

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica



Diseño de sistema de detección de defectos en papel para la empresa Proquinal.

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

Fabián Dixon Sojo

Cartago, noviembre de 2022



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

Declaración de Autenticidad

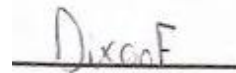
Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 25 de noviembre 2022

Firma del autor

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Dixon Sojo', is written over a horizontal line.

Fabián Dixon Sojo

Céd: 117230593

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 para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Fabián Dixon Sojo

Proyecto: Diseño de sistema de detección de defectos en papel para la empresa Proquinal



Ing. Rodolfo Piedra Camacho

Asesor

Cartago, 25 de noviembre 2022

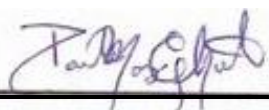
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

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: Fabián Dixon Sojo

Proyecto: Diseño de sistema de detección de defectos en papel para la empresa Proquinal

Miembros del jurado evaluador



Ing. Paula Monge Chanto

Jurado



MSc. -Ing. Johanna Vanessa Muñoz Pérez

Jurado



Ing. Eduardo José Asenjo Castillo

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, 25 de noviembre 2022

Resumen

El proceso de revisión de defectos en papel de la empresa Proquinal es desarrollado de forma completamente manual, dependiendo de un único operario por turno que debe completar otras labores además de esta. A raíz de esto, al fallar en la detección de un defecto puede ocurrir una división de papel en la línea de producción, generando la pérdida de 250 metros de material y tiempo de producción gastado en el reabastecimiento y puesta en marcha de la línea.

El presente documento detalla una propuesta de diseño de un sistema de detección de defectos en papel con el propósito de asistir al operario en su labor de revisión para reducir las pérdidas de material producto del fallo en la detección de defectos. Se muestra el proceso de diseño de ingeniería, desde el planteamiento de necesidades hasta el desarrollo de prototipo del concepto seleccionado. También, se realiza una validación bajo pruebas de concepto para garantizar el cumplimiento de los requerimientos y necesidades planteadas. Se concluye que el sistema detecta 94 de cada 100 defectos mientras que el operario detecta aproximadamente 80 de cada 100, esto implica evitar la potencial pérdida de 3500 metros de material por cada 100 defectos, además de un potencial ahorro de 210 minutos perdidos en reprocesos.

Palabras clave: Detección de defectos, Diseño mecánico, Visión por computadora, Microcontrolador.

Abstract

The paper defect review process within Proquinal is completely manually developed, at the expense of only one operator per work shift that has more tasks to complete in addition to this one. As a result, a failed defect detection may occur, which in turn may cause paper division in the line of production, leading to the loss of 250 meters of material and production time wasted in the resupply and startup of the line of production.

This document details a design proposal for a paper defect detection system with the purpose of assisting the operator in his reviewing task to reduce material loss as a result of failed defect detection. The engineering design process carried out is shown, from the establishment of customer needs to the development of the prototype of the selected concept. Additionally, a validation through proof of concept is done, to ensure the compliance of the established requirements and needs. As a conclusion, the proposed system detects, in average, 94 of every 100 defects while the operator detects 80 of every 100 in average. This implies avoiding the loss of a potential 3500 meters of material for every 100 defects, as well as a potential 210 minute loss in the resupply and startup of the line.

Keywords: Computer vision, Defect detection, Mechanical design, Microcontroller.

Dedico este proyecto de graduación a mis padres y mi hermana, que siempre me han brindado todo el apoyo posible durante toda esta etapa académica.

Agradecimiento

En primer lugar, le agradezco a toda mi familia, que siempre han estado para mí y me han apoyado de forma incondicional.

A mis amigos y mi novia, por siempre impulsarme a dar lo mejor de mí y alentarme a salir siempre adelante.

Al profesor Ing. Rodolfo Piedra Camacho, por brindarme guía y apoyo durante la realización del proyecto.

Finalmente, al Ing. Carlos Salas, por permitirme realizar el proyecto dentro de la empresa Proquinal y, también, por brindarme consejos durante la realización de este.

Lista de Contenido

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Entorno del Proyecto.....	1
1.2. Definición del Problema.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Estructura del informe.....	4
Capítulo 2. Marco Teórico	5
2.1. Generalidades de la planta de producción	5
2.2. Tipos de papel utilizado	6
2.3. Tipos de defectos que se encuentran en el papel.....	11
2.4. Sistemas de visión por computadora	14
2.5. Microcontrolador	22
Capítulo 3. Metodología.....	24
3.1. Identificación de necesidades del cliente	24
3.2. Establecimiento de especificaciones objetivo	25
3.3. Planteamiento de posibles soluciones.....	26
3.4. Selección y establecimiento de candidato a prototipo	26
3.5. Prototipado y Pruebas de concepto.....	28
Capítulo 4. Requerimientos para la solución.....	29
4.1. Análisis de la información otorgada por el cliente	29
4.2. Descomposición funcional del problema	32
4.3. Requerimientos.....	33
Capítulo 5. Propuesta de diseño	38
5.1. Posibles soluciones.....	38
5.2. Filtrado y selección.....	44
Capítulo 6. Diseño y desarrollo del prototipo de solución	52

6.1. Sección Mecánica: Estructura de montaje del sistema de detección	52
6.2. Sección Mecánica: Carcasa de sección de control	66
6.3. Sección de detección: Sistema de visión.....	69
6.4. Sección de detección: Sistema de Control	80
6.5. Sección de detección: Interfaz.....	87
Capítulo 7. Resultados y análisis.....	89
7.1. Pruebas de concepto y validación	89
7.2. Resumen de porcentaje de cumplimiento de requerimientos.....	102
7.3. Análisis económico	106
Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones	110
8.1. Conclusiones.....	110
8.2. Recomendaciones.....	111
Referencias	113
Anexos.....	116
Anexo A.....	116
Anexo B.....	135
Anexo C.....	137

Lista de Figuras

Figura 2. 1. Muestra de papel tipo Avante..	6
Figura 2. 2. Muestra de papel tipo Alloy.....	7
Figura 2. 3. Muestra de papel tipo Carbonium.....	8
Figura 2. 4. Muestra de papel tipo Monalisa.....	8
Figura 2. 5. Muestra de papel tipo Polo.....	9
Figura 2. 6. Muestra de papel tipo Paris.....	9
Figura 2. 7. Muestra de papel tipo Liso (Normal).....	10
Figura 2. 8. Muestra de papel tipo Delta.....	11
Figura 2. 9. Rotura o rompimiento de papel.....	11
Figura 2. 10. Ranura al borde del papel.....	12
Figura 2. 11. Gotas de material.....	13
Figura 2. 12. Mancha de laca.....	13
Figura 2. 13. Delaminación.....	14
Figura 2. 14. Ilusión de Cornsweet (1/2).....	15
Figura 2. 15. Ilusión de Cornsweet (2/2).....	15
Figura 2. 16. Imagen ejemplo y su versión en escala de grises.....	18
Figura 2. 17. Histograma de imagen en escala de grises.....	19
Figura 2. 18. Filtrado gaussiano con kernel 9x9.....	20
Figura 2. 19. Segmentación binaria.....	21
Figura 2. 20. Detección de bordes.....	22
Figura 4. 2. Área de trabajo de separación de papel (2).....	32
Figura 4. 1. Área de trabajo de separación de papel (1).....	32
Figura 4. 3. Descomposición funcional de la sección de detección.....	33
Figura 5. 1. Imagen ilustrativa de solución de tipo cajón. (1).....	38
Figura 5. 2. Imagen ilustrativa de solución de tipo cajón. (2).....	39
Figura 5. 3. Imagen ilustrativa de solución de tipo Riel para estructura de soporte.....	39
Figura 5. 4. Imagen ilustrativa de solución de tipo brazo.....	40
Figura 5. 6. Ejemplo de caja metálica para el circuito de control.....	41
Figura 5. 7. Ejemplo de sensor de rugosidad para la detección de defectos superficiales. ..	42
Figura 5. 8. Configuración de Backlighting.....	43
Figura 5. 9. Configuración de iluminación directa.....	43

Figura 6. 1. Mediciones tomadas en planta del área de trabajo (1).	53
Figura 6. 2. Mediciones tomadas en planta del área de trabajo (2).	53
Figura 6. 3. Vista lateral de simulación del área de trabajo.....	54
Figura 6. 4. Vista isométrica de simulación de área de trabajo.	54
Figura 6. 5. Vista isométrica del diseño de estructura de acople para la cámara.	55
Figura 6. 6. Vista explosionada del diseño de estructura de acople para la cámara.	56
Figura 6. 7. Brazo de sujeción para la cámara a la estructura de anclaje.	58
Figura 6. 8. Estructura de brazo de anclaje para la fuente de luz.	59
Figura 6. 9. Vista explosionada de estructura de brazo de anclaje para la fuente de luz.....	59
Figura 6. 10. Columna para el soporte de los brazos de cámara y luz.....	60
Figura 6. 11. Estructura de montaje del sistema de detección de defectos.....	61
Figura 6. 12. Estructura de sistema de detección de defectos en el área de trabajo.	62
Figura 6. 13. Diagrama de fuerzas para el sistema.....	62
Figura 6. 14. Diagrama de momentos del sistema.....	63
Figura 6. 15. Diagrama de Von Mises para el elemento.	64
Figura 6. 16. Diagrama de desplazamiento para el elemento.	64
Figura 6. 17. Diseño de prototipo de estructura de montaje.....	66
Figura 6. 18. Dimensiones de la placa de circuito de control.....	67
Figura 6. 19. Dimensiones y disposición de carcasa del sistema de control.	68
Figura 6. 20. Carcasa metálica para sección de control por Schneider Electric.	68
Figura 6. 21. Carcasa metálica para sección de control por Rose Enclosures.....	69
Figura 6. 22. Cámara Blackfly S USB3.	70
Figura 6. 23. Lente 8mm UC Series FFL.	70
Figura 6. 24. Fuente de luz ODL300 Linear Light.....	71
Figura 6. 25. Triángulos opuestos por el vértice.	71
Figura 6. 26. Diagrama de flujo del algoritmo de detección de defectos.	75
Figura 6. 27. Diagrama de bloques de la sección de procesamiento de la imagen.....	77
Figura 6. 28. Histograma de la imagen capturada por la cámara	79
Figura 6. 29. Diagrama de conexión de los elementos del sistema de control.	80
Figura 6. 30. Esquemático de circuito de luces.	82
Figura 6. 31. Esquemático de circuito de alarma y cámara.....	83
Figura 6. 32. Diagrama de flujo del algoritmo de control.	85

Figura 6. 33. Interfaz del programa de detección de defectos.....	87
Figura 7. 1. Proceso de detección: Defecto tipo gota.....	93
Figura 7. 2. Proceso de detección: Defecto tipo ranura.....	94
Figura 7. 3. Espécimen de papel con defectos de tipo gota.....	95
Figura 7. 4. Papel con ranuras hechas por tijera.....	96
Figura A 1. Esquemático de circuito de control.....	119
Figura A 2. Código para la revisión [1/11].....	120
Figura A 3. Código para la revisión [2/11].....	121
Figura A 4. Código para la revisión [3/11].....	122
Figura A 5. Código para la revisión [4/11].....	123
Figura A 6. Código para la revisión [5/11].....	124
Figura A 7. Código para la revisión [6/11].....	125
Figura A 8. Código para la revisión [7/11].....	126
Figura A 9. Código para la revisión [8/11].....	127
Figura A 10. Código para la revisión [9/11].....	128
Figura A 11. Código para la revisión [10/11].....	129
Figura A 12. Código para la revisión [11/11].....	129
Figura A 13. Código para el microcontrolador [1/6].....	130
Figura A 14. Código para el microcontrolador [2/6].....	131
Figura A 15. Código para el microcontrolador [3/6].....	131
Figura A 16. Código para el microcontrolador [4/6].....	132
Figura A 17. Código para el microcontrolador [5/6].....	133
Figura A 18. Código para el microcontrolador [6/6].....	134
Figura B. 1. Hoja de datos de cámara Blackfly S USB 3.....	135
Figura B. 2. Hoja de datos de fuente de luz ODL300 Linear Light.....	136

Lista de Tablas

Cuadro 3. 1. Preguntas realizadas al cliente	24
Cuadro 3. 2. Tabla ejemplo para filtrado de la solución.....	27
Cuadro 3. 3. Tabla ejemplo para evaluación de la solución.	27
Cuadro 4. 1. Necesidades interpretadas a partir de los enunciados del cliente.....	29
Cuadro 4. 2. Requerimientos para la estructura de montaje del sistema de detección.	34
Cuadro 4. 3. Requerimientos para la carcasa de la sección de control.....	34
Cuadro 4. 4. Requerimientos para el elemento de detección.....	35
Cuadro 4. 5. Requerimientos para el sistema de control.	36
Cuadro 4. 6. Requerimientos para la interfaz.	36
Cuadro 5. 1. Tabla de filtrado de la estructura de montaje del sistema de detección.....	45
Cuadro 5. 2. Tabla de selección de la estructura de montaje del sistema de detección.....	46
Cuadro 5. 3. Tabla de selección para la carcasa de la sección de control.	46
Cuadro 5. 4. Tabla de filtrado para el elemento de detección.	48
Cuadro 5. 5. Tabla de selección para el elemento de detección.	48
Cuadro 5. 6. Tabla de selección para el sistema de control.....	49
Cuadro 5. 7. Tabla de filtrado para la interfaz.....	50
Cuadro 5. 8. Tabla de selección para la interfaz.....	51
Cuadro 6. 1. Tabla de posibles opciones para el computador del sistema.....	81
Cuadro 6. 2. Propuesta para periféricos de ordenador.....	88
Cuadro 7. 1. Prueba de concepto para validar la detección del sistema en estado estático.	92
Cuadro 7. 2. Prueba de concepto para validar la lectura del sistema para diferentes tamaños de defectos de tipo ranura.....	95
Cuadro 7. 3. Prueba de concepto para validar la detección del sistema en estado dinámico.	97
Cuadro 7. 4. Prueba de concepto para validar el tiempo de detección del sistema.	99
Cuadro 7. 5. Prueba de concepto para validar el tiempo en funcionamiento del sistema...	100

Cuadro 7. 6. Costos del proyecto..... 106

Cuadro A. 1. Prueba #7: Cantidad de defectos detectados para una muestra de 100 defectos.
116

Capítulo 1. Introducción

1.1. Entorno del Proyecto

Proquinal se trata de una empresa dedicada a la producción de textiles, con su producto principal siendo el vinilo. El nombre de la empresa surge de su nombre original “Productos Químicos Nacionales” cuando fue fundada en 1959. Esta empresa nace en Colombia y fue hasta el 2004 que se expande a Costa Rica para aumentar su capacidad de producción. La planta de producción de la empresa está ubicada en el Coyol de Alajuela.

El proceso de producción de textiles pasa por muchas etapas de producción en donde la materia prima se transforma desde una sustancia en bruto a lo que se puede considerar una tela vinílica para su uso en cualquier sector de la industria, fabricado a la medida para las distintas condiciones a las que se van a ver expuestas dichas telas. Las etapas que se pueden encontrar en la planta de Proquinal son: Admisión de materia prima, área de masas, etapa generadora, etapa de acabado, etapa de revisión, y finalmente, el despacho del producto.

A partir de Setiembre del año 2021 surge un nuevo departamento en Proquinal encargado de la automatización de procesos industriales en planta. Antes de esto, existía automatización muy básica en la planta en donde se tenían empleados algunos PLCs y sensores para agilizar los procesos, pero estos proyectos eran gestionados por el departamento de mantenimiento y no se llevaba un control adecuado de los mismos. En este nuevo departamento se trabaja para realizar una gestión organizada y bien planteada de la automatización, en donde se busca obtener los procesos óptimos para la planta de producción. Es a partir de este departamento y su visión en la empresa que se identifican distintos puntos en el proceso de producción de la planta en donde actualmente se presentan deficiencias que pueden ser mejoradas por medio de sistemas de ingeniería, como es en el caso del proceso de separación del papel.

1.2. Definición del Problema

Generalidades

El proceso de separación del papel es una subetapa dentro de la etapa generadora en la que se debe separar el papel del resto de capas del vinilo ya que este no forma parte del producto final.

La etapa de separación de papel es una etapa crítica en el proceso, esto es porque el papel separado se requiere reutilizar hasta unas 10 veces. Sin embargo, para ser reutilizado no debe tener ningún defecto, específicamente de tipo de ranura. Esto se debe a que al iniciar el proceso de la generadora el papel es utilizado como base para el vinilo, donde a través de las diferentes etapas se puede estirar. Por lo tanto, cuando se presentan defectos de este tipo y no se alcanzan a identificar, ocurren divisiones de papel en la línea de producción, lo que implica pérdida del material.

La pérdida de material es una razón crítica para no permitir este tipo de situaciones, pero también se debe recalcar que la etapa generadora es una máquina continua en donde si existe una pérdida de este tipo se debe dar un reproceso de esta etapa, teniendo pérdidas en tiempo además de material. Cada división de papel que ocurra en la línea equivale a 250 metros de material perdidos, además de esto, para reestablecer el proceso se toman mínimo 15 minutos de la producción poniendo en la etapa generadora en marcha de nuevo

La revisión del papel es completamente manual, es decir, existe un operario que se encuentra ubicado en la etapa de separación de papel que se encarga de verificar que el papel no presente ningún defecto. Esto implica que la labor de reconocer defectos está sujeta al nivel de concentración del operario sobre una tarea muy repetitiva, por lo que se da lugar a una facilidad de error por fatiga, distracciones, entre otros. De esta manera es que, un sistema de detección de defectos que alerte al usuario presenta una función muy útil de apoyo para las funciones del operario.

Síntesis del problema

Existe la necesidad de diseñar un sistema de detección de defectos en papel que genere alertas para los operarios, con el fin de reducir la pérdida de material por rompimientos en distintos procesos de la producción.

1.3. Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema para la inspección de papel con el fin de detectar y alertar sobre defectos en este, con la finalidad de reducir la pérdida de material, mejorando la productividad en planta y la calidad del producto final.

Objetivos Específicos

1. Determinar las variables de influencia del entorno del proceso.
2. Proponer una estructura mecánica para el montaje del sistema de detección de defectos.
3. Desarrollar un sistema de detección de defectos en papel que complemente la inspección visual realizada por el operario.
4. Validar el funcionamiento del sistema de detección diseñado con el fin de que cumpla con las necesidades planteadas por la empresa.

1.4. Estructura del informe

Este informe se compone de distintas secciones que tienen como finalidad instruir al lector en cómo se desarrolló el proyecto. Las secciones del informe están dispuestas de la siguiente forma:

1. Introducción. En esta sección se plantean las generalidades del proyecto, así como el problema y los objetivos que tiene el mismo.
2. Marco teórico. Se plantean los conocimientos teóricos afines al proyecto en específico y relacionados con elementos del área específica en la que se trabaja el proyecto.
3. Metodología. En esta se explica detalladamente el modo de operación con el que se desarrolló el proyecto en cuestión.
4. Requerimientos para la solución. Se especifican los objetivos técnicos y métricas que debe alcanzar la solución.
5. Propuesta de diseño. Se deja claro cualquier especificación técnica, alcance y limitación del proyecto y se presenta una propuesta de la solución escogida que cumple con estos parámetros.
6. Diseño y desarrollo del prototipo. A partir de la propuesta de diseño seleccionada se lleva a cabo el diseño tanto en software como en hardware de la solución en forma de prototipado para realizar pruebas y obtener conclusiones.
7. Resultados y análisis. Se llevan a cabo pruebas de concepto con el fin de validar el prototipo desarrollado.
8. Conclusiones y recomendaciones. Se determina el cumplimiento de los objetivos planteados y se define el siguiente paso que podría tener el proyecto desarrollado.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Generalidades de la planta de producción

Proquinal es una empresa dedicada a la producción de textiles vinílicos, por lo tanto, la producción de estos se conforma de distintas etapas que van desde la admisión de materia prima hasta el despacho del producto final. Más concretamente, las distintas etapas son (en este orden): Admisión de materia prima, área de masas (procesamiento de materia prima), generadora, acabados, revisión y despacho. El enfoque del proyecto en cuestión es en una subetapa de la etapa generadora, por lo tanto se profundiza un poco más en esta etapa.

La etapa generadora es el cuerpo de la producción de la empresa, se le llama así porque es la etapa en la que se genera el vinilo al pasar por distintas subetapas. Esta etapa es una única línea de producción que consta de aproximadamente 250 metros de distintos procesos por los que pasa el material para llegar a ser un vinilo. La base de todas estas subetapas es el papel, ya que se utiliza para poner las distintas capas de material sobre este. Las subetapas de la generadora son las siguientes:

1. Puesta de papel: En esta etapa se toma uno de los rollos de papel (ya sea nuevo o reutilizado) que se encuentren en el cuarto de papel y se coloca al inicio de la línea para iniciar la producción. Como la línea de producción a partir de este punto es continua, en esta etapa se genera un “colchón” de material que permite dar unos 3 minutos de tiempo en caso de que exista un pequeño problema en algún punto adelante en la línea y se necesite disponer de ese tiempo para solucionar.
2. Puesta de laca y horneado: Es la primera capa de material que cae sobre el papel, esta capa protege el papel y permite la separación del papel del resto de capas en etapas posteriores, luego de la puesta de laca se debe hornear para fijar la capa.
3. Puesta de “capa” y horneado: Una sustancia que se conoce como “capa” y es producida en el área de masas. Le otorga propiedades elásticas al producto final.
4. Puesta de espuma y horneado.

5. Laminación: Etapa para reducir el espesor del producto y conseguir una unión más fuerte de las distintas capas.
6. Puesta de tela y horneado: Última capa de material que se le pone al producto; se debe hornear para que se adhiera al resto de capas.
7. Separación de papel: Etapa donde se separa el papel del resto de capas para permitir su reutilización. Además, el papel no es parte del producto final. En esta etapa se da una revisión del papel para verificar cualquier defecto generado en las etapas anteriores.
8. Etiquetado.

2.2. Tipos de papel utilizado

En la planta de producción existen distintas familias de papeles utilizados, cada una con ciertas características que se describirán a continuación. Estas características se toman de un análisis visual del papel. Las familias de papel encontradas en la planta son:

- Con relieve:
 - Avante: Se trata de un papel casi liso, con un patrón irregular en su cara con poco relieve. Es de un color amarillento. No es un papel brillante ni duro. Un ejemplo de este tipo de papel se puede observar en la imagen de la figura 2.1.



Figura 2. 1. Muestra de papel tipo Avante. Fuente: Elaboración propia.

- Alloy: A diferencia del avante, este papel sí es brillante; es decir, refleja la luz incidida sobre él. El color de este papel es crema, y tiene un patrón distintivo semejante a rayas que atraviesan el papel en su dimensión vertical, su relieve es muy bajo. Su dureza es similar al avante. Un ejemplo de este tipo de papel se encuentra en la imagen de la figura 2.2.

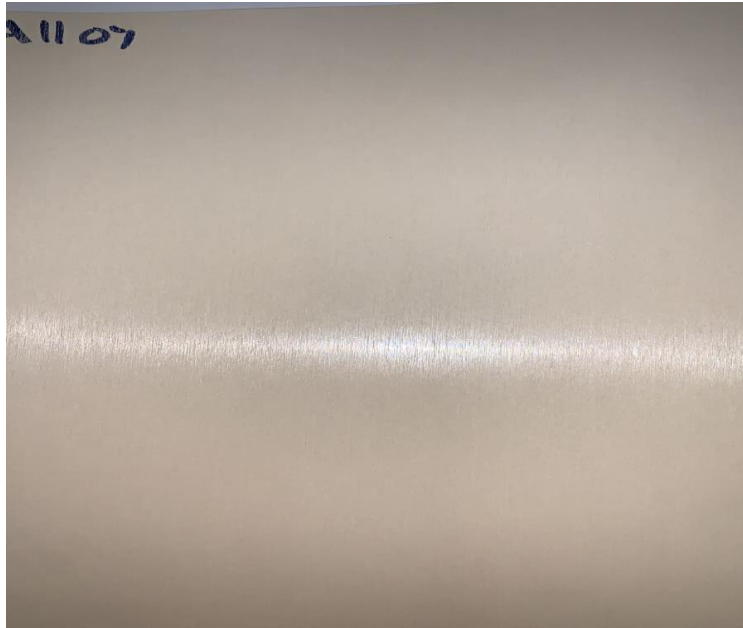


Figura 2. 2. Muestra de papel tipo Alloy. Fuente: Elaboración propia.

- Carbonium: Un papel de color blanco con un patrón regular en forma de diamante. Este papel es duro y tiene un relieve alto. No es brillante. Un ejemplo de este tipo de papel se encuentra en la imagen de la figura 2.3.



Figura 2. 3. Muestra de papel tipo Carbonium. Fuente: Elaboración propia.

- Monalisa: Papel de color blanco con un patrón irregular a lo largo de su cara, presenta poco relieve. Tiene una dureza similar al carbonium y presenta poco brillo. Un ejemplo de este papel se encuentra en la imagen de la figura 2.4.



Figura 2. 4. Muestra de papel tipo Monalisa. Fuente: Elaboración propia.

- Polo: Es el papel más duro utilizado en planta. Es de color crema y tiene un patrón regular a lo largo de su cara con relieve alto. Además, es muy brillante. Un ejemplo de este papel se encuentra en la imagen de la figura 2.5.



Figura 2. 5. Muestra de papel tipo Polo. Fuente: Elaboración propia.

- Paris: El tipo de papel menos utilizado en la planta. Es de un color blanco y tiene una dureza alta. Presenta un patrón irregular a lo largo de su cara y tiene poco relieve. Es brillante. Un ejemplo de este papel se encuentra en la imagen de la figura 2.6.



Figura 2. 6. Muestra de papel tipo Paris. Fuente: Elaboración propia.

- Lisos:
 - Normal (Liso): Es el papel más utilizado en planta. Totalmente liso y sin patrón. Es color crema y no tiene brillo. Tiene dureza similar al avante. Un ejemplo de este tipo de papel se observa en la imagen de la figura 2.7.



Figura 2. 7. Muestra de papel tipo Liso (Normal). Fuente: Elaboración propia.

- Delta: Muy similar al anterior, pero color blanco. Es un poco más duro que el anterior. Un ejemplo de este tipo de papel se observa en la imagen de la figura 2.8.



Figura 2. 8. Muestra de papel tipo Delta. Fuente: Elaboración propia.

2.3. Tipos de defectos que se encuentran en el papel

Durante la línea de producción se pueden generar distintos defectos sobre el papel, los defectos conocidos son:

- Rotura: Se refiere a un rompimiento en una porción del área transversal del papel, sin contar los bordes de este. Son sencillos de detectar en caso de que lleguen a la zona de separación de papel, pero en medio de la línea de producción son muy propensos a causar una división de papel. Se puede observar un ejemplo en la imagen de la figura 2.9.

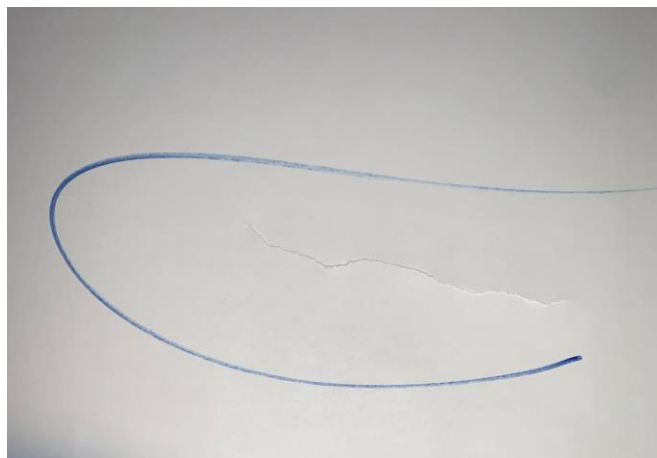


Figura 2. 9. Rotura o rompimiento de papel. Fuente: Elaboración propia.

- Ranura: Rompimiento o rasgadura en el borde del papel. Usualmente muy pequeños en tamaño, desde unos 0.5 mm. Son muy difíciles de detectar a simple vista y son muy propensos a generar divisiones de papel. El cliente los cataloga como defectos críticos de detección y son uno de los dos tipos de defectos que se consideran para este proyecto. Un ejemplo de este tipo de defecto se encuentra en la imagen de la figura 2.10, encerrados en un recuadro rojo.

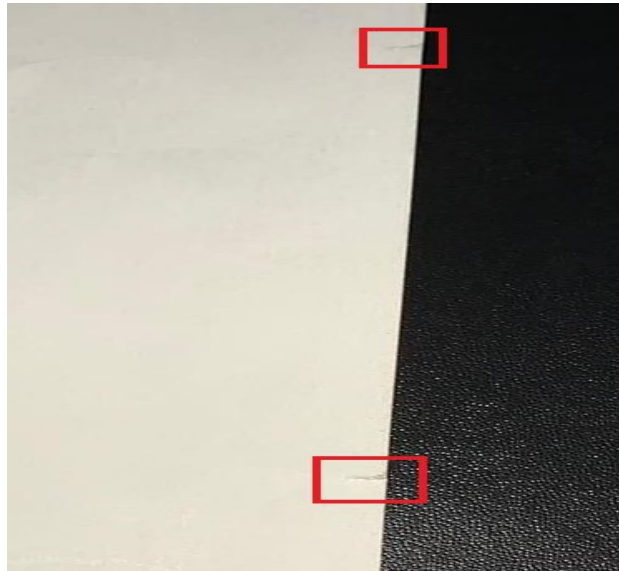


Figura 2. 10. Ranura al borde del papel. Fuente: Elaboración propia.

- Gota de material: Como su nombre lo indica, se refiere a una gota de material que cae sobre el papel y no se separa con el resto del producto. Pueden ser gotas de cualquiera de las capas anteriores, pero generalmente son gotas de laca. Pueden aparecer en cualquier punto del área transversal del papel y estos defectos en el papel al no ser detectados causan levantamientos de material en la línea. Un levantamiento de material ocasiona que la capa de material no se deposite de forma uniforme en toda la cara del producto lo que forma defectos superficiales como burbujas, puntos o rayas en el producto final reduciendo su calidad. Son el otro tipo de defecto que se considera para este proyecto. Un ejemplo de estos defectos se encuentra en la imagen de la figura 2.11.



Figura 2. 11. Gotas de material. Fuente: Elaboración propia.

- Mancha de laca: Se refiere a un oscurecimiento del papel provocado por la capa de laca. Usualmente se da en los bordes del material. Este no es un defecto crítico pues no ocasiona división de papel. Un ejemplo de este tipo de defecto se encuentra en la imagen de la figura 2.12.

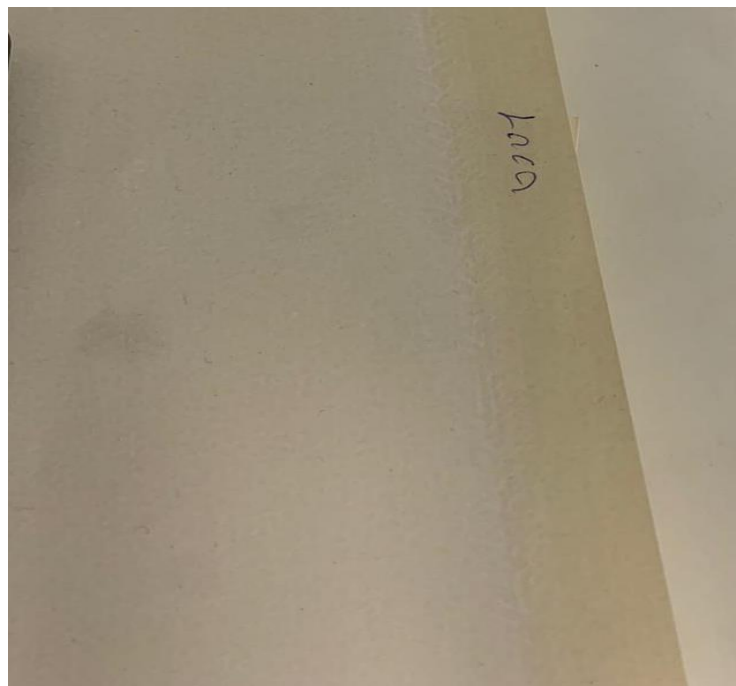


Figura 2. 12. Mancha de laca. Fuente: Elaboración propia.

- Separación de capa (delaminación): Este defecto se refiere a la separación del papel en distintas capas, esto ocasiona que se puedan desprender las capas de forma que se pierden las características físicas del papel en donde ocurre dicho desprendimiento. Se puede observar un ejemplo de este tipo de papel en la imagen de la figura 2.13.

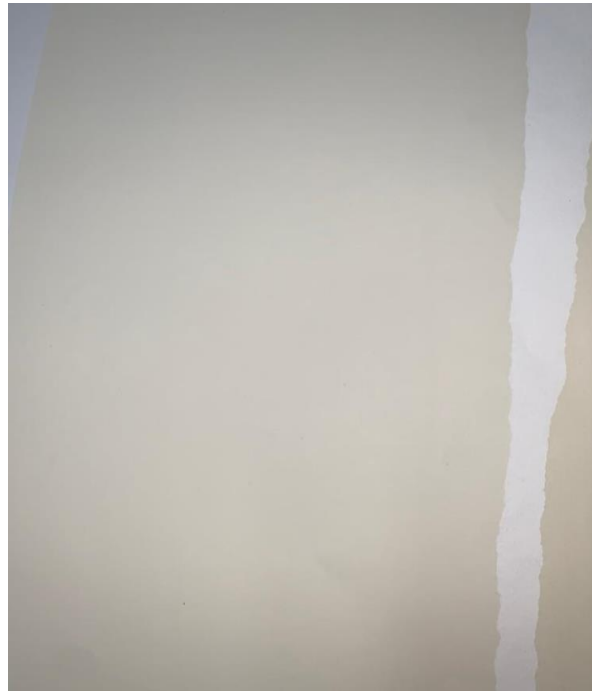


Figura 2. 13. Delaminación. Fuente: Elaboración propia.

2.4. Sistemas de visión por computadora

2.4.1. Visión por computadora

La visión por computadora es una herramienta de ingeniería que permite analizar elementos reales utilizando imágenes capturadas mediante cámaras. Según Vélez [1], “La visión artificial tiene como finalidad la extracción de información del mundo físico a partir de imágenes, utilizando para ello un computador”. Esta herramienta es perfecta para sustituir labores que se tornan repetitivas y/o monótonas para el ojo humano, pues una cámara no se fatiga como el ojo humano luego de un trabajo continuo, ni tiene problemas de percepción causado por contraste o por ruido en los datos procesados. La muy conocida ilusión de Cornsweet [2] es una buena ilustración de cómo se ven afectadas las capacidades visuales de un humano. En la imagen de la figura 2.14 se observa esta ilusión, en donde se observan dos

regiones con, aparentemente, brillos distintos, siendo la de la derecha un poco más oscura que la de la izquierda. Al observar la imagen de la figura 2.15, se revelan sus verdaderos brillos, pues al tapar la región de alto contraste en la imagen se puede apreciar que el área periférica de cada región siempre tuvo el mismo brillo.



Figura 2. 14. Ilusión de Cornsweet (1/2). Fuente: [3]

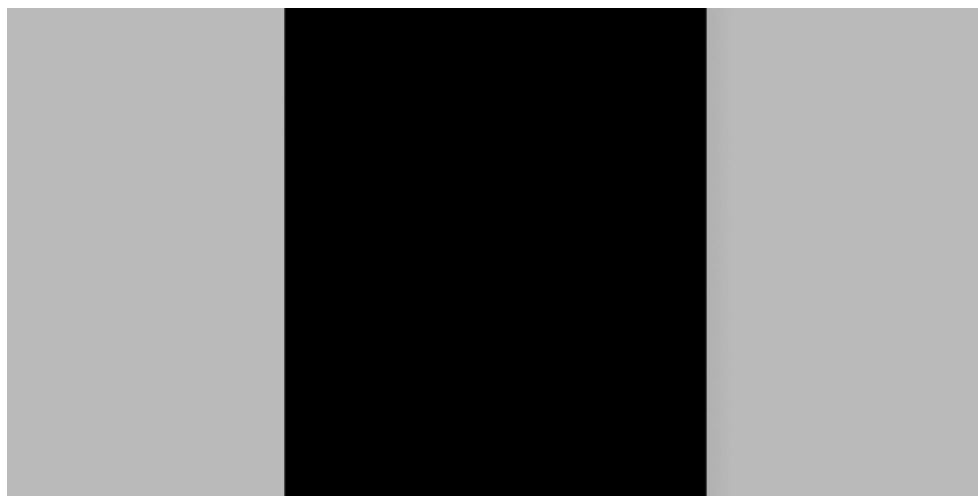


Figura 2. 15. Ilusión de Cornsweet (2/2). Fuente: [3]

2.4.2. Sistema de visión por computadora

Un sistema de visión por computadora es la combinación de todos los elementos necesarios para capturar, procesar y analizar una imagen para obtener el resultado esperado, ya sea identificar características, reconocer objetos, medir distancias, entre otros. Los sistemas de visión están usualmente compuestos por los siguientes elementos:

- Cámara.
- Lente.
- Fuente de iluminación.
- Computador.

2.4.2.1 Cámara.

Es el elemento utilizado para capturar las imágenes del área de trabajo objetivo. Según Nixon y Aguado [4], la cámara es el elemento sensor básico; la mayoría de las cámaras dependen de las propiedades de la luz al incidir en su sensor para generar una imagen. Su parámetro más importante es la resolución en píxeles, que se refiere a la cantidad de píxeles en las dimensiones horizontal y vertical que ofrece la cámara para trabajar. Este parámetro permite determinar el área de trabajo y la relación pixel por milímetro, que es necesaria para realizar el análisis de las características que se pueden obtener en los elementos de una imagen.

2.4.2.2 Lente.

En las palabras de Steger [5], “un lente es un dispositivo óptico por el que se enfoca la luz para formar una imagen dentro de una cámara. El propósito de un lente es crear una imagen definida en la que se puedan resolver los detalles más finos”. El lente permite mejorar las capacidades de captura de una imagen. Su parámetro más importante es la distancia focal, el cual se refiere a la distancia desde el sensor de la cámara hasta el eje central del lente.

