

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Carrera Ingeniería Mecatrónica



Diseño y programación de un sistema de visión artificial para la captura y procesamiento de las líneas de flujo de un flujo laminar.

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

Sebastián Rodríguez Alfaro

Cartago, 16 de noviembre 2021



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

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, 16 de noviembre 2021



Sebastián Rodríguez Alfaro

Céd: 116910999

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: Sebastián Rodríguez Alfaro

Proyecto: Diseño y programación de un sistema de visión artificial para la captura y procesamiento de las líneas de flujo de un flujo laminar.

JUAN LUIS CRESPO MARIÑO (FIRMA)	Firmado digitalmente por JUAN LUIS CRESPO MARIÑO (FIRMA) Fecha: 2021.11.16 10:19:31 -06'00'
--	--

Dr. -Ing. Juan Luis Crespo Mariño

Asesor

Cartago, 16 de noviembre 2021

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

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

Estudiante: Sebastián Rodríguez Alfaro

Proyecto: Diseño y programación de un sistema de visión artificial para la captura y procesamiento de las líneas de flujo de un flujo laminar.

Miembros del jurado evaluador

FELIPE GERARDO MEZA
OBANDO (FIRMA)

Digitally signed by FELIPE
GERARDO MEZA OBANDO
(FIRMA)
Date: 2021.11.16 15:56:32 -06'00'

MSc. -Ing. Felipe Meza Obando

Jurado

IVAN ARAYA
MENESES (FIRMA)

Firmado digitalmente por IVAN
ARAYA MENESES (FIRMA)
Fecha: 2021.11.16 11:25:59
-06'00'

MSc. -Ing. Iván Araya Meneses

Jurado

JOHANNA VANESSA
MUÑOZ PEREZ
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
JOHANNA VANESSA MUÑOZ
PEREZ (FIRMA)
Fecha: 2021.11.16 10:43:39 -06'00'

MSc. -Ing. Johanna Muñoz Pérez

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, 16 de noviembre 2021

Resumen

En este documento se presenta el diseño, implementación y validación de un sistema de visión computacional para observar y procesar las líneas de flujo producidas por el modelo de un impulsor para un Dispositivo de Asistencia Ventricular en el Laboratorio de Inteligencia Artificial para las Ciencias Naturales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Este proyecto formó parte de una etapa previa para la validación de modelos de impulsores propuestos para el desarrollo de un Dispositivo de Asistencia Cardíaca y posteriores pruebas in vivo de esta línea de investigación. El desarrollo implicó un diseño en conjunto con el Laboratorio de Simulaciones para la Bioingeniería, en el cual se implementó el sistema de visión artificial con equipo de la marca Cognex. El procesamiento de las imágenes se basó en algoritmos de detección de bordes, líneas y patrones, así como umbralización, semiumbralización y filtros para incrementar el contraste. Se obtuvo una herramienta para la captura, procesamiento, almacenamiento y estudio de imágenes que muestran el comportamiento del flujo producido por el impulsor de eje central. A través de una evaluación de aproximadamente el 1% de los resultados obtenidos, se comprobó que el sistema funciona adecuadamente para el estudio del comportamiento del flujo en una sección del tubo de la planta construida, con una tasa de aprobación mayor al 90% para todas las imágenes al extrapolar los resultados de la muestra poblacional evaluada.

Palabras clave: Flujo, Imágenes, Impulsor, Procesamiento, Visión Artificial, Visión Computacional

Abstract

This document presents the design, implementation, and validation of a computational vision system for observing and processing the flow lines produced by the impeller's design for a Ventrilocuar Assistance Device at the *Tecnológico de Costa Rica's* Artificial Intelligence and Natural Sciences Laboratory. This project formed part of one of the previous stages for the validation of the impeller models proposed for a Cardiac Assistance Device and for posterior in vivo testings in this investigation line. The development implied a joint design with the Simulation for Bioengineering Laboratory, in which the artificial vision system with Cognex brand equipment was implemented. The images processing was based on edges, lines and pattern detection algorithms, as well as, umbralization, semiumbralization and contrast enhancement filters. A tool for capture, processing, storage, and study of images that show the behaviour of the flow produced by the central axis impeller was obtained. Throughout the evaluation of approximately the 1% of the obtained results, was verified that the system properly works for the study of the flow's behaviour in a section of the constructed plant's tube, with an approval rate higher than 90% for all the images when extrapolating the results of the evaluated population sample.

Keywords: Artificial Vision, Computational Vision, Flow, Images, Impeller, Processing

DEDICATORIA

En primera instancia, dedico este proyecto de graduación a la mujer más importante de mi vida, mi mamá, Yamileth Alfaro, quien me dio todo su apoyo y cualquier cosa que necesitara para mis estudios, quien al verme muy ocupado debido a mi carga académica, no dudaba en ofrecerme ayuda, desde despertarse conmigo antes de las 5 de la mañana para que yo pudiera desayunar antes de ir al TEC, hasta responderme encuestas o entrevistas para mis cursos. Muchas gracias por todo, este logro no hubiera sido posible sin ella. También para el resto de mi familia, que siempre me demostró su apoyo y buenos deseos. Finalmente, a mis amigas y amigos, quienes nunca dejaron de alentarme y de creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer ante todo a mi familia, en especial a mis padres, por siempre darme la posibilidad de estudiar y todo su apoyo en cada momento del camino. Agradezco al profesor Juan Luis Crespo Mariño tanto por su excelente labor como asesor, como por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto en el LIANA, como su entendimiento, apoyo y consejos ante cada uno de los obstáculos enfrentados durante el proyecto.

Agradezco a mis compañeros y amigos por volver mi experiencia en el TEC tan agradable y especial, siempre apoyándome para salir adelante y disfrutar del camino. Un especial agradecimiento para el Ingeniero Ronald Loaiza con quién compartí el espacio de trabajo durante la mayor parte del desarrollo del proyecto y siempre tuvo fe en mí. También agradezco a todos los excelentes profesores que conocí durante mi carrera y demostraron su vocación por la enseñanza, quienes me motivaron a siempre hacer mi mejor esfuerzo en cada trabajo.

Finalmente, quiero agradecerme a mí mismo por creer en mí, por nunca rendirme, por siempre intentar dar lo mejor de mí, dando mi máximo esfuerzo y por tratar de siempre apoyar a mis amigos y compañeros, porque la carrera es con uno mismo y el éxito es para todos. Por último, pero no por eso menos importante, agradezco a Dios por todas las oportunidades que me ha dado y situaciones que me ha presentado, buenas o malas, todas me ayudaron a crecer como persona y profesional.

CONTENIDO

Lista de figuras	v
List of Tables	vii
List of Abbreviations	viii
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Entorno	3
1.3 Descripción del problema	4
1.4 Justificación	5
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivos específicos	6
1.6 Estructura del Informe	6
2 Marco Teórico	8
2.1 Dispositivo de Asistencia Ventricular	8
2.2 Mecánica de Fluidos	12
2.3 Visión Artificial	21
2.4 Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV)	30
2.5 Procesamiento de Imágenes	34
3 Metodología	44
4 Propuesta de Diseño	49
4.1 Necesidades y Especificaciones	50
4.2 Diseño de Planta del SIBILA	54
4.3 Generación de conceptos	58
4.3.1 División en Subsistemas	59
4.3.2 Búsqueda de Conceptos	61

4.4	Selección de Conceptos	61
4.4.1	Filtrado de Conceptos	62
4.4.2	Conceptos Escogidos	63
4.5	Pruebas de Concepto	70
4.5.1	Captura de Imágenes	71
4.5.2	Iluminación	71
4.5.3	Trazador	77
4.6	Rediseño de la Planta	83
4.6.1	Ensamblaje de la Planta	83
4.6.2	Sistema Mecánico	84
4.6.3	Rectificador de Flujo	88
4.6.4	Impulsor	90
4.7	Diseño del Procesamiento de Imagen	90
4.7.1	Versión 1	91
4.7.2	Versión 2	95
4.7.3	Presentación de Resultados	99
4.8	Diseño Seleccionado	101
4.8.1	Configuración de Cámaras	102
4.8.2	Equipo	106
5	Resultados y Análisis	110
5.1	Estrategia de Validación	110
5.2	Resultados	112
5.3	Análisis Económico	120
5.4	Análisis de Resultados	121
6	Conclusiones y Recomendaciones	125
6.1	Conclusiones	125
6.2	Recomendaciones	126
	Referencias bibliográficas	128
	Anexo 1: Rúbrica de evaluación para la validación	136
	Anexo 2: Resultados de evaluación para la validación	145

LISTA DE FIGURAS

2.1	Imagen del LVAD Heartmate 3.	11
2.2	Vista de corte del LVAD Heartmate 3.	12
2.3	Visualización de un flujo laminar por medio de inyección de tinta.	15
2.4	Visualización de un flujo turbulento por medio de inyección de tinta.	16
2.5	Visualización de un flujo de transición por medio de inyección de tinta.	17
2.6	Diagrama de bloques de las etapas típicas de un sistema de visión artificial.	22
2.7	Espectro visible de luz con respecto a la longitud de onda	23
2.8	Reflexión y refracción de la luz.	24
2.9	Relación de la luz incidente con el plano de formación de la imagen de una lente biconvexo.	25
2.10	Relación de la luz incidente con los focos de una lente biconvexo.	26
2.11	Esquema de partes y configuración de un sistema PIV.	32
2.12	Imagen de un aparato de Hele-Shaw comercial.	33
2.13	Esquema simplificado del montaje del experimento de Reynolds.	34
2.14	Esquema detallado del montaje del experimento de Reynolds.	35
2.15	Imagen de Lena en escala de grises y su histograma.	36
2.16	Ejemplos de operaciones lógicas y aritméticas, donde los píxeles negros tienen valores de 0 en sus bits y los blancos de 255.	39
2.17	Ejemplo de operación del algoritmo Patrón Binario Local (LBP).	41
3.1	Metodología de diseño de producto.	44
3.2	Metodología de diseño de Cascada.	47
3.3	Metodología de diseño de Prototipado.	48
4.1	Tanque de la planta ensamblado.	55
4.2	Tanque de la planta ensamblado con el tubo de realimentación.	56
4.3	Eje del impulsor ensamblado.	57
4.4	Diagrama de división en subsistemas del sistema de visión artificial.	60
4.5	Diagrama de descomposición en subsistemas con más detalle del sistema de visión artificial.	60

4.6	Configuración del montaje de las cámaras.	72
4.7	Anillo de luz facilitado por el LIANA.	73
4.8	Backlight facilitada por el LIANA.	74
4.9	Imagen capturada con cámara Cognex iluminando con el anillo de luz facilitado por el LIANA.	75
4.10	Imagen capturada con cámara Cognex iluminando con el backlight facilitado por el LIANA.	76
4.11	Diseño de backlight, para dos vistas paralelas.	78
4.12	Diseño final del backlight, para dos vistas perpendiculares.	79
4.13	Imagen capturada con cámara Cognex en la planta para la entrada del impulsor, con tinta china Staedtler como trazador.	81
4.14	Imagen capturada con cámara Cognex en la planta para la entrada del impulsor, con tinta marca Pelikan como trazador.	82
4.15	Diagrama para el diseño del montaje del motor para las poleas.	86
4.16	Foto del soporte para el motor.	86
4.17	Progresión de los ensambles para la sujeción del motor.	88
4.18	Progresión de los diseños del rectificador de flujo del proyecto	89
4.19	Progresión de los impulsores utilizados en el proyecto.	91
4.20	Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes capturadas a la entrada del impulsor.	98
4.21	Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes capturadas a la salida del impulso.	100
4.22	Interfaz Gráfica de Usuario creada para la visualización de los resultados.	101
4.23	Foto del sistema completo montado.	102
4.24	Foto del sistema de visión acoplado a la planta.	103
4.25	Foto del sistema mecánico montado a la planta.	104
4.26	Diagrama de conexión de una salida de alta velocidad de la cámara configurado como PNP.	106
4.27	Diagrama de conexión del Trigger de la cámara configurado como PNP.	107
4.28	Diagrama de conexión eléctrica de los cables para la sincronización de las cámaras.	107
5.1	Resultado de imágenes originales capturadas en la entrada del impulsor sin trazador.	113
5.2	Resultado de imágenes procesadas capturadas en la entrada del impulsor sin trazador.	114
5.3	Resultado de imágenes originales capturadas en la entrada del impulsor con trazador.	114
5.4	Resultado de imágenes procesadas capturadas en la entrada del impulsor con trazador.	115
5.5	Resultado de imágenes originales capturadas en la salida del impulsor sin trazador.	115
5.6	Resultado de imágenes procesadas capturadas en la salida del impulsor sin trazador.	116

5.7	esultado de imágenes originales capturadas en la salida del impulsor con trazador.	116
5.8	Resultado de imágenes procesadas capturadas en la salida del impulsor con trazador.	117

LIST OF TABLES

4.1	Necesidades identificadas, numeradas, clasificadas y calificadas.	52
4.2	Métricas con importancia, unidades, valores marginales e ideales y necesidades asociadas.	52
4.3	Representación del valor numérico de las escalas utilizadas para las métricas.	53
4.4	Conceptos obtenidos por búsqueda interna y externa para los distintos subsistemas.	61
4.5	Continuación de conceptos obtenidos por búsqueda interna y externa para los distintos subsistemas.	62
4.6	Conceptos tras filtrado por necesidades del proyecto.	62
4.7	Continuación de conceptos tras filtrado por necesidades del proyecto. .	63
4.8	Conceptos tras filtrado según la accesibilidad.	63
4.9	Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: cámaras. . . .	64
4.10	Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: montaje de cámaras.	65
4.11	Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: tipo de iluminación.	66
4.12	Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: color de luz. . .	67
4.13	Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: montaje de iluminación.	67
4.14	Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: trazador. . . .	68
4.15	Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: dosificación del trazador.	69
4.16	Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: adición del trazador.	70
4.17	Lista de materiales y elementos de la planta y sistema de visión con su cantidad y clasificación.	108
4.18	Continuación de lista de materiales y elementos de la planta y sistema de visión con su cantidad y clasificación.	109
5.1	Resultados de evaluación de los resultados para una de las pruebas de la entrada del impulsor para la validación.	118

5.2	Resultados de evaluación de los resultados para una de las pruebas de la salida del impulsor para la validación.	119
5.3	Tabla de costos del proyecto	122
5.4	Resumen de resultados generales de validación.	123
5.5	Resultado de validación de la interfaz de usuario	124
5.6	Resultados de encuesta de validación de la experiencia de usuario de la interfaz gráfica	124
A.1	Resultados de evaluación de los resultados para la primera prueba de la entrada del impulsor para la validación.	146
A.2	Resultados de evaluación de los resultados para la segunda prueba de la entrada del impulsor para la validación.	147
A.3	Resultados de evaluación de los resultados para la tercera prueba de la entrada del impulsor para la validación.	148
A.4	Resultados de evaluación de los resultados para la primera prueba de la salida del impulsor para la validación.	149
A.5	Resultados de evaluación de los resultados para la segunda prueba de la salida del impulsor para la validación.	150
A.6	Resultados de evaluación de los resultados para la tercera prueba de la salida del impulsor para la validación.	151

ACRÓNIMOS

ADC Convertidor Analógico a Digital (Analogic Digital Converter)

CCD Dispositivo de Carga Acoplada (Charge-Coupled Device)

CLAHE Ecualización Adaptativa de Histograma de Contraste Limitado (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization)

CMOS Óxido de Metal Complementario en Silicón (Complementary Metal Oxide on Silicon)

FoV Campo de Visión (Field of View)

FPS Cuadros por Segundo (Frames per Second)

LBP Patrón Binario Local (Local Binary Pattern)

LIANA Laboratorio de Inteligencia Artificial para las Ciencias Naturales

PIV Velocimetría de Imagen de Partícula (Particle Image Velocimetry)

SIBILA Laboratorio de Simulación para la Bioingeniería (Simulation for Bioengineering Laboratory)

TEC Tecnológico de Costa Rica

VAD Dispositivo de asistencia ventricular (Ventricular assist device)

VA Visión Artificial

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades del sistema cardiovascular representaron la principal causa de mortalidad del país en el año 2010 [1]. Esta tendencia se ha mantenido presente desde entonces, como se muestra en la publicación del 2018 por parte de la Organización Panamericana de la Salud [2] donde se destaca que para el año 2016 las enfermedades del corazón son la principal razón de muerte a nivel general en América del Norte, América Latina y el Caribe. Consecuentemente, la cantidad de trasplantes cardíacos ha incrementado y se considera el tratamiento de elección en caso de insuficiencia cardíaca terminal refractaria a tratamiento médico o quirúrgico [3]. En el caso de España, 304 trasplantes cardíacos fueron realizado en el 2017 y 2689 entre los años 2008 y 2017 [4].

El procedimiento de trasplante cardíaco se considera como una solución para la insuficiencia cardíaca avanzada, sin embargo, su principal limitante es la disponibilidad de donantes por lo que se han creado alternativas para el manejo de esta condición como los dispositivos de asistencia ventricular, la resincronización cardíaca, el desfibrilador automático implantable, entre otros [3]. El dispositivo de asistencia ventricular para pacientes en espera o rechazados para un trasplante ha demostrado una mejora en la

supervivencia de los pacientes de hasta un 23% a los 2 años en comparación con un 8% sin el tratamiento.

Las razones anteriores dieron origen al proyecto para el desarrollo de un dispositivo de asistencia ventricular dentro del *Tecnológico de Costa Rica (TEC)*, para el cual se han propuesto modelos de impulsor para una bomba de sangre [5]. El diseño de cualquier elemento de un producto se debe validar de alguna forma que garantice su adecuado funcionamiento en el producto final [6]. En [7] se desarrolla el diseño y validación experimental de un impulsor para un compresor centrífugo, para verificar experimentalmente su adecuado funcionamiento. Por otra parte, la validación computacional también forma parte del proceso de validación, sin embargo, en algunos casos, esta no sustituye a la validación experimental como el caso de [8]. La validación experimental también se puede basar en un proceso de inspección visual, para lo cual el uso de sistemas de visión artificial y el procesamiento de imágenes presentan una ayuda en la evaluación. En [9] se emplean cámaras que permiten capturar imágenes en intervalos de hasta 1.6 picosegundos para observar diferencias en la intensidad del plasma que no podrían ser percibidas a simple vista durante un proceso de validación experimental.

1.1 Antecedentes

La línea de investigación del Tecnológico de Costa Rica para el desarrollo de un dispositivo de asistencia ventricular tiene su origen a partir del año 2011 con el Estudio exploratorio para el desarrollo de un dispositivo de asistencia cardiaca [5]. En este trabajo se desarrollan modelos matemáticos y simulaciones de estos para el sistema cardiovascular y el flujo de la sangre. También se comparan distintos tipos de bombas para sangre como las bombas de desplazamiento positivo, bombas centrífugas y bombas axiales e impulsores como los impulsores con y sin eje central [5].

En el mismo año que se comenzó esta línea de investigación, se realizó un proyecto donde se desarrolló la implementación de una simulación del sistema circulatorio en MATLAB, donde se emplearon 6 modelos matemáticos, enfocándose en el modelo matemático basado en parámetros concentrados [10]. Entre las simulaciones realizadas, se incluyó la conexión de un modelo matemático de un *Dispositivo de asistencia ventricular (Ventricular assist device) (VAD)* en serie con la arteria aorta [10].

En el transcurso de los años se han desarrollado múltiples proyectos asociados a esta misma línea de investigación dentro del Tecnológico de Costa Rica, uno de los más recientes corresponde con el diseño de un prototipo de un montaje experimental para la medición de esfuerzos por compresión sobre el impulsor de bombas de sangre [11]. Este trabajo planteó un diseño adecuado para la medición de esfuerzos de compresión en los álabes del impulsor para bombas de sangre [11].

1.2 Entorno

El proyecto se realizó en el *Laboratorio de Inteligencia Artificial para las Ciencias Naturales (LIANA)* en el *TEC* para el *Laboratorio de Simulación para la Bioingeniería (Simulation for Bioengineering Laboratory) (SIBILA)* del Área Académica de Ingeniería Mecatrónica del *TEC*. El proyecto se ubica en el contexto del proyecto del *SIBILA* para desarrollar un *VAD*.

El Laboratorio de Inteligencia Artificial para las Ciencias Naturales es una de las tres unidades de investigación adscritas en exclusiva al Área Académica de Ingeniería Mecatrónica del Tecnológico de Costa Rica. Esta posee los objetivos generales de participar en el desarrollo de novedosos paradigmas de inteligencia computacional basados en el estudio de fenómenos naturales y abordar el uso de paradigmas de computación inteligente a la resolución de problemas propios de las ciencias naturales y otras disciplinas tecnológicas [12]. Algunas de las líneas de investigación del *LIANA* son el

desarrollo de redes neuronales artificiales de alto orden, desarrollo de funciones atencionales con base en arquitecturas modulares bioinspiradas, desarrollo de aplicaciones computacionales basadas en aprendizaje automático para su uso en astronomía y astrofísica, entre otros [13]. Adicionalmente, el *LIANA* tiene acceso al equipo de un laboratorio de visión artificial del Área de Ingeniería Mecatrónica del Tecnológico de Costa Rica. En este laboratorio se tiene equipo de carácter industrial para sistemas de visión artificial incluyendo cámaras programables, iluminación de distintos tipos y equipo de montaje.

El Laboratorio de Simulación para la Bioingeniería forma parte de una de las unidades de investigación del Tecnológico de Costa Rica con las cuales el *LIANA* ha colaborado. En el *SIBILA* se está llevando a cabo el proyecto para el desarrollo del Dispositivo para Asistencia Cardíaca, del cual se han derivado múltiples proyectos relacionados con este, por ejemplo, el Desarrollo de Modelos de Impulsor para Dispositivos de Asistencia Cardíaca, entre otros [14].

1.3 Descripción del problema

Para el desarrollo del *VAD* se necesita realizar un análisis dinámico del comportamiento de las líneas de flujo de un fluido para la validación de distintos modelos de impulsores. Este análisis se debe realizar por medio de un procesamiento digital para la observación precisa de las líneas y la comparación directa entre distintos resultados. Hasta la fecha, la validación de los diseños de los impulsores se ha llevado a cabo por medio de simulaciones computacionales tanto en el *SIBILA* como en el *LIANA*. Para este propósito, el *SIBILA* propuso desarrollar una cámara en la que se puedan acoplar los impulsores para generar un flujo laminar a través de un conducto de sección circular para poder realizar validaciones experimentales. Sin embargo, este sistema no posee una forma de capturar y procesar digitalmente las líneas de flujo en el fluido para su

detallado análisis. Por esta razón, desde el *LIANA* se plantea el diseño de un sistema de visión artificial para la captura y procesamiento digital con el equipo disponible en el laboratorio.

Por lo tanto, se requiere diseñar un sistema de visión artificial para poder observar, procesar y comparar el comportamiento de las líneas de flujo en distintos diseños de impulsores del *SIBILA* para el Dispositivo de Asistencia Ventricular, con el fin de validar experimentalmente estos impulsores, los cuales sólo se han validado previamente por simulaciones computacionales.

1.4 Justificación

El problema tiene su origen en el proyecto *VAD*, el cual requiere de un análisis de la velocimetría de imágenes de partículas en un flujo laminar para probar sus impulsores y determinar si se cumplen las características necesarias en el fluido. Del mismo modo, el laboratorio posee un sistema que permite generar los flujos de manera controlada atravesando un conducto traslúcido por el cual se puede ver el fluido.

El desarrollo de este proyecto ahorrará al *SIBILA* más tiempo y recursos en simulaciones para la validación de los diseños de los impulsores. La construcción de este sistema para la visualización y análisis de las líneas de flujo producidas por un impulsor permitirá al laboratorio la verificación del comportamiento de los impulsores actuales e impulsores que se desarrollen a futuro en caso de realizarse modificaciones a estos. Adicionalmente, la validación de los impulsores permitiría una experimentación más confiable de los Dispositivos de Asistencia Ventricular con los impulsores con y sin eje central. El desarrollo de este proyecto representa un paso en una línea de investigación con alto impacto para el desarrollo tecnológico, científico y para la salud pública por tratarse de un trabajo ligado al desarrollo del diseño de un dispositivo de aplicación biomédica

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de visión artificial para la captura y procesamiento de las imágenes de las líneas de flujo en el fluido laminar, para el estudio del comportamiento fluídico de distintos impulsores del *VAD* desarrollados por *SIBILA*, durante el primer semestre del 2021.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Identificar variables y parámetros de interés del sistema de visión a implementar de acuerdo con los requerimientos para el diseño del sistema para la captura de las imágenes.
2. Establecer los algoritmos de visión computacional para la segmentación de las líneas de flujo de las imágenes tomadas.
3. Comparar distintos modelos de impulsor del *VAD* para el análisis de las líneas de flujos entre cada resultado.
4. Validar el diseño propuesto del sistema de visión artificial mediante una evaluación visual por parte del desarrollador y del cliente para confirmar una adecuada y repetible segmentación de las líneas de flujo.

1.6 Estructura del Informe

El presente documento se divide en 6 capítulos principales, los cuales corresponde con la Introducción, el Marco Teórico, el Marco Metodológico, la Propuesta de Diseño, los Resultados y su Análisis y las Conclusiones y Recomendaciones. Además de estos capítulos, se cuenta con formalidades, secciones de organización como los índices,

resumen y referencias, anexos y apéndices al final del documento.

El capítulo de Introducción define el problema con el que se trató, poniendo el contexto a nivel de entorno, antecedentes, justificación y objetivos, tanto el general como los específicos. El siguiente capítulo muestra definiciones y teoría de los temas de interés y relación con el proyecto, tanto para el contexto del proyecto como para la solución propuesta. La sección del Marco Metodológico define la teoría de las metodologías empleadas en el desarrollo del proyecto y su relación con los objetivos planteados. El capítulo de Propuesta de Diseño muestra el proceso de desarrollo de la solución planteada al problema definido durante el desarrollo del proyecto. El capítulo de Resultados y Análisis abarca todos los resultados obtenidos del diseño final propuesto y la interpretación de estos. Adicionalmente, este capítulo compara los resultados obtenidos con los objetivos planteados al comienzo del proyecto. Por último, el sexto capítulo explica las conclusiones obtenidas a raíz del desarrollo y resultados del proyecto. Por otra parte, también se plantean recomendaciones para trabajos futuros en relación con lo desempeñado en este proyecto.

Con este proyecto, se desarrolla una herramienta computacional y física para facilitar a los investigadores del SIBILA el estudio de sus distintos modelos de impulsores. El sistema permite observar algunas de las líneas de flujo del flujo producido por el impulsor y procesar digitalmente las imágenes para resaltar estas líneas. Finalmente, el proyecto presenta gran valor a futuras investigaciones y desarrollos, pues en este se detallan las pruebas y resultados de distintas iteraciones, tanto a nivel de programación de software, como selección de elementos, como es el caso del trazador.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

El presente capítulo detalla la principal teoría necesaria para el desarrollo del proyecto. Entre esta se destacan 4 principales secciones, las cuales corresponden con los Dispositivos de Asistencia Ventricular, la dinámica de fluidos, los sistemas de visión artificial y el procesamiento de imágenes y temas relacionados con estos campos del conocimiento. Los conceptos definidos en este capítulo son necesarios tanto para el entendimiento de la naturaleza del proyecto y su entorno, como para el desarrollo de la solución.

2.1 Dispositivo de Asistencia Ventricular

Una de las partes más importantes del cuerpo humano es el sistema cardiovascular, el cual está compuesto por el corazón y los vasos sanguíneos; una red de venas, arterias y capilares que suministran oxígeno desde los pulmones a los tejidos de todo el cuerpo por medio de la sangre [15]. En el sistema cardiovascular, el corazón es el motor, o bomba, que permite el desplazamiento de la sangre hacia los vasos sanguíneos y todo el cuerpo mediante pulsaciones, o contracciones de sus paredes que están hechas de músculo [15].

En el cuerpo humano, el corazón trabaja de manera similar a una bomba mecánica, la cual desplaza o circula un fluido de un lugar a otro, donde el tipo de bomba más común es la bomba centrífuga [16] [17]. El movimiento del fluido por una bomba es permitido gracias al movimiento giratorio de un impulsor que bombea el fluido [18]. El tipo de bomba se define según su tipo de impulsor, entre los cuales se encuentran: impulsor de caudal radial, impulsor de caudal semi-axial, impulsor de canal, impulsor vortex e impulsor de caudal axial [18].

La gran importancia del sistema cardiovascular se puede observar en como en el 2016, el 31% de las muertes a nivel global fueron causadas por enfermedades cardiovasculares [19] [20]. La fatalidad de las enfermedades cardiovasculares radica en como la mayoría de estas acaban en una insuficiencia cardiaca, como son la cardiopatía isquémica, la enfermedad del músculo del corazón como son las miocardiopatías, las valvulopatías, las arritmias, por aumento de demanda como anemia, las infecciones generalizadas, las enfermedades de tiroides, el aumento de la presión arterial, entre otras [21]. La insuficiencia cardiaca se define como un padecimiento en el que existe un desequilibrio entre la capacidad del corazón para bombear sangre y las necesidades del organismo, es decir, no se bombea suficiente sangre para que el cuerpo trabaje con normalidad [21].

Cuando un paciente padece de insuficiencia cardiaca, este se debe someter a algún tipo de tratamiento, pues esta condición puede ser fatal. El tratamiento por excelencia para pacientes con insuficiencia cardiaca en etapa avanzada es el trasplante de corazón [22] [3]. El incremento de casos de insuficiencia cardiaca, en conjunto con el limitado número de donaciones de corazón, lleva a la necesidad de tratamientos distintos al trasplante de corazón, como es el implante de un dispositivo de asistencia ventricular, *VAD* por sus siglas en inglés (*Ventricular assist device*) [19] [22] [3]. Según un estudio desarrollado por [22], el implante de un *VAD* incrementa la tasa de supervivencia del paciente en 11 años en promedio y 13 años si este sobrevive por el primer año. No obstante, si bien el implante de *VAD* muestra resultados positivos, antes de considerar

un implante de este o incluso un trasplante de corazón, la insuficiencia cardiaca se suele tratar de forma farmacológica, hasta el punto en que la condición del paciente no se pueda mantener [3]. Otros tratamientos para la insuficiencia cardiaca son la resincronización cardiaca, el desfibrilador automático implantable, la cirugía y la terapia celular [3].

Cuando un paciente con insuficiencia cardiaca avanzada no responde a tratamientos farmacológicos y no farmacológicos convencionales, se considera el implante de un *VAD* como terapia alternativa [23]. El *VAD* se suele utilizar como tratamiento transitorio para personas en espera de un trasplante cardiaco por insuficiencia cardiaca, sin embargo, en algunos casos, los pacientes lo han optado como una solución a largo plazo y sustituto del trasplante [23] [24]. Un *VAD* es un dispositivo mecánico con una bomba que presenta soporte circulatorio a un paciente con insuficiencia cardiaca en etapa avanzada, restaurando la circulación, preservando el funcionamiento de los órganos, mejora el estatus funcional y calidad de vida, y extiende la probabilidad de supervivencia de los pacientes [25].

Algunos modelos comerciales de *VAD* son el *EvaHeart*, el *DuraHeart* y el *HeartMate 3*. El *EvaHeart* trabaja por medio de una bomba centrífuga, con un impulsor centrífugo [26]. El *DuraHeart* es el primer diseño de un *VAD* de bomba centrífuga implantable con un impulsor magnéticamente levitado [27]. Finalmente, el *HeartMate 3*, el cual se observa en las Figuras 2.1 y 2.2, trabaja con una bomba centrífuga y al igual que el *DuraHeart*, posee un rotor completamente levitado, el cual además tiene la capacidad de centrarse automáticamente ante perturbaciones [28]. Si bien todos los modelos mencionados utilizan un impulsor centrífugo, también podría emplear impulsores de otros estilos como los ya mencionados, axial, de canal, radial u otro.



Figura 2.1: Imagen del LVAD Heartmate 3. (Recuperado de: [28]).



Figura 2.2: Vista de corte del LVAD Heartmate 3. (Recuperado de: [28]).

2.2 Mecánica de Fluidos

La mecánica de fluidos corresponde con la rama de la física encargada del estudio del comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento, y la interacción de éstos con sólidos u otros fluidos en sus fronteras [29] [30]. Al estudio de los fluidos en reposo se le conoce como fluidoestática, estática de fluidos o hidrostática, mientras que cuando se encuentran en movimiento se le denomina fluidodinámica, dinámica de fluidos o hidrodinámica [29] [30]. La mecánica de fluidos se puede considerar solamente como dinámica de fluidos, tomando la estática de fluidos como un caso especial de la hidrodinámica donde la velocidad es igual a cero [30]. Un fluido es cualquier sustancia con la capacidad de fluir, es decir, que este se deforma de manera continua bajo la influencia de un esfuerzo cortante, sin importar lo pequeña que sea su magnitud [29] [31]. El término de fluido es aplicable tanto para líquidos como gases [31] [30], donde los primeros se consideran prácticamente incompresibles como el agua o algunos gases a bajas velocidades [29].

Antes de comprender el comportamiento de los fluidos es necesario conocer las principales propiedades de los fluidos y sus efectos en el contexto de la hidrodinámica. La primera característica a considerar es la densidad, la cual se define para cualquier materia como su masa por unidad de volumen [29] [30] [31]. La densidad de un material puede variar dependiendo de factores ambientales como la presión y la temperatura [31]. En algunos casos es conveniente describir la densidad de un material en relación a otro material, para lo cual se suele utilizar el término de densidad relativa, o gravedad específica, el cual se define como la razón entre la densidad de un material y la de otro material estándar de referencia, usualmente el agua a 4°C (1000 kg/m^3) para los líquidos y el aire para los gases [29] [30] [31]. Otra variación para el término de la densidad de un material es el peso específico, el cual se define como el peso de un material por unidad de volumen, es decir, igual a la multiplicación de la densidad y el valor de la aceleración de la gravedad [30]. La relación de densidad entre un fluido y otro material determina si este se sumerge, flota o se suspende, si la densidad del material es mayor, menor o igual a la del fluido respectivamente [31].

Otra propiedad básica de los fluidos que puede considerarse como una de las más importantes para el estudio de la fluidodinámica es la viscosidad de un fluido y de forma consecuente, el coeficiente de viscosidad. Existen distintas redacciones para la definición de la viscosidad variando de autor en autor. [29] define la viscosidad de un fluido como una resistencia interna cuantificada que ocurre cuando dos capas de fluidos se mueven una en relación con la otra, desarrollando una fuerza de fricción entre ellas. Por otra parte, [30] define la viscosidad como una medida cuantitativa de la resistencia de un fluido a fluir, lo cual implica que la viscosidad determina la velocidad de deformación del fluido cuando se le aplica un esfuerzo cortante. Adicionalmente, [31] define la viscosidad como las fricciones internas de un fluido, las cuales se oponen al movimiento de una porción de un fluido en relación con otra. Al igual que la densidad, la viscosidad también varía con la temperatura del fluido, de manera que al incrementar

su temperatura, la viscosidad aumenta si se trata de un gas y disminuye si se trata de un líquido [30] [31].

No todos los flujos de un mismo fluido se comportan de la misma forma, ya que existen distintos tipos de flujos definidos según el patrón con el que el fluido se desplaza. Un flujo que se desplaza de forma ordenada y en capas no alternadas, las cuales se deslizan suavemente una sobre otra se define como laminar [29] [31], como se observa en la Figura 2.3. Del mismo modo, se considera un flujo estable aquel cuyo patrón de flujo no cambia con el tiempo, lo cual también es un requisito para que un flujo sea laminar [31]. Opuesto al flujo laminar se encuentra el flujo turbulento el cual presenta un comportamiento irregular, caótico, desordenado, complejo, aleatorio e inestable, con variaciones en la velocidad [29] [31], como se muestra en la Figura 2.4. Un flujo puede pasar de laminar a turbulento si su rapidez excede cierto valor crítico [31]. Por otra parte, a un flujo que alterna entre un comportamiento laminar y turbulento se le denomina flujo de transición [29], donde un ejemplo de su representación se muestra en la Figura 2.5.

El régimen de un flujo se puede determinar matemáticamente con el número adimensional de Reynolds [30], considerando que si el número de Reynolds es bajo, el flujo es laminar y si es alto, es turbulento. Cuantitativamente, se considera que un flujo en una tubería circular es laminar si el número de Reynolds es inferior a 2300, es turbulento si el número de Reynolds es superior a 4000, y es transicional si se encuentra entre estos valores [29]. El número de Reynolds se define como la razón de las fuerzas inerciales a las fuerzas viscosas en el fluido [29]. Matemáticamente, se expresa en la Ecuación 2.1. En esta expresión Re corresponde al número de Reynolds, V_{prom} es la velocidad promedio del flujo (m/s), D es la longitud característica de la geometría del área transversal del flujo, la cual corresponde al diámetro para una tubería circular a presión (m), ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), ν es la viscosidad, o viscosidad cinemática del fluido (m^2/s) y μ es el coeficiente de viscosidad, viscosidad dinámica, o viscosidad absoluta y

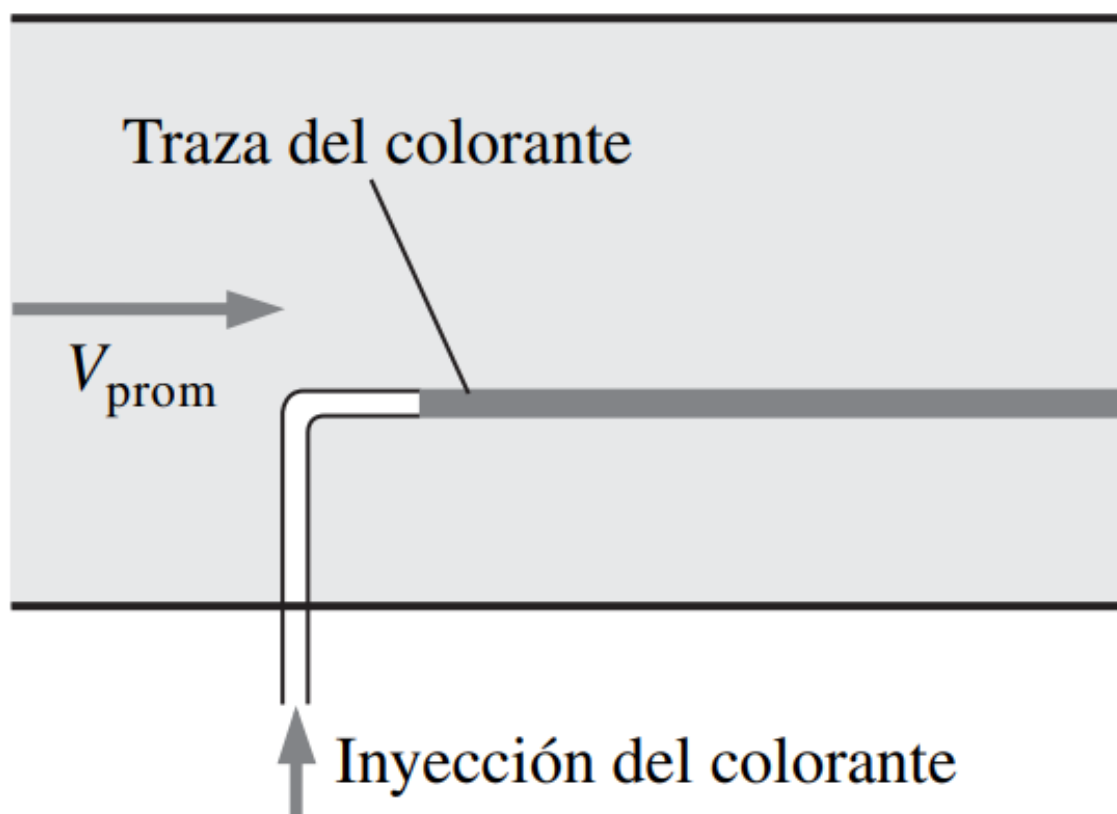


Figura 2.3: Visualización de un flujo laminar por medio de inyección de tinta. (Recuperado de: [29]).

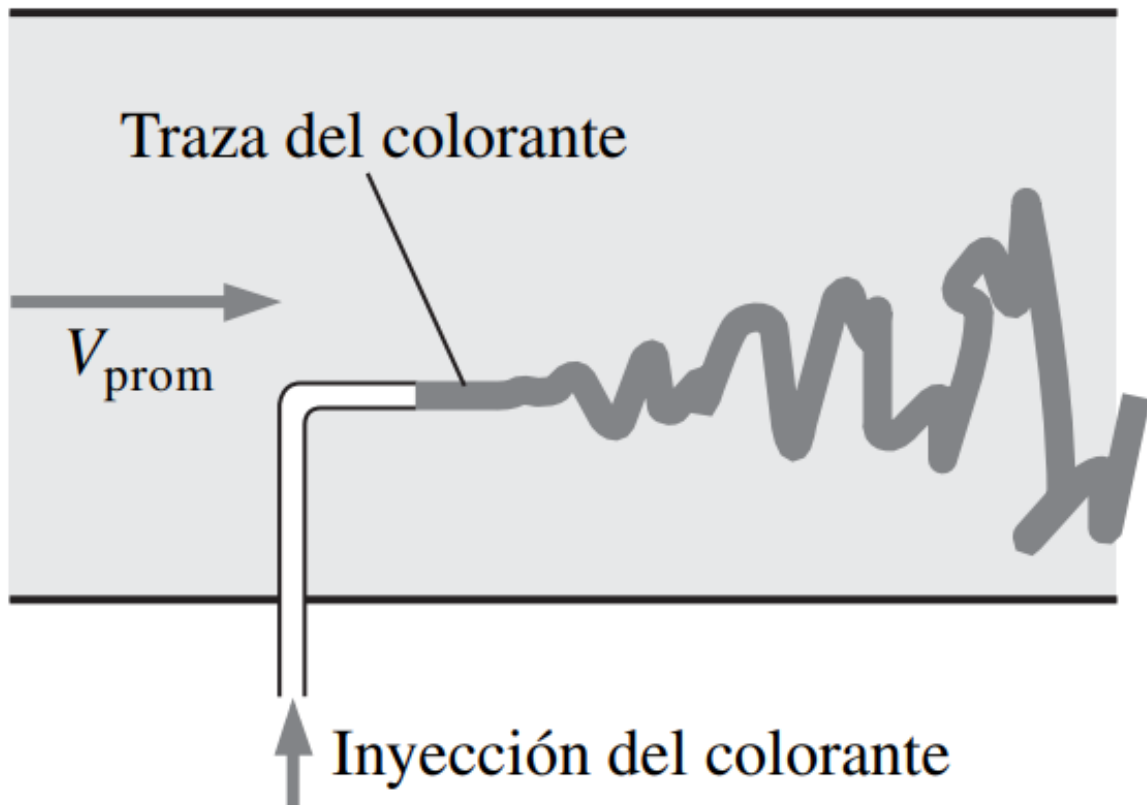


Figura 2.4: Visualización de un flujo turbulento por medio de inyección de tinta. (Recuperado de: [29]).

se relaciona a la viscosidad cinemática según la Ecuación 2.2.

$$Re = \frac{V_{prom} * D}{\nu} = \frac{\rho * V_{prom} * D}{\mu} \quad [29][30] \quad (2.1)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [29][30] \quad (2.2)$$

Existen cuatro formas básicas que describen un flujo, las cuales corresponden con: las líneas de corriente, las sendas, las líneas fluidas y las líneas de traza [30]. Una línea de corriente es una curva que en un instante dado, es tangente al vector de velocidad local [29] [30]. Una senda, o línea de flujo, es el camino o trayectoria seguida por una única partícula en un fluido en movimiento [30] [31]. Una línea fluida, o línea de tiempo, es un conjunto de partículas fluidas adyacentes que en un instante dado forman una línea [29] [30]. Por último, una línea de traza es el lugar geométrico de las partículas que en instantes sucesivos pasaron por un mismo punto en específico [29] [30]. En un flujo estable, el patrón global de flujo no cambia con el tiempo por lo que las líneas de flujo se mantienen constantes y estas son iguales a las líneas de corriente [31]. Para el caso de que el flujo sea estacionario, las líneas de corriente, las sendas y las líneas de traza son iguales [29] [30].

