores, dando filamentos de 0,09 mm con una incertidumbre de 0,013 mm.

### 6.2 Recomendaciones

1. Realizar la calibración del sistema de medición mínimo cada 6 meses, aunque a mayor frecuencia de calibraciones, mayor será la precisión del sistema.
2. Realizar la selección de componentes lo más rápido posible, debido a los trámites que se deben de llevar a cabo en la compra de insumos estos podrán tardar más de lo planeado en llegar.
3. Para mayor precisión en las medidas del filamento, realizar un sistema donde se pueda medir el hilo en dos dimensiones, para así garantizar la circularidad del filamento.
4. Para una segunda iteración, realizar un programa capaz de tomar tres o más secciones del filamento y formar la media entre esos valores.

## Capítulo 7: Bibliografía

- [1] TEC, «Desarrollo de un sistema de estudios in-vitro adaptable en equipo de pruebas dinámicas, con miras a generar estímulos biomecánicos sobre cultivos celulares,» Cartago, 2017.
- [2] K. T. Ulrich y S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, McGraw Hill Education, 2013.
- [3] M. A. Woodruff y D. W. Hutmacher, «The return of a forgotten polymer : Polycaprolactone in the 21st century,» *Process in Polymer Science*, 2010.
- [4] J. An, C. K. Chua, K. F. Leong, C. H. Chen y J. P. Chen, «Solvent-free fabrication of three dimensionally aligned polycaprolactone microfibers for engineering of anisotropic tissues,» *Biomedical Microdevices*, vol. 14, n° 5, p. 863–872, 2012.
- [5] E. Malikmammadov, T. E. Tanir, A. Kiziltay, V. Hasirci y N. Hasirci, «PCL and PCL-based materials in biomedical applications.,» *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, vol. 29, n° 7-9, p. 863–893, 2018.
- [6] L. Ghasemi-Mobarakeh, D. Kolahreez, S. Ramakrishna y D. Williams, «Key terminology in biomaterials and biocompatibility,» *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 2019.
- [7] A. Aristizábal Castrillón, M. Torres y M. Ruth, *Ensayos y propiedades de los materiales*, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2017.
- [8] M. Bunge, «ANÁLISIS DEL CONCEPTO DE MAGNITUD FÍSICA,» *Enseñanza de la Física*, vol. 13, n° 2, pp. 21-24, 2000.

- [9] A. Visco, C. Scolaro, A. Giamporcaro, S. De caro, I. Tranquillo y M. Catauro , «Threads Made with Blended Biopolymers: Mechanical, Physical and Biological Features,» *Polymers*, vol. 11, 2019.
- [10] A. Visco, D. Nocita, A. Giamporcaro, S. Ronca, G. Forte, A. Pistone y C. Espro, «Effect of Ethyl Ester L-Lysine Triisocyanate addition to produce reactive PLA/PCL bio-polyester blends for biomedical applications,» *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 68, pp. 308-317, 2017.
- [11] W. Zhang, I. Ullah, Y. Zhang, H. Ou, J. Zhou, M. W. Ullah, X. Zhang y W. Li, «Fabrication and characterization of porous polycaprolactone scaffold via extrusion-based cryogenic 3D printing for tissue engineering,» *Materials & Design*, vol. 180, 2019.
- [12] H. K. Manjili, H. Malvandi, M. S. Mousavi, E. Attari y H. Danafar, «In vitro and in vivo delivery of artemisinin loaded PCL–PEG–PCL micelles and its pharmacokinetic study,» *Artificial Cells, Nanomedicine and Biotechnology*, vol. 46, n° 5, pp. 926-936, 2018.
- [13] N. Siddiqui, S. Asawa, B. Birru, R. Baadhe y S. Rao, «PCL-Based Composite Scaffold Matrices for Tissue Engineering Applications,» *Molecular Biotechnology*, vol. 60, n° 7, pp. 506-532, 2018.
- [14] J. F. Vélez Serrano, A. B. Moreno Díaz, Á. Sánchez Calle y J. L. E. Sánchez Marín, *Visión por Computador*, Madrid, 2003.
- [15] A. Sánchez Salmerón y C. Ricolfe Viala, «Capítulo 1: Sistema de Captura de imágenes,» de *Conceptos y Métodos en Visión por Computador*, 2016.
- [16] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer Science & Business Media, 2010.
- [17] L. Shapiro y G. Stockman, *Computer Vision*, Prentice Hall , 2000.