2.4.2.3 Fuente de iluminación.

Según Steger [5] el objetivo de la iluminación de un sistema de visión es el de lograr que las características importantes de un objeto sean visibles y, a su vez, suprimir las características no deseadas de este. Existen distintos tipos de fuentes de iluminación para sistemas de visión, entre ellos la luz estroboscópica, que se refiere a una luz discontinua en el tiempo pero con un patrón de disparo. Este tipo de iluminación es especialmente bueno para capturar elementos en movimiento, ya que, al sincronizar el disparo de luz con el disparo de la cámara se logra una captura del elemento como si estuviera estático.

Además, existen distintos tipos de configuración de iluminación. Entre estos existe la iluminación por contraste (backlighting) que se refiere a poner el elemento u objeto de inspección en el medio de la fuente de luz y el sensor de la cámara [5]. Esta configuración permite analizar detalles del contorno del elemento ya que sólo muestra las siluetas si es un elemento opaco. Para objetos transparentes también permite visualizar partes internas del objeto porque evita las reflexiones causadas por iluminación directa.

2.4.2.4 Computador.

Es el elemento del sistema que se encarga de procesar los datos (imágenes) obtenidos por la cámara. Es el cerebro de la operación y permite realizar el análisis necesario para obtener los resultados esperados. Gracias a la evolución de los procesadores a lo largo de los años, el procesamiento paralelo otorgado por varios núcleos en un procesador beneficia cada vez más los requerimientos computacionales de un sistema de visión.

2.4.3. Procesamiento de imagen

Corke [6] dice sobre el procesamiento de imagen: “El procesamiento de imagen es un proceso de computación que transforma una o varias imágenes de entrada en una imagen de salida”. El proceso llevado a cabo durante esta etapa varía dependiendo del resultado que se busca para el sistema, pero siempre es seguro que durante esta etapa se van a llevar a cabo transformaciones de la imagen mediante filtrados para extraer las características más importantes. Algunas de las transformaciones que se pueden encontrar son: conversión a escala de grises, filtrado gaussiano, segmentación y detección de bordes.

2.4.3.1 Escala de grises.

Usualmente, las imágenes capturadas por las cámaras para los procesos de visión son a color, es decir, presentan al menos 3 canales para representar los valores de cualquier color dependiendo del sistema en el que se encuentre. Para muchas aplicaciones de los sistemas de visión por computadora, el color no es una característica representativa que permita obtener conclusiones respecto al elemento observado, por lo tanto, una práctica valiosa en este campo es transformar la imagen a una escala de grises representativa de la misma, en donde se convierten los 3 (o más) canales en uno solo que representa la intensidad de cada color mediante un valor de gris. Como Davis menciona en [7], la cantidad de espacio y velocidad

de procesamiento requeridos para analizar el color en una imagen son muy altos, por lo tanto, la decisión del análisis del color debe ser bien justificada según el objetivo de la inspección. En las imágenes de la figura 2.16 se muestra una imagen a color y su versión en escala de grises a modo de ejemplo.

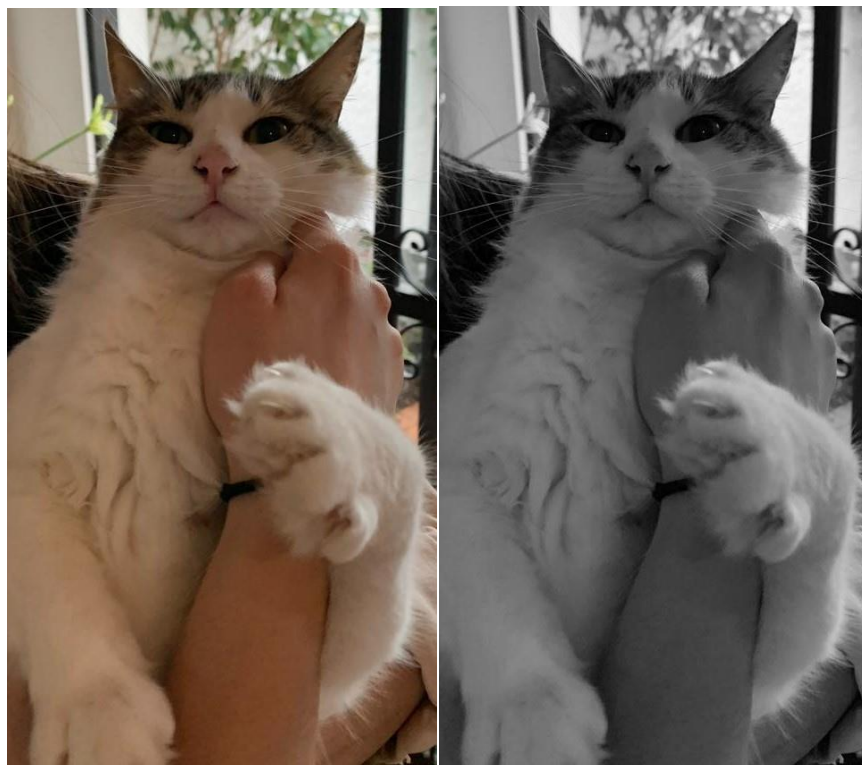


Figura 2. 16. Imagen ejemplo y su versión en escala de grises. Fuente: Elaboración propia.

2.4.3.2 Histograma.

El histograma es una herramienta que muestra la distribución de los valores de píxeles en una imagen. Indica el número de píxeles que se encuentran por cada valor de píxel, entre 0 y 255. Esta herramienta provee información útil sobre la calidad de la imagen y la composición de la escena [6]. Es comúnmente utilizada para imágenes en escala de grises, en donde se puede comparar el valor de gris de los píxeles de la imagen. Si se desea utilizar para imágenes a color, se debe realizar un histograma para cada uno de sus canales. En la imagen de la figura 2.17 se muestra un ejemplo del histograma para la de la figura 2.16 en escala de grises.

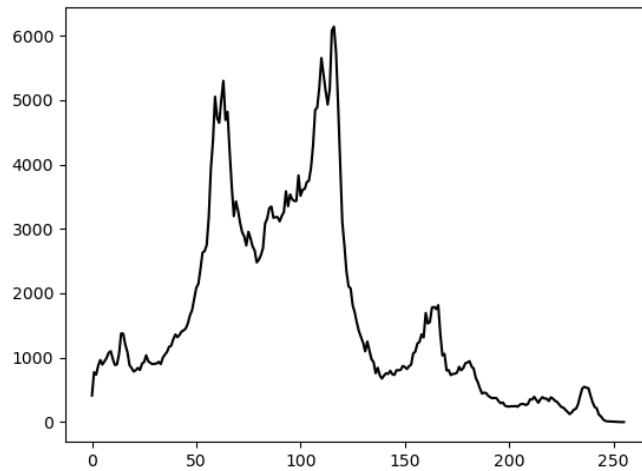


Figura 2. 17. Histograma de imagen en escala de grises. Fuente: Elaboración propia.

2.4.3.3 Filtrado gaussiano.

Se utiliza para reducir el ruido que puede tener una imagen. Utiliza la operación de convolución para aplicar un modelo gaussiano a la imagen de modo que un punto en la imagen suavizada se calcula de la suma de una región (kernel, matriz más pequeña que la imagen) en donde los puntos centrales de dicha región tienen más peso que los puntos en su periferia [4]. El kernel aplicado para este tipo de filtrado se puede ajustar dependiendo de la necesidad. Un kernel mayor remueve mayor ruido pero también detalles de la imagen, lo que puede ocasionar la pérdida de características deseadas. En la imagen de la figura 2.18 se muestra un filtrado gaussiano con un kernel fuerte, es decir, de tamaño 9x9. Se puede observar la reducción de detalles, por ejemplo los ojos y los bigotes del gato se muestran un poco más borrosos.



Figura 2. 18. Filtrado gaussiano con kernel 9x9. Fuente: Elaboración propia.

2.4.3.4 Segmentación.

Según [1], la segmentación consiste en aislar los elementos que interesan de una escena para comprenderla. El objetivo de esta etapa es separar del objeto de inspección aquellos elementos de la imagen que no son de interés, permitiendo realizar un posterior análisis de la imagen con mayor sencillez. Existen distintos tipos de segmentación pero la más conocida es la segmentación binaria, en donde para su versión más básica se determina un valor límite de pixel en escala de grises y se determina que cualquier pixel que esté sobre ese valor se cambia su valor a uno previamente establecido, mientras que si está por debajo de ese valor se lleva a 0. En la imagen de la figura 2.19 se observa a modo de ejemplo, la segmentación binaria de la imagen de la figura 2.16. Se puede observar como el pelaje alrededor de la cara del gato se mantiene en un valor de pixel bajo, en este caso 0, mientras que el resto del pelaje se dispara a un valor de pixel de 255.



Figura 2. 19. Segmentación binaria. Fuente: Elaboración propia.

2.4.3.5 Detección de bordes.

Dependiendo de la solución es necesario realizar una detección de bordes en la imagen. Esto permite identificar los distintos objetos dentro de la imagen. También existen distintos métodos para la detección de bordes en una imagen, con el más famoso siendo el filtrado Canny [4]. El filtro de canny se basa en encontrar el gradiente de pequeñas regiones de la imagen. Cada gradiente se compone de su magnitud y dirección, de forma que puede determinar poco a poco la existencia de un borde. Luego de obtener los gradientes, se escanean todos los píxeles de la imagen para eliminar los píxeles no deseados que pueden ser generados por ruido. Finalmente, se aplica una función de umbral de histéresis en el cual se decide, mediante una función, cuales píxeles son borde y cuales no. Para esto se necesita únicamente dos valores de umbral, uno mínimo y uno máximo. Si los píxeles se encuentran sobre el umbral máximo, se considera como borde, y si se encuentra por debajo del mínimo no se considera como borde. En el caso en el que el píxel se encuentre entre los 2 valores de umbral, se revisa si su vecindario está formado por píxeles de borde, en cuyo caso se considera como borde de igual forma. Si no, se aplica una función para determinar si es o no borde. En la imagen de la figura 2.20 se puede observar un ejemplo del filtro de canny para la detección de bordes. Este filtro se le aplica a la imagen de la figura 2.19, y se puede

observar bajo comparación directa que los bordes más pronunciados de la imagen se destacan, siendo estos los cambios entre píxeles de valor 0 y píxeles de valor 255.



Figura 2. 20. Detección de bordes. Fuente: Elaboración propia.

2.5. Microcontrolador

Un microcontrolador es, con palabras de Moreno y Córcoles [8], “dispositivo electrónico que integra en él mismo un gran número de componentes y que tiene la característica de ser programable. Es decir, es un circuito integrado programable. La gran ventaja de los microcontroladores es que funcionan como dispositivos electrónicos que son capaces de llevar a cabo operaciones lógicas”. Esto implica que estos dispositivos tienen una enorme cantidad de aplicaciones en la electrónica. Una de sus aplicaciones más importantes es el acondicionamiento y sincronización de señales. Esto es, en el caso de tener un sistema que requiere comunicación entre varios dispositivos, un microcontrolador permite tomar las señales de entrada y salida y procesarlas de forma que estén sincronizadas unas con otras. Una gran herramienta de los microcontroladores para llevar esta sincronización a cabo es las llamadas interrupciones del sistema. Una interrupción es, en otras palabras, un evento que se lleva a cabo al activarse una bandera. Esta bandera puede ser activada tanto interna como

externamente, y es especialmente útil porque permite llevar a cabo instrucciones que no son parte del programa principal, es decir, permiten cambiar el comportamiento del sistema en consecuencia a las condiciones de trabajo del sistema. De forma externa, las interrupciones se pueden activar mediante señales de entrada debidamente conectadas a una de sus entradas específicas para este propósito. De forma interna, las interrupciones más utilizadas son las conocidas como temporizadores. Los temporizadores permiten activar el evento de la interrupción cada cierto tiempo, y son especialmente útiles para sincronizar aplicaciones como tiempos de disparo de cámaras y luces, por ejemplo.

Un microcontrolador se compone de 3 elementos principales [8]:

- Entradas y salidas: Usualmente conocidas como el GPIO de la placa. Es el elemento del microcontrolador que se encarga de la comunicación con el exterior.
- CPU: La unidad central de procesamiento y el elemento más importante del microcontrolador, ya que se encarga de ejecutar las instrucciones de forma correcta.
- Memoria: Elemento encargado de almacenar toda la información, tanto de las instrucciones como los datos a procesar. Existen dos tipos de memoria en un microcontrolador:
 - Memoria persistente: Memoria que almacena la información de forma permanente, incluso sin tener energía eléctrica. Las instrucciones del programa se guardan en este tipo de memoria.
 - Memoria volátil: Memoria que almacena la información hasta que deja de recibir alimentación eléctrica. Es decir, el estado de la información almacenada en esta memoria se reinicia al volver a recibir energía eléctrica.

Capítulo 3. Metodología

La metodología desarrollada en este proyecto se basó en gran medida en la metodología para el diseño y desarrollo de productos de Ulrich y Eppinger [9], en donde se trata de llevar un producto desde las necesidades de un cliente hasta una solución final que satisfaga estas necesidades.

3.1. Identificación de necesidades del cliente

En esta sección de la metodología se obtiene toda la información necesaria para definir las limitaciones y especificaciones que requiere el proyecto. Para lograr esto, se recurre a métodos de recopilación de información directos e indirectos, como lo fueron la entrevista y el análisis de la propuesta de proyecto por parte del cliente.

3.1.1. Análisis de información previa

Esta parte del proceso consiste en realizar un primer análisis acerca de lo que se expresa directamente en el planteamiento del problema otorgado por el cliente, esto representa el primer contacto con el cliente y sus necesidades. En este planteamiento se consternan algunos puntos relevantes acerca de la descripción del problema de manera general desde la perspectiva propia del cliente.

3.1.2. Planteamiento de entrevista

En este apartado se plantean una serie de preguntas dirigidas al cliente con la finalidad de ampliar sobre las necesidades de este para el desarrollo del proyecto. Con los resultados de esta entrevista se procesa la información de forma que se obtienen necesidades interpretadas que se jerarquizan en grupos y se establece un nivel de importancia.

Cuadro 3. 1. Preguntas realizadas al cliente

No. Pregunta	Pregunta
1	¿Cuáles son los tipos de capas o procesos que pueden dañar el material?
2	¿Cuáles son los tipos de defectos en el papel y cuál es su orden de prioridad?
3	¿En dónde se ubican los defectos a lo ancho del papel?
4	¿Cuál sería un aproximado de la frecuencia de los defectos?
5	¿Cuál es el ancho del papel?
6	¿Se utilizan distintos papeles, en qué se diferencian?

7	¿A qué velocidad se realiza la revisión?
8	¿La máquina separadora de papel trabaja todo el día?
9	¿Qué debe cumplir el sistema para ser considerado exitoso?
10	¿Qué partes son fundamentales para ustedes que tenga el sistema?
11	¿Cuántas alarmas para el operario debe tener el sistema?

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Procesado de información

Para esta sección se tomaron las respuestas o enunciados otorgados por el cliente y se interpreta una necesidad a partir de ellas. De esta forma, se planteó un conjunto de necesidades y requisitos que debe contemplar la solución generada.

3.1.4. Jerarquización y Categorización de las necesidades

Para realizar la jerarquización y categorización se analizaron las necesidades interpretadas y se agruparon dependiendo del tipo de necesidad que se menciona para englobarlas en grupos más grandes que permiten realizar un segundo análisis de la información y obtener, de ser necesario, una necesidad secundaria o terciaria a partir de la necesidad interpretada por el cliente.

3.2. Establecimiento de especificaciones objetivo

Para esta sección se definen las posibles métricas que competen a cada necesidad, de forma que se tenga un método confiable de determinar el grado de cumplimiento de cada una de estas. Para lograr esto primero se realiza una descomposición funcional del sistema y luego se establecen las necesidades y métricas para cada subgrupo de la solución.

3.2.1. Estudio del problema

En este apartado se trata el problema primeramente como una caja negra y se llega al objetivo final de dividirlo en subsecciones individuales que se pueden ver como objetivos a solucionar separados.

3.2.2. Establecimiento de especificaciones

Al contar con las necesidades y los subgrupos en los que se puede dividir el problema, se procede a establecer las especificaciones para cada subgrupo, de modo que todos los aspectos de la solución sean totalmente medibles y se garantiza una solución satisfactoria.

3.3. Planteamiento de posibles soluciones

Para esta sección se partió de la descomposición del problema y se realizó la búsqueda de los distintos conceptos que puedan ser objetos a solución, de modo que se obtuvieron distintas propuestas que se evalúan para determinar su validez antes los requerimientos del problema.

3.3.1. Búsqueda de conceptos

La búsqueda de conceptos se da tanto interna como externamente, de modo que para la búsqueda interna se realizó una lluvia de ideas para cada uno de los grupos definidos anteriormente. Luego, se realizó una búsqueda externa por medio de bibliografía y referencias a patentes que podrían ser similares al objetivo de la solución.

3.3.2. Construcción de prototipos

Al tener distintos conceptos producto de la búsqueda, se plantean distintos prototipos de solución para cada grupo establecido, que cumplan con los requerimientos propuestos.

3.4. Selección y establecimiento de candidato a prototipo

En esta sección se tomaron una serie de decisiones con la finalidad de establecer un candidato a prototipo. Este candidato a prototipo es producto del análisis de las posibilidades generadas por los distintos conceptos estudiados.

3.4.1. Etapa de filtrado

Para realizar el filtrado de los prototipos se basa en el desempeño de cada uno bajo ciertos criterios que son muy similares a las especificaciones planteadas. Para esto, se definió uno de los prototipos como referencia y se determina cuáles de los otros prototipos se desempeñan de mejor o peor manera en cada uno de estos criterios. En este caso, una puntuación de positivo o “+” se refiere a que para ese criterio es mejor que la referencia, por ejemplo, en el posible criterio de costo un “+” significa que tiene menor costo que la referencia, mientras que un “-” se refiere a un punto negativo respecto a la referencia, utilizando el mismo ejemplo se referiría a mayor costo. Finalmente, se contabilizaron los positivos y negativos y se tomó la primera decisión de conceptos ganadores. Para realizar este filtrado se hizo un análisis gráfico por medio de una tabla que permitiera una visualización sencilla de los parámetros. La tabla en cuestión se encuentra en el cuadro 3.2.

Cuadro 3. 2. Tabla ejemplo para filtrado de la solución.

Criterio de selección	Concepto			
	1	2	3	4

Suma +				
Suma 0				
Suma -				
Evaluación Neta				
Posición				
¿Combinar?				

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Etapa de evaluación

En el caso de la etapa de evaluación se trabajó de forma similar a la de filtrado, pero esta vez se determinó un valor numérico y un ponderado relativo al peso que tiene cada criterio para tomar una decisión sobre el prototipo de solución a realizar. La tabla base para realizar este procedimiento es la mostrada en el cuadro 3.3. En este cuadro el apartado E.P significa evaluación ponderada en donde se obtiene la relación de la calificación otorgada por el peso definido para este criterio. Finalmente, se contabilizan los puntos y se selecciona un ganador según las posiciones finales de cada concepto.

Cuadro 3. 3. Tabla ejemplo para evaluación de la solución.

Criterio de selección	Peso (%)	Concepto			
		1		2	
		Calificación	E.P	Calificación	E.P
Total de Puntos					
Posición					

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Prototipado y Pruebas de concepto

Para esta última etapa se realizó un prototipo funcional a partir de la selección anterior, y se realizó la validación de los requerimientos mediante pruebas de concepto propiamente planteadas para evaluar el desempeño de la solución.

3.5.1. Prototipado

Se procedió a realizar el diseño correspondiente a cada uno de los grupos de solución mediante lo planteado en la propuesta de prototipo, y se llevó a cabo la confección de estos. En este caso, el tipo de prototipo realizado se definió por las secciones de cada solución, es decir, para la sección de la estructura mecánica el prototipado se refiere a una simulación del sistema en el área de trabajo, mientras que para la sección de la detección el prototipado se refiere a un ejemplo físico de detección con los conceptos seleccionados.

3.5.2. Pruebas de concepto

Para definir las pruebas de concepto que se utilizaron para validar la solución propuesta, se debió establecer las variables a medir, que son a partir de las necesidades y requerimientos del cliente que se logran obtener, y los factores de influencia, que se obtuvieron luego de un análisis de las variables a medir para determinar los aspectos que dan la variación de estas. Además de esto, se estableció un valor y/o rango para los factores de influencia que fue basado en el conocimiento previo del entorno y del proceso al cual está sujeta la solución.

Capítulo 4. Requerimientos para la solución

4.1. Análisis de la información otorgada por el cliente

De primera entrada, se reconoce como causa principal del problema la revisión manual de los rollos, dado que esto genera mucha incertidumbre por parte de errores humanos como fatiga, distracción, entre otros. El cliente informa que el operario de turno suele no darle mucha importancia porque conoce que se va a realizar una segunda inspección en el cuarto de papeles, volviendo crítica la función del personal que realice la segunda revisión. Se reconoce como el defecto más crítico y con más interés del cliente a detectar, las ranuras en el borde del papel ya que son las que generan efectos más graves en el proceso de producción.

Cuadro 4. 1. Necesidades interpretadas a partir de los enunciados del cliente.

No. Pregunta	Enunciado	Necesidad Interpretada
1	Cualquiera que se encuentre antes de la separación de papel.	Sin necesidad asociada.
2	El más crítico viene siendo las ranuras, luego de eso están las gotas de material como laca, etc.	El sistema debe identificar sin falta todas las ranuras que aparezcan en el papel, así como también identificar otros posibles defectos.
3	En general aparecen a lo ancho del papel, pero las ranuras son específicamente en los bordes de este.	La solución debe estar ubicada de forma que pueda identificar defectos en los bordes del papel.
4	No se tiene una métrica que cuantifique los defectos detectados a lo largo de tiempo.	Sin necesidad asociada.
5	El papel es de ancho variable.	El sistema se debe situar de forma que contemple el máximo y el mínimo ancho posible.
6	Sí. Existen distintas calidades de papel y se utilizan dependiendo del	La solución debe ser capaz de detectar defectos para variaciones de papel dentro de una especificación.

	pedido. Puede haber cambios leves en color.	
7	Aproximadamente entre 25 y 30 m/min.	La solución debe poder realizar la detección a una velocidad definida.
8	Únicamente se detiene los domingos.	El sistema debe ser capaz de operar de forma continua.
9	Debe ser capaz de detectar las ranuras en los bordes del papel de forma tanto estática como dinámica, el área crítica son los bordes, el resto del material no es prioridad. Debe ser capaz de generar una alerta tanto visual como sonora para que capte la atención del operario.	-
10	Es fundamental que el sistema tenga una alerta tanto sonora como visual para captar la atención del operario, que su campo de revisión contemple los bordes del material, y que se nos brinde las consideraciones necesarias para que el sistema funcione correctamente. También, el controlador que se vaya a utilizar necesita tener comunicación IP.	La solución debe tener un sistema de alertas integrado y debe tener la posibilidad de comunicación IP.
11	Es necesario únicamente una alarma que le indique al operario que se detectó un defecto, indiferente de cuál sea.	El sistema debe tener al menos una alarma para indicar la detección de algún defecto.

Fuente: Elaboración propia.

Como nota adicional, el cliente solicita que se contemple utilizar la misma iluminación que ya existe en el área de trabajo. También, se menciona que para una primera

implementación del sistema lo crítico es evaluar los extremos del papel, pero para un futuro sería una ventaja que se pudiera adicionar una detección al resto del material revisado.

Es gracias al cuadro 4.1 que se realizó una agrupación de las necesidades interpretadas bajo categorías planteadas para relacionarlas bajo un mismo tema. De esta forma es que se presenta la siguiente categorización y jerarquización:

- El sistema se adapta completamente al área de trabajo:
 - La solución está ubicada de forma que pueda identificar defectos en los extremos del papel.
 - La solución está situada de forma que se contempla el ancho máximo y mínimo posible de un material.
 - La solución no afecta la revisión del operario, es decir no obstruye la línea de visión para su revisión.
 - El sistema utiliza la iluminación del área de trabajo sin necesidad de agregar elementos de iluminación.
- El sistema detecta correctamente los defectos en el material:
 - La solución detecta los defectos más críticos en el material.
 - La solución detecta defectos en un estado estático.
 - La solución detecta defectos en estado dinámico, es decir, a cierta velocidad de revisión.
 - La solución detecta defectos no tan críticos pero que pueden impactar negativamente el proceso de generación de vinilo.
 - La solución cuenta con al menos una alerta o alarma auditiva y visual de modo que llame la atención del operario.
- El controlador tiene la posibilidad de comunicación IP para acoplarse, en un futuro, con el sistema de datos de la planta.
- El sistema es capaz de operar de forma continua.

4.2. Descomposición funcional del problema

Es debido a un análisis del problema que se llegó a la conclusión de que este es divisible en dos grandes secciones con sus distintas subsecciones que representan los diferentes objetivos a solucionar.

Primero, se define una sección mecánica que comprende las estructuras que funcionan como sostén y anclaje para los distintos elementos. De esta forma, se definió un subgrupo que se refiere a la estructura de sostén del sistema de detección, que tiene como función dar ese sostén a los elementos que comprenden el sistema como también el anclaje de esta estructura en el área de trabajo. En las imágenes de las figuras 4.1 y 4.2 se tiene lo que es un detalle del área de trabajo de separación de papel, en donde se puede observar que está comprendida por una serie de rodillos que tensan y enrollan el papel en un último rodillo para ser extraído. Luego, se tiene un subgrupo que se encarga de dar la protección necesaria para los elementos de la sección de control, esto en forma de una carcasa para el circuito.



Figura 4. 2. Área de trabajo de separación de papel (1).



Figura 4. 1. Área de trabajo de separación de papel (2).

Por otra parte, se define una sección de detección que comprende los algoritmos, elementos y circuitos que realizan la detección en sí, en la imagen de la figura 4.3 se muestran la interpretación de la descomposición de esta sección. Primero, se definió un subgrupo correspondiente al elemento de detección, el cual comprende los sensores o actuadores que se utilizan para la detección de defectos, y el algoritmo o software que realice el procesamiento respectivo para determinar el defecto. Seguidamente, se definió un subgrupo para el sistema de control en donde se planteó el circuito de acondicionamiento y sincronización de señales para el elemento de detección. Finalmente, se definió un último subgrupo que se refiere a la interfaz de la solución, para las funciones de inicio y apagado de la solución.

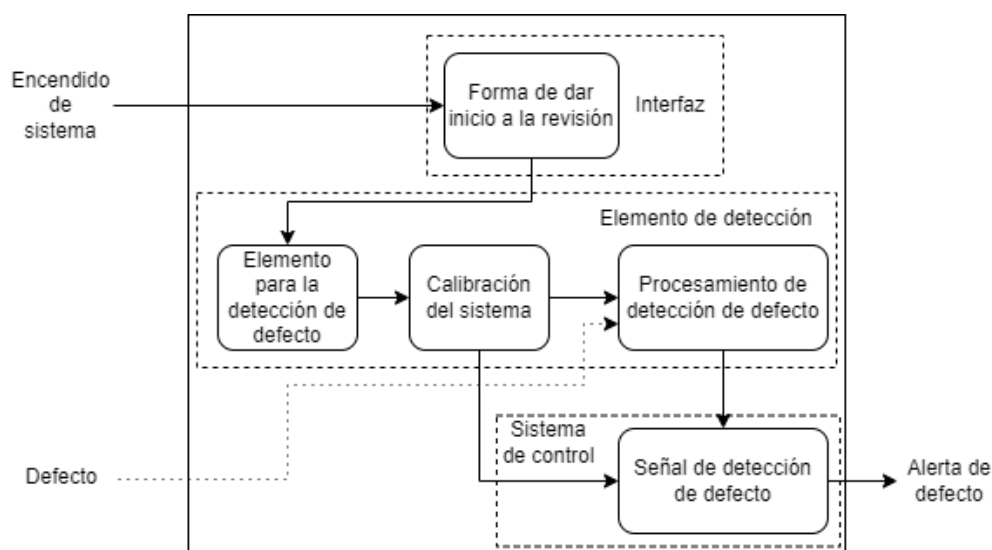


Figura 4. 3. Descomposición funcional de la sección de detección. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Requerimientos

Para determinar los requerimientos se trabajó sobre las necesidades planteadas y su validez para cada uno de los subgrupos de modo que se obtiene una lista de requerimientos para cada uno.

4.3.1. Sección mecánica: Estructura de montaje del sistema de detección

Cuadro 4. 2. Requerimientos para la estructura de montaje del sistema de detección.

No.	Requerimiento	Métrica	Valor Ideal	Unidad
1	Largo máximo de la estructura	225	<225	cm
2	Distancia entre elementos de detección	150 - 183	166.5	cm
3	Obstrucción a la revisión del operario	Si/No	No	binario
4	Obstrucción al paso del material	Si/No	No	binario

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 4.2 se presentan los requerimientos que se definieron para la estructura de montaje del sistema de detección, en donde el requerimiento No. 1 se refiere al valor máximo del largo que debe tener la estructura en su totalidad, acotado por el área de trabajo donde se sugiere realizar el montaje; este largo se refiere a la distancia horizontal de lado a lado del área de trabajo. El requerimiento No. 2 hace referencia a la distancia que debe haber entre un elemento de detección y otro para que puedan identificar el área crítica del papel, la cual son los bordes; es por esto por lo que este requerimiento se define en base a los tamaños mínimos y máximos del material a revisar. Para los requerimientos No. 3 y No.4 se buscó que la estructura no fuera a interferir de ninguna forma con el proceso de separación de papel, por lo que es necesario detallar que esta no puede obstruir ni la línea de visión del operario para su revisión, ni el paso del material al ser enrollado.

4.3.2. Sección mecánica: Carcasa de sección de control

Cuadro 4. 3. Requerimientos para la carcasa de la sección de control.

No.	Requerimiento	Métrica	Valor Ideal	Unidad
1	Está aislada al polvo	IP 50 o similar	IP 50	Grado de protección IP
2	Obstrucción a la revisión del operario	Si/No	No	binario
3	Obstrucción al paso del material	Si/No	No	binario

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 4.3 se presentan los requerimientos que se definieron para la carcasa de la sección de control. Como No. 1 se plantea el grado de protección de la carcasa contra el polvo ya que esta va a tener en su interior circuitos y dispositivos electrónicos los cuales

deben estar protegidos para prolongar su vida útil. Se planteó un grado de protección IP 50 que garantiza cierta protección contra el polvo, aunque no total, y cero protecciones contra agua pues el sistema no se encuentra en uso en una ubicación donde esto pueda ser un problema. Como requerimiento No. 2 y No. 3 se planteó, de igual forma a la anterior, que la estructura no represente ninguna interferencia a la línea de visión para el operario ni una obstrucción al paso del material pudiendo generar problemáticas en el proceso.

4.3.3. Sección de detección: Elemento de detección

Cuadro 4. 4. Requerimientos para el elemento de detección.

No.	Requerimiento	Métrica	Valor Ideal	Unidad
1	El elemento necesita iluminación adicional	Si/No	No	binario
2	El elemento detecta defectos en estado estático	Si/No	Si	binario
3	El elemento detecta defectos en estado dinámico	Si/No	Si	binario
4	Velocidad de detección del elemento	25 - 30	30	m/min
5	Detecta defectos de tipo ranura de un tamaño mínimo	0.5 - 1	0.5	mm
6	Horas de operación del elemento en forma continua	2	2	horas

Fuente: Elaboración propia

Para el cuadro 4.4 se plantearon los requerimientos que competen la sección de detección, y en específico, para el elemento que se utilizó para realizar la detección. En primera instancia, el requerimiento No. 1 habla sobre la iluminación adicional para la detección del sistema; en este caso el cliente en cuestión solicitó directamente que se pueda utilizar la misma iluminación del entorno para este sistema. Esta iluminación consiste en dos barras de luz led apuntadas directamente al material a revisar. Para el segundo y tercer requerimiento se definió que es necesario que el sistema detecte defectos tanto en forma estática como dinámica, es decir, se deben detectar defectos mientras el papel no está en movimiento, y a su vez cuando esté en movimiento. La velocidad de movimiento promedio a la que el papel se enrolla en esta etapa del proceso es entre los 25 y 30 metros por minuto, lo que significa que el sistema debe ser capaz de detectar a esas velocidades para no tener reducciones en tiempos del proceso. Para el requerimiento No. 5 se determinó, mediante el cliente, que los defectos críticos a detectar son los de tipo ranura, y a su vez, estos son los

más pequeños que se pueden hallar entre los defectos a revisar; esto quiere decir que es necesario que el sistema pueda detectar estos defectos cuyo tamaño es entre los 0.5 y 1 mm. Finalmente, el requerimiento No. 6 parte de que la máquina de separación de papel está en funcionamiento de forma continua; para efectos de la validación de este proyecto, se determinó que el sistema debe trabajar sin problemas durante al menos 2 horas seguidas.

4.3.4. Sección de detección: Sistema de control

Cuadro 4. 5. Requerimientos para el sistema de control.

No.	Requerimiento	Métrica	Valor ideal	Unidad
1	Número de alertas con las que cuenta el sistema	1 – 2	2	Cantidad
2	Cantidad de alarmas sonoras por defecto	1	1	Cantidad
3	El sistema tiene la posibilidad de comunicación IP	Si/No	Si	Binario

Fuente: Elaboración propia

Para el cuadro 4.5 se tienen los requerimientos planteados para el sistema de control. Para el primer requerimiento se planteó el uso de 2 alertas, una que funciona como alerta para los defectos detectados y una segunda que funciona como alerta de algún error con el sistema y que no pueda ser utilizado para operar correctamente. Para el segundo requerimiento se planteó la cantidad de alarmas por defecto en donde el ideal es que el sistema alerte una vez por cada defecto detectado para no sobre alertar y generar inconformidad al operario. Para el tercer y último requerimiento de esta fase el cliente requiere que el controlador utilizado pueda tener comunicación a través de IP para una futura conexión con los sistemas de control de la planta.

4.3.5. Sección de detección: Interfaz

Cuadro 4. 6. Requerimientos para la interfaz.

No.	Requerimiento	Métrica	Valor Ideal	Unidad
1	La interfaz es de uso intuitivo para el operario	Si/No	Si	binario
2	La interfaz tiene forma de dar inicio y fin a la revisión	Si/No	Si	binario

Fuente: Elaboración propia

Para el cuadro 4.6 se definieron los requerimientos que se refieren a la interfaz y su modo de operación para el operario. Como primer requerimiento se planteó que esta fuera intuitiva para el operario, de forma que la persona que vaya a manejar el sistema necesite la menor cantidad de instrucciones para ponerlo en marcha sin ningún problema. Como segundo requerimiento se planteó la necesidad de que el sistema tiene una forma de dar inicio y fin a la revisión cuando sea necesario, por medio de la interfaz de usuario.

Capítulo 5. Propuesta de diseño

5.1. Posibles soluciones

En esta sección se estudiaron distintas soluciones posibles para cada uno de los subgrupos del problema, de esta manera se logran obtener conceptos de solución que contemplan distintas ideas para luego obtener una única solución tras un debido filtrado y selección.

5.1.1. Sección mecánica: Estructura de montaje del sistema de detección

Para este subgrupo, se idearon tres posibles soluciones que contemplan el anclaje de la estructura a la estructura existente en planta y el anclaje de los elementos de detección a la estructura. La primera de las opciones se refiere a un cajón maquinado para contener los elementos de detección, con puntos de anclaje a sus extremos que le permiten sujetarse a la estructura existente, de esta forma los elementos de detección se encuentran protegidos y sujetos a la estructura. Un boceto de ejemplo de esta opción se puede observar en la imagen de la figura 5.1 y 5.2.

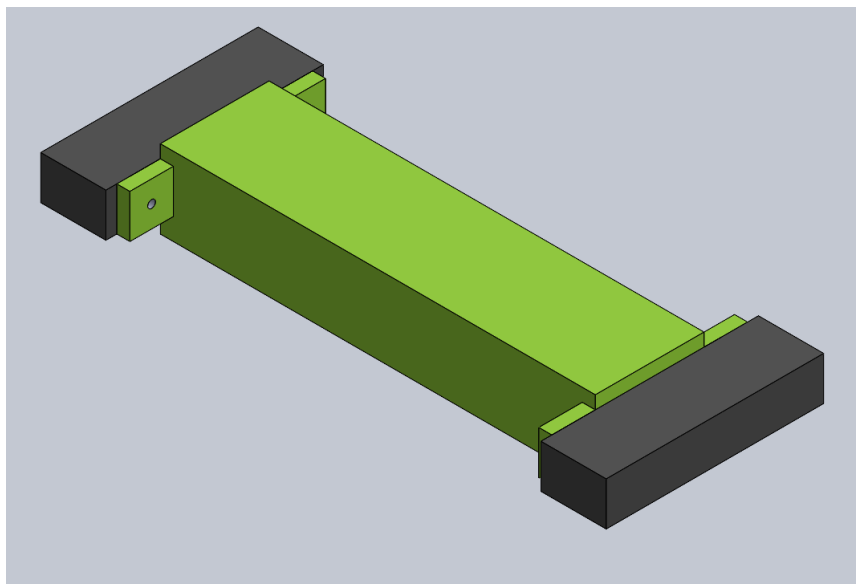


Figura 5. 1. Imagen ilustrativa de solución de tipo cajón. (1).
Fuente: Elaboración propia.

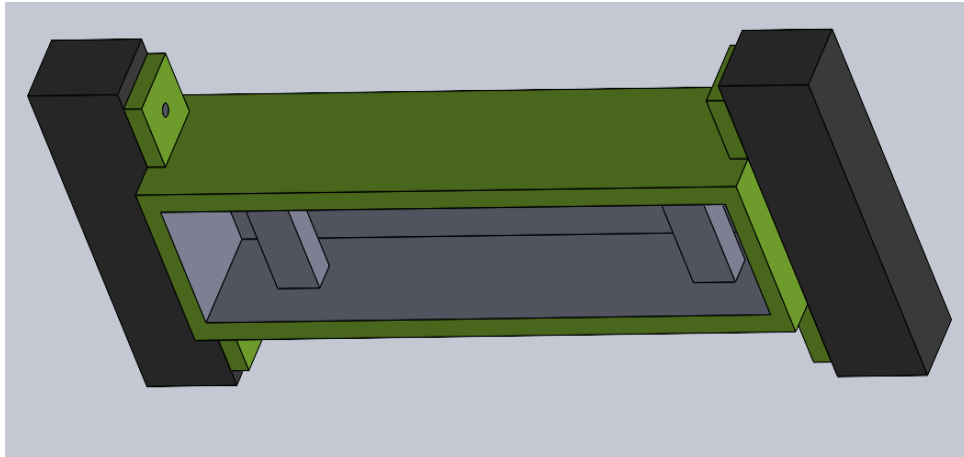


Figura 5. 2. Imagen ilustrativa de solución de tipo cajón. (2). Fuente: Elaboración propia.