Un flujo puede visualizarse de diversas maneras, lo cual es una forma de conocer el aspecto de un flujo de forma cualitativa y cuantitativa al observar fotografías o diversas representaciones gráficas de este [30]. Las representaciones visuales de un fluido permiten observar de manera resaltada las características ya mencionadas como las líneas de flujo, sendas, régimen del flujo, entre otros. Algunos métodos empleados para facilitar estas visualizaciones son: inyección de humo, tinta o burbujas, adición de virutas o polvo sobre una superficie libre del fluido, partículas trazadoras con flotabilidad neutra, el método de las sombras de *Schlieren*, hilos sujetos a una superficie que limita el flujo, sustancias luminiscentes o bioluminiscentes, la *Velocimetría de Imagen de Partícula*

(*Particle Image Velocimetry*) (*PIV*) [30].

Como ya se mencionó previamente, la dinámica de fluidos, o cinemática de fluidos, es el estudio que explica cómo fluyen los fluidos y cómo describir su movimiento [29] para lo cual existen dos principales enfoques para la descripción de los fluidos. El primero de estos es la descripción Lagrangiana de fluidos, la cual busca seguir el rastro del vector de posición y del vector de velocidad como funciones del tiempo para cada partícula mediante el uso de las leyes de Newton [29]. Por otra parte, se tiene el segundo enfoque de descripción Euleriana del movimiento de fluidos, el cual se basa en la descripción del flujo de fluidos definiendo un volumen finito, llamado dominio del flujo, o volumen de control, a través del cual un fluido fluye hacia dentro y hacia fuera [29]. En contraste con la descripción Lagrangiana, no se sigue el rastro de la posición y la velocidad, sino que se utilizan variables de campo, el tiempo y funciones del espacio para describir el movimiento del volumen de control [29].

Para la descripción del movimiento de un fluido se utilizan distintas ecuaciones que basadas en principios y leyes de la Física, permiten analizar distintos problemas físicos e ingenieriles. En un sistema cerrado, la masa del sistema permanece constante y consecuentemente, la razón de cambio de la masa del sistema es igual a cero, de lo cual se extrae la Ecuación 2.3, donde \dot{m}_{ent} y \dot{m}_{sal} son las razones totales de flujo de masa hacia dentro y hacia fuera del volumen de control respectivamente y $\frac{dm_{vc}}{dt}$ es la razón de cambio de la masa dentro de las fronteras de este volumen [29]. Como al producto de la masa y la velocidad de un cuerpo se le llama momento lineal, o cantidad de movimiento del cuerpo y como la aceleración de un cuerpo es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre ese cuerpo según la segunda ley de Newton, se tiene que cuando la fuerza neta sobre un fluido es igual a cero y se cumple el principio de conservación de la masa, la cantidad de movimiento del sistema permanece constante [29].

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sal} = \frac{dm_{vc}}{dt} [29] \quad (2.3)$$

A diferencia de la masa en un sistema cerrado, la energía de este sí puede cambiar por lo que se define que la energía neta transferida, o extraída a un sistema durante un proceso, es igual al cambio en el contenido de energía del sistema, lo cual se representa en la Ecuación 2.4, donde \dot{E}_{ent} y \dot{E}_{sal} son las razones de transferencia de energía hacia dentro y hacia fuera del volumen de control y $\frac{dE_{vc}}{dt}$ es la razón de la energía del volumen de control [29]. Adicionalmente, otra ecuación utilizada para describir el comportamiento de un fluido es la ecuación de Bernoulli, la cual es una relación aproximada entre la presión, la velocidad y la elevación, la cual se mantiene constante, por lo que para dos puntos cualesquiera sobre una misma línea de corriente para un flujo estacionario e incompresible se tiene que la ecuación de Bernoulli se define como se observa en la Ecuación 2.5, donde P es la presión, V es la rapidez y z es la altura en el fluido [29]. Esta ecuación es válida en regiones de flujo estacionario e incompresible en donde las fuerzas netas de fricción son despreciables.

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \frac{dE_{vc}}{dt} [29] \quad (2.4)$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 [29] \quad (2.5)$$

Para una descripción más detallada y específica de los fluidos también se aplica un análisis diferencial, con el cual se obtienen ecuaciones diferenciales a partir de principio de conservación de la masa y la segunda ley de Newton [29] [30]. Del principio de conservación de la masa se deduce la Ecuación 2.6, también conocida como ecuación de continuidad, donde $\vec{\nabla}$ corresponde con el vector gradiente y esta ecuación es válida inclusive para un flujo compresible [29]. La otra ecuación diferencial utilizada para describir el movimiento de los fluidos es la ecuación de Navier-Stokes, la cual es la base de la mecánica de fluidos y se escribe de forma vectorial como se presenta en la Ecuación 2.7. La ecuación de Navier-Stokes presentada es válida para fluidos aprox-

inadadamente isotérmicos, incompresible y newtonianos, es decir, fluidos para los que el esfuerzo cortante es linealmente proporcional a la razón de deformación por corte [29]. Estas ecuaciones diferenciales permiten resolver los detalles del flujo en todas partes en el dominio del flujo, sin embargo, no es una labor sencilla, pues la ecuación de Navier-Stokes es una ecuación diferencial parcial vectorial, de segundo orden, no-lineal e inestable [29].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) = 0 \quad [29] \quad (2.6)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad [29] \quad (2.7)$$

2.3 Visión Artificial

El primer paso para entender el concepto de visión artificial, es delimitar su definición y partes que lo definen. La Visión Artificial se define en [32] como un sistema en el que se emplea un computador para extraer información del mundo físico a partir de imágenes estáticas, escenas tridimensionales o imágenes en movimiento. De forma similar, en [33], se define que los sistemas de visión artificial son sistemas encargados de procesar imágenes e interpretar los contenidos encontrados, donde sus principales y más comunes etapas se muestran en Figura 2.6. La visión artificial, también conocida como visión computacional o visión por computadora, se utiliza en aplicaciones como: reconocimiento óptico de caracteres, inspección de maquinaria, control de calidad, construcción de modelos 3D a partir de vistas aéreas, en imágenes médicas, construcción de imágenes generadas por computadora a partir vídeo de cuerpos en movimiento, industria agrícola, monitoreo, reconocimiento de huellas dactilares, robótica, entre otros [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40].

Como se mencionó previamente, la visión artificial implica un sistema, el cual está

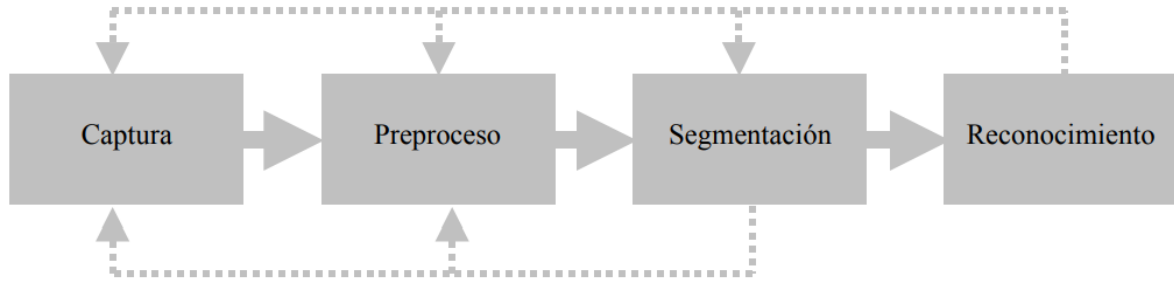


Figura 2.6: Diagrama de bloques de las etapas típicas de un sistema de visión artificial. (Recuperado de: [32]).

compuesto por distintas partes, entre las cuales ya se mencionó el computador en la definición obtenida de [32], sin embargo, esta se refiere exclusivamente para el procesamiento y no se menciona nada sobre la captura de dichas imágenes. Por lo tanto, se define que un sistema de visión artificial posee una fuente de iluminación, un dispositivo para la captura de imágenes (comúnmente una cámara digital) y un dispositivo para el procesamiento de las imágenes y control del sistema [32], [41]. Antes de poder ahondar en cada una de las partes del sistema, es necesario comprender las propiedades físicas en las que se basa la captura de las imágenes, comenzando por la luz, conociendo su definición, comportamiento y propiedades de interés para los sistemas de visión artificial.

A partir del 1930 se determinó un comportamiento dual de partícula y onda de la luz con el desarrollo de la electrodinámica cuántica [42]. Para el punto de vista de la captura y procesado de imágenes, la luz se comporta como una onda electromagnética, descrita totalmente por su amplitud y longitud de onda [32]. De las 2 características que describen la onda de luz, la amplitud es responsable por el brillo, o intensidad, mientras que la longitud de onda es responsable por el color del haz de luz [32]. Los colores que distingue el ojo humano son los ubicados dentro del espectro electromagnético visible, el cual corresponde al rango de longitudes de onda de los 400 a los 700 nanómetros [32] [43], como se observa en Figura 2.7.

El comportamiento de la luz y otras ondas electromagnéticas lo estudia la rama de

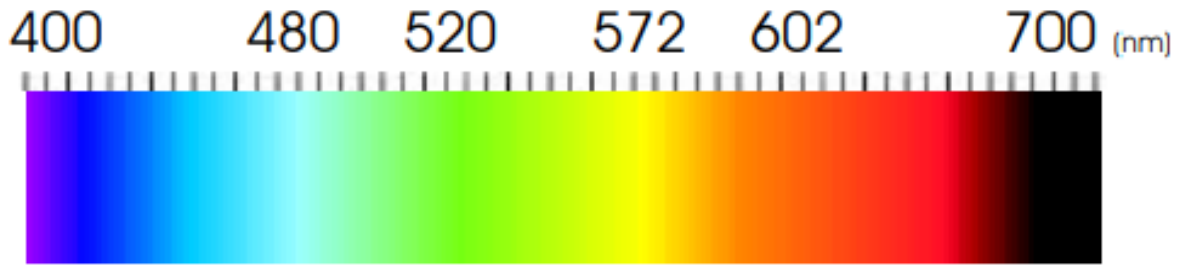


Figura 2.7: Espectro visible de luz con respecto a la longitud de onda. (Recuperado de: [32]).

la física conocida como óptica [42]. Entre algunos de los conceptos básicos definidos por la óptica, se destacan la reflexión y la refracción, las cuales ocurren en alguna u otra medida siempre que la luz incide sobre alguna superficie. De esta forma, cuando un rayo de luz incide en una interfaz lisa, una parte de la luz se ve reflejada con un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia y la otra parte se refracta y viaja dentro del medio de dicha superficie [42]. El ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión se miden como el ángulo entre una recta imaginaria perpendicular, o normal, a la superficie en la que incide la luz y el respectivo rayo de luz [42]. En la Figura 2.8 se observa la forma en que un haz de luz incidente sobre una superficie se refleja y refracta al interactuar con otro medio. La óptica también define las lentes, las cuales son sistemas ópticos conformados por un par de superficies refractivas planas o esféricas que permiten la formación de imágenes [42]. Las lentes son popularmente utilizadas para la formación de imágenes proyectadas en dispositivos como microscopios, telescopios, binoculares, cámaras fotográficas y demás [42].

Los dispositivos ópticos como las cámaras emplean una variación de lente conocida como lente delgada, la cual es una lente de grosor despreciable y perfectamente biconvexa, es decir, ambas caras mayores poseen una superficie curvada hacia afuera, que permite proyectar la luz de una escena hacia una superficie, generando una imagen de manera nítida pero invertida, de cabeza, donde dicha superficie se conoce como el plano de formación de la imagen [32], como se observa en Figura 2.9. Una lente biconvexa

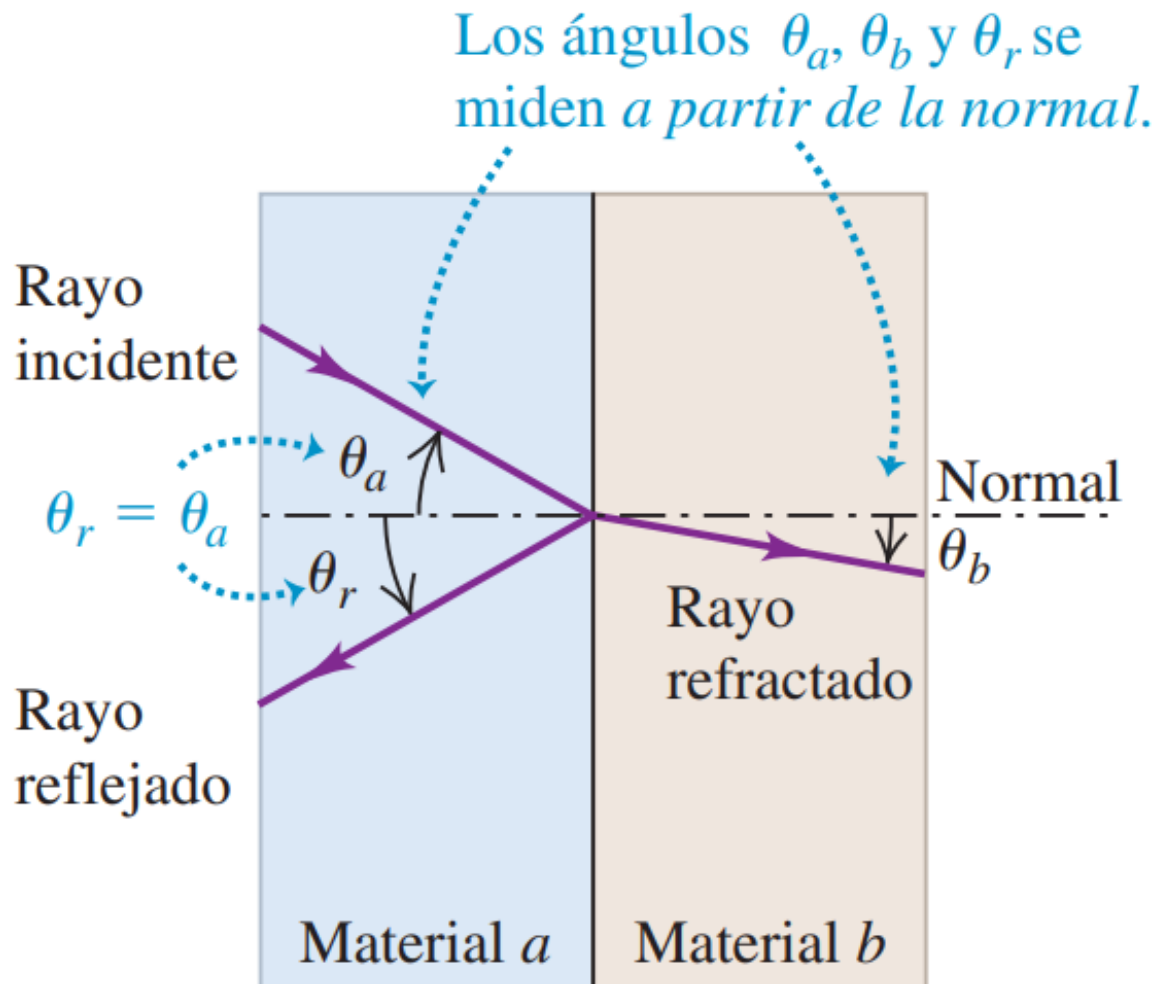


Figura 2.8: Reflexión y refracción de la luz. (Recuperado de: [42]).

de grosor despreciable posee 2 ejes de simetría, uno axial y otro óptico que viaja de una cara a otra atravesando el centro de ambas caras [32]. Cuando la luz incide en una lente se genera un punto de interés, el cual se denomina foco y este es el punto donde se intersecan todos los rayos de luz paralelos que inciden en la lente de manera perpendicular al eje axial y cuya distancia de este punto al eje axial se denomina distancia focal [32]. La distancia focal es de gran relevancia para determinar el tamaño de la imagen en el plano de formación de la imagen y la distancia necesaria entre el lente y esta superficie [34] [32]. La forma en que interactúan la luz con respecto a los focos de una lente delgada biconvexa se muestran en Figura 2.10.

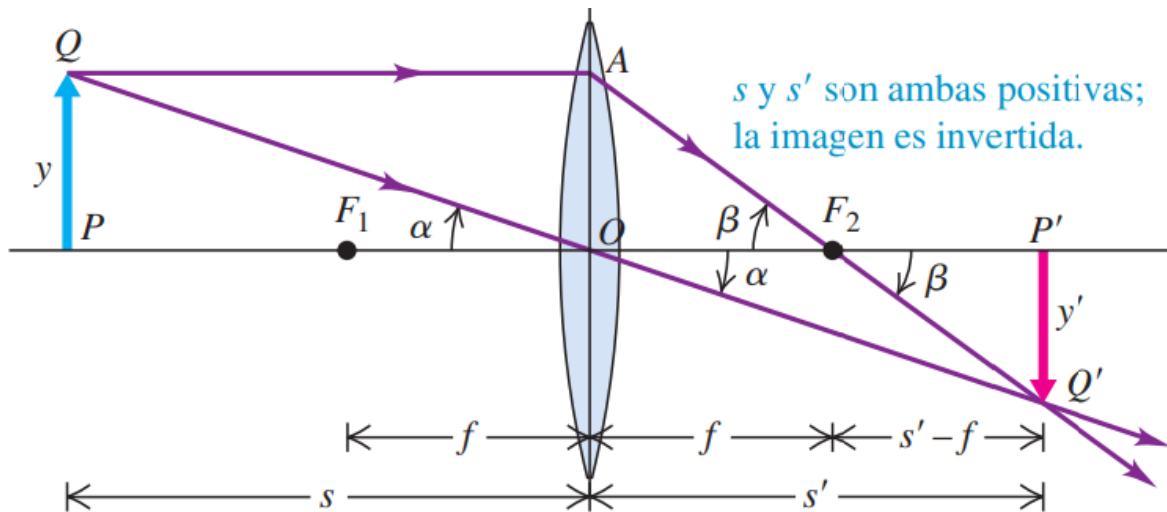


Figura 2.9: Relación de la luz incidente con el plano de formación de la imagen de una lente biconvexo. (Recuperado de: [42]).

Como se mencionó previamente, la cámara es uno de los principales elementos que componen un sistema de visión artificial. Una cámara digital es un dispositivo que captura imágenes del mundo real y las digitaliza a valores discretos [32]. Una cámara fotográfica está compuesta por una caja hermética a la luz, una lente biconvexa, un obturador para abrir la lente y permitir el paso de la luz por un tiempo definido y algún medio de registro sensible a la luz [34] [42]. En una cámara digital, el medio de registro corresponde a un sensor, el cual en cámaras digitales de fotos y vídeos pertenece principalmente a uno de dos tipos de sensores para la digitalización y captura

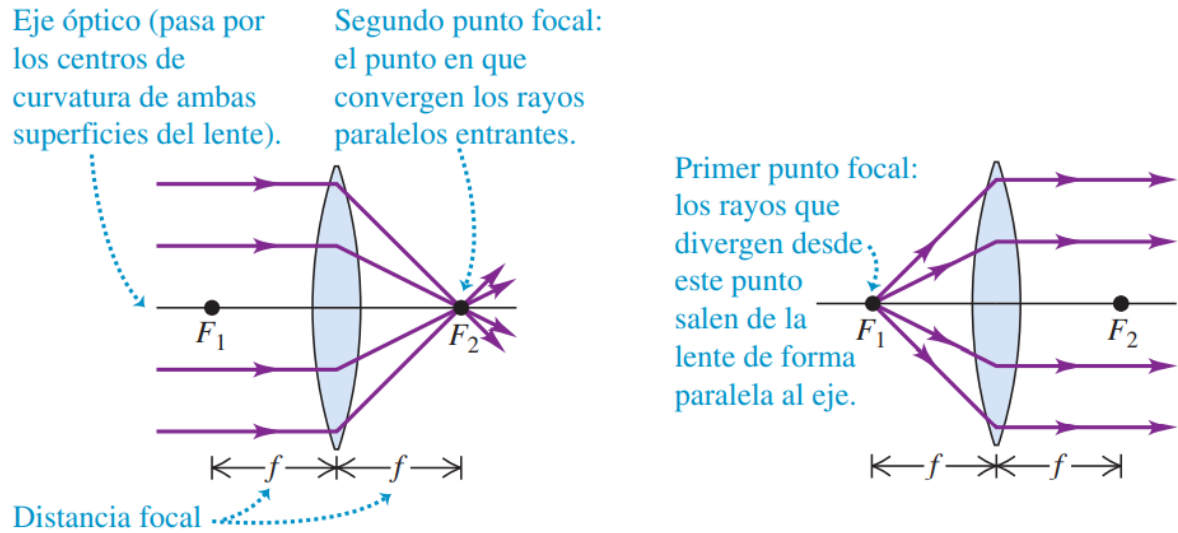


Figura 2.10: Relación de la luz incidente con los focos de una lente biconvexo. (Recuperado de: [42]).

de las imágenes y estos son el *Dispositivo de Carga Acoplada (Charge-Coupled Device) (CCD)*, y el *Óxido de Metal Complementario en Silicón (Complementary Metal Oxide on Silicon) (CMOS)* [34]. Un sensor *CCD* está compuesto por una matriz de elementos fotosensibles que convierten la cantidad de intensidad de luz que reciben en una señal eléctrica proporcional y la cantidad de estos elementos y el área que ocupan definen la resolución espacial del dispositivo y la resolución de la imagen que se forma [32]. La resolución espacial de una imagen corresponde con el número de píxeles por pulgadas, medidas sobre el objeto original, o inversamente, la distancia sobre el objeto original entre dos píxeles adyacentes [32].

El término previamente mencionado píxel o píxeles son los elementos base de los cuales están compuestas las imágenes digitales y estos elementos individuales representan información de una región de la imagen [32]. Para el caso de las imágenes en escalas de grises, esta información corresponde exclusivamente al brillo o intensidad de luz que recibe cada píxel [32]. Para el caso de las imágenes a color se utilizan múltiples canales a diferencia de las imágenes en escala de grises que sólo emplea uno, sin embargo, las imágenes a color no se emplearon en el desarrollo de este proyecto por lo que estos con-

ceptos se omiten. Por su propia parte, el valor que puede adquirir un píxel depende de la resolución del *Convertidor Analógico a Digital (Analogic Digital Converter) (ADC)* de la cámara, el cual posee un número finito de bits, lo cual limita la cantidad de valores que puede adquirir un píxel, es decir, la diferencia que hay entre un valor y otro adyacente [34].

El proceso para la captura de una imagen no termina una vez que la luz alcanza un sensor y este genera sus valores de tensión eléctrica, estos luego se convierten en valores digitales para generar la información cruda de la imagen, con la cual, luego se puede obtener una imagen en un formato para observar en una pantalla digital. Los pasos para construir una imagen digital son los siguientes: primero, la luz reflejada de superficies entra en las lentes de la cámara y una apertura permite pasar la luz hacia el sensor, luego, los elementos fotosensibles del sensor producen valores de tensión eléctrica proporcionales al nivel de iluminación que recibieron. Seguidamente, se realiza una amplificación de cada uno de estos valores y se realiza una discretización por medio de un *ADC*, generando una matriz con los datos de cada píxel con su respectiva posición en la matriz igual a su posición en el sensor. Finalmente, esta matriz se puede convertir a un formato de imagen para ser mostrado en pantalla [34]. Algunos de los formatos en los que se muestran las imágenes corresponden a extensiones tipo: TIFF, GIF, BMP, JPG, JPEG, PNG, PGM, JFIF, entre otros [32].

Ya describimos la forma en que se comporta la luz al incidir en una superficie y en cómo esta se puede utilizar para producir imágenes digitales, por lo que ahora se continuará describiendo las fuentes de iluminación, las cuales son parte de los sistemas de visión artificial, como se mencionó previamente. Todo material es capaz de emitir suficiente luz visible para ser luminosa si este alcanza una temperatura lo suficientemente elevada [42], como son los casos de los bombillos incandescentes, las fogatas, la lava, las bobinas de los calentadores domésticos, las resistencias de un horno, etc. Por otra parte, esta no es la única forma de que un material se considere como una fuente

luminosa, como es el caso de las descargas eléctricas a través de gases ionizados que también producen luz, por ejemplo en las luces de neón o las lámparas fluorescentes [42].

Una fuente de luz puede generar iluminación difusa o especular, donde la primera ilumina una superficie de forma pareja con sombras suaves, mientras que la segunda concentra la iluminación en una menor área por lo que se producen resaltes brillantes y sombras pronunciadas, lo cual puede ser útil para acentuar geometrías en el objeto iluminado [34]. Una fuente de luz muy utilizada en la actualidad en los dispositivos de iluminación para los sistemas de visión artificial son los LED, pues estos permiten una gran variedad de longitudes de onda con buena precisión, con bajo consumo energético y poco calentamiento [44]. Alternativamente, los sistemas de visión artificial también emplean la luz solar o luz de la habitación como fuente de iluminación del sistema [34]. Por otro lado, algunas de las fuentes de luz artificial específicamente utilizadas en sistemas de visión corresponden con: el anillo de luz, el anillo de luz difusa, la barra de luz, el campo oscuro, el campo oscuro de ángulo bajo, la luz difusa en eje (co-axial), el domo de luz, el domo de luz difusa, la luz integrada a la cámara de alto poder y la luz trasera [44].

Dependiendo de la funcionalidad, las fuentes de iluminación o cámaras se pueden emplear con filtros de distintos tipos que permiten cambiar las propiedades de la luz no permitiendo que algunas características pasen a través del filtro. Un tipo de estos filtros corresponde con los filtros de color, cuyo uso permite aclarar u oscurecer características en los objetos de la imagen, por ejemplo, una luz o filtro de un color aclara características de ese mismo color, y simultáneamente, oscurecen características del color complementario al de la luz o filtro [44]. Dos colores son complementarios entre sí si se encuentran en lados opuestos del círculo cromático, por ejemplo, son complementarios el rojo con el verde, el amarillo con el morado y el azul con el anaranjado [43]. Otro tipo de filtros son los polarizadores, los cuales se colocan frente al lente de la cámara

o frente a la fuente de luz y se utilizan para disminuir los reflejos de luz que producen manchas blancas en la imagen capturada [44].

En este punto ya se han descrito las características de cada uno de los elementos que conforman un sistema de visión, sin embargo, todavía se deben explicar las características que describen un sistema de visión artificial y a las imágenes que se capturan. Los principales conceptos que caracterizan un sistema de visión artificial se muestran a continuación:

- **Distancia de trabajo:** es la distancia del objeto que se captura hasta la distancia focal de la lente de la cámara [45].
- **Distancia focal:** es la principal característica que describe un lente y corresponde a la distancia entre el eje axial de la lente y un punto sobre el eje óptico en el que se intersecan todos los rayos de luz paralelos que inciden perpendicularmente en el eje axial [32].
- **Apertura del lente:** corresponde a una proporción de apertura de un diafragma que tapa la lente regulando la superficie de la lente expuesta a los rayos de luz y así limitando la cantidad de luz que entra. Esta variable es inversamente proporcional a la profundidad de campo y al tiempo de exposición necesaria [32].
- **Enfoque:** se refiere a la definición de la imagen y de los objetos que se encuentran a una distancia determinada de la cámara y se varía cambiando la distancia a la que se encuentra la lente del plano de formación de la imagen, es decir el sensor en una cámara digital [32].
- **Profundidad de campo:** es la variación permisible de profundidad en una escena que se captura, siendo función de la distancia focal y el diámetro de la apertura [34]. El *Campo de Visión (Field of View) (FoV)* es el área de la escena que captura la cámara a la distancia de trabajo, definida en alto y ancho y depende de la distancia focal de la lente y de la distancia de trabajo [34] [45].

- **Exposición:** es la energía luminosa total por unidad de área que llega a la película y depende de la apertura del lente y del tiempo que entra la luz por el lente hacia el sensor [42].
- **Tasa de captura (*Frame rate*):** corresponde a la cantidad de imágenes capturadas por segundo, o la cantidad de imágenes mostradas por segundo en un video [34], se suele denominar *Cuadros por Segundo (Frames per Second) (FPS)*.

Ya se ha explicado lo que es una imagen y cómo se obtiene, a continuación, se describen las principales características que las describen, de las cuales algunas se mencionaron previamente como la resolución de la imagen, brillo, la profundidad de color o resolución del *ADC*. Por último, se omiten el concepto de matiz puesto que este es solo de interés en imágenes a color. Una de estas características corresponde con el formato, el cual corresponde a la forma en que se almacena, envía e interpreta una imagen [32]. El tamaño de la imagen también es uno de los conceptos que caracteriza una imagen y este se refiere a los dos valores numéricos que indican la cantidad de filas y columnas de píxeles de una imagen [32]. Finalmente, el contraste se refiere a la diferencia de intensidad en una imagen, es decir, la diferencia entre el elemento más claro y el más oscuro en una imagen [32] [34].

2.4 Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV)

La *PIV* es un método de análisis hidrodinámico basado en técnicas ópticas de imagen para medir múltiples vectores de velocidad de un fluido en una resolución temporal y espacial específica [46]. De este se derivan algunos tipos más específicos como la *PIV* óptica, el cual emplea cámaras ópticas para obtener las imágenes y luego medir el campo de velocidad bidimensional instantáneo [47]. Por otra parte, el Echo-PIV utiliza ultrasonido para obtener imágenes de microburbujas inyectadas en el flujo [47]. Para poder observar el campo de velocidad en un fluido se necesitan resaltar ciertas

partículas, conocidas como trazadoras que siguen las dinámicas del flujo en el que se introducen [48]. Existen distintos tipos de trazadores que se pueden emplear, algunos ejemplos de estos son partículas fluorescentes [49], microburbujas [47], esferas huecas de cristal [47], entre otros. El movimiento de los trazadores se obtiene mediante imágenes consecutivas, las cuales se utilizan para calcular información de velocidad del flujo [48].

El principal uso de la velocimetría de imágenes de partículas es en el análisis dinámico de fluidos, en especial cuando se trata de flujos turbulentos [48] [50]. Las *PIV* también se pueden utilizar para visualizar fuerzas en un objeto, como es el caso en [51]. La *PIV* ha demostrado gradualmente ser una solución válida para la visualización del campo de flujo en bombas de sangre [52]. Específicamente, la *PIV* ecocardiográfica ha sido empleada para evaluar la vorticidad de flujo en el ventrículo izquierdo para el diagnóstico temprano de enfermedades del corazón [46] [47] [50].

Por otra parte, un sistema *Insight Ultra PIV* con una cámara de alta resolución fue empleada en [49] para el estudio en un corazón artificial. El sistema previamente mencionado es un modelo estándar que emplea cámaras ópticas para observar partículas fluorescentes, sin embargo, este no es el único sistema *PIV* estándar que existe, la marca *TSI* posee: sistemas *PIV* resuelto en el tiempo, sistemas *PIV* estéreo, sistemas *PIV* de medición 2D, sistemas micro *PIV* y sistemas *PIV* volumétricos [53]. De manera general, los sistemas *PIV* ópticos en 2D poseen una cámara, lente, láser polarizado para formar un plano y no una línea recta, un trazador, un sistema de procesamiento y un sistema de control [47]. Las partes previamente mencionadas se observan, junto con su configuración espacial para un caso en la Figura 2.11. De manera general, los sistemas *PIV* poseen ciertas limitaciones, entre las cuales se destacan: la enorme cantidad de datos que se generan, la necesidad de múltiples cámara para mediciones tridimensionales cuando el campo de flujo es muy complicado, una unidad de procesamiento suficiente, falta de resolución, precisión y confiabilidad en la estimación del campo de velocidad, en especial cuando se emplean múltiples cámaras, entre otros [48].

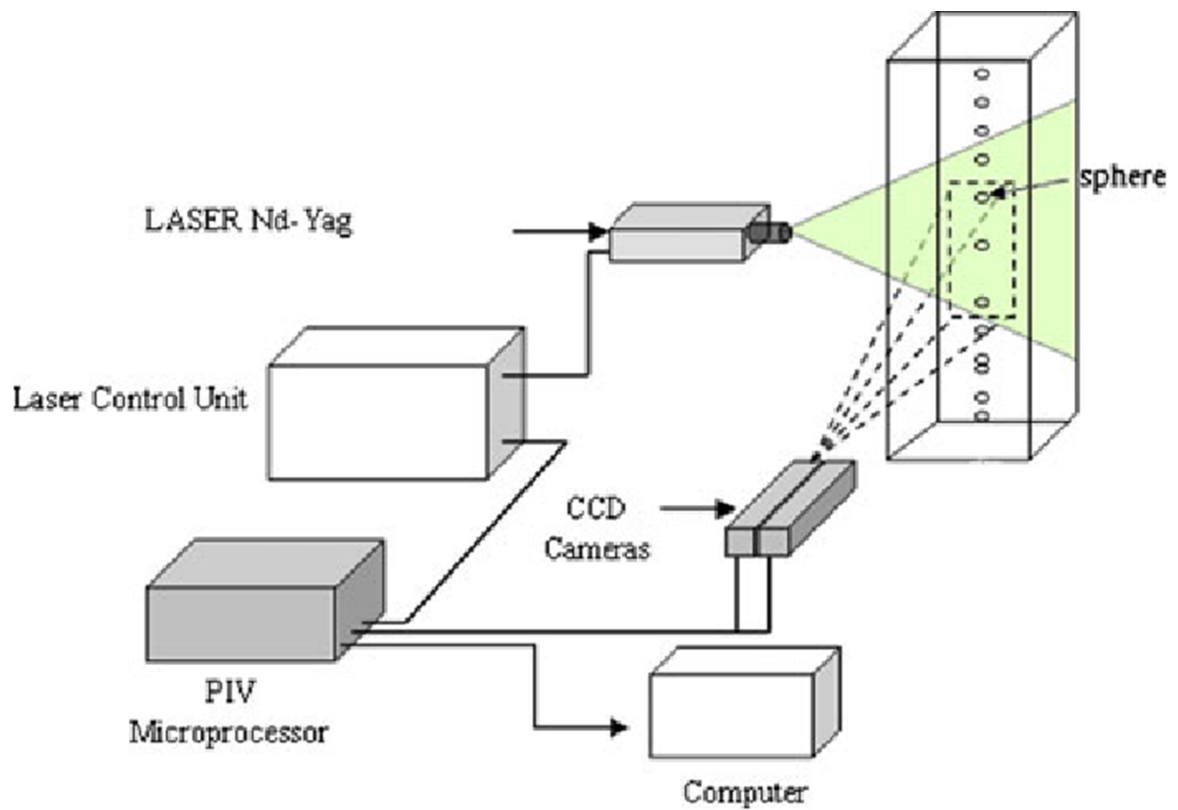


Figura 2.11: Esquema de partes y configuración de un sistema *PIV*. (Recuperado de: [54]).

Como se mencionó, la *PIV* es un método de análisis hidrodinámico, sin embargo, la aproximación del campo de velocidad de un flujo no siempre es necesario, en algunas ocasiones, basta con caracterizar el régimen del flujo o estudiarlo visualmente, para lo cual se utilizan equipos como el aparato de Hele-Shaw o el montaje experimental de Reynolds. El aparato de Hele-Shaw es un dispositivo cuyo propósito es visualizar flujos potenciales en dos dimensiones [55] [56] [57] [58]. El aparato de Hele-Shaw consiste de una zona de visualización conformada por dos planos separados una distancia mucho menor a su largo y ancho, un tanque de entrada, un tanque de salida, múltiples de entrada y salida, inyectores de tinta, depósito de tinta y bomba de tinta [55] [58] [59]. Un diseño comercial de un aparato de Hele-Shaw se observa en la Figura 2.12, con el que se destacan las líneas de flujo del fluido al desplazarse entre las dos placas. En [59] se desarrolla el diseño y construcción de un dispositivo para la visualización del flujo que circula alrededor de perfiles en 2D [59], del mismo modo que un aparato de Hele-Shaw.

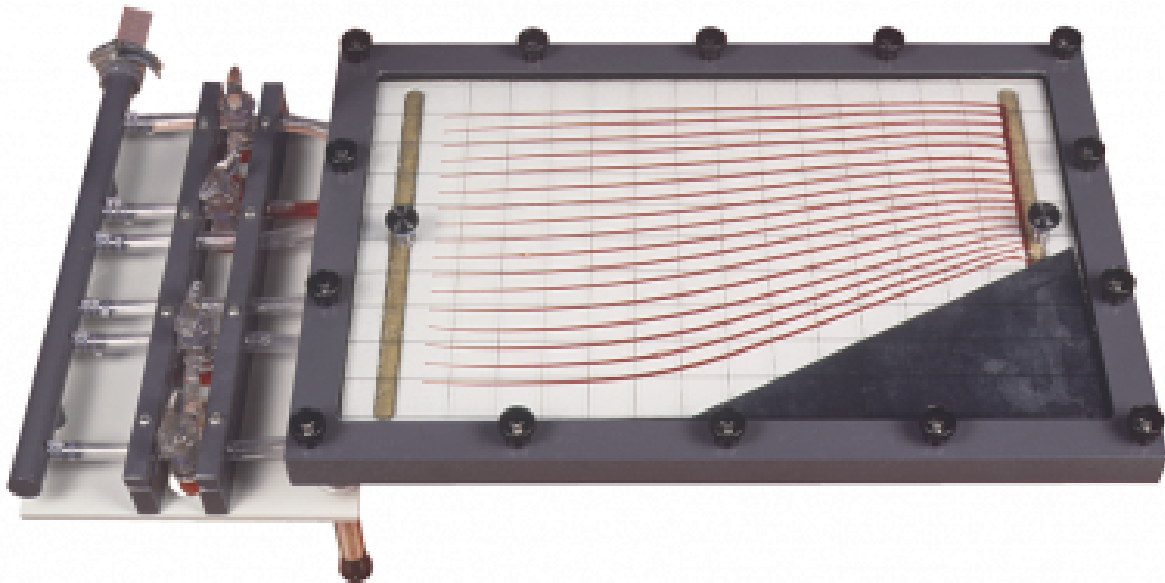


Figura 2.12: Imagen de un aparato de Hele-Shaw comercial. (Recuperado de: [56]).

Por otra parte, el montaje experimental de Reynolds también permite observar las líneas de flujo en un fluido mediante la adición de un trazador, sin embargo, a diferencia

del aparato de Hele-Shaw que observa el flujo en un plano, el montaje del experimental de Reynolds observa el flujo a través de un tubo transparente [55]. El experimento de Reynolds permite observar los distintos regímenes del flujo utilizando una tinta o colorante como trazador para destacar la trayectoria del flujo y emplea una válvula para variar el caudal del flujo y de esta forma, alterar el régimen [55] [59] [60] [61] como se observa en el diagrama de la Figura 2.13. Tanto en [60] y [61] se describe el desarrollo de una máquina para el desarrollo del experimento de Reynolds y se detallan las partes necesarias y utilizadas, junto con su configuración para el funcionamiento, tal y como se detalla en la Figura 2.14

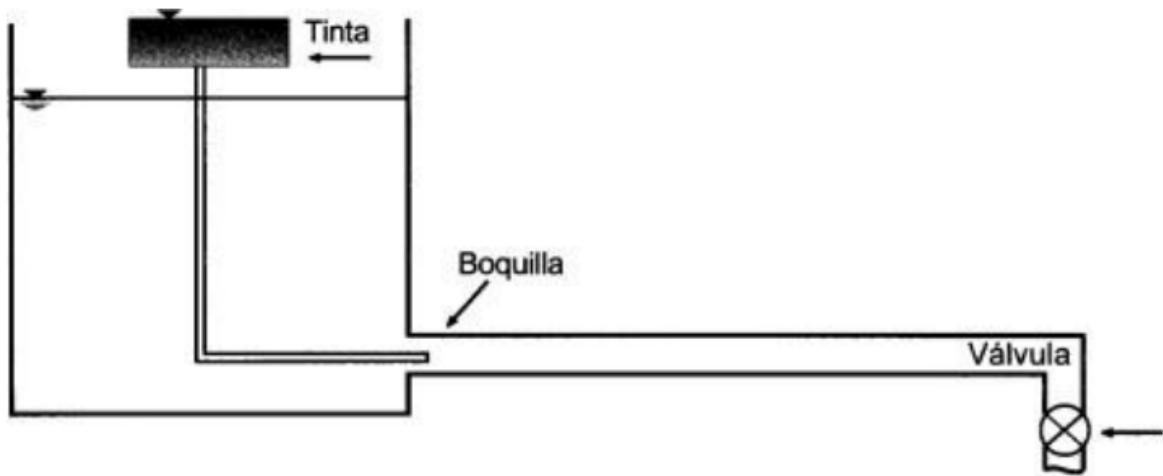


Figura 2.13: Esquema simplificado del montaje del experimento de Reynolds. (Recuperado de: [61]).

