



# UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE COLOR IN SITU Y EN TIEMPO REAL EN UN EQUIPO DE EXTRACCIÓN DE JAMAICA UTILIZANDO UNA CÁMARA CCD”

## TESIS

PARA OBTENER TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA

PRESENTA

**GIBRAN PACHECO LÓPEZ**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. ROSEBET MIRANDA LUNA**

CO-DIRECTOR DE TESIS

**DR. ROGELIO VALADEZ BLANCO**

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA. OCTUBRE DE 2014



Tesis presentada en Agosto de 2014 ante el siguiente jurado:

Dr. Rosebet Miranda Luna (Director)

Dr. Rogelio Valadez Blanco (Co-Director)

Dr. Manuel Arias Montiel (sinodal)

Dr. José Aníbal Arias Aguilar (sinodal)

MC. Fermín Hugo Ramírez Leyva (sinodal)



*Dedicado a:*

*Este trabajo de tesis se lo dedico primeramente a la persona que más quiero y admiro, a la que siempre está ahí cuando más lo necesito, a ti mi Madre, te amo mama. Y por supuesto a esos tres tipos que hacen que la felicidad sea más fácil de encontrar, papa, Ivan y Obed, los quiero mucho.*



# Agradecimientos

Quiero comenzar esta página agradeciendo a mis directores de tesis el Dr. Rosebet Miranda Luna y el Dr. Rogelio Valadez Blanco, por su gran apoyo a lo largo de todo este proyecto de tesis. Por la confianza que me aportaron y todas las horas de trabajo invertidas. A mis sinodales por su tiempo invertido en las correcciones y en sus aportaciones tan puntuales, al Dr. Manuel Arias Montiel, Dr. José Anibal Arias Aguilar y MC. Fermin Hugo Ramirez Leyva, muchas gracias.

También agradecer a la Dra. Patricia Magaly Gallegos Acevedo por las aportaciones a este trabajo, pero principalmente por ser la responsable en convencerme de hacer la tan famosa tesis. Muchas gracias.

Quiero agradecer a quienes conformamos a la UTM de la que me siento muy orgulloso, pues la UTM no son los edificios y los laboratorios, sino los alumnos y profesores que trabajan todos los días y que hacen de esta una Universidad de calidad.

Quiero agradecer a todos mis compañeros de la generación por hacer mis días de la Universidad tan placenteros. Por despertarme todas esas mañanas y tener ganas de verlos y no perderme ningún comentario, ningún chiste, nada. Difícilmente tendré un grupo tan unido como ustedes. Un verdadero gusto formar parte de él. Una mención especial a mi amigo Abel que me ayudo en la interfaz que se realizó en la tesis, muchas gracias Abel.

A todos los profesores que me impartieron clase, que se esmeraron y procuraron el pleno entendimiento. Afortunadamente fueron muchos como para enumerarlos. En sus

clases aprendí el significado de esfuerzo, y no me refiero a esfuerzo = fuerza/área que también me enseñaron, sino que anteriormente nunca me tuve que esforzar en nada para entender algo, todo era muy simple, solo que a partir de ese momento las cosas no fueron tan simples y había que esforzarse para obtener lo que se quería. Aquí tuve que aprender hábitos, buenos hábitos para poder seguir adelante.

A mis compañeros de trabajo que siempre estuvieron en la mejor disposición para ayudarme y hacer que no me volviera loco redactando el documento. Al Dr. Marco, mi jefe, por el apoyo que siempre me brindó.

Muy probablemente se me escapen mencionar a varias personas, a todas esas personas que me apoyaron o ayudaron, gracias.

---

# Resumen

En diferentes industrias existe la necesidad de monitorear la evolución del color de líquidos durante el procesamiento de alimentos, bebidas, fármacos, y aguas residuales, etc. Este monitoreo se refiere a una medición en línea, in situ y en tiempo real. Actualmente las mediciones del color de líquidos se realizan fuera de línea. La obtención de esta medición es un procedimiento laborioso, costoso y poco eficiente, debido a la necesidad de recursos humanos para la realización de toma de muestras y análisis. Para ayudar al control de procesos y de la calidad de los productos de la industria de bebidas se realizó el diseño y la construcción de un sistema de monitoreo de color de líquidos en línea. Este equipo, denominado INI-LAB, tiene la característica de capturar imágenes con una cámara CCD de color de alta velocidad y resolución. La muestra a observar es iluminada por una fuente de luz blanca que consiste de LEDs de alta luminosidad. El dispositivo cuenta con un sistema óptico para el correcto enfoque de las imágenes. Para obtener datos de color en el sistema CIELAB, se realizó una correlación entre los datos RGB obtenidos por una videocámara a color y los datos de entrenamiento  $L^*a^*b^*$  obtenidos con un colorímetro espectrofotométrico comercial de laboratorio HunterLab ScanVis; la correlación de datos se realizó por 2 métodos: 1) la propuesta de una matriz de transformación y 2) un algoritmo de Redes Neuronales Artificiales (RNA). El sistema tuvo una precisión aceptable ( $\Delta E < 20$ ) con respecto a las mediciones realizadas con el colorímetro de laboratorio (HunterLab), para la estimación del color de bebidas comerciales translúcidas con un amplio rango de colores. El sistema de monitoreo fue sensible en el rango de las concentraciones de colorante empleadas (6-600 mg/L). Se obtuvo una alta precisión para medir el color ( $Cv_{max} < 0,7\%$ ). Debido a su alta precisión, el sistema fue capaz de distinguir con un intervalo de confianza de 99%, los parámetros de color CIELab de muestras parecidas. El sistema permite obtener cinéticas de extracción de compuestos coloridos a partir de jamaica en función de la temperatura. Se demostró la

potencialidad del sistema INI-LAB para el monitoreo en línea de cambios rápidos en el color en procesos industriales.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	4
1.2. Justificación . . . . .	5
1.3. Objetivos . . . . .	6
1.3.1. Objetivo general . . . . .	6
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	7
1.4. Descripción de la metodología . . . . .	7
1.5. Estructura de la tesis . . . . .	10
<b>2. Estado del arte y marco teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Estado del arte . . . . .	11
2.1.1. Sistemas de monitoreo de color . . . . .	11
2.1.2. Sistema de monitoreo in situ . . . . .	14
2.2. Marco teórico . . . . .	17
2.2.1. Cámaras digitales CCD . . . . .	17
2.2.2. Lentes . . . . .	19
2.2.3. Formación de imágenes mediante lentes delgadas . . . . .	19
2.2.4. La ecuación de las lentes y el aumento . . . . .	20
2.2.4.1. Reflexión de la luz . . . . .	21
2.2.5. Espacios de color . . . . .	23
2.2.6. Sistemas de iluminación mediante LEDs de alta luminosidad . . . . .	27
2.2.7. Redes neuronales . . . . .	29

2.2.7.1.	Función de activación . . . . .	30
2.2.7.2.	Modelo matemático de las redes neuronales artificiales . . . . .	31
2.2.7.3.	Tipos de arquitecturas . . . . .	32
2.2.7.4.	Algoritmos de entrenamiento . . . . .	33
2.2.7.5.	Aprendizaje supervisado . . . . .	33
2.2.7.6.	Aprendizaje no supervisado . . . . .	34
2.2.7.7.	Modelo de retro-propagación . . . . .	34
2.2.8.	Fase de creación y desarrollo . . . . .	35
2.2.8.1.	Diseño de la arquitectura . . . . .	36
2.2.8.2.	Fase de entrenamiento . . . . .	36
2.2.8.3.	Fase de validación o test . . . . .	36
<b>3.</b>	<b>Desarrollo</b>	<b>39</b>
3.1.	Concepto de diseño . . . . .	39
3.1.1.	Selección de videocámara y diseño de sonda . . . . .	40
3.1.2.	Control de luminosidad . . . . .	43
3.1.3.	Carcasa . . . . .	45
3.1.4.	Sistema para reducir la velocidad de flujo e iluminación a contraluz . . . . .	46
3.2.	Manufactura del dispositivo . . . . .	46
3.2.1.	Manufactura de la sonda . . . . .	47
3.2.2.	Manufactura del soporte para la lente. . . . .	47
3.2.3.	Manufactura del soporte para la ventana de zafiro . . . . .	48
3.2.4.	Manufactura de la carcasa y tapa . . . . .	50
3.2.5.	Manufactura del reductor de velocidad . . . . .	51
3.2.6.	Ensamble de piezas . . . . .	52
3.3.	Software desarrollado . . . . .	53
<b>4.</b>	<b>Metodología experimental</b>	<b>59</b>
4.1.	Pruebas de funcionalidad, sensibilidad y reproducibilidad del equipo . . . . .	59
4.2.	Correlación de datos . . . . .	59

---

4.2.1. Correlación de datos usando una matriz de corrección . . . . .	60
4.2.2. Correlación de datos por RNA . . . . .	60
4.2.3. Preparación y captura de muestras para correlación RGB-L*a*b* . . . . .	60
4.2.4. Mediciones al banco de muestras . . . . .	62
4.3. Validación utilizando bebidas comerciales . . . . .	63
4.4. Pruebas en línea: Proceso de extracción sólido-líquido de flor de jamaica . . . . .	64
<b>5. Resultados</b>	<b>67</b>
5.1. Correlación de datos RGB a L*a*b* usando el banco de muestras . . . . .	68
5.1.1. Implementación del método por matriz de corrección . . . . .	70
5.1.2. Implementación del método RNA . . . . .	70
5.2. Comparativa de métodos de correlación . . . . .	73
5.3. Análisis de sensibilidad del dispositivo . . . . .	74
5.4. Validación de las bebidas comerciales . . . . .	75
5.5. Validación extracción sólido-líquido de la flor de jamaica . . . . .	79
5.6. Cinéticas de extracción sólido-líquido de flor de jamaica en función de la temperatura . . . . .	82
5.7. Otros resultados interesantes . . . . .	83
<b>6. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>85</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	85
6.2. Trabajo futuro . . . . .	86
<b>Bibliografía</b>	<b>87</b>
<b>A. Espectro de emisión de los LEDs blancos de alta luminosidad</b>	<b>91</b>
<b>B. Instalación</b>	<b>93</b>
B.1. Requerimientos . . . . .	93
B.2. Pruebas de compatibilidad . . . . .	95
<b>C. Entrenando redes neuronales en Matlab 2013 A</b>	<b>97</b>

---

D. Proceso de simulación de una RNA	103
E. Planos de piezas	107
F. Control de iluminación difusa	113
G. Maquinado de una cuerda	115
H. Lista de materiales utilizados	117
I. Guía de usuario	121
J. Tablas de resultados	125

# Índice de figuras

2.1. Colorímetros portátiles . . . . .	13
2.2. Microscopio de Visión de Partículas (PVM) [9]. . . . .	15
2.3. Analizador de Imágenes y Partículas (PIA) [9]. . . . .	16
2.4. Sistema de reflectancia de haz enfocado (FBRM). . . . .	16
2.5. Estructura de un Chip CCD. <a href="http://aficionadosalafotografia.com/la-camara-de-video-el-sensor/">http://aficionadosalafotografia.com/la-camara-de-video-el-sensor/</a> . . . . .	17
2.6. Diagrama del funcionamiento de una Cámara CCD. . . . .	18
2.7. Lente biconvexa. <a href="http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/11078">http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/11078</a> . . . . .	19
2.8. Esquema de los rayos principales que conforman una imagen. . . . .	20
2.9. Diagrama utilizado para la deducción de la ecuación de las lentes y el aumento. . . . .	21
2.10. Reflexión especular. . . . .	22
2.11. Reflexión difusa. . . . .	22
2.12. Sistema de color MUNSSELL. . . . .	24
2.13. Espectros de emisión de los diferentes iluminantes. <a href="http://www.gusgsm.com/iluminantes_estandares_cie">http://www.gusgsm.com/iluminantes_estandares_cie</a> . . . . .	25
2.14. Espacio de color CIELAB. <a href="http://rdesign.over-blog.com/color-lab">http://rdesign.over-blog.com/color-lab</a> . . . . .	26
2.15. Espectro de emisión de un LED de luz blanca de alta luminosidad. Imagen tomada de [18]. . . . .	27
2.16. Vista esquemática de un LED [18]. . . . .	28