Para la segunda opción de estructura se ideó un riel ajustado por tornillo a cada extremo de la estructura existente en la planta en el cual se tienen distintas perforaciones para ubicar el elemento de detección a su largo. Un boceto de ejemplo de esta opción se observa en la figura 5.3. Al eliminar el cajón se obtiene una solución más barata, sencilla, y menos intrusiva para el operario, pero se pierde la protección contra elementos ambientales que genera el cajón de la solución anterior.

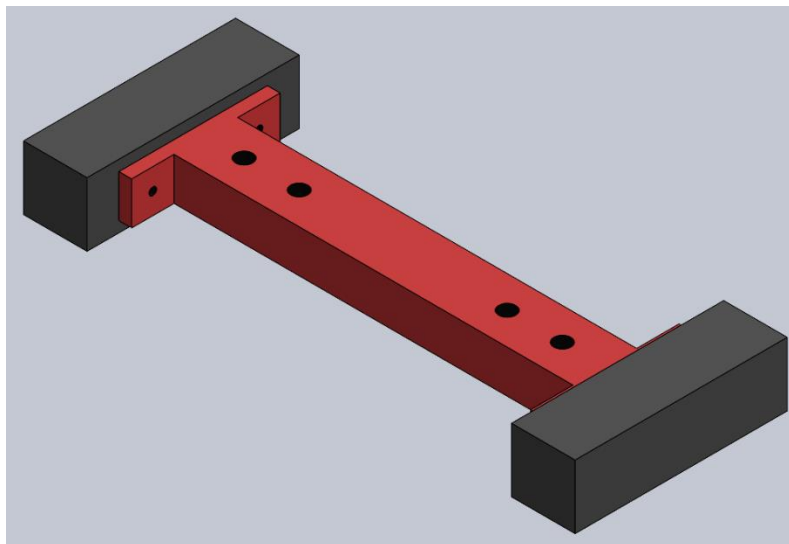


Figura 5. 3. Imagen ilustrativa de solución de tipo Riel para estructura de soporte. Fuente: Elaboración propia.

La tercera y última opción, se refiere a un brazo de sujeción, es decir un riel similar a la segunda opción, pero sujeto únicamente a un extremo de la estructura existente, y con un elemento de sujeción en su extremo libre para el elemento de detección. Esta opción requiere un brazo a cada extremo de la estructura existente. Un boceto de ejemplo se presenta en la imagen de la figura 5.4.

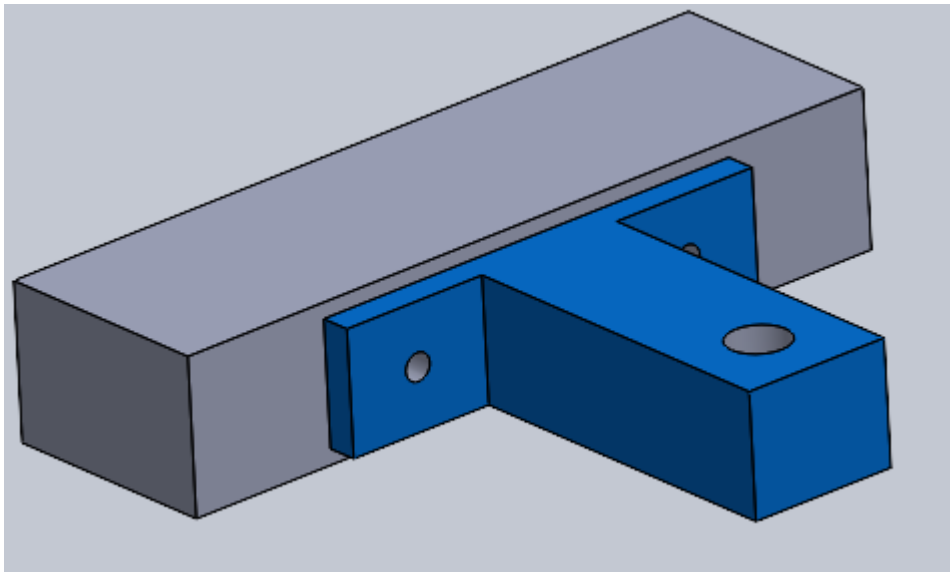


Figura 5. 4. Imagen ilustrativa de solución de tipo brazo. Fuente: Elaboración propia.

Es importante denotar que la sujeción del elemento de detección a la estructura depende en gran parte del mismo elemento de detección seleccionado, es por esto por lo que el detalle de cómo es esta sujeción se define una vez se haya realizado esta selección.

5.1.2. Sección mecánica: Carcasa de sección de control

Para este subgrupo se contemplaron los requerimientos y se contemplaron 2 posibles soluciones que permitan el cumplimiento de estos. La primera opción se refiere a realizar una caja de acrílico que contenga los elementos necesarios para un sistema de control y acondicionamiento de señales. Mientras que la segunda opción se refiere a una caja metálica obtenida por medio de un proveedor externo con las dimensiones necesarias para el acomodo del sistema de control, en donde de igual forma se debe trabajar y acondicionar para el sistema diseñado. Una disposición de esta opción se encuentra en la figura 5.6.



Figura 5. 6. Ejemplo de caja metálica para el circuito de control. Fuente: Schneider Electric [10]

5.1.3. Sección de detección: Elemento de detección

En el caso del elemento de detección se logró definir varias posibles soluciones, en donde se pueden agrupar unas bajo el subtema de sistema de visión. La primera solución planteada se refiere a un sensor de rugosidad superficial como el que se muestra en la imagen de la figura 5.7. Este sensor está en contacto directo con el papel y detecta la rugosidad de la superficie de este, luego procesando las lecturas del sensor se pueden identificar las anomalías que presente el papel para determinar la aparición de un defecto.



Figura 5. 7. Ejemplo de sensor de rugosidad para la detección de defectos superficiales. Fuente: Twilight [11]

Las siguientes soluciones comparten como factor común que se refieren a soluciones de visión por computadora, en donde se utiliza una cámara para tomar imágenes y estas se procesan a tiempo real mediante un algoritmo que se diseña a la medida del problema a resolver, de forma que pueda identificar un posible defecto en el papel a revisar.

- Backlight o iluminación por contraste: Para esta solución se utiliza una fuente de iluminación por detrás del material a revisar, de modo que el material se encuentre entre el campo de visión de la cámara y la fuente de luz. De esta forma, se pueden contrastar en mayor manera las irregulares de tipo ranura, ya que estas pasan de lado a lado del material. Un ejemplo de esta disposición se muestra en la figura 5.8. Además de esto, se contrastan también puntos de sustancias con colores oscuros en la superficie del material, esto exclusivamente debido a que el material es claro, usualmente blanco o crema, y se genera una diferencia notable.
- Luz estroboscópica directa: En este caso se utiliza iluminación directa, es decir, la fuente de luz y la cámara se encuentran paralelas en dirección al

material a revisar. La luz es de tipo estroboscópico para contemplar la velocidad de movimiento de la máquina de trabajo. La luz directa es útil para diferenciar elementos en la superficie del material a revisar como lo son los defectos que se desean revisar en este caso. Una ilustración de esta disposición se encuentra en la figura 5.9.

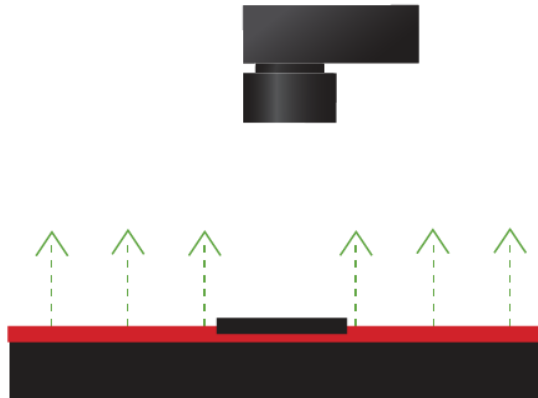


Figura 5. 8. Configuración de Backlighting.

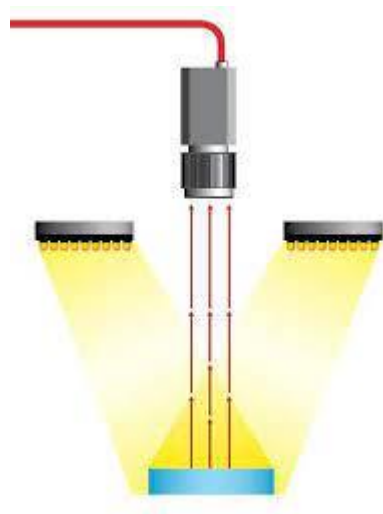


Figura 5. 9. Configuración de iluminación directa.

5.1.4. Sección de detección: Sistema de control

Para este subgrupo se idearon 2 posibles opciones de solución, la primera siendo un circuito lógico programable o PLC, en donde se administran las entradas y salidas necesarias

para acondicionar las señales y generar las respectivas alertas del sistema. La segunda opción se refiere a un microcontrolador de tipo ATmega328P y un respectivo circuito de acondicionamiento para generar las alertas necesarias. Ambas soluciones se conectan a un ordenador de manera que se pueda procesar la información obtenida mediante un algoritmo que permita determinar si se encuentra un defecto en el tramo de material analizado.

5.1.5. Sección de detección: Interfaz

En este caso, se tuvieron 3 posibles soluciones para generar una interfaz de usuario. La primera solución planteada se refiere a un monitor de computadora en el que se pueda observar una aplicación que permita dar el inicio o final a la revisión, controlado por medio de periféricos como los son un teclado y un mouse. Para la segunda opción, se planteó utilizar un monitor táctil, en donde se cumple la misma función que en la anterior pero el control se realiza por medio de la interacción directa con la pantalla. Por último, como tercera opción de solución se planteó el uso de un panel con los botones necesarios para llevar a cabo el control del sistema como lo serían botones de inicio y parada.

5.2. Filtrado y selección

Para escoger las soluciones a prototipar se realizó un proceso de filtrado y selección igual al dispuesto en la sección 3.4 de la metodología. Primero se realizó un filtrado inicial mediante la tabla del cuadro 3.2, ajustada a las especificaciones de selección necesarias para cada sección. Luego, se realizó una selección mediante la tabla del cuadro 3.3, en donde se evaluaron únicamente las soluciones que obtuvieran un puntaje mayor o igual a cero en la etapa anterior. Para esta selección se les asignaron pesos a las especificaciones planteadas según conversaciones con el cliente y criterio técnico para determinar qué solución puede ser mejor mediante un puntaje del 1 al 5, en donde 1 se refiere a muy malo y 5 se refiere a muy bueno. Al puntuar la especificación para cada solución, se pondera en base al peso asignado y luego se suman las evaluaciones ponderadas para obtener un valor numérico que indica que el mayor es el ganador.

5.2.1. Sección mecánica: Estructura de montaje del sistema de detección

Para la estructura de montaje se consideraron los conceptos descritos en el apartado 5.1.1, en donde el concepto definido como cajón (verde en el boceto) es el concepto 1, el riel (rojo en el boceto) es el 2 y el de tipo brazo (azul en el boceto) es el concepto 3 para efectos

de la tabla del cuadro 5.1. Para este caso, se utilizó como referencia el concepto 2, marcado con negrita en la tabla, por ser un concepto muy sencillo de caracterizar y de cierta forma un punto medio entre los demás. Al final del filtrado se determinó que con el propósito de mejorar el concepto ganador de esta etapa (el 3) se podría buscar una combinación entre el 1 y el 3 en donde se obtendría un brazo pequeño como el dispuesto en el boceto del concepto 3 con un cajón cobertor que lo proteja del ambiente, como se muestra en el concepto 1.

Cuadro 5. 1. Tabla de filtrado de la estructura de montaje del sistema de detección.

Criterio de selección	Concepto		
	1	2	3
---	1	2	3
Facilidad de diseño	-	0	+
Facilidad de mantenimiento	-	0	+
Seguridad del elemento de detección	+	0	-
Facilidad de montaje	-	0	+
Aprovechamiento del espacio	0	0	+
Posibilidad de ampliación	+	0	-
Costo	-	0	+
Suma +	2	0	5
Suma 0	1	6	0
Suma -	4	0	2
Evaluación Neta	-2	0	3
Posición	3	2	1
¿Combinar?	Sí (3)	No	No

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la tabla del cuadro 5.2 se tienen los siguientes 3 conceptos: el concepto 1 se refiere al ganador de la etapa anterior, es decir el brazo detallado en el apartado 5.1.1 (azul en el boceto); el concepto 2 se refiere a la referencia utilizada en el filtrado, es decir el riel (boceto de color rojo); y el concepto 3 se refiere a la combinación del cajón con el brazo. El peso asignado a cada criterio de selección se determinó mediante la información proporcionada por el cliente en cuanto a la importancia que le asigna a cada necesidad.

Cuadro 5. 2. Tabla de selección de la estructura de montaje del sistema de detección.

Criterio de selección	Peso (%)	Concepto					
		1		2		3	
		Calificación	E.P	Calificación	E.P	Calificación	E.P
Facilidad de diseño	10	5	0,5	3	0,3	2	0,2
Facilidad de mantenimiento	15	3	0,45	3	0,45	2	0,3
Seguridad del elemento de detección	20	2	0,4	3	0,6	5	1
Facilidad de montaje	15	3	0,45	2	0,3	1	0,15
Aprovechamiento del espacio	15	3	0,45	2	0,3	3	0,45
Posibilidad de ampliación	10	1	0,1	5	0,5	1	0,1
Costo	15	5	0,75	3	0,45	3	0,45
Total de Puntos	100		3,1		2,9		2,65
Posición			1		2		3

Fuente: Elaboración propia

Para este caso, el concepto ganador y el que es llevado a una siguiente fase de diseño es el descrito como **brazo de sujeción**.

5.2.2. Sección mecánica: Carcasa de sección de control

Para la carcasa de la sección de control se determinó que, al tener pocas opciones de solución, es más efectivo realizar el paso de selección sin pasar por ningún filtrado, pues este último no tendría mucho aporte a la selección. De esta forma, se determinaron los criterios de selección mostrados en la tabla del cuadro 5.3, en donde se tiene un énfasis en la importancia de la protección IP, la facilidad en manipulación de la carcasa para el montaje y mantenimiento, y el costo de esta. En este caso, los conceptos son los que se encuentran en el apartado 5.1.2, en donde el concepto asignado como 1 se refiere a el cajón de acrílico, mientras que el concepto asignado como 2 se refiere a la caja metálica obtenida de un proveedor externo.

Cuadro 5. 3. Tabla de selección para la carcasa de la sección de control.

Criterio de selección	Peso (%)	Concepto			
		1		2	
		Calificación	E.P	Calificación	E.P
Protección IP	22	3	0,66	5	1,1
Protección a la estática	20	3	0,6	5	1
Facilidad de diseño	15	3	0,45	5	0,75
Manipulación	22	5	1,1	3	0,66
Costo	21	5	1,05	3	0,63
Total de Puntos	100		3,86		4,14
Posición			2		1

Fuente: Elaboración propia.

El concepto ganador para esta sección fue el número 2, el cual se refiere a **una caja metálica** obtenida de un proveedor externo. En las siguientes secciones y conforme al avance del proyecto se definen las especificaciones de dicha caja metálica y los ajustes necesarios que se le deben realizar para poder contener los elementos del sistema de control.

5.2.3. Sección de detección: Elemento de detección

Para el caso del filtrado del elemento de detección para la sección de detección, se realiza la selección a partir de los conceptos descritos en la sección 5.1.3. De esta forma, el concepto denotado como número 1 es el que se refiere al sensor de rugosidad, el concepto número 2 se refiere al sistema de visión por computadora con una disposición de iluminación del tipo Backlighting (el cual se toma como referencia para la etapa de filtrado), mientras que el concepto número 3 se refiere al sistema de visión utilizando una iluminación de tipo directa con luz estroboscópica. Aquí es importante destacar que existe un requerimiento de iluminación en el cual se plantea que el sistema idealmente no cuenta con iluminación adicional, y las soluciones 2 y 3 planteadas requieren de un componente de iluminación adicional. Dicho esto, tras diálogo con el cliente, se llegó a un acuerdo en el que se permite utilizar instrumentos de iluminación que ya dispone la compañía que no necesariamente se encuentren en esta área de trabajo, por lo que estas soluciones no pierden su validez ante este requerimiento. Los criterios de selección utilizados para evaluar estos conceptos son los mostrados en la tabla del cuadro 5.4, en donde se hace énfasis a los criterios de velocidad de detección, facilidad de mantenimiento, facilidad de montaje y costo, según lo requerido por el cliente. El criterio de sistema de iluminación se refiere a la necesidad de tener un sistema

de iluminación adicional y la facilidad de montar este, en donde un rubro “+” quiere decir que no es necesario o que es más sencillo de instalar.

Cuadro 5. 4. Tabla de filtrado para el elemento de detección.

Criterio de selección	Concepto		
	1	2	3

Sistema de iluminación	+	0	0
Facilidad de mantenimiento	0	0	0
Área de detección	-	0	0
Detección de distintos tipos de defectos	-	0	0
Aprovechamiento del espacio	+	0	0
Posibilidad de ampliación	-	0	0
Facilidad de uso	+	0	0
Facilidad de montaje	+	0	+
Velocidad de detección	-	0	0
Costo	-	0	0
Suma +	4	0	1
Suma 0	1	10	9
Suma -	5	0	0
Evaluación Neta	-1	0	1
Posición	3	2	1
¿Combinar?	No	No	No

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla del cuadro 5.5 se muestra la selección del elemento de detección. Para este cuadro se tiene como concepto número 1 el ganador de la etapa anterior, es decir el sistema de visión por medio de luz estroboscópica directa; y como concepto número 2, el sistema de visión con iluminación de tipo Backlighting.

Cuadro 5. 5. Tabla de selección para el elemento de detección.

Criterio de selección	Peso (%)	Concepto			
		1		2	
		Calificación	E.P	Calificación	E.P
Sistema de iluminación	7	3	0,21	3	0,21

Facilidad de mantenimiento	12	3	0,36	3	0,36
Área de detección	9	3	0,27	2	0,18
Detección de distintos tipos de defectos	11	3	0,33	3	0,33
Aprovechamiento del espacio	9	3	0,27	4	0,36
Posibilidad de ampliación	5	3	0,15	3	0,15
Facilidad de uso	9	3	0,27	3	0,27
Facilidad de montaje	12	3	0,36	4	0,48
Velocidad de detección	14	3	0,42	3	0,42
Costo	12	3	0,36	3	0,36
Total de Puntos	100		3		3,12
Posición			2		1

Fuente: Elaboración propia.

El concepto ganador para esta sección fue el número 1, es decir, el **sistema de visión por computadora con iluminación por medio de iluminación por contraste o backlighting**.

5.2.4. Sección de detección: Sistema de control

Similar al caso de la carcasa del sistema de control, para el propio sistema de control se pasó de una vez al paso de la selección sin pasar por un filtrado previo, pues este no aporta a la selección. De esta manera, se plantearon los criterios de selección que se muestran en la tabla del cuadro 5.6, de forma que lo más relevante en este caso es el costo y luego la facilidad de programación. En este caso, el concepto determinado como número 1 es el que se describe como un microcontrolador ATmega328P, mientras que el número 2 se refiere al PLC; ambos descritos en la sección 5.1.4. Para este caso, el ganador de esta selección fue el concepto número 1, sobre todo por su reducido costo frente a un posible PLC.

Cuadro 5. 6. Tabla de selección para el sistema de control.

Criterio de selección	Peso (%)	Concepto			
		1		2	
		Calificación	E.P	Calificación	E.P
GPIO	27	5	1,35	3	0,81
Programación	33	5	1,65	3	0,99

Costo	40	5	2	3	1,2
Total de Puntos	100		5		3
Posición			1		2

Fuente: Elaboración propia.

5.2.5. Sección de detección: Interfaz

Para el caso del filtrado del elemento de detección para la sección de detección, se realiza la selección a partir de los conceptos descritos en la sección 5.1.5. Es así como el concepto definido como número 1 se refiere al monitor y periféricos normales, es decir, teclado y ratón (este concepto se toma como referencia para la etapa de filtrado). El concepto número 2 se refiere a lo que sería una pantalla táctil, y el concepto número 3 se refiere a panel de botones para controlar el sistema. De esta forma, en la tabla del cuadro 5.7 se presentan los criterios de selección para este caso, en donde se le brinda énfasis a la facilidad de uso y al costo de la interfaz.

Cuadro 5. 7. Tabla de filtrado para la interfaz.

Criterio de selección	Concepto		
	1	2	3
---	1	2	3
Facilidad de uso	0	+	+
Facilidad de montaje	0	+	0
Facilidad de mantenimiento	0	-	0
Facilidad de implementación	0	-	-
Aprovechamiento del espacio	0	+	0
Costo	0	-	+
Suma +	0	3	2
Suma 0	6	0	3
Suma -	0	3	1
Evaluación Neta	0	0	1
Posición	2	3	1
¿Combinar?	No	No	No

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la interfaz y como se observa en la tabla del cuadro 5.7, todos los conceptos propuestos obtienen una evaluación neta mayor o igual a 0, es por esto por lo que todos son elegibles para continuar con la siguiente etapa, la etapa de selección. Para esta

etapa se mantiene la enumeración de los conceptos, es decir el número 1 continúa siendo el monitor con los periféricos convencionales y el número 3 es el panel de botones.

Cuadro 5. 8. Tabla de selección para la interfaz.

Criterio de selección	Peso (%)	Concepto					
		1		2		3	
		Calificación	E.P	Calificación	E.P	Calificación	E.P
Facilidad de uso	23	3	0,69	4	0,92	4	0,92
Facilidad de montaje	17	3	0,51	4	0,68	3	0,51
Facilidad de mantenimiento	13	3	0,39	1	0,13	3	0,39
Facilidad de implementación	16	5	0,8	2	0,32	3	0,48
Aprovechamiento del espacio	13	3	0,39	4	0,52	3	0,39
Costo	18	3	0,54	1	0,18	3	0,54
Total de Puntos	100		3,32		2,75		3,23
Posición			1		3		2

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla del cuadro 5.8, el concepto ganador de esta sección es la interfaz mediante **monitor y periféricos convencionales** para el control del sistema.

Capítulo 6. Diseño y desarrollo del prototipo de solución

6.1. Sección Mecánica: Estructura de montaje del sistema de detección

En esta sección se entra en detalle sobre el procedimiento llevado a cabo para diseñar la estructura de montaje del sistema de detección y su prototipo. Al ser seleccionada una cámara como elemento de detección para el sistema, se debieron tomar consideraciones adicionales a las ya planteadas anteriormente, las cuales son en forma de la sujeción de la fuente de luz y el elemento de acople entre la misma cámara y la solución de estructura seleccionada. De esta manera, los pasos generales que se tomaron para llevarlo a cabo fueron:

1. Simulación preliminar del área de trabajo.
2. Diseño de estructura de acople entre la cámara y brazo de sujeción.
3. Diseño del brazo de sujeción para la cámara.
4. Diseño del brazo de sujeción de la fuente de luz.
5. Diseño de estructura de anclaje.
6. Diseño de prototipo de estructura.
7. Elaboración de prototipo de estructura.

6.1.1. Simulación preliminar del área de trabajo.

Para determinar correctamente variables como el posicionamiento, las alturas, las longitudes de brazo y las distancias de trabajo apropiadas, se realizó un diseño preliminar del área de trabajo. Este fue diseñado a partir de mediciones tomadas en el sitio, para la cual se consideraron únicamente los elementos más importantes del entorno para el proyecto; estas mediciones se pueden observar en las imágenes de las figuras 6.1 y 6.2. El resultado obtenido en este proceso preliminar de diseño se observa en las imágenes de las figuras 6.3 y 6.4.

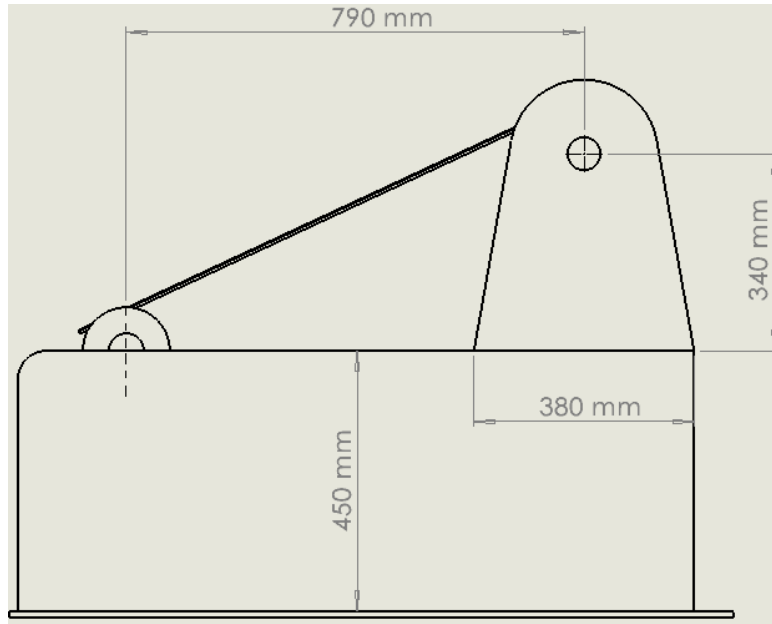


Figura 6. 1. Mediciones tomadas en planta del área de trabajo (1). Fuente: Elaboración propia.

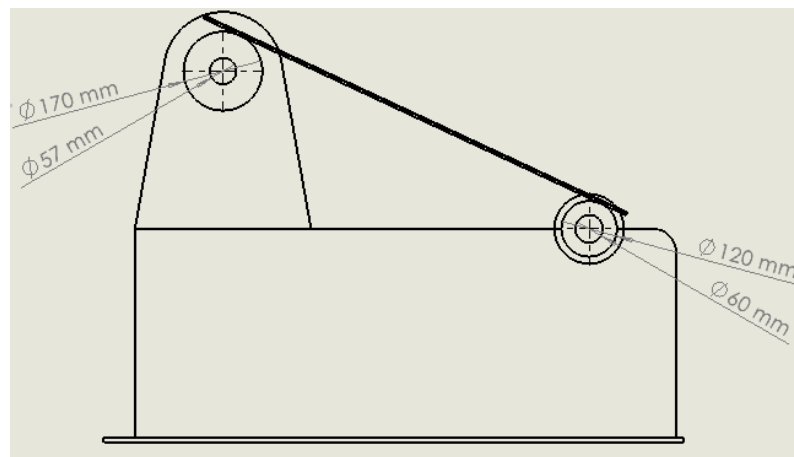


Figura 6. 2. Mediciones tomadas en planta del área de trabajo (2). Fuente: Elaboración propia.

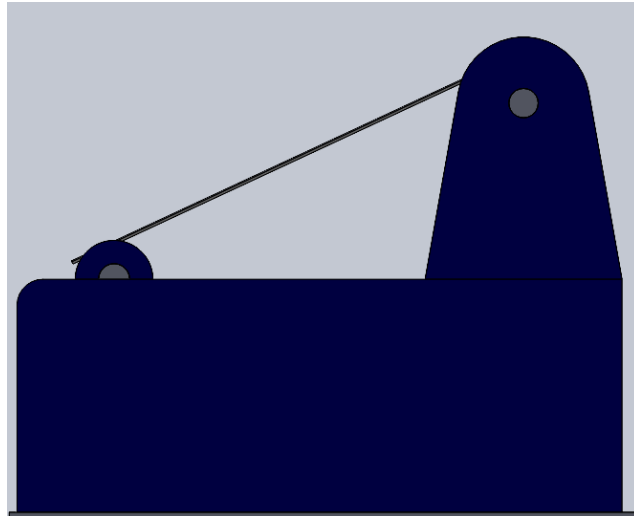


Figura 6. 3. Vista lateral de simulación del área de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

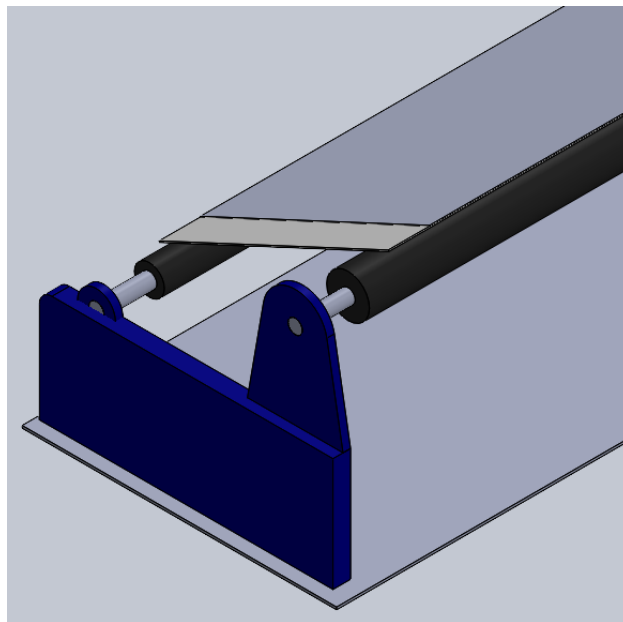


Figura 6. 4. Vista isométrica de simulación de área de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2. Estructura de acople para la cámara.

Es necesario generar una estructura para la cámara BFS-U3-23S3C-C Blackfly S USB3; los detalles y especificaciones de la cámara se discuten más adelante en la sección 6.3.1. Para efectos de esta sección se destaca que la cámara tiene como dimensiones: 29mm de ancho, 29mm de alto y 30mm de profundidad, así como también una masa de 39 gramos

[12]. Además, se dispone de un modelo CAD de dicha cámara obtenido de la página del fabricante, de esta manera se puede desarrollar una estructura con las dimensiones precisas basada en este modelo. Para esta estructura las consideraciones necesarias a tomar son:

- Dimensiones de la cámara.
- Debe poseer un modo de anclaje con el brazo de sujeción.
- Material no contaminante.

Para cumplir con las consideraciones planteadas, se procedió a realizar el diseño en base al modelo CAD mencionado anteriormente. El resultado de dicho diseño es el mostrado en las figuras 6.5 y 6.6.

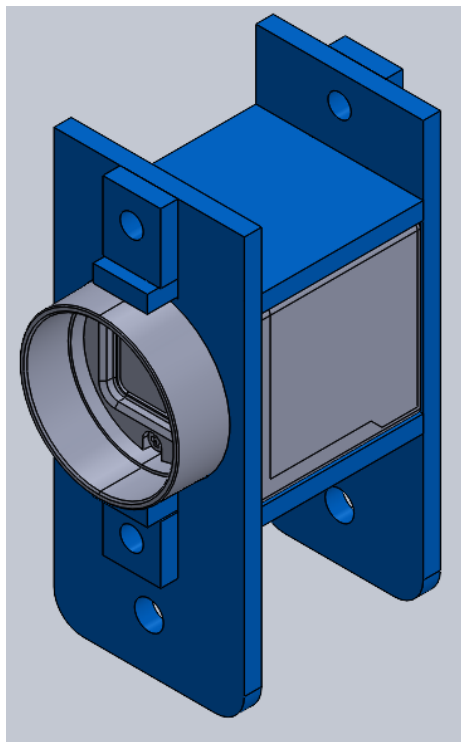


Figura 6. 5. Vista isométrica del diseño de estructura de acople para la cámara.
Fuente: Elaboración propia.

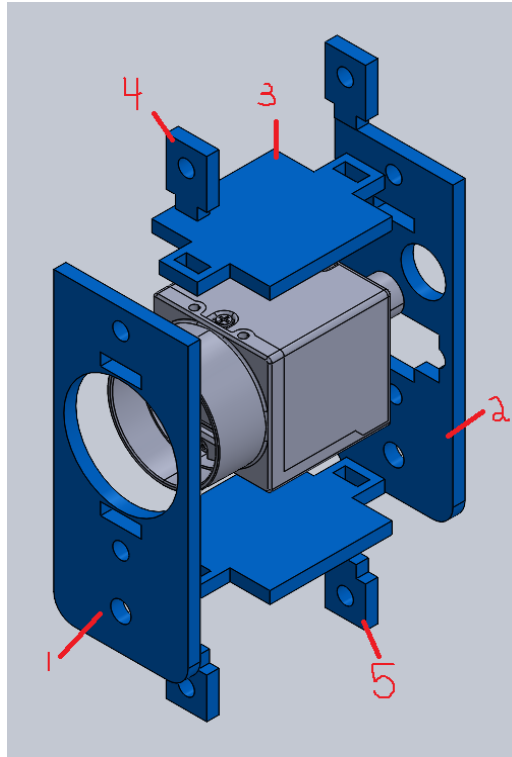


Figura 6. 6. Vista explosionada del diseño de estructura de acople para la cámara.
Fuente: Elaboración propia.

El detalle de las dimensiones de todas las piezas que conforman la estructura se encuentra en los planos mecánicos del anexo. En la figura 6.6 se identificaron 5 piezas que componen la estructura, y se detallan un poco más a continuación:

- La pieza 1 es la parte frontal de la estructura, cuyas dimensiones principales son su ancho y su alto, 33mm y 74mm, respectivamente. También es importante el círculo para la entrada del lente cuyo diámetro es de 28mm.
- La pieza 2 es la parte posterior de la estructura, cuyo alto y ancho son idénticos a la pieza 1, pero en este caso se deben dejar aperturas para el cableado de la cámara y su indicador Led.
- La pieza 3 aparece dos veces en la estructura, es una pieza que sirve como puente entre la pieza 1 y la pieza 2, y se debe situar tanto en la parte superior como en la parte inferior, así funciona de sostén y de cubierta para la cámara. Sus dimensiones más importantes son su ancho y largo, de 29mm y 46mm, respectivamente.

- Las piezas 4 y 5 son muy similares y cumplen la misma función, esta es de *seguro*, para que todo se mantenga en su sitio. De ancho tienen 10mm y su diferencia está en su largo, la pieza 4 tiene 15mm mientras que la pieza 5 mide 13mm.

Para el material seleccionado para esta estructura se eligió acrílico de 3mm de espesor, esto porque la estructura no está sometida a ninguna fuerza excepcional y su función es de proveer una forma de acople para la cámara con la estructura de sujeción, además es un material que no genera contaminaciones por oxidación o similares.

6.1.3. Brazo de sujeción para la cámara.

Con respecto al brazo de sujeción para la cámara, además de las consideraciones tomadas por los requerimientos de la tabla 4.2, se debieron tener las siguientes consideraciones:

- Por requerimiento: Ser menor a 112,5 cm (considerando que debe ser uno a cada lado, el largo máximo de toda la estructura debe ser de 225 cm).
- Debe tener distintos puntos de anclaje para la cámara y estos deben estar dispuestos de forma que se pueda realizar la detección para distintos tamaños de papel, es decir, debe tener al menos dos posiciones para la cámara distanciadas 16.5 centímetros entre ellas.
- Debe disponer de varios ángulos para la cámara para permitir la manipulación y ajuste.
- Debe tener un ancho no mayor a 30 milímetros para el anclaje de la estructura de acople de la cámara.
- Debe ser de un material no corrosivo, para evitar generar suciedad que pueda quedar en el papel a revisar.

En base a estas consideraciones es que se procede a realizar el diseño demostrado en la figura 6.7.

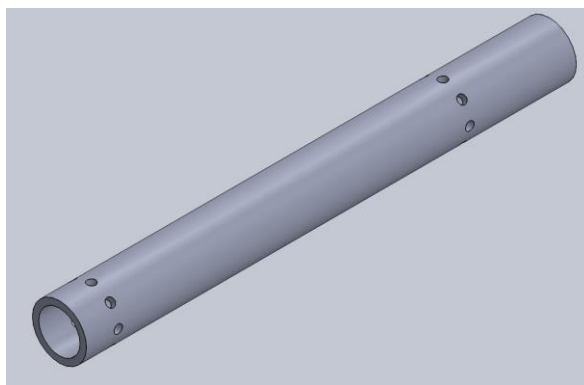


Figura 6. 7. Brazo de sujeción para la cámara a la estructura de anclaje. Fuente: Elaboración Propia.

El brazo de sujeción de la figura 6.7 se trata de un único elemento cilíndrico, con perforaciones en las posiciones definidas por la distancia a la que se puede presentar el papel a revisar. Para el detalle específico de las dimensiones del elemento se puede corroborar en los planos mecánicos de los anexos. Este elemento cilíndrico tiene un diámetro externo de 1 pulgada, o 25,4mm y un largo de 230mm. La distancia entre sus perforaciones es de 165mm o 16,5cm. La distribución radial de dichas perforaciones permite que se ajuste la cámara en distintos ángulos para la revisión, ya que el papel a revisar se encuentra en un ángulo de 30° respecto al eje horizontal. La forma de sujeción de este elemento con la estructura de anclaje diseñada en la sección 6.1.5 se trata de una unión soldada. Por último, el material definido para esta estructura se trata de acero inoxidable, de forma que no exista ninguna contaminación por oxidación en el papel a revisar.

6.1.4. Brazo de sujeción para la fuente de luz.

Con respecto a la sujeción para la fuente de luz, se debe realizar una estructura que funcione como brazo de sujeción para la fuente de luz ODL300 Linear Light de Smart Vision Lights. Los detalles y especificaciones de la fuente de luz se detallan en la sección 6.3.1, y para efectos de esta sección las dimensiones importantes de la fuente de iluminación seleccionada son: 306mm de largo, 60mm de alto y 33,2mm de profundidad, así como también una masa de 370 gramos [13]. Es importante destacar que en la página del fabricante se encuentra un archivo CAD del elemento, de manera que funciona como base para el diseño de cualquier estructura de montaje. Las consideraciones importantes que se tomaron en cuenta para este diseño son:

- Dimensiones de la fuente de luz.
- Dimensiones del brazo de sujeción de la cámara.
- Dimensiones de los puntos de anclaje de sujeción de la cámara.

En este caso, la fuente de iluminación debe poder acomodarse al campo de visión de la cámara de manera que siempre esté directamente por debajo del sujeto a detectar. Es por esto por lo que se debe prestar especial atención a las dimensiones ya definidas del brazo de sujeción de la cámara. El brazo de sujeción diseñado se muestra en las imágenes de las figuras 6.8 y 6.9.