2.5 Procesamiento de Imágenes

El procesamiento de las imágenes corresponde con una de las principales etapas de un sistema de visión. Ya se detalló el proceso de captura de imágenes, ahora se desarrollan algunos conceptos empleados en la manipulación digital de las imágenes. Una forma de obtener información de una imagen es por medio de su histograma, el cual es un diagrama de barras, en el que sobre el eje de las abscisas se representan los diferentes

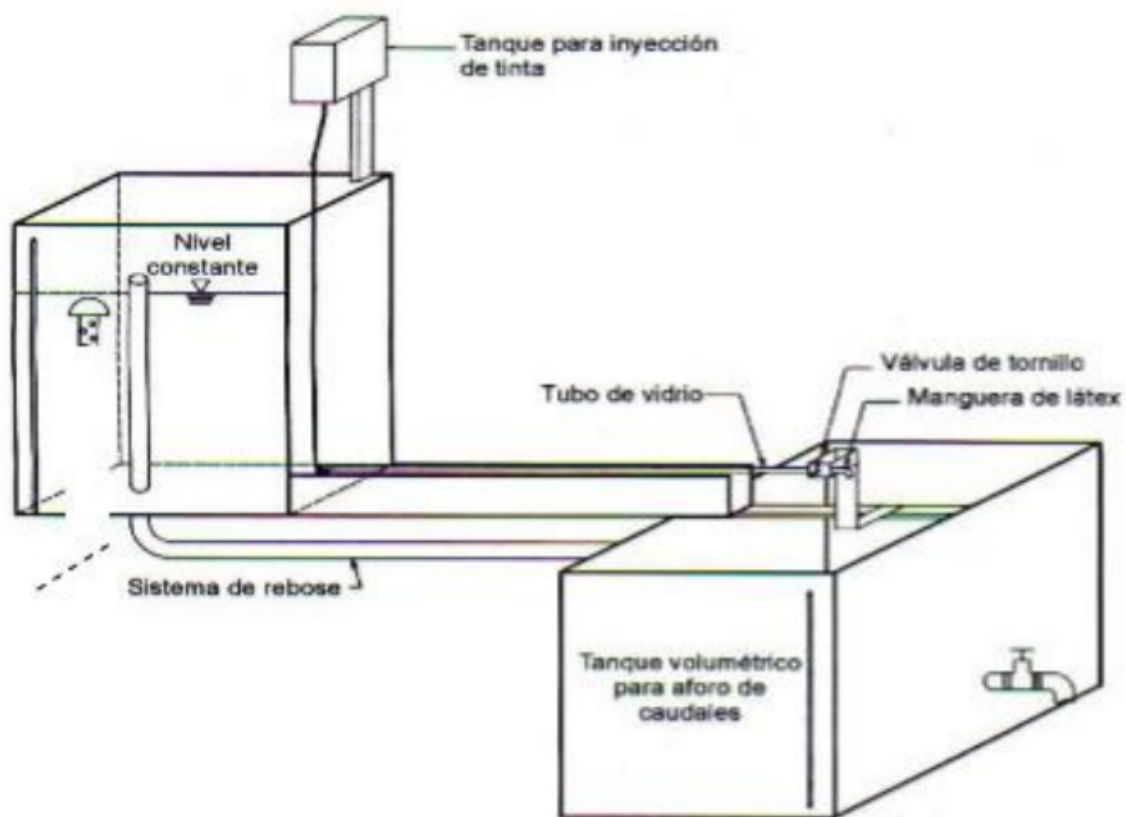


Figura 2.14: Esquema detallado del montaje del experimento de Reynolds. (Recuperado de: [60]).

valores que pueden tomar los píxeles de una imagen y en el eje de las ordenadas, el número de píxeles de la imagen con este valor [32]. En la Figura 2.15 se muestra la imagen de Lena y su respectivo histograma, donde el valor mínimo de los píxeles de esta imagen tienen un valor de 0 y corresponden con el negro, mientras que el mayor es de 255 para el blanco, con todos los valores intermedios para grises. La imagen de Lena se volvió un estándar en la comunidad científica para los estudios de procesamiento de imagen por tener una buena combinación de detalles, regiones planas, sombras y texturas, lo cual es útil para probar distintos tipos de algoritmos de procesamiento de imágenes [62]. La imagen de Lena se suele utilizar para comparar el desempeño entre distintos algoritmos o probar nuevos filtros y algoritmos de procesamiento [63] [64]. Un histograma no muestra información espacial de la imagen, ya que una imagen sólo puede tener un único histograma, pero varias imágenes distintas pueden tener un mismo histograma [32]. Entre la información que se puede obtener de un histograma se destacan la saturación y el contraste, donde la primera corresponde a cuánto se aprovecha todo el rango de valores disponibles, mientras que el segundo se refiere a qué tan polarizados están los datos en el histograma [32] [34]. A partir de la información obtenida del histograma de una imagen, se pueden tomar decisiones fundamentadas para el procesamiento de las imágenes.

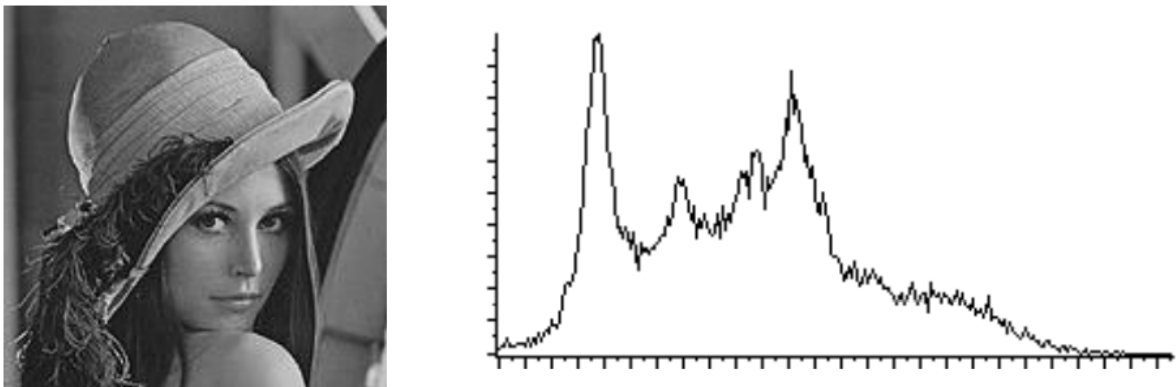


Figura 2.15: Imagen de Lena en escala de grises y su histograma. (Recuperado de: [32]).

Las características de saturación y contraste que se pueden observar por medio del histograma de una imagen, también se pueden modificar. Un ejemplo de una operación que incrementa el contraste es la función *autolevel*, la cual aplica un filtro que estira o extiende localmente el histograma de valores de gris de la imagen para cubrir todo el rango de valores de negro a blanco [65]. Por otro lado, también se tienen funciones para incrementar el contraste de la imagen, de las cuales se presentan varias a continuación. Un método común para el aumento de contraste es la ecualización del histograma, en la cual se redistribuye la escala de grises basada en la probabilidad de distribución de los niveles de gris de la imagen [66] [67]. La función *equalize_adapthist*, o *Ecualización Adaptativa de Histograma de Contraste Limitado (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) (CLAHE)*, es un algoritmo de incremento de contraste local, dividiendo la imagen en regiones uniformes y obteniendo el histograma de cada región para aplicar una ecualización del histograma de cada región [65]. Otra función que podría permitir incrementar el contraste de la imagen es la función *adjust_gamma*, la cual se basa en transformar la imagen de entrada por medio de la Ecuación 2.8 después de normalizar la imagen a una escala de 0 a 1 y donde el valor gamma puede ser un valor real positivo, tomando en cuenta que si este es mayor que 1 la imagen se oscurece y si es menor que 1, se aclara [65] [68]. De manera similar a la corrección gamma, la función *adjust_log* transforma la imagen de entrada por medio de la Ecuación 2.9 para valores de ganancia *gain* reales [65]. Finalmente, la función *enhance_contrast* incrementa el contraste de la imagen calculando el máximo y el mínimo de los vecinos de cada píxel y sustituyendo su valor por el del que sea más cercano de estos dos [65].

$$O = I * gamma \quad [65] \quad (2.8)$$

$$O = gain * \log(1 + I) \quad [65] \quad (2.9)$$

Las operaciones más básicas y comunes en el procesamiento de imágenes son las operaciones lógicas, las cuales cambian directamente el valor de los píxeles de las imágenes [32]. Las principales operaciones lógicas aplicadas entre dos imágenes son: la conjunción (operación lógica *AND*), la disyunción (operación lógica *OR*), la negación o inversión, la suma, la resta, la multiplicación y la división [32]. Algunas de estas operaciones se observan en la Figura 2.16. Otra forma en que se procesan las imágenes son con filtros de convolución, o kernels, los cuales se comparan contra cada píxel y sus vecinos para obtener un valor, formando una nueva imagen filtrada [32] [34]. Algunas aplicaciones de este tipo de filtros son la reducción del ruido, difuminación leve, afilado de detalles, acentuar bordes, entre otros [34]. Una variación de los filtros convolucionales son los operadores morfológicos, los cuales se utilizan para tratar problemas que involucran formas en una imagen [32]. Algunas operaciones morfológicas comunes son: la dilatación, la erosión, la apertura, el cierre, la coincidencia estructural, entre otros [32]. El uso de estos operadores se aplica en filtros morfológicos empleados para la eliminación de ruido o elementos pequeños, la extracción de bordes, el rellenado de agujeros, el adelgazamiento, la detección de patrones o formas y demás [34].

Algunos filtros muy comúnmente utilizados son los filtros gaussiano y mediana, los cuales se suelen utilizar para eliminar el ruido de una imagen [69]. El filtro gaussiano es un filtro que elimina el ruido de la imagen, sin embargo, presenta problemas como que elimina bordes y detalles, además de que puede volver la imagen borrosa. Del mismo modo, el filtro mediana, o *median* en inglés, se utiliza para reducir el ruido de una imagen, sin embargo, este lo hace reemplazando el valor de cada píxel por el valor de la mediana de la vecindad del respectivo píxel [70].

Las imágenes capturadas muestran una representación espacial, sin embargo, puede ser útil el emplear la representación en el dominio de la frecuencia de una imagen, la cual se obtiene a través de una transformada de Fourier, puesto que estas explican cómo se repiten ciertos patrones de una imagen [32]. Por medio de esta representación

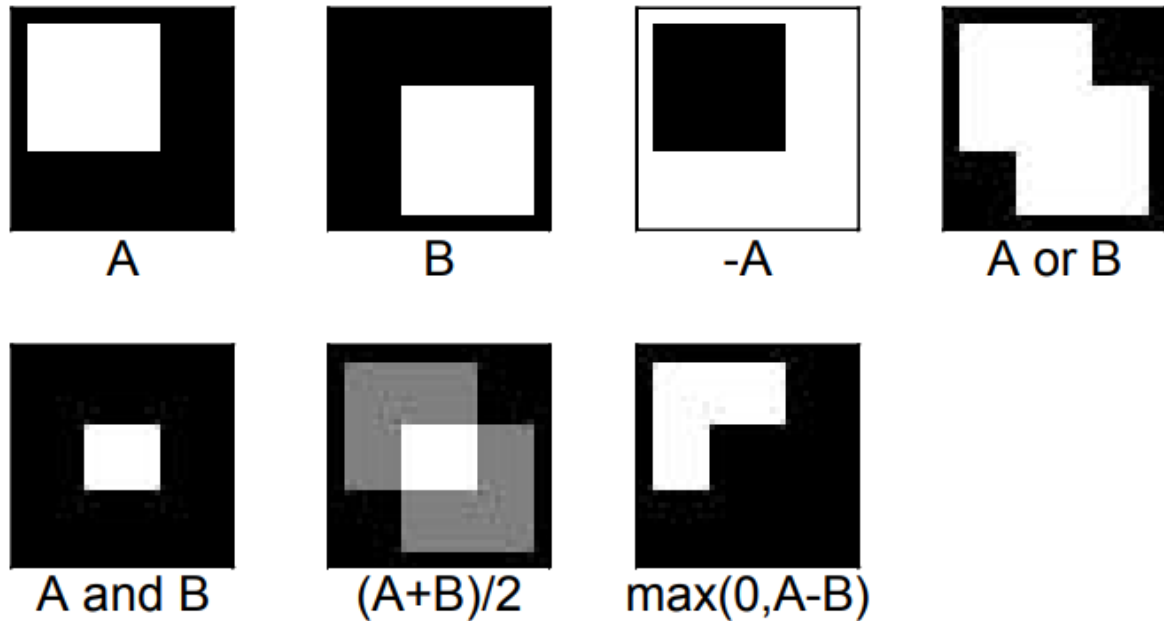


Figura 2.16: Ejemplos de operaciones lógicas y aritméticas, donde los píxeles negros tienen valores de 0 en sus bits y los blancos de 255. (Recuperado de: [32]).

se pueden aplicar filtros de frecuencia para observar, alterar o eliminar directamente elementos como el ruido, los bordes, las texturas, etc [32]. Entre los filtros de frecuencia más comunes se encuentran los filtros pasa bajas, pasa altas y pasa banda, los cuales por medio de una o varias frecuencias de corte, eliminan y mantienen ciertas frecuencias [32] [34]. Otro tipo de transformación de una imagen es la transformada de Hough, la cual es un método de análisis global diseñado para detectar líneas rectas y curvas a partir de la posición de n puntos [32]. Además de permitir identificar líneas en una imagen, este método posee la ventaja de ser una técnica robusta en los resultados de segmentación que obtiene, sin embargo, esto conlleva un elevado coste computacional [32]. Un algoritmo que se suele utilizar en conjunto con la transformada de Hough es la función *hough_line_peaks*, la cual identifica las líneas más prominentes identificadas con la transformada de Hough, separadas por cierto ángulo y distancia para un rango de ángulos definidos [65].

La detección de bordes es un método muy común en el procesamiento de imágenes pues permite encontrar el contorno de elemento, discontinuidades, líneas y geometrías.

Algunas funciones para la detección de bordes corresponden con los filtros Farid, Laplace, Prewitt, Roberts, Scharr y Sobel, entre otros [65]. Algunos de los filtros para detección de líneas se pueden utilizar para detectar solamente los bordes horizontales o los verticales e incluso diagonales, ya sean con pendiente positiva o negativa. Estas funciones generan el mapa de magnitudes de los bordes por medio de los cambios y discontinuidades abruptas en valor, o en otras palabras, detectan las altas frecuencias de la imagen [71]. Por otra parte, también se tienen algoritmos para la detección de patrones y texturas como es el caso del algoritmo *Patrón Binario Local (Local Binary Pattern) (LBP)* [65]. El algoritmo *LBP* es comúnmente utilizado para la detección y clasificación de texturas, sin embargo, también ha demostrado ser útil para el análisis de expresiones faciales y reconocimiento facial, entre otros [72]. El algoritmo *LBP*, en naturaleza, representa el patrón derivativo circular de primer orden de la imagen, utilizando un radio y cantidad de píxeles en específico alrededor del píxel actual, donde para cada uno de estos valores se les asigna un 1 si son mayores o iguales que el píxel central y 0 si son menores, luego, a partir de estos valores se define un valor binario según estos valores definidos, donde este valor es el nuevo valor del píxel central [72]. Por lo tanto, se tiene un total de posibles nuevos valores iguales a n^2 , donde n corresponde con la cantidad de píxeles que forman parte de la circunferencia utilizada para el cálculo del valor central, como se muestra en la Figura 2.17.

Cuando se quiere mostrar una o más áreas de interés en una imagen sin que quede duda de qué corresponde a qué, se utiliza la segmentación, la cual es un proceso que consiste en dividir una imagen digital en regiones homogéneas con respecto a una o más características [32] [34]. La forma más simple de realizar una segmentación es por medio de la umbralización, la cual es un proceso que permite convertir una imagen en escala de grises o color, en una imagen binaria, de manera que los píxeles de los objetos de interés se etiquetan con un valor distinto de los píxeles del fondo de la imagen [32]. La umbralización se puede realizar de distintas formas, el caso más sencillo es la

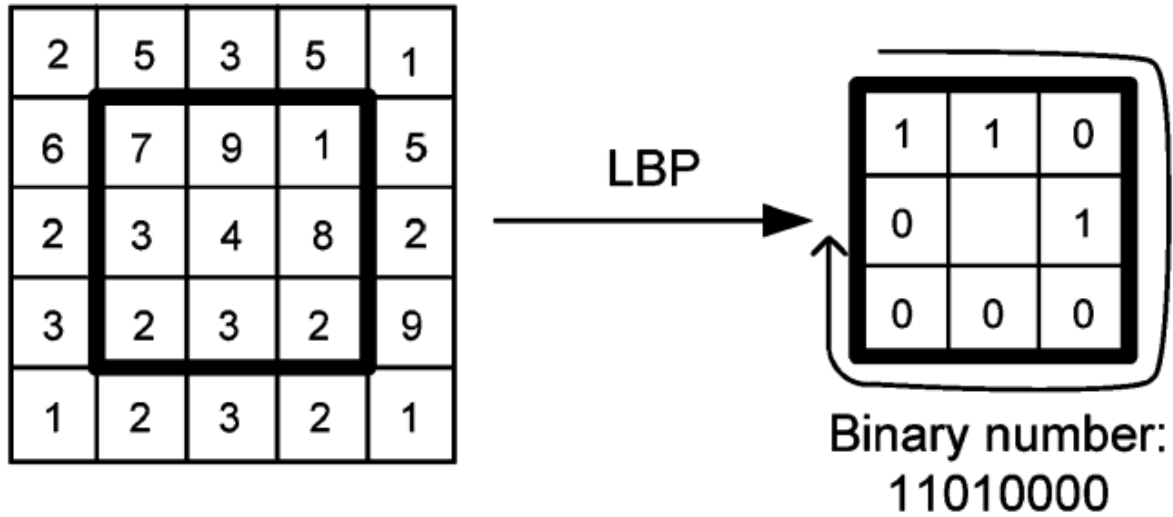


Figura 2.17: Ejemplo de operación del algoritmo Patrón Binario Local (LBP). (Recuperado de: [72]).

umbralización fija que se suele emplear en aquellas imágenes en las que existe suficiente contraste entre los diferentes objetos que se desean separar y el fondo y demás elementos, estableciendo un valor fijo que delimita el umbral de separación sobre el histograma [32]. La multiumbralización realiza la misma función que la umbralización normal, pero para múltiples objetos diferenciados del fondo por medio de múltiples valores de umbral [32]. La principal diferencia entre la umbralización y la multiumbralización es que el resultado que se obtiene no es una imagen binaria, sino que los distintos objetos tendrán etiquetas, o valores, diferentes. La semiumbralización por otra parte mantiene el valor original de los objetos por segmentar, mientras que el fondo se pone en negro o blanco [32]. Un ejemplo de una técnica de multiumbralización es el algoritmo *watershed*, el cual segmenta las regiones en distintos colores utilizando una pila de prioridad de píxeles y una búsqueda de primero en amplitud [34]. Por último, la umbralización adaptativa corrige los problemas de la umbralización fija, haciendo que el valor del umbral varíe como una función de las características locales de la imagen [32].

A continuación se detallan algunas de las funciones para la umbralización de imágenes encontradas en la biblioteca *skimage* 0.18.0 de SciKit-Image para el procesamiento de

imágenes en Python [65]. La primera función es la *threshold_isodata*, también conocida como método Ridler-Calvard, la cual retorna el valor de umbral que equivale al punto medio entre el valor promedio de los dos grupos en los que se separa la imagen con la umbralización [65]. La función *threshold_li* [65], la cual obtiene el valor del umbral por medio del método iterativo de minimización de cruce de entropía de Li [73]. La función *thresh_mean*, la cual calcula el valor promedio del histograma de la imagen y lo retorna como el umbral [65]. La función *threshold_minimum*, que calcula el umbral con el método mínimo, el cual toma el histograma de la imagen y lo aplanar hasta que sólo queden 2 máximos y el valor mínimo en medio de estos es el umbral [65]. La función *threshold_otsu* [65] calcula el umbral por medio del método Otsu para imágenes en escala de gris [74] [75]. La función *threshold_triangle* calcula el valor del umbral con el algoritmo *triangle* [65], el cual es un método gráfico en el que se traza una línea desde el valor máximo y el mínimo del histograma, formando un triángulo, luego se dibuja una línea normal a la primera y donde esta interseca el eje horizontal del histograma se encuentra el valor del umbral [75]. Por último, la función *threshold_yen* [65] utiliza el método Yen para calcular el umbral, el cual se basa en el criterio de correlación máxima considerando 2 factores, la discrepancia entre la imagen original y la umbralizada y el número de bits requeridos para representar la imagen umbralizada [76].

Una etapa esencial del diseño de un sistema de visión artificial es la validación. La validación es de vital importancia para poder garantizar el adecuado funcionamiento del sistema de visión y el procesamiento con un correspondiente grado de aprobación [77]. El primer paso para la validación, corresponde con la adquisición de un conjunto de datos, es decir, las imágenes que se van a utilizar para demostrar y evaluar el desempeño del sistema [77] [78]. Luego, se definen los métodos para realizar la evaluación y el determinar cuantitativamente el resultado de la evaluación, por ejemplo una tasa de aciertos [78] o una comparación entre un nuevo algoritmo y otros existentes [79]. Por último, se evalúan los resultados en comparación con los resultados deseados, o

esperados, que se definen al especificar los métodos de evaluación [79].

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se basó en la metodología planteada en el libro *Diseño y Desarrollo de Productos* [6], la cual se muestra en Figura 3.1 e implica un proceso de diseño iterativo e ingenieril. A continuación se detallan cada uno de los pasos de la metodología aplicados en el proyecto y su utilización para cumplir cada objetivo previamente planteado.



Figura 3.1: Metodología de diseño de producto. (Recuperado de: [6]).

1. Planeamiento:

Esta etapa de la metodología comprende la etapa de desarrollo del anteproyecto, incluyendo la identificación del problema, planteamiento de los objetivos, definición del entorno y análisis de viabilidad y justificación. Esta fase se realizó previo al inicio formal del proyecto.

2. Desarrollo de concepto:

Esta fase corresponde a la identificación de necesidades, requerimientos y especificaciones y el planteo de múltiples conceptos de solución [6]. El objetivo específico 1 se completó en esta sección, puesto que para la definición de las especificaciones y los conceptos, se requirieron identificar todas las variables y parámetros que contempla la solución y sus rangos aceptables.

3. Diseño en el nivel sistema:

Este paso implica un diseño generalizado y abstraído de la propuesta de solución, dividiéndola en subsistemas y componentes generales. Parte de las actividades establecidas para el desarrollo del objetivo específico 1 poseen una dependencia con esta etapa, puesto que el planteo de los componentes del sistema se incluye tanto en esta fase como este objetivo.

4. Diseño de detalle:

El diseño en detalle de la propuesta de solución incluye el establecimiento de todos los detalles y secciones del sistema como qué componentes en específico se utilizan y cómo se realizan todos los procesos dentro del sistema. Esta definición no deja lugar a ninguna duda dentro del diseño realizado. El objetivo específico 2 se completó en esta fase del proyecto, ya que la definición detallada de la solución incluye y describe el subsistema de software y procesamiento del sistema, al igual que la culminación del objetivo específico 1.

5. Pruebas y refinamiento:

Esta fase corresponde al paso final en el diseño de la propuesta de solución, abarcando las pruebas conceptuales del diseño para el rediseño, mejoramiento y validación del sistema. Los objetivos específicos 3 y 4 se completaron en esta etapa, puesto que el cumplimiento de ambos depende de los resultados obtenidos en las pruebas del diseño. A raíz de los resultados obtenidos en las pruebas ocurren los lazos de rediseño y se regresa a pasos anteriores de la metodología por lo

que los objetivos específicos que se cumplen en fases previas de la metodología poseen una dependencia con esta fase, donde una nueva iteración puede invalidar el cumplimiento de un objetivo específico por lo que se debe volver a considerar para el progreso del proyecto.

Para el desarrollo de la etapa de software se optó por utilizar una combinación de dos metodologías clásicas de diseño de software sobre una metodología ágil de diseño de software, ya que estas últimas poseen mayor ventaja para proyectos computacionales de mayor escala, ya que facilitan el manejo de grupos de trabajo. Este es el caso de la metodología Kanban, cuyo principal objetivo es maximizar la productividad de una unidad de trabajo [80]. A nivel general, el desarrollo de software se divide en 2 principales etapas que todo proyecto de cómputo incluye sin importar su tamaño y estas son el análisis y la programación. La segunda de estas etapas suele representar un proceso sistemático e iterativo por lo que una forma adecuada de manejarlo es con una metodología de diseño de software clásica, como las implementadas en este proyecto.

La primera metodología aplicada fue la Metodología de Cascada o *Waterfall* en inglés. La metodología de cascada, mostrada en Figura 3.2, sigue un orden secuencial y continuo, cuyas etapas son: Identificación de requerimientos, Diseño, Implementación, Verificación y Mantenimiento [81]. Cada uno de estos pasos es claro por sí solo y muestra el orden secuencial del diseño, sin embargo, no se observa el proceso iterativo que ocurre en el rediseño entre las etapas de diseño, implementación y verificación. Por lo tanto, se decidió incorporar elementos tanto de la Metodología de Cascada como de la Metodología de Prototipo, mostrada en Figura 3.3, la cual también es una metodología clásica de diseño de software. Esta metodología se basa en el principio de generar iteraciones al modificar y mejorar versiones previas con el fin de obtener resultados flexibles a cambios [82]. Lo anterior es especialmente útil cuando se trabaja en conjunto con un cliente que pide ciertas especificaciones, puesto que el resultado podría no alcanzarlas, se requerirían ajustes para satisfacer las necesidades. Del mismo modo, el proceso de

prototipado puede generar un resultado incremental donde el cliente toma un papel importante en la realimentación y el rediseño [83].

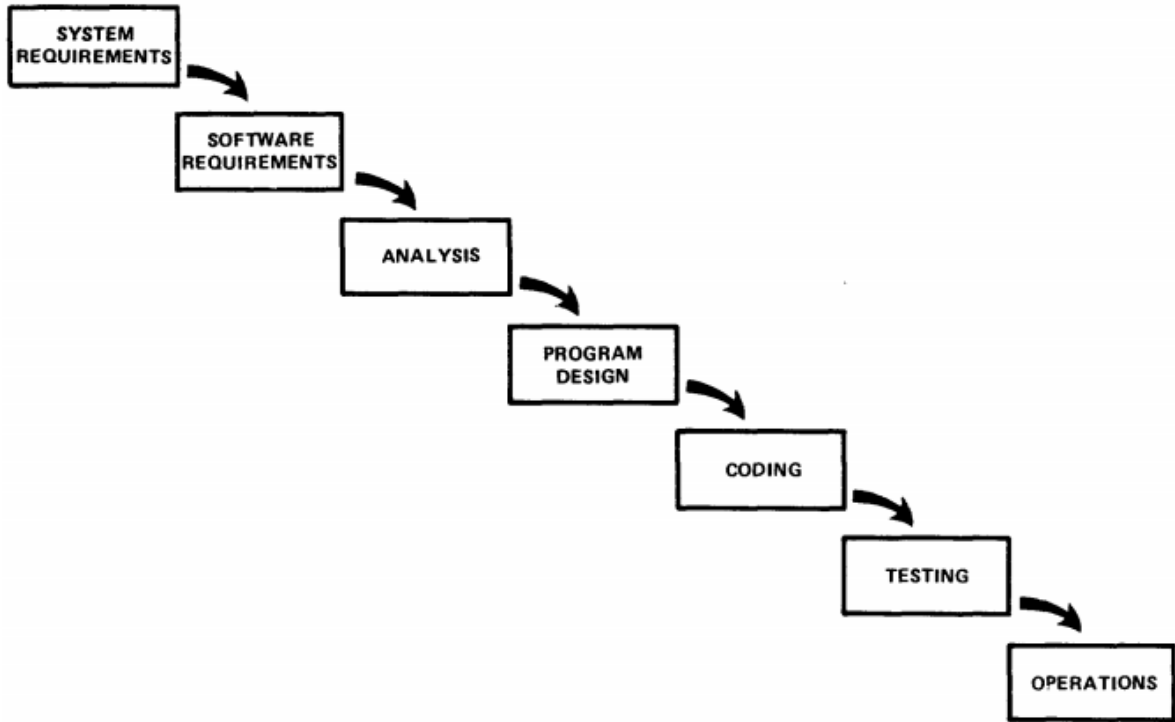


Figura 3.2: Metodología de diseño de Cascada. (Recuperado de: [84]).

La utilización de una o más metodologías de desarrollo de software en este proyecto permitieron cumplir el objetivo específico 2, el cual se encuentra fuertemente ligado al subsistema de software y procesamiento. Adicionalmente, el resultado obtenido de la aplicación de estas metodologías representó la herramienta con la cual se hizo posible el alcance de los objetivos específicos 3 y 4.

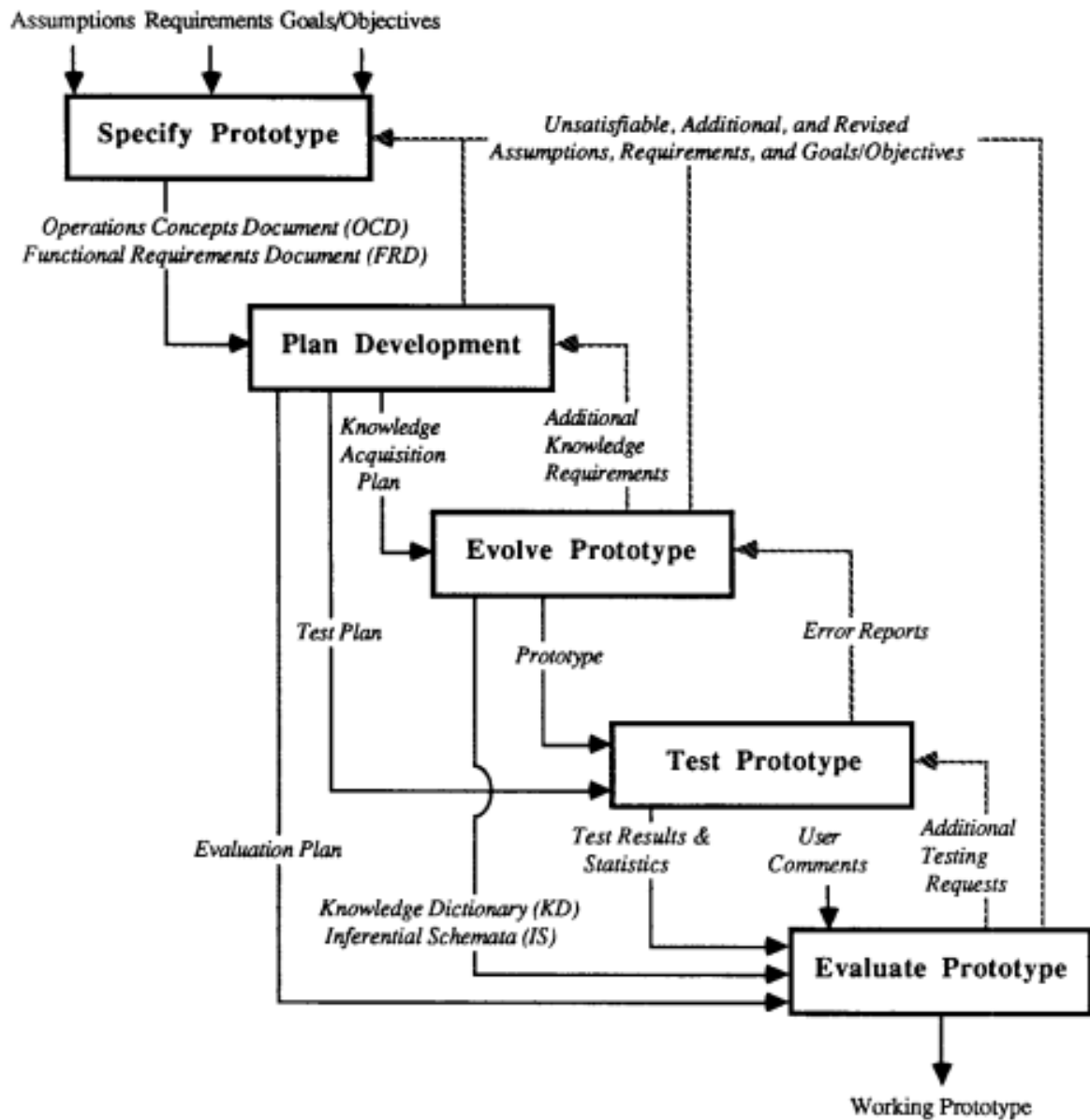


Figura 3.3: Metodología de diseño de Prototipado. (Recuperado de: [82]).

CAPÍTULO 4

PROPUESTA DE DISEÑO

Este capítulo aborda el procedimiento realizado para la obtención de la solución propuesta. Esta se realizó con base en las metodologías expuestas en el capítulo anterior. Este capítulo se agrupa en 3 diseños sinérgicos distintos que dependen de sí, sin embargo, se desarrollaron con algunas variaciones en las metodologías. Esto pues, el diseño de la planta se realizó en conjunto con el cliente, luego, el diseño del sistema de visión se realizó según la metodología de diseño presentada en el Capítulo 3. Por último, el diseño de la lógica de procesamiento y muestra de resultados se llevó a cabo con las metodologías de desarrollo de software también explicadas en el Capítulo 3.

La primera sección que se aborda en este capítulo es la identificación de necesidades y especificaciones las cuales son indispensables para el desarrollo de las 3 partes ya mencionadas independientemente que siguen metodologías distintas, dado que, estas son las necesidades y especificaciones del proyecto como tal, por lo que se deben considerar en cada una de las secciones del diseño.

4.1 Necesidades y Especificaciones

En esta etapa se buscaron identificar las principales necesidades por medio de entrevistas con el cliente, de las cuales se lograron extraer un total de 21 necesidades las cuales luego se agruparon en 6 categorías distintas según su relación con el proyecto. Las categorías identificadas corresponden a: presentación de los resultados (*Resultados*), interfaz de usuario (*Interfaz*), captura de imágenes (*Captura*), uso de recursos (*Recursos*), manejo del espacio (*Espacio*) y otros (*Otros*) para necesidades que no se podían agrupar con otras necesidades. Seguidamente, a cada una de estas necesidades se le asignó un valor de importancia en una escala del 1 al 5 en función de la opinión del cliente, al cual se le realizó una encuesta con el fin de evaluar la importancia de cada una. Los valores de la escala anterior corresponden con:

1. Se puede eliminar
2. Deseable
3. Importante
4. Muy importante
5. Imprescindible

De forma resumida, las necesidades identificadas, su importancia y clasificación se muestran en el Cuadro 4.1 al igual que su respectivo número, el cual servirá para facilitar su identificación posteriormente en el documento. Se puede observar que la mayoría de las necesidades se clasificaron por el cliente con el máximo valor de importancia, sin embargo, gracias a una serie de entrevistas y reuniones con el cliente, se logró diferenciar una jerarquía de importancia para las necesidades en función de su relación con el proyecto, las cuales se dividen en orden de más importante a menos importante: funcionamiento, costos monetarios, qué tan intuitivo es y qué tan estéticamente agradable es. Estas clasificaciones serán de mayor relevancia una vez que se llegue a la etapa

de selección de conceptos donde se compararon distintos conceptos con base en las necesidades y requerimientos por lo que una clara importancia relativa entre estos era necesaria para jerarquizar los distintos conceptos.

Una vez que se identificaron las necesidades, se realizó una definición de métricas con las cuales se pretendió evaluar el diseño en lineamiento con las necesidades identificadas al terminar el diseño. Cada una de las necesidades ya establecidas se asoció a una de las métricas. Con base en la importancia asignada por el cliente a cada una de las necesidades, se le asignó una importancia a cada métrica según las necesidades asociadas a esta. Luego, a cada métrica se le designó un tipo de unidad de medición para su evaluación, así como valores marginales e ideales de estos para el diseño presentado, tal y como se observa en el Cuadro 4.2. Esta tabla representó una guía para evaluar el cumplimiento de las necesidades de la propuesta de solución, bajo 2 estándares, donde se tiene un valor mínimo o máximo aceptable y un valor objetivo, o ideal, de forma que para cada necesidad se tiene un rango de valores en los que se considera que se cumplió el objetivo de forma satisfactoria.

Algunas de las métricas mostradas en el Cuadro 4.2 se definieron como escalas numéricas para determinar el grado de cumplimiento de las necesidades asociadas a la métrica. Cada una de las escalas definidas se identificó con un número romano en el Cuadro 4.2 para luego hacer referencia a estos en el Cuadro 4.3. Para evaluar los resultados con base en estas métricas, es necesario el definir en qué medida de cumplimiento se asigna el respectivo valor numérico. Por lo tanto, en el Cuadro 4.3 se muestra el significado de cada uno de los valor posibles de cada escala definida por las métricas.

Núm.	Subtipo	Necesidad	Imp.
1	Resultados	El sistema obtiene líneas de flujo digitalmente	5
2	Resultados	La líneas de flujo son claras y se ven a simple vista	5
3	Resultados	Queda marcada una estela de la línea de flujo	3
4	Interfaz	La interfaz de usuario es fácil de entender	5
5	Interfaz	La interfaz de usuario es operable por cualquier investigador del <i>SIBILA</i>	5
6	Interfaz	Se muestra el resultado en video	5
7	Interfaz	Es pueden ver cuadros específicos del video	5
8	Interfaz	Se pueden ver las líneas en tiempo real	4
9	Interfaz	Se pueden ver resultados de distintas pruebas al mismo tiempo	3
10	Captura	Las líneas de flujo se van antes y después del impulsor	5
11	Captura	Se tienen 2 vistas ortogonales	5
12	Recursos	Se prioriza el equipo de visión artificial del <i>LIANA</i> sobre comprar otro	5
13	Recursos	Se prioriza el material disponible en el <i>SIBILA</i> sobre comprar otro	4
14	Recursos	Se mantienen los costos del proyecto al mínimo	5
15	Recursos	Se realiza el mínimo posible de compras de equipo y materiales	5
16	Espacio	El sistema de visión se acopla establemente al prototipo facilitado por el <i>SIBILA</i>	5
17	Espacio	El espacio y forma de montaje es el de una mesa o escritorio	5
18	Otros	Los resultados son confiables y repetibles	5
19	Otros	Los resultados se pueden ver en otro momento	5
20	Otros	El producto final es estéticamente atractivo	5
21	Otros	Los resultados se muestran de manera atractiva	5

Table 4.1: Necesidades identificadas, numeradas, clasificadas y calificadas.

Núm. Métrica	Núm. Necesidad	Métrica	Imp.	Unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	1	Escala del 1 al 5 (i)	5	Números discretos	3	5
2	2	Escala del 1 al 3 (ii)	5	Números discretos	2	3
3	3	Escala del 1 al 5 (iii)	3	Números discretos	4	5
4	4, 5, 20, 21	Resultado de la prueba de percepción del usuario	5	%	>70	>95
5	6	Escala del 1 al 5 (iv)	5	Números discretos	3	5
6	7	Escala del 1 al 4 (v)	5	Números discretos	3	4
7	8	Escala del 1 al 3 (vi)	4	Números discretos	2	3
8	9	Escala del 1 al 3 (vii)	3	Números discretos	2	3
9	10	Extensión del tubo que se observa	5	cm	>20	>30
10	11	Escala del 1 al 5 (viii)	5	Números discretos	3	5
11	12, 13	Relación del costo de los materiales comprados con el costo total de los materiales utilizados	4	%	<25	<5
12	14, 15	Costos de materiales, manufactura y envíos	5	Colones	<200'000	<20'000
13	16	Desplazamiento de elementos por vibraciones del sistema y perturbaciones externas	5	cm	<3.5	<1
14	17	El área superficial ocupada por el sistema	5	m ²	<3.5	<2
15	18	Tasa de aprobación de las pruebas de validación	5	%	>90	>98
16	19	Escala del 1 al 3 (ix)	5	Números discretos	2	3

Table 4.2: Métricas con importancia, unidades, valores marginales e ideales y necesidades asociadas.

Escala	Valor	Representación
i	1	No se observa la línea de flujo cuando se procesa la imagen
	2	Se observan algunos puntos de la línea de flujo, pero no se aprecia la trayectoria
	3	Se observan puntos de la línea de flujo y se puede apreciar la trayectoria
	4	Se observa la trayectoria general de la línea de flujo, pero no toda su forma
	5	Se observa tanto la trayectoria como la forma completa de la línea de flujo
ii	1	La línea de flujo y el fondo de la imagen no se diferencian
	2	Se diferencian levemente la línea de flujo y el fondo de la imagen
	3	La línea de flujo y el fondo tienen alto contraste entre sí
iii	1	El trazador no deja marcada la línea de flujo, sólo su posición actual
	2	El trazador deja marcada la línea de flujo solo ligeramente detrás de su posición actual y luego se difumina
	3	El trazador deja marcada la línea de flujo, pero se difumina durante la prueba
	4	El trazador deja marcada la línea de flujo durante toda la prueba, pero se difuminan un poco
	5	El trazador deja claramente marcada la línea de flujo durante toda la prueba
iv	1	No se muestra video del resultado en ningún momento de la prueba
	2	Se muestra un video del resultado solamente durante la prueba
	3	Se genera un video del resultado después de la prueba
	4	Se muestra video del resultado durante y después de la prueba
	5	Se muestra video del resultados durante y después de la prueba y se genera un video del resultado segmentado
v	1	No se pueden ver cuadros específicos del video de manera individual
	2	Se puede detener el video para ver un único cuadro por más tiempo
	3	Se pueden pasar los cuadros de manera individual (de uno en uno)
	4	Se pueden seleccionar cuadros específicos del video
vi	1	No se pueden ver las líneas de flujo digitalmente en tiempo real
	2	Se pueden ver las líneas de flujo digitalmente sin segmentar en tiempo real
	3	Se pueden ver las líneas de flujo digitalmente y segmentadas en tiempo real
vii	1	No se pueden ver los resultados de más de una prueba a la vez
	2	Se pueden ver los resultados sin segmentar de más de una prueba a la vez
	3	Se pueden ver los resultados segmentados de más de una prueba a la vez
viii	1	No se tienen 2 vistas del tubo
	2	Se tienen 2 vistas de tubo, pero no son ortogonales entre sí
	3	Se tienen 2 vistas ortogonales del tubo, pero se toman con la misma cámara en distintas pruebas
	4	Se tienen 2 vistas ortogonales del tubo para la misma prueba, pero no se capturan las imágenes de forma sincronizada
	5	Se tienen 2 vistas ortogonales del tubo para la misma prueba y las capturas están sincronizadas
ix	1	Los resultados solo se pueden ver mientras se realiza la prueba
	2	Los resultados solo se pueden ver inmediatamente después de la prueba
	3	Los resultados se pueden ver en cualquier momento después de terminada la prueba

Table 4.3: Representación del valor numérico de las escalas utilizadas para las métricas.