2.17. Gráfica que relaciona la corriente y el voltaje de 2 LED's de luz blanca de dos marcas diferentes. . . . .	28
2.18. Tres ejemplos de funciones de activación . . . . .	31
2.19. Representación matemática de una RNA . . . . .	32
2.20. Arquitectura MLP [17]. . . . .	32
2.21. Representación de mínimos locales y globales . . . . .	35
3.1. Concepto de diseño. . . . .	40
3.2. Características de la videocámara DCU223C. . . . .	41
3.3. Área del sensor de la videocámara y de la escena a observar . . . . .	43
3.4. Sistema de iluminación en el interior de la sonda. . . . .	43
3.5. Maquina de estados y distribución de los LEDs . . . . .	44
3.6. Circuito esquemático . . . . .	45
3.7. Pieza sonda de acero . . . . .	47
3.8. Desbaste de la pieza soporte de lente en el torno horizontal . . . . .	48
3.9. Maquinado de la pieza soporte de la lente en la fresadora manual vertical . . . . .	49
3.10. Pieza porta ventana de zafiro montada en la fresa vertical y el cabezal divisor . . . . .	49
3.11. Manufactura de la carcasa en el torno CNC . . . . .	50
3.12. Manufactura de cuerda para los prisioneros en la carcasa . . . . .	51
3.13. Sistema de iluminación a contraluz. . . . .	51
3.14. Material necesario para el pegado de la lente y la ventana de zafiro . . . . .	52
3.15. Cableado del sistema de iluminación . . . . .	53
3.16. Estuche terminado. . . . .	53
3.17. Diagrama de flujo del proceso para determinar los valores $L^*a^*b^*$ . . . . .	54
3.18. Estructura de la secuencia 100 del programa en LabVIEW. . . . .	55
3.19. Módulos para determinar el promedio de las componentes RGB y las componentes $L^*a^*b^*$ . . . . .	56
3.20. Módulo para guardar datos en un archivo CSV. . . . .	57

---

3.21. Módulo para guardar imágenes. . . . .	57
4.1. Banco de muestras puntuales . . . . .	61
4.2. Evoluciones de color . . . . .	61
4.3. Mediciones de color al banco de muestras. . . . .	62
4.4. Bebidas comerciales . . . . .	63
4.5. Proceso de extracción sólido-líquido a partir de la flor de jamaica. . . . .	65
5.1. Sistema de monitoreo de color INI-LAB. . . . .	67
5.2. Comparativa del comportamiento de la componente R. . . . .	69
5.3. Arquitectura que presentó los mejores resultados. . . . .	71
5.4. Diagrama de los componentes de la arquitectura utilizada para la compo- nente $L^*$ . . . . .	71
5.5. Comportamiento de la componente $L^*$ del banco de muestras. . . . .	74
5.6. Diferencia de color $\Delta E$ entre mediciones en línea y fuera de línea realizadas a las muestras comerciales. . . . .	76
5.7. Bebidas comerciales. Muestra M2, M3, M4, M5 y M8 respectivamente. . . . .	78
5.8. Comportamiento de la componente $L^*$ durante el monitoreo del proceso de extracción de jamaica. . . . .	80
5.9. Comportamiento de la componente $a^*$ durante el monitoreo del proceso de extracción de jamaica. . . . .	80
5.10. Comportamiento de la componente $b^*$ durante el monitoreo del proceso de extracción de jamaica. . . . .	81
5.11. Evolución del color del proceso de extracción de la jamaica. . . . .	81
5.12. Evolución de la componente $L^*$ durante el proceso de extracción de ja- maica a diferentes temperaturas. . . . .	82
5.13. Imagen de un cabello humano observado por el sistema INI-LAB. . . . .	83
A.1. Pruebas de iluminación del LED blanco de alta luminosidad . . . . .	91
A.2. Pruebas de iluminación del LED blanco de alta luminosidad utilizando un espectrofotómetro comercial . . . . .	92

B.1. Ventana de instalación de LabVIEW 2013 . . . . .	94
B.2. Ventana de inicio de LabVIEW 2013 . . . . .	95
B.3. Ventana de instalación de THORLABS . . . . .	95
B.4. Cámara CDU223C vista posterior . . . . .	96
B.5. Correcta visualización de la interfaz del sistema INI-LAB . . . . .	96
C.1. Interfaz en Matlab. . . . .	97
C.2. Ventana del manejador de datos de las redes neuronales . . . . .	98
C.3. Ventana de datos para importar . . . . .	99
C.4. Ventana de configuración de la red neuronal artificial . . . . .	100
C.5. Ventana de la visualización de la RNA creada . . . . .	101
C.6. Entrenamiento de la RNA . . . . .	101
C.7. Ventana de visualización de los pesos y sesgo de la RNA . . . . .	101
D.1. Ventana de visualización de los pesos y sesgo de la RNA. . . . .	103
D.2. Ventana de visualización de los pesos y sesgo de la RNA, y mensaje de datos guardados. . . . .	104
D.3. Ventana de simulación de datos de entrada. . . . .	104
D.4. Ventana para exportar datos al workspace de Matlab. . . . .	105
E.1. Sonda de acero inoxidable 316 . . . . .	107
E.2. Carcasa de Nylamid . . . . .	108
E.3. Tapa de Nylamid . . . . .	109
E.4. Porta ventana de zafiro de PTFE . . . . .	110
E.5. Porta lente de PTFE . . . . .	111
E.6. Sistema de iluminación a contra luz de Nylamid . . . . .	112
F.1. Pistas de circuito impreso . . . . .	113
F.2. Vista superior del sistema de iluminación . . . . .	114
G.1. Características de una cuerda. . . . .	115

---

I.1. Posición adecuada para el sistema de iluminación a contra luz . . . . .	122
I.2. Interfaz de usuario . . . . .	123



# Índice de tablas

4.1. Relación de muestras comerciales. . . . .	63
5.1. Precisión de las mediciones del color realizadas a una misma muestra usando diferentes modos de medición. . . . .	75
5.2. Comparativa de mediciones de muestras opacas . . . . .	77
5.3. Comparativa de mediciones de muestras similares. . . . .	78
H.1. Lista de materiales. . . . .	117
H.1. (continuación) . . . . .	118
H.1. (continuación) . . . . .	119
J.1. Concentrado del banco de muestras. . . . .	125
J.1. (continuación) . . . . .	126



# Capítulo 1

## Introducción

Para el control de la calidad de procesos químicos, alimentarios, farmacéuticos o biotecnológicos, se requiere la medición de variables como pH, oxígeno disuelto, densidad, viscosidad, color, concentración de cloro, turbidez, tamaño y forma de las micropartículas y conductividad. De manera muy particular en la industria de los alimentos y de bebidas, las exigencias a las que están sometidos los procesos son elevadas debido a que se requiere asegurar la inocuidad<sup>1</sup> y la calidad sensorial del producto. El consumidor espera que las propiedades de los productos alimentarios que adquiere, tales como, textura, sabor, color y aroma, cumplan con un estándar adecuado de calidad y que además estos atributos se mantengan constantes. El monitoreo en línea permite obtener en tiempo real las mediciones de algún parámetro del proceso, ya sea que se trate de un sistema continuo o por lotes. Esto a su vez puede usarse para implementar sistemas de control automático que permitan reducir en gran medida las labores de análisis de laboratorio y de supervisión de procesos. La continua medición de los parámetros de interés permite entonces aumentar el grado de automatización y de control de los procesos, que a su vez permiten su optimización, así como el adecuado uso de materias primas, balance de materiales y el aseguramiento de la calidad del producto [2].

Para tomar acciones correctivas o preventivas oportunas de manera que los pro-

---

<sup>1</sup>Se refiere a las condiciones y prácticas que preservan la calidad de los alimentos para prevenir la contaminación y las enfermedades transmitidas por el consumo de estos.

ducto se mantengan dentro de ciertas especificaciones de calidad, es necesario que los resultados de las mediciones se obtengan en el menor tiempo posible y que estos a su vez sean confiables. Existen diferentes técnicas y principios de análisis para optimizar y parametrizar procesos industriales con el uso de instrumentos. Éstos se pueden clasificar en dos grandes tipos: análisis destructivos y no destructivos. Los primeros se distinguen por un muestreo y el sacrificio del producto o parte de él para obtener el valor del parámetro que se requiere medir. Por otra parte, los análisis no destructivos se refieren a cualquier tipo de prueba practicada a un material o muestra que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales, y que no impliquen la destrucción de la misma. Ambos análisis permiten a la industria de alimentos y bebidas, de modo particular, alcanzar especificaciones de calidad y seguridad alimentaria así como también obtener un riguroso seguimiento del estado del proceso [1, 22].

En las últimas décadas, el desarrollo tecnológico ha permitido el monitoreo de los procesos de producción de alimentos, fármacos y productos químicos y biotecnológicos. Algunos avances en esta área son la adaptación de modernos sistemas de iluminación, la incorporación de microelectrónica e informática, utilización de sistemas de control automático y enfoque de imágenes, el uso de sensores cada vez más precisos y con mejor desempeño y algoritmos que mejoran el procesamiento de señales. Adicionalmente con la ayuda de los sistemas de cómputo actuales se pueden obtener sistemas de control en tiempo real [13]. Con los nuevos alcances computacionales y el desarrollo de hardware, es posible realizar el monitoreo de imágenes, lo que antes se dificultaba por la gran exigencia computacional de estos sistemas de medición.

El color es una de las características más importantes que definen a los objetos y es un factor crítico para la aceptación de un producto comercial. La apariencia superficial (textura) y el color de los alimentos son los primeros parámetros de calidad sensorial que los consumidores evalúan. Es así que la medición del color permite por lo tanto, la detección de anomalías y defectos. Los parámetros como la luminosidad, tonalidad y saturación ayudan a definir el color de los objetos que se observan. Las variaciones de los

parámetros del color pueden ser indicadoras de reacciones químicas que se llevan a cabo en los procesos productivos, del deterioro de los productos, de la variación de compuestos coloridos o de la concentración de biomasa de un producto [21].

Aunque existen diferentes espacios de color, el más utilizado en la industria de los alimentos es el espacio de color CIELAB debido a su distribución uniforme, la cual es muy cercana a la percepción del ojo humano. Los colorímetros comerciales permiten realizar mediciones puntuales sobre la muestra en diferentes espacios de color, incluyendo el CIELAB. Para ello suelen utilizar arreglos de fotodetectores y filtros.

En esta tesis se presenta el diseño y la construcción de un sistema para el monitoreo in situ y en tiempo real del color, aplicable a reactores biológicos. Es importante destacar que dicho sistema está pensado para el monitoreo de compuestos coloridos en fluidos, de manera que el sistema procesa y muestra un número considerable de datos por minuto. El sistema permite llevar un registro de la evolución del color respecto al tiempo durante el desarrollo de procesos de producción de productos alimenticios, farmacéuticos, químicos y biotecnológicos. A este dispositivo se le ha llamado INI-LAB, donde INI significa “dentro de” en Mixteco y LAB son los parámetros de color del sistema CIELAB.

Para probar la funcionalidad del sistema INI-LAB, se midieron 19 bebidas refrescantes comerciales con un amplio espectro del color. Estas pruebas sirvieron para evaluar el comportamiento del sistema para realizar las mediciones de colores con los que no fue entrenado el sistema.

Finalmente para probar la precisión del sistema se buscó un proceso de la industria de bebidas en el que ocurrieran cambios de color, y en el que el monitoreo de éste pudiera ser una herramienta para el control del proceso. En este sentido, se eligió el sistema de extracción sólido-líquido a partir de flor de jamaica. La flor de jamaica posee propiedades alimenticias y medicinales que la hacen aceptable en muchos lugares del mundo sin importar su clima. Generalmente se consume como agua fresca o como té. La

jamaica es antiparasitaria, diurética y ligeramente laxante. Ayuda al proceso digestivo y renal, es útil para bajar de peso y para controlar el grado de colesterol. En México, las principales entidades productoras de jamaica son Guerrero y Oaxaca, cuyo volumen de producción representa 84% del total que fue del orden de las 5,640 toneladas en el año 2012. A nivel mundial México ocupa el cuarto lugar en producción, por debajo de Sudán, Senegal y China [24].

## 1.1. Planteamiento del problema

Actualmente, los análisis fisicoquímicos de gran parte de los procesos que se realizan en las industrias alimentaria, farmacéutica, biotecnológica y química se realizan fuera de línea (off-line). Es decir, se toma una muestra del proceso y se traslada a un laboratorio en donde se realizan los análisis correspondientes.