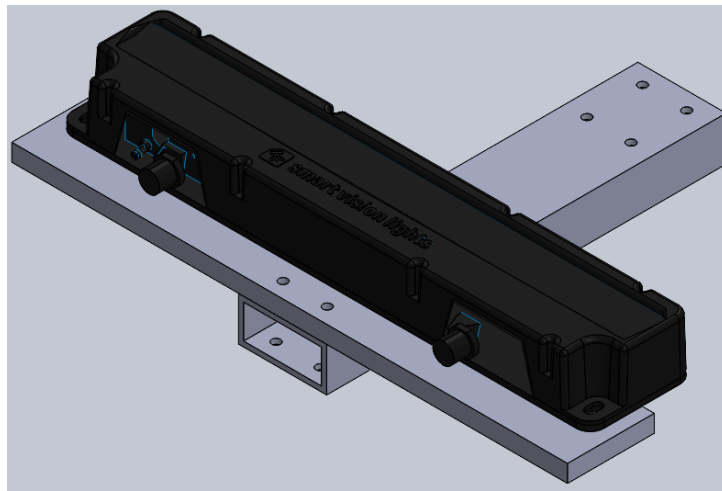


Figura 6. 8. Estructura de brazo de anclaje para la fuente de luz. Fuente: Elaboración propia.

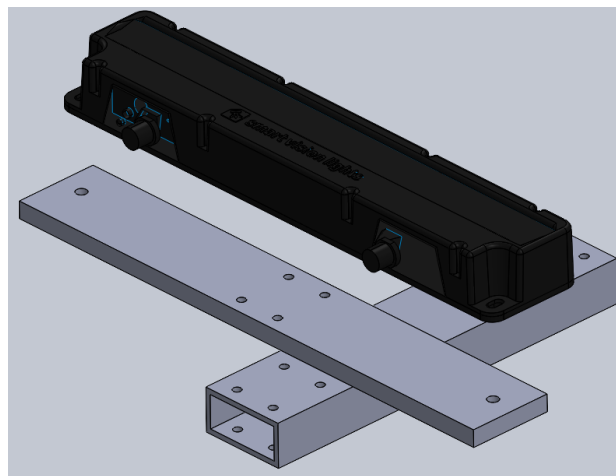


Figura 6. 9. Vista explosionada de estructura de brazo de anclaje para la fuente de luz. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la imagen de la figura 6.9, la estructura se compone de 2 elementos. El primero se trata de una plataforma base para la fuente de luz, en donde se fija por medio de tornillos la fuente a dicha plataforma. Su largo de 320mm y su ancho es de 50mm, el espesor de la placa es de media pulgada o 12,25mm. La segunda pieza es el brazo en sí, la estructura es rectangular y tiene un largo de 230mm, su altura es de 1 pulgada o 25,4mm y su ancho es de 2 pulgadas o 50,8mm. Los agujeros que se encuentran a su largo están diseñados de forma que coincide la distancia con los agujeros del brazo de sujeción de la cámara. La forma de sujeción de este elemento con la estructura de anclaje diseñada en la sección 6.1.5 se trata de una unión soldada.

6.1.5. Estructura de anclaje.

Al dialogar con el cliente y analizar el área de trabajo respecto al elemento de detección seleccionado, se determinó que es necesario el diseño de una estructura de anclaje, es decir una estructura nueva que permita el anclaje de los brazos para la cámara y la fuente de luz y que se pueda fijar en el área de trabajo. De esta forma y con el propósito de aprovechar el área de trabajo, se determinó que una estructura de tipo columna es la más adecuada para esta función. Para realizar el diseño de esta columna se debió considerar la distancia a la que se encuentra el papel a revisar del piso la cual es de, aproximadamente, 900mm en la parte más alta a la que llega el material. La columna de anclaje se muestra en la imagen de la figura 6.8.

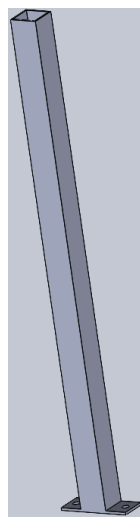


Figura 6. 10. Columna para el soporte de los brazos de cámara y luz. Fuente: Elaboración Propia.

La columna de la figura 6.10 tiene una altura de 900 mm y es de perfil cuadrado de 2 pulgadas o 50,8mm. Las especificaciones de sus dimensiones se encuentran en los planos mecánicos de los anexos. De esta forma, el diseño completo de la estructura de montaje del sistema de detección se puede observar en la imagen de la figura 6.11. Y en la imagen de la figura 6.12 se observa su ubicación respecto al área de trabajo.

A modo de realizar un estudio de los esfuerzos presentes en la columna, se presenta en la imagen de la figura 6.13, un diagrama de fuerzas básico, en el que se pueden observar las fuerzas externas, en este caso representadas por C y L, que ejercen los brazos de sujeción de la cámara y la fuente de luz, sobre la columna, y su posición respecto al piso del área de trabajo. Además, se representa como R_y y R_x las fuerzas de reacción en la base de la columna. Para realizar el análisis sobre la columna en cuestión, estas fuerzas se representan como momentos de torsión ejercidos sobre la columna de acuerdo con el valor de la fuerza y la distancia hasta su punto de aplicación.

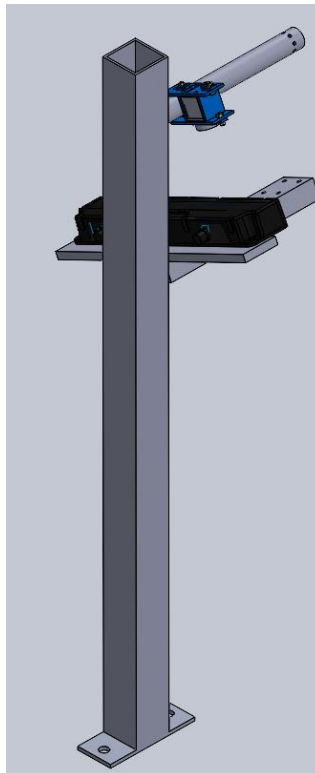


Figura 6. 11. Estructura de montaje del sistema de detección de defectos. Fuente: Elaboración propia.

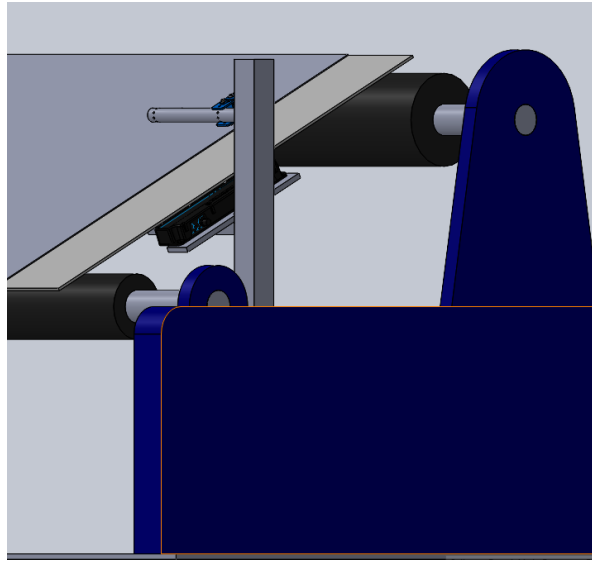


Figura 6. 12. Estructura de sistema de detección de defectos en el área de trabajo.
Fuente: Elaboración propia.

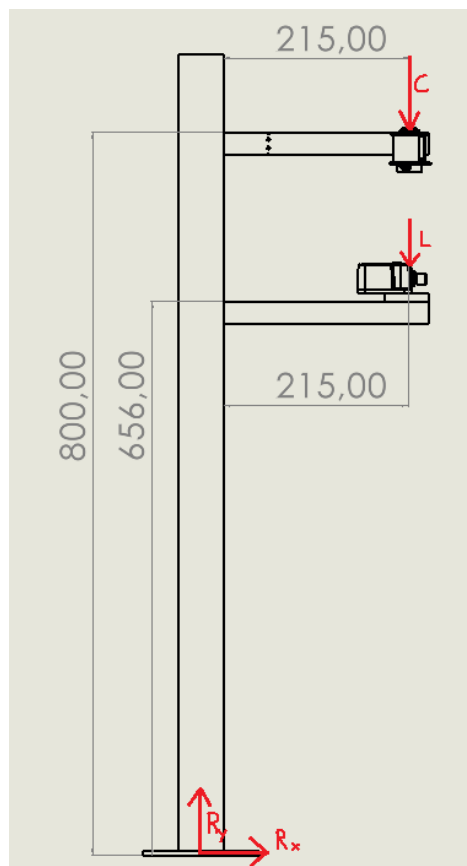


Figura 6. 13. Diagrama de fuerzas para el sistema. Fuente: Elaboración propia.

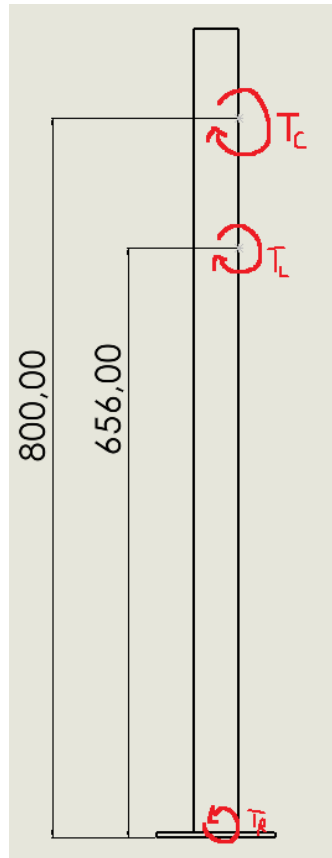


Figura 6. 14. Diagrama de momentos del sistema. Fuente: Elaboración propia.

A partir de este concepto, se realiza una simulación por medio del software de Solidworks 2020, para calcular los esfuerzos de Von Mises de la estructura y determinar si se encuentra o no en punto de falla. Para esta simulación, se utiliza un material de acero inoxidable AISI 316, cuyas propiedades mecánicas [14] son una resistencia a la tensión de 550MPa, y una resistencia a la fluencia de 240MPa. Dicho esto, se presenta en las figuras 6.15 y 6.16 el resultado de la simulación para esfuerzos de Von Mises y desplazamientos bajo el modelo de fuerzas representado en la figura 6.14.

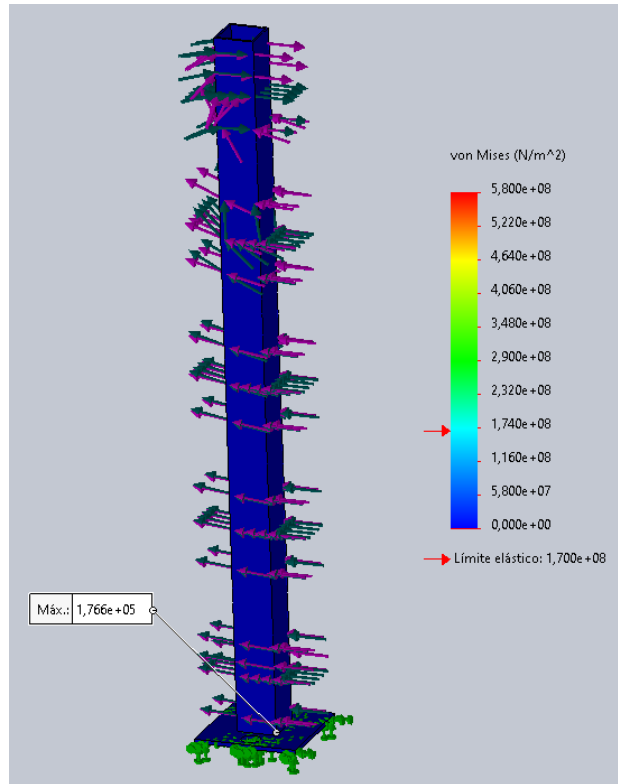


Figura 6. 15. Diagrama de Von Mises para el elemento. Fuente: Elaboración propia.

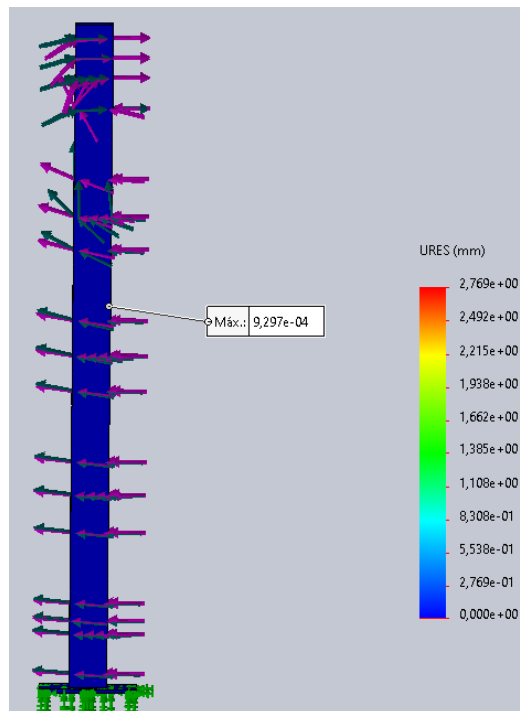


Figura 6. 16. Diagrama de desplazamiento para el elemento. Fuente: Elaboración propia.

Del diagrama de la figura 6.15 se puede observar que a lo largo de todo el elemento no existe ningún esfuerzo que se encuentre en un punto crítico del mismo, de hecho el esfuerzo máximo se encuentra varios órdenes de magnitud por debajo del valor de resistencia a la fluencia; lo que indica que este elemento presenta un factor de seguridad muy grande para la aplicación que se modela. La resistencia a la fluencia del material es de 240MPa, mientras que el valor de esfuerzo máximo de Von Mises obtenido por la simulación fue de 0,176MPa; por lo que se obtiene un factor de seguridad de $1,6 \times 10^3$. Esto se debe a que la estructura diseñada no se encuentra bajo esfuerzos grandes debido al tamaño y peso de los elementos en relación con el tamaño del elemento.

Además, del diagrama de la figura 6.16 se puede observar que el desplazamiento máximo es de $9,297 \times 10^{-4}$ mm, lo cual se puede considerar insignificante en relación con el largo de la columna, ya que la relación entre largo y desplazamiento es mucho mayor a 10, como se denota en [15].

6.1.6. Diseño de prototipo de estructura.

El prototipo diseñado de la estructura tiene como objetivo ser muy similar la estructura diseñada anteriormente pero a una menor escala y con materiales de fácil acceso, diseño y producción. Dicho esto, el prototipo diseñado se puede observar en la imagen de la figura 6.17.

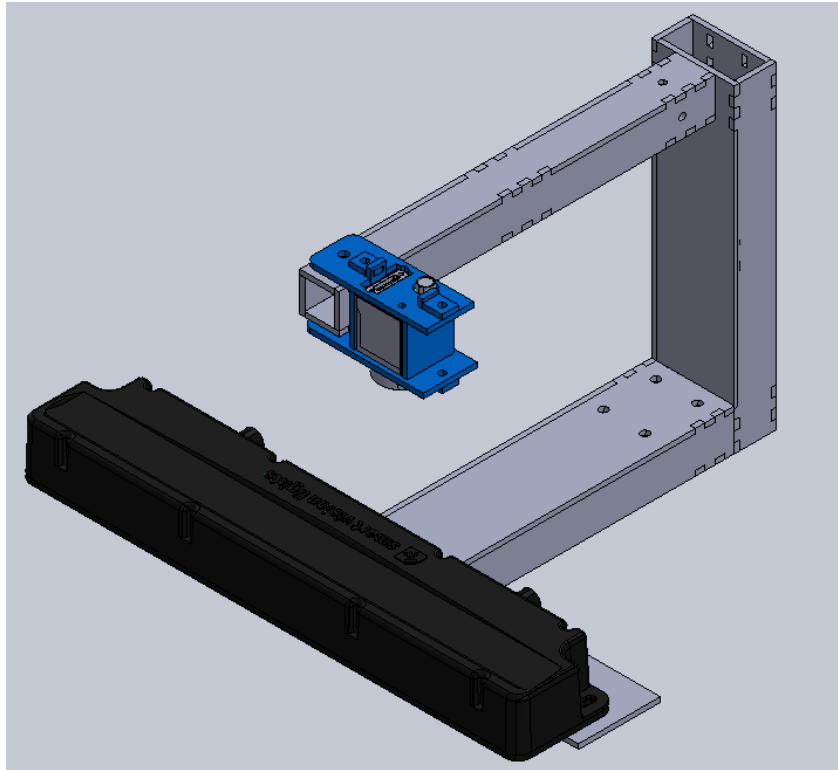


Figura 6. 17. Diseño de prototipo de estructura de montaje. Fuente: Elaboración propia.

Este prototipo cuenta con las 4 partes principales del diseño original: la estructura de acople de la cámara, el brazo de sujeción de la cámara, el brazo de sujeción de la fuente de luz y la columna de soporte. Pero en este caso se rediseñaron de forma que puedan ser confeccionados a partir de acrílico como su material, mediante corte láser. Esto funciona como un banco de trabajo prototipo para la realización de distintas pruebas de validación de forma que se cumplen en mayor medida las variables presentadas en el diseño que se propone para ser puesto en planta. Al igual que en los casos anteriores, los detalles de las dimensiones se presentan en los planos mecánicos en los anexos del documento, pero las dimensiones importantes se mantienen con la excepción de que el brazo para la cámara pasa a ser de perfil cuadrado, y la columna de soporte se reduce a una altura de 195mm.

6.2. Sección Mecánica: Carcasa de sección de control

Para el diseño de la carcasa de los elementos de control es necesario tomar en cuenta las dimensiones de estos. En este caso, se tiene la selección realizada en la sección 5.2.4, en donde se refiere al microcontrolador ATmega328P como el controlador a utilizar, por medio

de una placa de Arduino. Las dimensiones de dicha placa están dadas por el proveedor [16] como: 68.6 mm de largo y 53.4 mm de ancho. Además de esto, la carcasa asegura el circuito de control para la activación de las alarmas, disparo de luces y disparo de cámaras cuyo diseño se encuentra en la sección 6.4. Para esta sección únicamente es de importancia las dimensiones que tienen la placa en la que se establece el circuito. En este caso las dimensiones de dicha placa son: 117 mm de ancho y 114,5 mm de largo, como se muestra en la imagen de la figura 6.18.

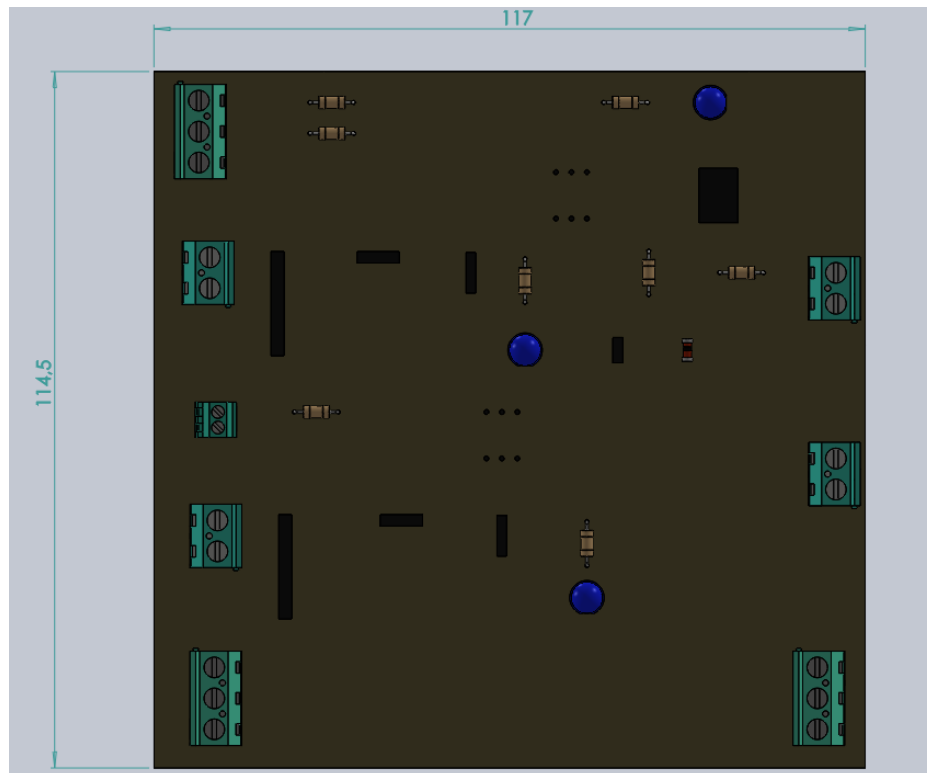


Figura 6. 18. Dimensiones de la placa de circuito de control. Fuente: Elaboración propia.

Al tener estas dimensiones en cuenta, la carcasa de esta sección del sistema debe tener como mínimo 140 mm de largo para que la placa quepa correctamente, y al menos 220 mm de ancho para que ambos elementos quepan uno al lado del otro. La disposición y medidas mínimas de la carcasa se presentan en la imagen de la figura 6.19.

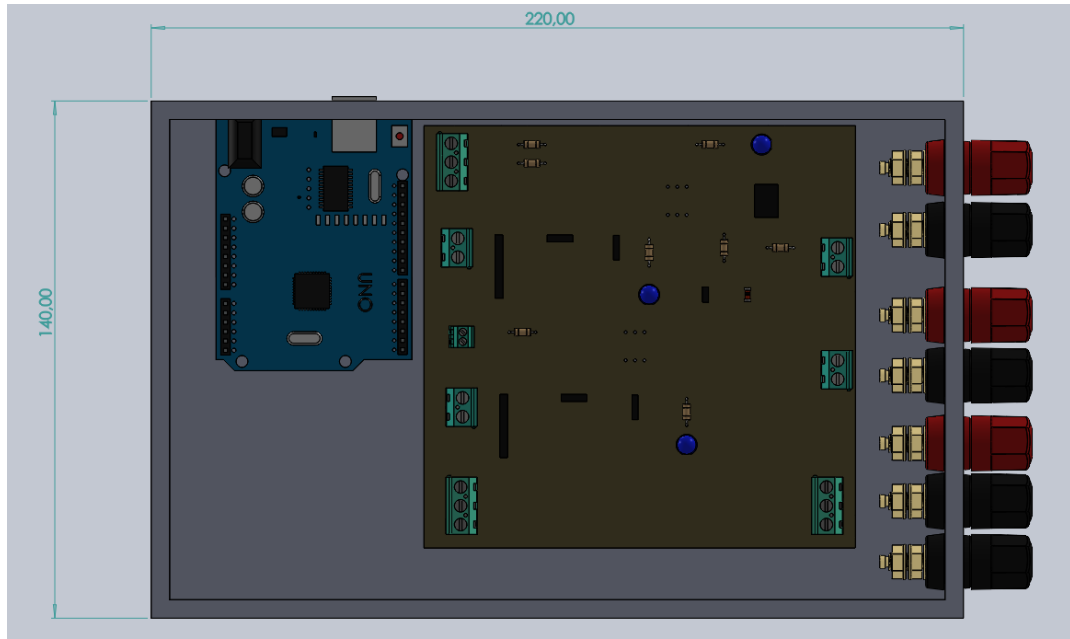


Figura 6. 19. Dimensiones y disposición de carcasa del sistema de control. Fuente: Elaboración propia.

Dadas las especificaciones determinadas y con la restricción del requerimiento número 1 del cuadro 4.3 que se refiere a la protección IP del sistema, se brindan dos posibles opciones que cumplen con lo dicho, mostradas en las imágenes de las figuras 6.20 y 6.21.



Figura 6. 20. Carcasa metálica para sección de control por Schneider Electric. Fuente: Schneider Electric [10].



Figura 6. 21. Carcasa metálica para sección de control por Rose Enclosures. Fuente: Newark [17].

Se recomienda la selección de la carcasa de la figura 6.20 por la facilidad de obtención ya que es una carcasa que se puede obtener en el país sin necesidad de recurrir al extranjero.

6.3. Sección de detección: Sistema de visión

En el caso del elemento de detección, se cambia la sección a un nombre más apropiado “sistema de visión”, pues tras seleccionar una cámara como elemento de detección se desarrolla el proceso de diseño para el sistema completo.

6.3.1. Información de los dispositivos y parámetros de fábrica

Para la selección de la cámara y lente a utilizar, en este caso se destaca que la empresa cliente pudo proporcionar una cámara y lente aptos para el desarrollo del proyecto, por lo que se trabajó directamente con los dispositivos proporcionados. A continuación, se presentan ciertos detalles importantes de cada uno [12]:

- Cámara: BFS-U3-23S3C-C Blackfly S USB3, Color.
 - Costo: 510.00 USD por unidad.
 - Tamaño de píxel: 3,45 μm .
 - Resolución en píxeles: 1920x1200 PX.
 - Resolución en milímetros (calculada a partir del tamaño del píxel): 6,624x4,14 mm.
 - Velocidad de captura en FPS: 163 FPS.
 - Requerimientos de potencia: 8 – 24 V vía GPIO o 5 V vía USB.
 - Consumo de potencia: 3Watts máx.

- Lente: 8mm UC Series FFL.
 - Costo: 220 USD.
 - Distancia Focal: 8 mm.



Figura 6. 22. Cámara Blackfly S USB3. Fuente: Edmund Optics. [12]



Figura 6. 23. Lente 8mm UC Series FFL. Fuente: Edmund Optics. [18]

Además de estos dispositivos, como se trata de un sistema de visión se debe seleccionar una fuente de luz; en este caso, la empresa cliente también dispuso de una fuente de luz para el desarrollo del proyecto. La fuente de luz proporcionada es la siguiente:

- Fuente de luz: Luz lineal ODL300:
 - Costo: 770 USD por unidad.
 - Requerimientos de potencia: 24 VDC.
 - Consumo de potencia: 110 W máx durante disparo.



Figura 6. 24. Fuente de luz ODL300 Linear Light. Fuente: Smart Vision Lights. [13]

6.3.2. Cálculo del área de visión

Para calcular el área de visión se utilizaron los datos conocidos previamente por el fabricante respecto a la cámara y lente, además de datos obtenidos por mediciones tomadas en planta respecto a las distancias de trabajo. Por lo tanto, el procedimiento para calcular el área de visión de una cámara bajo estos parámetros se demuestra a continuación.

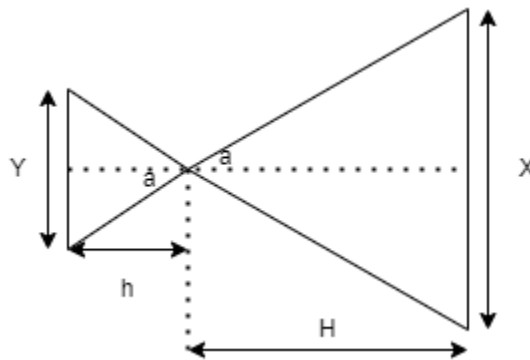


Figura 6. 25. Triángulos opuestos por el vértice. Fuente: Elaboración propia.

En la imagen de la figura 6.25, se tiene una disposición de triángulos opuestos por el vértice, que es la configuración obtenida entre el sensor de la cámara y el área capturada por este, estando su vértice a la distancia dada por la distancia focal del lente. Es de esta forma que se puede obtener el área de trabajo, que en este caso sería la “X” denotada por la imagen de la figura. Se debe destacar que cada dimensión, es decir horizontal y vertical, tiene sus valores de “Y” y “X”; de esta manera, las variables en este diagrama corresponden a lo siguiente:

- “Y” – Resolución en mm para dimensión vertical: 4,14mm.
- “Y” – Resolución en mm para dimensión Horizontal: 6,624mm.

- “h” – Distancia focal: 8mm.
- “a” – Ángulo de apertura para dimensión vertical (calculado): 15,165°.
- “a” – Ángulo de apertura para dimensión horizontal (calculado): 25,175°.
- “H” – Distancia de trabajo. Esta es ajustable según el valor de X requerido.
- “X” – Dimensión vertical del área de trabajo.
- “X” – Dimensión horizontal del área de trabajo.

En este caso, se requiere que la resolución del área de trabajo sea muy alta para poder observar claramente cualquier defecto que pase por el foco de detección del sistema. Las consideraciones que se tomaron en esta fase de cálculo son acerca de la velocidad requerida vs la velocidad de captura de la cámara, ya que esto limita cuánto material es observado en un segundo. La velocidad ideal para el sistema es de 30 metros de material por minuto, esto significan 500 mm de material por segundo. La cámara puede capturar hasta 163 capturas por segundo, pero para efectos de este cálculo se limita a unas 30 capturas por segundo de forma que se deja un margen muy generoso para el post-procesamiento de la imagen. Esto quiere decir que en 30 capturas se deben poder observar 500 mm de material. De forma estricta se tiene entonces que la dimensión vertical de cada captura debe ser de unos 16,67mm.

$$\frac{30m}{min} = \frac{30m}{min} * \frac{1min}{60s} = \frac{0,5m}{s} * \frac{1000mm}{1m} = 500mm/s$$

$$\frac{500mm}{\frac{s}{30fps}} = 16,67mm \text{ por captura}$$

Este valor de 16,67mm se traduce en la mínima dimensión vertical que puede tener el sistema para cumplir con el requisito de velocidad. De esta forma se obtiene entonces el valor de la distancia de trabajo mínima que debe tener el sistema para cumplir con este requisito mediante la figura 6.25, en donde se desea obtener el valor “H”. Para obtener el valor de H se tienen las relaciones de las ecuaciones (6.1) en donde se relacionan los lados de cada triangulo mediante el ángulo, (6.2) en donde se realiza la equivalencia de las ecuaciones y (6.3) en donde se despeja para el valor H.

$$\sin a = \frac{Y}{Z} , \quad \sin a = \frac{X}{H} \quad (6.1)$$

$$\frac{Y}{Z} = \frac{X}{H} \quad (6.2)$$

$$H = \frac{X}{Y} * h \quad (6.3)$$

$$H = \frac{16,67 \text{ mm}}{4,14 \text{ mm}} * 8 \text{ mm} = 32,21256 \text{ mm}$$

Al resolver la ecuación (3) para H se obtiene un valor de 32,21 mm. Esta es la distancia de trabajo mínima para cumplir los requerimientos propuestos. Para la facilidad del montaje, y brindar un pequeño margen extra, se define H con un valor de 50mm o 5cm, que cumple con los requisitos de distancia de trabajo.

De esta forma se obtiene un nuevo valor para la dimensión vertical de la siguiente forma:

$$X = \frac{50 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} * 4,14 \text{ mm} = 25,875 \text{ mm}$$

Por lo que se obtiene un valor de 25,875 mm para la dimensión vertical. Además, se tiene lo mismo para la dimensión horizontal:

$$X = \frac{50 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} * 6,624 \text{ mm} = 41,4 \text{ mm}$$

Esto quiere decir que la totalidad del área de visión A es:

$$A = 41,4 \text{ mm} X 25,875 \text{ mm} = 4,14 \text{ cm} X 2,5875 \text{ cm}$$

A partir de esta información, se obtiene la resolución en mm/px para el área de trabajo determinada como:

$$Res = \frac{41,4 \text{ mm}}{1920px} = 0.022 \text{ mm/px}$$

6.3.3. Desarrollo del algoritmo de detección

Para realizar la detección propia de la existencia de un posible defecto en el papel se confeccionó un algoritmo de preparación de cámaras, comunicación entre procesador y controlador y procesamiento de imágenes. Este algoritmo tiene el flujo que se puede observar en la imagen de la figura 6.26. Es importante destacar que la sección 6.4 se profundiza sobre la función del microcontrolador por lo que en esta sección sólo se menciona la comunicación serial con este.

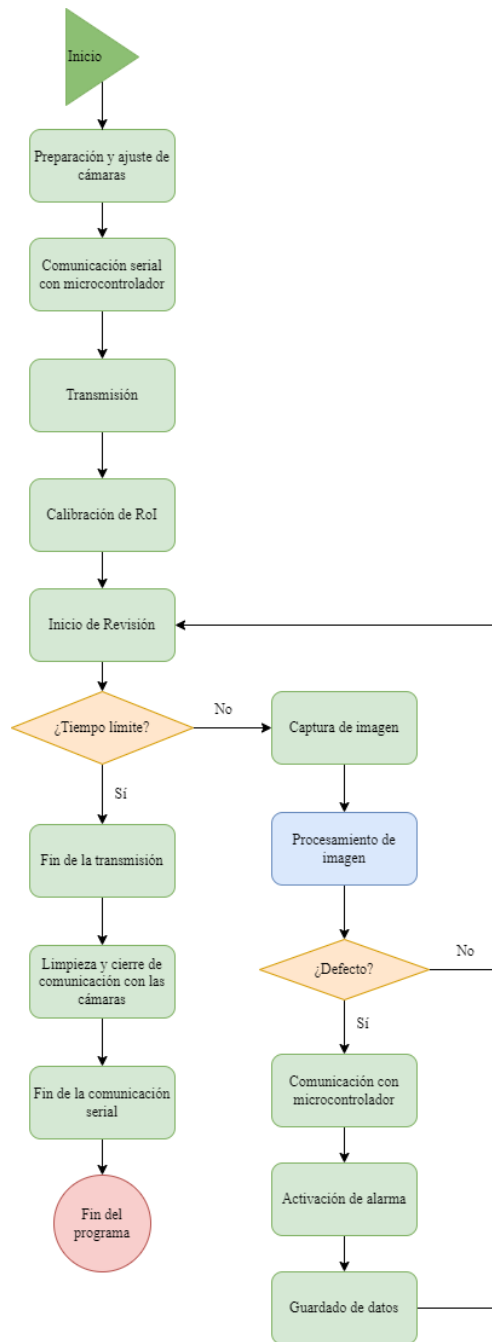


Figura 6. 26. Diagrama de flujo del algoritmo de detección de defectos. Fuente: Elaboración propia.

Según lo que se observa en la imagen de la figura 6.22, este algoritmo se compone de distintas partes que se detallan brevemente a continuación:

- **Preparación y ajuste de cámaras:** Mediante la librería de Spinnaker para Python, *PySpin*, se adquieren y determinan los valores necesarios para iniciar

correctamente la transmisión en las cámaras, así como también validar la existencia de cámaras conectadas al computador para poder iniciar el programa sin problemas.

- **Comunicación serial con microcontrolador:** Se abre la comunicación serial y verifica que no haya problemas en la misma. Luego, mediante caracteres se le pasa la siguiente instrucción al microcontrolador. Inicialmente se deben calibrar los disparos de las luces estroboscópicas con las cámaras para obtener una imagen con la mejor intensidad de luz posible.
- **Transmisión:** Se inicia la transmisión con los parámetros obtenidos en la primera sección del algoritmo, se inicia la toma de imagen.
- **Calibración de RoI:** Utilizando como muestra las primeras capturas de la cámara, se determinan dos regiones de interés (RoI), la primera siendo una región “permisiva” alrededor del borde del papel, con la finalidad de eliminar del foco de atención el resto de los datos que contiene la imagen que no son de importancia para la determinación de un defecto. La segunda RoI se considera una región “estricta” alrededor del papel que cubre pocos pixeles, de forma que se va a utilizar para luego determinar la existencia de un defecto en el borde del papel.
- **Inicio de revisión:** Una vez se tienen los RoI determinados se inicia la toma de imágenes de forma natural, esta sección representa el inicio del ciclo de toma de imágenes, en donde primero se determina si se alcanzó el tiempo límite del programa, en caso de no alcanzarlo se continúa con la toma de imágenes normalmente, mientras que en caso de alcanzarlo se procede a la sección de finalización del programa.
- **Captura de imagen:** Se procede a tomar la siguiente imagen proveniente de la cámara, se valida si la toma es exitosa, en caso de no serlo se genera un reporte de error y se continúa con la toma de imágenes. En caso de que la toma sea exitosa se guarda la imagen en forma de arreglo y se procede a la etapa de procesamiento de imagen.
- **Procesamiento de imagen:** Se convierte la imagen en distintas formas de manera que se logra determinar si existe o no un defecto en esta imagen. Se

explicará con más detalle esta etapa más adelante. En caso de existir un defecto se procede a la etapa de alerta de este. Si se determina que no existe ningún defecto entonces se continúa el ciclo de revisión.

- **Activación de alarma:** Esta es la primera etapa de alerta de defecto. En esta etapa se envía un mensaje al microcontrolador para que active la salida correspondiente a la alarma del circuito, de forma que el usuario pueda darse cuenta de que se determinó la existencia de un defecto.
- **Guardado de datos:** A modo de referencia, se registra en un archivo existente la determinación del defecto con fecha y hora.
- **Fin de la transmisión:** En caso de haber finalizado el ciclo de revisión se procede a la etapa de finalización de la transmisión. En esta etapa se detiene la toma de imágenes por medio de la cámara.
- **Limpieza y cierre de comunicación con cámaras:** Se realiza un cerrado de la transmisión de la cámara utilizando la librería PySpin.
- **Fin de la comunicación serial:** Se detiene el disparo de cámaras y luces mediante un mensaje al microcontrolador. Se cierran los puertos seriales y se finaliza la comunicación con el microcontrolador.

6.3.4. Procesamiento de la imagen

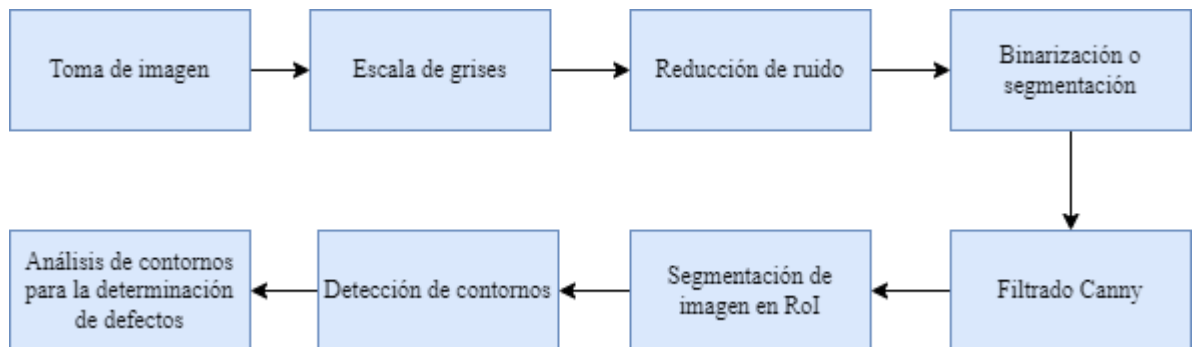


Figura 6. 27. Diagrama de bloques de la sección de procesamiento de la imagen.
Fuente: Elaboración propia.