- J. L. Crespo Mariño, «Tema 3: Introducción a Cámaras en Visión Industrial,» 2019. [En línea]. Available:  
[18] <https://tecdigital.tec.ac.cr/dotlrn/classes/IMT/MT9008/S-1-2020.CA.MT9008.1/file-storage/view/presentaciones%2FTEMA3-V2.pdf>.  
[Último acceso: 10 Septiembre 2020].
- J. L. Crespo Mariño, «Tema 2: Consideraciones sobre Luz e Iluminación,» 2019. [En línea]. Available:  
[19] <https://tecdigital.tec.ac.cr/dotlrn/classes/IMT/MT9008/S-1-2020.CA.MT9008.1/file-storage/view/presentaciones%2FTEMA2-V2.pdf>.  
[Último acceso: 13 Septiembre 2020].
- J. L. Crespo Mariño, «Tema 4: Ópticas y Lentes,» 2019. [En línea]. Available: <https://tecdigital.tec.ac.cr/dotlrn/classes/IMT/MT9008/S-1-2020.CA.MT9008.1/file-storage/view/presentaciones%2FTEMA4-V2.pdf>.  
[20] [Último acceso: 15 Septiembre 2020].
- [21] E. Sandoval Z, Técnicas aplicadas al estudio de la anatomía vegetal, UNAM, 2005.
- [22] D. K. Maheshwari, Practical Microbiology, S. Chand Publishing, 2003.
- [23] P. Hariharan, Basics of Interferometry, Segunda ed., California: Elsevier, 2007.
- [24] S. Millán Gómez, Procedimientos de Mecanizado, Segunda ed., Paraninfo, 2006.
- Capris, «Micrómetros,» [En línea]. Available:  
[25] <https://capris.cr/searchengine/?category=232>. [Último acceso: 27 Septiembre 2020].
- [26] Alibaba, «Interferómetro,» [En línea]. Available: <https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=&CatId=&SearchText=>

+interferometer&selectedTab=&viewType=GALLERY. [Último acceso: 27 Septiembre 2020].

[27] Alibaba, «Visión Datum EX1400CPS externo gatillo 14MP CMOS USB HD placa Microscopio de visión de la cámara,» [En línea]. Available: [https://spanish.alibaba.com/product-detail/vision-datum-ex1400cps-external-trigger-14mp-cmos-usb-board-hd-microscope-machine-vision-camera-62290216822.html?spm=a2700.8699010.videoBannerStyleB\\_top.5.2ff968beFXPc06](https://spanish.alibaba.com/product-detail/vision-datum-ex1400cps-external-trigger-14mp-cmos-usb-board-hd-microscope-machine-vision-camera-62290216822.html?spm=a2700.8699010.videoBannerStyleB_top.5.2ff968beFXPc06). [Último acceso: 26 Septiembre 2020].

[28] C. Hoy, «Raspberry Pi 4 vs Raspberry Pi 3, ¿qué mejora en el nuevo modelo?,» 14 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://computerhoy.com/noticias/tecnologia/raspberry-pi-4-vs-raspberry-pi-3-mejora-nuevo-modelo-443801>. [Último acceso: 25| Septiembre 2020 ].

[29] F. Beer y R. Johnson, *Mecánica de Materiales*, Quinta ed., México DF: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2009.

[30] R. Picatoste Ruilope, «Modelling and Control of Stepper Motors for High Accuracy Positioning Systems Used in Radioactive Environments,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2014.

[31] A. Morar, «Stepper Motor Model for Dynamic Simulation,» *Acta Electrotehnica*, vol. 44, n° 2, pp. 117-122, 2003.

[32] L. E. Ramírez Salazar, «El motor paso a paso: descripción, modelación, simulación,» ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito, 1990.

[33] MOOG Components Group, «KM - Motor Constant - “THE GREAT EQUALIZER”,» 16 Enero 2008. [En línea]. Available: [http://www.motioncomp.com/pdfs/Motor\\_Constant\\_Great\\_Equalizer.pdf](http://www.motioncomp.com/pdfs/Motor_Constant_Great_Equalizer.pdf). [Último acceso: 15 Enero 2021].

- [34] O. Ramírez Rodríguez, «Caracterización de motor de pasos híbrido a través de modelado no lineal y pruebas de laboratorio,» Universidad de Costa Rica, San José, 2015.
- [35] Dings Motion USA, «NEMA 17 BLDC MOTOR,» [En línea]. Available: <https://dingsmotionusa.com/nema-17-bldc>. [Último acceso: 19 Enero 2021].
- [36] ArduCam, «ArduCam,» [En línea]. Available: <https://www.arducam.com/product/arducam-5mp-m12-picam/>. [Último acceso: 18 Marzo 2021].
- [37] R. E. Walpole, R. H. Myers y S. L. Myers, Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias, Novena ed., Ciudad de México: Pearson Education, 2012.