En este tipo de análisis se miden los parámetros de una muestra bajo condiciones diferentes a las del proceso. Aunado a esto, la obtención de la medición es un procedimiento tardado y costoso, debido principalmente a la necesidad de recursos humanos especializados para la realización de los análisis. Adicionalmente, las muestras tomadas de un proceso son generalmente pequeñas en relación al tamaño total del lote por lo que son poco representativas. Estas mediciones se realizan de manera esporádica, a ciertos intervalos regulares de tiempo, lo que puede causar que cuando el proceso no está siendo muestreado no se detecten a tiempo problemas asociados a la cantidad del producto pudiendo traducirse en un volumen importante de pérdidas de este por no cumplir con los requerimientos de calidad establecidos. Por otra parte, el tiempo transcurrido entre la adquisición de la muestra y la realización del análisis juega un papel determinante ya que una vez que esta ha sido retirada del medio en el que se encontraba originalmente, sus propiedades físicas y químicas pueden cambiar, ocasionando con ello errores de medición. Finalmente, la mayoría de los procesos fuera de línea son destructivos. No es frecuente la reincorporación de muestras al proceso de producción.

En el caso de la medición de parámetros de color, normalmente se realiza un procedimiento fuera de línea; es decir, se toma una muestra (de 20 a 30 ml) que suele representar un volumen considerable para procesos de volúmenes pequeños, y se analiza posteriormente en un colorímetro espectrofotométrico. Es importante aclarar que las muestras no se devuelven al proceso de producción, por lo que se considera un procedimiento de medición destructivo.

En las industrias químico-biológicas actuales, se busca que las mediciones sean no destructivas, que puedan realizarse in situ y procurando la nula o la menor alteración del proceso. Además, es deseable que el monitoreo se realice a intervalos de tiempo cortos, al mismo tiempo que se lleva a cabo el proceso (tiempo real) y con la mayor flexibilidad posible. Con base en lo anterior, los sistemas de visión en línea e in situ abren la posibilidad de determinar los parámetros fisicoquímicos de productos de forma directa e indirecta, ofreciendo soluciones a las necesidades antes mencionadas.

En esta tesis se propuso el diseño y se llevó a cabo la construcción de un sistema para el monitoreo y evaluación del color durante un proceso de producción de alimentos in situ, basado en el estándar CIELAB y empleando una videocámara CCD (*Charged Coupled Device*). El sistema debe ser capaz de adquirir y procesar una secuencia de imágenes del proceso y proporcionar los parámetros de color  $L^*a^*b^*$  a partir de la información de una matriz con valores RGB capturada por la videocámara.

## 1.2. Justificación

### Justificación Tecnológica.

El sistema permite automatizar el monitoreo del color de fluidos en procesos de producción de alimentos, fármacos o productos biotecnológicos o de la industria química en general, prescindiendo así de mano de obra para realizar la toma de muestras y la

medición del color durante el proceso. Por otra parte, no existe en el mercado actual un sistema capaz de realizar el seguimiento del color in situ en reactores o líneas de procesos. Los equipos disponibles en el mercado hasta el día de hoy realizan mediciones de color por lotes, fuera de línea y no en tiempo real, además de que son de uso manual [9]. Así mismo, en este proyecto se realizó un desarrollo propio de tecnología avanzada de monitoreo de procesos, lo que impulsará el desarrollo científico y tecnológico de nuestra universidad, estado y país.

#### Justificación Económica.

El costo del sistema de monitoreo en línea propuesto en este trabajo es mucho menor que el de los dispositivos que se venden en el mercado para la medición de color. Estos equipos no cumplen con la funcionalidad del sistema de monitoreo propuesto, ya que realizan mediciones fuera de línea y no en tiempo real. En el mercado existe el colorímetro espectrofotométrico UltraScan VIS de la marca HunterLab con un costo aproximado de \$360,000.00 MN que realiza la medición de color de muestras líquidas y sólidas en laboratorio (fuera de línea). De igual manera existen colorímetros portátiles de alta gamma como el SPH860 con un costo de \$10,600.00 USD. Es importante mencionar que existen sistemas de monitoreo en línea, como por ejemplo el sistema de monitoreo de partículas de la compañía estadounidense Mettler Toledo con un costo actual de \$171,000.00 USD [4]; sin embargo estos sistemas no permite el análisis de color .

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo del color de líquidos en línea e in situ, utilizando una videocámara CCD, para procesos de la industria química, biotecnológica o alimentaria y su aplicación en un sistema de extracción de jamaica.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Seleccionar la videocámara idónea para el sistema; diseñar, construir e implementar una sonda que se acople a ella y permita proteger e insertar un sistema óptico y un sistema de iluminación difusa.
- Diseñar e implementar una carcasa que contenga la videocámara y dé soporte a la misma, además de un sistema de control de la intensidad de luz difusa.
- Diseñar y construir un sistema para reducir la velocidad de flujo del líquido en el punto de monitoreo y un sistema de iluminación a contraluz.
- Implementar un algoritmo por medio de un software con múltiples prestaciones gráficas que permita reconocer la videocámara, y realizar la estimación en línea de valores  $L^*a^*b^*$  a partir de valores RGB medidos con la videocámara.
- Realizar pruebas de validación del sistema de monitoreo de color en línea aplicándolo a un proceso de extracción sólido-líquido a partir de flor de jamaica y comparar los resultados del monitoreo de color  $L^*a^*b^*$  en línea con mediciones de estos parámetros realizadas con un equipo fuera de línea (HunterLab).

## 1.4. Descripción de la metodología

A continuación se expone la metodología con la cual se llevó a cabo el desarrollo e implementación del sistema para el monitoreo del color. Una vez construido el prototipo se probaron sus funcionalidades y alcances con una aplicación en un proceso de extracción de alimentos.

La metodología tiene el nombre de Proceso de Diseño CYAD-UAM Azcapotzalco, la cual fue creada en la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco [26]. El proceso metodológico se divide en 5 fases, y estas a su vez se dividen en las tareas necesarias para cumplir los objetivos y metas del proyecto. Las fases llevan por nombre: a) Caso, b) Problema, c) Hipótesis, d) Proyecto y e) Realización. Es importante señalar

que la metodología que se empleó no sigue un proceso lineal, sino iterativo, el cual se retroalimenta en su totalidad o en sus etapas. En la retroalimentación se hace uso de otros métodos de investigación más específicos como lo son: la ingeniería concurrente y el diseño mecatrónico. Es así que el proceso tiene un carácter concurrente y de interacción interdisciplinaria entre distintas ramas de la ingeniería.

#### Caso.

En esta etapa se hizo una observación interdisciplinaria de los fenómenos que acontecen en la realidad: se observaron los procesos de monitoreo en el área de los alimentos. A partir de esto, se definió la propuesta de proyecto que se detalla en este capítulo.

#### Problema.

En esta etapa se detectó una situación que era factible solucionar. De la información recopilada, se pudo apreciar que existía un problema tecnológico para realizar el monitoreo del color en los procesos alimentarios, químicos y/o biotecnológicos. En la actualidad no existe en el mercado un dispositivo que permita realizar de manera automatizada la medición periódica de dicha variable. Adicionalmente, los dispositivos que existen no están diseñados para ser usados en procesos.

#### Hipótesis

- Un sistema para el monitoreo de color basado en una videocámara CCD permitirá obtener datos de color en el espacio CIELAB durante un proceso de extracción sólido-líquido de flor de jamaica.
- La conversión de parámetros RGB obtenidos por la videocámara CCD utilizando un iluminante no estandarizado a parámetros  $L^*a^*b^*$  se puede realizar mediante una Red Neurona Artificial (RNA) o una matriz de transformación.

#### Proyecto

Se desarrolló de manera detallada la alternativa elegida, a fin de que esta pudiera ser realizada físicamente. En esta etapa se planeó la creación del concepto de diseño a partir

de los requerimientos estructurales, funcionales y de diseño que se especificaron. Se elaboraron distintos diseños, se evaluaron y se tomó el que cumplió con todas las exigencias requeridas. Posteriormente, mediante un proceso iterativo se mejoraron las prestaciones del diseño. El concepto de diseño seleccionado detalla de manera precisa cada uno de los elementos que la conforman. El proyecto de tesis se puede estructurar de manera general en tres etapas:

- A) Dispositivo. Este a su vez se puede estructurar en tres módulos muy bien definidos:
  - 1) La sonda, 2) la carcasa y 3) el reductor de velocidad. Para el diseño de cada pieza fue necesario realizar un proceso iterativo, pues se tenía que cumplir condiciones mínimas de seguridad y funcionamiento, así como el acoplamiento entre ellas.
- B) Interfaz. La interfaz de adquisición de datos cuenta con 4 módulos: 1) el módulo de identificación e inicialización de la videocámara CCD, 2) el módulo para la adquisición de los valores promedio de las imágenes, 3) el módulo para convertir los valores RGB a CIELAB, 4) el módulo para guardar los valores CIELAB en un archivo. Todos estos módulos se fueron estructurando y cambiando a medida que se hacían pruebas y surgían necesidades que deben cubrir para el funcionamiento óptimo de la interfaz.
- C) Experimentos y pruebas. Se diseñó un experimento que pusiera a prueba las capacidades del dispositivo, y que mostrara de manera efectiva las ventajas del dispositivo desarrollado. Para ello se hizo el monitoreo en tiempo real del color (CIELAB) durante el proceso de extracción de jamaica y de 19 bebidas comerciales y se comparó con mediciones fuera de línea en un colorímetro de laboratorio.

#### Realización

Con el concepto de diseño generado en el paso anterior, se hicieron los diagramas y planos de manufactura de cada una de las piezas del dispositivo. La construcción del dispositivo se realizó en el laboratorio de manufactura avanzada y en el taller de metales de la UTM. Con las piezas construidas se realizó su ensamble. Las pruebas del dispositivo se realizaron en el laboratorio de agroindustrias de la UTM.

## 1.5. Estructura de la tesis

El presente trabajo de tesis está organizado en seis capítulos principales.

En el Capítulo 1 se aborda la parte introductoria donde se da un panorama general de la problemática existente, y se plantea la propuesta de solución mediante la estructuración de un objetivo general y cinco objetivos particulares. Así mismo se describe la metodología que se utilizó para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

En el Capítulo 2 se presenta el estado del arte y el marco teórico donde se exponen las tecnologías utilizadas para la captura de imágenes, su procesamiento y los equipos de monitoreo de color en línea.

En el Capítulo 3 se describe el concepto de diseño del dispositivo propuesto, el proceso de manufactura empleado y se detalla el software desarrollado para la medición del color en tiempo real.

En el Capítulo 4 se describen la metodología experimental: las pruebas efectuadas, las mediciones y los sistemas de validación propuestos.

En el Capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos de este trabajo según los objetivos definidos en el Capítulo 1.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones, aportaciones y trabajos futuros.

# Capítulo 2

## Estado del arte y marco teórico

### 2.1. Estado del arte

#### 2.1.1. Sistemas de monitoreo de color

A los equipos usados para medir el color se les llama colorímetros. En estos equipos primeramente se utiliza una fuente de luz blanca para iluminar la muestra. Posteriormente, se utiliza un sensor para captar la luz transmitida o reflejada por la muestra. La medición del color se consigue generalmente mediante la determinación de los valores triestímulo del haz de luz recibido por el sensor: intensidad de la luz a tres diferentes longitudes de onda de los colores rojo, verde y azul. Estos valores se comparan contra un estándar de un sistema de referencia como el CIE XYZ de 1931 (espacio de color uniforme y correlacionado con la percepción del ojo humano), el RGB, o sistemas de referencia particulares [3].

Los colorímetros espectrofotométricos son los instrumentos más exactos para la medición del color de los objetos, debido a la captura y separación del espectro de luz visible proveniente de la muestra en intervalos de longitud de onda en el orden de los nanómetros [31].

Actualmente en el mercado es posible encontrar colorímetros para cuantificar el

color de objetos sólidos, líquidos, opacos o traslucidos. Algunos de ellos son portátiles y permiten realizar mediciones no destructivas.

Las desventajas que presentan los espectrofotómetros de mesa como el espectrofotómetro ScanVis de HunterLab radican en que no permiten realizar mediciones in-situ, ni en línea, no son automatizados y no proporcionan la información del color en tiempo real. Las características de los colorímetros comerciales dificultan su utilización para optimizar el control de los procesos y por lo tanto la calidad de los productos.