El apartado de procesamiento de la imagen se compone de 8 bloques, como se observa en la imagen de la figura 6.27. El objetivo de este apartado es determinar si en la imagen tomada existe algún posible defecto mediante un análisis de contornos en la región de interés. Los bloques se detallan a continuación:

- **Toma de imagen:** Etapa inicial del procesamiento, se refiere a la etapa del flujo llamada **captura de imagen**.
- **Escala de grises:** Se requiere pasar la imagen a escala de grises para los procesos que son llevados a cabo sobre esta. Se guarda una copia de la imagen original (En RGB) para visualizar la información sobre esta.
- **Reducción de ruido:** Se le aplica un filtro gaussiano leve para suavizar la imagen con la finalidad de reducir cualquier elemento que sea considerado ruido.
- **Binarización o segmentación:** Se realiza una segmentación binaria en donde cualquier valor de píxel que se encuentre por debajo del valor de calibración en escala de grises se considera como fondo y se cambia su valor a 0. Al ser el papel un material de color crema, es un material cuyos valores en escala de grises son naturalmente altos y, por lo tanto, sencillo de diferenciar de cualquier otra cosa. El valor de calibración es de 60, y se obtiene por medio de un análisis inicial de un histograma de la imagen capturada por la cámara en una prueba, en donde se utiliza la maqueta de prototipo con la fuente de iluminación real para obtener un entorno lo más similar posible al área de trabajo. El histograma se puede observar en la imagen de la figura 6.28.
- **Filtrado Canny:** Se aplica un filtrado de detección de bordes de tipo canny que se encarga de distinguir concretamente el borde del papel y cualquier contorno distinto a este dentro del mismo papel.
- **Segmentación de imagen en RoI:** Mediante los valores de RoI definidos anteriormente durante la calibración, se toman únicamente los datos que se encuentran dentro de los límites del RoI permisivo.
- **Detección de contornos:** Se utiliza una función de opencv-python para encontrar los contornos presentes en la sección de la imagen perteneciente al RoI.
- **Análisis de contornos para la detección de defectos:** Se analizan los contornos encontrados de forma que si algún contorno se sale de los bordes determinados por la RoI estricta entonces se considera como una anomalía. Esto porque un papel sin defectos de tipo rasgadura debe tener un borde cuyo

contorno se puede observar como una línea recta vertical, por lo tanto si existe alguna rasgadura en el papel el contorno de dicha rasgadura va a tener una dirección horizontal rompiendo los límites de la RoI.

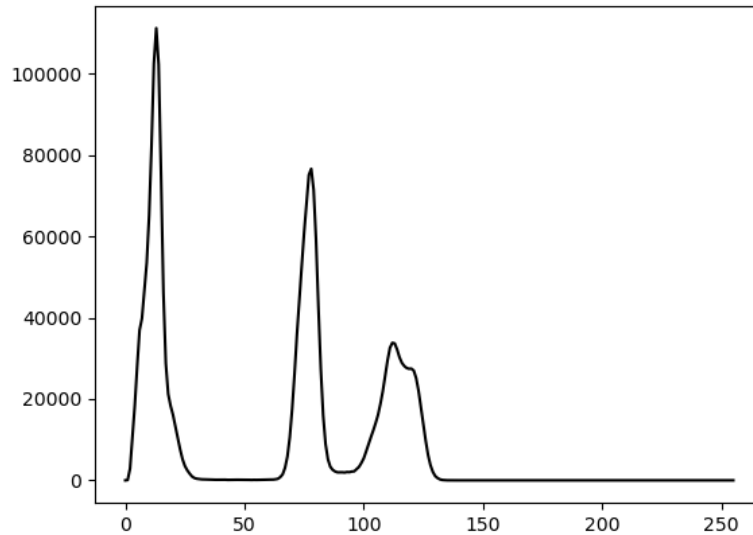


Figura 6. 28. Histograma de la imagen capturada por la cámara. Fuente: Elaboración Propia.

6.3.5. Región de interés

Como se menciona anteriormente, para realizar el análisis de los defectos en una imagen se determinan 2 regiones de interés. Existe una región de interés que rodea el borde del papel de forma estricta, unos cuantos píxeles que permiten que el papel a revisar tenga un margen de error en su ubicación. Esto es porque en la realidad el papel a revisar no se encuentra 100% centrado a lo largo de su extensión, por lo tanto se debe tener un margen que permita ese desfase con el borde detectado en la calibración inicial. Este margen es muy pequeño y consiste en aproximadamente 0,4 mm de ancho. Además de esto, se tiene una segunda región de interés que permite hacer ignorar cierta porción de la imagen que no brinda información necesaria para determinar si existe un defecto o no, y permite reducir la cantidad de datos que deben ser procesados por los filtros de detección de contornos. Al ser los defectos de tipo ranura los de mayor prioridad para detectar, se determina que un área alrededor del borde del material es el foco de interés del sistema y por lo tanto todo lo que se

encuentre fuera de esa área no debe ser tomado en cuenta. Esto permite detectar los defectos que se encuentren dentro del área determinada, estando los defectos de tipo ranura siempre en el borde del material a revisar. Esta región de interés tiene una distancia hacia el centro del material de aproximadamente 3 mm.

6.4. Sección de detección: Sistema de Control

La sección de control se resume en 3 subsecciones de importancia: el computador a utilizar, el algoritmo de control para el microcontrolador, y el circuito de control. El objetivo principal de esta sección es el de sincronizar todas las señales del sistema para generar salidas que sean de fácil comprensión para el usuario. En este caso, al tratarse de un sistema de visión con iluminación por contraste, y estarse utilizando una fuente de iluminación de estilo estroboscópico, esto quiere decir que la sección de control debe encargarse de la sincronización del disparo de la luz con el disparo de la cámara, de tal forma que se obtenga una toma de imagen con la cantidad de luz apropiada. Una demostración de cómo se encuentra conectado el sistema entre sí se muestra en la imagen de la figura 6.29.

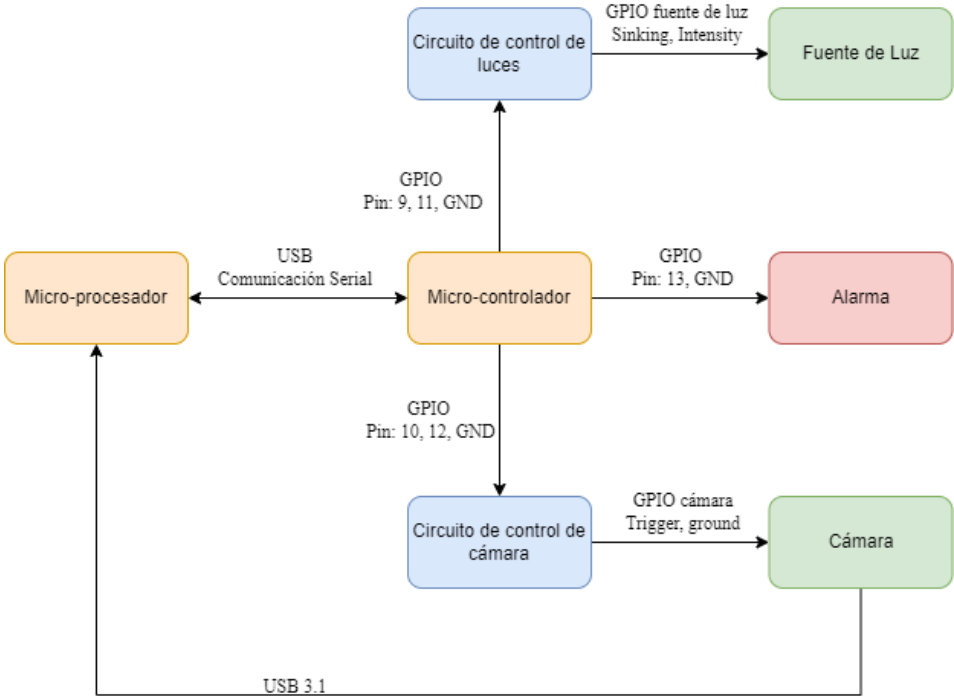


Figura 6. 29. Diagrama de conexión de los elementos del sistema de control. Fuente: Elaboración propia.

6.4.1. Computador

El elemento más importante del computador a seleccionar es el microprocesador (CPU), este procesador debe estar entre los requisitos recomendados por parte del fabricante de la cámara. En este caso, la recomendación del fabricante [19] es un procesador Intel i5 o equivalente. Además de esto, el fabricante recomienda una memoria RAM de, al menos, 4 GB. Es de esta manera que se proponen los siguientes 4 ordenadores. Estos ordenadores son de proveedores locales para economizar en los temas de costos por envío y tiempos por envío.

Cuadro 6. 1. Tabla de posibles opciones para el computador del sistema.

Proveedor	Procesador	Memoria RAM	Costo
Intelec [20]	AMD Ryzen 5	8 GB DDR4	₡ 299,000
ExtremeTech [21]	AMD Ryzen 5	8 GB DDR4	₡ 295,000
Intelec [22]	Intel i5	8 GB DDR4	₡ 470,000
ExtremeTech [23]	Intel i5	8 GB DDR4	₡ 520,000

Fuente: Elaboración propia.

6.4.2. Circuito de control

El circuito de control es un circuito que permite transmitir las señales de salida del Arduino hasta los elementos del sistema tales como las cámaras, las luces y la alarma de detección de defecto. Para esto existen distintas consideraciones necesarias a ser tomadas:

- En cuanto a las cámaras: Su alimentación proviene de la conexión USB 3.1 con el computador, pero es necesaria una conexión con el microcontrolador para el trigger de la misma. Esta señal de trigger puede ser de 3.3V que proporciona el microcontrolador.
- En cuanto a las luces: La alimentación debe ser de 24V en corriente directa. Además, requiere de dos señales para su activación, la señal “intensity” que determina la intensidad de iluminación con la que se activa, esta tiene un rango de 1V a 10V en corriente directa. Además, existe la señal trigger, que puede ser PNP o NPN. En este caso se utiliza la versión NPN.
- En cuanto a la alarma: Se utiliza una luz piloto LED roja con alarma sonora incluida, esta se debe alimentar a 12V en corriente directa para su correcto funcionamiento.

Con estas consideraciones tomadas en cuenta, se presenta en las figuras 6.30 y .6.31, el esquemático del circuito diseñado para estos requerimientos, dividido en las 3 partes.

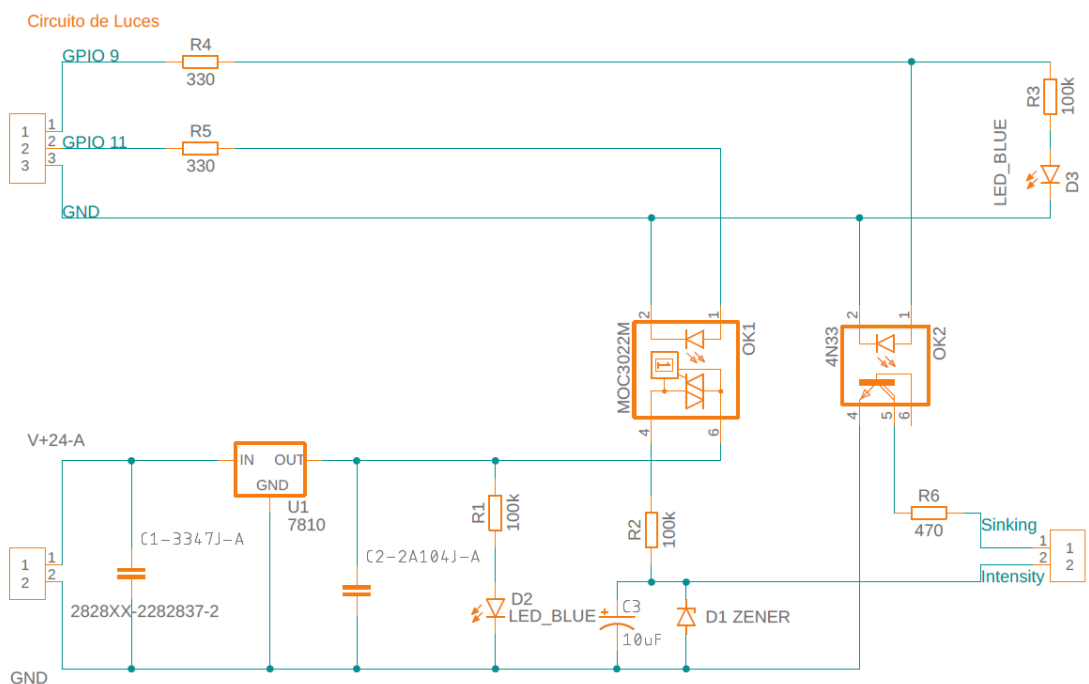


Figura 6. 30. Esquemático de circuito de luces. Fuente: Elaboración Propia.

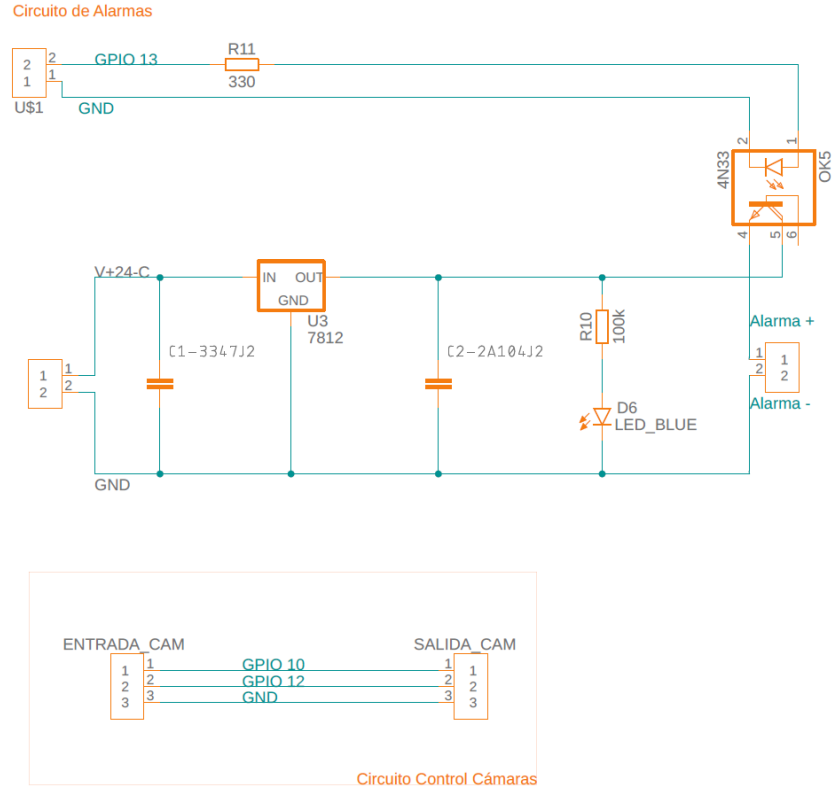


Figura 6. 31. Esquemático de circuito de alarma y cámara. Fuente: Elaboración propia.

Al ser las luces las que tienen el requerimiento de alimentación mayor, se inicia el diseño partiendo de una fuente de alimentación que pueda suplir este requerimiento. Por lo tanto, se utiliza una fuente de 24V para los circuitos la cual se acondiciona luego para cada circuito específico. En el caso del circuito de las luces los elementos más importantes son los optoacopladores y el regulador de tensión. Para realizar un desacople de potencias entre la placa del microcontrolador y el circuito se utilizan optoacopladores que se encargan de transmitir la señal proveniente del microcontrolador a la sección de potencia del circuito. Por la velocidad de disparo necesaria para actuar las luces, es necesario un optoacoplador de altas velocidades para la salida de trigger de la luz; es por esto que se utiliza un 4N33 para permitir un pulso rápido. Por otro lado, se utiliza un MOC3022 para hacer el desacople de potencias respecto a la señal de intensidad, pues este no necesita tener alta velocidad de activación, pero si debe aguantar los voltajes de hasta 10V. Para regular el voltaje de la fuente de 24V a 10V, se utiliza un LM7810 con un par de capacitores de forma que se establezca la tensión de salida. Además de esto, se utilizan 2 Leds para conocer el estado del circuito y las señales.

Por último, para la señal de intensidad se utiliza un diodo Zener con la intención de no permitir una fluctuación de tensión por encima de los 10V, junto a un capacitor para estabilizar la señal y una resistencia para disipar el voltaje restante.

En el caso del circuito de alarmas de la figura 6.31, se tiene una disposición similar a la anterior, pero con un único optoacoplador, ya que sólo se necesita una señal de salida de la placa; y un LM7812 para regular la tensión de entrada al valor de 12V que se necesita a la salida de este.

El apartado de las cámaras es simplemente una interfaz para la conexión directa entre la placa y las cámaras. Existen 3 entradas y salidas las cuales 2 se refieren una a cada cámara y la tercera se refiere a la tierra de estas.

6.4.3. Algoritmo de control

Para la sincronización de señales como tal, el microcontrolador debe recibir señales del microprocesador respecto al inicio del programa, la calibración de los disparos, y la activación de alarmas. A partir de esta información, debe elaborar un procesamiento para luego levantar las señales necesarias de su GPIO y permitir el correcto funcionamiento del sistema. Un diagrama de flujo que representa el algoritmo implementado se encuentra en la imagen de la figura 6.32.

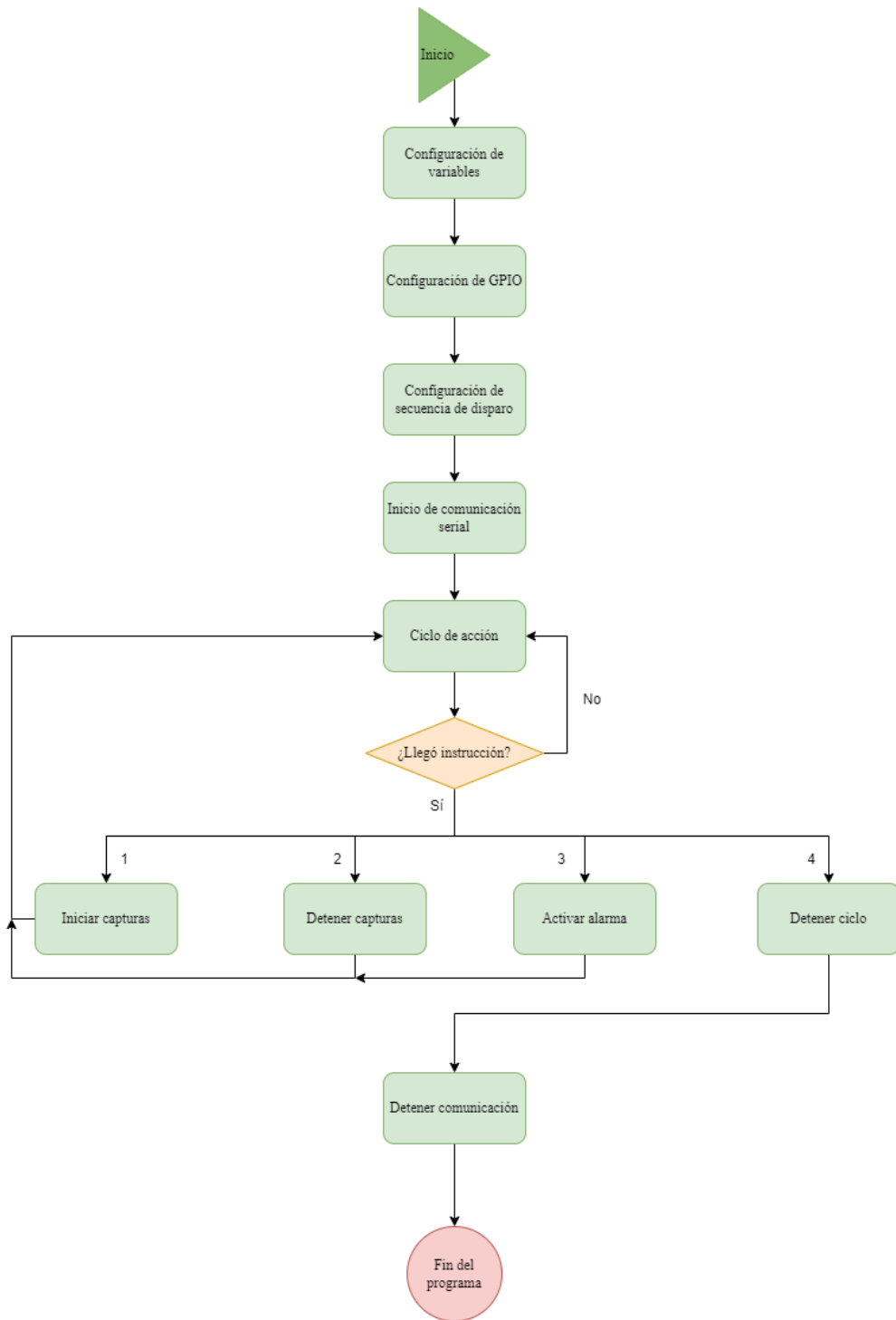


Figura 6. 32. Diagrama de flujo del algoritmo de control. Fuente: Elaboración propia.

Las secciones de este algoritmo se detallan a continuación:

- **Configuración de variables:** Se inicializan las variables necesarias para el funcionamiento del programa. Estas incluyen los valores de frecuencia de disparo para las luces y para las cámaras, y variables creadas para el propósito del algoritmo (listas, strings, entre otros.)
- **Configuración de GPIO:** Se inicializan las salidas y entradas de la placa, para enviar las señales al circuito correspondiente.
- **Configuración de secuencia de disparo:** Se genera una secuencia de disparo para las luces y cámaras de la siguiente forma: primero se genera el pulso para encender la luz, luego se genera el pulso para encender la cámara, luego se apaga el pulso de la cámara para detener el disparo, por último se apaga el pulso de la luz para detener el disparo. Esta secuencia de eventos es para asegurar una captura con suficiente iluminación.
- **Inicio de comunicación serial:** Se abren los puertos seriales de la placa para permitir el recibo de información.
- **Ciclo de acción:** Ciclo de funcionamiento del programa, se realiza polling a la espera de un mensaje proveniente del computador. Este mensaje selecciona una de las siguientes 4 opciones:
 - **Iniciar captura:** Al recibir la primera opción se activa la bandera de encendido de luces y captura. De esta forma, se procede a aplicar la secuencia de disparo cada vez que se activa la interrupción por el timer1 en la placa. Esta interrupción se configura de manera que realiza la secuencia de disparo a una frecuencia de 256 Hz; de esta forma se asegura que el disparo de la cámara y las luces son suficientemente rápidos para capturar a la velocidad deseada.
 - **Detener captura:** Al recibir esta opción se desactiva la bandera de encendido de luces y captura. Esto quiere decir que en las próximas interrupciones del timer1 no va a haber ningún disparo.
 - **Activar alarma:** Al recibir esta opción se pone en alto la salida que indica que se detectó un defecto.
 - **Detener ciclo:** Esta opción rompe el ciclo de acción para detener la comunicación serial y el programa.

6.5. Sección de detección: Interfaz

Para la interfaz del sistema se contemplan 2 subsecciones: la interfaz del programa para el operario, y los elementos para operar el sistema, es decir, los periféricos del computador.

6.5.1. Interfaz del programa

En este caso, la interfaz del programa tiene como objetivo la simplicidad de uso, de forma que sea lo más sencillo para el operario poner en marcha el sistema. Se presenta en la imagen de la figura 6.33 la interfaz diseñada con este objetivo en mente.

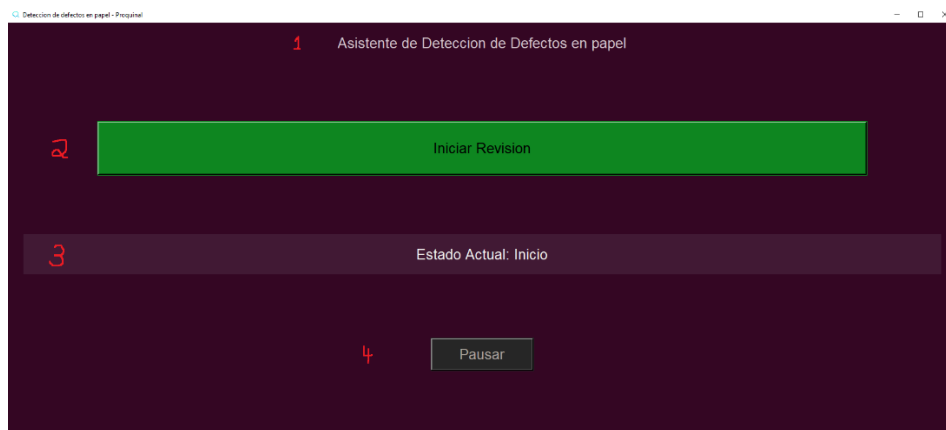


Figura 6. 33. Interfaz del programa de detección de defectos. Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en la imagen de la figura 6.33, la interfaz cuenta con 4 secciones:

1. **Título:** El título del programa
2. **Botón de inicio/fin:** Botón para dar inicio o, una vez iniciado, finalizar el proceso de revisión.
3. **Barra de estado:** Barra de texto en la que se muestra un resumen del proceso actual del sistema.
4. **Pausa/Reanudación:** Botón para pausar o reanudar el sistema en caso de ser necesario.

6.5.2. Periféricos

Como se resolvió en la tabla del cuadro 5.8 en la sección 5.2.5, para la interfaz se utilizan periféricos convencionales, es decir un mouse y teclado y un monitor de computador normal. En este caso, el objetivo principal de este apartado es obtener los elementos por un costo reducido, pues no se requiere ninguna función especial de estos. Dicho esto, se presenta a continuación una tabla de propuesta para cada uno:

Cuadro 6. 2. Propuesta para periféricos de ordenador.

Elemento	Costo
Combo Teclado y Mouse [24]	₪ 12000
Monitor Viewsonic 22" [24]	₪ 75000

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 7. Resultados y análisis

7.1. Pruebas de concepto y validación

En esta sección se presentan las pruebas realizadas con el fin de validar los requerimientos planteados en el capítulo 4. Además de su respectivo análisis para obtener conclusiones sobre el sistema.

7.1.1 Variables a medir y factores de influencia

Para determinar las variables a medir se realizó un análisis de los requerimientos y necesidades planteadas por el cliente. De esta manera, se determinaron las siguientes variables a medir:

- Capacidad de detección de un defecto.
- Velocidad de detección: Es decir, la velocidad en la que el sistema toma y procesa las capturas.
- Número de alertas por defecto.
- Obstrucción: Si el sistema genera algún tipo de obstrucción ante la revisión del operario o el paso de material.
- Facilidad de uso: Si el sistema se le hace fácil de utilizar al operario.

A partir de estas variables a medir se determinaron los siguientes factores de influencia para cada variable (y sus rangos):

- Capacidad de detección de un defecto.
 - Tamaño del defecto.
 - Estado del papel respecto al sistema (estático o dinámico).
 - Offset del defecto respecto al borde del papel.
 - Tipo de defecto.
- Velocidad de detección.
 - Si existe o no un defecto en el foco de detección.
 - Tiempo durante el cual el sistema ha permanecido encendido.
- Número de alertas por defecto.

- Tamaño del defecto.
- Obstrucción.
 - Operario.
- Facilidad de uso.
 - Operario.

Cada factor de influencia tiene un respectivo valor o rango que pueden tomar, este valor se determinó bajo el conocimiento del entorno del área de trabajo, buscando siempre que sea lo más similar posible al caso real. Estos valores son los siguientes:

- Tamaño del defecto: Desde 0,3mm hasta 9mm.
- Estado del papel respecto al sistema: Los dos posibles valores son estático o dinámico.
- Offset del defecto respecto al borde del papel: Desde 0mm a 25mm.
- Tipo de defecto: Ranura o gota de material.
- Si existe o no un defecto en el foco de detección: Existe o no existe.
- Tiempo durante el cual el sistema ha permanecido encendido: 0 a 120 minutos.
- Operario: El ideal son los 3 operarios del área, pero a raíz de la dificultad de tiempos, se tomarán en cuenta 2 operarios; pues el horario de uno de ellos es desde la noche a la madrugada.

7.1.2 Sección mecánica

Como validación de la sección mecánica se requirió conocer si el sistema diseñado obstruye de alguna forma la visión del operario o el paso del material. Para esto, se realizó una visita a la planta con el prototipo del sistema, y se colocó de forma que simulara la posición del sistema en una futura implementación. Una vez colocado se les preguntó a 2 de 3 operarios de turno qué le parecía la posición del sistema respecto a su posición en el área de trabajo y si generaba algún tipo de disconformidad para él realizar su labor. Para la empresa cliente no es crítico que se les realice la entrevista a los 3 operarios del área porque con que dos de estos tengan una opinión similar se puede llegar a una conclusión, además el tercer operario tiene el turno de la mañana que comprende entre las 22:00 y las 6:00, por lo

que también se toma en cuenta la facilidad de la entrevista. El operario A, cuyo turno corresponde al emprendido entre las 14:00 y 22:00 (turno de la tarde), responde: “A la hora de realizar no me afecta en nada, ya que se encuentra por detrás del rollo de revisión. Lo único es que toca prestar un poco más de atención a la hora de realizar el cambio de papel para acomodar también la cámara. La idea me gusta mucho porque me permite anotar datos en el sistema con más tranquilidad sabiendo que la cámara me puede alertar para yo estar atento en caso de que venga un defecto.”

El operario B, cuyo turno corresponde al emprendido entre 6:00 y 14:00 (turno de la mañana), responde: “En la revisión no afecta, nada más me gustaría que el mover las cámaras sea sencillo para no perder mucho tiempo con eso.”

Además de esto, se observó el paso del papel a través del sistema para garantizar que no hubiera ningún tipo de obstrucción.

A partir de lo observado y las respuestas de los operarios se puede determinar que una posible mejora a la sección mecánica es buscar una forma de que el movimiento de la cámara sobre el brazo sea lo más sencillo y rápido posible para la manipulación de ellos.

De igual forma, bajo lo observado y las respuestas de los operarios se determina que no existe ninguna obstrucción a la operación de revisión por parte de los operarios ni al paso del material, por lo que se logran evaluar satisfactoriamente los requerimientos número 3 y 4 del cuadro 4.2.

7.1.3. Sección de detección

7.1.3.1. Prueba 1:

Para la primera validación de la sección de detección se realizó la prueba que se encuentra en el cuadro 7.1. Para esto se utilizó el prototipo del sistema y una población de 20 especímenes de papel obtenidas de la planta de producción, los cuales contaban con defectos de tipo ranura o gota ya determinados por los operarios. La muestra tomada para la prueba consistió en tomar de forma aleatoria 6 de estos especímenes. Cada uno de estos especímenes podía contener 1 o más defectos de uno o ambos tipos, para un total de 20 defectos analizados. De esta forma se cuenta con un entorno muy similar al área de trabajo. A partir de este cuadro

se logra evaluar los requerimientos número 2 y 5 del cuadro 4.4, así como también el número 2 del cuadro 4.5. Para esta prueba un valor de “Sí” en la casilla de lectura del sistema indica que el sistema detectó el defecto y lo anunció mediante alarma, mientras que un “No” significa lo contrario.

Cuadro 7. 1. Prueba de concepto para validar la detección del sistema en estado estático.

Descripción de la prueba: Poner, en el área de revisión del sistema, muestras de papel con defectos identificados previamente por los operarios, con el objetivo de obtener una lectura por parte del sistema.				
# Defecto	Tipo de defecto	Tamaño de defecto ($\pm 0.1\text{mm}$)	Offset ($\pm 0.1\text{mm}$)	Lectura del sistema
1	Ranura	1	0	Sí
2	Gota	2.3	0	Sí
3	Ranura	0.8	0	Sí
4	Gota	2	3.5	No
5	Ranura	0.5	0	Sí
6	Gota	0.8	3.2	No
7	Ranura	4.5	0	Sí
8	Gota	4	15	No
9	Ranura	0.3	0	No
10	Gota	1.5	2.5	Sí
11	Ranura	0.8	0	Sí
12	Gota	6	20	No
13	Ranura	2	0	Sí
14	Gota	4.3	1.5	Sí
15	Ranura	5	0	Sí
16	Gota	1.8	25	No
17	Ranura	1.6	0	Sí
18	Gota	3	1	Sí
19	Ranura	1.6	0	Sí
20	Gota	4	0	Sí

Fuente: Elaboración propia.

A partir del cuadro 7.1 se pueden denotar distintos aspectos importantes sobre tanto el sistema como los defectos de muestra. Primero que todo, es importante observar que los defectos de tipo gota suelen ser mayores en tamaño, con un tamaño promedio de 2.97 mm; mientras que los defectos de tipo ranura son los que se encuentran en valores más pequeños con un promedio de 1.81 mm. Por su parte, el sistema fue capaz de obtener una lectura positiva para 15 de los defectos presentados, y una negativa para 5 de estos. Bajo este

resultado se observa que el sistema tuvo dificultades con un defecto de 0.3 mm en el borde del papel; además de esto, se puede observar que los defectos que estén a una distancia mayor a aproximadamente 3 mm del borde del papel no son detectados. Esto se debe a las regiones de interés del sistema, pues el punto crítico de este es el borde (según lo indicado por el cliente) por lo que un análisis de la imagen que se encuentre más allá de este puede generar ruido indeseado entonces el sistema lo ignora. A modo de ejemplo de los defectos analizados así como también el proceso de análisis que lleva a cabo el sistema se presentan las imágenes de las figuras 7.1, 7.2 y 7.3.

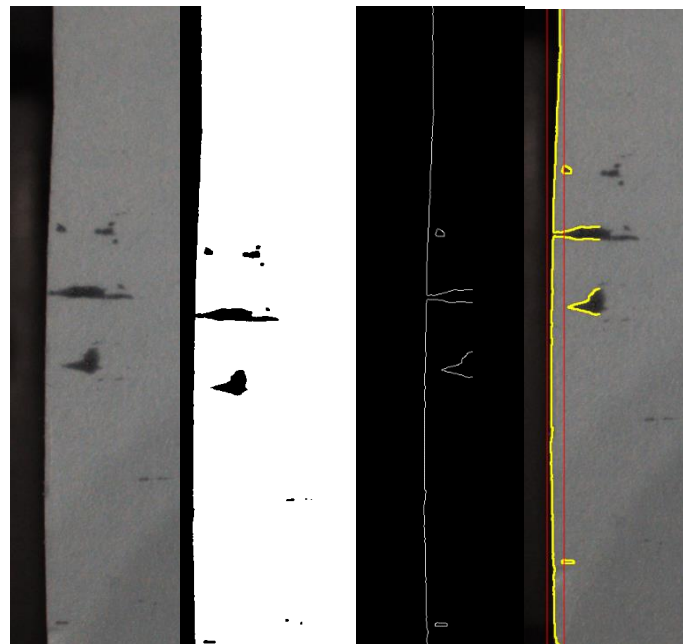


Figura 7. 1. Proceso de detección: Defecto tipo gota. Fuente: Elaboración propia.

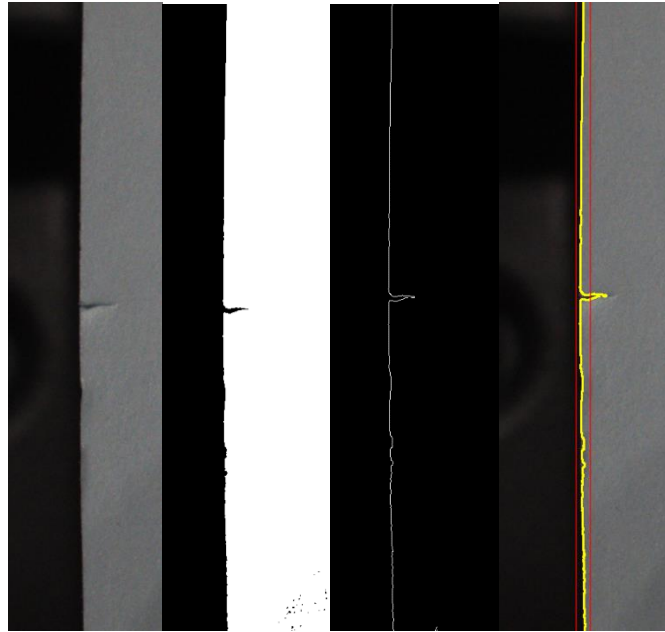


Figura 7. 2. Proceso de detección: Defecto tipo ranura. Fuente: Elaboración propia.

En las imágenes de las figuras 7.1 y 7.2 se muestra el proceso de detección separado en 4 etapas. La primera (más a la izquierda) se refiere a la captura inicial de la imagen sin ningún procesamiento. La siguiente es el filtro de Binarización o segmentación binaria que se le aplica a la imagen. Luego, se tiene un filtrado de bordes canny para obtener el borde de la imagen y los contornos de los posibles defectos. Por último, se tiene una determinación de contornos y un análisis de posición en donde en el caso de estar sobrepasando la región de interés estricta se considera como un defecto detectado. Es importante remarcar que la región de interés estricta es la que se comprende por los pixeles alrededor del borde del papel, en este caso marcada por un rectángulo rojo alrededor de este.

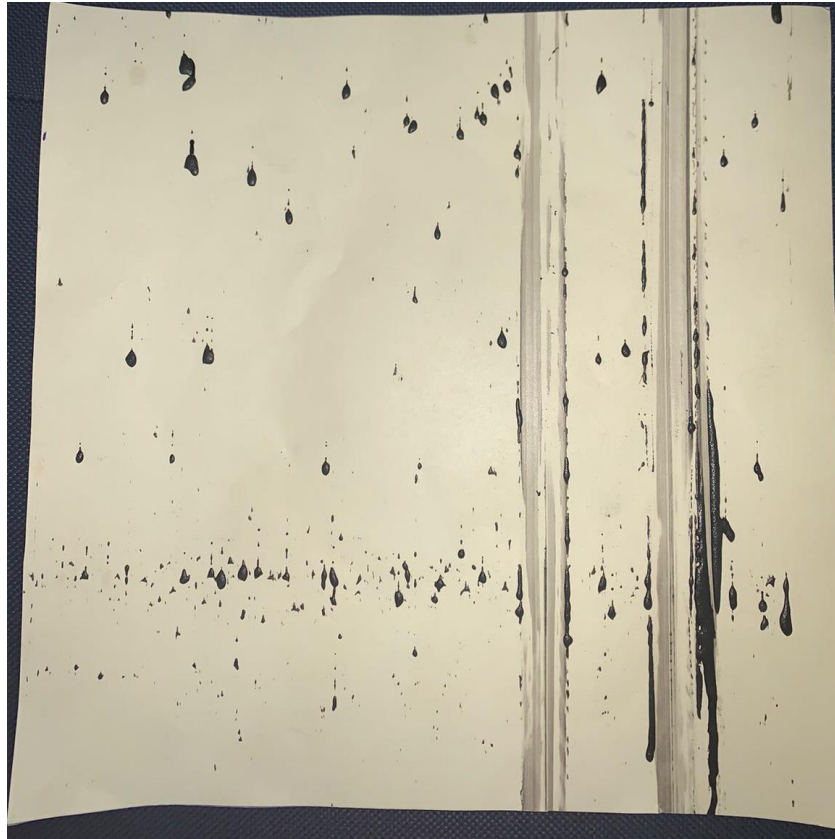


Figura 7. 3. Espécimen de papel con defectos de tipo gota. Fuente: Elaboración propia.