4.2 Diseño de Planta del SIBILA

Al diseño realizado por el *SIBILA* se le refiere como planta, o prototipo, y este refiere al sistema que permite la generación del flujo a través de un tubo, produciendo el desplazamiento del agua por medio de un impulsor. Este diseño consta de varias secciones, de las cuales se destacan, el tanque, o reservorio de agua, la etapa mecánica, la cual incluye al impulsor y mecanismo que permite su movimiento rotacional, por último, se tiene el tubo o conducto en el cual se produce el flujo que se desea observar.

El diseño del tanque consistió de una caja rectangular de lámina de acrílico de 5 mm de espesor sin tapa, con dimensiones externas de 20x20x40 cm. Esta caja tenía un orificio de 5 cm de diámetro en una de las caras de 20x20 y otro orificio igual en una de las caras de 20x40 como se muestra en la Figura 4.1.

Por otro lado, la sección del tubo estaba compuesta por 3 secciones de tupo de PVC de una pulgada y media de diámetro interno, 3 codos de PVC y una sección de tubo de plexiglass de aproximadamente 3 cm de diámetro interno, la cual sería el área de interés para observar el fluido, ya que esta sección es traslúcida, a diferencia de la hecha de PVC. Adicionalmente, esta sección presentaba uniones de PVC para poder acoplar las secciones de tubo de PVC y el de plexiglass al tanque de agua. Todos estos elementos se acoplaron de la forma en que se observa en la Figura 4.2, donde el agua sale por una de las caras del tanque, recorre el tubo y reingresa al tanque por una de las caras perpendiculares a la cara por la que salió.

La última sección del diseño de la planta realizada por el *SIBILA* consistió de la etapa mecánica. Esta estaba conformada por los elementos mostrados a continuación:

- Impulsor
- Eje
- Rectificador de flujo

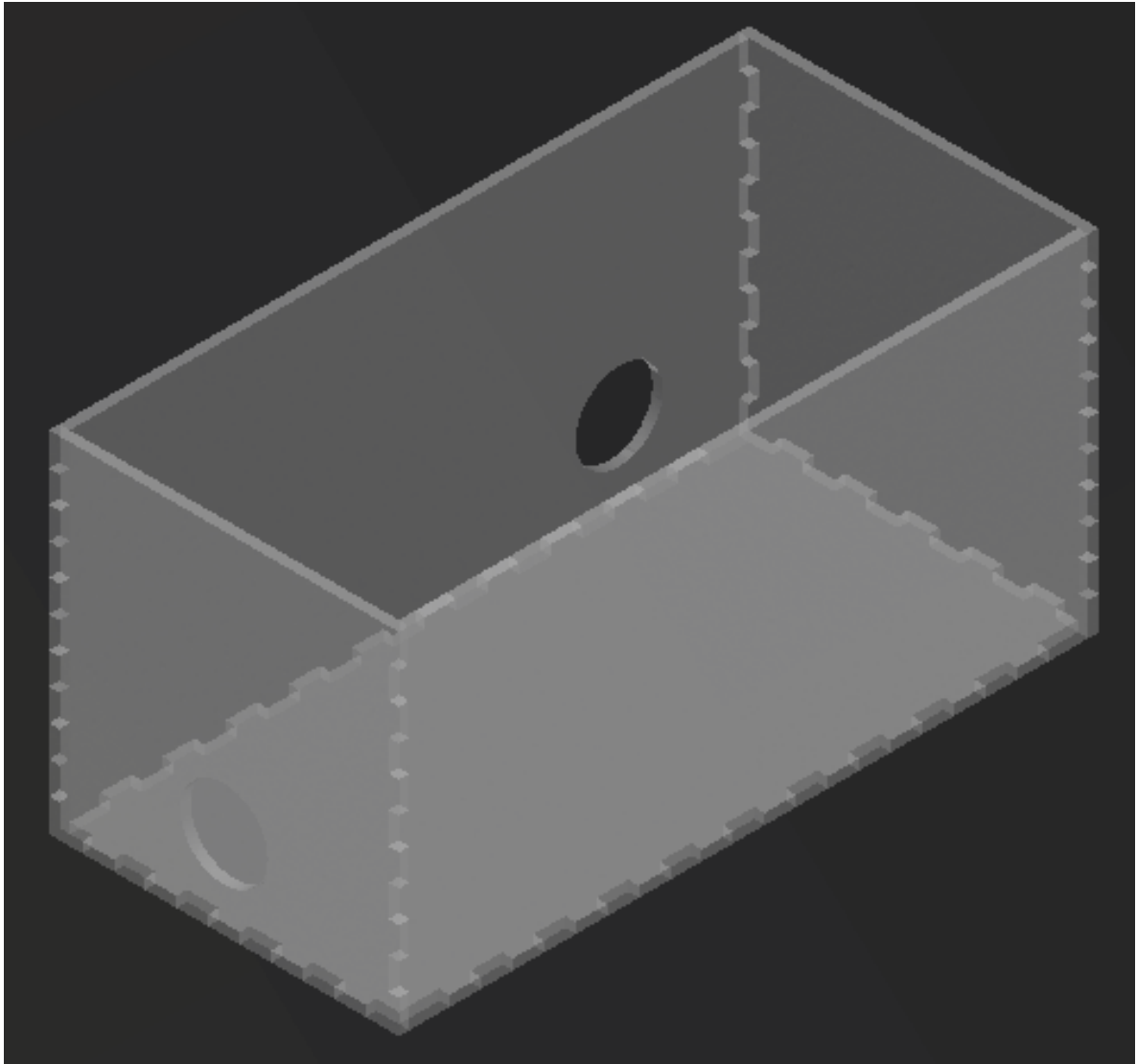


Figura 4.1: Tanque de la planta ensamblado. (Elaboración propia).

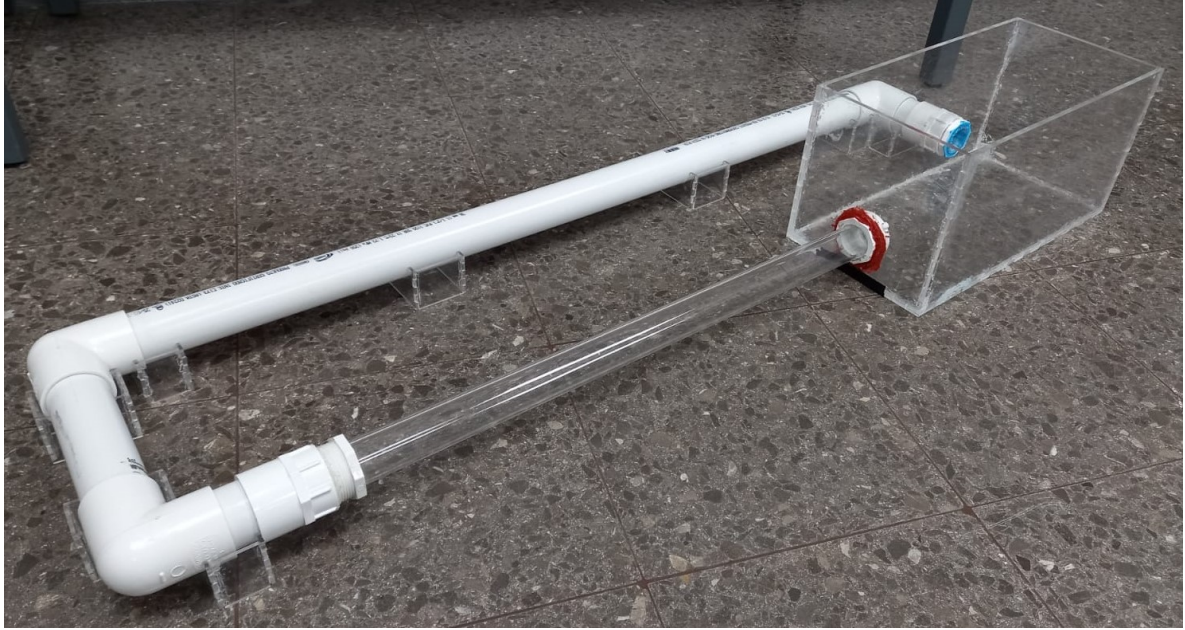


Figura 4.2: Tanque de la planta ensamblado con el tubo de realimentación. (Elaboración propia).

- Motor
- Driver
- Sistema de poleas
- Fuente de tensión ajustable

De los elementos mencionados anteriormente, el eje y el sistema de poleas son los únicos que se conforman por múltiples partes. Adicionalmente, en la lista anterior se obviaron los cables de conexión necesarios. El sistema de poleas se conformó por una correa de 20 cm, una polea de 60 dientes de y otra de 20 dientes. Por otra parte, el eje estaba compuesto por 6 piezas, las cuales se muestran ensambladas y etiquetadas en la Figura 4.3: el impulsor, una barra sólida que conforma el eje que se acopla al impulsor, un tubo hueco de aluminio de mayor diámetro por el cual pasa la barra anterior, para acoplar este tubo hueco al rectificador de manera que este se mantenga fijo y la barra central con el impulsor puedan girar, una pieza impresa en 3D en plástico para acoplar

la barra al diámetro interno de la polea, el cuál era mayor que el diámetro externo de la barra, un rol de cobre para mantener centrada la barra dentro del tubo hueco, por último, otra pieza impresa en 3D en plástico para también mantener la barra centrada dentro del tubo y a su vez, evitar la fricción y desgaste entre el impulsor con la barra hueca.

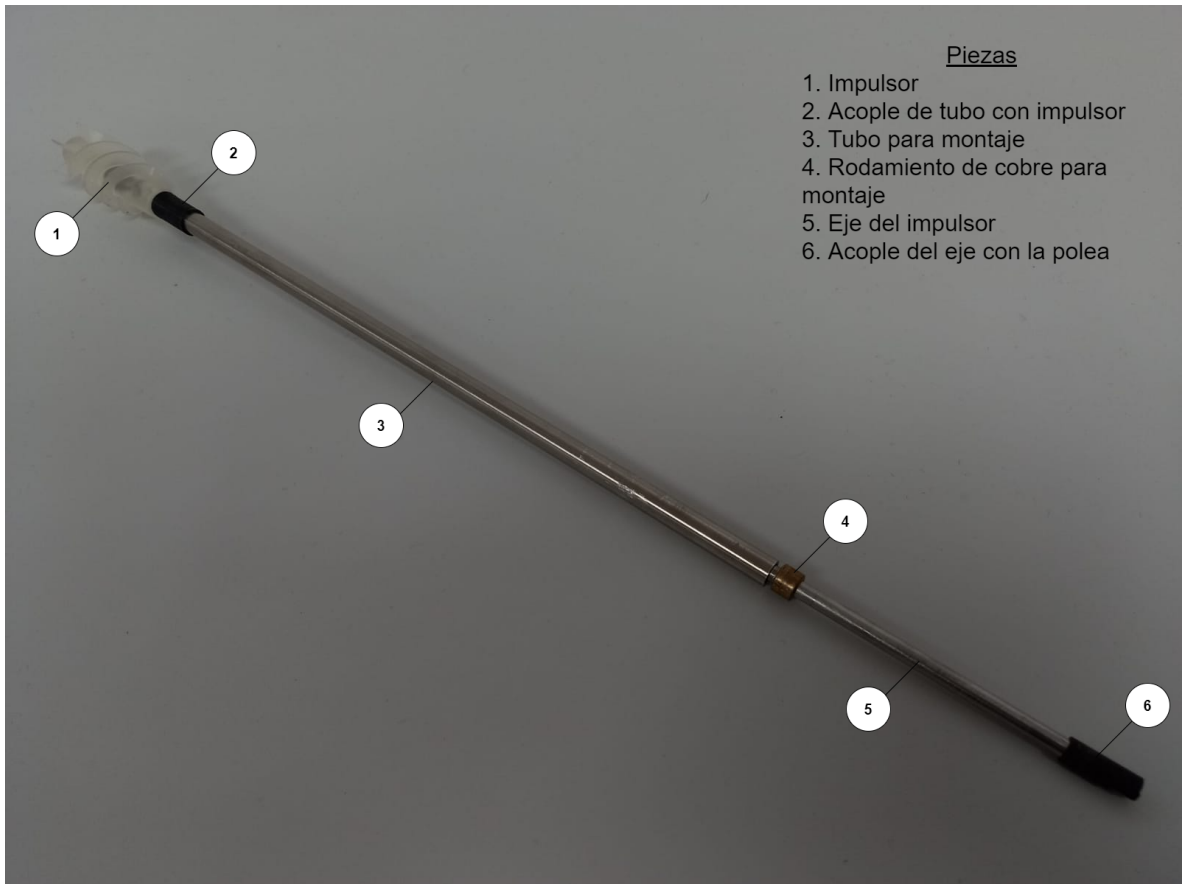


Figura 4.3: Eje del impulsor ensamblado. (Elaboración propia).

Este diseño completo definido hasta el momento poseía 2 problemas principales. El primero, el diseño se encontraba incompleto, faltaban detalles de ensamblaje y montaje. Segundo y más importante, este diseño planteado, no se había probado, por lo tanto, no se sabía si era adecuado para el objetivo de crear el flujo laminar por medio del impulsor. Algunos aspectos de diseño se asignaron a las tareas propias de este proyecto, con asistencia y consulta del *SIBILA* para terminar un diseño en conjunto de la planta

funcional. Los detalles de estas pruebas y decisiones de diseño, se desarrollan en la Sección 4.6, donde se ahonda en las falencias del diseño mencionado hasta el momento, las pruebas y rediseños realizados.

4.3 Generación de conceptos

El proceso de generación de conceptos se realizó estructurado en 4 etapas distintas, las cuales correspondieron con la división del sistema en subsistemas más pequeños y manejables para mejor entender la naturaleza del problema y las posibles soluciones, la generación de conceptos por medio de búsquedas internas y externas, el filtrado y comparación de conceptos para reducir la cantidad de conceptos guiándose hacia una solución adecuada y por último, una etapa de pruebas de los conceptos seleccionados tras la evaluación. La metodología que se describe en [6] establece que se generan listas de conceptos para cada uno de los subsistemas y luego se combinan para generar conceptos completos del sistema, los cuales luego se deben comparar entre sí para luego hacer combinaciones y una siguiente comparación previas a una selección. No obstante, se consideró que esta sección de la metodología carece de una exploración completa de los conceptos generados pues la cantidad de posibles combinaciones suele ser muy alta por lo que solo se toman algunas de las combinaciones, lo cual al hacer las comparaciones no necesariamente se evalúa adecuadamente cuál es la mejor solución posible, o en caso de que sí se consideren todas las posibles combinaciones, el proceso de evaluación y comparación entre conceptos se extendería demasiado. Por lo tanto, la evaluación de los conceptos en este proyecto se realizó comparando los conceptos de cada subsistema y seleccionándolos de esta evaluación para luego combinarlos en un único concepto completo seleccionado.

Esta sección de generación de conceptos se enfoca en el diseño del sistema de visión artificial así como en el sistema para la adición y regulación de un trazador que se agrega

a la planta, puesto que aunque se asocia más al diseño de la planta que al del sistema de visión artificial, es indispensable para el adecuado funcionamiento del último, pues sin este, no se podrían observar las características que le interesan al cliente.

4.3.1 División en Subsistemas

Como primer paso para la generación de los conceptos se tiene el entendimiento del sistema para lo cual se descompuso el sistema en subsistemas, pero primero se identificaron las entradas y salidas del sistema. En este caso se consideran las entradas y salidas para el sistema de visión, de las cuales algunas de estas entradas corresponden con salidas de la planta facilitada por el cliente. Por lo tanto, las entradas y salidas identificadas se denotan a continuación.

Entradas:

- Líneas de flujo / área de interés
- Señales de control

Salidas:

- Imágenes tomadas
- Vídeo
- Archivos generados

Adicionalmente, se pueden observar la subdivisión en subsistemas en la Figura 4.4, donde también se pueden observar cómo las entradas y salidas interaccionan con estos subsistemas y en como estos se relacionan entre sí. Por otra parte, en la Figura 4.5 se observa como los subsistemas también se descomponen en más subsistemas para tener un mayor detalle para la generación de conceptos. Por lo tanto, se identificaron 3 principales subsistemas y uno adicional para el trazador. De cada uno de estos

subsistemas se pueden extraer otros subsistemas a un nivel inferior, por lo que primero se trataron los 2 subsistemas de captura de imágenes y del trazador, para luego realizar los conceptos de los siguientes dos subsistemas, de procesamiento de imágenes y de interfaz gráfica de usuario.

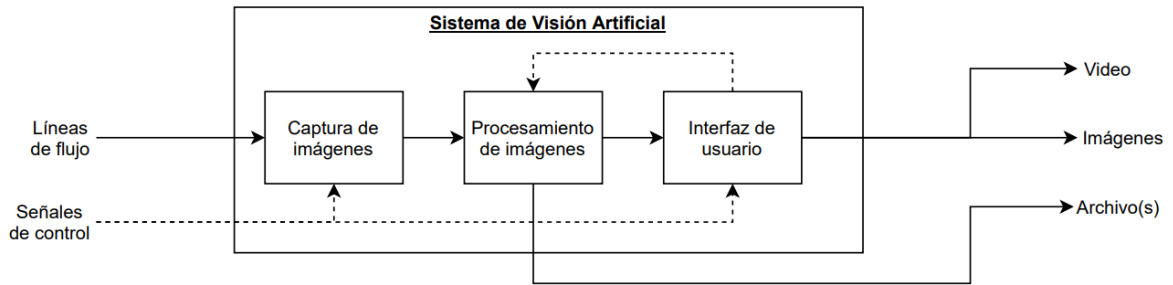


Figura 4.4: Diagrama de división en subsistemas del sistema de visión artificial. (Elaboración propia).

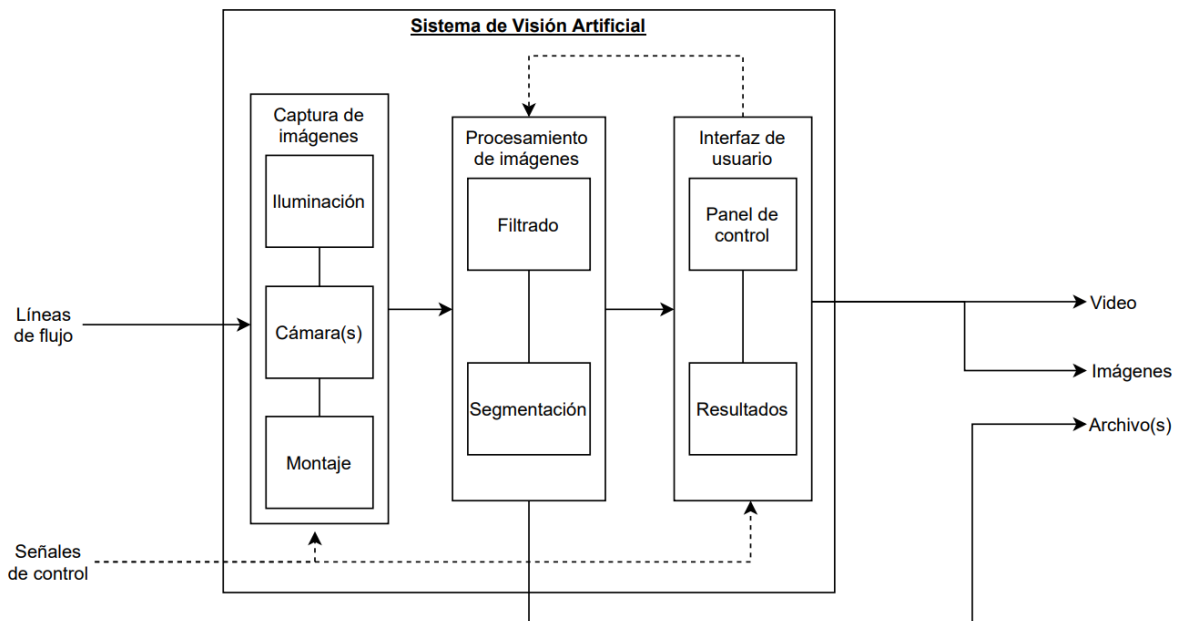


Figura 4.5: Diagrama de descomposición en subsistemas con más detalle del sistema de visión artificial. (Elaboración propia).

Algunos de los subsistemas se pueden descomponer aun más como fue el de la captura de imágenes, el cual se descompuso en 5: cámara, montaje de cámara, tipo de iluminación, color de luz y montaje de iluminación. Por otra parte, el subsistema del trazador se descompuso en 3 partes: sustancia de trazador, dosificación y medio de

Cámara(s)	Montaje de cámara(s)	Tipo de iluminación	Color de luz
Cámara industrial de VA (I)	Brazo de montaje de cámara (I)	Luz natural (I)	Luz ultravioleta (I)
		Anillo de luz (I)	
Cámara de celular (I)	Cámara apoyada en superficie plana (I)	Backlight (I)	Luz blanca (I)
		Domo de luz (I)	
Cámara fotográfica (I)	Trípode para cámara (I)	Barra LED (I)	Luz de color RGB (I)
	Sostenida con la mano (I)	Bar lighting (E) [44]	
Cámara de drone (E) [85]	Sobre riel recto (I)	Dark Field Lighting (E) [44]	Luz incandescente (I)
	Brazo móvil (I)	Diffuse On-Axis Lighting (E) [44]	
Cámara térmica (infrarrojo) (E) [44]	Con gyro-estabilizador (E) [44]	Diffuse Dome/Ring Lighting (E) [44]	Filtro de color (E) [44]
		Low Angle Dark Field Lighting (E) [44]	
Cámara de luz ultravioleta (E) [86]	Sobre un UAV (unmanned aerial vehicle) (E) [87]	High-Powered Integrated Light (E) [44]	
		In-Sight Integrated Light (E) [44]	

Table 4.4: Conceptos obtenidos por búsqueda interna y externa para los distintos subsistemas.

adición. Por simplicidad para el desarrollo de los conceptos, a cada uno de estos se les va a llamar subsistemas en las siguientes secciones del documento, pero se debe recordar que estos corresponden a subsistemas de subsistemas más amplios. Finalmente, después de concluida la selección, prueba y aprobación de los conceptos de los subsistemas de captura de imágenes y trazador, se realizó el mismo procedimiento para la definición de conceptos para los subsistemas de procesamiento de imágenes e interfaz de usuario a partir de los resultados obtenidos con los otros dos subsistemas ya definidos.

4.3.2 Búsqueda de Conceptos

En los Cuadros 4.4 y 4.5 se muestran los conceptos obtenidos categorizados por columnas según cada uno de los subsistemas definidos, donde se les clasifica como (*I*) a los conceptos obtenidos por búsqueda interna y como (*E*) a los obtenidos por búsqueda externa.

4.4 Selección de Conceptos

El proceso de selección de conceptos implicó primeramente un filtrado para disminuir la cantidad de conceptos. Seguidamente, se realizó una evaluación de los conceptos de acuerdo a ciertos criterios. Una vez evaluados los conceptos, se compararon estos

Montaje de Iluminación	Trazador	Dosificación	Adición del trazador
Unión no permanente (I)	Colorante Vegetal (I)	Por gravedad (I)	Aguja (I)
Acoplado a la cámara (I)	Aceite (I)	Bomba peristáltica (I)	
Apoyado en una superficie (I)	Tinta de lapicero (I)	Bomba sumergible (I)	Tubo capilar (E) [60]
	Tinta de marcador (I)	Bomba de vacío (I)	
Unión permanente (I)	Pintura de base no polar (I)	Inyección manual (I)	Manguera (I)
Step-Up o Step-Down (E) [88]	Barniz para madera (E)	Mecánica con motor (E)	
		Tinta de impresora (E)	Pistón neumático (E)
	Témpera (I)	Válvula reguladora (I)	
	Tinta a base de anilina (E) [61]		

Table 4.5: Continuación de conceptos obtenidos por búsqueda interna y externa para los distintos subsistemas.

Cámara(s)	Montaje de cámaras	Tipo de iluminación	Color de luz
Cámara industrial de VA	Brazo de montaje de cámara	In-Sight Integrated Light	Luz de color RGB
Cámara de celular	Trípode para cámara	Diffuse On-Axis Lighting	Luz Ultravioleta
		Domo de luz	
Cámara de luz ultravioleta	Cámara apoyada	Backlight	Filtro de color
		Anillo de luz	Luz blanca

Table 4.6: Conceptos tras filtrado por necesidades del proyecto.

resultados para determinar qué concepto se selecciona.

4.4.1 Filtrado de Conceptos

El proceso de filtrado de conceptos detallado en esta sección del proyecto, se realizó en 2 partes, un primer filtrado con relación a las necesidades del proyecto establecidas, cuyos resultados se muestran en los Cuadros 4.6 y 4.7. Seguidamente, se realizó un segundo filtrado con relación a la disponibilidad de equipo y materiales, esto incluye materiales que pertenecen a alguno de los laboratorios o se pueden conseguir con relativa facilidad y bajo costo, lo cual también hace referencia a las necesidades asociadas a los costos. Los resultados del segundo filtrado se observan en el Cuadro 4.8. En el Cuadro 4.8 también se observa que no se incluyen los conceptos de dosificación ni adición del trazador, esto se debe a que estos no cambiaron tras el segundo filtrado.

Montaje de iluminación	Trazador	Dosificación del trazador	Adición del trazador
Apoyado	Tinta a base de anilina	Gravedad	Aguja
Unión no permanente	Pintura de base no polar	Bomba peristáltica	
Acoplado a la cámara	Tinta de marcador	Bomba sumergible	Tubo capilar
	Barniz de madera	Bomba de vacío	
Step-Up o Step-Down	Tinta de lapicero	Inyección manual	Manguera
	Colorante vegetal	Válvula reguladora	

Table 4.7: Continuación de conceptos tras filtrado por necesidades del proyecto.

Cámara(s)	Montaje de cámaras	Tipo de iluminación	Color de luz	Montaje de iluminación	Trazador
Cámara industrial de VA	Brazo de montaje de cámara	Domo de luz	Luz blanca	Uniones no permanentes	Colorante vegetal
		Backlight			Tinta de lapicero
Cámara de celular	Cámara apoyada	Backlight	Filtro de color		Pintura de base no polar
Cámara de celular	Cámara apoyada	Anillo de luz	Filtro de color		Apoyado en superficie
					Barniz de madera
					Tinta de marcador

Table 4.8: Conceptos tras filtrado según la accesibilidad.

4.4.2 Conceptos Escogidos

En esta sección se delimitaron criterios para la evaluación y comparación de los distintos subsistemas de conceptos con el fin de seleccionar los que se consideraran más adecuados para el proyecto para luego ser sometidos a pruebas de concepto. Algunas de estas opciones que se clasificaron como la mejor opción en su categoría, demostraron no ser adecuadas en las pruebas de concepto, sin embargo, esto se trata en la Sección 4.5 donde se profundiza en las pruebas realizadas, los resultados obtenidos y las conclusiones que llevaron a cambiar de concepto y repetir las pruebas o especificar dicho concepto como final. Por lo tanto, en esta sección los conceptos se clasifican con un valor numérico de prioridad, donde este representa el orden en el que se pretendían probar en las pruebas de concepto. La evaluación de los conceptos se llevó a cabo por medio de una simbología de 3 parámetros, donde + es sinónimo de positivo, deseable, mejor, - se entiende como negativo, no deseable, peor y 0 se interpreta como neutro, no relevante. Por último, al

Criterios de selección	Cámara industrial de VA	Cámara de celular
Programabilidad	+	-
Compatibilidad con montaje	+	-
Resolución	-	+
Framerate	0	0
Color	0	0
Prioridad	1	2

Table 4.9: Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: cámaras.

final de esta sección se mencionan los conceptos escogidos para las pruebas después de la evaluación y comparación de cada concepto entre su subsistema, sin embargo, estos también se pueden diferenciar en cada tabla como los conceptos de prioridad 1. Para definir la prioridad, el *más* genera una puntuación de +1, el *menos* de -1 y el *cero* de 0 puntos, luego estos se suman y el que tenga mayor puntuación tiene mayor prioridad. En caso de empate en esta puntuación, se debe considerar qué criterios tienen mayor peso entre sí.

La evaluación de los conceptos de cámaras, representado en el Cuadro 4.9, consideró la capacidad de la programabilidad de la cámara, su compatibilidad con el equipo de montaje disponible, la resolución del sensor, los cuadros por segundo de la captura de video de la cámara y color de la imagen. La cámara industrial de *Visión Artificial* (VA) posee la ventaja sobre la cámara de celular en la flexibilidad y facilidad de la programabilidad y en la compatibilidad con el montaje para cámaras que posee el laboratorio. Por otra parte, la cámara de celular posee una mayor resolución que la cámara industrial. La cantidad de cuadros por segundo de ambas cámaras es mayor a 30, por lo cual ambas son aceptables en este ámbito. Finalmente, si bien, la cámara industrial de VA sólo representa las imágenes en escala de grises, esto es deseable para el procesamiento, por lo que ambas cámaras se clasificaron como neutro en este aspecto.

La evaluación del montaje de las cámaras consideró: la estabilidad, la compatibilidad con la cámara, la estética y la compatibilidad con el área de trabajo, como se

Criterios de selección	Brazo de montaje	Cámara apoyada
Estabilidad	+	-
Compatibilidad con cámara	+	-
Estética	+	-
Compatibilidad con área de trabajo	0	0
Prioridad	1	2

Table 4.10: Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: montaje de cámaras.

muestra en el Cuadro 4.10. En la estabilidad, el brazo de montaje presenta mayores ventajas que el apoyar la cámara contra objetos o superficies. En la compatibilidad con las cámaras, posee la facilidad de tener un tornillo para su acople, el cual sirve especialmente con las cámaras industriales que posee el laboratorio. En estética, se ve más confiable, profesional y agradable el uso del brazo de montaje que la cámara apoyada. Por último, la compatibilidad con el área de trabajo depende del área de trabajo, puesto que la cámara apoyada depende de las dimensiones del espacio, las cualidades del espacio y demás materiales disponibles en la zona, mientras que el brazo de montaje depende de si tiene de donde sujetarse firmemente, como una mesa de relativo poco grosor, por lo que se le asignó una nota neutra a ambos conceptos en este criterio.

Para la evaluación del tipo de luz o iluminación se definieron 4 criterios como se muestra en el Cuadro 4.11. Para el primer criterio de área iluminada, el anillo de luz posee la capacidad de iluminar la mayor área, seguido por el *backlight* y por último, el domo de luz. En la distancia de trabajo, el domo se calificó como no deseable puesto que tanto este como la cámara sólo pueden estar a una distancia muy corta, el anillo se clasificó como el mejor pues su distancia de trabajo es la más flexible y adaptable a la cámara, mientras que el *backlight* se clasificó como neutro porque aunque su distancia de trabajo es muy inflexible, permite flexibilidad en la distancia de trabajo de la cámara. En el criterio de montaje, el *backlight* es el mejor, pues basta con apoyarlo en el área de

Criterios de selección	Domo de luz	Anillo de luz	Backlight
Área iluminada	-	+	0
Distancia de trabajo	-	+	0
Montaje	-	0	+
Luz difusa	+	-	+
Prioridad	3	2	1

Table 4.11: Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: tipo de iluminación.

trabajo. El montaje del anillo de luz se puede complicar un poco pero también se puede acoplar al montaje de la cámara, por lo que se clasificó como neutro. Mientras que el domo de luz posee la necesidad de ubicarse en un área plana, no muy compatible con la forma cilíndrica del tubo del área de interés. Para este proyecto, se determinó que la luz debía ser difusa para evitar reflejos en el tubo que generarían manchas blancas, o *hot spots* en la imagen capturada, por lo tanto, el domo de luz y *backlight* se clasificaron como deseables mientras que el anillo de luz como no deseable.

El subsistema del color de la luz se evaluó con tres criterios distintos, como se observa en el Cuadro 4.12. Los criterios utilizados fueron la compatibilidad con la luz, la estética y la ayuda que presentar al segmentar las imágenes. Esta última se distinguió con un asterisco ya que es condicional al resto del diseño, incluyendo la etapa de procesamiento de imágenes, por lo que podría no ser relevante. Al compara ambos conceptos, la luz blanca posee ventaja en la compatibilidad con la luz, pues estas ya son blancas por lo que no habría que hacer ninguna alteración a estas, a diferencia de si se quisiera adicionar un filtro de color. A nivel de estética, se considera que si la luz es blanca o de otro color, no se tiene gran diferencia por lo que ambos se clasificaron como no relevantes. Finalmente, en el ayudar al segmentar el filtro de color presenta ventaja por poder aumentar o disminuir el contraste de distintos elementos de la imagen, dependiendo de su color, como sería el caso del trazador.

El método de montaje para la iluminación se evaluó por medio de 4 criterios, los

Criterios de selección	Luz blanca	Filtro de color
Compatibilidad con luces	+	-
Estética	0	0
Ayuda al segmentar*	0	+
Prioridad	1	2

Table 4.12: Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: color de luz.

Criterios de selección	Apoyado en superficie	Unión no permanente
Estabilidad	0	+
Costo	+	0
Compatibilidad con luz	0	0
Alteraciones al espacio de trabajo	+	-
Prioridad	1	2

Table 4.13: Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: montaje de iluminación.

cuales correspondieron con la estabilidad, el costo, la compatibilidad con la luz y las alteraciones al espacio de trabajo necesarias, como se muestra en el Cuadro 4.13. En la estabilidad, las uniones no permanentes poseen la clara ventaja ya que la luz se fijaría firmemente, mientras que apoyado se tiene mayor vulnerabilidad a vibraciones y perturbaciones. En costo, se tiene una ligera ventaja para las luces apoyadas en la superficie de trabajo, ya que no habría costo adicional de comprar componentes, mientras que para las uniones no permanentes sí. En la compatibilidad con la luz, ambas se consideraron neutras, ya que ambas se podrían adecuar al tipo de luz que se seleccione. Finalmente, la iluminación apoyada sobre la superficie de trabajo no requeriría alteraciones al espacio de trabajo, mientras que las uniones no permanentes necesitarían agujeros con los que no se contaba.

La selección del material a utilizar como trazador fue una de las etapas más importantes, pues de este material dependía el poder destacar las líneas de flujo en el fluido. Puesto que el fluido utilizado fue agua, se requería de una sustancia con propiedades

Criterios de selección	Colorante vegetal	Tinta de lapicero	Tinta de marcador	Barniz de madera	Pintura de base no polar
Costo	+	0	0	-	-
Accesibilidad	+	+	+	0	-
Solubilidad en agua	Sí	No	Sí	No	Sí
Peso específico*	0.935	1.150	1.045	0.990	1.0 a 1.1
Prioridad	1	3	2	4	5

Table 4.14: Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: trazador.

físicas similares a la del agua como la densidad para evitar que se sumergiera al fondo del tubo o flotara, en lugar de desplazarse con el resto del líquido y con una viscosidad cercana a la del agua para que se mueva a una velocidad similar a la del agua. Sin embargo, era deseable que el material no se diluyera en el agua puesto que esto generaría que se perdiera la estela debido a la agitación que ocurre en el agua debido al giro del impulsor. Por lo tanto, los criterios de selección definidos en el Cuadro 4.14 son: el costo, la accesibilidad, si son solubles en agua y su peso específico, el cual se diferencia con un asterisco pues este valor puede variar entre colores del mismo material por el tipo de pigmento que se utilice para este o la marca de la sustancia. En costo, el colorante vegetal es el más barato, seguido por las tintas de lapicero y marcador, mientras que el barniz y las pinturas de base no polar, como la pintura a base de anilina, tienen un mayor costo. En accesibilidad, el colorante vegetal, la tinta de lapicero y la tinta de marcador son más fáciles de obtener, pudiendo encontrarse en supermercados y librerías. El barniz de madera también es de medianamente fácil acceso, pudiendo encontrarse en ferreterías, con que la pintura de base no polar siendo la más difícil de conseguir. De estas 5 sustancias, sólo la tinta de lapicero y barniz no son solubles en agua. Finalmente, en el cuadro se observan los pesos específicos para algunos de estos productos, recordando que pueden variar según marca y hasta color.

El método en el que se controla o se dosifica la adición del trazador fue de alta importancia para regular cuánto de este material ingresaba al tubo, permitiendo que se desplazara con el agua y no que se asentara o se disparara a mucha mayor velocidad

Criterios de selección	Por gravedad	Bomba peristáltica	Bomba sumergible	Bomba de vacío	Inyección manual	Válvula reguladora
Costo	+	-	0	-	+	+
Flujo constante	0	+	+	+	-	0
Ajuste de presión	-	+	+	+	-	0
Precisión del flujo	0	+	0	0	-	0
Prioridad	5	1	2	3	6	4

Table 4.15: Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: dosificación del trazador.

debido a la alta presión. Los principales criterios de selección considerados fueron el costo, la capacidad de generar un flujo constante, la capacidad de ajustar la presión y la precisión del flujo en cantidad de sustancia que ingresa por minuto y por iteración, según se observa en el Cuadro 4.15. La bomba peristáltica se definió como la mejor opción debido a su alta precisión para regular el flujo, con la única desventaja siendo su elevado costo relativo a las demás opciones. Seguidamente, la bomba sumergible, con un costo más bajo que el de la bomba peristáltica y por lo tanto, también un peor desempeño en confiabilidad, repetitividad y precisión. La bomba de vacío presentó cualidades muy similares a la bomba sumergible, pero con un costo elevado, similar a la bomba peristáltica. El concepto de utilizar una válvula reguladora o un conducto abierto a la presión atmosférica presentaron características similares, sin embargo, la válvula facilita el regular la cantidad de flujo aunque siempre limitado por la presión atmosférica y diferencia de altura en su presión máxima.

El método por el que se adiciona el trazador, implica el grosor de la estela que destaca el trazador, qué tanta presión se necesita para adicionar el trazador en el tubo y qué tanta distancia debe recorrer el trazador por el tubo antes de entrar en el campo de visión. Este último es de alta importancia cuando el trazador es soluble en agua, pues se difumina conforme avanza y puede no poder observarse en las imágenes una vez que llega al área de interés. Por lo tanto, se definieron 4 criterios de selección, como se muestra en el Cuadro 4.16. En el costo, la aguja tiene el menor precio, seguida

Criterios de selección	Aguja	Tubo capilar	Manguera
Costo	+	-	0
Accesibilidad	+	-	0
Grosor de la línea	+	+	-
Largo	-	+	+
Prioridad	1	2	3

Table 4.16: Evaluación y comparación de conceptos del subsistema: adición del trazador.

por la manguera y por último el tubo capilar. Este comportamiento se mantiene en la accesibilidad. Por otra parte, el grosor de la línea de producen la aguja y el tubo capilar en mucho más deseable que el que produce una manguera, incluso si esta es delgada, no es comparable con los otros dos. Finalmente, en el largo, la aguja se ve altamente limitada en comparación con el tubo capilar y la manguera.

4.5 Pruebas de Concepto

En esta sección se desarrollan las pruebas de concepto realizadas, los resultados de cada una, las conclusiones obtenidas y el rediseño, repitiendo los pasos anteriores hasta tener un concepto con resultados aceptables en estas pruebas. Esta sección se divide en 3 grupos de pruebas, los cuales evaluaron la captura de imágenes, la iluminación y el trazador, donde en cada prueba consecuente, también se evaluaron los conceptos previos, ya que el trabajo en conjunto de todos es necesario para el funcionamiento adecuado del sistema completo. Las pruebas detalladas en esta sección no incluyen las competentes a la planta, puesto que esas se especifican en la Sección 4.6, sin embargo, las pruebas de concepto mencionadas a continuación se hicieron en consideración del diseño de la planta.

4.5.1 Captura de Imágenes

Para la captura de imágenes se realizaron pruebas con las cámaras Cognex In-Sight 7200 y Cognex In-Sight 7010, que para simplicidad se les va a referir a ambas como cámaras Cognex serie 7000. Por medio de estas pruebas se determinó que el procesamiento de las cámaras era muy lento por cada imagen por lo que las cámaras se utilizarían sólo para capturar las imágenes y el procesamiento se haría a posteriori en la misma computadora en la que se almacenarían las imágenes tomadas. Las pruebas también demostraron que la tasa de captura era suficiente para capturar un video que se observara de manera fluida. El montaje de las cámaras por medio de los brazos de montaje para cámaras, mostró resultados favorables, en el que es fácil colocar las cámaras en el área de trabajo y de forma repetible entre pruebas. Por último, se logró una sincronización de la captura de imágenes con ambas cámaras para obtener imágenes del tubo con 2 vistas diferentes.

Como conclusiones de estas pruebas, se delimitó que las cámaras Cognex serie 7000 con los brazos de montaje eran adecuados para la captura de imágenes del sistema, las cuales se configurarían para capturar imágenes de manera sincronizada y en 2 vistas distintas, como se observa en la Figura 4.6. Adicionalmente, se delimitó que el procesamiento de las imágenes se realizaría por medio de una programación realizada y compilada por la computadora, en lugar de un procesamiento desde las cámaras que guardara en la computadora las imágenes ya procesadas. Por último, la resolución de estas cámaras es de 800 x 600 píxeles, por lo que una imagen de 30 cm de largo podría perder información de los detalles, como podría ser la línea de flujo si era muy delgada, por lo que se debía tener en mente esto para definir el área de interés de la imagen.