Existen también los colorímetros portátiles para control de calidad: ColorStriker y la serie SPHXXX, todos ellos de La compañía ColorLite. Los hay portátiles, fijos y semifijos para procesos en líneas de producción. El modelo SPH900 (ver Figura 2.1a) viene con cabezal de sonda externa flexible con tamaño de punto (3.5 mm de diámetro) para análisis sobre superficies curvas y muestras pequeñas. Se trata de un espectrómetro de rejilla. Usa una fuente de luz LED de alto rendimiento y una sonda con disparador automático. El modelo SPH860 es similar al anterior, pero incluye accesorios adaptables al cabezal de la sonda que permite el uso en una variedad más amplia de aplicaciones. Es útil para medir el color de plásticos, cuero, polvos, líquidos, granulados, cremas, alimentos, cable, etc. Su tiempo de escaneo es de 0.5 segundos.

El equipo ColorStriker de la compañía ColorLite (ver Figura 2.1b) es pequeño (del tamaño de un ratón de computadora), inalámbrico (de baterías), para medición de color sin contacto en casi todos los materiales y superficies (pinturas de pared, pinturas de automóvil, incluso tonos de piel; textiles y cuero; pinturas de pared y barnices; maderas, paneles; azulejos y plásticos, pintura automotriz, alimentos, materiales de construcción, empaques y embalajes, etc.), usa fuente de luz LED de alta duración. Tanto el equipo ColorStriker como los equipos SPH900 y SPH860 no son automatizados, y son puntuales, es decir, entregan una sola medida de la pequeña superficie considerada, pero sobre todo no están adaptados para realizar mediciones de color dentro de un proceso.



(a) Colorímetro portátil SPH900

(b) Colorímetro portátil ColorStrike

Figura 2.1: Colorímetros portátiles

También se han desarrollado a nivel de laboratorio sistemas que monitorean específicamente el color en procesos, destacando el monitoreo in situ de polímeros y alimentos durante procesos de extrusión. Para ello estos sistemas utilizan un espectrofotómetro de tecnología CCD que es iluminado por medio de fibra óptica, y el cual es introducido al extrusor de manera que se monitorea el color en tiempo real. El sistema funciona de tal manera que por medio de la fibra se ilumina la muestra y la luz reflejada es captada por el espectrofotómetro. Con esa información y por medio de un algoritmo basado en redes neuronales se puede predecir el color al final de la extrusión y con ello hacer un control de los colorantes que se suministran al sistema. No se tienen reporte de estos equipos a nivel comercial [25, 31].

En las últimas décadas la visión por computadora se ha utilizado para medir las propiedades intrínsecas de diferentes alimentos, proporcionando ventajas con respecto a los colorímetros convencionales como: la posibilidad de analizar cada pixel de la imagen y la detección de defectos. Se han utilizado estas técnicas para medir el color en los alimentos como lo reportan Brosnam y Sun en 2004 [10], y constituyen sistemas muy versátiles para la aplicación de procesos.

Con las cámaras digitales es posible registrar el color de cada pixel el cuál se representa por tres parámetros: el rojo (R), el verde(G) y el azul(B). El espacio de color RGB no es absoluto (depende de la sensibilidad de la cámara y de la iluminación). Por otro lado el sistema uniforme de medición de color CIELAB es el espacio de color idóneo para la medición del color, ello se debe a que es absoluto (no depende de la iluminación ni del dispositivo observado), su distribución del color es uniforme, se puede representar todos los colores, y es el que más se asemeja a la percepción del color del ser humano; por ello que es el más utilizado en la industria de los alimentos y bebidas. Para obtener los parámetros  $L^*a^*b^*$  a partir de la captura de imágenes en RGB es necesaria una metodología para convertir los valores RGB a  $L^*a^*b^*$ , como la descrita por Pedrichi et al [21].

### 2.1.2. Sistema de monitoreo in situ

Desde el año 1991, se han construido sistemas que buscan el monitoreo in situ en los procesos de la industria alimentaria y química en general. El tamaño y la robustez requerido por los sistemas de monitoreo depende del tipo de aplicación y de las condiciones a las que estos sistemas estarán expuestos [9]. Así pues, se pueden encontrar en el mercado sistemas que por medio de sondas, sistemas de lentes y diferentes tipos de sistemas de iluminación, registran los fenómenos fisicoquímicos durante los procesos. Por medio de la adquisición de imágenes o la interpretación de los niveles de retrodispersión de la luz, los equipos desarrollados son capaces de determinar por ejemplo la forma y/o el tamaño de las partículas durante el proceso [8]. No se han reportado sistemas de monitoreo in-situ para la medición del color en línea.

Uno de estos sistemas es el Microscopio de Visión de Partículas, que se muestra en la Figura 2.2 el cuál es distribuido por Mettler Toledo/Lasentec. Este sistema utiliza una cámara CCD blanco y negro. Cuenta con un sistema de lentes que le permite una resolución de  $1075 \times 825 \mu\text{m}$ . Mediante 6 láseres independientes se ilumina el sistema de adentro hacia afuera. Su software permite la adquisición de 10 imágenes por segundo,

el análisis de tamaño y forma. Se puede vincular con *MATLAB*® para el procesamiento de imágenes. Tiene una sonda manufacturada de Hastelloy C22 que es una clase de acero inoxidable altamente anticorrosivo. Puede operar en ambientes muy diversos pues soporta una temperatura de operación de -80 a 120 °C y una presión de 10 bar [34].

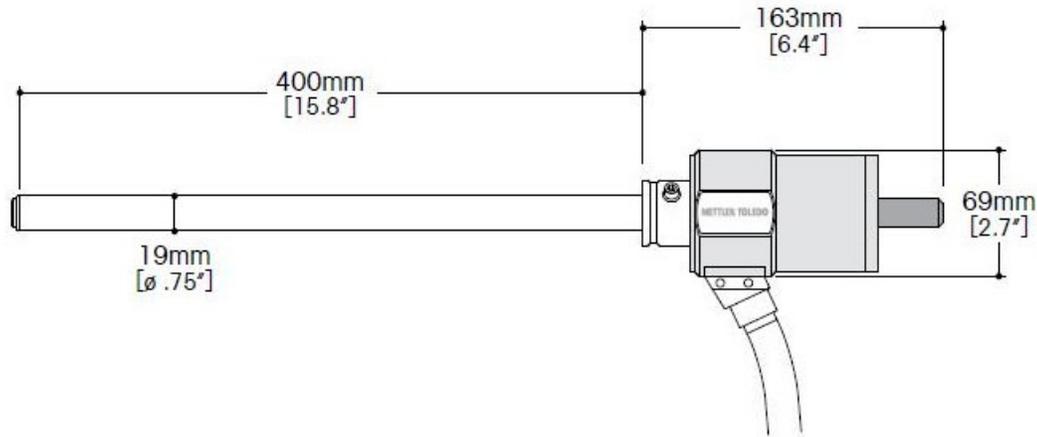


Figura 2.2: Microscopio de Visión de Partículas (PVM) [9].

Un segundo dispositivo de monitoreo en línea es el Analizador de Imágenes y Partículas (PIA por sus siglas en inglés). El sistema PIA (Figura 2.3) consiste en un microscopio de vídeo en línea (IVM) acoplado a un software modular de análisis de imágenes. La iluminación se consigue mediante el uso de fibra óptica. Las partículas en el campo visible residen en el área de enfoque entre la cámara CCD y el dispositivo de iluminación. Con este sistema es posible detectar partículas en el rango de 40 - 425 micras. Filtros polarizadores permiten la detección y resolución de imágenes de cristales claros y transparentes. La zona de muestreo está especialmente pulida con el fin de evitar la adherencia de las partículas a las ventanas [9].

Un tercer sistema (Figura 2.4) es el de reflectancia de haz enfocado FBRM (por sus siglas en inglés *Focused Beam Reflectance Method*). Este sistema desarrollado por Lasentec® mide la distribución de longitud de la onda reflejada por la muestra que se ve afectada por la geometría, el tamaño, y el número de partículas de dicha muestra.

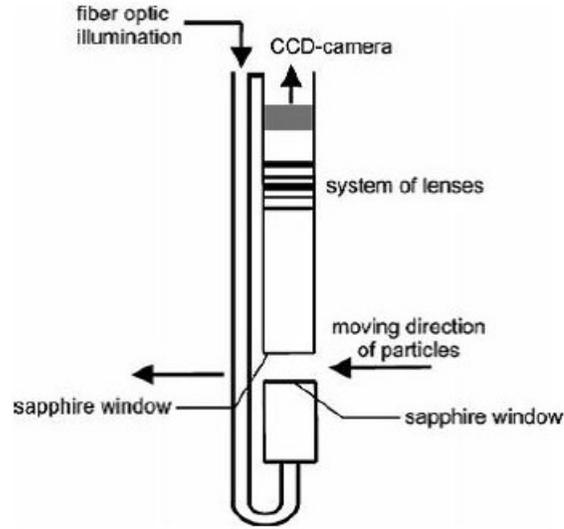


Figura 2.3: Analizador de Imágenes y Partículas (PIA) [9].

Utiliza un rayo de luz láser, que escanea la muestra en una trayectoria circular. La luz retrodispersada hacia la sonda se capta por el sensor para obtener la medición de la longitud de onda de las partículas de la muestra. Por lo general, se miden miles de haces por segundo, proporcionando una medición robusta que es sensible a los cambios en el tamaño o número de partículas que se monitorean [8].

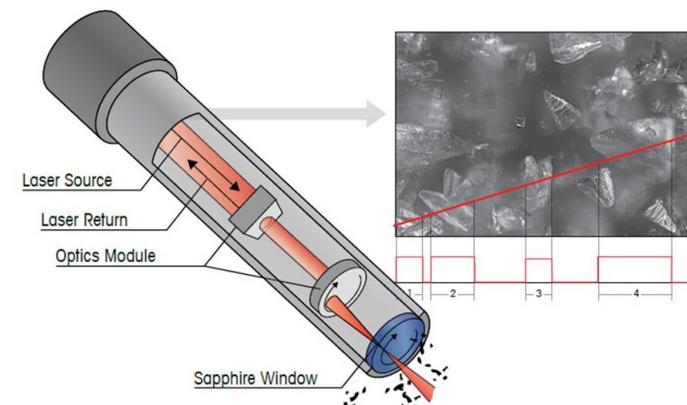


Figura 2.4: Sistema de reflectancia de haz enfocado (FBRM).

## 2.2. Marco teórico

En esta sección se desarrollan los conceptos utilizados a lo largo de la tesis. Se inicia con conceptos relacionados a las cámaras CCD, principios básicos de óptica y formación de imágenes. Posteriormente se explica el espacio de color utilizado, los sistemas de iluminación y finalmente se explican las fases que implican el entrenamiento de las RNAs y sus conceptos básicos como tipos de arquitecturas, algoritmos de entrenamiento, modelo matemático, entre otros.

### 2.2.1. Cámaras digitales CCD

Las cámaras digitales son dispositivos electrónicos que capturan imágenes convirtiéndolas en señales eléctricas. En el interior de una cámara digital (Figura 2.5), se encuentra un filtro de Bayer y un chip sensible que puede ser CCD o CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*). El filtro de Bayer está montado sobre el sensor CCD y su función es descomponer la luz en sus tres componentes primarios (rojo, verde y azul). Un pixel de color está formado por la respuesta de cuatro fotodiodos: dos verdes, un rojo y un azul. Los fotodiodos se encargan de convertir los fotones que recibe en voltaje, información que es posteriormente codificada.

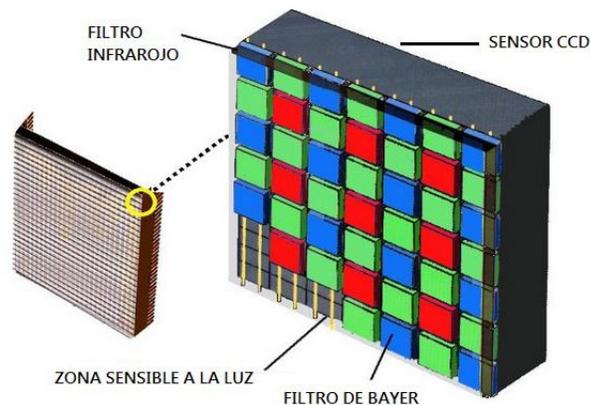


Figura 2.5: Estructura de un Chip CCD. <http://aficionadosalafotografia.com/la-camara-de-video-el-sensor/>.