7.1.3.2. Prueba 2:

En el cuadro 7.2 se muestra una segunda prueba de validación para la sección de detección. Para este caso se utilizó el mismo entorno presentado para la prueba del cuadro 7.1, pero en este caso en vez de utilizar muestras de papel con defectos ya determinados, se utiliza una muestra a la cual se le realizan pequeños cortes por medio de tijeras, de modo que se logra controlar el tamaño de estos cortes. A partir de este cuadro se realiza una segunda evaluación del requerimiento 5 del cuadro 4.4.

Cuadro 7. 2. Prueba de concepto para validar la lectura del sistema para diferentes tamaños de defectos de tipo ranura.

Descripción de la prueba: Poner, en el área de revisión del sistema, muestras de papel con defectos de tipo ranura generados con tijera, con el objetivo de obtener una lectura por parte del sistema.		
# Defecto	Tamaño de defecto (± 0.1 mm)	Lectura del sistema
1	3	Sí

2	2.5	Sí
3	2.2	Sí
4	2	Sí
5	1.8	Sí
6	1.4	Sí
7	1.2	Sí
8	1	Sí
9	0.8	Sí
10	0.6	Si
11	0.5	Si
12	0.4	No
13	0.3	No

Fuente: Elaboración propia.

La prueba se inició creando una ranura de un valor relativamente alto (3mm) como defecto inicial, y este valor se fue reduciendo hasta obtener un resultado negativo en la lectura del sistema. Bajo este criterio se logra entender el límite del sistema y en este caso se puede decir que el sistema no puede detectar defectos de un tamaño menor a los 0.5 mm. De igual forma, el requerimiento indica que el tamaño mínimo de detección son 0.5 mm, por lo que este límite no afecta el cumplimiento del requerimiento. En la imagen de la figura 7.4 se muestra un ejemplo de la muestra de papel utilizada.



Figura 7. 4. Papel con ranuras hechas por tijera. Fuente: Elaboración propia.

7.1.3.3. Prueba 3:

En el cuadro 7.3 se muestra una tercera prueba de validación para la sección de detección. Para este caso se utilizó el mismo entorno presentado para la prueba del cuadro 7.1, pero en este caso en vez de utilizar pequeños especímenes de papel, se utiliza un espécimen más largo (2 metros), que permite el paso de este a través del sistema (es decir, en movimiento mientras el sistema captura). A este espécimen se le realizan distintos rompimientos de forma manual a lo largo de su extensión para generar la población de prueba, además de esto, se generan manchas de forma manual (utilizando marcador) para simular defectos de tipo gota. A partir de este cuadro se evalúan los requerimientos número 3, y 5 del cuadro 4.4, así como también el número 2 del cuadro 4.5.

Cuadro 7. 3. Prueba de concepto para validar la detección del sistema en estado dinámico.

Descripción de la prueba: Pasar, a través del área de revisión, una muestra en movimiento con defectos a lo largo de su extensión, con el objetivo de obtener una lectura del sistema.					
# Defecto	Tipo de defecto	Tamaño de defecto ($\pm 0.1\text{mm}$)	Offset ($\pm 0.1\text{mm}$)	Lectura del sistema	Veces que se activó la alerta
1	Ranura	3,1	0	Si	1
2	Gota	1,5	1,5	Si	1
3	Gota	2	0	Si	1
4	Gota	1	1	Si	1
5	Ranura	0,6	0	Si	1
6	Gota	3,4	2	Si	2
7	Gota	5	0	Si	2
8	Ranura	4	0	Si	2
9	Ranura	0,8	0	Si	1
10	Gota	4,8	2,5	Si	2
11	Ranura	2,4	0	Si	2
12	Gota	1	0	Si	1
13	Ranura	0,8	0	No	0
14	Ranura	3	0	Si	1
15	Ranura	1,5	0	Si	1
16	Gota	3	1	Si	2
17	Ranura	2,3	0	Si	1
18	Ranura	0,8	0	Si	1

19	Gota	6	0	Si	2
20	Gota	3,5	0	Si	2
21	Ranura	1,5	0	Si	1
22	Gota	4,8	1	Si	2
23	Gota	2,5	2	Si	1
24	Gota	4	0	Si	2
25	Ranura	1,5	0	Si	1
26	Ranura	0,8	0	Si	1
27	Ranura	0,5	0	Si	1
28	Ranura	1,3	0	Si	1
29	Gota	1	1	Si	1
30	Ranura	4	0	Si	2
31	Gota	4,5	0	Si	2
32	Gota	3	0	Si	2
33	Ranura	1	0	Si	1
34	Ranura	0,5	0	No	0
35	Ranura	1	0	Si	1
36	Gota	3	0	Si	1
37	Ranura	0,8	0	Si	1
38	Gota	4	1	Si	2
39	Gota	2,5	0	Si	1
40	Ranura	0,6	0	Si	1

Fuente: Elaboración propia.

Bajo los resultados de esta prueba se puede observar que el sistema logra detectar la mayoría de los defectos presentados, con 38 lecturas positivas y 2 negativas. Además de estos, se puede observar que los defectos de tipo ranura son los que generan más dificultad a la detección, y esto sucede con los defectos de tamaños pequeños de tipo ranura, todos por debajo de 1 mm. Esto indica que, mientras que el sistema si es capaz de funcionar en estado dinámico (es decir, mientras el papel esté en movimiento a través del sistema), tiene una limitante de precisión para defectos de tipo ranura entre los 0,5mm y 1mm. Finalmente, la gran mayoría de defectos son detectados una única vez, en total: 13 defectos detectados 2 veces, 25 defectos detectados 1 vez y 2 defectos sin detectar. Los defectos detectados más de una vez tienden a ser del tipo gota, además, los más grandes en ese subgrupo.

7.1.3.4. Prueba 4:

En el cuadro 7.4 se muestra una cuarta prueba de validación para la sección de detección. Para esta prueba y bajo el mismo entorno de pruebas que para las anteriores, se utilizó una muestra de papel con defectos conocidos y se puso bajo el foco de detección del sistema. Luego, mediante la librería “datetime” de Python se determina el tiempo que dura el programa en tomar 30 capturas. Este tiempo es obtenido con precisión de milisegundos. A partir de este cuadro se evalúa el requerimiento número 4 de la tabla del cuadro 4.4.

Cuadro 7. 4. Prueba de concepto para validar el tiempo de detección del sistema.

# Medición	Tiempo para 30 capturas (±0.0001s)
1	0.5800
2	0.5170
3	0.5720
4	0.7960
5	0.5620
6	0.6130
7	0.4970
8	0.5420
9	0.7610
10	0.5450
Promedio	0.5985

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de detección ideal es de 30 metros de material por minuto, a partir de los datos del cuadro 7.4 se determina que el sistema procesa 30 capturas en 0.5985 segundos, aproximadamente 50 capturas por segundo. Según el área de trabajo determinada para la distancia de trabajo propuesta, una captura cubre una dimensión vertical de 2,5875 cm. Esto quiere decir que se necesitan 1160 capturas para cubrir los 30 metros de material que pasan por minuto a través de la máquina. El sistema procesa 3007 capturas por minuto, por lo que cumple perfectamente el requerimiento de velocidad de detección.

$$\frac{30\text{capturas}}{0.5985s} = 50\text{fps}$$

$$\frac{3000\text{cm}/\text{min}}{2,5875\text{cm}/\text{captura}} = 1159,42 \approx 1160 \text{ capturas}/\text{min}$$

$$50\text{fps} * \frac{60s}{1\text{min}} = 3007 \text{ capturas}/\text{min}$$

Además de esto, si se considera como si todas las capturas procesadas fueran tan lentas como el peor de los casos, se tiene que el sistema procesa 30 capturas en 0.7960 segundos según los datos del cuadro 7.4, esto significa 37 capturas procesadas en 1 segundo. Por lo tanto, en un minuto se procesan 2220 capturas, lo cual de igual forma cumple el requerimiento de la velocidad de detección.

$$\frac{30 \text{capturas}}{0.7960s} = 37fps$$

$$37fps * \frac{60s}{1min} = 2220 \text{ capturas/min}$$

7.1.3.5. Prueba 5:

Una siguiente prueba para la sección de detección se puede observar en el cuadro 7.5, y consistió en poner el sistema en funcionamiento por 2 horas continuas y realizar medición de tiempo por 30 capturas cada 15 minutos, con la configuración de prueba que se utiliza para el cuadro 7.4. De esta forma, se evalúa el requerimiento número 5 del cuadro 4.2.

Cuadro 7. 5. Prueba de concepto para validar el tiempo en funcionamiento del sistema.

# Medición	Tiempo para medición (minutos)	Tiempo para 30 capturas (±0.0001s)
1	0	0.5330
2	15	0.5600
3	30	0.5980
4	45	0.5650
5	60	0.5630
6	75	0.6500
7	90	0.6310
8	105	0.5420
9	120	0.5510

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar de los resultados del cuadro 7.5, el sistema mantiene un tiempo para procesar 30 capturas muy similar a lo largo de todo su funcionamiento, con pequeñas variaciones que no afectan en términos de velocidad de detección al mismo. Cabe destacar que durante esta prueba se utilizó una muestra de material con defecto y de esta forma se comprobó que la función de detección de defectos permanece activa y en

funcionamiento tras las 2 horas de prueba. Se concluye que el sistema cumple con el requerimiento número 5 del cuadro 4.2.

7.1.3.6. Prueba 6:

Para evaluar la interfaz del sistema, se realizó una visita a la planta con el prototipo del sistema, se les pidió a dos operarios que lo utilizaran por unos minutos, con el fin de obtener su opinión acerca de qué tan sencillo consideraban que era utilizarlo. El operario A, cuyo turno corresponde al emprendido entre las 14:00 y 22:00 (turno de la tarde), comenta: “Pues es muy sencillo de utilizar, son sólo dos botones y el sistema trabaja prácticamente solo.”

Mientras que el operario B, cuyo turno corresponde al emprendido entre 6:00 y 14:00 (turno de la mañana), responde: “Si así es como se va a implementar el sistema me gusta porque no es complicado de entender.”

Bajo la respuesta de los operarios se determina que la interfaz es funcional y responde a las necesidades de estos, por lo tanto se satisface el requerimiento número 1 del cuadro 4.6. La interfaz busca siempre se lo más simple posible para que el usuario final pueda utilizar el sistema sin problemas.

7.1.3.7. Prueba 7:

A modo de validar más concretamente los puntos de calidad de producto y pérdida de material, se buscó realizar una prueba de concepto que consiste en lo siguiente:

A través del foco de detección del sistema, se hace pasar un material de 2 metros preparado previamente con 100 defectos cuya posición y tipo son conocidos y se busca conocer cuántos de estos defectos el sistema es capaz de leer. Estos defectos son de tipo ranura y gota, y sus tamaños varían siendo los más pequeños de 1 mm, de forma que son similares a los defectos detectados por un operario normalmente.

Los resultados completos de esta prueba se pueden observar en el anexo A, cuadro A.1. A modo de resumen, el sistema fue capaz de detectar de forma positiva 94 de los 100

defectos que se prepararon. De forma que tiene una precisión del 94% para la detección de estos.

Gracias a los datos obtenidos del cuarto de papel, se conoce que un operario normal del área de separación de papel logra detectar en promedio 80 de cada 100 defectos que llegan al cuarto de papel. La línea de producción es de unos 250 metros de largo; en el caso de que ocurra una división de papel se pierde todo el material que esté en la línea indistintamente si la división de papel se da al inicio, al final o en el medio de esta. Esto quiere decir que cada defecto de tipo ranura que se falla en detectar equivale a 250 metros de material perdidos. Por otra parte, cada defecto que se falla en detectar pero no induce una división de papel (es decir, defectos de tipo gota) equivale a un posible defecto superficial en el producto final, lo cual reduce la calidad del material entregado.

7.2. Resumen de porcentaje de cumplimiento de requerimientos

En esta sección se describe el porcentaje de cumplimiento de los requerimientos establecidos en el capítulo 4 de este documento, de forma que se puede determinar un grado de cumplimiento de los objetivos planteados para el proyecto. Del mismo modo que en el capítulo 4.3, se plantea cada sección con sus requerimientos por aparte.

7.2.1. Sección mecánica: Estructura de montaje del sistema de detección

Bajo este apartado se evalúan los requerimientos planteados en el cuadro 4.2.

7.2.1.1. Largo máximo de la estructura:

Para el requerimiento número 1 del cuadro 4.2, se plantea que el valor ideal del largo de la estructura sea menor a 225 cm. Este requerimiento se planteó por si la estructura debía ser colocada de extremo a extremo del área de trabajo. En el caso de la solución planteada, la estructura se conforma por dos estructuras en forma de columnas, que se acomodan de forma que puedan estar dentro de la distancia horizontal establecida. El objetivo de las estructuras es que se encuentren a una distancia máxima entre ellas de 201 cm, ya que de esta forma van a estar en posición para revisar todos los posibles anchos de material. Se considera el requerimiento como satisfecho.

7.2.1.2. Distancia entre elementos de detección:

Como se menciona en el punto anterior, la solución planteada permite ajustar la distancia entre las estructuras; pero de igual forma está planteada para cubrir una distancia entre elementos de detección máxima de 183 cm, y mínima de 150 cm, pues el elemento de detección tiene forma de ajustar su posición. Por esto se considera el requerimiento como satisfecho.

7.2.1.3. Obstrucción a la revisión del operario:

Según la sección 7.1.2 en el apartado de sección mecánica, se realizó una prueba de concepto para determinar el grado de cumplimiento de este requerimiento y su resolución fue satisfactoria.

7.2.1.4. Obstrucción al paso del material:

De igual forma que para el anterior, bajo la prueba de concepto realizada en planta se determinó que no existe obstrucción al paso del material bajo la solución propuesta.

7.2.2. Sección mecánica: Carcasa de sección de control

Bajo este apartado se evalúan los requerimientos planteados en el cuadro 4.3.

7.2.2.1. Aislamiento al polvo:

En la solución se recomienda la caja metálica de Schneider Electric cuya métrica de aislamiento IP está dada por un IP 55 según el proveedor [10], lo que indica que se cumple este requerimiento.

7.2.2.2. Obstrucción a la revisión del operario:

La carcasa para el circuito de control se plantea situar fuera del área que comprende la máquina, en un lugar donde no exista posible obstrucción de ningún tipo. De esta forma se cumple el requerimiento.

7.2.2.3. Obstrucción al paso del material:

De la misma forma, la ubicación de la carcasa no obstruye ningún modo el paso de material según la ubicación planteada. De esta forma se cumple el requerimiento.

7.2.3. Sección de detección: Elemento de detección

Bajo este apartado se evalúan los requerimientos planteados en el cuadro 4.4.

7.2.3.1. El elemento necesita iluminación adicional:

El requerimiento número 1 de la tabla del cuadro 4.3 no se cumple bajo esta solución, pero tras el diálogo con la empresa cliente se determinó que este no es un requerimiento crítico que perjudica el cumplimiento de los objetivos del proyecto, y se llegó a la conclusión de que es aceptable siempre y cuando se utilicen los elementos de los que ya disponen.

7.2.3.2. El elemento detecta defectos en estado estático:

En la sección 7.1.3 se demostró bajo las pruebas de concepto detalladas en 7.1.3.1 y 7.1.3.2 que este requerimiento se cumple para distintos tipos de defectos y distintos tamaños.

7.2.3.3. El elemento detecta defectos en estado dinámico:

En el apartado de detección de la sección anterior (7.1.3) se demostró bajo prueba de concepto que este requerimiento se cumple para distintos tipos de defectos y distintos tamaños.

7.2.3.4. Velocidad de detección del elemento:

Como se menciona en el análisis de la sección 7.1.3.4, el sistema es capaz de tomar hasta 3240 capturas por minuto, lo cual bajo el tamaño de la dimensión vertical del área de trabajo, supera con creces las 1160 capturas necesarias para detectar 30 metros de material al minuto. Bajo este entendido, el sistema cumple el requerimiento de la velocidad de detección.

7.2.3.5. Detecta defectos de tipo ranura de un tamaño mínimo:

La resolución del sistema es de 0,022mm/px, lo que indica que se tienen aproximadamente 22,727 píxeles para cubrir 0,5mm de material. De esta forma se valida que la resolución determinada es suficiente para obtener características de la ranura más pequeña necesaria con varios píxeles.

Según las pruebas de concepto realizadas, los defectos de tipo ranura más pequeños que el sistema logra detectar son de 0.5mm. Por debajo de este valor el sistema no logra detectar un defecto. En algunos resultados de pruebas de concepto (por ejemplo la prueba detallada en la sección 7.1.3.3) no todos los valores en el rango entre 0.5 y 1 mm son detectados correctamente por el sistema. A pesar de esto, el valor de 0.5 mm como tamaño mínimo de detección se refería a un valor ideal, mientras que el valor de 1 mm cumple el requerimiento propuesto.

7.2.3.6. Horas de operación continua:

Bajo las pruebas de concepto realizadas se demostró que el sistema puede estar en funcionamiento durante 2 horas continuas sin perder mayor rendimiento, este tiempo fue el que se acordó con la empresa cliente que le da validez al requerimiento de uso continuo.

7.2.4. Sección de detección: Sistema de control

Bajo este apartado se evalúan los requerimientos planteados en el cuadro 4.5.

7.2.4.1. Número de alertas con las que cuenta el sistema:

El sistema cuenta con dos alertas, la primera se refiere a la alarma sonora y visual que es proporcionada por la luz piloto conectada al pin 13 del GPIO del microcontrolador para alertar sobre la detección de un defecto. La segunda se refiere a una alerta generada en la interfaz del sistema que indica un posible error en alguna etapa del proceso e indica el mal funcionamiento de este. De esta forma se considera el requerimiento como satisfecho.

7.2.4.2. Cantidad de alarmas sonoras por defecto:

Según la prueba realizada en el apartado 7.1.3.3, la gran mayoría de defectos es detectado con una única alerta, pero los defectos más grandes suelen ser detectados múltiples veces lo que levanta la alarma esa cantidad de veces. Por lo tanto, el requerimiento no se cumple bajo su valor ideal, pero al dialogar con el cliente este menciona que es un resultado aceptable que no perjudica la solución, por lo tanto se toma el requerimiento como válido.

7.2.4.3. El sistema tiene la posibilidad de comunicación IP:

El procesador del sistema tiene posibilidad de comunicación IP de forma sencilla, por lo que este requerimiento se considera satisfecho.

7.2.5. Sección de detección: Interfaz

Bajo este apartado se evalúan los requerimientos planteados en el cuadro 4.6.

7.2.5.1. La interfaz es de uso intuitivo para el operario:

Bajo la prueba realizada en la sección 7.1.3.6 en el apartado de sección de detección, se determinó que este requerimiento se cumple de forma satisfactoria.

7.2.5.2. La interfaz tiene forma de dar inicio y fin a la revisión:

La interfaz del sistema tiene un botón diseñado para dar inicio o dar por finalizada la revisión, por lo tanto este requerimiento se resuelve de forma satisfactoria.

7.3. Análisis económico

7.3.1. Costos

Los costos del proyecto están divididos en los siguientes grupos: materiales y equipo, diseño e implementación, y mantenimiento. En el cuadro 7.6 se muestra un desglose de cada uno de estos grupos y los costos asociados a cada elemento.

Cuadro 7. 6. Costos del proyecto.

Nombre	Costo Unitario	Cantidad	Costo total	Notas
Materiales y equipo				
Sistema de Visión				
Cámara	\$ 595,00	2	\$ 1 190,00	Cotización de Edmund Optics
Lente	\$ 214,00	2	\$ 428,00	
GPIO Cámara	\$ 52,25	2	\$ 104,50	
Alimentación Cámara	\$ 47,50	2	\$ 95,00	
Iluminación	\$ 682,20	2	\$ 1 364,40	Cotización de Smart Vision Lights
Cableado iluminación	\$ 51,00	2	\$ 102,00	
Electrónica				
Circuitería (PCB, Componentes)	\$ 18,22	1	\$ 18,22	MicroJPM [25]
Controlador	\$ 17,95	1	\$ 17,95	

Fuente de Poder	\$	18,95	1	\$	18,95	CRCibernética [26]
Alarmas	\$	4,56	1	\$	4,56	MicroJPM [25]
Interfaz						
Monitor	\$	123,00	1	\$	123,00	Extremetech [24]
Computador	\$	483,79	1	\$	483,79	
Periféricos	\$	19,68	1	\$	19,68	
Estructura Mecánica						
Estructura de soporte	\$	98,40	2	\$	196,80	Taller mecánico contratista
Acople de cámara	\$	6,56	2	\$	13,12	LaserMJPM
Subtotal					\$	4 179,96
Diseño e implementación						
Mensualidad	\$	472,49	5	\$	2 362,45	
Mantenimiento						
Mantenimiento/hr	\$	19,91	12	\$	238,89	12 horas por mes
Implementos de mantenimiento	\$	13,99	1	\$	13,99	Kit de limpieza de computadora, entre otros.
Subtotal Mensualidad					\$	3 034,56
Total					\$	7 214,52

Fuente: Elaboración propia

7.3.2. Ganancias

Las ganancias para este proyecto se ven reflejadas en 2 puntos importantes. El más importante es el ahorro generado al reducir la pérdida de material. Como se mencionó anteriormente, una división de papel implica una pérdida de 250 metros de material, y, gracias a información proporcionada por el cliente se conoce que el costo del material se puede estimar en 3 dólares por metro, en promedio. Según la prueba realizada en la sección 7.1.3.7, el sistema detecta 94 sobre 100 defectos mientras que los operarios de la zona de separación de papel detectan 80 sobre 100 defectos; cada defecto que se falla en detectar implica una posible pérdida de 250 metros de material, por lo que por cada 100 defectos, al utilizar el sistema se puede evitar la pérdida de 3500 metros de material, lo cual equivale a \$10500 ahorrados. Adicionalmente, el cliente indica que al ocurrir una división de papel, la máquina se encuentra en paro durante 15 minutos para poder reiniciar su operación normal.

Esto quiere decir que al utilizar el sistema, por cada 100 defectos hay un potencial ahorro de 210 minutos o 3 horas y media en tiempo perdido para la producción de la planta por restablecimiento de material.

El siguiente punto importante que se debe tomar en cuenta es que el sistema permite el desarrollo de otras tareas para los operarios sin tener numerosas pérdidas. El operario de la zona de separación de papel tiene distintas tareas, entre ellas la revisión del papel como la más importante, pero, adicionalmente debe anotar datos del material y de los defectos en el sistema, realizar el cambio de rollo de papel, y la entrega de un rollo revisado; todo mientras la máquina enrolladora de papel no se detiene, pues es un proceso continuo. Esto indica que a medida que el operario realiza otras labores se pierde la revisión constante del papel e incrementa la posibilidad de que exista un defecto no detectado. Es por esto que al utilizar el sistema propuesto, se le facilita al operario realizar las otras labores de forma correcta, con la seguridad de que si existe un defecto de este tipo se alertará para que tenga tiempo de verificar y registrarlo; mejorando la productividad del operario en todas sus tareas pendientes.

7.3.3. Retorno a la inversión

Al dialogar con el cliente, este menciona que se dan alrededor de 30 divisiones de papel por mes. Esto indica que en un mes deben existir al menos 150 defectos, de los cuales 120 son detectados por un operario y 30 defectos pasan para luego convertirse en divisiones de papel. Bajo el sistema propuesto, por cada 150 defectos se deben detectar en promedio 141 de ellos, es decir, un ahorro de 21 defectos sobre el operario. Esto, en términos monetarios, significa un ahorro de \$15750 al mes. Para este caso entonces se tiene una inversión para el primer año de \$7214,52; y una ganancia en ahorros por material de \$189000 anuales. Por lo que se puede obtener un retorno a la inversión para el primer año, según la fórmula matemática de la ecuación 7.1, de:

$$ROI = \frac{\text{Ganancia} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} \quad (7.1)$$

$$ROI = \frac{189000 - 7214,52}{7214,52} = 25,19$$

Este retorno a la inversión es muy alto e implica una gran ganancia para la empresa bajo el uso del sistema. Esto se debe a que las pérdidas por material son muy altas y numerosas, y el sistema no presenta elementos realmente costosos, lo que lo vuelve una solución muy ventajosa para reducir pérdidas significativamente.

Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones.

Las conclusiones obtenidas tras la validación del prototipo bajo las distintas pruebas de concepto son las siguientes:

- La propuesta de solución planteada genera un potencial ahorro en el material perdido por la empresa. Esto se debe a que cada defecto de tipo ranura detectado sobre el operario reduce la posibilidad de que ocurra una división de papel a causa de este. En este caso, el sistema detecta 94 de cada 100 defectos mientras que el operario detecta aproximadamente 80 de cada 100, esto implica evitar la potencial pérdida de 3500 metros de material por cada 100 defectos.
- Cada defecto de tipo gota en el papel es un potencial defecto en el producto final de la empresa. Por lo tanto, cada defecto de tipo gota detectado sobre el operario reduce la cantidad de defectos en el producto final, mejorando así la calidad del mismo.
- Cuando ocurre una división de papel en la línea de producción no se pierde únicamente el material en la línea, sino que también existe una pérdida de tiempo en el reproceso generado a partir del cambio de papel y la puesta en marcha de la máquina nuevamente. De esta forma, se evidencia que al reducir la posibilidad de que ocurra una división de papel también se reduce el tiempo perdido en reprocesos para la línea de producción, mejorando así la productividad de la planta. Por cada 100 defectos existe un potencial ahorro de 210 minutos o 3 horas y media en tiempo perdido por reprocesos.
- La estructura mecánica propuesta como parte de la solución cumple las necesidades planteadas por el cliente, permitiendo un montaje en la planta de producción sin obstruir las labores de revisión del operario ni el paso del material por el área de revisión. La necesidad del cliente establecía una distancia máxima de 225 cm para el largo de la estructura, mientras que la estructura propuesta tiene una distancia máxima de 201 cm.

- En promedio, el sistema propuesto tiene una velocidad de procesamiento de 3007 capturas por minuto, mientras que la cantidad de capturas necesarias para evaluar 30 metros de material en 1 minuto está dada por 1160 capturas procesadas por minuto. Por lo tanto, el algoritmo de detección planteado tiene una velocidad de detección de aproximadamente 2.5 veces lo requerido por el cliente, de forma que se puede aumentar la velocidad de trabajo en la máquina sin problemas de detección de ser necesario.
- El defecto de mínimo tamaño detectado por el sistema es de 0.5 mm con una precisión reducida, mientras que defectos de tamaño de 1 mm o mayor son detectados sin problemas. Los defectos detectados por los operarios son usualmente de tamaños mayores y más sencillos de observar, por lo que el sistema funciona como una herramienta para complementar su revisión.
- La estructura del sistema se propone situar en una posición que no le obstruye al operario en sus labores de revisión, sino más bien lo complementa, realizando una detección previa a su propia revisión.
- La interfaz propuesta para el sistema es de uso intuitivo para el operario, de forma que le permite operar el sistema sin dificultades para complementar su revisión.
- La propuesta de solución planteada cumple con las necesidades del cliente de forma que se considera como una solución válida.

8.2. Recomendaciones.

Para un desarrollo futuro, o bien implementación del proyecto, se plantean distintas recomendaciones que se deben tomar en cuenta:

- En vista de una posible expansión del proyecto a incluir un mayor número de cámaras para poder observar el ancho completo del papel en búsqueda de defectos, se debe revisar el computador seleccionado; de forma que cumpla con el requisito de memoria necesario para utilizar n cantidad de cámaras necesarias.

- Considerando el tamaño del área de trabajo del sistema de visión propuesto, la fuente de iluminación utilizada tiene un área de efecto mayor a la necesaria, por lo tanto, se puede utilizar una fuente de iluminación mucho más pequeña que cubra únicamente el área de trabajo propuesta. Esto podría significar una simplificación del sistema de control y de la estructura mecánica.
- Como un posible siguiente paso del proyecto se propone generar un registro de los datos obtenidos por el sistema para una revisión de métricas del área de implementación. Los datos registrados podrían ser: defectos detectados en X cantidad de metros, defectos detectados por rollo de material, defectos detectados en X cantidad de tiempo, entre otros.

Referencias

- [1] Vélez, J., Moreno, A., Sánchez, A., & Sánchez, J. (2003). *Visión por Computador*. Madrid.
- [2] Brown, H., & Friston, K.J. (2012). Free-energy and illusions: the Cornsweet effect. *Front. Psychology* 3:43. doi: 10.3389/fpsyg.2012.00043
- [3] Purves, D., Amita S., & Beau R. (1999). An Empirical Explanation of the Cornsweet Effect. *Journal of Neuroscience*. 8542-8551. Doi: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.19-19-08542.1999>
- [4] Nixon, M., & Aguado, A. (2019). *Feature Extraction and Image Processing for Computer Vision*, 4th ed. Academic Press.
- [5] Steger, C., Ulrich, M., & Wiedemann, C. (2018). *Machine Vision Algorithms and Applications*, 2nd ed. John Wiley & Sons.
- [6] Corke, P., (2017). *Robotics, Vision and Control*, 2nd ed. Springer International Publishing.
- [7] Davies, E. (2012). *Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*, 4th ed. Academic Press.
- [8] Moreno, A., & Córcoles, S. (2018). *Arduino: curso práctico*. RA-MA Editorial.
- [9] Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. México D.F. [etc.]: Mc Graw-Hill.
- [10] "NSYDBN2520 - Metal industrial box | Schneider Electric Global", *Schneider Electric*, 2022. [Online]. Obtenido de: <https://www.se.com/ww/en/product/NSYDBN2520/metal-industrial-box-low-plain-cover-h256xw206xd93-ip55-grey-ral-7035/?filter=business-1-industrial-automation-and-control&node=12028104362-metallic-junction-boxes&range=5776-spacial-sdb&selected-node-id=12028104442>.

- [11] A. Reyes. (2022). Verificador de rugosidad superficial GL-GR260, 1st ed. Monterrey, Nuevo León, 64920: Twilight: Instrumentos de Medición Industrial.
- [12] "FLIR Blackfly S BFS-U3-23S3C-C Camera | Edmund Optics", *Edmund Optics*, 2022. [Online]. Obtenido de: <https://www.edmundoptics.com/p/bfs-u3-23s3c-c-usb3-blackflyreg-s-color-camera/41347/>.
- [13] "ODL300 overdrive™ linear connect-a-light," *Smart Vision Lights*, 13-Mar-2022. [Online]. Obtenido de: <https://smartvisionlights.com/products/odl300/>.
- [14] "AISI 316 Stainless Steel: Specification and Datasheet", *Matmatch*, 2022. [Online] Obtenido de: [AISI 316 Stainless Steel: Specification and Datasheet - Matmatch](https://www.matmatch.com/aisi-316-stainless-steel-specification-datasheet/)
- [15] Budynas, R., & Nisbett, J. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México D.F. [etc.]: Mc Graw-Hill.
- [16] "Arduino Uno Rev3", *Arduino Online Shop*, 2022. [Online]. Obtenido de: <https://store-usa.arduino.cc/collections/boards/products/arduino-uno-rev3>.
- [17] "041422070 Rose Metal Enclosure, Electrical / Industrial, Diecast Aluminium, 220 mm, 140 mm, 64 mm, IP66", *Newark/ Electronic Components Distributor*, 2022. [Online]. Obtenido de: <https://www.newark.com/rose/041422070/aluform-aluminum-enclosure-painted/dp/03AH6751>.
- [18] "8mm UC Series Fixed Focal Length Lens | Edmund Optics", *Edmund Optics*, 2022. [Online]. Obtenido de: <https://www.edmundoptics.com/p/8mm-uc-series-fixed-focal-length-lens/41864/>.
- [19] "BFS-U3-Getting-Started", *FLIR*, 2017. [Online]. Obtenido de: <https://flir.app.boxcn.net/s/4nmu4yffg9h7qov46w5ijcude99nks0u/file/418603801042>
- [20] "PC INTELEC FORGE R5-4600G - 8GB", Intelc, 2022. [Online]. Obtenido de: PC Intelc Forge R5-4600G - 8GB - 240GB-SSD - Neo - Kit 3en1
- [21] "EXTREME PC LEVEL 3 AMD", ExtremeTech, S.F. [Online] Obtenido de: Extremetechcr COMPUTADORAS GAMING
- [22] "PC INTELEC REX PRO CORE I5 11400F - 8GB", Intelc, 2022. [Online]. Obtenido de: PC Intelc Rex Pro Core i5 11400F - 8GB - 256GB-SSD - GTX 1050 4GB - Neo
- [23] "INTEL EXTREME PC TIER 3", ExtremeTech, S.F. [Online] Obtenido de: Extremetechcr COMPUTADORAS GAMING

[24] ExtremeTech, S.F. [Online] Obtenido de: ExtremeTech | Computadoras, Laptops y gamers Costa Rica - ExtremeTechCR

[25] MicroJPM. (2022). [Online] Obtenido de: Micro JPM

[26] CRCibernética. (2022). [Online] Obtenido de: CRCibernética (cricibernetica.com)

Anexos

Anexo A.

A.1. Prueba #7

Cuadro A. 1. Prueba #7: Cantidad de defectos detectados para una muestra de 100 defectos.

# Defecto	Tipo de defecto	Tamaño de defecto ($\pm 0,1\text{mm}$)	Offset ($\pm 0,1\text{mm}$)	Lectura del sistema
1	Gota	6,5	0	Si
2	Ranura	1,4	0	Si
3	Ranura	2,2	0	Si
4	Ranura	3	0	Si
5	Ranura	1,2	0	Si
6	Gota	8,5	0	Si
7	Gota	5,2	0	Si
8	Gota	8	1,2	Si
9	Ranura	3,4	0	Si
10	Gota	1	0,6	Si
11	Ranura	2,4	0	Si
12	Gota	1,4	0	Si
13	Ranura	3,2	0	Si
14	Gota	1,2	2,5	Si
15	Gota	4,5	0	Si
16	Gota	1,2	0	Si
17	Ranura	2,2	0	Si
18	Ranura	1,2	0	Si
19	Ranura	3,8	0	Si
20	Gota	3,4	1,5	Si
21	Ranura	2,8	0	Si
22	Gota	4	0	Si
23	Gota	2	0	Si
24	Ranura	2,8	0	Si
25	Ranura	2,2	0	Si
26	Ranura	1,4	0	Si
27	Gota	6,5	0	Si
28	Ranura	4	0	Si
29	Gota	8	0	Si
30	Ranura	1	0	No
31	Ranura	3	0	Si
32	Ranura	1,8	0	Si
33	Ranura	1,5	0	Si

34	Ranura	2,5	0	Si
35	Gota	7	0	Si
36	Gota	5,5	0	Si
37	Ranura	3	0	Si
38	Ranura	1	0	No
39	Gota	9	1	Si
40	Gota	8	1	Si
41	Ranura	2,8	0	Si
42	Gota	2,8	0	Si
43	Gota	8	0	Si
44	Ranura	1	0	Si
45	Gota	7,5	0,8	Si
46	Gota	2	1	Si
47	Gota	1	0	Si
48	Ranura	3	0	Si
49	Gota	6,3	0	Si
50	Gota	7	0	Si
51	Ranura	3	0	Si
52	Gota	4,8	0	Si
53	Ranura	1,5	0	Si
54	Ranura	2,7	0	Si
55	Gota	8	0	Si
56	Ranura	1	0	Si
57	Ranura	2,2	0	Si
58	Ranura	2,8	0	Si
59	Gota	2	0	Si
60	Ranura	1	0	Si
61	Ranura	1,3	0	No
62	Ranura	3,4	0	Si
63	Gota	1	0	Si
64	Ranura	3,2	0	Si
65	Ranura	3,4	0	Si
66	Gota	2	0	Si
67	Ranura	1,4	0	Si
68	Ranura	1,2	0	Si
69	Ranura	4	0	Si
70	Gota	6,8	0	Si
71	Gota	8,5	0	Si
72	Ranura	1,7	0	Si
73	Ranura	3,2	0	Si
74	Gota	2	0	Si

75	Gota	4	0	Si
76	Gota	1,7	0	Si
77	Ranura	1	0	No
78	Gota	3	1	Si
79	Ranura	1,8	0	No
80	Ranura	2,1	0	Si
81	Ranura	2,5	0	Si
82	Gota	7	0	Si
83	Ranura	1	0	No
84	Gota	6,8	0	Si
85	Gota	5,8	1	Si
86	Gota	3,8	0	Si
87	Gota	4	0	Si
88	Gota	2	1	Si
89	Gota	1	0	Si
90	Ranura	3	0	Si
91	Ranura	1,3	0	Si
92	Ranura	1	0	Si
93	Gota	5	0	Si
94	Gota	7,5	1,5	Si
95	Gota	2	0	Si
96	Gota	4,5	0	Si
97	Gota	5	1	Si
98	Ranura	1	0	Si
99	Gota	6,2	2	Si
100	Gota	6	0	Si

Fuente: Elaboración propia.