4.5.2 Iluminación

Las pruebas de concepto de la iluminación se realizaron inicialmente con el anillo de luz y el backlight que facilitó el laboratorio, los cuales se observan en las Figuras 4.7 y 4.8, respectivamente. De estas pruebas se observó que el anillo de luz generaba reflejos



Figura 4.6: Configuración del montaje de las cámaras. (Elaboración propia).

de luz dentro del tubo, como se aprecia en la Figura 4.9, al igual que la luz externa que también las generaba si se alejaba más el anillo de luz para evitar estos reflejos. Por otra parte, el backlight no generaba los *hot spots*, sin embargo el área iluminada estaba limitada por las dimensiones de esta luz, uno de los resultados de estas pruebas conceptuales se muestra en la Figura 4.10. El montaje para el backlight resultó más sencillo que el del anillo de luz debido a su geometría y posición en la mesa con respecto a la planta, sin embargo, si se colocaba de manera vertical, se volvía más inestable por su delgada base, por lo que requería una mejor base de apoyo.

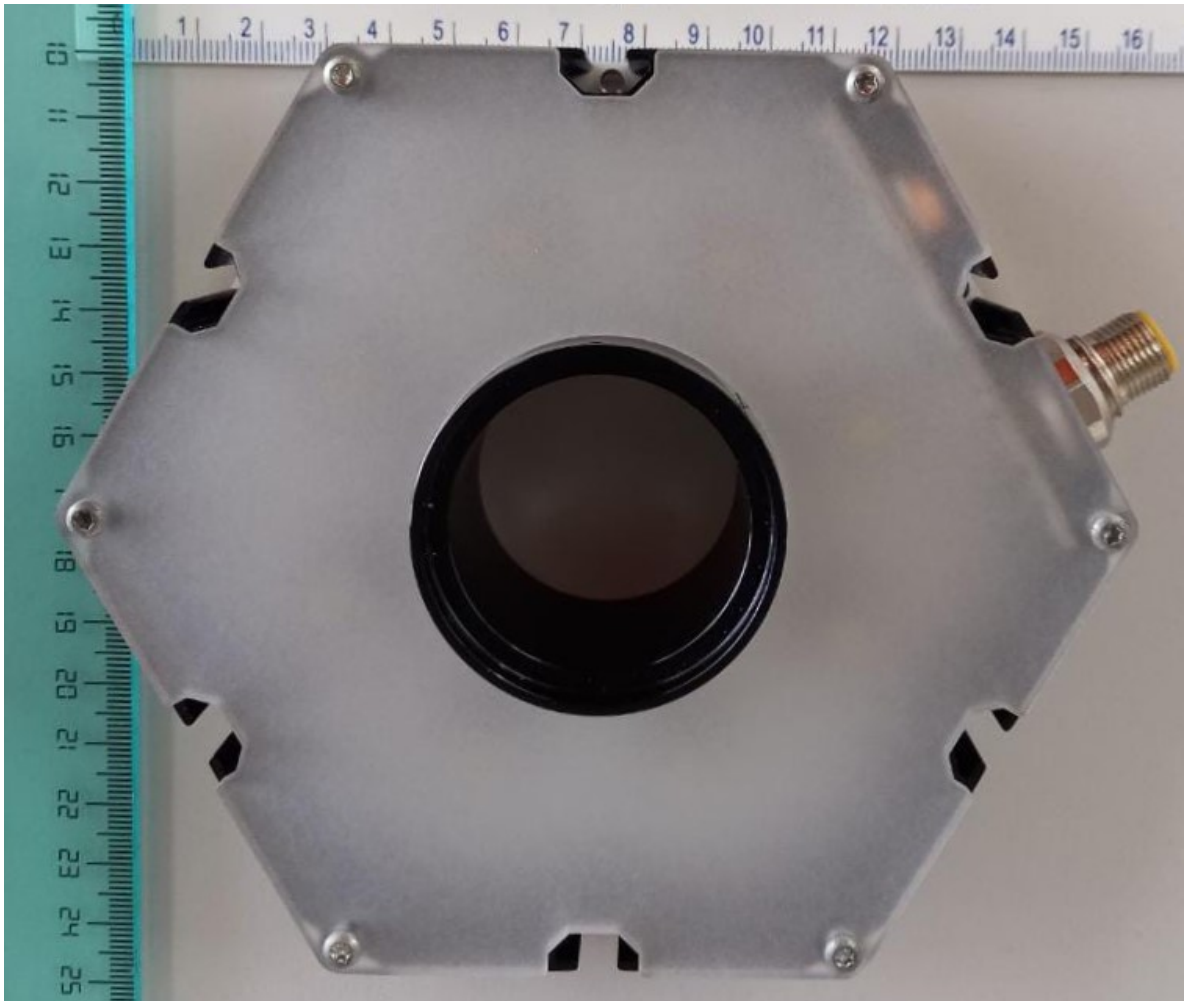


Figura 4.7: Anillo de luz facilitado por el *LIANA*. (Elaboración propia).

De estas pruebas se concluyó que el backlight presentaba mejores resultados que el anillo de luz, sin embargo, se necesita un segundo backlight o uno más grande para

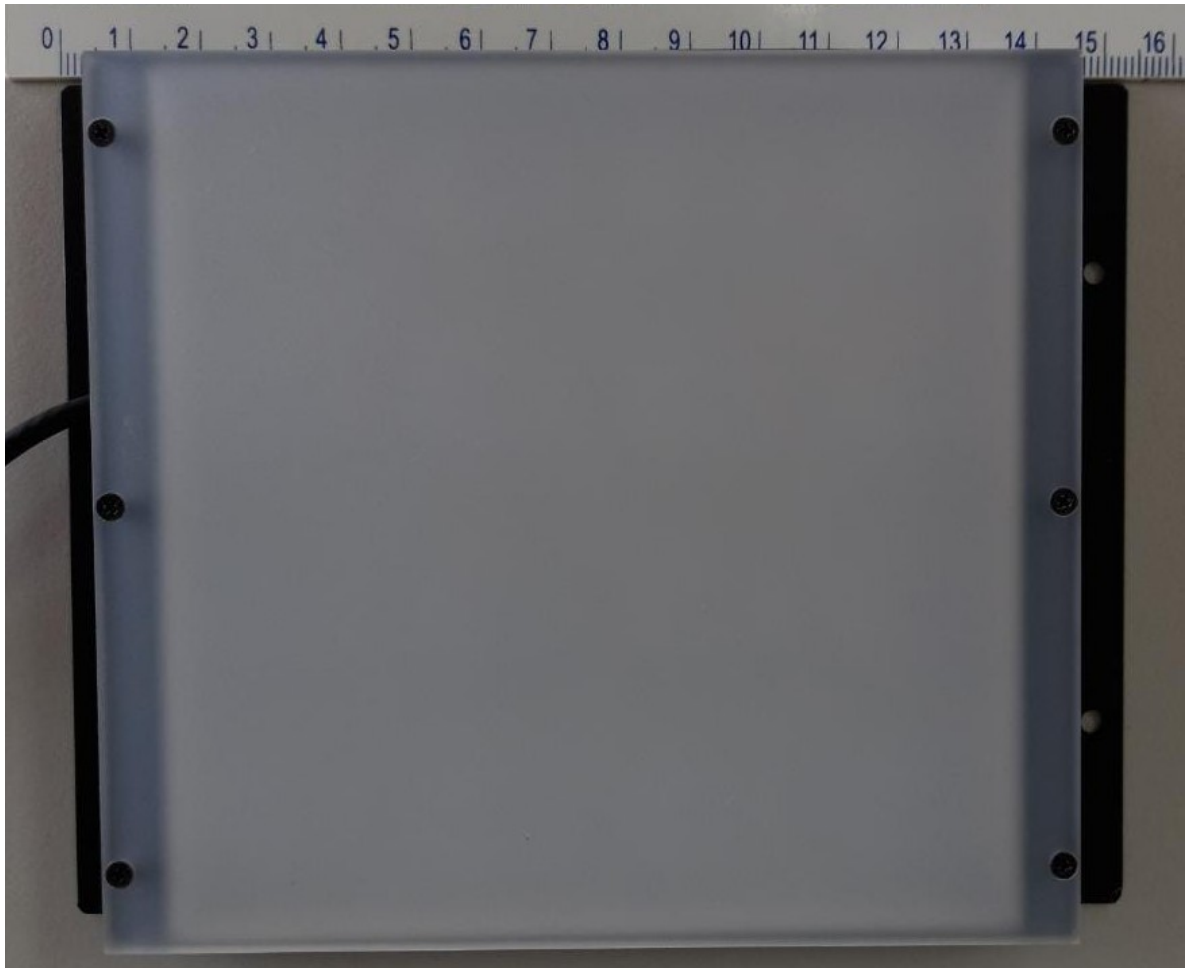


Figura 4.8: Backlight facilitada por el *LIANA*. (Elaboración propia).

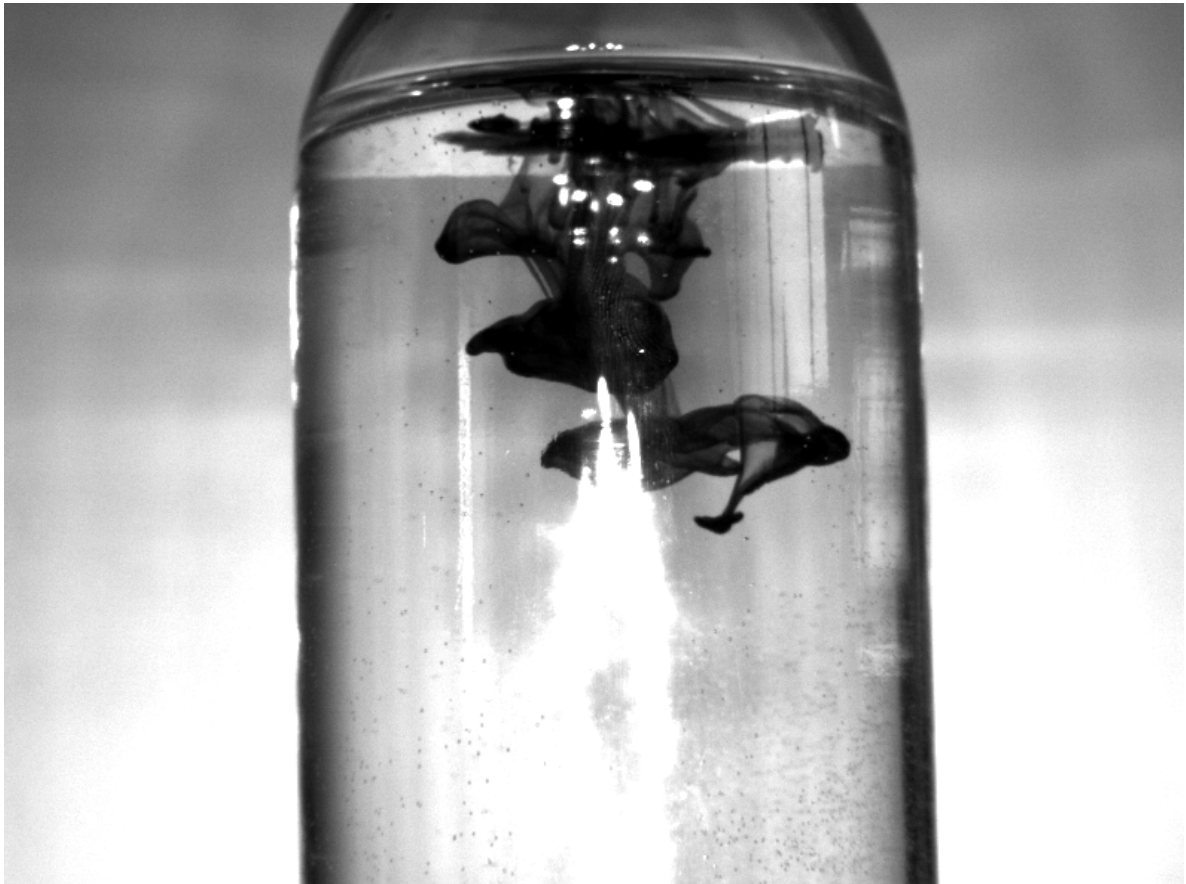


Figura 4.9: Imagen capturada con cámara Cognex iluminando con el anillo de luz facilitado por el *LIANA*. (Elaboración propia).



Figura 4.10: Imagen capturada con cámara Cognex iluminando con el backlight facilitado por el *LIANA*. (Elaboración propia).

poder observar una mayor extensión del tubo. Por lo tanto, se realizó un rediseño para realizar un backlight de luminarias de luz LED para techo. Se hicieron varias propuestas de distintos tamaños, precios y formas, de lo que se delimitó que la mejor opción era de forma rectangular, con un gran tamaño, sin embargo, el precio de esta luminaria era muy elevado, por lo que se optó por dos luces cuadradas más pequeñas que se podrían colocar lado a lado, este diseño implementado se muestra en la Figura 4.11. Las pruebas realizadas con este diseño de luces se hicieron con un impulsor de plástico de color opaco, sin embargo, luego se rediseñó el impulsor para usar uno impreso en resina, por lo que era transparente y al colocarle estas luces, el impulsor desaparecía en las fotos por ser transparente, por lo que se optó por colocar una delgada lámina de acrílico de color frente a las luces para disminuir su intensidad y así poder observar el impulsor en las imágenes, sin perder los detalles del tubo y primordialmente, las líneas de flujo. En este punto se consideraba mejor utilizar ambas cámaras para ver distintas secciones de un mismo plano, para ver una mayor extensión de tubo. Después de algunas pruebas del trazador se optó por colocar ambas cámaras mirando la misma sección de tubo de forma perpendicular y realizando 2 corridas distintas, utilizando el diseño de luces de la Figura 4.12, una observando el tubo a la entrada del impulsor y otra a la entrada, de manera que se pudiera observar una mayor sección del tubo y manteniendo las dos vistas, esta justificación se detalla en las Sección 4.5.3.

4.5.3 Trazador

Para el sistema del trazador primeramente se probó utilizando una aguja de jeringa intradérmica para la adición de colorante vegetal diluido en agua y dosificado por medio de una bomba sumergible a través de una manguera de silicona, como las empleadas en peceras. Al ser el colorante diluido en agua a priori, se lograba tener propiedades de densidad y viscosidad similares a la del agua, por lo que el colorante se desplazaba con el agua permitiendo ver la línea de flujo, sin embargo, luego se dispersaba mucho



Figura 4.11: Diseño de backlight, para dos vistas paralelas. (Elaboración propia).

y ya no se podía apreciar su trayectoria, en especial una vez que la estela alcanzaba el impulsor. Se intentó sustituir la aguja por una más larga, no obstante, la más larga que se consiguió era un catéter, el cual no era considerablemente más largo que la aguja que se tenía previamente.

Debido a los resultados anteriores, se consideró utilizar la siguiente opción del Cuadro 4.14, una tinta de lapicero, la cual no era soluble en agua, sin embargo, al ser esta a base de aceite, tenía una densidad similar a la de un aceite. Por lo tanto, una vez que se adicionaba esta tinta al agua, la tinta se suspendía en la parte superior del tubo en lugar de seguir la trayectoria del agua. Por otra parte, se logró conseguir una aguja mucho más larga, facilitada por uno de los laboratorios de la Escuela de Química del *TEC*, esta aguja alcanzando los 15 cm y superando en más del doble la aguja anterior.

Después de múltiples intentos y búsquedas bibliográficas, se consultó con el encargado del laboratorio de termofluidos del *TEC*, donde uno de los experimentos de este

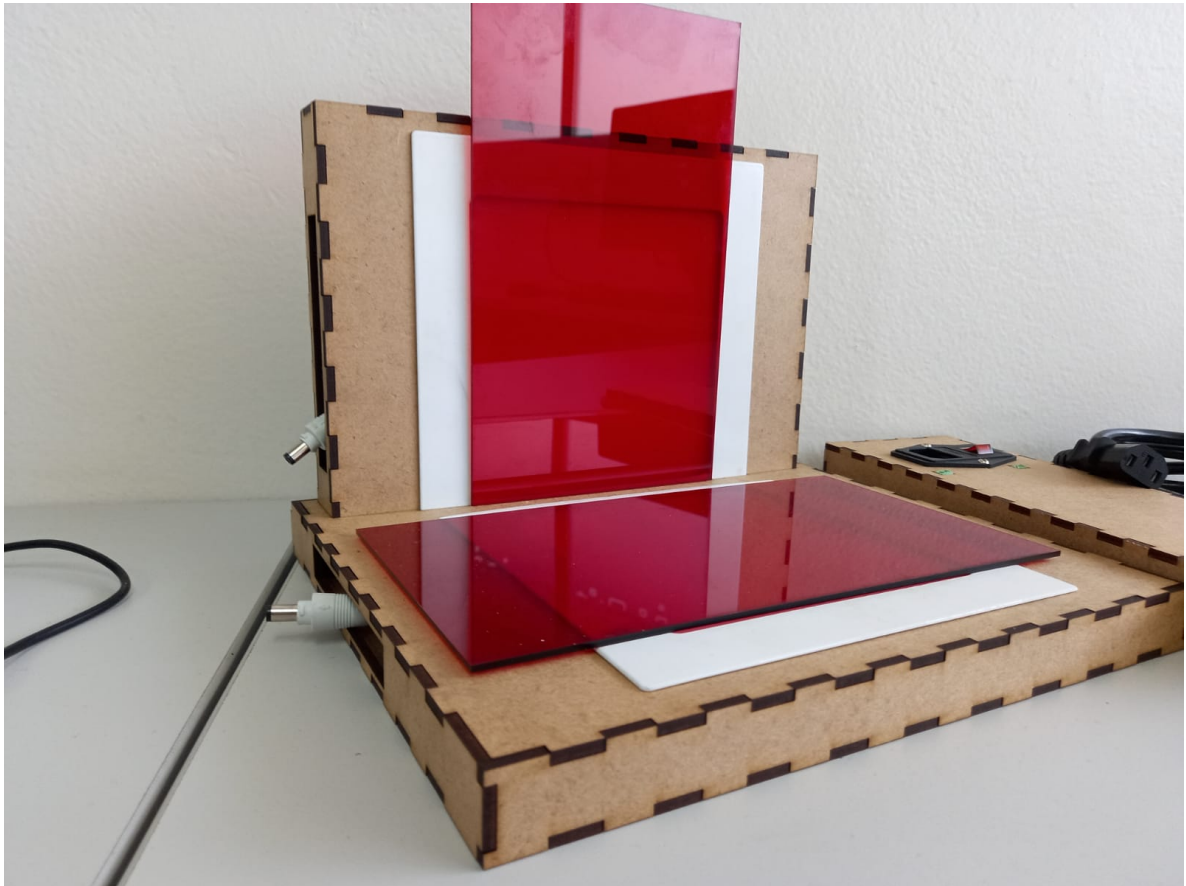


Figura 4.12: Diseño final del backlight, para dos vistas perpendiculares. (Elaboración propia).

laboratorio es el experimento de Reynolds, cuál es la tinta que utiliza el laboratorio para el experimento de Reynolds. A lo cual el encargado respondió con 2 opciones, una tinta china marca Staedtler que utilizan actualmente y una tinta de lapicero marca Pelikan que era la que traía la máquina originalmente. Al no haber disponibilidad a nivel nacional de la tinta de lapicero recomendada, se optó por la tinta china, la cual era soluble en el agua, por lo que los resultados obtenidos fueron similares a los del colorante vegetal diluido en agua. Finalmente, se consiguió la tinta original de la máquina de Reynolds, sin embargo, esta era parcialmente soluble en el agua por lo que el resultado final a la salida del impulsor seguía siendo el mismo.

En las Figuras 4.13 y 4.14 se observan imágenes capturadas con el sistema de visión donde se probó el sistema con ambas tintas y se evaluaron los resultados para determinar la mejor. Al comparar los resultados entre la tinta de lapicero importada y la tinta china, la forma de la línea de flujo era mejor en la segunda, al igual que la cantidad de tinta disponible permitía mayor flexibilidad para el manejo. Esto puesto que la tinta de lapicero era tan poca que no se podía dosificar con bomba ni por gravedad por lo que se utilizaba una jeringa para hacer la dosificación de forma manual, lo cual incrementa la variabilidad entre pruebas. Por otra parte, la tinta china se podía regular su flujo con una válvula, ya que la cantidad era suficiente para llenar el tubo sin preocuparse de que no alcance la tinta, aunque no la suficiente para utilizar la bomba sumergible de manera confiable. Además, el flujo de la bomba era muy elevado y la adición de la tinta se hacía de forma turbulenta, a diferencia de por gravedad o con la válvula con la cual ocurría un goteo leve que bajo el agua generaba una adición progresiva y constante de tinta.

En conclusión, el método de adición seleccionado fue una aguja de gran tamaño, dosificando el flujo del trazador con una válvula y la altura de esta y con una tinta china de color negro como trazador. Consecuentemente, como la tinta utilizada es soluble en agua, se optó por capturar las imágenes del proceso en 2 iteraciones distintas, una en



Figura 4.13: Imagen capturada con cámara Cognex en la planta para la entrada del impulsor, con tinta china Staedtler como trazador. (Elaboración propia).

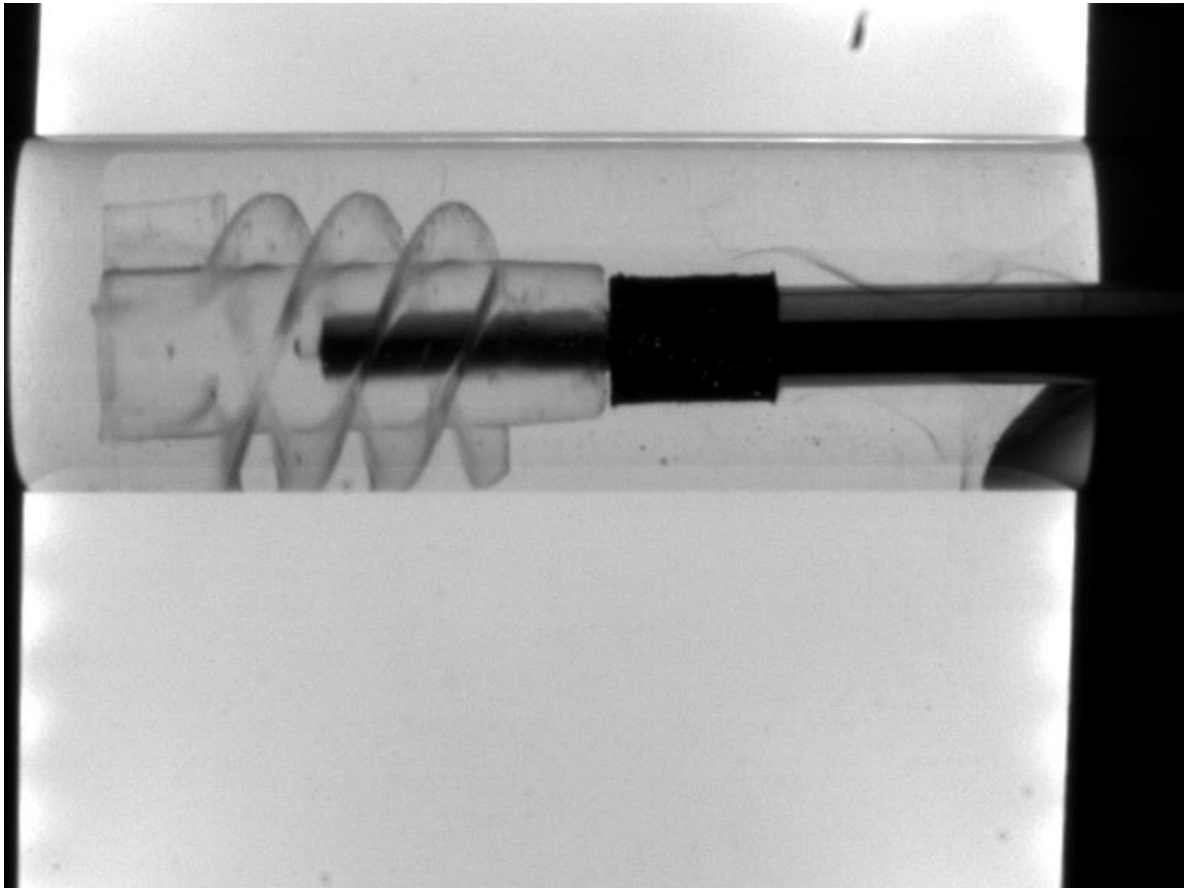


Figura 4.14: Imagen capturada con cámara Cognex en la planta para la entrada del impulsor, con tinta marca Pelikan como trazador. (Elaboración propia).

la que se observaba el comportamiento a la entrada del impulsor y otra en la que se observaba el comportamiento a la salida, ambos con una sección del impulsor también visible. Esto con la intención de adecuar la cantidad de tinta que se utilizó según lo que se quería observar al igual que poder variar la distancia entre la aguja y el impulsor para disminuir o aumentar la distancia que tiene que recorrer la tinta antes de entrar al área de interés y así afectar cuánto se ha diluido antes de ser visible.

4.6 Rediseño de la Planta

El rediseño de la planta se realizó muy de la mano con el cliente, por lo que algunos de los criterios de diseño fueron realizados por parte del *SIBILA*. Este procedimiento se dividió en 4 etapas distintas, las cuales representan el ensamble de la planta, las modificaciones y diseños realizados al sistema mecánico, la modificación en el diseño del rectificador y variaciones en el impulsor.

4.6.1 Ensamblaje de la Planta

Lo primero que se ensambló de la planta fue el tanque de agua hecho de láminas de acrílico. Como primera opción para pegar el tanque se optó por utilizar silicona caliente debido a su bajo costo y accesibilidad. La silicona caliente permitió armar el tanque de forma sencilla y rápida, el tanque era lo suficientemente resistente y mantenía adecuadamente su forma, sin embargo, una vez que se le agregaba agua, habían muchas fugas. Aunque las fugas se repararan con la misma silicona, debido a la presión del agua con el tanque lleno y la manipulación del tanque, con el tiempo se formaban fugas nuevas. Por lo tanto, se optó por utilizar cloroformo para pegar el tanque de acrílico, el cual también tiene un costo bajo pero tiene menor accesibilidad, por lo cual no fue la primera opción. El cloroformo se agregó con una jeringa en las aristas internas del tanque, lo cual disolvió parte de ambas láminas, creando una unión permanente como

una soldadura.

El ensamblaje de los tubos y codos se realizó con pegamento para PVC, el cual fue facilitado por el cliente. Luego, las uniones de los tubos al tanque se hicieron con uniones roscadas una de cada lado de la cara del tanque. En esta etapa se encontró con el problema que habían fugas de agua en las uniones roscadas pues estas necesitaban mucha fuerza para quedar completamente selladas y debido a su ubicación en el tanque, se dificultaba el uso de herramientas para sujeción y giro. Por lo tanto, se intentó sellar estas fugas con silicona caliente que todavía se tenía, no obstante, esto generaba el mismo problema que con el tanque de agua. Entonces, se soltaron las uniones roscadas y se les agregó un pegamento de silicona frío en las roscas y se volvió a ensamblar antes de que el pegamento se secase. Esta última opción solucionó las fugas de agua en las uniones del tubo con el tanque puesto que el pegamento se amoldó a la geometría de las roscas, sellando el tanque y solucionando el problema de fugas en esta zona. Más adelante, se empezó a filtrar el agua por la parte externa de las uniones, por lo cual se aprovechó la misma silicona fría para agregar un cordón de pegamento al rededor de estas uniones, en el perímetro externo del área en contacto con la cara del tanque, lo cual solucionó estas fugas.

4.6.2 Sistema Mecánico

En primera instancia, al sistema mecánico se le debía corregir la falencia de no poseer una forma de sujetar y acoplar los elementos. Entre estos diseños se encuentran, una pieza para acoplar el eje del motor con la polea de 20 dientes y la forma de colocar y sujetar el motor. El acople del eje del motor con la polea se realizó tomando el perfil D del eje como agujero interno y el diámetro interno de la polea como diámetro externo de la pieza y se imprimió en 3D en plástico. Esta pieza se acopló al eje a presión y se sujetó a la polea con los tornillos que poseía esta. La ubicación del motor se debía establecer de manera que el motor quedara alineado con el final del eje y a una distancia

de este adecuada para el largo de la polea. Además, se debía considerar que la correa debía quedar a tensión pero debía poder montarse en las poleas de manera sencilla sin amenazar con romper o dañar la correa.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores y para poder ubicar el motor a una altura por encima del nivel del agua, se diseñó una tapa de acrílico para el tanque de agua que cubriera parcialmente el tanque. Las dimensiones de esta tapa permitían colocar el motor sobre esta o debajo de esta con su eje saliendo, de forma que al acoplarle la polea, esta quedara alineada con la otra polea que se colocaba en el eje. La distancia entre ejes adecuada para estas poleas y correa se puede calcular según el largo de la correa, sin embargo, esto no soluciona el problema del montaje. Por lo tanto, el diseño se afrontó de manera geométrica, como se observa en la Figura 4.15. En la Figura 4.15, se observa que dado que la distancia entre ejes es fija, la circunferencia que se genera cuando se utiliza esta distancia como radio, centrado en el eje del impulsor, interseca en 2 puntos el plano a la altura a la que se coloca el eje del motor, siempre y cuando la distancia entre ejes sea mayor que la distancia entre el eje del impulsor y el plano. De esta forma se resolvió geoméricamente, la ubicación del motor para la distancia entre ejes definida por las poleas y correa dentada disponibles. Adicionalmente, según un cálculo aproximado, se aseguró que la distancia entre los puntos de la intersección fuera menor que la distancia máxima del rango de movimiento del motor, o en otras palabras, el interior del tanque.

Por lo tanto, se diseñó el montaje del motor de forma que se pudiera desplazar el motor hacia los lados en relación al eje, permitiendo así tanto colocar el motor a una distancia adecuada del eje, como aumentar o disminuir la tensión de la correa para facilitar el montaje. Finalmente, se diseñó para imprimir en 3D una pieza que sostuviera el motor sujetándolo por debajo de la tapa diseñada debido a que si se colocaba sobre la tapa, no habría intersección entre la circunferencia de la distancia entre ejes con el plano del eje del motor, este diseño se muestra en la Figura 4.16.

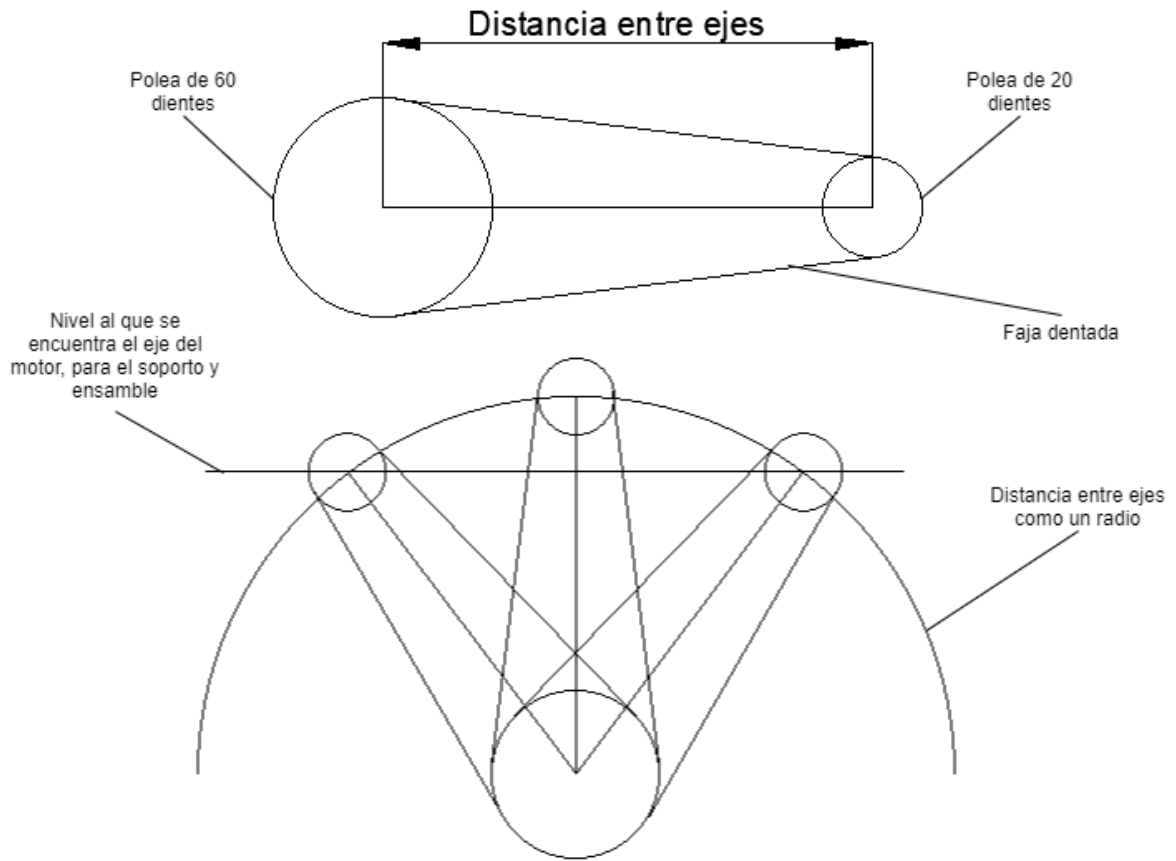


Figura 4.15: Diagrama para el diseño del montaje del motor para las poleas. (Elaboración propia).

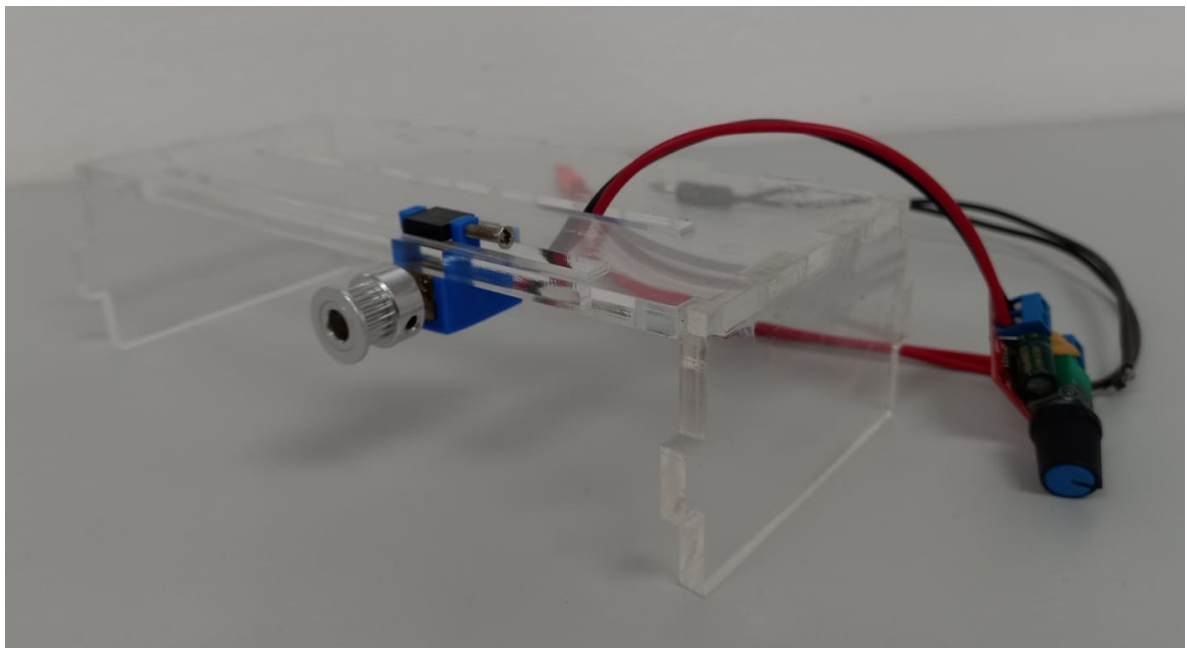


Figura 4.16: Foto del soporte para el motor. (Elaboración propia).

Una vez implementados estos diseños, se probó el sistema, con lo cual se observó que el motor disponible tenía una velocidad máxima de giro y un torque de salida muy bajos, con 90 rpm y $0.8 \text{ kgf} * \text{cm}$ respectivamente. Por lo tanto, este motor se sustituyó por un motor de corriente continua con caja reductora con una velocidad máxima de 460 rpm y un torque de salida de $1.44 \text{ kgf} * \text{cm}$. Por otra parte, el cambio del motor implicó un cambio en la pieza de acople con la polea, para lo cual se siguió el mismo procedimiento que para la versión anterior, donde se utilizó el perfil del eje del motor para las dimensiones del orificio interno. Como el eje del segundo motor era mucho más pequeño que el eje del primero, el orificio en la pieza de acople era muy pequeño para la boquilla de la impresora, por lo que al imprimirlo en plástico, el agujero quedó deformado y el eje no entraba. Entonces se volvió a imprimir la pieza manteniendo las dimensiones pero en una impresora 3D de resina que permitía una mayor resolución y detalle.

Además de tener que cambiar la pieza de acople, se tuvo que cambiar la pieza de sujeción del motor, por el diseño mostrado como la Versión 2 en la Figura 4.17. La segunda iteración era muy delgada, por lo que el motor quedaba vulnerable a torcerse y quedar desalineado con relación al eje del impulsor, lo cual ocasionaba oscilaciones en el eje y perturbaciones en el flujo. Por esta razón, luego se modificó esta pieza para mantener el motor en una posición más estable, este es la Versión 3 del diseño que se observa en la Figura 4.17. El primer mecanismo de sujeción para el motor utilizaba 2 pernos que atravesaban el motor que poseía 2 agujeros para el ensamble. Por otro lado, el segundo y tercer diseño de sujeción empleaba uno de estos pernos pero atravesando el orificio de las piezas de montaje, ya que el segundo motor no poseía agujeros para el ensamble.

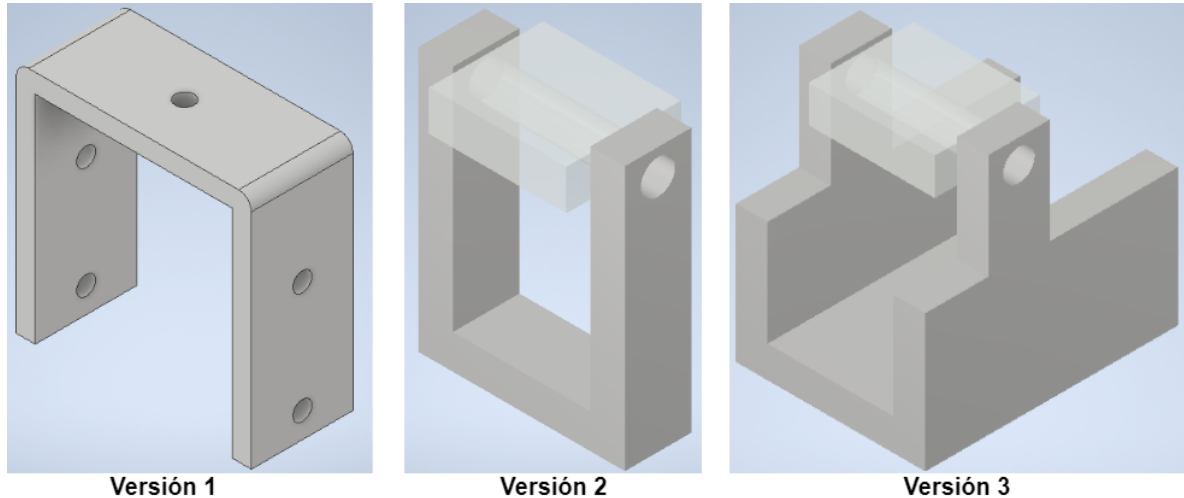


Figura 4.17: Progresión de los ensambles para la sujeción del motor. (Elaboración propia).

4.6.3 Rectificador de Flujo

El principal objetivo de la planta es utilizar un impulsor para generar un flujo laminar. Como el impulsor funciona completamente sumergido en el agua, era necesario implementar un sistema de transmisión de potencia mecánica para mantener el motor que genera el movimiento giratorio del impulsor afuera del agua para evitar que este se dañara. Este sistema de transmisión generaba turbulencia en el agua del tanque, por lo que se consideró necesario la implementación de un rectificador de flujo para separar cada extremo del eje. Adicionalmente, este rectificador facilitaría el montaje del eje y posteriormente también facilitaría el montaje de sistema de adición del trazador.

En la Figura 4.18 se observan los distintos modelos de rectificador utilizados y su progresión de izquierda a derecha. La geometría externa se mantuvo igual siempre, pues el acople con el tubo fue el mismo durante todo el proyecto. El primer rectificador prácticamente no rectificaba nada del flujo pues los agujeros eran muy grandes, además no permitía un acople adecuado con el sistema de adición del trazador. La segunda iteración, tenía el error opuesto a la primera, donde los orificios eran tan pequeños que se dificultaba mucho el desplazamiento del líquido del tanque de suministro de agua al tubo. Por otra parte, la segunda iteración presentaba la ventaja de permitir

pasar una aguja por los orificios del rectificador para adicionar el trazador al flujo a través de dicha aguja. El tercer modelo tenía 3 arreglos circulares de orificios, donde los agujeros internos y externos permitían el flujo del agua, mientras que los agujeros del arreglo central permitían el montar una o varias agujas para la adición del trazador. La geometría utilizada por la tercera iteración, se mantuvo para las siguientes 2 versiones.