A continuación se explica la adquisición de una imagen con el sensor CCD, y su almacenamiento (Figura 2.6). Para poder adquirir la imagen de un objeto es necesario que se encuentre iluminado y enfocado. Los fotones que son rebotados por el objeto pasan por una lente y son direccionados hacia el sensor CCD. A su paso atraviesan un filtro de infrarrojo y finalmente inciden sobre el filtro de Bayer. Los rayos resultantes se concentran en el chip sensible llamado CCD que envía los datos digitales para su codificación y su posterior almacenamiento. Los datos que conforman las imágenes se guardan en formato digital (archivos de computadora) con una alta resolución, y en el caso de secuencias de video se guardan con una menor resolución [13]. La capacidad máxima de resolución o detalle de la imagen depende del número de celdas fotoeléctricas del CCD. Este número se expresa en píxeles. A mayor número de píxeles, mayor resolución.

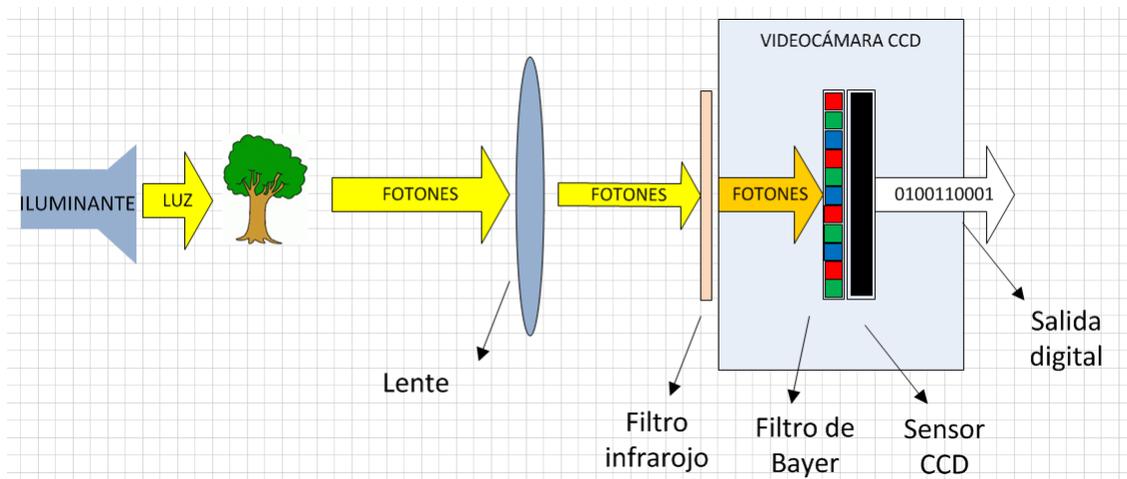


Figura 2.6: Diagrama del funcionamiento de una Cámara CCD.

Las cámaras CCD tienen tres características ventajosas distintivas en comparación con una cámara CMOS: 1) Alto rango dinámico, esto quiere decir que se obtendrán imágenes con un contraste elevado, lo cual es ideal para escenas con poca luz y también porque estas cámaras producen una señal con menor ruido. 2) Mayor nitidez para imágenes con objetos en movimiento. 3) Mayor uniformidad puesto que cada pixel utiliza el mismo convertidor de carga a tensión.

### 2.2.2. Lentes

Una vez que se cuenta con una videocámara CCD para la captura de imágenes, se requiere de una lente delgada para lograr el enfoque adecuado de la muestra (ver Figura 2.7). La lente tiene la función de captar los rayos luminosos y concentrarlos de manera que se enfoque la escena observada en la superficie del sensor de la videocámara [13].

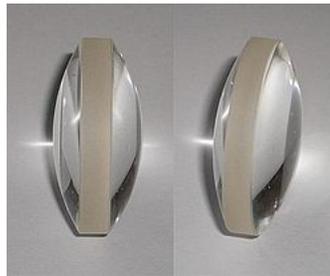


Figura 2.7: Lente biconvexa. <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/11078>.

Una lente es un medio transparente que altera la forma de un frente de ondas que pasa a través de ella. Las lentes generalmente se construyen de vidrio y se les da forma de tal modo que la luz refractada forme imágenes. Generalmente las lentes se construyen de contorno circular, limitado por caras curvas o por una plana y una curva.

### 2.2.3. Formación de imágenes mediante lentes delgadas

Para la formación de imágenes es necesario conocer los elementos que componen un sistema óptico y sus características. En la Figura 2.8 se muestran los rayos principales que conforman una imagen así como los puntos focales. El primer punto focal  $F_1$  es el que se localiza del mismo lado de la lente donde incide la luz. El segundo punto focal  $F_2$  se localiza en el lado opuesto de la lente. Se pueden trazar tres rayos principales que pasan a través de la lente. El rayo 1 es un rayo paralelo al eje de la lente y una vez que atraviesa la lente se desvía de manera que pasa a través del segundo punto focal  $F_2$ . El rayo 2 pasa a través del primer punto focal  $F_1$  y al llegar a la lente se desvía para seguir

una trayectoria paralela al eje de esta. Finalmente, el rayo 3 pasa a través del centro geométrico de una lente y no se desvía. Los tres rayos que se originan en un mismo punto en el objeto se enfocan en un mismo punto sobre el plano imagen. Lo mismo ocurre con todos los puntos del objeto. [13].

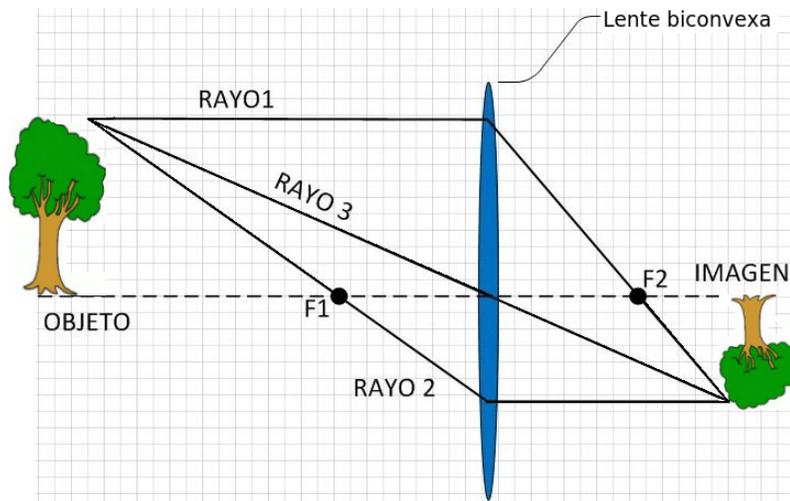


Figura 2.8: Esquema de los rayos principales que conforman una imagen.

#### 2.2.4. La ecuación de las lentes y el aumento

Las características del tamaño y la localización de la imagen pueden determinarse analíticamente a partir de la ecuación de las lentes. Esta importante relación se puede deducir aplicando la geometría plana en los elementos ópticos mostrados en la Figura 2.9 [13].

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

donde:

$p$  = distancia al objeto

$q$  = distancia a la imagen

$f$  = distancia focal de la lente

De la Figura 2.9 se deduce también la siguiente ecuación:

$$x = p + q \quad (2.2)$$

donde  $x$  = distancia entre el objeto y el sensor de la cámara

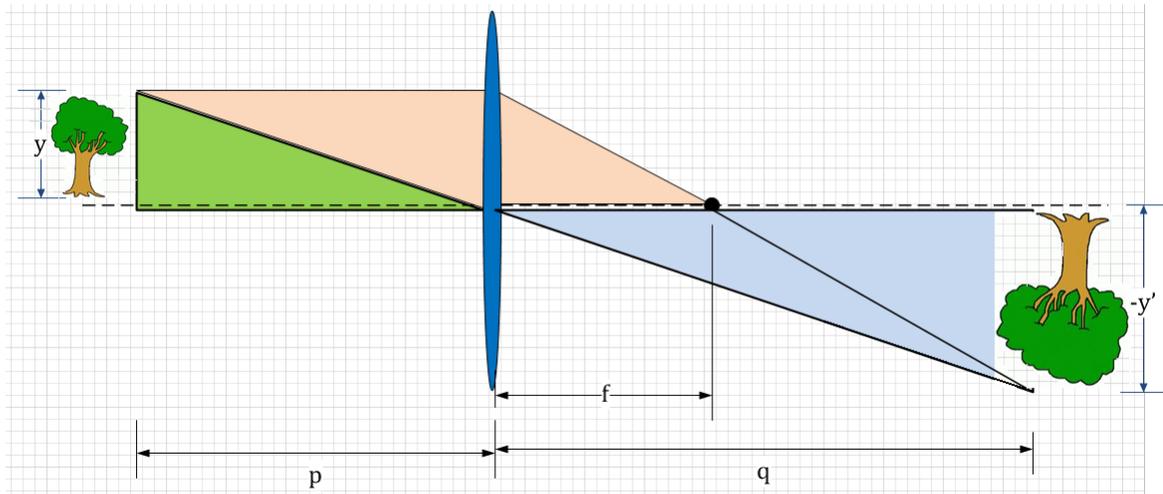


Figura 2.9: Diagrama utilizado para la deducción de la ecuación de las lentes y el aumento.

El aumento  $M$  se define como la razón del tamaño de la imagen y el tamaño del objeto, por lo que:

$$M = \frac{y'}{y} = -\frac{q}{p} \quad (2.3)$$

Un aumento positivo indica que la imagen es derecha, mientras que un aumento negativo ocurre sólo cuando la imagen es invertida.

#### 2.2.4.1. Reflexión de la luz

Al incidir la luz sobre la superficie de un objeto se puede producir el fenómeno de reflexión que consiste en la desviación de un rayo luminoso cuando choca con un medio diferente al original. El nuevo medio ofrece una resistencia a la luz que no permite su paso a través de él, lo que provoca que el rayo luminoso se refleje. Este fenómeno se divide a su vez en dos tipos:

La reflexión especular (Figura 2.10) se produce cuando un rayo luminoso incide sobre una superficie microscópicamente lisa y plana, o finamente pulida, que provoca que este sea reflejado. En este caso, el ángulo de incidencia del rayo luminoso y el ángulo del rayo reflejado son iguales.

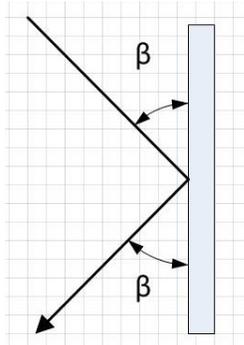


Figura 2.10: Reflexión especular.

La reflexión difusa se presenta cuando la superficie de un material es rugosa y no microscópicamente lisa. En este caso, cada rayo de luz que cae en una partícula de la superficie obedecerá la ley básica de la reflexión. Sin embargo, como las partículas están orientadas de manera aleatoria, las reflexiones se distribuirán de manera aleatoria. Una superficie perfecta de reflexión difusa refleja la luz de manera uniforme en todas direcciones, logrando una terminación mate perfecta. En la Figura 2.11 se observa como un rayo de luz unidireccional que incide sobre una superficie microscópicamente rugosa es dispersado en todas direcciones.

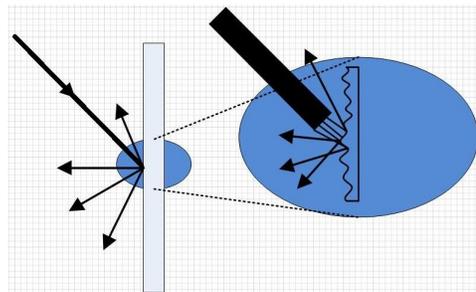


Figura 2.11: Reflexión difusa.