A.2. Esquemático de circuito de control

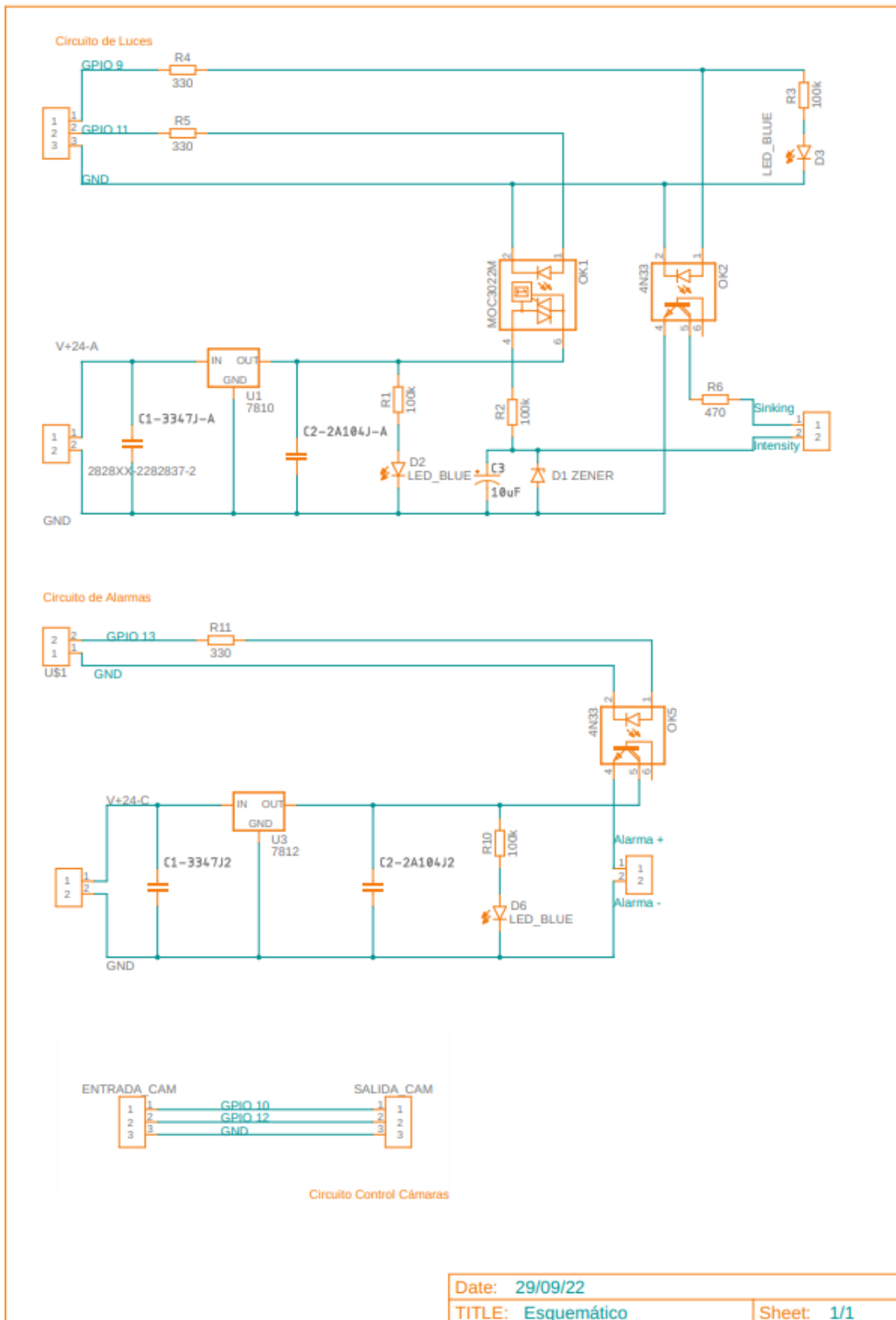


Figura A 1. Esquemático de circuito de control. Fuente: Elaboración Propia

A.3. Código para la revisión.

```
1 # Librerías necesarias
2 import os
3 import PySpin
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import sys
6 import keyboard
7 import time
8 from datetime import datetime
9 import cv2
10 import numpy as np
11 import serial
12 from Tkinter import*
13 from Tkinter import Tk, Text, TOP, BOTH, X, N, LEFT, RIGHT, CENTER, RAISED, BOTTOM
14 from ttk import Frame, Label, Entry, Button, Style
15 from PIL import ImageTk, Image #Para trabajar con imagenes
16 import threading
17
18 # Variables generales
19 global continue_recording
20 continue_recording = True
21 global contadorRevision
22 contadorRevision = 0
23 rootPath = os.getcwd()
24 dirIcons = rootPath + "\iconos"
25
26 # hex de los colores
27 color_seleccion='#262626'
28 color_inactivo='#333333'
29 color_presionado='#E95420'
30 color_presionar='#0E8620'
31 color_reset= '#333333'
32 color_borrar= '#333333'
33 color_fijos= '#333333'
34 color_background= '#340623'
35 color_sensibilidad = '#AEA79F'
36 color_estado= '#411934'
37 color_texto= '#F6F6F5'
38 color_blanco= '#FFFFFF'
39 color_parpadeo= "#3E705A"
40
41 # fuente de letra
42 Fuente = 'Helvetica'
43
44 # Variables Trigger
45 class TriggerType:
46     SOFTWARE = 1
47     HARDWARE = 2
48
49 CHOSEN_TRIGGER = TriggerType.HARDWARE
50
51 # ----- Funciones ----- #
52
53 # Función para el botón de inicio de revisión
54 def inicioRevision():
55     global Boton_Inicio
56
57     if contadorRevision>2:
58         exit()
59
60
61     Boton_Inicio.configure(style='SecuenciaPresionado.TButton')
62     Boton_Inicio.state(["disabled"])
63     Estado.configure(text="Revisando")
64     root.update()
65
66     Main = threading.Thread(target=MainRev())
67     Main.start()
```

Figura A 2. Código para la revisión [1/11]. Fuente: Elaboración propia.


```

69 # funcion que cambia el estado del boton de play/pausa
70 def PlayPause():
71     global sistema_pausado
72
73     if sistema_pausado == True:
74         Reanudar()
75
76     else:
77         Pausar()
78
79     sistema_pausado = not(sistema_pausado)
80     root.update()
81
82 # Pausa de trigger
83 def Pausar():
84     global serialComs
85     try:
86         serialComs.write(b'P')
87         flag_pausa = True
88     except:
89         flag_pausa = False
90
91     if(flag_pausa):
92         Estado.configure(text="Sistema Pausado")
93         BotonPlay.configure(text="Reanudar")
94         root.update()
95     else:
96         print("No se pudo pausar el sistema")
97
98 # Reanuda trigger
99 def Reanudar():
100     global serialComs
101     try:
102         serialComs.write(b'R')
103         flag_pausa = True
104     except:
105         flag_pausa = False
106
107     if(flag_pausa):
108         Estado.configure(text="Revision")
109         BotonPlay.configure(text="Pausar")
110         root.update()
111     else:
112         print("No se pudo reanudar el sistema")
113
114 # Termina la revisión
115 def exit():
116     global continue_recording
117     print('Program is closing..')
118     serialComs.write(b'P')
119     time.sleep(1)
120     print('Done!')
121     continue_recording = False

```

Figura A 3. Código para la revisión [2/11]. Fuente: Elaboración propia.

```

123 # Configura el modo de trigger para el disparo de la cámara
124 def configure_trigger(cam):
125     result = True
126
127     print('*** CONFIGURING TRIGGER ***')
128
129     if CHOSEN_TRIGGER == TriggerType.SOFTWARE:
130         print('Software trigger chosen ...')
131     elif CHOSEN_TRIGGER == TriggerType.HARDWARE:
132         print('Hardware trigger chose ...')
133
134     try:
135         nodemap = cam.GetNodeMap()
136         node_trigger_mode = PySpin.CEnumerationPtr(nodemap.GetNode('TriggerMode'))
137         if not PySpin.IsAvailable(node_trigger_mode) or not PySpin.IsReadable(node_trigger_mode):
138             print('Unable to disable trigger mode (node retrieval). Aborting...')
139             return False
140
141         node_trigger_mode_off = node_trigger_mode.GetEntryByName('Off')
142         if not PySpin.IsAvailable(node_trigger_mode_off) or not PySpin.IsReadable(node_trigger_mode_off):
143             print('Unable to disable trigger mode (enum entry retrieval). Aborting...')
144             return False
145
146         node_trigger_mode.SetIntValue(node_trigger_mode_off.GetValue())
147
148         print('Trigger mode disabled...')
149
150         node_trigger_selector = PySpin.CEnumerationPtr(nodemap.GetNode('TriggerSelector'))
151         if not PySpin.IsAvailable(node_trigger_selector) or not PySpin.IsWritable(node_trigger_selector):
152             print('Unable to get trigger selector (node retrieval). Aborting...')
153             return False
154
155         node_trigger_selector_framestart = node_trigger_selector.GetEntryByName('FrameStart')
156         if not PySpin.IsAvailable(node_trigger_selector_framestart) or not PySpin.IsReadable(
157             node_trigger_selector_framestart):
158             print('Unable to set trigger selector (enum entry retrieval). Aborting...')
159             return False
160         node_trigger_selector.SetIntValue(node_trigger_selector_framestart.GetValue())
161
162         print('Trigger selector set to frame start...')
163
164         node_trigger_source = PySpin.CEnumerationPtr(nodemap.GetNode('TriggerSource'))
165         if not PySpin.IsAvailable(node_trigger_source) or not PySpin.IsWritable(node_trigger_source):
166             print('Unable to get trigger source (node retrieval). Aborting...')
167             return False
168
169         if CHOSEN_TRIGGER == TriggerType.SOFTWARE:
170             node_trigger_source_software = node_trigger_source.GetEntryByName('Software')
171             if not PySpin.IsAvailable(node_trigger_source_software) or not PySpin.IsReadable(
172                 node_trigger_source_software):
173                 print('Unable to set trigger source (enum entry retrieval). Aborting...')
174                 return False
175             node_trigger_source.SetIntValue(node_trigger_source_software.GetValue())
176             print('Trigger source set to software...')
177
178         elif CHOSEN_TRIGGER == TriggerType.HARDWARE:
179             node_trigger_source_hardware = node_trigger_source.GetEntryByName('Line0')
180             if not PySpin.IsAvailable(node_trigger_source_hardware) or not PySpin.IsReadable(
181                 node_trigger_source_hardware):
182                 print('Unable to set trigger source (enum entry retrieval). Aborting...')
183                 return False
184             node_trigger_source.SetIntValue(node_trigger_source_hardware.GetValue())
185             print('Trigger source set to hardware...')
186
187         node_trigger_mode_on = node_trigger_mode.GetEntryByName('On')
188         if not PySpin.IsAvailable(node_trigger_mode_on) or not PySpin.IsReadable(node_trigger_mode_on):
189             print('Unable to enable trigger mode (enum entry retrieval). Aborting...')
190             return False
191
192         node_trigger_mode.SetIntValue(node_trigger_mode_on.GetValue())
193         print('Trigger mode turned back on...')
194
195     except PySpin.SpinnakerException as ex:
196         print('Error: %s' % ex)
197         return False
198
199     return result

```

Figura A 4. Código para la revisión [3/11]. Fuente: Elaboración propia.

```

281 # Función para tomar la siguiente imagen a partir de trigger, software o hardware.
282 # Si es por hardware simplemente queda a la espera de la señal del GPIO.
283 def grab_next_image_by_trigger(nodesap, cam):
284     try:
285         result = True
286
287         if CHOSEN_TRIGGER == TriggerType.SOFTWARE:
288             node_softwaretrigger_cmd = PySpin.CCommandPtr(nodesap.GetNode('TriggerSoftware'))
289             if not PySpin.IsAvailable(node_softwaretrigger_cmd) or not PySpin.IsWritable(node_softwaretrigger_cmd):
290                 print('Unable to execute trigger. Aborting...')
291                 return False
292
293             node_softwaretrigger_cmd.Execute()
294
295         elif CHOSEN_TRIGGER == TriggerType.HARDWARE:
296             pass
297
298     except PySpin.SpinnakerException as ex:
299         print('Error: %s' % ex)
300         return False
301
302     return result

```

Figura A 5. Código para la revisión [4/11]. Fuente: Elaboración propia.

```

224 # Función para el cálculo de las ROI
225 def Roi(nodesap, cam):
226     global continue_recording
227     # Variables de Roi1: Roi para filtrar el ruido
228     x0 = -1
229     x1 = -1
230     # Variables de Roi2: Roi de tolerancia de defecto
231     m = -1
232     n = -1
233     # Listas para promediar valores de x0 y x1
234     X0 = np.zeros(20)
235     X1 = np.zeros(20)
236     # Listas para promediar valores de m y n
237     M = np.zeros(20)
238     N = np.zeros(20)
239
240     num_frame = 0
241     # Se espera inicialmente 20 frames para asegurar que la captura
242     # de imagen se da correctamente.
243     while (num_frame < 20):
244         grab_next_image_by_trigger(nodesap, cam)
245
246         image_result = cam.GetNextImage(1000)
247         try:
248             # Ensure image completion
249             if image_result.IsIncomplete():
250                 print('Image incomplete with image status %d ...' % image_result.GetImageStatus())
251
252             else:
253                 num_frame += 1
254
255             # Release image
256             #
257             # *** NOTES ***
258             # Images retrieved directly from the camera (i.e. non-converted
259             # images) need to be released in order to keep from filling the
260             # buffer.
261             image_result.Release()
262
263         except PySpin.SpinnakerException as ex:
264             print("Error: %s" % ex)
265
266     while (num_frame >= 20 and num_frame < 40):
267         grab_next_image_by_trigger(nodesap, cam)
268
269         image_result = cam.GetNextImage(1000)
270         try:
271             # Ensure image completion
272             if image_result.IsIncomplete():
273                 print('Image incomplete with image status %d ...' % image_result.GetImageStatus())
274
275             else:
276                 # Getting the image data as a numpy array
277                 image_data = image_result.GetNDArray()
278                 img_tmp = cv2.cvtColor(image_data, cv2.COLOR_BAYER_RG2BGR)
279                 # Escala de grises para procesar la info de la imagen
280                 gray_img = cv2.cvtColor(img_tmp, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
281                 # Filtro Gaussiano para suavizar la imagen como es recomendado para Canny
282                 gaussian = cv2.GaussianBlur(gray_img, (3,3), 0)
283                 # Binarización de imagen para diferenciar papel de fondo
284                 ret, thresh = cv2.threshold(gaussian, 60, 255, 0)
285                 # Filtro Canny para discriminar bordes
286                 canny_edges = cv2.Canny(thresh, 15, 90)
287
288                 linesP = cv2.HoughLinesP(canny_edges, 1, np.pi / 180, 50, None, 50, 10)
289
290                 X = 0
291                 if linesP is not None:
292                     for i in range(0, len(linesP)):
293                         l = linesP[i][0]
294                         if ((np.abs(l[2] - l[0]) < 10) and (np.abs(l[3] - l[1]) > 20)):
295                             X = l[0]
296                             break
297
298                 X0[num_frame-20] = X-40
299                 X1[num_frame-20] = X+70
300                 M[num_frame-20] = X-5
301                 N[num_frame-20] = X+15
302
303                 num_frame += 1
304
305             # Release image
306             image_result.Release()
307
308         except PySpin.SpinnakerException as ex:
309             print("Error: %s" % ex)
310
311     x0 = int(np.average(X0))
312     x1 = int(np.average(X1))
313     m = int(np.average(M))
314     n = int(np.average(N))
315
316     return x0, x1, m, n

```

Figura A 6. Código para la revisión [5/11]. Fuente: Elaboración propia.

```

320 # Función de ciclo de detección de defectos
321 def deteccion(x0, x1, m, n, nodemap, cam, serialComs):
322     global continue_recording
323     isCentered = True
324     frames = 0
325
326     while continue_recording and isCentered:
327         grab_next_image_by_trigger(nodemap, cam)
328
329         image_result = cam.GetNextImage(1000)
330         try:
331             # Ensure image completion
332             if image_result.IsIncomplete():
333                 print('Image incomplete with image status %d ...' % image_result.GetImageStatus())
334             else:
335                 frames += 1
336                 # Getting the image data as a numpy array
337                 image_data = image_result.GetNDArray()
338                 img_tmp = cv2.cvtColor(image_data, cv2.COLOR_BAYER_RG2BGR)
339                 # Copia de imagen original
340                 frame_copy = np.copy(img_tmp)
341                 # Escala de grises para procesar la info de la imagen
342                 gray_img = cv2.cvtColor(img_tmp, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
343                 # Filtro Gaussiano para suavizar la imagen como es recomendado para Canny
344                 gaussian = cv2.GaussianBlur(gray_img, (3,3), 0)
345                 # Binarización de imagen para diferenciar papel de fondo
346                 ret, thresh = cv2.threshold(gaussian, 60, 255, 0)
347                 # Filtro Canny para discriminar bordes
348                 canny_Edges = cv2.Canny(thresh, 15, 90)
349
350                 # Se segmenta la imagen en los pixeles de la ROI para eliminar ruido
351                 canny_Edges[0:1200, 0:x0] = 0
352                 canny_Edges[0:1200, x1:1920] = 0
353
354                 # Se buscan contornos en la imagen
355                 contours, hierarchy = cv2.findContours(canny_Edges, cv2.RETR_TREE, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
356                 # Se guarda copia de los contornos originales
357                 contours2 = contours
358                 newContours = []
359                 newContour = []
360
361                 contour_index = 0
362                 for contour in contours:
363                     # Se buscan los puntos de cada contorno
364                     for p in range(len(contour)):
365                         point = contour[p]
366                         # Se identifica si el punto se encuentra fuera del ROI estricto
367                         if point[0][0] > n:
368                             a = np.delete(contour, p, 0)
369                             newContour = np.append(newContour, [a])
370                         # Se recalibra si el borde está por fuera del ROI
371                         elif point[0][0] < m-5:
372                             isCentered = False
373                             print('Recalibrando')
374                             break
375                         # Lista con los puntos de contornos del defecto
376                         newContours = np.append(newContours, [newContour])
377                         contour_index += 1
378
379                 newContours = np.array(newContours)
380                 try:
381                     # Si la lista tiene un valor existe defecto
382                     if len(newContours) > 0:
383                         serialComs.write(b'L')
384                         print('Existe defecto')
385                 except:
386                     # Error por lista vacía
387                     pass
388
389                 # Release image
390                 image_result.Release()
391
392             except PySpin.SpinnakerException as ex:
393                 print('Error: %s' % ex)
394
395         if isCentered == False:
396             return False
397
398     return True

```

Figura A 7. Código para la revisión [6/11]. Fuente: Elaboración propia.

```

480 # Inicio de revisión, inicia el sistema
481 def revision(cam, nodemap, nodemap_tldevice, serialComs):
482     global continue_recording
483     global numPrueba
484     sNodemap = cam.GetTLStreamNodeMap()
485
486     # Change bufferhandling mode to NewestOnly
487     node_bufferhandling_mode = PySpin.CEnumerationPtr(sNodemap.GetNode('StreamBufferHandlingMode'))
488     if not PySpin.IsAvailable(node_bufferhandling_mode) or not PySpin.IsWritable(node_bufferhandling_mode):
489         print('Unable to set stream buffer handling mode.. Aborting...')
490         return False
491
492     # Retrieve entry node from enumeration node
493     node_newestonly = node_bufferhandling_mode.GetEntryByName('NewestOnly')
494     if not PySpin.IsAvailable(node_newestonly) or not PySpin.IsReadable(node_newestonly):
495         print('Unable to set stream buffer handling mode.. Aborting...')
496         return False
497
498     # Retrieve integer value from entry node
499     node_newestonly_mode = node_newestonly.GetValue()
500
501     # Set integer value from entry node as new value of enumeration node
502     node_bufferhandling_mode.SetIntValue(node_newestonly_mode)
503
504     try:
505         node_acquisition_mode = PySpin.CEnumerationPtr(nodemap.GetNode('AcquisitionMode'))
506         if not PySpin.IsAvailable(node_acquisition_mode) or not PySpin.IsWritable(node_acquisition_mode):
507             print('Unable to set acquisition mode to continuous (enum retrieval). Aborting...')
508             return False
509
510         # Retrieve entry node from enumeration node
511         node_acquisition_mode_continuous = node_acquisition_mode.GetEntryByName('Continuous')
512         if not PySpin.IsAvailable(node_acquisition_mode_continuous) or not PySpin.IsReadable(
513             node_acquisition_mode_continuous):
514             print('Unable to set acquisition mode to continuous (entry retrieval). Aborting...')
515             return False
516
517         # Retrieve integer value from entry node
518         acquisition_mode_continuous = node_acquisition_mode_continuous.GetValue()
519
520         # Set integer value from entry node as new value of enumeration node
521         node_acquisition_mode.SetIntValue(acquisition_mode_continuous)
522
523         cam.BeginAcquisition()
524
525         print('Acquiring images...')
526         device_serial_number = ''
527         node_device_serial_number = PySpin.CStringPtr(nodemap_tldevice.GetNode('DeviceSerialNumber'))
528         if PySpin.IsAvailable(node_device_serial_number) and PySpin.IsReadable(node_device_serial_number):
529             device_serial_number = node_device_serial_number.GetValue()
530
531         isOver = False
532         while not isOver:
533             # Toma valores de ROI
534             x0, x1, m, n = Roi(nodemap, cam)
535
536             isOver = deteccion(x0, x1, m, n, nodemap, cam, serialComs)
537
538         # End acquisition
539         cam.EndAcquisition()
540
541     except PySpin.SpinnakerException as ex:
542         print('Error: %s' % ex)
543         return False
544
545     return True

```

Figura A 8. Código para la revisión [7/11]. Fuente: Elaboración propia.

```

467 # Reinicia el trigger para el próximo uso
468 def reset_trigger(nodemap):
469     try:
470         result = True
471         node_trigger_mode = PySpin.CEnumerationPtr(nodemap.GetNode('TriggerMode'))
472         if not PySpin.IsAvailable(node_trigger_mode) or not PySpin.IsReadable(node_trigger_mode):
473             print('Unable to disable trigger mode (node retrieval). Aborting...')
474             return False
475
476         node_trigger_mode_off = node_trigger_mode.GetEntryByName('Off')
477         if not PySpin.IsAvailable(node_trigger_mode_off) or not PySpin.IsReadable(node_trigger_mode_off):
478             print('Unable to disable trigger mode (enum entry retrieval). Aborting...')
479             return False
480
481         node_trigger_mode.SetIntValue(node_trigger_mode_off.GetValue())
482
483         print('Trigger mode disabled...')
484
485     except PySpin.SpinnakerException as ex:
486         print('Error: %s' % ex)
487         result = False
488
489     return result
490
491 # Inicializa la cámara
492 def init_camera(cam, serialComs):
493     try:
494         result = True
495
496         contadorRevision += 1
497
498         nodemap_tldevice = cam.GetTLDeviceNodeMap()
499
500         cam.Init()
501
502         nodemap = cam.GetNodeMap()
503
504         result &- revision(cam, nodemap, nodemap_tldevice, serialComs)
505
506         result &- reset_trigger(nodemap)
507
508         cam.DeInit()
509
510     except PySpin.SpinnakerException as ex:
511         print('Error: %s' % ex)
512         result = False
513
514     return result
515

```

Figura A 9. Código para la revisión [8/11]. Fuente: Elaboración propia.

```

516 # Cuerpo, inicializa todo.
517 def MainRev():
518     global continue_recording
519     global serialComs
520
521     continue_recording = True
522     result = True
523     system = PySpin.System.GetInstance()
524
525     cam_list = system.GetCameras()
526
527     num_cameras = cam_list.GetSize()
528
529     print('Number of cameras detected: %d' % num_cameras)
530
531     if num_cameras == 0:
532
533         cam_list.Clear()
534
535         system.ReleaseInstance()
536
537         print('Not enough cameras!')
538         input('Done! Press Enter to exit...')
539         return False
540
541
542     try:
543         # Abre puerto serial
544         serialComs = serial.Serial('COM4')
545         time.sleep(3)
546         # escribe un char
547         serialComs.write(b'R')
548         time.sleep(3)
549         serialComs.write(b'L')
550     except:
551         serialComs = 0
552         print("Can't open serial port...")
553         pass
554
555     # Run on each camera
556     for i, cam in enumerate(cam_list):
557
558         result &= init_camera(cam, serialComs)
559
560     del cam
561
562     try:
563         serialComs.close()
564     except:
565         print("Serial port not opened...")
566
567     # Clear camera list before releasing system
568     cam_list.Clear()
569
570     # Release system instance
571     system.ReleaseInstance()
572
573     print('Done!')
574     return result
575

```

Figura A 10. Código para la revisión [9/11]. Fuente: Elaboración propia.


```

576 #-----PANTALLA PRINCIPAL-----
577
578 root = Tk()
579 root.title("Deteccion de defectos en papel - Proquinal")
580
581 # get the screen dimension
582 screen_width = root.winfo_screenwidth()
583 screen_height = root.winfo_screenheight()
584
585 window_width = int(screen_width*0.75)
586 window_height = int(screen_height*0.75)
587
588 # find the center point
589 center_x = int((screen_width/2 - window_width / 2))
590 center_y = int((screen_height/2 - window_height / 2))
591
592 # set the position of the window to the center of the screen
593 root.geometry('{}x{}+{}+{}'.format(window_width,window_height,center_x,center_y))
594
595 # root.path = os.getcwd()
596
597 root.style = Style()
598 root.style.theme_use("alt")
599 root.configure(background=color_background)
600
601 #-----Iconos-----
602
603 #icono de la aplicacion
604 img = Image.open(dir_icons + "loupe.png")
605 render = ImageTk.PhotoImage(img)
606 root.tk.call('wm', 'iconphoto', root._w, render)
607
608 #-----ESTILOS PROCESO-----
609
610 root.style.configure("Secuencia.TButton", font=(Fuente, 20), justify="center",background = color_presionar, foreground = 'black', borderwidth=3, focusthickness=3, focuscolor='none' )
611 root.style.configure("SecuenciaPresionado.TButton", font=(Fuente, 20), justify="center",background = color_presionado, foreground = 'black', borderwidth=3, focusthickness=3, focuscolor='none' )
612 root.style.map("SecuenciaPresionado.TButton", background=[('active', color_presionado)])
613
614 #-----ESTILOS CONTROL-----
615
616 root.style.configure("SeleccionInactivo.TButton", font=(Fuente, 20), justify="center",background = color_fijos, foreground = '#AEA79F', borderwidth=3, focusthickness=3, focuscolor='none' )
617 root.style.configure("SeleccionActivo.TButton", font=(Fuente, 20), justify="center",background = color_seleccion, foreground = '#AEA79F', borderwidth=3, focusthickness=3, focuscolor='none' )
618 root.style.map("SeleccionInactivo.TButton", background=[('pressed', color_seleccion)])
619
620 #-----COLOR DE FONDO-----
621
622 root.style2=Style()
623 root.style2.configure("Color.TFrame", background=color_background)
624 root.style2.configure("Color.TLabel", background=color_background)
625

```

Figura A 11. Código para la revisión [10/11]. Fuente: Elaboración propia.

```

625 #-----CUADRO DE TITULO-----
626
627 Frame_Titulo=Frame(root)
628 Frame_Titulo.pack(expand=False, side=TOP, fill=BOTH)
629 Frame_Titulo.configure(style='Color.TFrame')
630
631 Titulo = Label(Frame_Titulo, text="Asistente de Deteccion de Defectos en papel", font=(Fuente, 20), foreground = '#D6C6CF')
632 Titulo.pack(anchor=CENTER, padx=5, pady=20)
633 Titulo.configure(style='Color.TLabel')
634
635 #-----CUADRO DE PROCESO-----
636
637 Frame_Proceso=Frame(root)
638 Frame_Proceso.pack(expand=True, padx = 150, fill=BOTH)
639 Frame_Proceso.configure(style='Color.TFrame')
640
641 #-----BOTONES DE PROCESO-----
642
643 Boton_Inicio = Button(Frame_Proceso, style='Secuencia.TButton', text="Iniciar Revision")
644 Boton_Inicio.configure(command=inicioRevision)
645 Boton_Inicio.pack(expand=True, fill=X, side=LEFT, anchor=CENTER, ipadx=20, ipady=30, padx=20)
646
647 #-----CUADRO DE ESTADO-----
648
649 Frame_Estado=LabelFrame(root, bg = color_estado, bd=0)
650 Frame_Estado.pack(fill=BOTH, padx=30)
651
652 Estado=Label(Frame_Estado, text="Estado Actual: Inicio", font=(Fuente, 20), foreground = color_texto, background = color_estado)
653 Estado.pack(pady=20, anchor=CENTER)
654
655 #-----CUADRO DE CONTROL-----
656
657 Frame_Control = Frame(root)
658 Frame_Control.pack(fill=BOTH, expand=True, padx = 80)
659 Frame_Control.configure(style='Color.TFrame')
660
661 #-----BOTONES DE CONTROL-----
662
663 BotonPlay = Button(Frame_Control, style="SeleccionActivo.TButton", text="Pausar", command=PlayPause)
664 BotonPlay.pack(expand=True, side=RIGHT, anchor=CENTER, ipadx=10, ipady=10, pady=10, padx=5)
665
666 root.mainloop()
667

```

Figura A 12. Código para la revisión [11/11]. Fuente: Elaboración propia.

A.4. Código para el microcontrolador.

```
#define lightStrobePin 9 //signal pins
#define camStrobePin1 10
#define camStrobePin2 12
#define lightIntensityPin 11
#define lightAlertPin 13
#define SERIAL_WAIT 1000

enum instruction {LIGHT_ON, LIGHT_OFF, CAM_ON, CAM_OFF};

unsigned int lightStrobeTime=2500, camStrobeTime=100;
unsigned int lightOffsetTime=0, camOffsetTime=100;
byte lightIntensity=0;

unsigned int delays[4];
instruction sequence[4];

uint16_t freq=8;
byte cont=0, periodCont=1;
bool shotCam=false;
unsigned long period=1000000/freq; //period

boolean lightFirstOn = true; //whether the light or the cam turns on first.
boolean lightFirstOff = true; //whether the light or the cam turns on first.

String reg="";
char valueString[9]="";
char inputString[9]="rece"; // a String to hold incoming data
byte ix=0;
bool stringComplete = false; // whether the string is complete
bool Encender_Luces = false;

char Lectura;

void setup()
{
  //disparo luz pin
  pinMode(lightStrobePin, OUTPUT);
  digitalWrite(lightStrobePin,LOW);
  //intensidad pin
  pinMode(lightIntensityPin, OUTPUT);
  analogWrite(lightIntensityPin,255-lightIntensity);
  //disparo camaras pin
  pinMode(camStrobePin1, OUTPUT);
  digitalWrite(camStrobePin1,LOW);
  //indicador de luces al maximo
  pinMode(13, OUTPUT);
```

Figura A 13. Código para el microcontrolador [1/6]. Fuente: Elaboración propia.

```

digitalWrite(13,LOW);//light strobe use negative logic
pinMode(LightStrobeON, OUTPUT);
digitalWrite(LightStrobeON,LOW);

//comunicaion serial
Serial.begin(9600);
//inputString.reserve(200);

//configura disparos
configureStrobe();
delay(1000);
}

void loop() {
// print the string when a newline arrives:
while (Serial.available()) {
accion();
}
}

```

Figura A 14. Código para el microcontrolador [2/6]. Fuente: Elaboración propia.

```

void configureStrobe(){

//Serial.println("setting conf...");

cli();//stop interrupts

if (lightStrobeTime<period/SECURITY_TOP && camStrobeTime<period){
analogWrite(lightIntensityPin,255-lightIntensity);
setInstructionOrder();

//set timer1 interrupt at 1Hz
TCCR1A = 0;// set entire TCCR1A register to 0
TCCR1B = 0;// same for TCCR1B
TCNT1 = 0;//initialize counter value to 0
// set compare match register for 1hz increments
OCR1A = 15624/freq-1;// = (16*10^6) / (1*1024) - 1 (must be <65536)
// turn on CTC mode
TCCR1B |= (1 << WGM12);
// Set CS12 and CS10 bits for 1024 prescaler
TCCR1B |= (1 << CS12) | (1 << CS10);
// enable timer compare interrupt
TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);

//Serial.println("done");

}else{
//Serial.println("pulse width exceeds 9% of period \nnothing done. \nuse \"get peri\" to display period value");
Serial.write("error0 ",8);
delay(SERIAL_WAIT);
}
sei();//allow interrupts
}

```

Figura A 15. Código para el microcontrolador [3/6]. Fuente: Elaboración propia.

```

void setInstructionOrder() {
    sequence[0]=LIGHT_ON;
    delays[0]=lightOffsetTime;

    sequence[1]=CAM_ON;
    delays[1]=camOffsetTime-delays[0];

    sequence[2]=CAM_OFF;
    delays[2]=camStrobeTime;

    sequence[3]=LIGHT_OFF;
    delays[3]=lightStrobeTime-delays[1]-delays[2];
}

void applyInstruction(instruction instr){
    switch (instr){
        case LIGHT_ON:
            digitalWrite(lightStrobePin, HIGH);
            break;
        case LIGHT_OFF:
            digitalWrite(lightStrobePin, LOW);
            break;
        case CAM_ON:
            digitalWrite(camStrobePin1, HIGH);
            break;
        case CAM_OFF:
            digitalWrite(camStrobePin1, LOW);
            break;
    }
}

```

Figura A 16. Código para el microcontrolador [4/6]. Fuente: Elaboración propia.

```

ISR(TIMER1_COMPA_vect){//timer1 interrupt
  if(Encender_Luces){
    digitalWrite(LightStrobeON, HIGH);
    cont+=1;
    delayMicroseconds(delays[0]);
    applyInstruction(sequence[0]);

    delayMicroseconds(delays[1]);
    applyInstruction(sequence[1]);

    delayMicroseconds(delays[2]);
    applyInstruction(sequence[2]);

    delayMicroseconds(delays[3]);
    applyInstruction(sequence[3]);

    applyInstruction(CAM_OFF); //ensure lights and cams signals are off.
    applyInstruction(LIGHT_OFF);
  }
}

```

Figura A 17. Código para el microcontrolador [5/6]. Fuente: Elaboración propia.

```

void accion() {
  Lectura=Serial.read();

  switch (Lectura){
    case 'P':
      Encender_Luces = false;
      digitalWrite(LightStrobeON, LOW);
      break;

    case 'R':
      Encender_Luces = true;

      break;

    case 'L':
      digitalWrite(lightAlertPin, HIGH);
      delay(100);
      digitalWrite(lightAlertPin, LOW);
      break;

    case 'F':
      lightIntensity=atoi(valueString);
      lightStrobeTime=2000;
      configureStrobe();
      Serial.println(lightIntensity);
      Serial.println("Final");
      break;

    case 'M':
      digitalWrite(13, LOW);
      lightIntensity=atoi(valueString);
      configureStrobe();
      break;

    case 'T':
      Serial.println("Se recibio T");
      digitalWrite(13, LOW);
      lightStrobeTime=150+25*atoi(valueString);
      configureStrobe();
      break;

  }
}

```

Figura A 18. Código para el microcontrolador [6/6]. Fuente: Elaboración propia.

Anexo B.

B.1. Hoja de datos cámara Blackfly S USB3.

SPECS	BFS-U3-23S3M-C	BFS-U3-23S3C-C
Resolution	1920 x 1200	
Frame Rate*	163 FPS	
Megapixels	2.3 MP	
Chroma	Mono	Color
Sensor	Sony IMX392, CMOS, 1/2.3"	
Readout Method	Global shutter	
Pixel Size	3.45 μm	
Lens Mount	C-mount	
ADC	10-bit / 12-bit	
Minimum Frame Rate**	1 FPS	
Gain Range**	0 to 47 dB	
Exposure Range**	5 μs to 30 s	
Acquisition Modes	Continuous, Single Frame, Multi Frame	
Partial Image Modes	Pixel binning, decimation, ROI	
Image Processing	Gamma, lookup table, and sharpness	Color correction matrix, gamma, lookup table, saturation, and sharpness
Sequencer	Up to 8 sets using 6 features	
Image Buffer	240 MB	
User Sets	2 user configuration sets for custom camera settings	
Flash Memory	6 MB non-volatile memory	
Opto-isolated I/O	1 input, 1 output	
Non-isolated I/O	1 bi-directional, 1 input	
Auxiliary Output	3.3 V, 120 mA maximum	
Interface	USB 3.1 Gen 1	
Power Requirements	8 - 24 V via GPIO or 5 V via USB3 interface	
Power Consumption	3 W maximum	
Dimensions/Mass	29 mm x 29 mm x 30 mm / 36 g	
Machine Vision Standard	USB3 Vision v1.0	
Compliance	CE, FCC, KCC, RoHS, REACH. The ECCN for this product is: EAR099.	
Temperature	Operating: 0°C to 50°C Storage: -30°C to 60°C	
Humidity	Operating: 20% to 80% (no condensation) Storage: 30% to 95% (no condensation)	
Warranty	3 years	

*Frame rates are measured with Device Link Throughput Limit of 380 MBps and Acquisition Frame Rate disabled. Values are rounded down to whole numbers.

**Values are the same in binning and no binning modes.

Figura B. 1. Hoja de datos de cámara Blackfly S USB 3. Fuente: [4]

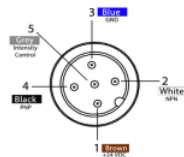
B.2. Hoja de datos Fuente de luz ODL300 Linear Light.

SPECIFICATIONS

Electrical Input	24 VDC +/- 5%
Input Current	Max. 4.6 A during strobe
Input Power	Max. 110 W during strobe
PNP Trigger	2.8 mA @ 4VDC 8.8 mA @ 12VDC 17.6 mA @ 24VDC
NPN Trigger	14.4 mA @ Common (0VDC)
Trigger Input	PNP > +4 VDC (24 VDC max.) to activate or NPN ≥ GND <1VDC to activate (not both)
Strobe Duration	Min. 1 μs Max. ∞
Power Indicator	Turns green when powered up
Status Indicators	Strobe indicator will turn red while resting and turn off when ready
Analog Intensity	The output is adjustable from 10% - 100% by a 1 - 10 VDC signal or front potentiometer. Jumpering pin 5 to pin 1 will provide maximum intensity
Connection	5-pin M12 connector
Operating Temperature	-10° to 40° C (14° to 104° F) RH max 80% non-condensing humidity
Storage Temperature	-20° to 70° C (-4° to 158° F) RH max 80% non-condensing humidity
IP Rating	IP50
Weight	~370 g
Compliances	CE, IEC 62471, RoHS
Warranty	10 years*

*See SmartVisionLights.com/warranty for details

WIRING CONFIGURATION



Pin layout for light (Male Connector)

Pins	Function	Signal	Wire Color
1	Power In	+24VDC	BROWN
2	NPN	Sinking Signal	WHITE
3	GND	Ground	BLUE
4	PNP	Sourcing Signal	BLACK
5	Intensity Control	1-10VDC	GREY

For maximum intensity, tie pin 5 to pin 1 at +24VDC.