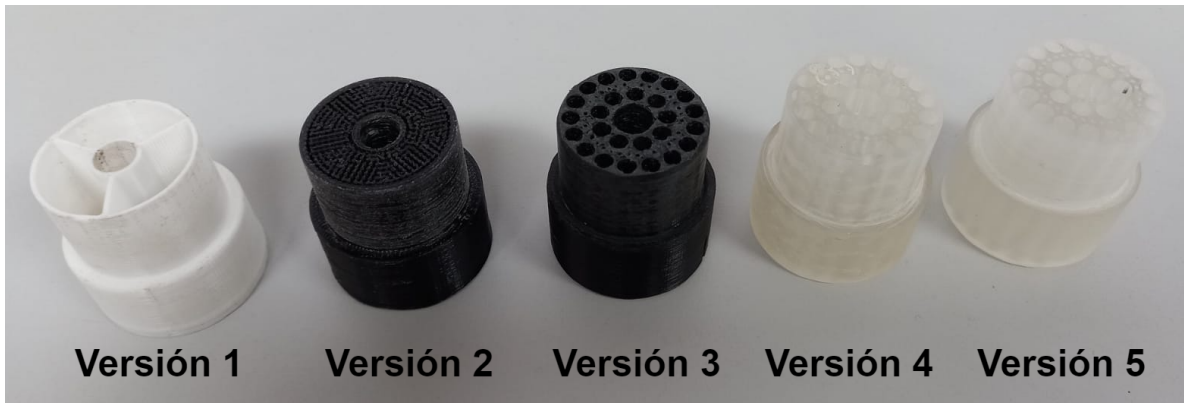


Figura 4.18: Progresión de los diseños del rectificador de flujo del proyecto. (Elaboración propia).

Las primeras 3 versiones del rectificador se realizaron con impresión 3D en plástico, mientras que las siguientes 2 se imprimieron en 3D pero en resina. El 4 y 5 diseños se ven iguales a simple vista, sin embargo, durante el proceso de formación del cuarto modelo, los agujeros más pequeños, por los que pasan las agujas, se bloquearon. Se descubrió que este bloqueo ocurrió debido a que el proceso de impresión 3D de resina involucra 3 etapas, una de formación en la impresora, otra de limpieza en alcohol y otra de endurecimiento por medio de luz ultra violeta. En la primera etapa, la resina se encuentra en estado líquido y por medio de un rayo láser se va formando en la geometría deseada por lo que durante este proceso, algunas gotas de resina quedaron atrapadas en los orificios pequeños debido al efecto de capilaridad, por lo que en la etapa de endurecimiento, esta resina líquida se endurecía y bloqueaba los agujeros. Por lo tanto, para la quinta iteración se tomaron 2 medidas para solucionar dicho problema, la primera fue orientar la pieza de forma más vertical en lugar de horizontal para ayudar

a escurrir la resina líquida que quedaba atrapada. La segunda medida implementada, fue en la etapa de limpieza con alcohol, en la que se utilizó una jeringa para inyectar el alcohol a presión a través de los orificios para poder remover cualquier resina que pudiera haber quedado atrapada.

4.6.4 Impulsor

Durante la realización del proyecto, se utilizaron 3 impulsores con características distintas, sin embargo, todos con la misma geometría. El único modelo de impulsor implementado en este proyecto, fue el de eje central, que era el único modelo disponible de parte del *SIBILA*. Los 3 impulsores utilizados se muestran en la Figura 4.19, en orden de implementación de izquierda a derecha. Los 3 impulsores fueron fabricados con impresión 3D, el primero fue hecho de plástico, mientras que los otros dos fueron impresos en resina. El primer impulsor presentaba un rendimiento deficiente pues algunas de sus aspas estaban parcial o completamente rotas. El segundo y tercer impulsor mostraron un desempeño equivalente en lo que respecta al movimiento del fluido, sin embargo, se optó por utilizar el impulsor traslúcido pues presentaba ventajas en la captura de imagen como poder observar el trazador cuando este pasa por debajo o detrás del impulsor.

4.7 Diseño del Procesamiento de Imagen

El diseño de la etapa de procesamiento digital de las imágenes capturadas se realizó con las metodologías mencionadas en el Capítulo 3, por lo que el diseño se realizó de manera incremental y realizando múltiples pruebas de distintos métodos para comparar los resultados entre sí. El principal objetivo de la etapa de procesamiento era el poder apreciar con mayor claridad y facilidad la trayectoria, posición y comportamiento del agua en respuesta a la operación del impulsor dentro del tubo. La principal forma con

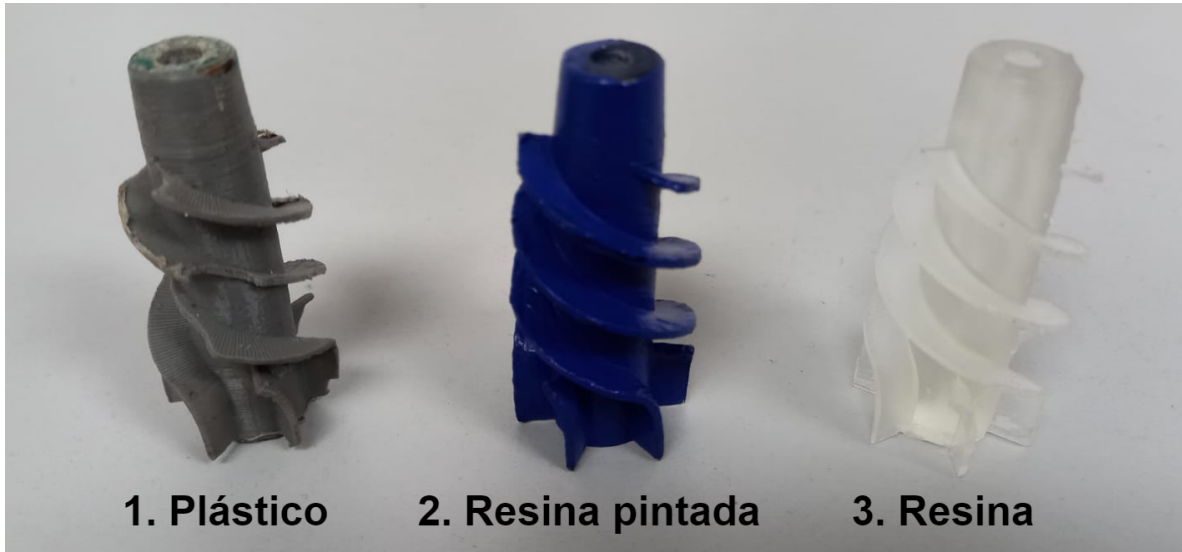


Figura 4.19: Progresión de los impulsores utilizados en el proyecto. (Elaboración propia).

la que se pretendió observar estas características, fue con el uso de un trazador, el cual generaría contraste entre una o más líneas de flujo y el resto del agua dentro del tubo. Por lo tanto, se realizó el procesamiento de las imágenes para alterar sus características y facilitar el cumplimiento de los objetivos. El procesamiento realizado se dividió en 2 etapas, una de preprocesado y otra de segmentación, donde en la primera se harían ajustes y cambios a la imagen que está siendo procesada para facilitar la segmentación. Por otra parte, la segmentación permitiría obtener una imagen de la cual fuera más fácil el obtener las características deseadas que con la imagen original.

4.7.1 Versión 1

4.7.1.1 Preprocesado

El objetivo del preprocesado era realizar una segmentación para observar con mayor facilidad y claridad las características del fluido. Como se utilizó como trazador una tinta de color negra, una de las características que se quería mejorar era el contraste entre el trazador y el agua. Por otra parte, la región de interés es el interior del tubo, sin embargo, como el tubo era de plexiglass y se utilizaron luces desde 2 direcciones,

se generaban algunos reflejos dentro del tubo. La existencia de reflejos afectaría el observar la forma del trazador y podría afectar la segmentación. Del mismo modo, las burbujas dentro del tubo o partículas en el exterior del tubo y sobre las luces o el lente de la cámara también podrían dificultar la segmentación. Por último, las regiones externas al tubo no son de interés, sin embargo estas podrían afectar la segmentación. Por lo tanto, la etapa de procesamiento contemplaba todos estos factores para tomar las decisiones de diseño.

En primera instancia, se probaron los filtros y algoritmos de manera individual y luego en combinaciones, uno después de otro. Los primeros métodos que se probaron fueron el filtro Gausseano y filtro de mediana local para eliminar las burbujas y partículas externas que se ubicaban en el exterior del tubo o sobre la luz o el lente. El resultado de estas pruebas mostraba adecuado resultado para eliminar estas imperfecciones, sin embargo, también la imagen se volvía más borrosa y se perdía contraste en los bordes de las geometrías, incluyendo las líneas de flujo, por lo que se dificultaba más verlas.

Por otro lado, se probaron algoritmos para incrementar el contraste de la imagen y por lo tanto, incrementar el contraste entre el trazador y el agua. Para este aumento de contraste se probaron las funciones Ecualización de Histograma Adaptativa de Contraste Limitado (*CLAHE*), Ecualización de Histograma, Corrección Gamma, Corrección Logarítmica de la imagen y la función Incrementar Contraste. La primera de las anteriores mostró un incremento en el contraste de la imagen aunque también se oscurece un poco la imagen de manera general. La segunda función incrementó el contraste principalmente entre el interior del tubo y el exterior del tubo, pero no tanto entre los elementos dentro del tubo y el fondo del tubo. Por otra parte, se incrementa el contraste del ruido y partículas externas pero a su vez se incrementa el contraste del trazador con el agua. La función de Corrección Gamma incrementó en cierta medida el contraste entre el trazador y el agua, sin embargo, la imagen se oscurece de

manera general. Por otra parte, la función de Corrección Logarítmica no incrementó el contraste entre el trazador y el agua, solo oscureció la imagen de manera general. La última función incrementó el contraste entre algunos elementos, sin embargo, agrupó otros elementos que tenían bajo contraste entre sí, como el caso del trazador con el agua, que se agruparon, perdiendo parte de la forma del trazador.

Como el área de interés de la imagen era la de afuera del tubo, se implementó un algoritmo de detección de líneas para determinar los bordes del tubo y así poder etiquetar el exterior del tubo como fondo de la imagen, es decir, una semiumbralización de la imagen. Antes de determinar las líneas del tubo, se aplicó un filtro para detectar los bordes dentro de la imagen, para lo cual se probaron las funciones Farid, Laplace, Prewitt, Roberts, Schar y Sobel, las cuales todas presentaron resultados prácticamente iguales. No obstante, se redujeron las posibilidades a las funciones que también tuvieran la opción de detectar únicamente las líneas verticales u horizontales, los cuales corresponden a las funciones Farid, Prewitt, Schar y Sobel. De las anteriores se continuó con la Farid por ser la de mayor simplicidad, aunque eso también implicó menor versatilidad, lo cual se consideró innecesario y de ser necesario más adelante, sencillo de cambiar. Una vez detectados los bordes, se realizó una binarización por umbralización de nivel para dejar sólo los bordes más prominentes y notorios. Después, se aplicó la Transformada de Hough para líneas rectas para detectar la posición y orientación de las líneas rectas en la imagen. Seguidamente, se delimitaron las principales 2 líneas detectadas con la función para determinar los mayores picos de las líneas detectadas con la Transformada de Hough para líneas rectas. Conociendo la ubicación y orientación de las líneas del exterior del tubo, se determinó que todo punto no ubicado en medio de estas dos líneas se consideraba fondo de la imagen.

Una vez realizadas y evaluadas las pruebas de cada una de las funciones mencionadas anteriormente, se realizaron pruebas con las combinaciones de las funciones y variando su orden, no se combinaron todas las funciones entre sí pero se combinaron según

su clasificación, es decir para aumentar el contraste, para eliminar imperfecciones y eliminar el exterior del tubo por una semiumbralización. Para el eliminar el fondo se utilizó un único método, el cual se utilizaría sólo como el primer algoritmo de los 3. La otra opción fue el no utilizar el algoritmo para semiumbralizar, solo los otros dos. Para esta prueba se utilizaron los filtros Gaussiano y de la Mediana para la primera categoría y las funciones *CLAHE*, Ecuilización de Histograma e Incrementar Contraste para la segunda categoría. Por lo tanto, se generan 6 combinaciones, 12 si se invierte el orden en el que se aplica la función y 24 combinaciones si se incluye el algoritmo de eliminar del fondo o no. Si a las 24 opciones obtenidas por combinación, se les suman las pruebas que ya se habían hecho, se generaron y evaluaron 30 opciones de preprocesado.

Al realizar todas las pruebas y evaluaciones se determinaron las combinaciones que generaron los mejores resultados, las cuales corresponden con la función *CLAHE* sola, el filtro de la mediana solo, la función *CLAHE* seguida del filtro de la mediana, el filtro de la mediana seguido por la función *CLAHE*, solo la semiumbralización, la semiumbralización seguida por la función *CLAHE* seguido por el filtro de la mediana y la semiumbralización seguida por el filtro de la mediana seguido por la función *CLAHE*. Estos métodos de preprocesados luego fueron utilizados para hacer pruebas en la etapa de segmentación detallada más adelante.

4.7.1.2 Segmentación

Para la segmentación de las imágenes se probaron 7 métodos de umbralización de nivel, donde el valor de corte se obtendría de forma dinámica con alguna de las 7 funciones en lugar de utilizar umbralización con valores fijos para las imágenes. Lo anterior pues la distribución en el histograma de las imágenes variaban entre sí en el transcurso de las pruebas. Las funciones utilizadas para esta umbralización fueron: la Isodata, la Li, la *Mean* o Promedio, la Mínimo, la Otsu, la Triángulo y la Yen. Estos métodos Las 7 funciones anteriores se probaron para la imagen original y luego

para los 7 preprocesados finalistas escogidos anteriormente. Tanto para las imágenes sin preprocesar como para las preprocesadas, los métodos Isodata y Otsu mostraron los mejores resultados para segmentar la tinta, el eje y el impulsor, sin incluir el agua dentro del tubo y otros elementos. Al comparar los 16 resultados seleccionados para estos 2 métodos de segmentación, utilizando como estándar la imagen original sin procesar. De estos resultados se concluyó que los mejores resultados se obtuvieron cuando el único preprocesado era el de eliminar las secciones de afuera del tubo, seguidos por los que sólo se aplicaba el filtro de la mediana o no se aplicaba ningún preprocesado.

Para las pruebas realizadas en esta versión del procesamiento se utilizaron imágenes capturadas con la configuración de cámaras en la que ambas cámaras se colocaban en paralelo para ver una sola vista pero una mayor extensión del tubo. Los métodos de segmentación definidos y probados en esta versión del procesamiento funcionaban adecuadamente para las imágenes que capturaban antes del impulsor, pero no para las que capturaban la salida del impulsor pues como la tinta se disolvía en el agua, la umbralización ocasionaba que la tinta se agrupara con el resto del agua y se observara como fondo. Lo anterior se debió al bajo contraste existente entre el agua tintada y el agua sin tinter a la salida del impulsor. Esta razón fue parte de las razones por las que se rediseñó la captura de las imágenes a dos pruebas distintas con las 2 vistas ortogonales en una sección de tubo más reducida, cuyo procesamiento se detalla en la Sección 4.7.2

4.7.2 Versión 2

Esta versión del procesamiento corresponde a las imágenes obtenidas con las cámaras en 2 vistas perpendiculares y para 2 pruebas distintas, una en la entrada del impulsor y otra en la salida del impulsor. Como se observó de la versión anterior, el agua tintada y el agua sin tinter a la salida del impulsor tienen muy bajo contraste entre sí y para ambas pruebas, el tono de las partes más claras de la tinta y el tono de las partes más

oscuras del agua dentro del tubo se parecen mucho y los valores varían entre imágenes de la misma prueba, por lo que una segmentación de la tinta por umbralización de nivel, aunque fuera umbralización por bandas, resultaba muy difícil de manera confiable entre fotos si los umbrales son de valores fijos. Por lo tanto, se definió que el procesamiento de las imágenes debía manejarse distinto para cada conjunto de imágenes, por lo que se tendría un total de 4 métodos de procesamiento, los cuales se pueden agrupar en parejas, una por prueba, es decir, el procesamiento para las fotos capturadas con ambas cámaras para la prueba de entrada son similares entre sí y el de las fotos capturadas para ambas cámaras para la prueba de salida son similares entre sí.

4.7.2.1 Entrada del Impulsor

A partir de los resultados obtenidos en la versión 1 del procesamiento de imagen, se sabía que el eliminar el exterior del tubo por medio de la detección de líneas favorecía la consecuente segmentación de las líneas de flujo. Adicionalmente, la segmentación se vería favorecida por el aumento de contraste entre la tinta y el resto del agua. Como se determinó en la versión 1, las funciones de aumento de contraste implementadas antes de eliminar el exterior del tubo no mejoraba el resultado y el hacerlo en el orden inverso ocasionaba que los valores del exterior del tubo cambiaran. Por lo tanto, se probó incrementar el contraste después de eliminar el exterior del tubo con funciones que aumentaran el contraste de manera local y no general, es decir, utilizando convolucionales que consideraran la vecindad de cada píxel para cambiar o mantener su valor. De las funciones probadas fueron las funciones Corrección Gamma, Corrección Logarítmica, Auto Nivelar o *Autolevel*, Ecuilizar e Incrementar Contraste. La función de Corrección Logarítmica volvía la imagen más brillante y no ayudaba a incrementar el contraste entre el trazador y el agua. La Corrección Gamma sí ayudaba a incrementar ligeramente el contraste entre el trazador y el agua, sin afectar los valores del exterior del tubo pero oscureciendo de manera general el interior del tubo. Las funciones de Incre-

mentar Contraste y de Auto Nivelar ocasionaban resultados interesantes, pues si bien no se obtenía el resultado esperado, se generaban distintos patrones para los distintos elementos de la imagen. Entre estos 2 últimos, la función de Auto Nivelar mantenía los valores del exterior del tubo, mientras que la función de Incrementar Contraste invertía los valores del exterior del tubo de claro a oscuro.

Para las imágenes originales se volvieron a probar las mismas 7 funciones de umbralización, de las cuales, la Yen, que para la versión 1 generaba resultados muy desfavorables, para esta versión 2, prácticamente separaba el interior del tubo del exterior del tubo, por lo que se utilizó previo a la detección de líneas para eliminar el fondo de la imagen, aunque para las imágenes de la cámara de la vista superior funcionaba prácticamente sin necesidad del algoritmo de detección de líneas. Adicionalmente, después de la umbralización Yen para obtener una imagen con la ubicación del exterior del tubo se agregaron funciones para eliminar puntos negros o huecos pequeños y luego para eliminar puntos blancos u objetos pequeños.

Por otra parte los resultados obtenidos de las últimas 2 funciones, llevaron a la idea de utilizar un algoritmo de detección de patrones, para lo cual se usó la función *LBP*. Por lo tanto, se definió que después de semisegmentar el interior del tubo, se aplicaría el algoritmo *LBP*, seguido por una umbralización de banda y por último, una función para eliminar puntos pequeños indeseados que también se segmentaron. De esta forma, el procesamiento empleado para las imágenes capturadas a la entrada del impulsor se muestran en la Figura 4.20, donde se observa que el procesamiento es prácticamente idéntico, con la salvedad de que para las imágenes de la vista lateral, se adiciona el algoritmo de detección de líneas para poder eliminar el fondo, mientras que para las imágenes de vista superior no se utilizan.

Procesamiento de Imágenes de Entrada del Impulsor

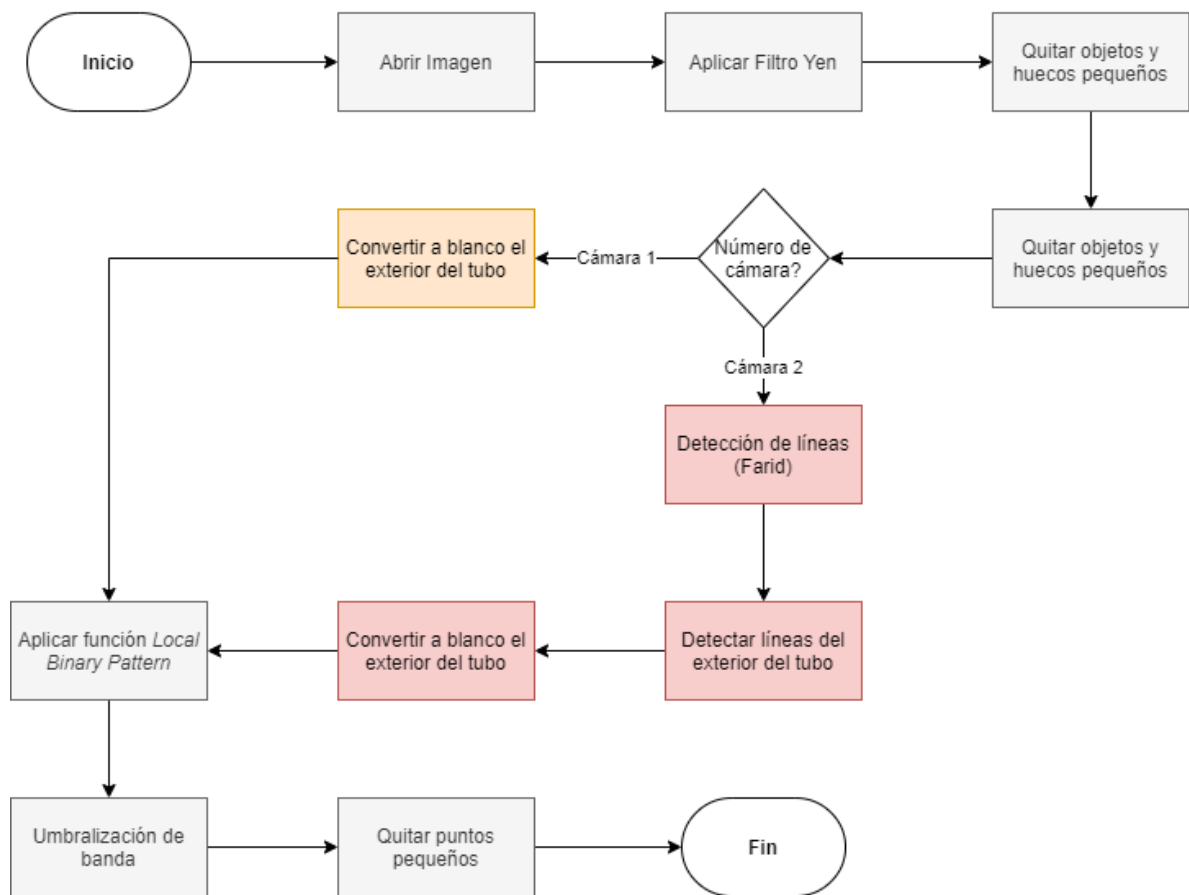


Figura 4.20: Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes capturadas a la entrada del impulsor. (Elaboración propia).

4.7.2.2 Salida del impulsor

Para las imágenes obtenidas a la salida del impulsor, los métodos implementados para las imágenes de la entrada del impulsor no mostraron resultados tan positivos, aunque sí algunos resultados intermedios. Se determinó que como el objetivo del procesamiento de las imágenes es facilitar al investigador el poder observar y analizar las líneas de flujo, la binarización de la imagen no era un requisito. Por lo tanto, se determinó que el mejorar el contraste entre el agua tintada y el agua sin tinter era la mejor forma de procesar la imagen para que el investigador le pueda sacar más provecho a las imágenes obtenidas.

De esta forma se definió el procesamiento para las imágenes capturadas a la salida del impulsor como se muestra en la Figura 4.21, donde se observa que para la cámara de la vista lateral se aplica la umbralización Yen y eliminar los puntos negros y blancos antes de detectar las líneas para eliminar el fondo de la imagen. Por último, se aplica una función para incrementar el contraste. Para esto se probaron las funciones Corrección Gamma, Corrección Logarítmica, *CLAHE*, Ecuilización del Histograma, Ecuilizar e Incrementar Contraste. De las cuales, la Corrección Gamma, el *CLAHE* y Ecuilización del Histograma presentaron los mejores resultados. De los 3, la Corrección Gamma generaba el menor contraste y entre las dos funciones de ecualización, la *CLAHE* generaba resultados más consistentes entre imágenes capturadas al inicio e imágenes capturadas al final de la prueba, por lo cual se seleccionó este como la función final del algoritmo de procesamiento de las imágenes tomadas a la salida del impulsor.

4.7.3 Presentación de Resultados

Para la presentación de los resultados se definió que se quería realizar una interfaz de usuario desde la cual se pudieran seleccionar las imágenes que se quieren ver y poder visualizarlas desde la interfaz ya sea procesadas o sin procesar. Por lo tanto, se definió utilizar la biblioteca PySimpleGUI, por su versatilidad, facilidad, documentación y por

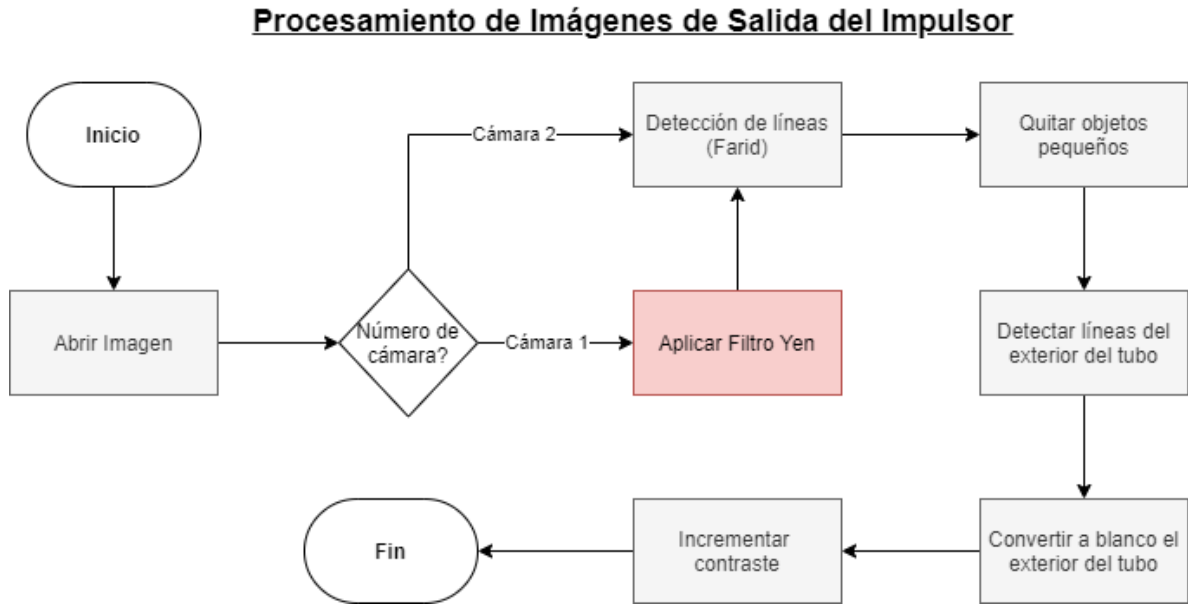


Figura 4.21: Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes capturadas a la salida del impulsor. (Elaboración propia).

supuesto, su compatibilidad con Python y demás paquetes empleados para el procesamiento de las imágenes. La biblioteca de funciones PySimpleGUI posee una función para mostrar imágenes, sin embargo, esta permite mostrar las imágenes que poseen formato PNG mientras que las imágenes capturadas con las cámaras se almacenaron en formato JPG por lo que se utilizó la biblioteca Pillow (PIL) para el manejo de las imágenes y corregir esta diferencia entre los formatos. Por otro lado, para el procesamiento de las imágenes, estas se manejaron con el paquete NumPy.

Para el diseño de la interfaz de usuario se comenzó por definir los comandos y controles que se querían tener, los cuales corresponden con: seleccionar la carpeta de imágenes, mostrar las imágenes, pasar a la siguiente imagen, volver a la imagen anterior, seleccionar una imagen en específico por su número, si el procesamiento se debe hacer para imágenes de entrada o salida, mostrar las imágenes procesadas, almacenar las imágenes procesadas que se están mostrando y salir. Además de los comandos, se definió la información que se quiere mostrar al usuario, la cual corresponde con: la carpeta actual, las imágenes actuales, el número de las imágenes actuales, el total de

pares de imágenes en la carpeta y el tipo de procesamiento que se tiene seleccionado. Para los comandos se determinó que el seleccionar la carpeta con el mismo motor de navegación del Explorador de Archivos, lo cual es más intuitivo, sencillo y cómodo que pedir al usuario que ingrese la dirección de la carpeta donde se encuentran las imágenes, sin embargo, esta sigue siendo una opción. Para el seleccionar un número de imagen en específico, se tiene un espacio de entrada de texto para que el usuario escriba, pues debido a la alta cantidad de imágenes por carpeta, se consideró la mejor opción. Para los demás comandos se definieron botones por su simplicidad y ser altamente intuitivos. por lo tanto, se programó la interfaz de usuario que se muestra en la Figura 4.22.

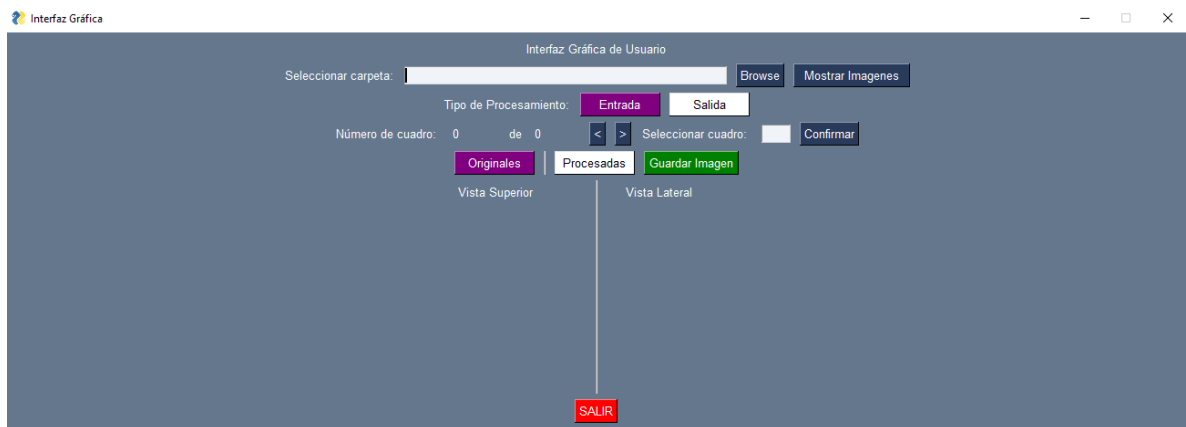


Figura 4.22: Interfaz Gráfica de Usuario creada para la visualización de los resultados. (Elaboración propia).

4.8 Diseño Seleccionado

El diseño seleccionado a nivel de conceptos corresponde con: 2 cámaras industriales de visión artificial, marca Cognex y serie In-Sight 7000 con un lente HF9HA-1B de 9 mm de distancia focal, ambas cámaras montadas y sujetadas con brazos de montaje de cámara, marca Manfrotto, utilizando un *backlight* de luz LED para cada cámara, una aguja larga para la adición del trazador, una válvula reguladora para la dosificación por gravedad con la posibilidad de utilizar una jeringa si se requiere mayor flujo de

tinta, como para las pruebas para observar la salida del impulsor y por último, tinta china negra marca Staedtler ligeramente diluída en agua. Con respecto al rediseño de la planta, se emplearon las modificaciones definidas en la Sección 4.6. El sistema de visión acoplado a la planta se muestra en la Figura 4.23, en la cual se pueden observar todas las partes y piezas utilizadas en la implementación final. Adicionalmente, en las Figura 4.24 se puede ver en más detalle el montaje de las luces y cámaras con respecto a la planta. Del mismo modo, en la Figura 4.25 se puede ver en mayor detalle el montaje del sistema mecánico de la planta.

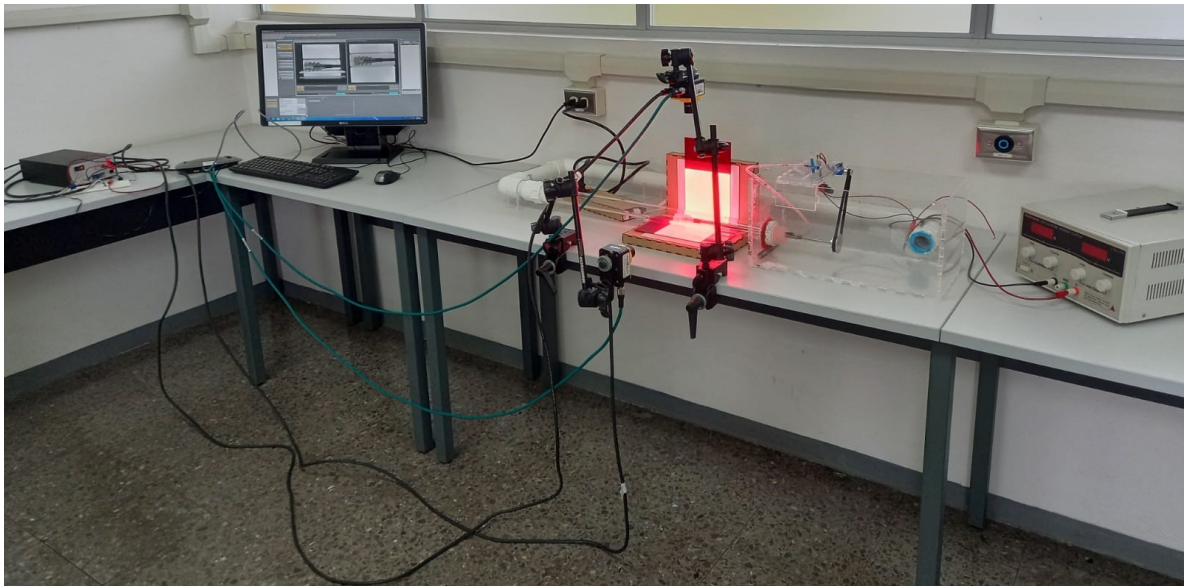


Figura 4.23: Foto del sistema completo montado. (Elaboración propia).

4.8.1 Configuración de Cámaras

Las cámaras se colocan en la disposición mostrada en la Figura 4.6, en la cual se observa que las cámaras capturan vistas perpendiculares entre sí, de la misma sección de tubo. Debido a la posición de las luces con respecto al tubo y como en la vista superior, la luz se encuentra más cerca del tubo que en la vista lateral, la vista superior permite capturar una longitud iluminada del tubo mayor que la vista lateral, por lo tanto, la distancia de ambas cámaras con su respectiva luz varió un poco. La cámara de la vista

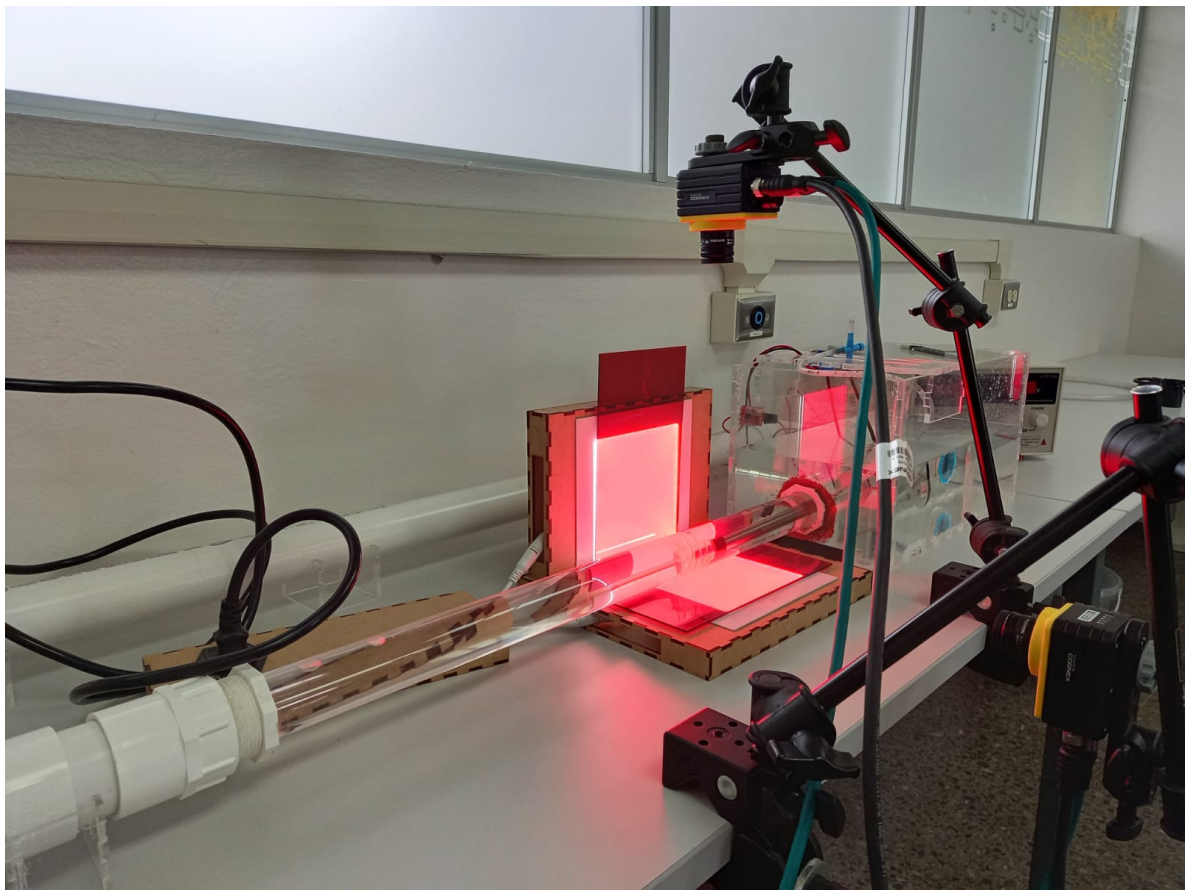


Figura 4.24: Foto del sistema de visión acoplado a la planta. (Elaboración propia).

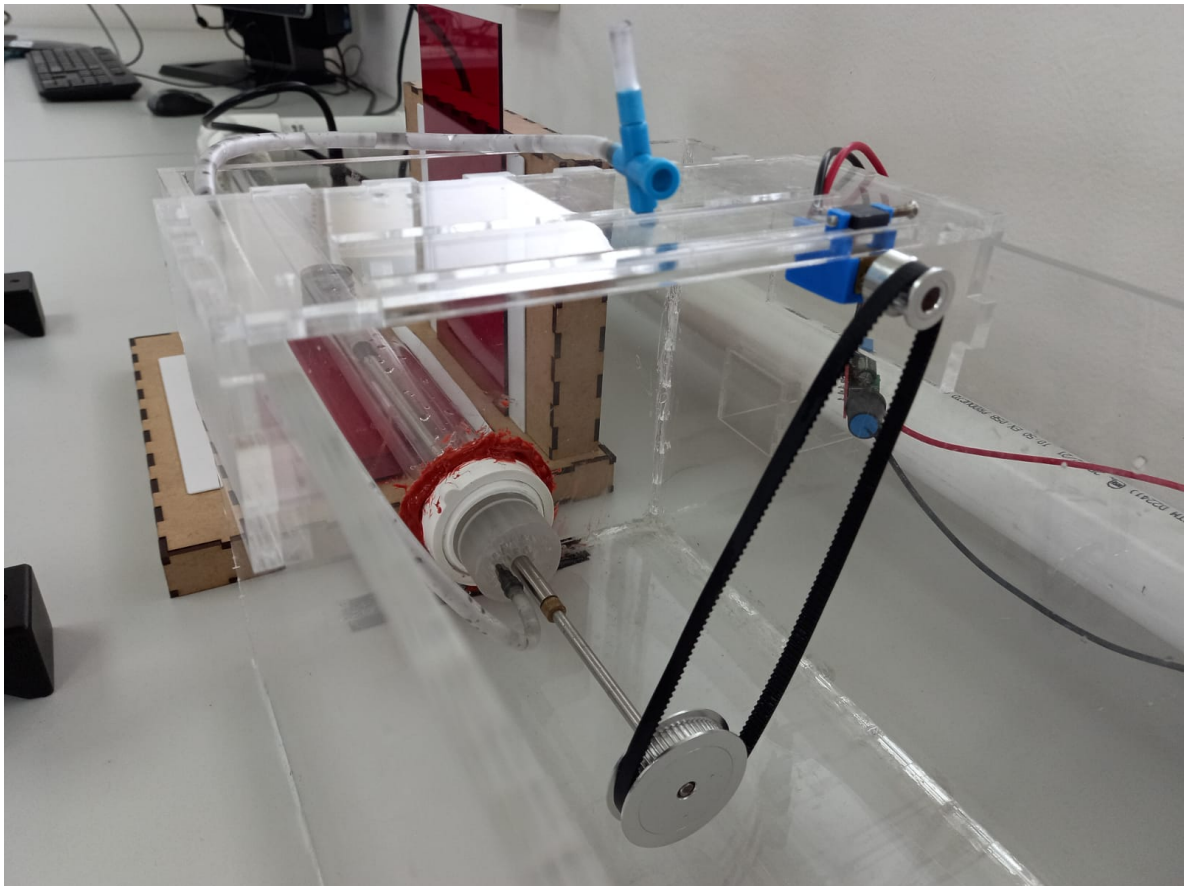


Figura 4.25: Foto del sistema mecánico montado a la planta. (Elaboración propia).

superior se colocó a una altura de 17 cm desde el centro del tubo, del mismo modo, la cámara de la vista lateral se colocó a una distancia de 17 cm del centro del tubo, por lo tanto, ambas cámaras poseen una distancia de trabajo de 17 cm. Dado que la distancia focal de la lente de ambas cámaras era de 9 mm, el campo de visión, o *FoV*, era de 12 por 9 cm, lo cual es mayor que lo esperado según la distancia de trabajo especificada, esto se debe a que el campo de visión se midió en relación a la superficie de la luz que se capturó en las imágenes y estas luces se encontraban a una distancia superior a la del centro del tubo. El lente se utilizó con una apertura mínima de 16, porque como se está utilizando un *backlight*, la luz se coloca viendo directamente hacia la cámara, por lo que la intensidad de luz que llega a la cámara es tanta que si se utiliza una apertura mayor a esta, los detalles de la imagen no se pueden apreciar pues todo se ve blanco. El enfoque del lente se configuró manualmente en un valor intermedio donde se enfocara el interior del tubo con suficiente nitidez.