### 2.2.5. Espacios de color

La colorimetría tiene como objetivo cuantificar de manera precisa la percepción de los colores. Los sistemas colorimétricos asignan una magnitud para cada uno de los atributos perceptivos del color. A los modelos estandarizados que buscan describir la percepción humana del color se les llaman espacios de color. En 1931 la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE por sus siglas en francés) introdujo el sistema RGB, y con él, el sistema XYZ (donde X, Y y Z son los valores triestímulo) para la representación del color. El sistema de color estandarizado CIE está basado en los colores primarios imaginarios XYZ, que no existen físicamente. Éstos son completamente teóricos e independientes de los dispositivos. Existen otros espacios de color dependientes de gamas de color, como el RGB o el CMYK. El sistema XYZ está basado en las curvas de respuesta de los tres receptores de un observador patrón. Los tres colores primarios del sistema de referencia CIE XYZ se hallan en un modelo espacial con coordenadas X, Y y Z, que tiene aspecto de un triángulo cromático. Se distinguen dos observadores patrón, CIE-1931 (observador de 2°) y el CIE-1964 (observador de 10°). La precisión de la igualdad de color depende del tamaño de la muestra del test y por ello el observador de 10° describe en este caso con mayor precisión las observaciones visuales del ojo humano [12]. Los valores triestímulos (X, Y, Z) están dados por:

$$\begin{aligned}
 X &= \int \rho(\lambda)S(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\
 Y &= \int \rho(\lambda)S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\
 Z &= \int \rho(\lambda)S(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

siendo  $\rho(\lambda)$  la reflectancia espectral de la muestra de color,  $S(\lambda)$  la distribución espectral de la fuente de luz utilizada y  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$  las funciones de mezcla que caracterizan al observador patrón.

Un problema del sistema de color XYZ, es que las diferencias colorimétricas entre los colores individuales no corresponden con las diferencias de color percibidas. El sistema  $L^*a^*b^*$  (CIE 1976) fue desarrollado con dos objetivos: 1) tener un sistema de medición fácil de usar, que sea compatible con el sistema de color Munsell, donde este último es un espacio de color tridimensional el cual se rige bajo tres atributos, matiz, luminosidad y saturación (Figura 2.12); 2) que las variaciones de luminancia y cromaticidad fuesen uniformes de acuerdo a la percepción del ojo humano.

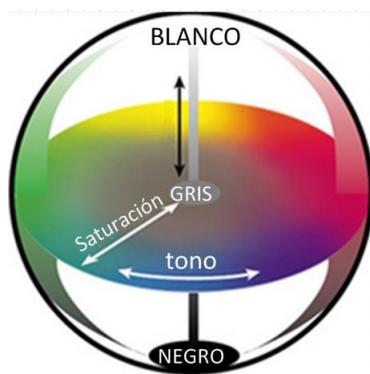


Figura 2.12: Sistema de color MUNSELL.

Para transformar los valores RGB que ofrecen los dispositivos digitales a valores  $L^*a^*b^*$ , los primeros deben transformarse a un espacio de color absoluto y específico que no dependa del dispositivo del que se extrae la información. Con esta consideración, los valores RGB se transforman primero al espacio de color CIE XYZ 1931 y posteriormente al sistema CIELAB 1976. Para transformar de RGB a CIE XYZ 1931 es necesario utilizar la ecuación 2.5. Donde la matriz  $M$  depende del iluminante estándar utilizado.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = (M) \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Debido a la enorme variedad de fuentes luminosas, la CIE ha estandarizado los distintos iluminantes, los cuales se clasifican en 4 grupos:

1) A, luz artificial de una bombilla incandescente de tungsteno. 2) D65, luz de día. 3) E, equienergético. Iluminante teórico que tiene la misma potencia en todas las longitudes de onda. 4) F, iluminantes estándares de lámparas y tubos fluorescentes. En la figura 2.13 se pueden observar el espectro de emisión de cada iluminante.

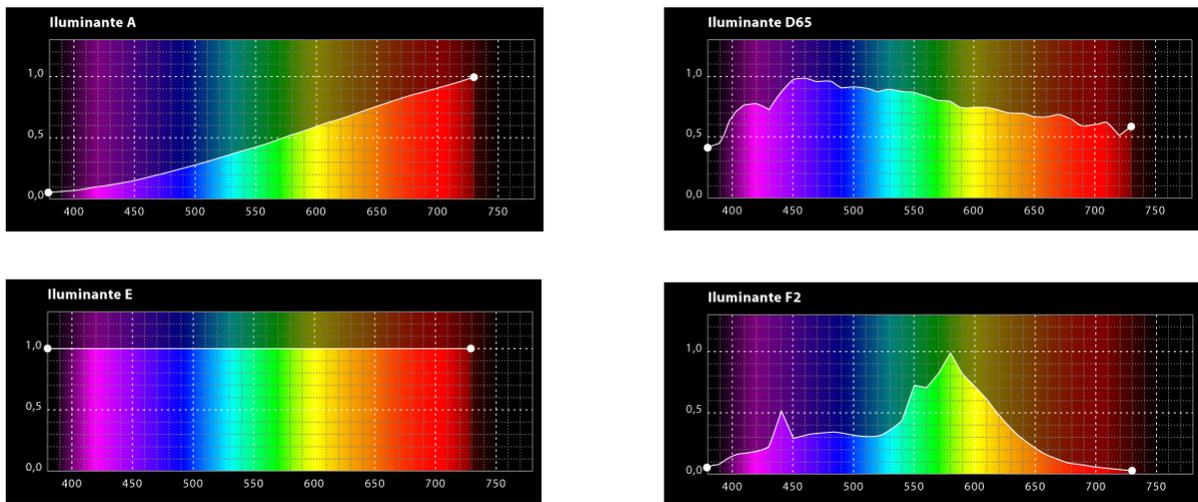


Figura 2.13: Espectros de emisión de los diferentes iluminantes. [http://www.gusgsm.com/iluminantes\\_estandares\\_cie](http://www.gusgsm.com/iluminantes_estandares_cie).

El iluminante D65 es el más utilizado para conversión de colores. Esto se debe a que el espectro que describe hace referencia a la luz de medio día. La matriz de transformación que se utiliza para transformar los valores del espacio RGB al XYZ utilizando el iluminante D65 es la que se muestra en la ecuación 2.6 [5].

$$M = \begin{pmatrix} 0,412383 & 0,357585 & 0,180480 \\ 0,212635 & 0,715170 & 0,072192 \\ 0,019330 & 0,119195 & 0,950528 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Posteriormente, se transforman los valores del sistema CIE XYZ a CIELAB, con

las siguientes ecuaciones:

$$L^* = \begin{cases} 116 * \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16 & \text{if } \frac{Y}{Y_n} > 0,008856 \\ 903,3 \left(\frac{Y}{Y_n}\right) & \text{if } \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856 \end{cases}$$

$$a^* = 500 * \left[ \left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} \right] \quad (2.7)$$

$$b^* = 200 * \left[ \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3} \right]$$

Donde  $X_n, Y_n$  y  $Z_n$  son los valores triestímulos del blanco de referencia. Las magnitudes  $L^*$ ,  $a^*$ , y  $b^*$  son adimensionales y se definen en función del tipo de estímulo y del blanco de referencia [21].

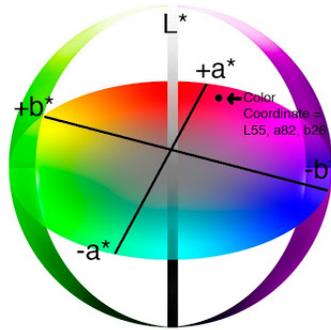


Figura 2.14: Espacio de color CIELAB. <http://rdesign.over-blog.com/color-lab>.

La coordenada  $L^*$  recibe el nombre de luminancia y  $(a^*, b^*)$  son las coordenadas cromáticas que forman un plano perpendicular a la luminancia (Figura 2.14), siendo, a su vez, perpendiculares entre sí. El corte del eje  $L^*$  con los planos que forman  $a^*$  y  $b^*$  son los puntos acromáticos. Altos valores en  $L^*$  hacen referencias a colores claros, y bajos niveles de  $L^*$  hace referencia a colores oscuros. Los valores positivos del eje  $a^*$  representan la intensidad del color rojo, mientras que los valores negativos indican la intensidad del color verde. Por otro lado, los valores positivos en el eje  $b^*$  representan un aumento en la intensidad del color amarillo, mientras que los valores negativos indican la intensidad del color azul.

### 2.2.6. Sistemas de iluminación mediante LEDs de alta luminosidad

Los LEDs (Light Emitting Diodes) de luz blanca son diodos que emiten luz azul a una longitud de onda de unos 460 nm. Para lograr la emisión de luz blanca, estos diodos son recubiertos con una capa compuesta por un derivado de fósforo. El fósforo absorbe la luz azul y la reemite a distintas longitudes de onda del espectro visible, generando así luz blanca (Figura 2.15).

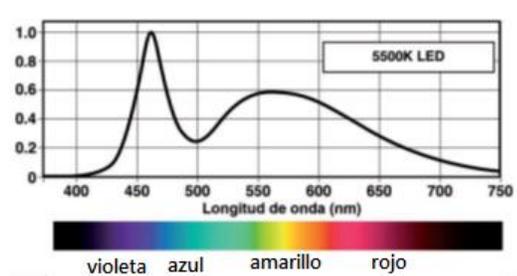


Figura 2.15: Espectro de emisión de un LED de luz blanca de alta luminosidad. Imagen tomada de [18].

La parte negativa del diodo (cátodo) está unida a un pequeño reflector metálico parabólico (Figura 2.16) que a su vez sirve de terminal de salida. Por esta terminal se disipa la mayor parte del calor generado durante el funcionamiento del LED. El polo positivo del diodo se encuentra soldado a la terminal de salida (ánodo) a través de un fino conductor metálico que normalmente es de oro. El diodo está encapsulado con una resina epóxica de excelente calidad óptica (alta transparencia) que le sirve de soporte, protección y crea la óptica de enfoque. Existen LEDs con distintos reflectores que permiten variar el ángulo de apertura del haz luminoso [29].

En la Figura 2.17 se observan el comportamiento de dos LEDs de 3 mm de diámetro de luz blanca de diferentes marcas. Se puede determinar que la corriente nominal promedio de los LEDs blancos de alta luminosidad es de 20 mA con una caída de tensión típica promedio de 3.6 V, lo que corresponde a una potencia disipada de 72 mW. Los

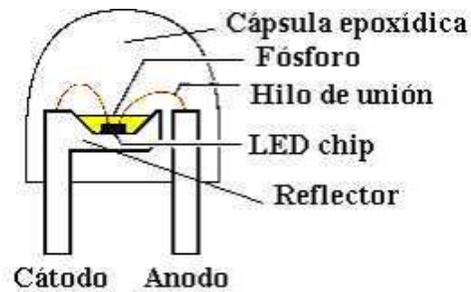


Figura 2.16: Vista esquemática de un LED [18].

parámetros máximos de corriente y potencia disipada son de 30 mA y 120 mW, respectivamente, siempre que el LED se mantenga a temperaturas inferiores a 25 °C. Si se supera la temperatura máxima de la unión semiconductor (100 °C) el diodo se funde [29].

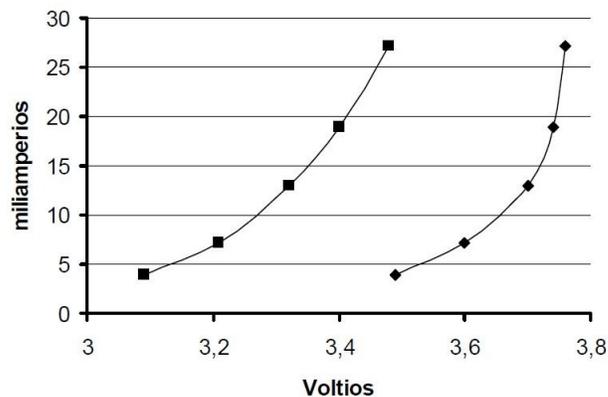


Figura 2.17: Gráfica que relaciona la corriente y el voltaje de 2 LED's de luz blanca de dos marcas diferentes.

El tiempo de vida útil de los LEDs de luz blanca en condiciones estándar es de aproximadamente 10,000 h. Tanto el fósforo, como el encapsulado epóxico se degradan con el tiempo y sobre todo con la temperatura, lo que se traduce en una pérdida progresiva de luminosidad y del color. Se calcula que ocurre una pérdida luminosa del 50 % durante un tiempo de operación de 10,000 h. A continuación se presentan las ventajas y los inconvenientes de los LEDs de luz blanca [33].