## Anexos

### A.1. Manual de usuario

La funcionalidad del sistema diseñado en este proyecto radica en el control del sistema mecatrónico encargado de elongar el filamento a un diámetro menor a 0.1 mm. Para iniciar el sistema, se necesitará descargar el programa PuTTY, el cual será el encargado de acceder la Raspberry Pi sin la necesidad de ocupar un teclado y una pantalla. Para realizar esta conexión, es importante que la computadora y la Raspberry Pi estén conectadas a la misma red wifi, debido a que los comandos al sistema de medición serán enviados por este medio.

#### A.1.1 Inicio del programa.

Al abrir PuTTY, se deberá poner la dirección IP de la Raspberry, como lo señala la figura 38. Esta dirección será la misma una vez se haya configurado el internet en la Raspberry.

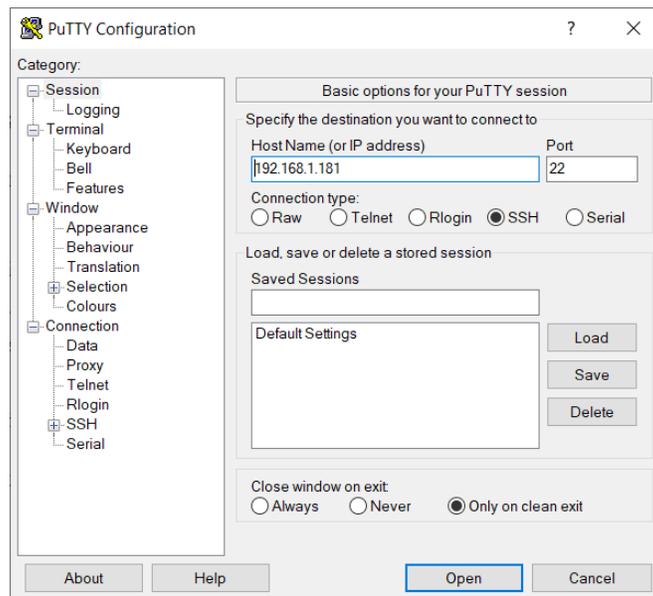
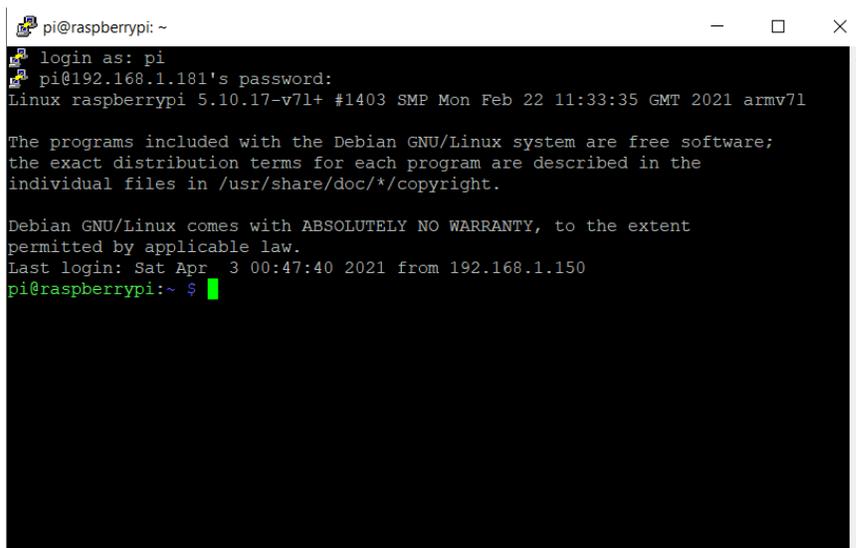


Figura 38. Menú de PuTTY.

**Fuente:** Autor. PuTTY.

Para acceder a la Raspberry, deberá de presionar Open, lo cual abrirá una pantalla similar al Terminal de Linux. Una vez dentro del terminal, el programa le pedirá al usuario que introduzca el nombre de usuario y contraseña, los cuales para esta Raspberry serán pi y PFG respectivamente. Un ejemplo de esto se observa en la figura 39.