For proper light function, apply either a PNP or NPN signal, not both.

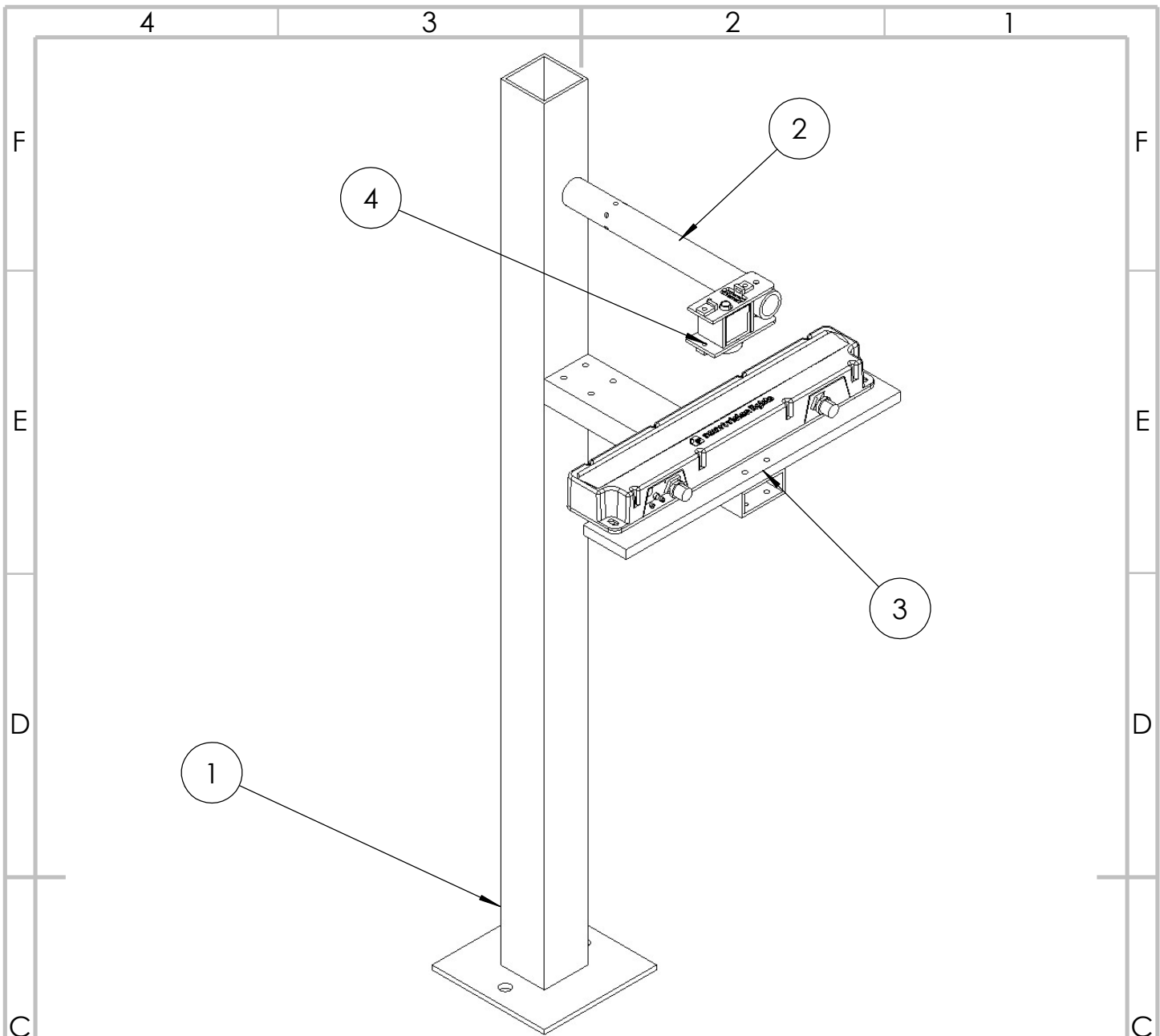
Failure to supply light with correct input current will result in inconsistent lighting behavior.

(see Product Specifications for requirements)

Figura B. 2. Hoja de datos de fuente de luz ODL300 Linear Light. Fuente: [5]

Anexo C.

C.1. Planos de diseño mecánico.



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Columna de Soporte	Columna de perfil cuadrado con base soldada para anclaje al piso.	1
2	Brazo de soporte de cámara	Brazo de perfil circular.	1
3	Brazo de soporte de Luces	Sub ensamble de soporte de luz.	1
4	Acople para cámara	Sub ensamble de acople de cámara.	1

TEC | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Ingeniería Mecatrónica

REVISIÓN:

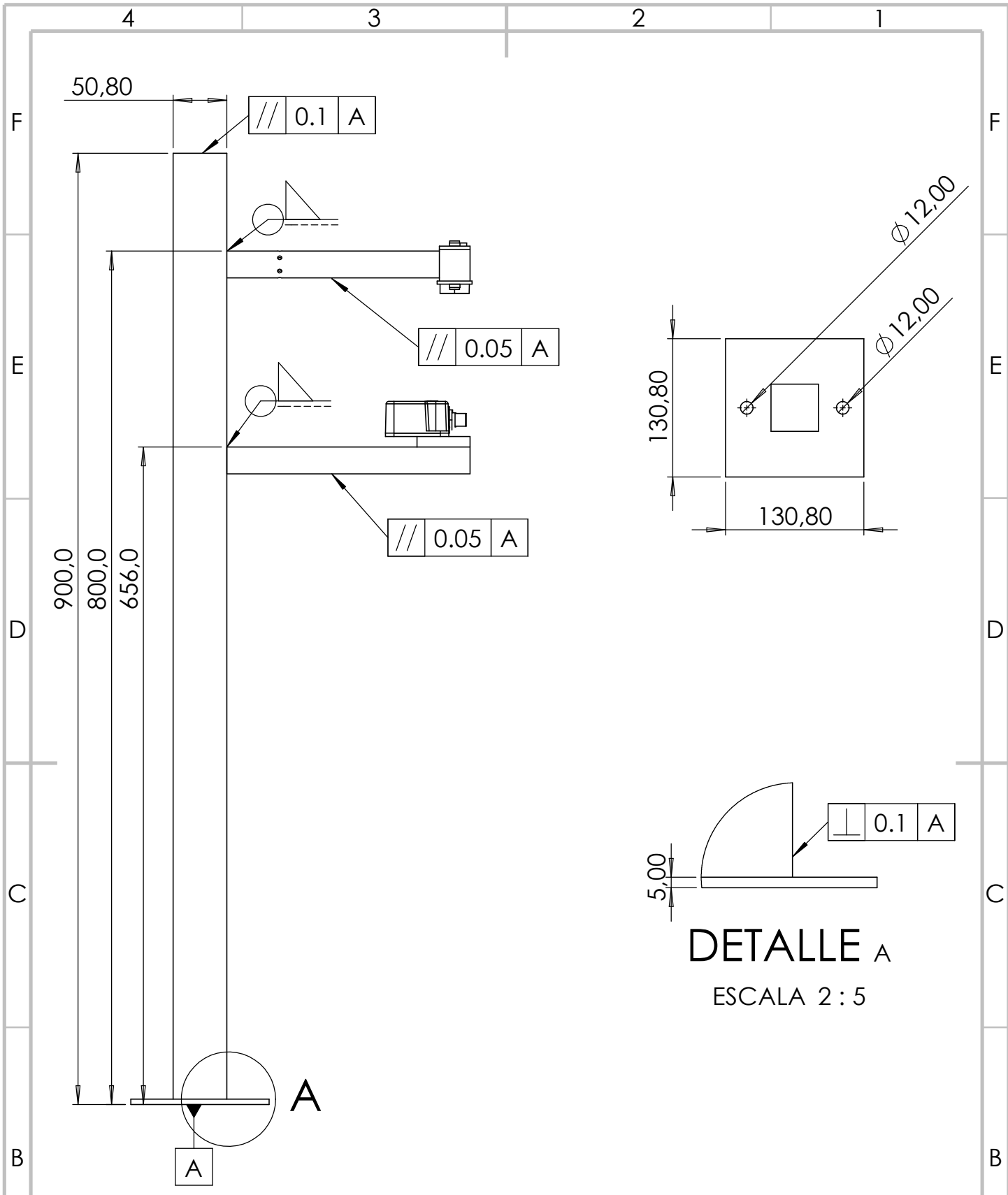
CURSO:
Proyecto Final de Graduación

A

NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ. Fabián Dixon		30/09/2022	--
VERIF.			
APROB.			MATERIAL: AISI 316
FABR.			

PARTE:
Listado de componentes

SISTEMA: 	TOLERANCIAS: LINEAL: X ± . X ± . XX ± . XXX ± ANGULAR: ±°	TOLERANCIA EN: --	PROYECTO: Detección de defectos en papel	ESCALA: 1:5	FORMATO A4
PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	HOJA 1 DE 10			



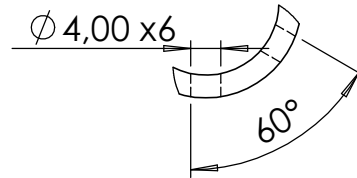
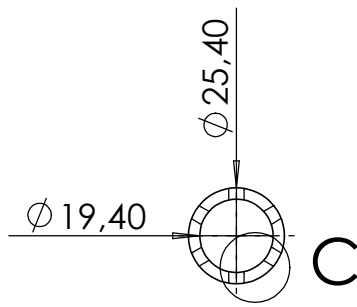
DETALLE A
ESCALA 2 : 5

TEC | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Ingeniería Mecatrónica
CURSO: Proyecto Final de Graduación

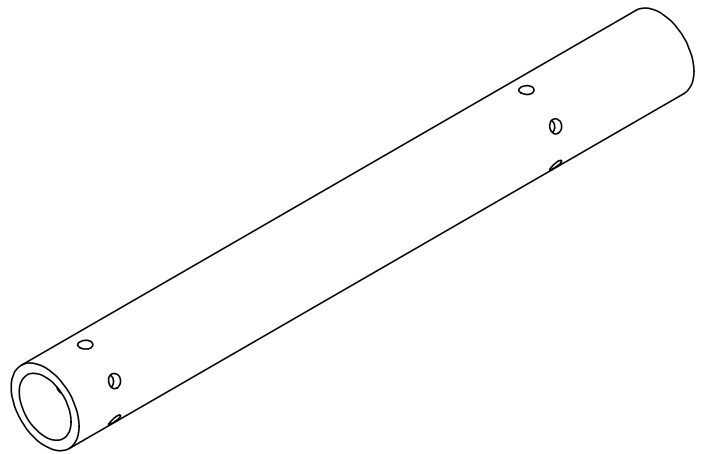
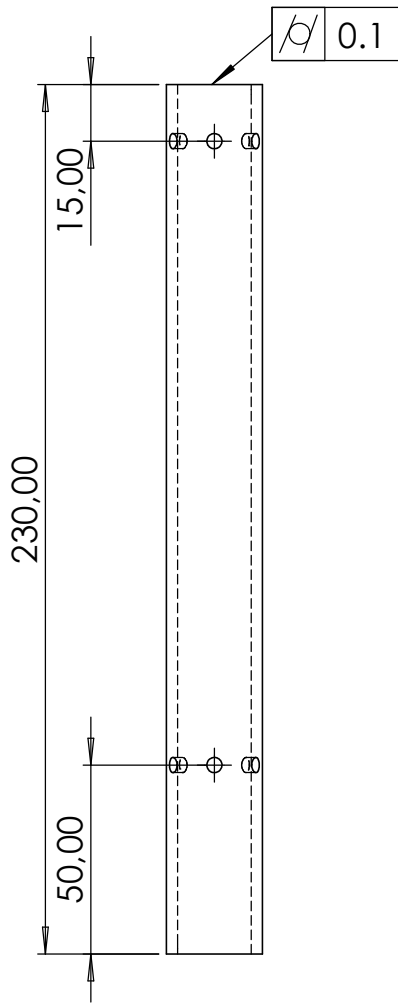
REVISIÓN:
A

DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE:
	Fabián Dixon		30/09/2022	N10	
VERIF.				MATERIAL:	PROYECTO:
APROB.				AISI 316	
FABR.				TOLERANCIA EN:	ESCALA:
				mm	1:5
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	FORMATO
	LINEAL: . X ±0.1 . XX ±0.05		mm	Detección de defectos en papel	A4
			PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	HOJA 2 DE 10



DETALLE C

ESCALA 1:1



TEC | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Ingeniería Mecatrónica

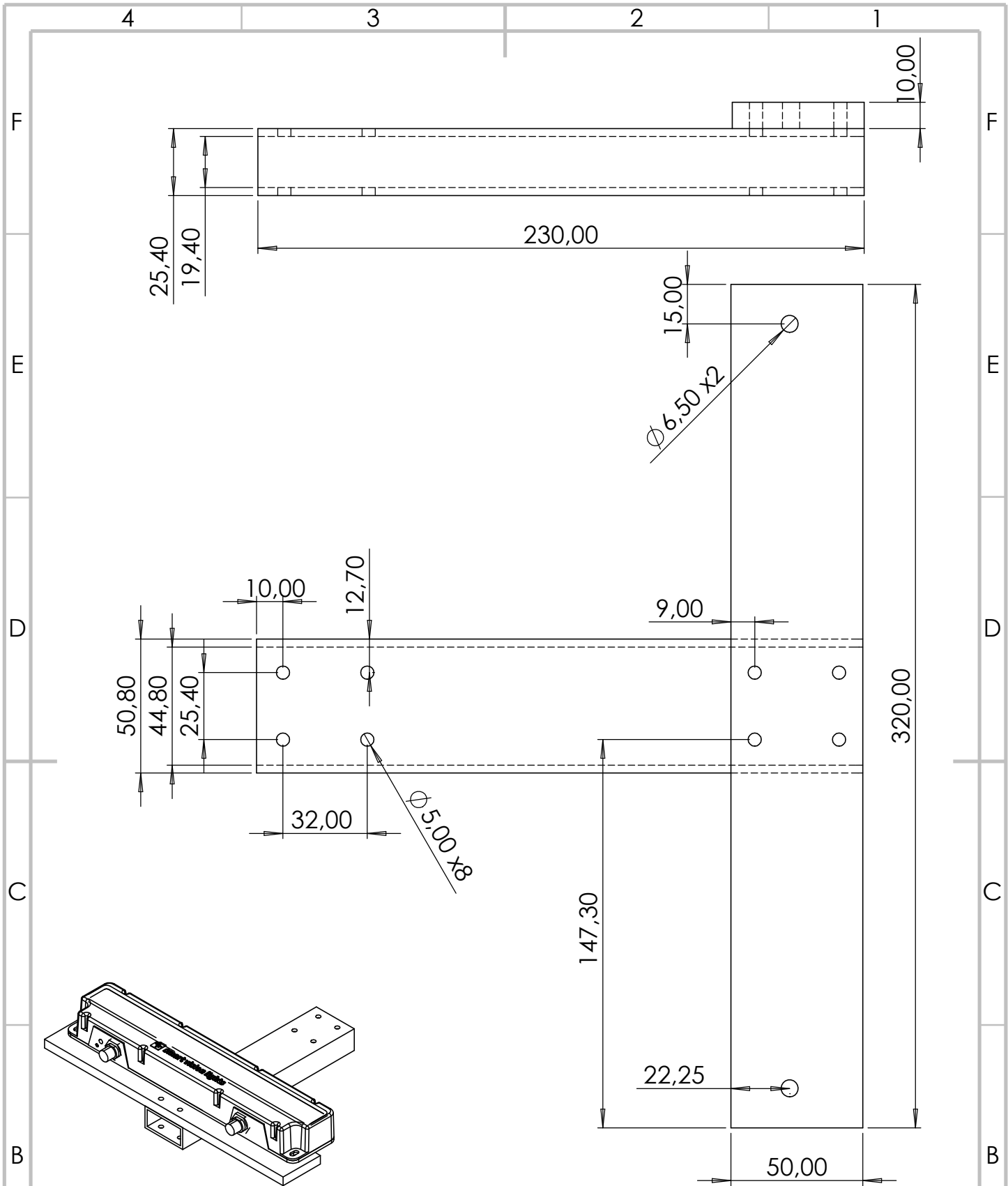
REVISIÓN:

CURSO:
Proyecto Final de Graduación

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	Fabián Dixon		30/09/2022	N10
VERIF.				MATERIAL:
APROB.				AISI 316
FABR.				TOLERANCIA EN:
SISTEMA:	TOLERANCIAS:			mm
PRIMER CUADRANTE	LINEAL:			PESO: -- gramos
	.X ±0.1			UNIDADES: mm
	.XX ±0.05			HOJA 3 DE 10
	Angular: ±0.1°			

PARTE:	ESCALA:	FORMATO
Elemento 2: Brazo de soporte de cámara	1:2	A4
PROYECTO:		
Detección de defectos en papel		



TEC | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Ingeniería Mecatrónica

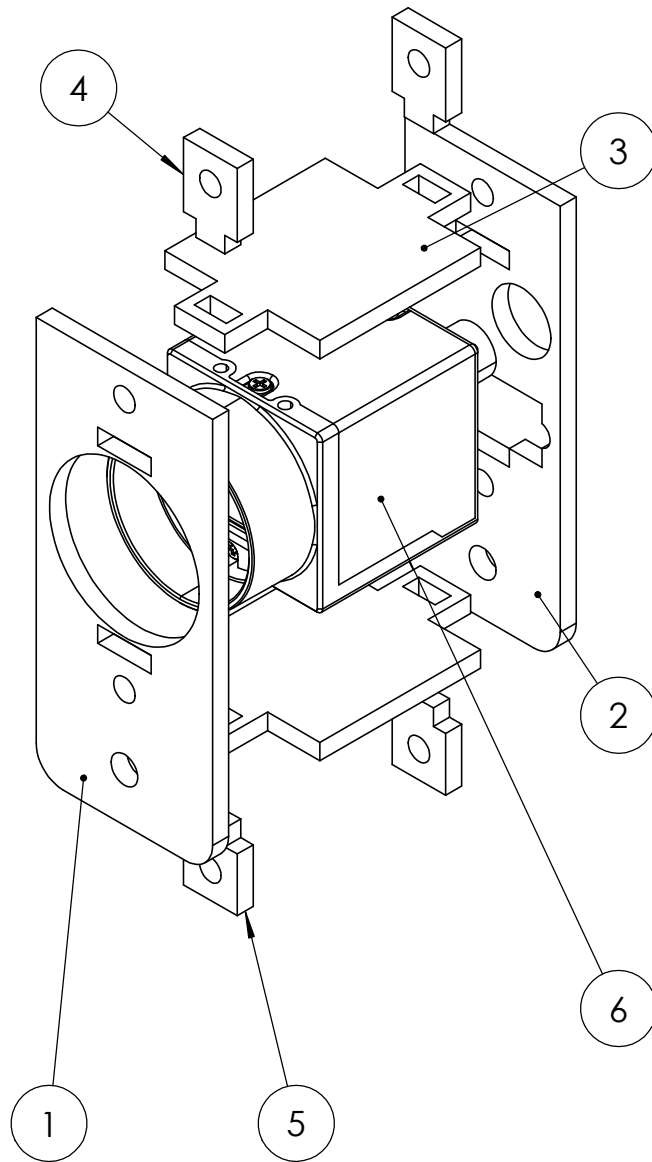
REVISIÓN:

CURSO:
Proyecto Final de Graduación

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	Fabián Dixon		30/09/2022	N10
VERIF.				MATERIAL:
APROB.				AISI 316
FABR.				TOLERANCIA EN:
SISTEMA:	TOLERANCIAS:			mm
PRIMER CUADRANTE	LINEAL:			
	. X ±0.1			
	. XX ±0.05			
	Angular: ±0.1°			
	PESO:	--	gramos	

PARTE:	ESCALA:	FORMATO
Elemento 3: Subensamble de soporte de luz	1:2	A4
PROYECTO:	UNIDADES:	HOJA 4 DE 10
Detección de defectos en papel	mm	



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Elemento 4.1	1
2	Elemento 4.2	1
3	Elemento 4.3	2
4	Elemento 4.4	2
5	Elemento 4.5	2
6	FL2-020-R0	1

TEC | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Ingeniería Mecatrónica

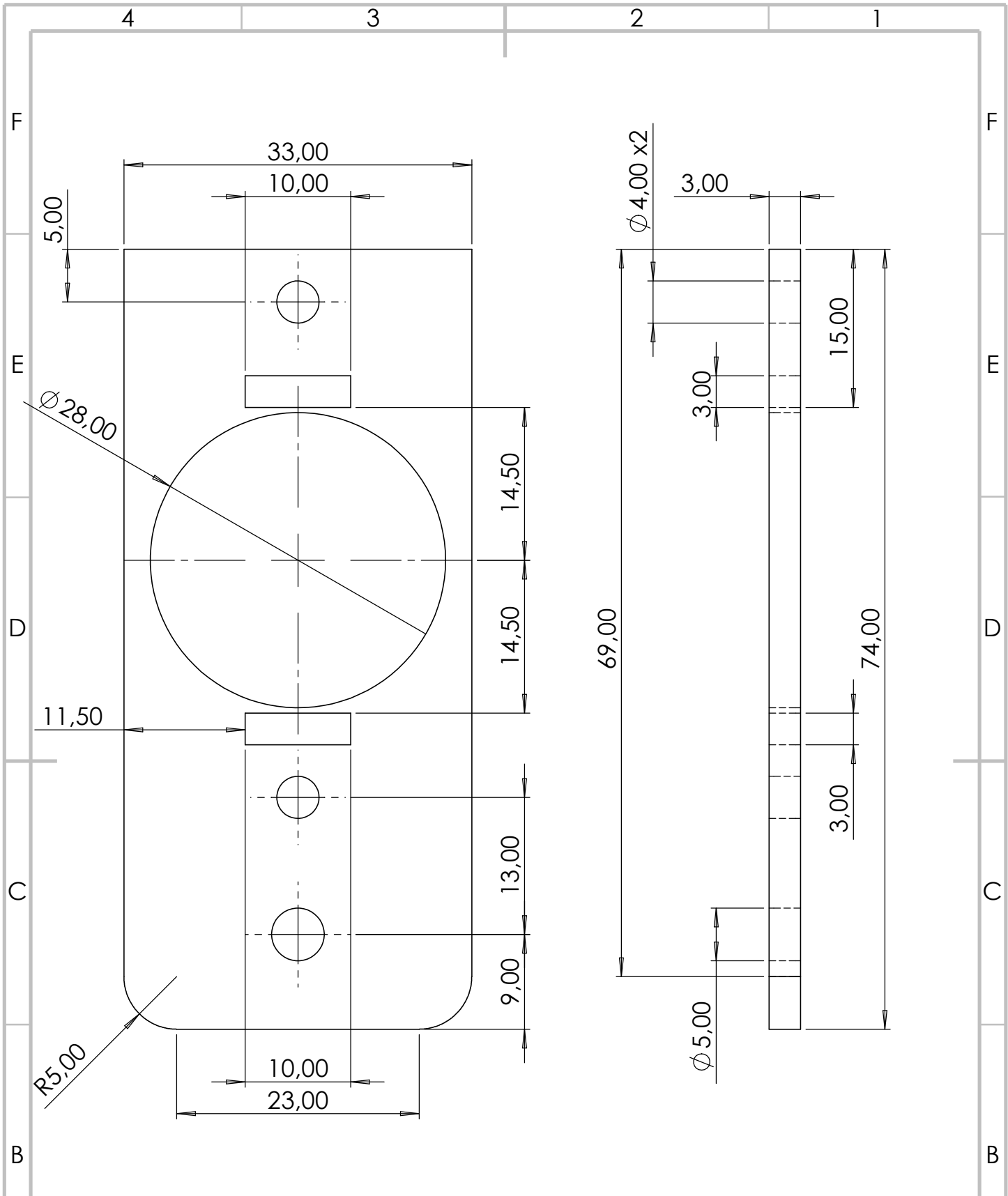
REVISIÓN:

CURSO:
Proyecto Final de Graduación

A

NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ. Fabián Dixon		30/09/2022	---
VERIF.			
APROB.			MATERIAL: Acrílico
FABR.			
SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	
PRIMER CUADRANTE	LINEAL: .X ±0.1 .XX ±0.05 Angular: ±0.1°	mm	
		PESO: -- gramos	

PARTE:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
Elemento 4: Subensamble de acople de cámara	Detección de defectos en papel	1:2	A4
	UNIDADES: mm	HOJA 5 DE 10	



TEC | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Ingeniería Mecatrónica

REVISIÓN:

CURSO:
Proyecto Final de Graduación

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	Fabián Dixon		30/09/2022	---
VERIF.				
APROB.				MATERIAL:
FABR.				Acrílico

PARTE:
Elemento 4.1

SISTEMA:

PRIMER CUADRANTE

TOLERANCIAS:
LINEAL:
.X ±0.1
.XX ±0.05
Angular: ±0.1°

TOLERANCIA EN:
mm

PROYECTO:
Detección de defectos en papel

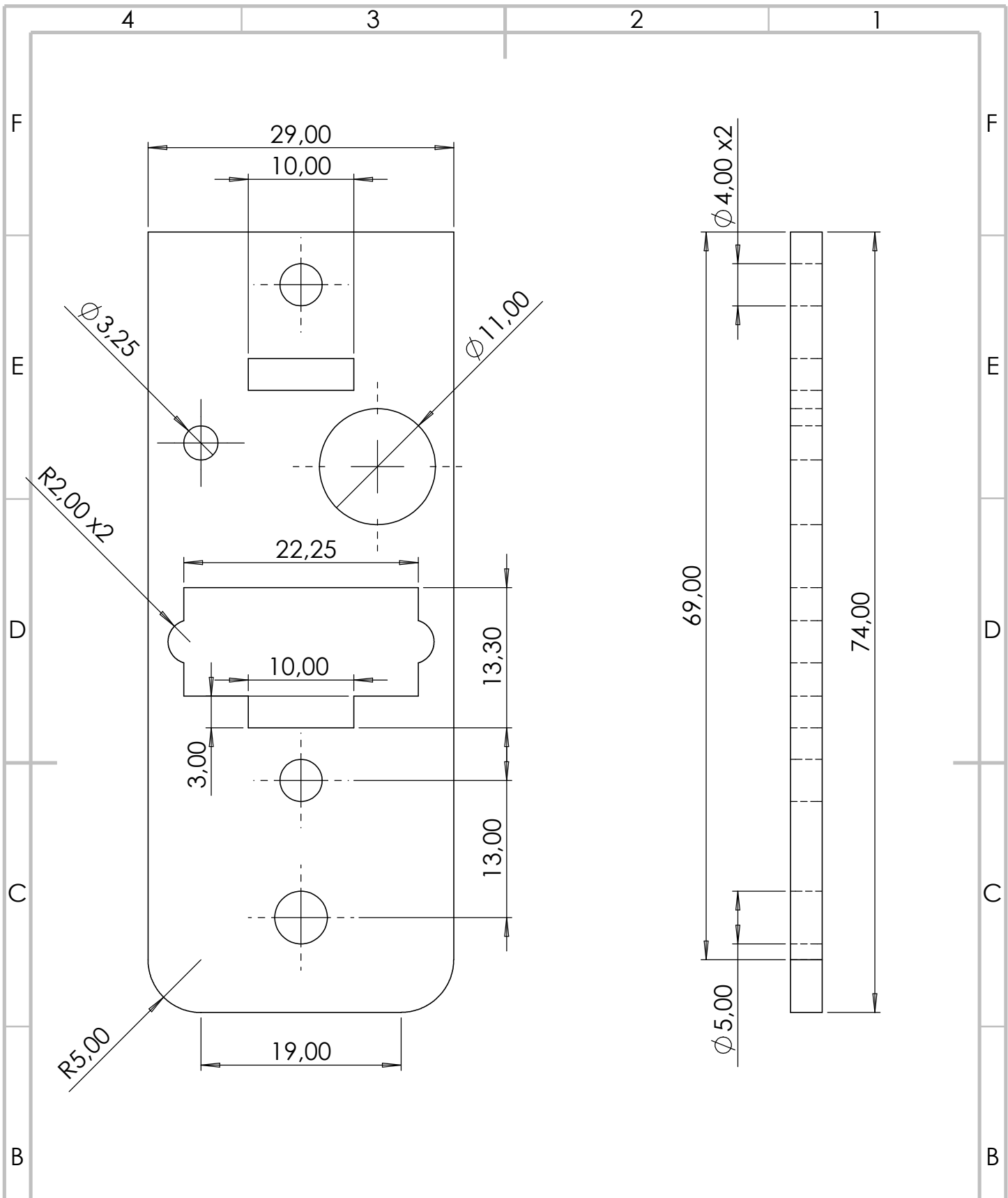
ESCALA:
2:1

FORMATO
A4

PESO: -- gramos

UNIDADES: mm

HOJA 6 DE 10



TEC | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Ingeniería Mecatrónica

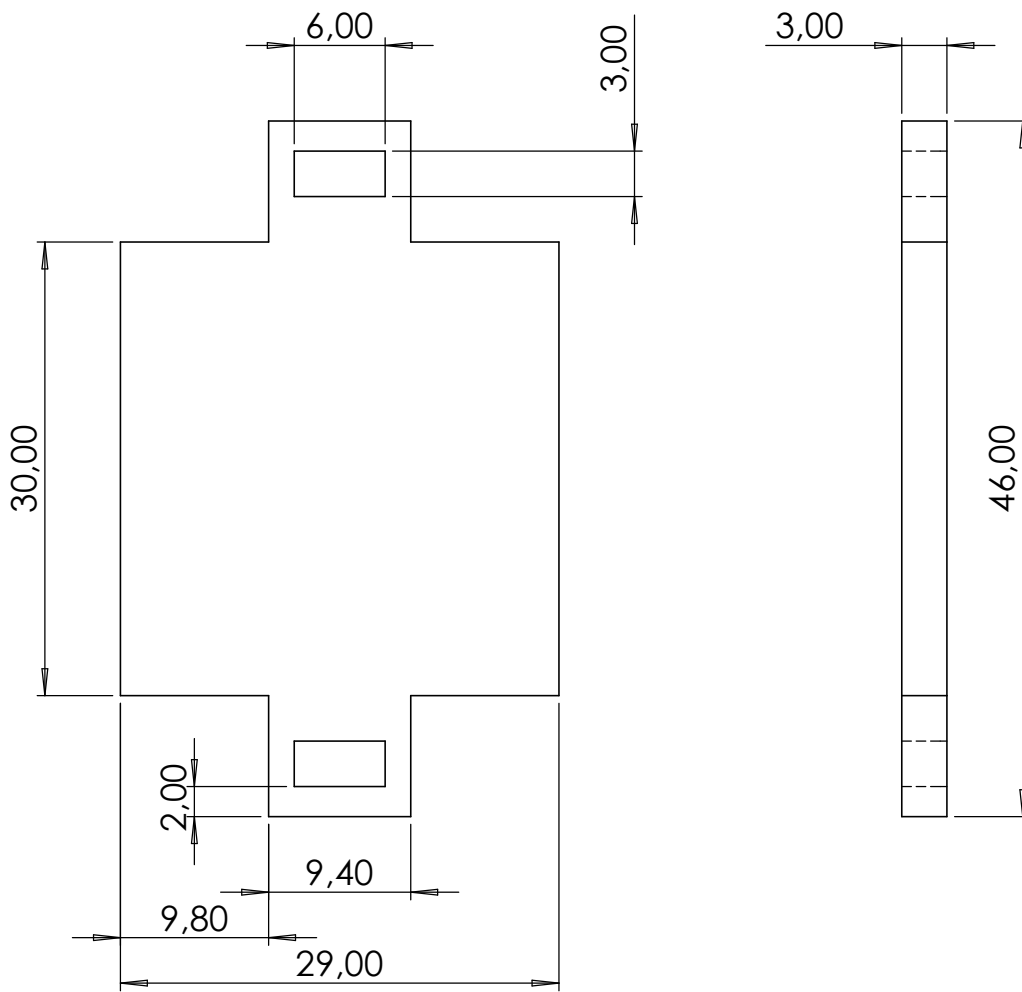
REVISIÓN:

CURSO:
Proyecto Final de Graduación

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	Fabián Dixon		30/09/2022	---
VERIF.				
APROB.				MATERIAL:
FABR.				Acrílico
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	mm
	LINEAL: .X ±0.1 .XX ±0.05 Angular: ±0.1°		PESO: --	gramos

PARTE:	Elemento 4.2		
PROYECTO:	Detección de defectos en papel	ESCALA:	2:1
UNIDADES:	mm	FORMATO:	A4
HOJA 7 DE 10			



TEC | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Ingeniería Mecatrónica

REVISIÓN:

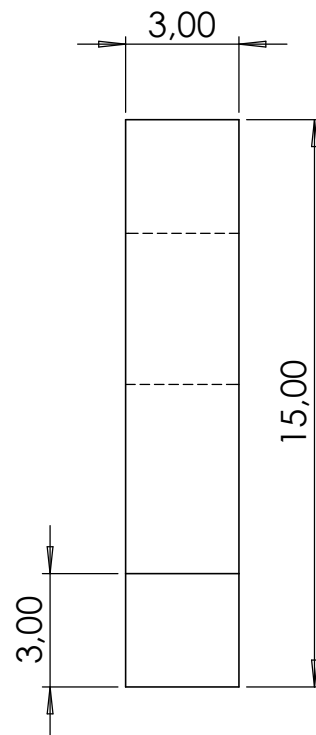
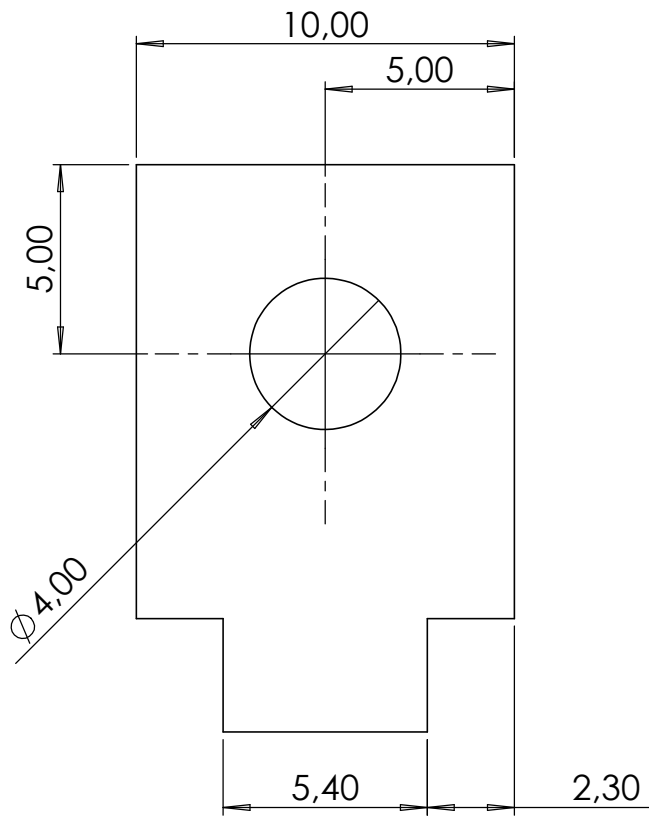
CURSO:
Proyecto Final de Graduación

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	Fabián Dixon		30/09/2022	---
VERIF.				
APROB.				MATERIAL:
FABR.				Acrílico

PARTE:	<h2>Elemento 4.3</h2>
PROYECTO:	

A	SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: .X ±0.1 .XX ±0.05 Angular: ±0.1°	mm	Detección de defectos en papel	2:1	A4
	PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	HOJA 8 DE 10			



TEC | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Ingeniería Mecatrónica

REVISIÓN:

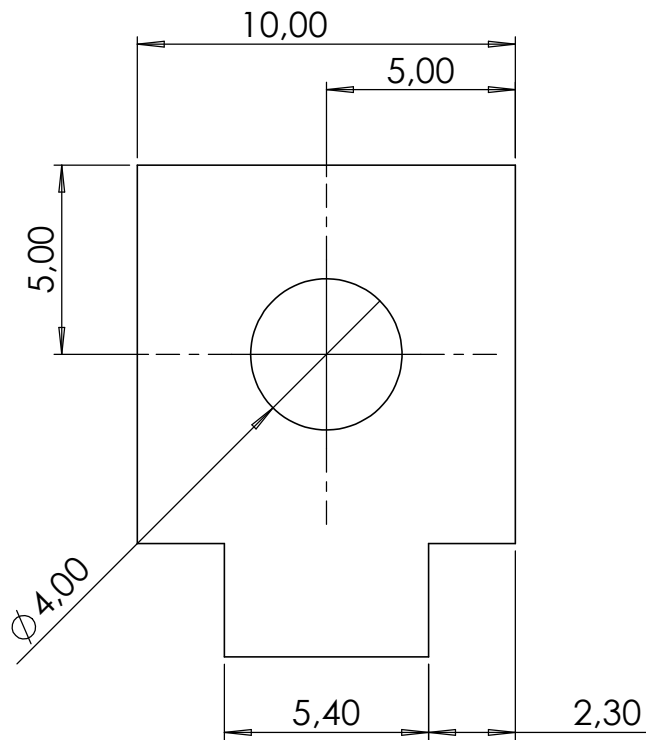
CURSO:
Proyecto Final de Graduación

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	Fabián Dixon		30/09/2022	---
VERIF.				
APROB.				MATERIAL:
FABR.				Acrílico

PARTE:	<h1>Elemento 4.4</h1>
PROYECTO:	

SISTEMA:		TOLERANCIAS: LINEAL: .X ±0.1 .XX ±0.05 Angular: ±0.1°	TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
			mm	Detección de defectos en papel	5:1	A4
PESO:	--	gramos	UNIDADES:	mm	HOJA	9 DE 10



TEC | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Ingeniería Mecatrónica

REVISIÓN:

CURSO:
Proyecto Final de Graduación

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	Fabián Dixon		30/09/2022	---
VERIF.				
APROB.				MATERIAL:
FABR.				Acrílico

PARTE:	<h1>Elemento 4.5</h1>
PROYECTO:	

SISTEMA:		TOLERANCIAS: LINEAL: .X ±0.1 .XX ±0.05 Angular: ±0.1°	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
				Detección de defectos en papel	5:1	A4
PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	HOJA 10 DE 10				