### Ventajas

- Vida útil nominal considerablemente larga: 10,000 h.
- Costos reducidos de mantenimiento.
- Alta eficiencia energética.
- No emiten radiación infrarroja ni ultravioleta.
- Colores saturados, sin necesidad de filtros.
- Menor dispersión de luz debido a un mejor control óptico.
- El nivel de iluminación es completamente regulable y no hay variación del color.
- Permite el encendido instantáneo al 100 % de intensidad y de forma frecuente.
- Encienden a bajas temperaturas (con temperaturas del medio de  $-40^{\circ}\text{C}$ ).
- Trabajan con voltajes bajos en corriente continua.
- Alta eficacia en ambientes fríos [18].

### Inconvenientes

- El control electrónico asociado al funcionamiento de los LEDs no tiene la misma vida útil que estos.
- Un aumento de potencia puede provocar la destrucción del LED.
- Cualquier fluctuación en la alimentación se traduce en una variación de la luz emitida.

## 2.2.7. Redes neuronales

La capacidad del cerebro humano de pensar, recordar y resolver problemas ha servido de inspiración a los científicos para intentar modelar desde el ordenador el funcionamiento del cerebro humano [7].

Es así que desde el siglo XX se inició el desarrollo de modelos computacionales que emulen el comportamiento humano. Aunque se han propuesto una gran cantidad de algoritmos, todos usan una estructura de red en donde los nodos o neuronas involucran procesos numéricos de otros nodos que dependen de la intensidad de sus conexiones. A esta clase de modelos computacionales se les llama Redes Neuronales Artificiales [16].

El éxito de las RNAs se debe a la facilidad de su uso, implementación y la habilidad de resolver problemas complejos y abstraer la esencia de datos que no presentan aspectos comunes o relativos. Su aprendizaje adaptativo, auto-organización, tolerancia de fallos, operación en tiempo real y fácil inserción dentro de la tecnología existente, ha hecho que su utilización se haya extendido a diferentes áreas como la biológica, la financiera, la industrial, el medio ambiente, militar, etc [19, 28, 6, 15].

La neurona artificial es la unidad básica de la red, la cual recibe información de otros módulos o de su entorno, la integra, la conmuta y emite una única salida que se va a transmitir a múltiples neuronas posteriores.

En una red de neuronas existen pesos o fuerzas sinápticas que son valores numéricos que ponderan las señales que se recibe por sus entradas. Cada peso determinará la fuerza de conexión entre dos neuronas. Un peso alto quiere decir un alto grado de conexión, que la información que transmite contribuye a un nuevo estado, o la alteración que puede producir. Una vez calculado el valor conjunto de todas las entradas denominado NET, se aplica una función de activación (FA) que determinará el valor del estado interno de la neurona, que se transmitirá a la salida [27].

#### **2.2.7.1. Función de activación**

La función de activación de una neurona es la encargada de relacionar la información de entrada de la neurona con el siguiente estado de activación que tenga esa neurona. Se pueden clasificar en dos grandes grupos:

1) Modelo acotado, el valor de la activación de la neurona está dentro de un rango de valores continuos, 2) Modelos no acotados, no existe límite de los valores de activación.

La función de activación se utiliza para limitar el rango de valores de la respuesta de la neurona [11]. Generalmente los rangos de valores se limitan a  $[0,1]$  o  $[-1,1]$ , sin embargo otros rangos son posibles de acuerdo a la aplicación o problema a resolver. Existen

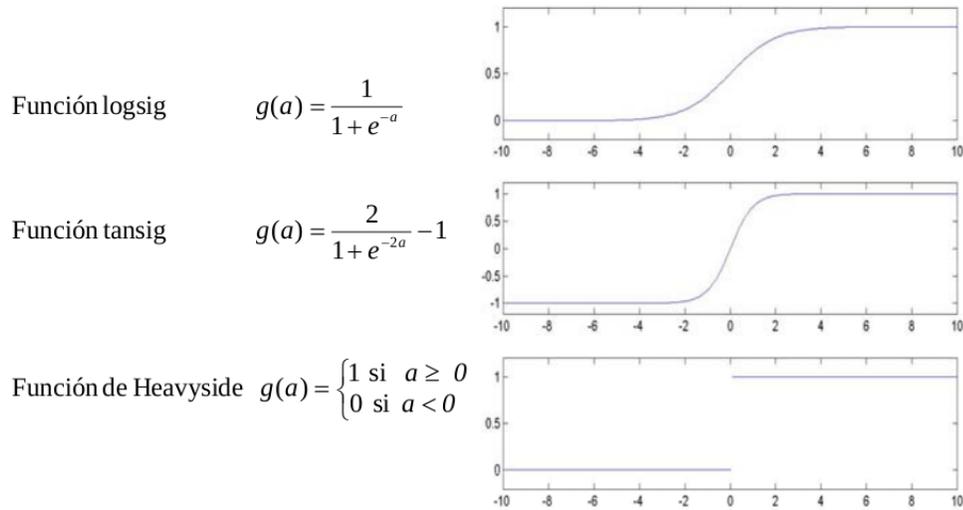


Figura 2.18: Tres ejemplos de funciones de activación

diversas funciones de activación y la decisión entre una u otra dependerá nuevamente de la aplicación o problema a resolver. En la figura 2.18 se pueden observar tres diferentes funciones de activación comúnmente utilizadas y con las que se han obtenido resultados satisfactorios en diversas aplicaciones como reconocimiento de patrones, reconocimiento de voz, entre otras.

### 2.2.7.2. Modelo matemático de las redes neuronales artificiales

Cada entrada del vector corresponde a una variable en la cual se obtiene cierta cantidad de observaciones o valores. Cuando se reciben las variables, cada entrada se multiplica por el correspondiente peso sináptico de la neurona que recibe dicho valor. Posteriormente cada uno de estos resultados se suman (Figura 2.19) [17].

Matemáticamente esto se expresa de la siguiente manera.

$$y_i = g_i = g \left( \sum_{j=1}^k w_{ji} x_{ji} + \theta_i \right) \quad (2.8)$$

Las entradas  $x_k$ ,  $K = 1, \dots, K$  de la neurona se multiplican por los pesos  $w_{ki}$  y se le suma la constante de sesgo (bias)  $\theta_i$ . El resultado es la entrada a la función de activación  $g$ . La función de activación es comúnmente la función tangente hiperbólico ( $\tanh$ ) o la

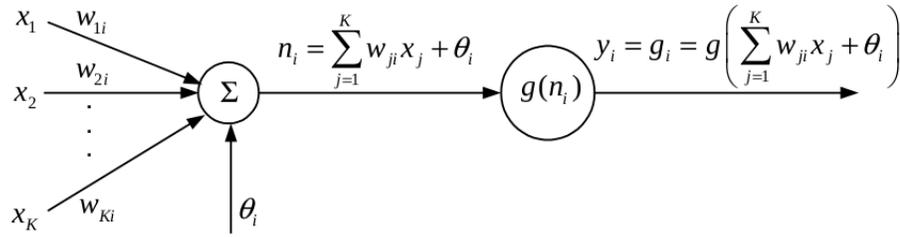


Figura 2.19: Representación matemática de una RNA

función sigmoide.

### 2.2.7.3. Tipos de arquitecturas

Las redes neuronales más útiles como funciones de aproximación son las multicapa MLP (Multi-Layer Perceptron). Una MLP, consiste en una capa de entrada, una o varias capas ocultas y una capa de salida. Cada nodo, también llamado neurona en una red de MLP incluye una sumatoria y una función de activación no lineal, tal como lo muestra la Figura 2.20, con la siguiente ecuación:

$$y_i = g \left( \sum_{j=1}^3 w_{ji}^2 g(n_j^1) + \theta_i^2 \right) = g \left( \sum_{j=1}^3 w_{ji}^2 g \left( \sum_{k=1}^k w_{kj}^1 x_k + \theta_j^1 \right) + \theta_i^2 \right) \quad (2.9)$$

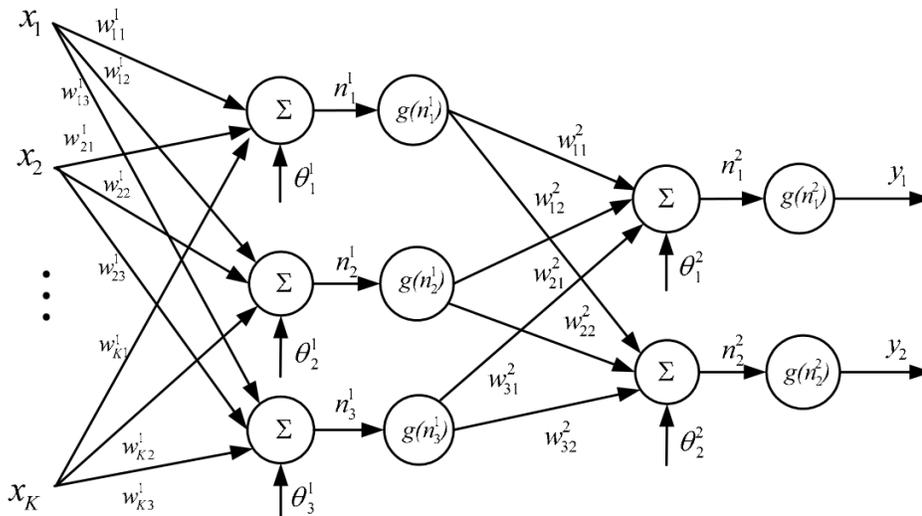


Figura 2.20: Arquitectura MLP [17].

#### 2.2.7.4. Algoritmos de entrenamiento

Son técnicas matemáticas o heurísticas bien establecidas a través de las cuales se obtienen los valores de los pesos sinápticos y el parámetro de sesgo. Estos algoritmos no modifican la función de activación elegida para el modelo de red neuronal que se entrena. Lo que hacen es modificar los pesos sinápticos utilizando el valor anterior de este más un factor de corrección [7].

$$W_{nuevo} = W_{viejo} + \Delta W \quad (2.10)$$

#### 2.2.7.5. Aprendizaje supervisado

Con esta técnica de aprendizaje el entrenamiento consiste en presentarle a la red repetitivamente patrones de estímulos de entrada pertenecientes a un juego de ensayo. El juego de ensayo está formado por parejas patrón de estímulos y respuesta correcta y debe de ser elegido cuidadosamente. Cada pareja se denomina hecho. En el juego de ensayo debe estar representada equilibradamente toda la información que la red necesite aprender.

Al realizar el entrenamiento la respuesta que da la red a cada patrón se compara con la respuesta correcta ante dicho patrón y, en virtud de esa comparación, se reajustan los pesos sinápticos. El reajuste de los pesos sinápticos está orientado a que, presentado el patrón de entrada, la red se acerque cada vez más a la respuesta correcta. Cuando ante un patrón de entrada la red de neuronas ya responde correctamente, se pasa al siguiente patrón del juego de ensayo y se procede de la misma manera. Cuando se termina con el último patrón del juego de ensayo, se tiene que volver a empezar con el primero, ya que los pesos se han seguido modificando.

Al cabo de unos pocos pasos de entrenamiento completos, con todos los elementos del juego de ensayo, los pesos sinápticos de todas las neuronas se estabilizan en torno a unos valores óptimos. Se dice entonces que el algoritmo de aprendizaje converge [16].

### **2.2.7.6. Aprendizaje no supervisado**

En este tipo de aprendizaje no se especifica a la red cuál debe ser la respuesta correcta; es decir, no hay una comparación entre la respuesta de la red y la respuesta deseada. Además, en este modelo de aprendizaje no existe ninguna influencia externa a la red, puesto que no se le informa de si un resultado fue correcto o no; tan sólo se le suministran grandes cantidades de datos con los que la red pueda construir sus propias asociaciones. Se necesita, por tanto, una cantidad mucho mayor de patrones de entrada durante el entrenamiento para que la red pueda ajustar correctamente sus pesos sinápticos. Por supuesto, los procedimientos de aprendizaje son diferentes a los utilizados con el modelo de entrenamiento supervisado.

En este tipo de aprendizaje, se le exige a la red que capte por sí misma alguna de las características presentes en los datos de entrada. El aprendizaje no supervisado pretende que las neuronas se auto-organicen aprendiendo a captar las regularidades de los datos de entrada sin suministrarles ningún tipo de criterio o ayuda externa que dirija dicha autoorganización [16].