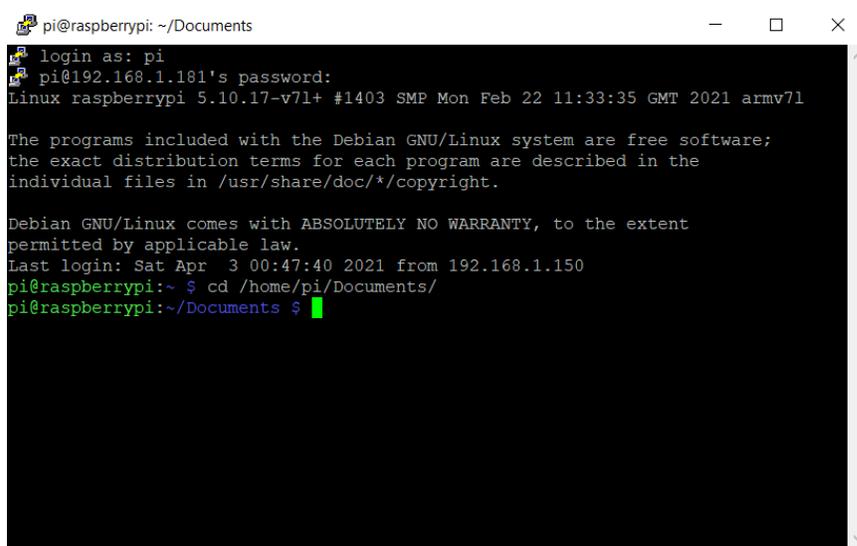


```
pi@raspberrypi: ~  
login as: pi  
pi@192.168.1.181's password:  
Linux raspberrypi 5.10.17-v7l+ #1403 SMP Mon Feb 22 11:33:35 GMT 2021 armv7l  
  
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;  
the exact distribution terms for each program are described in the  
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.  
  
Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent  
permitted by applicable law.  
Last login: Sat Apr 3 00:47:40 2021 from 192.168.1.150  
pi@raspberrypi:~ $
```

Figura 39. Usuario y contraseña en PuTTY.

**Fuente:** Autor. PuTTY.

Al introducir estos valores, se habrá entrado a la terminal del microcontrolador. Para acceder al algoritmo de medición del filamento, se deberá ir primero a la carpeta donde están los diferentes algoritmos. Para llegar a la carpeta se deberá de escribir `cd /home/pi/Documents/`, así como lo muestra la figura 40.



```
pi@raspberrypi: ~/Documents
login as: pi
pi@192.168.1.181's password:
Linux raspberrypi 5.10.17-v7l+ #1403 SMP Mon Feb 22 11:33:35 GMT 2021 armv7l

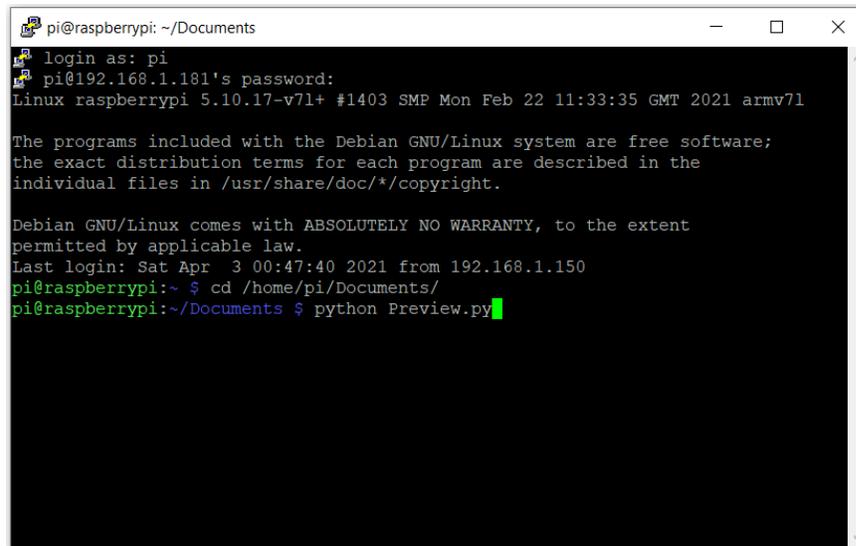
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Sat Apr  3 00:47:40 2021 from 192.168.1.150
pi@raspberrypi:~ $ cd /home/pi/Documents/
pi@raspberrypi:~/Documents $ █
```

Figura 40. Ejemplo de navegación en documentos.