Las cámaras también se debían configurar de forma digital desde el software de In-Sight Explorer, en este se configuró una de las cámaras como maestro y la otra como esclavo, lo cual significó que una de las cámaras se configuró para capturar imágenes cada cierto periodo de tiempo, mientras que la otra, para capturar una imagen cada vez que la primera cámara se lo indicara. Por lo tanto, a la cámara configurada como maestro se le seleccionó un método de captura de imagen periódico con un periodo de 100 ms, tomando así 10 imágenes por segundo. Por otro lado, la cámara configurada como esclavo, se le seleccionó un método de captura de imagen *Manual*, de manera que se capturara una imagen cuando se tuviera una señal en el cable de entrada *Trigger*. Por último, se configuró una salida de la cámara maestro para que enviara un pulso cada vez que se capturaba una imagen.

Para sincronizar las cámaras, no bastó con hacer la configuración de entradas, salidas y demás parámetros, también se debió conectar físicamente para que se diera el comando para la captura de imágenes. El diagrama de conexión eléctrica para la sincronización

de las cámaras se muestra en la Figura 4.28, donde se conectó la salida de la cámara maestro al trigger de la cámara esclavo, adicionalmente, se conectaron el común de ambos. Tanto la salida como el trigger se conectan en configuración PNP, por lo que el común de la salida se conectó a 24 voltios y el común del trigger se conectó a 0 voltios, como se observa en las Figuras 4.26 y 4.27 respectivamente.

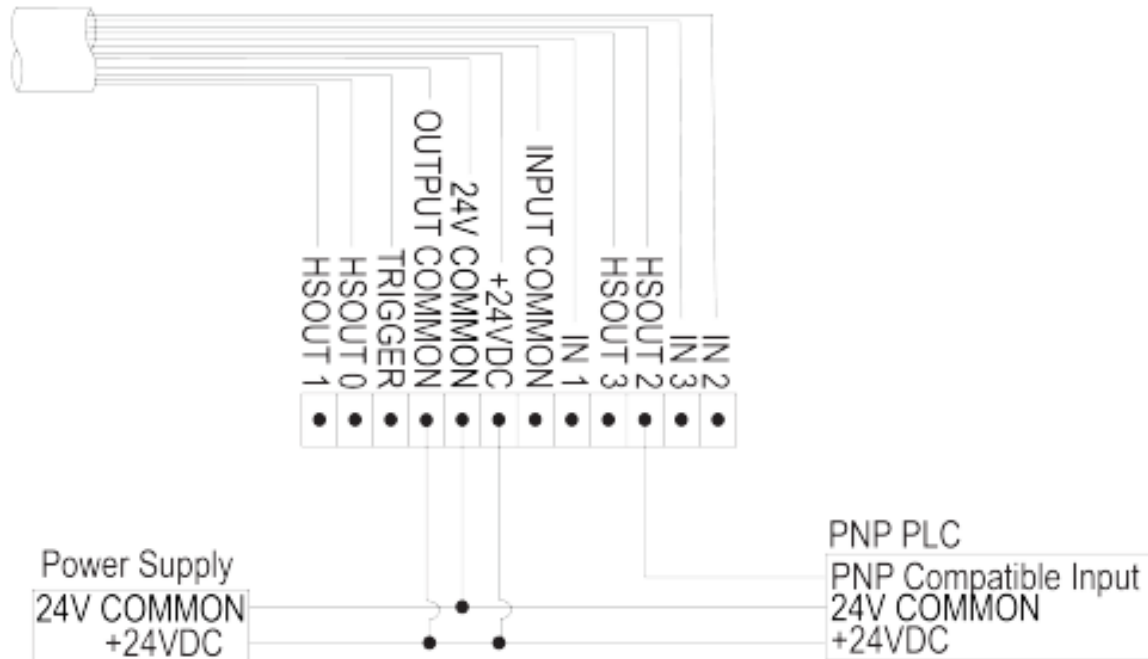


Figura 4.26: Diagrama de conexión de una salida de alta velocidad de la cámara configurado como PNP. (Recuperado de: [89]).

4.8.2 Equipo

La solución planteada en este capítulo, posee varios subsistemas, por lo cual esta solución cuentan con muchas y variadas piezas, elementos o materiales. La lista de equipo y materiales empleados en la solución se muestran en los Cuadros 4.17 y 4.18. En estos cuadros se especifican la cantidad de cada uno y a qué subsistema pertenecían. En esta lista no se incluyeron los materiales empleados para el ensamblaje y montaje, todos los materiales y equipos utilizados y necesarios para la realización del proyecto se detallan en el análisis económico.

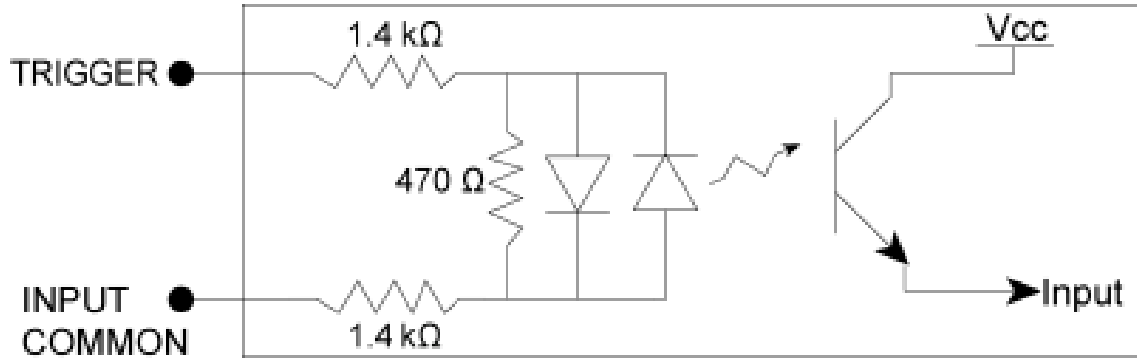


Figura 4.27: Diagrama de conexión del Trigger de la cámara configurado como PNP. (Recuperado de: [89]).

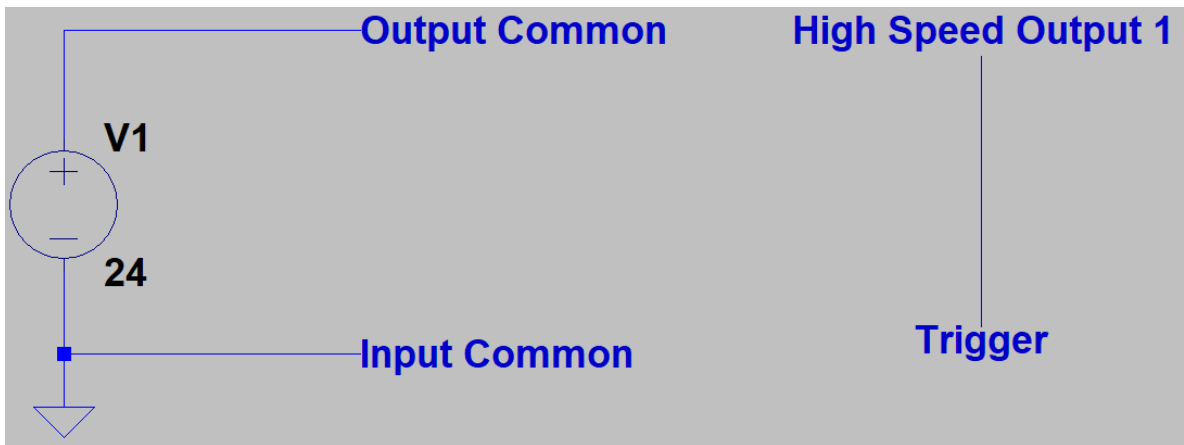


Figura 4.28: Diagrama de conexión eléctrica de los cables para la sincronización de las cámaras. (Elaboración propia).

Equipo	Cantidad	Subsistema
Cámara Cognex In-Sight 7200	1	Sistema de visión
Cámara Cognex In-Sight 7010	1	Sistema de visión
Brazo de soporte de cámara	2	Sistema de visión
Lente de distancia focal de 9 mm	2	Sistema de visión
Fuente de 24V	1	Sistema de alimentación
Cable de alimentación de 85 a 240 V	3	Sistema de alimentación
Cable de alimentación de cámara	2	Sistema de visión
Cable de red de cámara	2	Sistema de visión
Protoboard	1	Sistema de visión
Backlight	1	Sistema de visión
Computadora	1	Sistema de visión
Switch para conmutación	1	Sistema de visión
Cable de alimentación de switch	1	Sistema de visión
Cable de ethernet	1	Sistema de visión
Tanque de agua de la planta	1	Planta
Manguera de desagüe	1	Planta
Eje del impulsor	1	Sistema mecánico
Tubo de montaje del eje	1	Sistema mecánico
Rodamiento de cobre	1	Sistema mecánico

Table 4.17: Lista de materiales y elementos de la planta y sistema de visión con su cantidad y clasificación.

Equipo	Cantidad	Subsistema
Impulsor de eje central	1	Sistema mecánico
Acople de eje con polea	1	Sistema mecánico
Pieza de tope del tubo con con el impulsor	1	Sistema mecánico
Rectificador de flujo	1	Sistema mecánico
Polea de 60 dientes	1	Sistema mecánico
Polea de 20 dientes	1	Sistema mecánico
Correa dentada	1	Sistema mecánico
Motor eléctrico de corriente continua	1	Sistema mecánico
Acople de eje de motor con polea	1	Sistema mecánico
Soporte del motor	1	Sistema mecánico
Sujetador del motor	1	Sistema meánico
Driver del motor	1	Sistema mecánico
Fuente de tensión eléctrica variable	1	Sistema de alimentación
Cables de alimentación para el driver	1	Sistema de alimentación
Aguja para la inyección del trazador	1	Sistema del trazador
Manguera para la inyección del trazador	1	Sistema del trazador
Válvula reguladora de flujo del trazador	1	Sistema del trazador
Jeringa para suministro del trazador a la manguera	1	Sistema del trazador
Depósito de tinta	1	Sistema del trazador
Envase de tinta	1	Sistema del trazador

Table 4.18: Continuación de lista de materiales y elementos de la planta y sistema de visión con su cantidad y clasificación.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección del documento se muestra un resumen de los resultados finales obtenidos con el sistema completo. También se explica la estrategia de validación utilizada para validar el sistema de visión artificial, desde la captura de las imágenes, hasta su procesamiento e incluyendo la experiencia de usuario que presenta la interfaz gráfica. Después de detallada la estrategia de validación, se muestran los resultados numéricos obtenidos. Por otra parte, también se muestra el análisis económico realizado para el proyecto. Finalmente, se presenta el análisis de los resultados del sistema y la respectiva validación.

5.1 Estrategia de Validación

La validación del sistema se dividió en dos partes, la validación del procesamiento de las imágenes y la validación de la interfaz gráfica de usuario. Para la validación del sistema, se realizó un total de 6 pruebas, 3 con las cámaras en la posición de la entrada del impulsor y las otras 3, en la posición de la salida del impulsor. Las imágenes capturadas por ambas cámaras para cada prueba se almacenaron en una carpeta, cada una

con aproximadamente 1000 fotos por cámara. Es decir, un total de aproximadamente 12000 fotos, por lo que se utilizaron 20 fotos por prueba, usando las fotos en pareja, es decir, si se utiliza la foto 0 de la cámara de la vista superior, también se utiliza la foto 0 de la cámara de la vista lateral para la misma prueba. Por lo tanto, se utilizó aproximadamente el 1% de las imágenes capturadas para la validación. Con el fin de tener una muestra representativa de la población se seleccionaron 10 números al azar entre el 0 y el 999 para cada una de las 6 pruebas. Además de elegir los números de manera aleatoria, se determinó que los 10 números debían poder representar adecuadamente la población y como las imágenes difieren en características conforme avanza la prueba, esto permitiría tener una muestra donde se tengan todas las características de la prueba completa. Por lo tanto, el número aleatorio se encontraba entre 0 y 99 y se les sumaban 0, 100, 200, 300 y así sucesivamente hasta el último número al cual se le sumaron 900. Por ejemplo, los números de imágenes seleccionados de la primera prueba fueron: 82, 112, 273, 378, 469, 549, 617, 762, 857 y 952. Por otra parte, para las pruebas a la salida del impulsor, la primera prueba tenía menos de 1000 imágenes por lo que sólo se tenían 18 imágenes, no obstante, esto se compensó con la tercera prueba que tenía más de 1100 imágenes, por lo que de esta se seleccionaron 22 imágenes para mantener la relación del 1% previamente establecida.

Cada una de las imágenes se evaluó bajo varios criterios, tanto la imagen capturada como la imagen procesada. Del mismo modo, se definieron los criterios de evaluación tanto para las imágenes capturadas a la entrada del impulsor como para las imágenes capturadas a la salida del impulsor. Cada uno de los criterios definidos contemplaba una escala del 1 al 5 y al final se sumó el total de puntos. Para las pruebas de la entrada del impulsor, se definió un valor de aceptación del 90%, tanto para la puntuación de la evaluación como de la tasa de aprobación. Se escogió que el criterio fuera porcentual pues algunas preguntas no eran aplicables si el trazador todavía no se encuentra en cuadro. Por otra parte, para las pruebas de la salida del impulsor, el

criterio de aceptación es si la puntuación de la imagen procesada es mejorada por 1 o más puntos, o que por lo menos mantener la misma puntuación de la imagen original correspondiente. Los criterios definidos para la evaluación se definieron con base en las métricas de evaluación de las necesidades definidas en los Cuadros 4.2 y 4.3 y se muestran explicitados en el Anexo 1.

La interfaz gráfica de usuario también tuvo una evaluación para su validación, la cual consistió de 10 preguntas, 7 referentes a su funcionamiento, donde se verificó el funcionamiento adecuado de los comandos y 3 más sobre la experiencia de usuario. Las preguntas y sus métricas de evaluación se basaron en las métricas de los Cuadros 4.2 y 4.3 y se pueden observar en el Anexo 1. Para las preguntas sobre la experiencia de usuario se encuestaron 5 personas distintas para que contestaran las 3 preguntas subjetivas en una escala del 1 al 5, donde 5 es el valor más alto. A estas personas se les explicó rápidamente el funcionamiento y alcances del programa para que tuvieran cierto contexto para poder evaluar la interfaz tomando en cuenta la finalidad de esta.

5.2 Resultados

En esta sección se muestran algunos de los resultados finales obtenidos con el sistema. En las Figuras de la 5.1 a la 5.8 se muestran la interfaz gráfica de usuario presentando las imágenes ya sea procesadas o sin procesar, de entrada o de salida, con o sin el trazador, para mostrar las imágenes que se capturaron en las distintas pruebas y cómo se observa el trazador. Adicionalmente, se observan algunas imágenes procesadas que fueron utilizadas en la validación, con lo que se aprecia el cómo se segmentaron los resultados cuando hay presencia o ausencia del trazador o del agua tintada. Si bien se capturaron más de 10000 imágenes como resultados finales, entre estas 8 figuras mencionadas, se puede apreciar casi todo el espectro de los resultados obtenidos. No obstante, estas imágenes no son suficientes para poder estudiar el comportamiento del

fluido, pues no se observa exactamente el movimiento del trazador, para lo cual es recomendable el ver algunas de las imágenes inmediatamente antes y después de la imagen que se presenta en la interfaz gráfica.

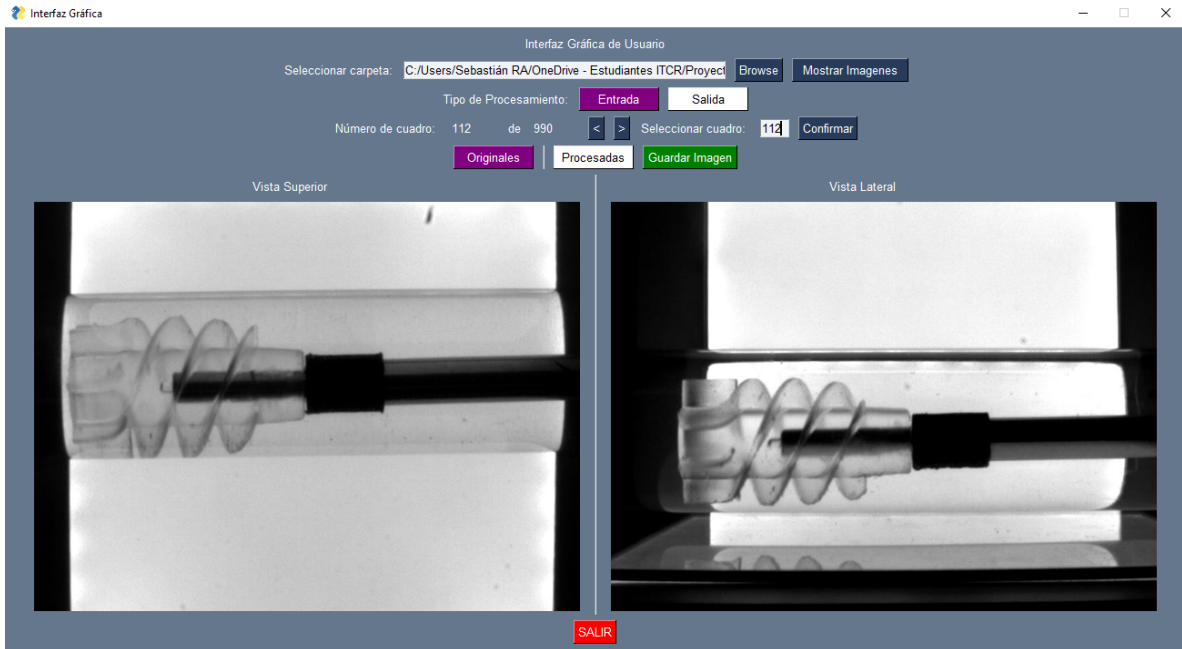


Figura 5.1: Resultado de imágenes originales capturadas en la entrada del impulsor sin trazador. (Elaboración propia).

En el Cuadro 5.1 se observan los resultados de la evaluación de las imágenes capturadas y procesadas con los criterios mostrados en el Anexo 1. En los cuadros se muestran los valores numéricos obtenidos en cada pregunta para cada tipo de imágenes del número indicado, para ambas cámaras y para las imágenes tanto originales como procesadas. Luego se suman el total de puntos obtenidos y se tiene el valor porcentual de los puntos obtenidos en comparación con los totales. Para todas las evaluaciones, en la pregunta 3 se tiene un resultado booleano de sí o no, en caso de ser no, se ignoran las siguientes 3 preguntas y sus puntos, pues estas no aplican, por lo que el valor obtenido para esa pregunta se representa con una x. La pregunta 3 hace referencia a la presencia del trazador en la imagen, por lo que algunas preguntas no aplican pues su puntuación sería siempre el mínimo de 1 punto. Por otro lado, el Cuadro 5.2 muestra prácticamente lo mismo pero para imágenes capturadas a la salida del impulsor.

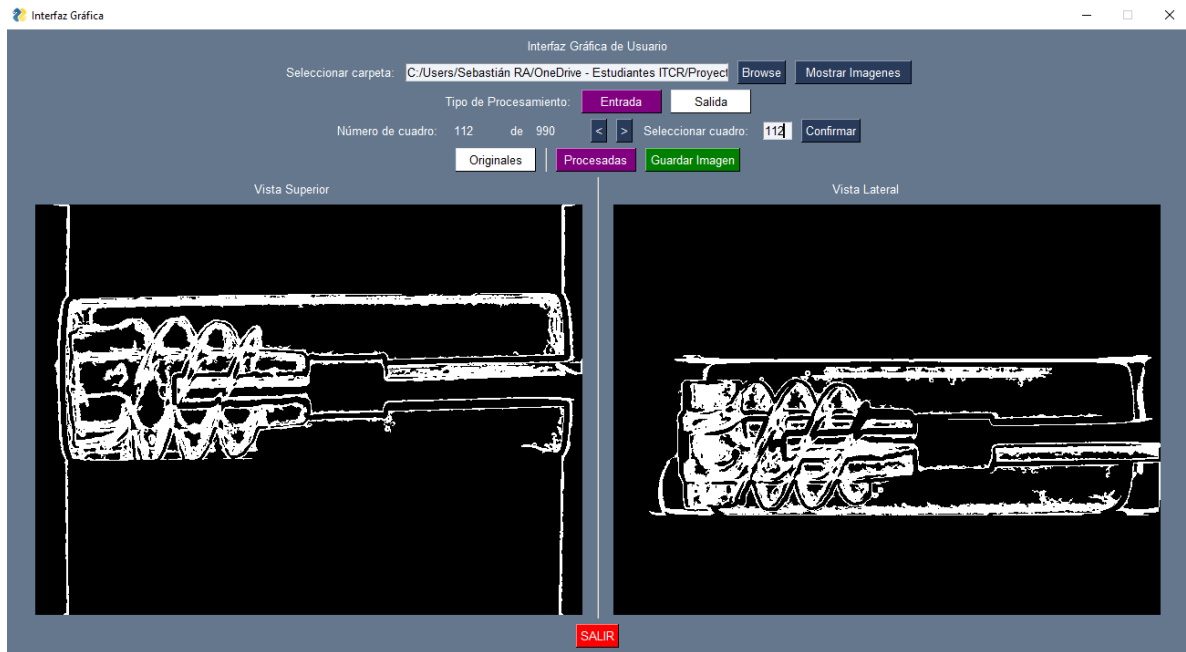


Figura 5.2: Resultado de imágenes procesadas capturadas en la entrada del impulsor sin trazador. (Elaboración propia).

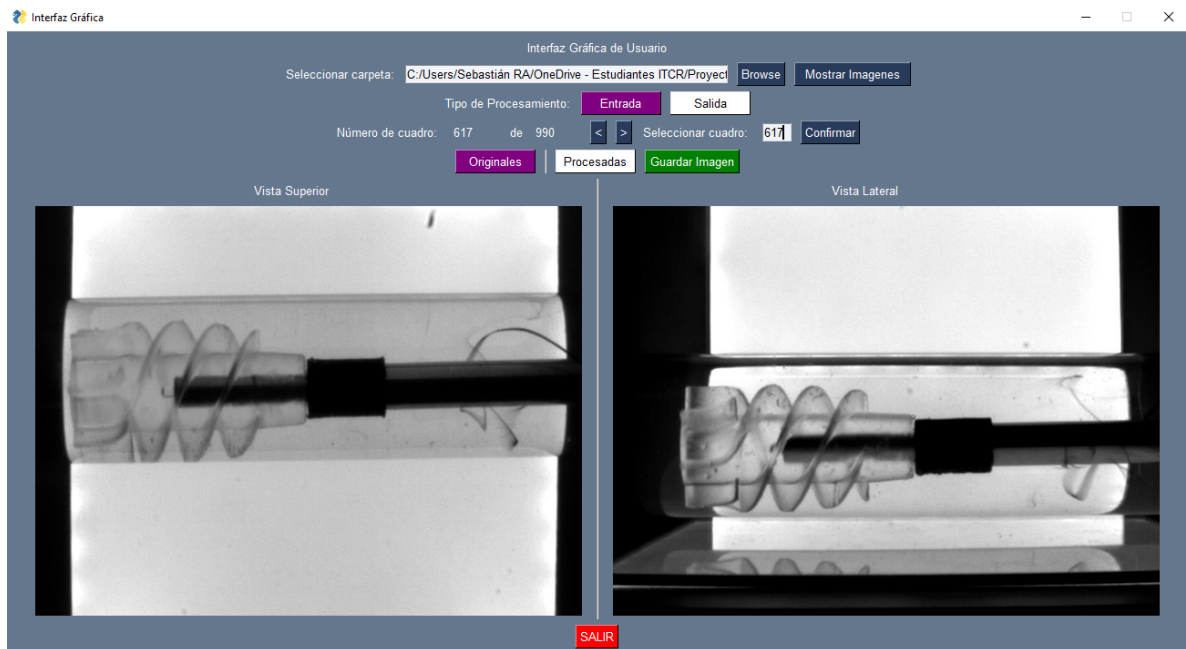


Figura 5.3: Resultado de imágenes originales capturadas en la entrada del impulsor con trazador. (Elaboración propia).

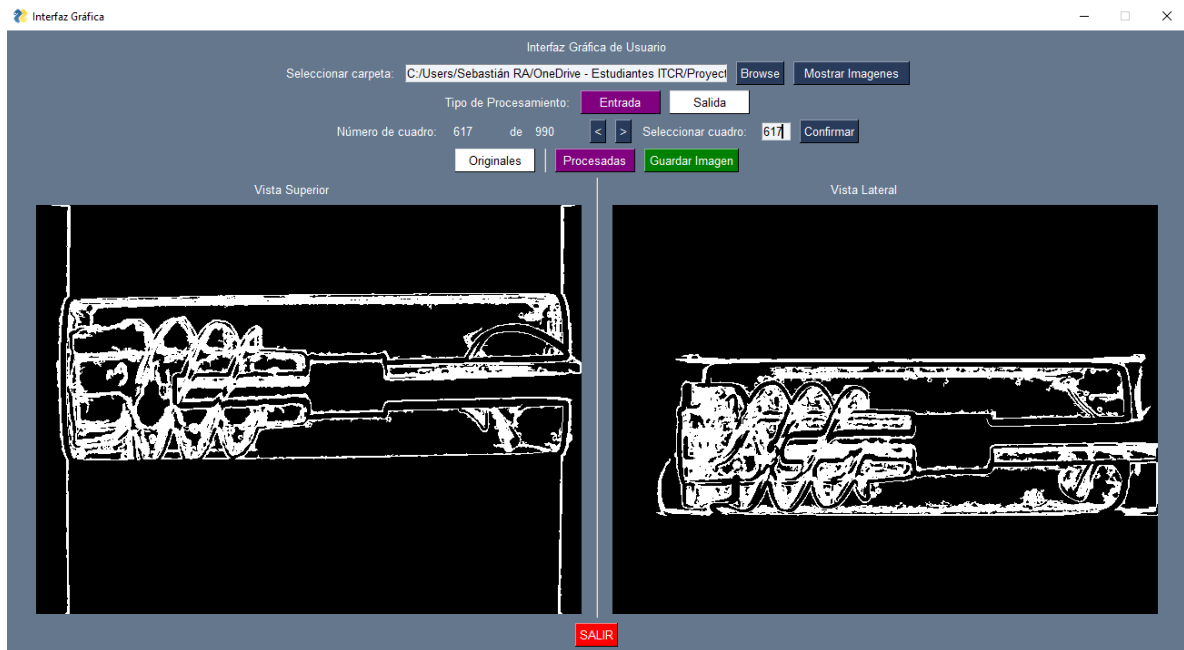


Figura 5.4: Resultado de imágenes procesadas capturadas en la entrada del impulsor con trazador. (Elaboración propia).



Figura 5.5: Resultado de imágenes originales capturadas en la salida del impulsor sin trazador. (Elaboración propia).

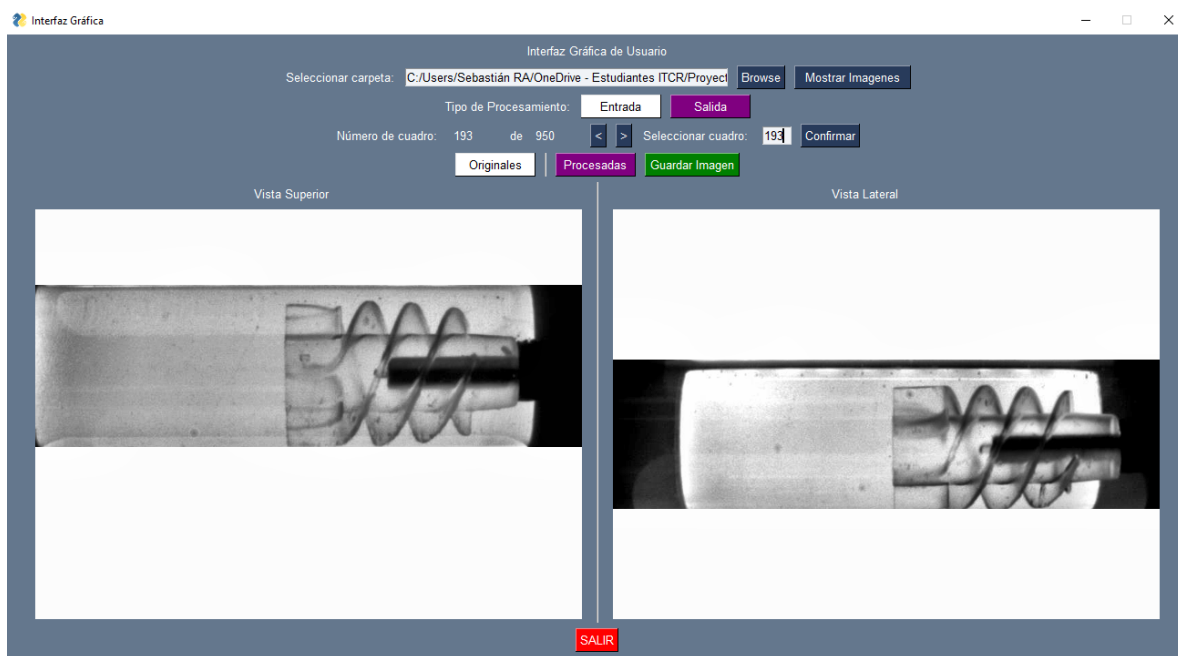


Figura 5.6: Resultado de imágenes procesadas capturadas en la salida del impulsor sin trazador. (Elaboración propia).



Figura 5.7: Resultado de imágenes originales capturadas en la salida del impulsor con trazador. (Elaboración propia).

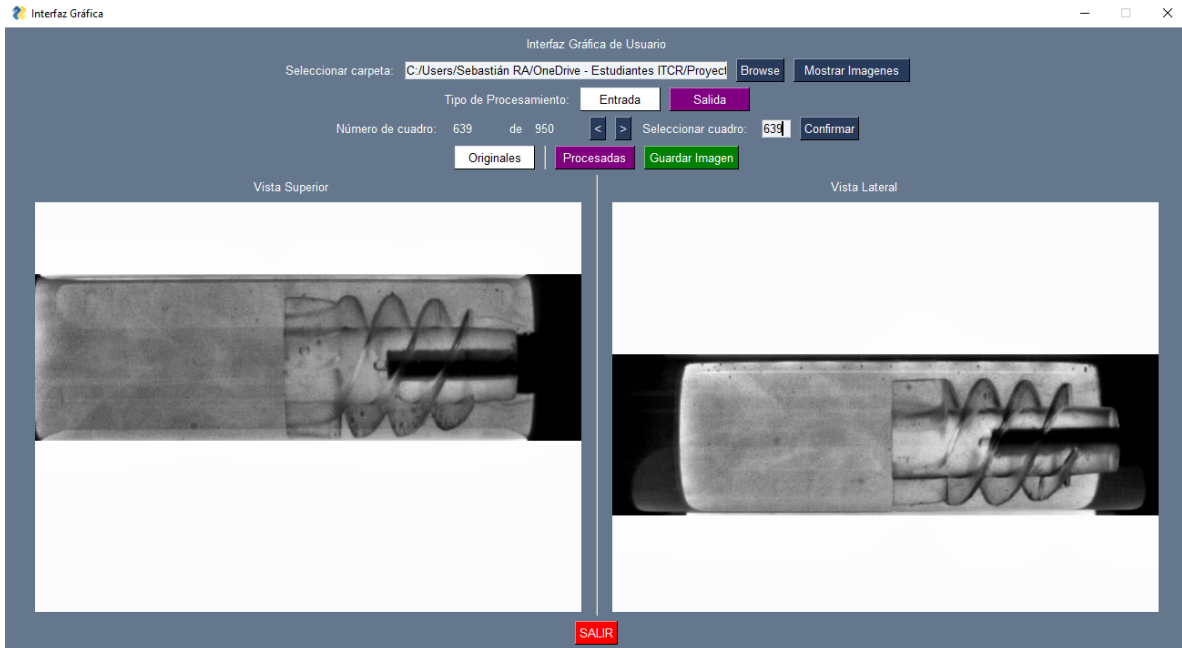


Figura 5.8: Resultado de imágenes procesadas capturadas en la salida del impulsor con trazador. (Elaboración propia).

Como ya se ha mencionado previamente, el procesamiento de las imágenes capturadas a la salida del impulsor difiere del procesamiento de las imágenes capturadas a la entrada del impulsor, por lo que su evaluación también difiere un poco. Las primeras 3 preguntas se mantuvieron, pero las siguientes 2 se cambiaron un poco, al igual que se tuvieron un total de 2 preguntas menos. Por otro lado, cómo se maneja la puntuación total también difiere, pues las puntuaciones varían mucho entre imagen e imagen. Por lo tanto, en este caso no es tan importante la puntuación total como que el procesamiento generara una mejoría en la imagen para el estudio del comportamiento del fluido, por lo que también se calculó la diferencia numérica entre las puntuaciones de la imagen original y la procesada. Todos los resultados de los 6 conjuntos de datos evaluados se muestran tabulados en el Anexo 2.

Cámara	Tipo	# de pregunta	82	112	273	378	469	549	617	762	857	952	
1	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		3 (bool)	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	5	x	5	5	5	5	5	5	4	5	5
		5 (5)	3	x	5	4	4	4	5	4	4	4	5
		6 (5)	5	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		Total (%)	92	100	100	96	96	96	100	92	96	96	100
	Procesado	1 (5)	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (bool)	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	2	x	5	4	5	5	5	5	4	4	5
		5 (5)	2	x	5	4	5	5	5	5	4	4	5
		6 (5)	5	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		7 (5)	4	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5
Total (%)	73,33	93,33	100	90	100	100	100	100	93,33	93,33	100		
2	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		3 (bool)	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		5 (5)	x	x	4	4	3	4	3	3	3	4	4
		6 (5)	x	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		Total (%)	100	100	96	96	92	96	92	92	92	96	96
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (bool)	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	5	5	5	5	5	5	5	5	4
		5 (5)	x	x	5	4	5	5	5	5	4	5	5
		6 (5)	x	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		7 (5)	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Total (%)	86,67	86,67	96,67	93,33	96,67	96,67	96,67	96,67	90	96,67	93,33		

Table 5.1: Resultados de evaluación de los resultados para una de las pruebas de la entrada del impulsor para la validación.

Cámara	Tipo	# de pregunta	2	193	282	306	452	541	639	742	856	927
1	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
		4 (5)	x	x	x	4	3	3	2	2	1	1
		5 (5)	x	x	x	2	2	2	2	2	1	1
		Total (10 o 20)	10	10	10	16	15	15	14	14	12	12
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
		4 (5)	x	x	x	4	4	5	4	3	2	3
		5 (5)	x	x	x	3	4	4	4	4	2	2
		Total (10 o 20)	10	10	10	17	18	19	18	17	14	15
	Diferencia	0	0	0	1	3	4	4	3	2	3	
	2	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2 (5)			5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3 (0)			0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
4 (5)			x	x	x	x	2	3	3	2	1	1
5 (5)			x	x	x	x	2	2	2	2	1	1
Total (10 o 20)			10	10	10	10	14	15	15	14	12	12
Procesado		1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
		4 (5)	x	x	x	x	3	3	3	3	2	2
		5 (5)	x	x	x	x	4	4	4	3	2	2
		Total (10 o 20)	10	10	10	10	17	17	17	16	14	14
Diferencia		0	0	0	0	3	2	2	2	2	2	

Table 5.2: Resultados de evaluación de los resultados para una de las pruebas de la salida del impulsor para la validación.

5.3 Análisis Económico

Para el análisis económico, se realizó en primera instancia el cálculo de los costos. Los costos asociados al proyecto están constituidos por los elementos que forman parte del sistema, como las cámaras y las partes de la planta, entre otros. Adicionalmente, se consideraron costos de manufactura como los servicios de corte láser e impresión 3D, además de las herramientas utilizadas para el ensamble como pegamento, llaves, dremel y demás. Finalmente, se consideró un salario asociado a 4 pagos mensuales, donde el valor de esta remuneración se determinó con base en la mitad del salario mínimo mensual de tiempo completo para un bachiller universitario [90], pues las horas designadas al proyecto, por reglamento, son 20 horas semanales, en otras palabras, un medio tiempo.

Debido a la naturaleza del proyecto, su entorno y su contexto asociado a una investigación científica, el valor intrínseco de su realización está más asociado a un valor de conocimiento, más que a un valor económico. Por lo tanto, calcular la viabilidad o impacto económico del proyecto no se puede calcular con base en una línea de producción. Por otra parte, este proyecto forma parte de una línea de investigación para el desarrollo de un dispositivo de asistencia ventricular, el cual requiere eventuales pruebas en personas, por lo que para llegar a este punto el combinar pruebas de validación por simulaciones computacionales con pruebas de validación en implementaciones físicas acelera el proceso. Del mismo modo, aunque en este proyecto sólo se realizaran pruebas con el modelo de impulsor de eje central, la validación del sistema de visión y funcionamiento de la planta, permitirían posteriores estudios utilizando otros modelos de impulsor.

Desde otra perspectiva, una implementación física que permita realizar pruebas físicas con modelos de impulsor del *VAD*, disminuye costos de horas de investigador dedicadas a preparar y efectuar pruebas simuladas. Igualmente, la documentación de este proyecto, incluyendo resultados de pruebas fallidas y exitosas, también poseen un

valor asociado a tiempo que futuros investigadores pueden ahorrar al no tener que repetir algunas pruebas o mejorar diseños, ya sean en otra o la misma línea de investigación. Además de en horas de investigadores empleadas en simulaciones, también se puede tener un ahorro en recursos computacionales, ya sea por no tener que invertir en adquirir más recursos de procesamiento o en tener que dedicar los recursos computacionales a estas simulaciones, en especial si se considera que mientras más se quiera aproximar la simulación a la realidad, más demanda de procesamiento es necesaria. Esto último puede llevar a la necesidad de invertir dinero en costosos equipo de procesamiento de alto rendimiento.

5.4 Análisis de Resultados

Una vez evaluados los resultados para las 6 pruebas, se observan ciertos patrones, de manera general, para los resultados de las imágenes de la entrada del impulsor, se tuvo una puntuación promedio de 94.2% con una tasa de aprobación del 90.8%. Al observar más detalladamente los resultados, la puntuación promedio para las imágenes sin procesar fue del 95% y para las imágenes procesadas fue de un 86.67%, con las de la cámara de la vista superior con un 90% y las de la cámara de la vista lateral con un 83.33%. Por lo tanto, el procesamiento para las imágenes de la cámara de la vista superior demostró mejor desempeño que el procesamiento para las imágenes obtenidas con la cámara de la vista lateral, debido a la influencia del *backlight* de la vista superior en las fotos capturadas por la cámara de la vista lateral. Cabe destacar que 6 de los 11 resultados con una puntuación inferior al 90% coincidían con imágenes en las que no se observaba el trazador en ningún punto. Lo anterior tiene sentido pues el principal objetivo del procesamiento es facilitar el estudio del comportamiento del fluido, para lo cual se necesita la presencia del trazador y del mismo modo, el procesamiento no es necesario si todavía no hay presencia del trazador en la imagen, por lo que

Descripción	Precio unitario (colones)	Cantidad	Subtotal (colones)
Computador (AOC)	600000	1	60000
Cámara Cognex In-Sight 7010	\$ 1823,36	1	1148716,8
Cámara Cognex In-Sight 7200	\$ 5022,08	1	3163910,4
Lente Fujinon de 9 mm de distancia focal	\$200	2	252000
Brazo de sujeción de cámara Manfrotto	\$ 267,95	2	337617
Fuente de alimentación de 24V	32000	1	32000
Breakout cable de cámaras Cognex	\$ 106,26	2	133887,6
Cable de red de cámaras	\$ 106,26	2	133887
Cable de alimentación de 85 a 240 V	\$ 7,50	3	14175
Protoboard	\$ 5	1	3150
Luminaria	7995	2	15990
Switch para conmutación	\$30	1	18900
Cable de ethernet	\$7	1	4410
Lámina de acrílico de 5 mm	8000	1	8000
Lámina de acrílico de 3 mm	5000	1	5000
Lámina de mdf de 3 mm	3000	2	6000
Servicio de corte láser	15000	1	15000
Servicio de impresión 3D	12000	1	12000
Manguera de desagüe - 1 m	1000	1	1000
Juego de poleas y faja	\$15	1	9450
Motor eléctrico de corriente continua	\$ 7,75	1	4882,5
Driver del motor	\$ 12	1	7560
Fuente de tensión eléctrica variable	\$150	1	94500
Cable automotriz - 1 m	\$0,50	3	945
Conectores tipo banana	\$0,50	6	1890
Cables tipo banana	\$3,95	4	9954
Válvula reguladora del flujo del trazador	300	1	300
Jeringa para suministro del trazador	8000	1	8000
Tinta china negra Staedtler - 22 ml	3000	1	3000
Pegamento de Silicon - Loctite	\$ 27	1	17010
Cloroformo 50 ml	500	1	500
Jeringa de 3 cc	100	3	300
Kit de Dremel 3000 de velocidad variable	\$172,90	1	108927
Kit de accesorios de dremel - 110 PCS	\$69	1	43470
Set de llaves milimétricas Allen	\$9,30	1	5859
Pegamento de PVC	2850	1	2850
Caja de herramientas - INGCO	\$125	1	78750
Subtotal			5682191,3
Remuneración al estudiante	285000	4	1140000
Total			6822191,3

Table 5.3: Tabla de costos del proyecto

Resumen de Resultados de Validación		
Entrada	Puntuación de resultados	94,2%
	Tasa de aprobación	90,8%
Salida	Diferencia de puntuación	1,74
	Tasa de aprobación	68,3%
Salida sin imágenes sin el trazador	Diferencia de puntuación	2,48
	Tasa de aprobación	97,6%

Table 5.4: Resumen de resultados generales de validación.

el procesamiento estaba mejor adecuado para las imágenes con el trazador presente. Adicionalmente, otras 3 de las imágenes con nota inferior al 90%, la mejoraron en su equivalente procesado en relación a sin procesar, lo cual implicó que el procesamiento ayudó a mejorar las características de la imagen necesarias para el estudio del flujo producido por el impulsor. De manera general, los resultados cumplieron la meta establecida de una tasa de aprobación y puntuación, ambas superiores al 90%.