**Fuente.** Autor. PuTTY

Dentro de esta carpeta se encuentran dos archivos, los cuales son el archivo llamado Preview y PFG3. El algoritmo de Preview puede ser utilizado para observar lo que estará observando la cámara. Este programa se puede utilizar para ajustar el lente de la cámara, por si alguna vez este se llegara a desenfocar. Para acceder a esta programación se deberá escribir el comando `python Preview.py`. Un ejemplo de la secuencia a seguir para llamar la programación puede ser visto en la Figura 41.



```
pi@raspberrypi: ~/Documents
login as: pi
pi@192.168.1.181's password:
Linux raspberrypi 5.10.17-v7l+ #1403 SMP Mon Feb 22 11:33:35 GMT 2021 armv7l

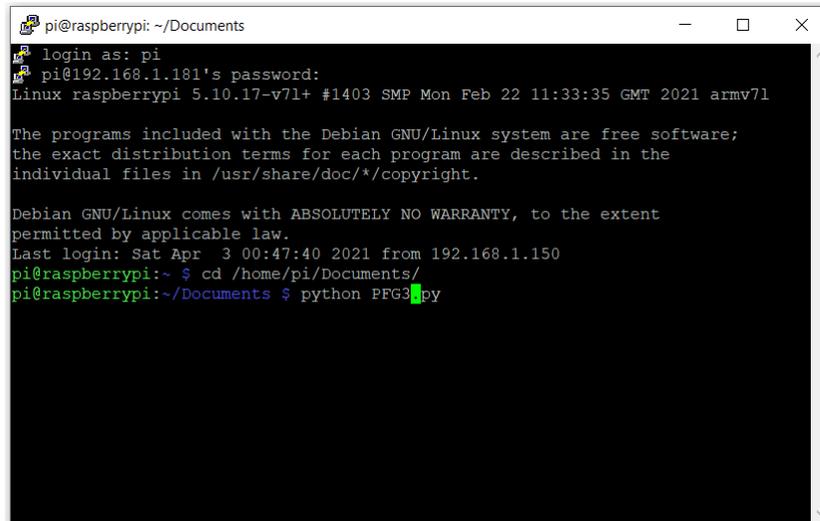
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Sat Apr  3 00:47:40 2021 from 192.168.1.150
pi@raspberrypi:~ $ cd /home/pi/Documents/
pi@raspberrypi:~/Documents $ python Preview.py
```

Figura 41. Ejemplo de llamado a Preview.

**Fuente:** Autor. PuTTY

El segundo programa que se encuentra en esa carpeta es PFG3, este documento contiene el código para realizar la medición del filamento y el envío de datos hacia el otro microcontrolador. Para activar el sistema de medición, se deberá escribir `python PFG3.py` en la terminal. Un ejemplo de la secuencia a seguir para llamar PFG3 puede ser visto en la Figura 42.



```
pi@raspberrypi: ~/Documents
login as: pi
pi@192.168.1.181's password:
Linux raspberrypi 5.10.17-v7l+ #1403 SMP Mon Feb 22 11:33:35 GMT 2021 armv7l

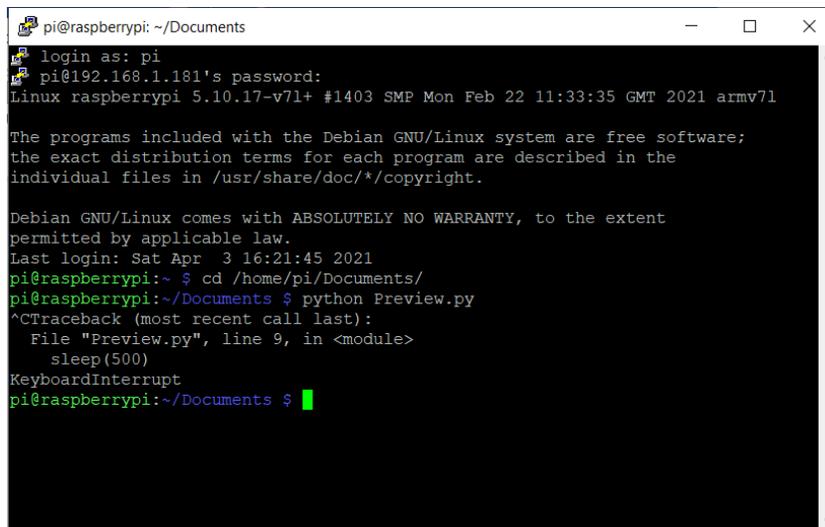
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Sat Apr 3 00:47:40 2021 from 192.168.1.150
pi@raspberrypi:~$ cd /home/pi/Documents/
pi@raspberrypi:~/Documents$ python PFG3.py
```

Figura 42. Ejemplo de llamado a PFG3.

**Fuente:** Autor. PuTTY

Las programaciones antes mencionadas estarán funcionando hasta que se le ordene al programa detenerse. Para esto hay dos opciones: terminar el programa utilizando Ctrl + C o cerrando la sesión y volviéndola a abrir. Un ejemplo de cómo se vería terminar el programa por medio de Ctrl + C se observa en la figura 43.



```
pi@raspberrypi: ~/Documents
login as: pi
pi@192.168.1.181's password:
Linux raspberrypi 5.10.17-v7l+ #1403 SMP Mon Feb 22 11:33:35 GMT 2021 armv7l

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Sat Apr 3 16:21:45 2021
pi@raspberrypi:~$ cd /home/pi/Documents/
pi@raspberrypi:~/Documents$ python Preview.py
^CTraceback (most recent call last):
  File "Preview.py", line 9, in <module>
    sleep(500)
KeyboardInterrupt
pi@raspberrypi:~/Documents$
```

Figura 43. Ejemplo de terminación del algoritmo por medio de Ctrl + C.

**Fuente:** Autor. PuTTY

Para reiniciar PuTTY, primero se deberá intentar cerrar la pestaña de PuTTY, luego aparecerá un cartel preguntando si se quiere cerrar la sesión, como se puede ver en la figura 44. Este se deberá de aceptar para después volver a iniciar la aplicación y realizar todos los pasos necesarios para volver a correr alguna de las programaciones.

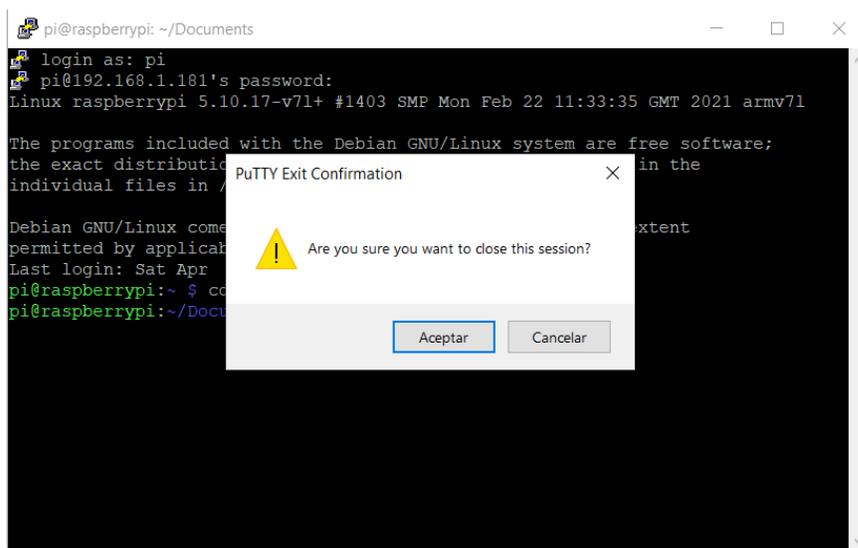


Figura 44. Ejemplo de terminación del algoritmo por reinicio.

**Fuente:** Autor. PuTTY

## A.1.2 Errores comunes

### A.1.2.1 Error de conexión de PuTTY.

En la figura 45 se aprecia uno de los posibles errores de conexión que pueden pasar con el PuTTY. La causa de este tipo de fallo se da por una mala conexión entre la computadora o la Raspberry Pi. Para arreglarlo, se deberá de buscar el número de IP de la Raspberry en el terminal de la Raspberry. Para esto, se deberá de escribir el comando `hostname -I`. Luego, se deberá de introducir este número en la parte de IP address de PuTTY.

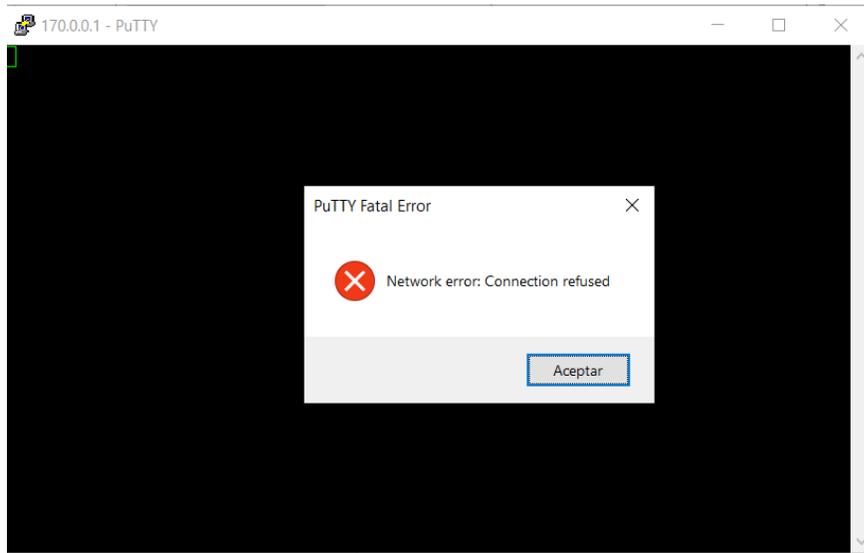


Figura 45. Error de conexión PuTTY-Raspberry Pi.