Por otra parte, los resultados de las imágenes de la salida del impulsor presentaron una tasa de aprobación del 68.3%, pues 41 de los 60 resultados presentaron una mejoría en el puntuación, mientras que el resto mantuvo su valor. Sin embargo, de los 19 resultados que no presentaron una mejoría, 18 de estos correspondían con imágenes en las que no se notaba contraste entre el agua clara y el agua tintada, pues no había llegado suficiente de la tinta del trazador a la salida del impulsor, por lo tanto, al considerar solo las imágenes con presencia del trazador en el agua, se tiene una tasa de aprobación del 97.6%. Por lo tanto, el procesamiento para las imágenes de salida del impulsor mejoran las características de la imagen el 97.6% de las veces cuando hay presencia de suficiente trazador a la salida del impulsor. Adicionalmente, de manera general, las imágenes mejoraron su puntuación en 1.74 puntos en promedio. Nuevamente, al considerar únicamente las imágenes con presencia del trazador, la mejoría promedio fue de 2.48 puntos.

Pregunta	Respuesta
1 (5)	2
2 (5)	5
3 (3)	2
4 (3)	2
5 (3)	3
6 (5)	5
7 (3)	3
Subtotal (27)	22
Nota	81,48

Table 5.5: Resultado de validación de la interfaz de usuario

Pregunta	Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5	Promedio
8 (5)	3	4	4	4	5	4
9 (5)	4	3	4	4	3	3,6
10 (5)	3	4	4	5	5	4,2
Subtotal (15)	10	11	12	13	13	11,8
Nota	66,67	73,33	80	86,67	86,67	78,67

Table 5.6: Resultados de encuesta de validación de la experiencia de usuario de la interfaz gráfica

La evaluación de la interfaz gráfica de usuario demostró un adecuado funcionamiento y respuesta por parte de los usuarios encuestados. Los resultados obtenidos para las preguntas sobre funcionamiento se muestran en el Cuadro 5.5, donde se obtuvo un total de 22 de los 27 puntos, para una nota de 81.48%. Los resultados de las últimas 3 preguntas se observan en el Cuadro 5.6. De estos resultados se obtuvo un total de puntos promedio de 11.8 de 15, para una nota de 78.67%. Por lo tanto, los resultados de la evaluación de la interfaz gráfica fueron un total de 33.8 de 42, para una nota porcentual de 80.48%. Para todas las preguntas, menos una, se cumplieron los valores marginales definidos y la nota final es superior al valor definido de 70%.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las conclusiones del proyecto, así como las principales recomendaciones definidas según el trabajo realizado, las falencias identificadas y los mayores problemas encontrados, con la finalidad de ayudar a los trabajos futuros relacionados con este proyecto.

6.1 Conclusiones

1. Se diseñó e implementó un sistema de visión por computadora capaz de capturar y procesar imágenes de 2 vistas perpendiculares entre sí del flujo producido por un impulsor del *VAD* y líneas de flujo resaltadas con un trazador.
2. Se determinó que las principales variables a dimensionar en el sistema de visión para la captura de imágenes, son el tipo de luz y su interacción con el campo de visión.

3. Se realizó una etapa de procesamiento de imágenes capaz de incrementar el contraste entre algunas líneas de flujo independientes del resto del flujo, permitiendo determinar la forma y trayectoria del trazador con mayor facilidad en más de un 90% de las veces.
4. Se obtuvieron resultados de imágenes que muestran el comportamiento del fluido tanto a la salida como la entrada del impulsor para una extensión total de tubo superior a 20 cm.
5. Se validó el sistema de visión artificial mediante una evaluación con escalas numéricas de características cualitativas, en la cual se obtuvo una tasa de aprobación superior al 90% de manera general.

6.2 Recomendaciones

Este proyecto se planteó sin contemplar el diseño ni rediseño de lo que se convirtió en la planta con la cual se obtuvieron los resultados finales, por lo cual hay mucho campo para mejoras y trabajos futuros tanto en para el sistema de visión artificial, como para la planta.

1. Cambiar el tanque por un recipiente de una sola pieza para reducir la posibilidad de fugas en las uniones de las diferentes caras de este.
2. Incluir una etapa de filtrado en la sección de retorno de la planta.
3. Cambiar el control del motor de lazo abierto a lazo cerrado para tener un mejor control y monitorización de la velocidad de giro del impulsor.
4. Agregar un segundo punto de apoyo al eje para evitar deflexión de este debido a las fuerzas transmitidas por la polea al extremo del eje.

5. Adecuar la planta para poder implementar otros modelos de impulsor del *VAD*, como el impulsor de levitador magnético.
6. Sustituir el trazador por alguna sustancia o material que sea no soluble en agua pero posea las propiedades físicas deseadas.
7. Incrementar la distancia entre la parte inferior del tubo de la planta con la superficie de la mesa, para tener más espacio para variar la distancia a la que se ubica el backlight del tubo.
8. Sustituir el backlight por uno con una superficie iluminada más larga para poder observar una mayor extensión del tubo por prueba.
9. Abordar el procesamiento de las imágenes desde un paradigma de inteligencia artificial, puesto que cada prueba es capaz de generar una gran cantidad de datos, sin embargo, para esto se necesitaría un adecuado etiquetado previo de estas imágenes.
10. Incrementar la versatilidad de la interfaz gráfica de usuario para poder comparar distintos resultados tanto una junto a otra, como una sobre otra, ya sea entre las imágenes originales, procesadas o una combinación de ambas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministerio de Salud de Costa Rica, “Indicadores básicos 2010: Situación de la salud en Costa Rica,” 2010.
- [2] Organización Panamericana de la Salud (OPS), “Indicadores básicos 2018: Situación de salud en las américas.” <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/vigilancia-de-la-salud/indicadores-de-salud-boletines/4017-indicadores-basicos-2018-ops/file>, 2019.
- [3] M. Ubilla, S. Mastrobuoni, A. M. Arnau, A. Cordero, E. Alegría, J. J. Gavira, M. J. Iribarren, T. Rodríguez, J. Herreros, and G. Rábago, *Trasplante Cardíaco*, vol. 29, pp. 63–78. Gobierno de Navarra. Departamento de Salud, 2006.
- [4] F. Gonzáles, L. Almenar, maría G. Crespo ande Lusi Alonso Pulpón, J. González, J. M. Sobrino, J. M. Arizón dle Prado, I. Soasa, J. Delgado, and F. Pérez, “Registro Español de trasplante cardiaco. XXIX informe oficial de la sección de insuficiencia cardiaca de la Sociedad Española de Cardiología (1984-2017),” *Revista Española de Cardiología*, vol. 71, Noviembre 2018.
- [5] G. Ortiz, “Estudio exploratorio para el desarrollo de un dispositivo de asistencia cardiaca,” 2011-2012.
- [6] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*. McGraw Hill Education, 5 ed., 2012.
- [7] G. Xi, Z. Wang, X. Li, and S. Wang, “Aerodynamic design and experimental validation of centrifugal compressor impellers with small flow rate,” *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air*, vol. 7, June 2009.
- [8] G. Ginga, I. R. Stanciu, S. Muntean, A. Baya, and L. E. Anton, “3D numerical flow analysis and experimental validation into a model impeller of storage pump,” *The 15th International Conference on Fluid Flow Technologies*, September 2012.

- [9] I. Saxena, K. Ehmann, and J. Cao, “Laser-induced plasma in aqueous media: numerical simulation and experimental validation of spatial and temporal profiles,” *Optical Society of America*, December 2014.
- [10] J. J. Montero, “Simulación numérica del sistema circulatorio,” Noviembre 2011.
- [11] V. Acebey, “Diseño de un primer prototipo de montaje experimental para la medición de esfuerzos por comprensión sobre el impulsor de bombas para sangre,” Noviembre 2020.
- [12] Tecnológico de Costa Rica, “Laboratorio de inteligencia artificial para las ciencias naturales (LIANA).” <https://www.tec.ac.cr/unidades/laboratorio-inteligencia-artificial-ciencias-naturales-liana>, Diciembre 2020.
- [13] Tecnológico de Costa Rica, “Líneas de investigación (LIANA).” <https://www.tec.ac.cr/lineas-investigacion>, Diciembre 2020.
- [14] Tecnológico de Costa Rica, “Desarrollo de modelos de impulsor para dispositivos de asistencia cardíaca (DAC).” <https://www.tec.ac.cr/proyectos/desarrollo-modelos-impulsor-dispositivos-asistencia-cardiaca-dac>, Diciembre 2020.
- [15] Bupa Global Latinoamérica, “Sistema cardiovascular.” <https://www.bupasalud.com/salud/sistema-cardiovascular>, 2020.
- [16] Meriam-Webster, Incorporated, “Definition of a water pump.” <https://www.merriam-webster.com/dictionary/water%20pump>, 2021.
- [17] The Home Depot, “Water pumps.” <https://www.homedepot.com/b/Plumbing-Water-Pumps/N-5yc1vZbqlb>, 2021.
- [18] Grundfos Ecademy, “Principales tipos de impulsor.” <https://www.grundfos.com/es/learn/ecademy/all-courses/basic-principles-and-pump-types/main-impeller-types>, 2020.
- [19] M. Ahmad, J. Glitza, F. M. von Aschwege, A. Hein, and B. Cauchi, “Pulse transit time estimation for blood pressure measurement in patients implanted with a left ventricular assist device,” *PervasiveHealth 2020*, May 2020.
- [20] World Health Organization, “World health statistics 2020, monitoring health for the SDGs sustainable development goals.” <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/332070/9789240005105-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, 2021.
- [21] Fundación Española del Corazón, “Insuficiencia cardíaca.” <https://fundaciondelcorazon.com/informacion-para-pacientes/enfermedades-cardiovasculares/insuficiencia-cardiaca.html>, 2021.
- [22] O. C. Manintveld, “Left ventricular assist device for end-stage heart failure: results of the first LVAD destination program in the Neatherlands,” *Online: at Springer-link.com*, October 2014.

- [23] H. Suwa, O. Seguchi, T. Fujita, Y. Murata, M. Hieda, T. Watanabe, T. Sato, H. Sunami, M. Yanase, H. Hata, and T. Nakatani, “Parcorporeal ventricular assist device as a bridge to transplant candidacy in the era of implantable continuous-flow ventricular assist device,” *The Japanese Society for Artificial Organs 2013*, October 2013.
- [24] J. D. Schmitto, J. S. Hanke, S. Rojas, M. Avsar, D. Malehsa, C. Bara, M. Strueber, and A. Haverich, “Circulatory support exceeding five years with a continuous-flow left ventricular assist device for advanced heart failure patients,” *Journal of Cardiothoracic Surgery*, 2015.
- [25] T. Krabatsch, I. Netuka, J. D. Schmitto, D. Zimpfer, J. Garbade, V. Rao, M. Morshuis, F. Beyersdorf, S. Marasco, L. Damme, and Y. Pya, “Heartmate 3 fully magnetically levitated left ventricular assist device for the treatment of advanced heart failure - 1 year results from the ce mark trial,” *Journal of Cardiothoracic Surgery*, 2017.
- [26] Evaheart, Inc., “Centrifugal LVAS.” <http://www.evaheart-usa.com/take-action>, 2014.
- [27] T. Sakaguchi, G. Matsumiya, D. Yoshioka, S. Miyagawa, H. Nishi, Y. Yoshikawa, S. Fukushima, S. Saito, T. Ueno, and Y. Sawa, “*DuraHeartTM* magnetically levitated left ventricular assist device,” *Official Journal of the Japanese Circulation Society*, July 2013.
- [28] Abbott, “Heartmate 3 LVAD.” <https://www.cardiovascular.abbott/us/en/hcp/products/heart-failure/left-ventricular-assist-devices/heartmate-3/about.html>, September 2018.
- [29] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. McGraw Hill, 1 ed., 2006.
- [30] F. M. White, *Mecánica de fluidos*. McGraw Hill, 5 ed., 2003.
- [31] H. D. Young and R. A. Freedman, *Física universitaria*, vol. 1. Pearson Educación, 12 ed., 2009.
- [32] J. F. Vélez Serrano, *Visión por computador*. S.L. - DYKINSON, 2 ed., 2003.
- [33] J. E. Sanchez and T. M. Rudolf, “Path planning based on an artificial vision system and optical character recognition (OCR),” *International Conference on Control and Computer Vision*, Junio 2019.
- [34] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer, 1 ed., 2010.
- [35] N. J. Nilsson, *Principles of Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann Publisher, Inc, 1980.

- [36] D. M. Krum, O. Omoteso, W. Ribarsky, T. Starner, and L. F. Hodges, "Evaluation of a multinodal interface for 3D terrain visualization," *IEEE Visualization*, Octubre 2002.
- [37] C. Conly, Z. Zhang, and V. Athitsos, "An integrated RGB-D system for looking up the meaning of signs," *International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Julio 2015.
- [38] R. Singh, B. Seth, and U. B. Desai, "Vision based GUI for interactive mobile robots," *International Conference on Intelligent User Interfaces*, Enero 2005.
- [39] E. Carrillo and A. A. Peñaloza, "Artificial vision to assure coffee-excelso beans quality," *Euro American Conference on Telematics and Information Systems*, Junio 2009.
- [40] S. Prasad, A. Prakash, S. K. Peddoju, and D. Ghosh, "Control of computer process using image processing and computer vision for low-processing devices," *International Conference on Advances in Coordination Chemistry and Isomerism*, Agosto 2012.
- [41] Y. Lang, D. Han, F. Bai, Z. Zhong, and Z. Weng, "Review of research and application of fluid flow detection based on computer vision," *International Conference on Computer Science and Application Engineering*, Octubre 2020.
- [42] H. D. Young and R. A. Freedman, *Física universitaria*, vol. 2. Pearson Educación, 12 ed., 2009.
- [43] L. M. González, "Teoría y manejo del color." <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/31280/secme-20912.pdf?sequence=>, 2016.
- [44] Cognex Corporation, "Machine vision lighting." <https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/components/lighting>, 2021.
- [45] Cognex Corporation, "Lens advisor." <https://www.cognex.com/resources/interactive-tools/lens-advisor>, 2021.
- [46] Y. Gu, Z. Cui, X. Yu, L. Wang, and C. Xiu, "A novel algorithm for modifying echocardiographic particle velocimetry flow field," *4th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*, 2011.
- [47] J. Voorneveld, A. Muralidharan, T. Hope, H. J. Vos, P. Kruizinga, A. F. W. van der Steen, F. J. H. Gijzen, S. Kenjeres, N. de Jong, and J. G. Bosch, "High frame rate ultrasound particle image velocimetry for estimating high velocity flow patterns in the left ventricle," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 65, no. 12, December 2018.
- [48] K. Komiya, T. Kurihara, and S. Ando, "3D particle image velocimetry using correlation image sensor," *SICE Annual Conference 2011*, September 2011.

- [49] P. Hochareon, K. B. Manning, A. A. Fontaine, S. Deutsch, and J. M. Tarbell, “Development of high resolution particle image velocimetry for use in artificial heart research,” *Proceedings of the Second Joint EMBS/BMES Conference*, October 2002.
- [50] H. Abe, “Echocardiographic particle image velocimetry in heart diseases,” *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2018.
- [51] R. Wang, C. Jiang, B. Yang, and J. Liu, “A novel vision-based tactile sensor using particle image velocimetry for multi-modal object detection and force sensing,” *IEEE MEMS 2021 Virtual Conference*, January 2021.
- [52] F. Wang, L. Li, H. Wang, K. Qian, W. Ru, P. Zeng, and Q. Wu, “Visualization of the flow patterns in the centrifugal blood pumps with particle image velocimetry,” *2009 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, 2009.
- [53] TSI Incorporated, “PIV systems.” <https://tsi.com/products/fluid-mechanics-systems/piv-systems/>, 2021.
- [54] N. Dietrich, S. Poncin, and H. Z. Li, “Dynamical deformation of a flat liquid-liquid interface,” *Springer Verlag 2010*, 2010.
- [55] T. Castellón, “Diseño y construcción de un aparato de Hele-Shaw.” <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/23656/u302977.pdf?sequence=1>, 2008.
- [56] A. M. Calderón, G. N. Vargas, and Y. J. Morales, “Aparato de Hele-Shaw.” <https://www.tecquipment.com/es/hele-shaw-apparatus#:~:text=El%20equipo%20consiste%20en%20un,arriba%2C%20produce%201%C3%ADneas%20de%20corriente.>, 2020.
- [57] J. F. Correa, “Información preliminar del Hele-Shaw. Hele Shaw modelo HS1-50-01.” https://www.epicos.com/sites/default/files/hele_shaw_data.pdf, 2016.
- [58] O. P. Reyes, G. Becerra, J. E. Pérez, E. Bernal, and L. F. Donis, “Manual de prácticas del laboratorio de mecánica de fluidos II.” https://www.ingenieria.unam.mx/termofluidos/docs/labtermofluidos/MADO-57_Mecanica_de_fluidos_2.pdf, September 2020.
- [59] E. Parra and L. A. Villamil, “Diseño y construcción de un equipo de laboratorio para visualización del flujo que circula alrededor de perfiles en 2D.” <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/141431.pdf>, 2015.
- [60] M. T. Avellaneda, “Implementación del montaje experimental para determinar el comportamiento de un flujo mediante el experimento de Reynolds.” <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14173/1/IMPLEMENTACION%20DEL%20MONTAJE%20EXPERIMENTAL%20PARA%20DETERMINAR%20EL%20COMPORTAMIENTO%20DE%20UN%20FLUJO%20MEDIANTE%20EL>.pdf, 2016.

- [61] TecQuipment, “Experimento de Reynolds (construcción de prototipo).” https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/4331/6/2017_experimento_reynolds_construccion.pdf, 2017.
- [62] D. C. Munson, “A note on lena,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 5, January 1996.
- [63] A. Rupani, P. Whig, G. Sujediya, and P. Vyas, “A robust technique for image processing based on interfacing of Raspberry-Pi and FPGA using IoT,” *2017 International Conference on Computer, Communication and Electronics*, July 2017.
- [64] C. S. Lindquist, T. S. C. Lindquist, and T. V. Lindquist, “New image processing algorithm requiring almost no apriori design information,” *Conference Record of Thirty-Second Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, November 1998.
- [65] S. Van-Der-Walt, “API reference for skimage 0.18.0.” <https://scikit-image.org/docs/stable/api/api.html>, 2021.
- [66] M. Kaur, J. Kaur, and J. Kaur, “Survey of contrast enhancement techniques based on histogram equalization,” (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 2, 2011.
- [67] J. A. Stark, “Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 9, May 2000.
- [68] S.-C. Huang, F.-C. Cheng, and Y.-S. Chiu, “Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, March 2013.
- [69] G. Deng and L. W. Cahill, “An adaptive gaussian filter for noise reduction and edge detection,” *IEEE Conference Record Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, 1993.
- [70] G. Gupta, “Algorithm for image processing using improved median filter and comparison of mean, median and improved median,” *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, November 2011.
- [71] D. Ziou and S. Tabbone, “Edge detection techniques - an overview,” *International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis*, vol. 8, pp. 537–559, 1998.
- [72] B. Zhang, Y. Gao, S. Zhao, and J. Liu, “Local derivative pattern versus local binary pattern: Face recognition with high-order local pattern descriptor,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 19, february 2010.
- [73] C. K. Lee and C. H. Li, “Minimum cross entropy thresholding,” *Pattern Recognition*, vol. 26, pp. 617–625, 1993.

- [74] L. Jianzhuang, L. Wenqing, and T. Yupeng, “Automatic thresholding of gray-level pictures using two-dimensional otsu method,” *International Conference on Circuits and Systems*, vol. 1, pp. 325–327, 1991.
- [75] S. Gopinathan and P. Deepa, “Enhancement of image segmentation using automatic histogram thresholding,” *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 3, april 2015.
- [76] J.-C. Yen, F.-J. Chang, and S. Chang, “A new criterion for automatic multilevel thresholding,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 4, March 1995.
- [77] P. Jannin, E. Krumpinski, and S. K. Warfield, “Validation in medical image processing,” *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2006.
- [78] A. F. M. Sampian, H. Hashim, M. M. Kamal, N. E. Abdullah, U. R. Yussuf, N. A. Khairuzzman, and A. F. M. Azmi, “Vision system for detection of white root disease infection based on capacitance properties,” *IEEE International Conference on Automatic Control and Inteligent Systems*, vol. 12, October 2016.
- [79] H. Allaka, D. Levy, T. Treibitz, and M. Groper, “Vision-aided speed modulation system to enhance seaworthiness of autonomous planing crafts,” *Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC)*, vol. 15, 2018.
- [80] R. B. Wakode, L. P. Raut, and P. Talmale, “Overview on Kanban Methodology and its implementation,” *International Journal of Scientific Research & Development*, vol. 3, 2015.
- [81] M. Mahalakshmi and M. Sundararajan, “Traditional SDLC vs Scrum Methodology - a comparative study,” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, 2013.
- [82] D. A. Fem and S. E. Donaldson, “Tri-cycle: A prototype for advanced software development,” *Gould Inc., Intelligent Systems Laboratory*, 1989.
- [83] R. G. Sabale and A. R. Dani, “Comparative study of prototype model for software engineering with system development life cycle,” *Journal of Engineering (IOSR-JEN)*, July 2012.
- [84] W. W. Royce, “Managing the development of large software systems,” *The institute of electrical and electronic engineers*, August 1970.
- [85] J.-A. Vayssade, R. Arquet, and M. Bonneau, “Automatic activity tracking of goats using drone camera,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 162, pp. 767–772, 2019.
- [86] T. C. Wilkes, A. J. S. McGonigle, T. D. Pering, A. J. Taggart, B. S. White, R. G. Bryant, and J. R. Willmott, “Ultraviolet imaging with low cost smartphone sensors: Development and application of a raspberry pi-based uv camera,” *Sensors*, vol. 16, no. 10, 2016.

- [87] J. Seok Oh, Y. Min Han, and S. Bok Choi, “Vibration control of a camera mount system for an unmanned aerial vehicle using piezostack actuators,” *IOP Science*, July 2011.
- [88] Smart Vision Lights, “Product data sheet - r130 EZ mount ring ligh.” https://smartvisionlights.com/wp-content/uploads/R130_Datasheet.pdf, September 2019.
- [89] Cognex Corporation, “In-Sight 7000 series vision system installation manual,” March 2021.
- [90] Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, Departamento de Salarios, “Salarios mínimos del sector privado para el año 2021.” http://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/Documentos-Salarios/lista_salarios_2021.pdf, Diciembre 2020.
- [91] J. Fraden, *Handbook of modern sensors. Physics, design, and applications*. Springer Science+Business Media, 4 ed., 2010.
- [92] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica*. McGraw Hill, 7 ed., 2012.
- [93] Tecnológico de Costa Rica, “¿Qué es el TEC?.” <https://www.tec.ac.cr/node/8035>, Diciembre 2020.
- [94] S. Li and M. Zhong, “High-precision disturbance compensation for a three-axis gyro-stabilized camera mount,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 6, pp. 3135–3147, 2015.
- [95] W. K. Wong, P. N. Tan, C. K. Loo, and W. S. Lim, “An effective surveillance system using thermal camera,” in *2009 International Conference on Signal Acquisition and Processing*, pp. 13–17, 2009.

ANEXO 1: RÚBRICA DE EVALUACIÓN PARA LA VALIDACIÓN

ENTRADA

Captura

1. ¿Se observa el tubo? (5 pts)

No se observa nada del tubo. (1 pts)

Se observa una sección del tubo de manera incompleta. (2 pts)

Se observa una sección completa pero muy pequeña del tubo. (3 pts)

Se observa una sección completa del tubo, pero el tubo está muy inclinado. (4 pts)

Se observa una sección completa del tubo con muy poca o ninguna inclinación. (5 pts)

2. ¿Se observa el impulsor? (5 pts)

No se observa el impulsor. (1 pts)

Se observa solo el contorno del impulsor. (2 pts)

Se observa una sección incompleta del impulsor. (3 pts)

Se observa todo el impulsor, pero de manera borrosa. (4 pts)

Se observa todo el impulsor adecuadamente. (5 pts)

3. **¿Se observa el trazador? (0 pts)**

Sí o no, en caso de no, saltar las siguientes 3 preguntas.

4. **¿Se aprecia la trayectoria del trazador? (5 pts)**

No se distingue la trayectoria del trazador. (1 pts)

Se distinguen algunos puntos del trazador. (2 pts)

Se distinguen suficientes puntos del trazador para apreciar la trayectoria. (3 pts)

Se distinguen casi toda la línea del trazador y la trayectoria. (4 pts)

Se distinguen toda la línea del trazador y su trayectoria. (5 pts)

5. **¿Cómo es el contraste entre el trazador y el fondo? (5 pts)**

No se distingue el trazador del fondo. (1 pts)

Hay un poco de contraste entre la mayoría del trazador y el fondo. (2 pts)

Hay un poco de contraste entre todo el trazador y el fondo. (3 pts)

Hay un poco de contraste en algunas partes y alto contraste en otras partes del trazador con respecto al fondo. (4 pts)

Hay alto contraste entre todo el trazador y el fondo. (5 pts)

6. **¿Queda marcada una estela de la línea de flujo? (5 pts)**

No queda marcada ninguna estela, solo la posición actual. (1 pts)

El trazador deja marcada la línea de flujo solo ligeramente detrás de su posición actual. (2 pts)

El trazador deja marcada la línea de flujo, pero se difumina lo más cercano al punto inicial. (3 pts)

El trazador deja marcada la línea de flujo durante todo su desplazamiento, pero se difumina un poco. (4 pts)

El trazador deja claramente marcada la línea de flujo durante todo su recorrido. (5 pts)

Procesado

1. ¿Se observa el interior del tubo? (5 pts)

No se observa el tubo. (1 pts)

Se observa todo el tubo menos algunas secciones en el interior. (2 pts)

Se observa todo el tubo, menos en alguno de los extremos. (3 pts)

Se observa todo el tubo, menos en alguno de los bordes del tubo. (4 pts)

Se observa toda la sección del tubo. (5 pts)

2. ¿Se observa el impulsor? (5 pts)

No se observa el impulsor. (1 pts)

Se observa solo parte del impulsor. (2 pts)

Se observa solo parte del contorno del impulsor. (3 pts)

Se observa casi todo el impulsor. (4 pts)

Se observa todo el impulsor o todo su contorno. (5 pts)

3. ¿Se observa el trazador? (0 pts)

Sí o no, en caso de no, saltar las siguientes 3 preguntas.

4. ¿Se aprecia la trayectoria del trazador? (5 pts)

No se distingue la trayectoria del trazador. (1 pts)

Se distinguen algunos puntos del trazador. (2 pts)

Se distinguen suficientes puntos del trazador para apreciar la trayectoria. (3 pts)

Se distinguen casi toda la línea del trazador y la trayectoria. (4 pts)

Se distinguen toda la línea del trazador y su trayectoria. (5 pts)

5. ¿Se observa la forma del trazador? (5 pts)

No se distingue la forma del trazador. (1 pts)

Se distingue la forma de algunas partes del trazador. (2 pts)

Se distinguen suficientes puntos del trazador para apreciar la forma. (3 pts)

Se distingue casi toda la forma de la línea del trazador. (4 pts)

Se distingue toda la forma de la línea del trazador. (5 pts)

6. ¿Cuál es el contraste entre el trazador y el fondo? (5 pts)

No se distingue el trazador del fondo. (1 pts)

Hay un poco de contraste entre la mayoría del trazador y el fondo. (2 pts)

Hay un poco de contraste entre todo el trazador y el fondo. (3 pts)

Hay un poco de contraste en algunas partes y alto contraste en otras partes del trazador con respecto al fondo. (4 pts)

Hay alto contraste entre todo el trazador y el fondo. (5 pts)

7. ¿Se segmentan elementos que no deberían segmentarse? (5 pts)

Se segmentan algunos elementos no deseados afuera del tubo. (1 pts)

Se segmentan algunos elementos no deseados en el interior del tubo. (2 pts)

Se segmentan algunos elementos no deseados alrededor del impulsor o bordes del tubo. (3 pts)

Se segmentan algunos elementos no deseados alrededor del trazador. (4 pts)

No se segmenta ningún elemento no deseado. (5 pts)

SALIDA

Captura

1. ¿Se observa el tubo? (5 pts)

No se observa nada del tubo. (1 pts)

Se observa una sección del tubo de manera incompleta. (2 pts)

Se observa una sección completa pero muy pequeña del tubo. (3 pts)

Se observa una sección completa del tubo, pero el tubo está muy inclinado. (4 pts)

Se observa una sección completa del tubo con muy poca o ninguna inclinación. (5 pts)

2. ¿Se observa el impulsor? (5 pts)

No se observa el impulsor. (1 pts)

Se observa solo el contorno del impulsor. (2 pts)

Se observa una sección incompleta del impulsor. (3 pts)

Se observa todo el impulsor, pero de manera borrosa. (4 pts)

Se observa todo el impulsor adecuadamente. (5 pts)

3. ¿Se observa el trazador después del impulsor? (0 pts)

Sí o no, en caso de no, saltar las siguientes 2 preguntas.

4. ¿Se observa la trayectoria del agua? (5 pts)

No se observa la trayectoria de ninguna línea de flujo. (1 pts)

Se observa parte de la trayectoria de alguna línea de flujo. (2 pts)

Se observa parte de la trayectoria de más de una línea de flujo. (3 pts)

Se observa la trayectoria de alguna línea de flujo. (4 pts)

Se observa la trayectoria de más de una línea de flujo. (5 pts)

5. ¿Cuál es el contraste entre el agua tintada por el trazador y el agua clara? (5 pts)

No se tiene contraste entre ambas aguas. (1 pts)

Se tiene un leve contraste en algunas partes y ningún contraste en otras, entre ambas aguas. (2 pts)

Se tiene un leve contraste entre ambas aguas. (3 pts)

Se tiene leve contraste en algunas partes y alto contraste en otras, entre ambas aguas. (4 pts)

Se tiene un alto contraste entre ambas aguas. (5 pts)

Procesado

1. **¿Se observa el interior del tubo? (5 pts)**

No se observa el tubo. (1 pts)

Se observa todo el tubo menos algunas secciones en el interior. (2 pts)

Se observa todo el tubo, menos en alguno de los extremos. (3 pts)

Se observa todo el tubo, menos en alguno de los bordes del tubo. (4 pts)

Se observa toda la sección del tubo. (5 pts)

2. **¿Se observa el impulsor? (5 pts)**

No se observa el impulsor. (1 pts)

Se observa solo parte del impulsor. (2 pts)

Se observa solo el contorno del impulsor. (3 pts)

Se observa casi todo el impulsor. (4 pts)

Se observa todo el impulsor. (5 pts)

3. **¿Se observa el trazador después del impulsor? (0 pts)**

¿Sí o no? En caso de no, saltar las siguientes 2 preguntas.

4. **¿Se observa la trayectoria del agua? (5 pts)**

No se observa la trayectoria de ninguna línea de flujo. (1 pts)

Se observa parte de la trayectoria de alguna línea de flujo. (2 pts)

Se observa parte de la trayectoria de más de una línea de flujo. (3 pts)

Se observa la trayectoria de alguna línea de flujo. (4 pts)

Se observa la trayectoria de más de una línea de flujo. (5 pts)

5. **¿Cuál es el contraste entre el agua tintada por el trazador y el agua clara? (5 pts)**

No se tiene contraste entre ambas aguas (1 pts)

Se tiene un leve contraste en algunas partes y ningún contraste en otras, entre ambas aguas (2 pts)

Se tiene un leve contraste entre ambas aguas (3 pts)

Se tiene leve contraste en algunas partes y alto contraste en otras, entre ambas aguas (4 pts)

Se tiene un alto contraste entre ambas aguas (5 pts)

INTERFAZ DE USUARIO

Funcionalidad

1. ¿Se genera un video del resultado? (5 pts)

No se muestra video del resultado en ningún momento de la prueba. (1 pts)

Se muestra un video del resultado solamente durante la prueba. (2 pts)

Se genera un video del resultado después de la prueba. (3 pts)

Se muestra video del resultado durante y después de la prueba. (4 pts)

Se muestra video del resultado durante y después de la prueba y se genera un video del resultado segmentado. (5 pts)

2. ¿Se ven cuadros específicos del video? (5 pts)

No se pueden ver cuadros específicos del video de manera individual. (1 pts)

Se puede detener el video para ver un único cuadro por más tiempo. (2 pts)

Se pueden pasar los cuadros de manera individual (de uno en uno). (3 pts)

Se pueden seleccionar cuadros específicos del video. (4 pts)

Se pueden seleccionar cuadros específicos del video o pasarlos individualmente. (5 pts)

3. ¿Se pueden ver las líneas de flujo en tiempo real? (3 pts)

No se pueden ver las líneas de flujo digitalmente en tiempo real. (1 pts)

Se pueden ver las líneas de flujo digitalmente sin segmentar en tiempo real. (2 pts)

Se pueden ver las líneas de flujo digitalmente segmentadas en tiempo real. (3 pts)

4. **¿Se pueden ver los resultados de distintas pruebas al mismo tiempo? (3 pts)**

No se pueden ver los resultados de más de una prueba a la vez. (1 pts)

Se pueden ver los resultados sin segmentar de más de una prueba a la vez. (2 pts)

Se pueden ver los resultados segmentados de más de una prueba a la vez. (3 pts)

5. **¿Se pueden ver las líneas de flujo antes y después del impulsor? (3 pts)**

No se pueden ver las líneas de flujo ni antes ni después. (1 pts)

Se pueden ver las líneas de flujo antes o después del impulsor, pero no en el otro. (2)

Se pueden ver las líneas de flujo antes y después del impulsor. (3)

6. **¿Se tienen 2 vistas ortogonales? (5 pts)**

No se tienen 2 vistas del tubo. (1 pts)

Se tienen 2 vistas del tubo, pero no son ortogonales entre sí. (2 pts)

Se tienen 2 vistas ortogonales del tubo, pero se toman con la misma cámara en distintas pruebas. (3 pts)

Se tienen 2 vistas ortogonales del tubo para la misma prueba, pero no se capturan las imágenes de forma sincronizada. (4 pts)

Se tienen 2 vistas ortogonales del tubo para la misma prueba y las capturas están sincronizadas. (5 pts)

7. **¿Se pueden ver los resultados en otro momento? (3 pts)**

Los resultados solo se pueden ver mientras se realiza la prueba. (1 pts)

Los resultados solo se pueden ver inmediatamente después de la prueba. (2 pts)

Los resultados se pueden ver en cualquier momento después de terminada la prueba. (3 pts)

Experiencia

1. **¿Qué tan intuitivo considera que es el programa? (5 pts)**

Muy poco intuitivo. (1 pts)

Poco intuitivo. (2 pts)

Medianamente intuitivo. (3 pts) Íntuitivo. (4 pts)

Muy intuitivo. (5 pts)

2. **¿Qué tan estéticamente atractivo considera que se presenta el programa y sus controles? (5 pts)**

Muy poco atractivo. (1 pts)

Poco atractivo. (2 pts)

Medianamente atractivo. (3 pts)

Atractivo. (4 pts)

Muy atractivo. (5 pts)

3. **¿Qué tan estéticamente atractivo considera que se presentan los resultados? (5 pts)**

Muy poco atractivo. (1 pts)

Poco atractivo. (2 pts)

Medianamente atractivo. (3 pts)

Atractivo. (4 pts)

Muy atractivo. (5 pts)

ANEXO 2: RESULTADOS DE EVALUACIÓN PARA LA VALIDACIÓN

Cámara	Tipo	# de pregunta	82	112	273	378	469	549	617	762	857	952
1	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	5	x	5	5	5	5	5	4	5	5
		5 (5)	3	x	5	4	4	4	5	4	4	5
		6 (5)	5	x	5	5	5	5	5	5	5	5
	Total (10 o 25)		92	100	100	96	96	96	100	92	96	100
	Procesado	1 (5)	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	2	x	5	4	5	5	5	4	4	5
		5 (5)	2	x	5	4	5	5	5	4	4	5
		6 (5)	5	x	5	5	5	5	5	5	5	5
		7 (5)	4	5	5	4	5	5	5	5	5	5
Total (15 o 30)		73,33	93,33	100	90	100	100	100	93,33	93,33	100	
2	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	5	5	5	5	5	5	5	5
		5 (5)	x	x	4	4	3	4	3	3	4	4
		6 (5)	x	x	5	5	5	5	5	5	5	5
	Total (10 o 25)		100	100	96	96	92	96	92	92	96	96
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	5	5	5	5	5	5	5	4
		5 (5)	x	x	5	4	5	5	5	4	5	5
		6 (5)	x	x	5	5	5	5	5	5	5	5
		7 (5)	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
Total (15 o 30)		86,67	86,67	96,67	93,33	96,67	96,67	96,67	90	96,67	93,33	

Table A.1: Resultados de evaluación de los resultados para la primera prueba de la entrada del impulsor para la validación. (Elaboración propia).

Cámara	Tipo	# de pregunta	19	178	215	362	496	511	678	744	847	935	
1	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		3 (0)	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		5 (5)	x	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4
		6 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Total (10 o 25)		100	96	96	92	92	92	96	96	96	96	96
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		5 (5)	x	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		6 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		7 (5)	2	5	5	5	5	5	5	4	5	5	2
Total (15 o 30)		80	93,33	100	100	100	100	96,67	100	100	90	90	
2	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		3 (0)	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5
		5 (5)	x	5	4	4	4	2	4	3	4	4	4
		6 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Total (10 o 25)		100	100	96	96	92	88	96	92	96	96	96
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	4
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4
		5 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5
		6 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		7 (5)	2	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4
Total (15 o 30)		80	96,67	96,67	96,67	96,67	93,33	93,33	96,67	86,67	90	90	

Table A.2: Resultados de evaluación de los resultados para la segunda prueba de la entrada del impulsor para la validación. (Elaboración propia).

Cámara	Tipo	# de pregunta	33	149	228	367	430	503	618	777	806	996	
1	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		3 (0)	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		5 (5)	x	3	4	3	3	3	4	4	4	4	3
		6 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
		Total (10 o 25)		100	92	96	92	92	92	96	96	96	96
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	5	4	5	5	4	4	5	5	5	4
		5 (5)	x	5	4	4	5	4	4	5	5	5	4
		6 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		7 (5)	4	4	4	5	4	4	4	2	2	2	4
Total (15 o 30)		93,33	96,67	90	96,67	96,67	90	90	90	90	90	90	
2	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		3 (0)	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		5 (5)	x	3	4	3	3	2	4	3	4	4	3
		6 (5)	x	5	4	5	5	5	5	4	4	5	4
		Total (10 o 25)		100	92	92	92	92	88	96	88	96	88
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5
		5 (5)	x	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5
		6 (5)	x	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		7 (5)	2	3	3	4	5	3	4	4	4	4	3
Total (15 o 30)		80	93,33	93,33	93,33	100	93,33	96,67	90	96,67	93,33		

Table A.3: Resultados de evaluación de los resultados para la tercera prueba de la entrada del impulsor para la validación. (Elaboración propia).

Cámara	Tipo	# de pregunta	10	116	287	380	422	582	652	701	805
1	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	x	4	4	4	3	2	4
		5 (5)	x	x	x	3	3	3	2	2	2
		Total (10 o 20)	10	10	10	17	17	17	15	14	16
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	x	4	5	5	4	4	4
		5 (5)	x	x	x	4	4	4	4	4	4
		Total (10 o 20)	10	10	10	18	19	19	18	18	18
	Diferencia	0	0	0	1	2	2	3	4	2	
2	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	x	1	1	2	1	2	2
		5 (5)	x	x	x	1	1	2	1	2	2
		Total (10 o 20)	10	10	10	12	12	14	12	14	14
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	x	3	1	3	2	3	3
		5 (5)	x	x	x	2	1	2	3	3	3
		Total (10 o 20)	10	10	10	15	12	15	15	16	16
	Diferencia	0	0	0	3	0	1	3	2	2	

Table A.4: Resultados de evaluación de los resultados para la primera prueba de la salida del impulsor para la validación. (Elaboración propia).

Cámara	Tipo	# de pregunta	2	193	282	306	452	541	639	742	856	927
1	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	x	4	3	3	2	2	1	1
		5 (5)	x	x	x	2	2	2	2	2	1	1
		Total (10 o 20)	10	10	10	16	15	15	14	14	12	12
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	x	4	4	5	4	3	2	3
		5 (5)	x	x	x	3	4	4	4	4	2	2
		Total (10 o 20)	10	10	10	17	18	19	18	17	14	15
		Diferencia	0	0	0	1	3	4	4	3	2	3
	2	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2 (5)			5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3 (0)			No	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
4 (5)			x	x	x	x	2	3	3	2	1	1
5 (5)			x	x	x	x	2	2	2	2	1	1
Total (10 o 20)			10	10	10	10	14	15	15	14	12	12
Procesado		1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	x	x	3	3	3	3	2	2
		5 (5)	x	x	x	x	4	4	4	3	2	2
		Total (10 o 20)	10	10	10	10	17	17	17	16	14	14
		Diferencia	0	0	0	0	3	2	2	2	2	2

Table A.5: Resultados de evaluación de los resultados para la segunda prueba de la salida del impulsor para la validación. (Elaboración propia).

Cámara	Tipo	# de pregunta	40	186	275	384	420	555	646	718	832	943	1042	
1	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
		3 (0)	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	2	3	2	3	2	2	1	2	2	1
		5 (5)	x	x	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
		Total (10 o 20)	10	10	14	15	14	15	14	14	12	13	13	12
	Procesado	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	3	5	4	4	3	3	3	3	3	2
		5 (5)	x	x	3	3	3	4	3	3	3	3	3	2
		Total (10 o 20)	10	10	16	18	17	18	16	16	16	16	16	14
		Diferencia	0	0	2	3	3	3	2	4	3	3	3	2
	2	Captura	1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2 (5)			5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
3 (0)			No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
4 (5)			x	x	x	1	1	2	3	1	2	2	1	
5 (5)			x	x	x	1	1	2	2	1	2	2	1	
Total (10 o 20)			10	10	10	12	12	14	15	12	14	14	12	
Procesado		1 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		2 (5)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		3 (0)	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
		4 (5)	x	x	x	3	3	3	4	3	3	3	3	3
		5 (5)	x	x	x	2	3	3	4	3	3	3	3	2
		Total (10 o 20)	10	10	10	15	16	16	18	16	16	16	16	15
		Diferencia	0	0	0	3	4	2	3	4	2	2	2	3

Table A.6: Resultados de evaluación de los resultados para la tercera prueba de la salida del impulsor para la validación. (Elaboración propia).