**Fuente:** Autor. PuTTY

#### A.1.2.2 Error en la programación

Otro posible error que se presente al intentar correr el programa es el error que se observa en la figura 46. Este error se presenta por dos razones: que no haya iluminación en la zona de medición o que no haya ningún objeto a ser medido dentro del rango de visión de la cámara. Si el fallo presente es la iluminación, esto significa que de alguna manera esta falló, por lo tanto, se recomienda el cambio del LED encargado de proveer la luz que le llegará al filamento. Si la iluminación no es el fallo presente en la zona de medición, significa que no hay ningún filamento en esta zona. Si no hubiera filamento, se deberá de hilar el filamento para que pueda tanto ser estirado como medido.

```
pi@raspberrypi: ~/Documents
login as: pi
pi@192.168.1.181's password:
Linux raspberrypi 5.10.17-v7l+ #1403 SMP Mon Feb 22 11:33:35 GMT 2021 armv7l

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Mon Apr  5 01:01:33 2021 from 192.168.1.150
pi@raspberrypi:~ $ cd /home/pi/Documents/
pi@raspberrypi:~/Documents $ python3 PFG3.py
Traceback (most recent call last):
  File "PFG3.py", line 66, in <module>
    (cnts, _) = contours.sort_contours(cnts)
  File "/home/pi/.local/lib/python3.7/site-packages/imutils/contours.py", line 2
5, in sort_contours
    key=lambda b: b[1][i], reverse=reverse))
ValueError: not enough values to unpack (expected 2, got 0)
pi@raspberrypi:~/Documents $
```

Figura 47. Error al no capturar objetos a medir.

**Fuente:** Autor. PuTTY

## A.2 Código de programación del sistema completo

A continuación, se presentarán los códigos utilizados tanto para el control de los motores como para la medición del filamento.

### A.2.1 Código de Python en microcontrolador

```

import numpy as np
import argparse
import imutils
import cv2
import io
import smbus
import struct
from picamera import PiCamera
from picamera.array import PiRGBArray
from time import sleep
from scipy.spatial import distance as dist
from imutils import perspective
from imutils import contours

# Direccion de esclavo I2C
arduino = 0x8

# Inicializacion de comunicacion serial
bus = smbus.SMBus(1)

def midpoint(ptA, ptB):
    return ((ptA[0] + ptB[0]) * 0.5, (ptA[1] + ptB[1]) * 0.5)

def writeNumbers(values):
    # Se envia un flotante al esclavo
    byteList = []
    for value in values:
        byteList += list(struct.pack('f', value))
    byteList.append(0)
    bus.write_i2c_block_data(arduino, byteList[0], byteList[1:4])

#Inicializacion de la camara
camera=PiCamera()

cap = PiRGBArray(camera)

sleep(0.1)

#PPM sera el valor de la calibracion del sistema
PPM = 0.1

```

```

#Procesado de imagen para medicion
for frame in camera.capture_continuous (cap, format="bgr", use_video_port=True):

    #Se toma cada frame para ser procesado
    imagen=frame.array
    #se utiliza una zona pequena de
    #la imagen para el procesado del filamento
    imagen= imagen[450:1000, 600:800]

    #Se realiza un preprocesamiento de la imagen
    gr = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    gr = cv2.GaussianBlur(gr, (7, 7), 0)

    #Se produce la deteccion de bordes con correccion de ruido
    bord = cv2.Canny(gr, 50, 100)
    bord = cv2.dilate(bord, None, iterations=1)
    bord = cv2.erode(bord, None, iterations=1)

    #Deteccion de contornos con los ejes
    cnts = cv2.findContours(bord.copy(), cv2.RETR_EXTERNAL,
    cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    cnts = imutils.grab_contours(cnts)
    (cnts, _) = contours.sort_contours(cnts)

    # Revisa contornos encontrados
    for c in cnts:
        # Ignora contornos pequeños

```

```

if cv2.contourArea(c) < 500:
    continue
# Computa una caja en las esquinas del objeto
copia = imagen.copy()
box = cv2.minAreaRect(c)
box = cv2.cv.BoxPoints(box) if imutils.is_cv2() else cv2.boxPoints(box)
box = np.array(box, dtype="int")

# Ordena las esquinas de los contornos para que siempre vayan
# en el mismo orden: sup-izq, sup-der, inf-der e inf-izq
box = perspective.order_points(box)

# Computa el punto medio entre las esquinas sup-der y sup-izq,
# inf-der e inf-izq, luego, sup-izq e inf-izq y el de sup-der e
(tl, tr, br, bl) = box
(tltrX, tltrY) = midpoint(tl, tr)
(blbrX, blbrY) = midpoint(bl, br)

(tlbrX, tlbrY) = midpoint(tl, br)
(trbrX, trbrY) = midpoint(tr, br)

# Computa la distancia Euclideana entre los puntos medios

dB = dist.euclidean((tlbrX, tlbrY), (trbrX, trbrY))
dA = dist.euclidean((tltrX, tltrY), (blbrX, blbrY))

# Encuentra el tamaño del objeto
dimA = dA / PPM
dimB = dB / PPM
# Envía los datos al controlador de los motores

numbers = []
numbers.append(dimB)
writeNumbers(numbers)

cap.truncate(0)

```

## A.2.2 Código de microcontrolador de motores

```

#include <Wire.h>
#include <AccelStepper.h>

// Define Motor Pins (1 Motor used)

#define dirPin 8 // Blue - 28BYJ48 pin 1
#define stePin 9 // Pink - 28BYJ48 pin 2

union BytesToFloat {
//Transformación de bytes a float de los datos recibidos
    byte valueBuffer[4];
    float valueReading[1];
} converter;

// Define motor
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, dirPin, stePin);

// Define la posición
int inputput =13;
int pos = 200;
int cont= 0;
int envy= 0;

void setup() {
    // Inicializa I2C
    Serial.begin(9600);
    Wire.begin(0x8);
    pinMode(inputput, INPUT);

    //Inicializa AccelStep

    stepper1.setMaxSpeed(1000.0);
    stepper1.setAcceleration(50.0);
    stepper1.setSpeed(200);

    //Realiza la función de transferencia de datos
    Wire.onReceive(Receiver);
    Wire.onRequest(Requester);
}

```

```

void loop()
{
  envy=digitalRead(inputput);
  while (envy){
    if (cont==0) {
      stepper1.moveTo(pos);
      cont++;
    }
    //Control de motor
    else if (stepper1.distanceToGo() == pos/3 && converter.valueReading[0] > 100.0){
      stepper1.move(12*cont);
      cont++;
    }
    else if (stepper1.distanceToGo() ==0){
      envy=0;
    }

    stepper1.run();
  }

}

//Función de recepción de datos
void Receiver(int byteCount){
  for(uint8_t index = 0; index<byteCount; index++){
    converter.valueBuffer[index] = Wire.read();
  }
}
void Requester(){
  Wire.write(envy);
}

```

### A.3 Hoja de datos del motor a pasos

#### HIGH TORQUE HYBRID STEPPING MOTOR SPECIFICATIONS

General specifications		Electrical specifications	
Step Angle (°)	1.8	Rated Voltage (V)	4
Temperature Rise (°C)	80 Max (rated current, 2 phase on)	Rated Current (A)	1.2
Ambient temperature (°C)	-20 ~ +50	Resistance Per Phase ( $\pm 10\%$ )	3.3 (25°C)
Number of Phase	2	Inductance Per Phase ( $\pm 20\%$ mH)	2.8
Insulation Resistance	100M $\Omega$ Min (500VDC)	Holding Torque (Kg.cm)	3.17
Insulation Class	Class B	Detent Torque (g.cm)	200
Max. radial force (N)	28 (20mm from the flange)	Rotor Inertia (g.cm <sup>2</sup> )	68
Max. axial force (N)	10	Weight (Kg)	0.365

● Pull out torque curve:  
VOLTAGE: 24VDC, CONSTANT CURRENT: 1.2A, HALF STEP

● Wiring Diagram:

● Dimensions: (unit=mm)

△						<b>SY42STH47-1206A</b>	TECHNICAL CONDITIONS
REV	REVISIONS	DESCRIPTION	BY	DATE	CHANGZHOU SONGYANG MACHINERY & ELECTRONICS NEW TECHNIC INSTITUTE		<b>060047000</b>
DRAW	任飞飞	2010.06.29					
CHECK							
APPROVE							