### **2.2.7.7. Modelo de retro-propagación**

Este es un algoritmo de aprendizaje supervisado que es utilizado para entrenar redes de varios niveles. Este algoritmo posee una base matemática bastante sólida y que es considerado como una generalización de la regla delta. Esta técnica minimiza el error promedio al cuadrado entre la salida real y la esperada, aplicando el concepto de gradiente descendente. Esto quiere decir que el valor de entrada de la red se propaga desde la primera hasta la última capa. La señal de salida se compara con la salida deseada y se calcula una señal de error para cada una de las salidas. Las salidas de error se propagan hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de las capas ocultas que contribuyen directamente a la salida. Sin embargo, las neuronas de la capa oculta solo reciben una fracción de la señal total del error, basándose aproximadamente en la contribución relativa que haya aportado cada neurona a la salida original. Este proceso

se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido una señal de error que describa su contribución relativa al error total.

Uno de los problemas que presenta este algoritmo de entrenamiento de redes multicapas es que puede quedar atrapado en un mínimo local o en algún punto estacionario (Figura 2.21), con lo cual no se llega a encontrar el mínimo global de la función de error. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que no tiene por qué alcanzarse el mínimo global en todas las aplicaciones, sino que puede ser suficiente con un error mínimo preestablecido.

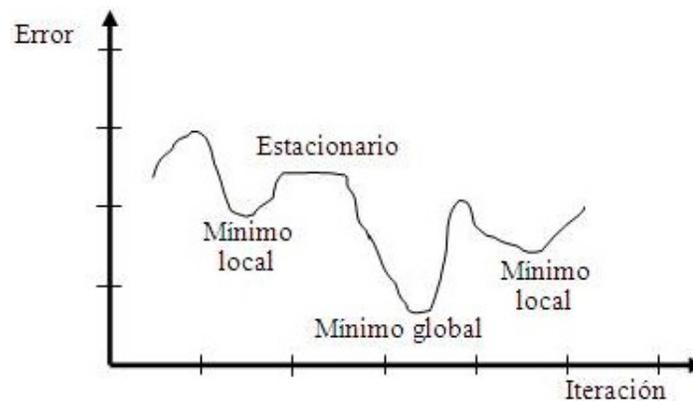


Figura 2.21: Representación de mínimos locales y globales

El objetivo de retro-propagación es que los pesos de los niveles escondidos generen una representación interna adecuada al problema a resolverse. Estas características y su porcentaje de éxito lo han convertido en uno de los algoritmos de aprendizaje más populares [28].

### 2.2.8. Fase de creación y desarrollo

El desarrollo de una RNA comprende las siguientes fases:

- Diseño de la arquitectura.
- Entrenamiento de la red.
- Validación de la red.

### 2.2.8.1. Diseño de la arquitectura

En la fase de diseño de la arquitectura se determina el número de neuronas que tendrá la red, el número de capas y la conectividad entre las mismas. A partir de un análisis de los datos del problema, se determinan cuántas entradas y salidas deberá tener la red, así como el número de neuronas y cómo estas están distribuidas en capas e interconectadas entre sí. Esta etapa es crítica, puesto que la topología de la red determina la capacidad de representatividad de la misma, y, por lo tanto, la cantidad de conocimiento que puede albergar. La arquitectura de la red deberá adecuarse al problema a resolver, y la no existencia de técnicas que realicen esta función hace que haya que recurrir a la experiencia y a la técnica de ensayo y error, probando varias topologías distintas, para finalmente conseguir una que se adapte de forma satisfactoria al problema. En esta etapa también se determinarán las funciones de activación y la de transferencia que se usarán [16].

### 2.2.8.2. Fase de entrenamiento

Una vez diseñada la arquitectura de la red (capas y número de neuronas por capa) y las funciones que la regirán, se tiene que proceder a entrenar a la red para que *aprenda* el comportamiento que debe tener; es decir, para que aprenda a dar la respuesta adecuada a la configuración de estímulos o patrones de entrada que se le presenten.

Durante este periodo de entrenamiento la red modifica sus pesos sinápticos, adaptándolos paulatinamente para que la respuesta de la red sea la correcta [16].

### 2.2.8.3. Fase de validación o test

Tras la fase de entrenamiento viene la fase de ejecución, durante la que se le pedirá a la red que responda a estímulos diferentes a los presentados durante la fase de entrenamiento. La red deberá de ser capaz de generalizar y dar respuestas correctas ante patrones de estímulos nuevos. Para operar con una red entrenada, se le sigue suministrando información de entrada a la red, sólo que ahora no se realizará ningún ajuste

---

en los pesos sinápticos. La red reconocerá o evaluará y dará una respuesta a partir de los pesos establecidos durante el entrenamiento. Durante este periodo de funcionamiento real o periodo de ejecución, se usa la red como si se tratara de cualquier otro programa informático convencional, en el que se le dan datos de entrada y retorna uno o varios valores [16].



# Capítulo 3

## Desarrollo

### 3.1. Concepto de diseño

La metodología que se desarrolló comenzó con la generación del concepto de diseño del prototipo tomando en cuenta todos los factores que afectan de manera directa o indirecta el desarrollo del concepto, como fueron: las especificaciones técnicas, los requerimientos del cliente, la maquinaria disponible, el capital, la experiencia, los diseños de productos parecidos, entre otros.

Primeramente, el dispositivo debía ser capaz de proveer información del color de líquidos durante su procesamiento en el interior de reactores (in situ), por lo que parte de la sonda tenía que estar sumergida, así que esta debía de ser hermética. La sonda debía de resistir temperaturas entre 0 y 100 °C sin deformarse, soportar los diferentes grados de acidez (pH entre 4 y 8), ser de un material que no guarde olores, fácil de limpiar y de esterilizar. Las imágenes tenían que ser transmitidas a una computadora para su procesamiento digital. Para el enfoque de la muestra se necesitaba de una lente biconvexa, además que debía incluir un sistema regulable de iluminación frontal difusa y otro a contraluz para que pudiera adaptarse a distintas aplicaciones. Para proteger el sistema de medición del medio de proceso y además permitir el paso de la luz, se necesitaba de una ventana transparente al espectro de luz visible con características ópticas

y mecánicas adecuadas.

Los requerimientos estructurales y funcionales para la fabricación del dispositivo fueron: 1) peso ligero, no mayor a 2 Kg; 2) ergonómico; 3) modular, para su fácil mantenimiento; 4) simple: pocas piezas para fácil ensamblado; 4) seguro para usarse en procesos químicos y/o biológicos; 5) diseño sanitario para aplicación en procesos alimentarios, farmacéuticos y biotecnológicos.

Todos estos factores determinaron la evolución del concepto de diseño, pues se hizo de manera iterada y concurrente para generar el concepto de diseño final que cumplió con todas las exigencias planteadas. El resultado de esta iteración se observa en la Figura 3.1

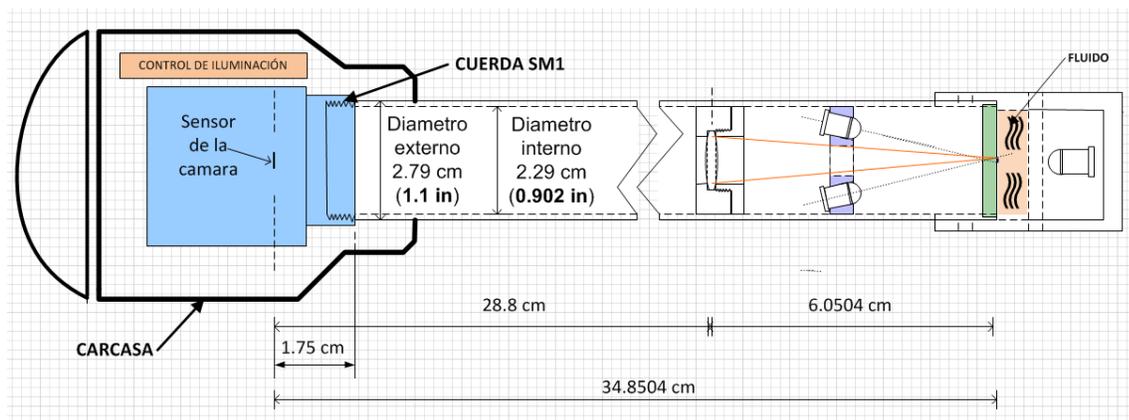


Figura 3.1: Concepto de diseño.

A continuación se describen los materiales y equipos que se utilizaron para llegar a este concepto de diseño, así como la serie de pasos que se utilizaron para su concepción.

### 3.1.1. Selección de videocámara y diseño de sonda

Se eligió utilizar la videocámara DCU223C de la compañía Thorlabs (Figura 3.2a) para la implementación del sistema de monitoreo de color en línea la cual contiene un sensor SONY ICX204 AK con una resolución a color de  $1024 \times 768$  pixeles, tamaño de

pixel de  $4.65 \times 4.64 \mu\text{m}$  y con conexión USB 2.0. Esta videocámara permite capturar imágenes a una velocidad máxima de 30 cuadros por segundo y se puede programar con distintos lenguajes de programación como lo son C++, C#, VB.NET, Delphi y LabVIEW. Como se puede apreciar en la Figura 3.2b, el rango de visión de la cámara cubre todo el espectro visible, así como parte del infrarrojo cercano [29].

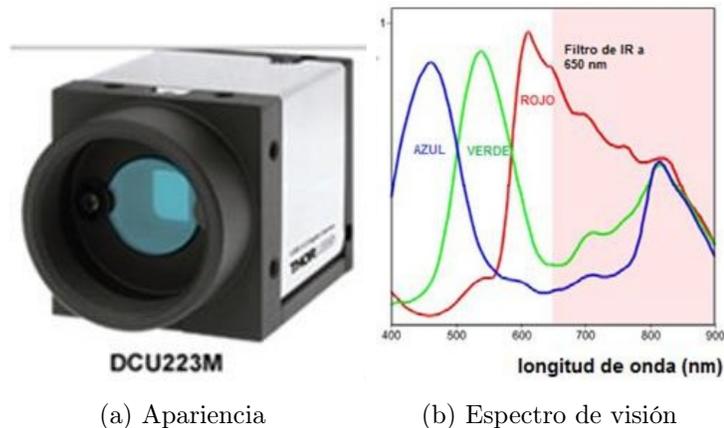


Figura 3.2: Características de la videocámara DCU223C.

En el estado del arte se describieron algunos sistemas comerciales de monitoreo in situ de tamaño y forma de partículas. Se pudo apreciar que todos ellos tienen en común el uso de una sonda cilíndrica, en donde en su interior van montados los elementos optoelectrónicos. En este tipo de sistemas es común usar una ventana de zafiro transparente montada en el extremo distal de la sonda para aislar el sistema de medición del medio muestreado. La elección de la videocámara fue el elemento clave, debido a que a partir de ella se eligieron, el software a utilizar, el vínculo de comunicación con la computadora, el diámetro de la sonda, y a partir de este último, el sistema de acoplamiento y los diámetros de la lente y de la ventana de zafiro. También es importante señalar que para la medición puntual del color no es indispensable el uso de una videocámara CCD, pero resulta conveniente ya que puede permitir la fácil extensión de la aplicación del dispositivo para medir el color promedio de una gran superficie (cambiando la lente), para medir el color pixel por pixel o para realizar algún otro tipo de análisis; por ejemplo, conteo de

micro-partículas.

Continuando con la selección de materiales, se eligió acero inoxidable 316 para construir la sonda, debido a su mejor resistencia a la corrosión con respecto a los aceros inoxidables 302 y 304. Se determinó que el diámetro adecuado es de 1 in. Esto se debe a que la videocámara DCU223C tiene extensión prevista para el acoplamiento modular del sistema óptico, con una cuerda para un inserto tipo SM1 (1.035 in y 40 hilos por in). Con estas consideraciones se lograron acoplar la videocámara y la sonda.

Se seleccionó una ventana de zafiro que distribuye Thorlabs de 0.5 in de diámetro. Para tener acceso con suficiente profundidad en los procesos químico-biológicos se definió una longitud de la sonda de aproximadamente 30 cm. A pesar de que el objetivo principal del prototipo es monitorear el color, para futuras aplicaciones se consideró enfocar un área de aproximadamente 1 mm cuadrado para visualizar la muestra a nivel de micro-partículas. Para lograr dicho enfoque, y considerando que las dimensiones del sensor de la cámara son 4.65 mm  $\times$  3.75 mm, el área enfocada resultó de 1  $\times$  0.75 mm (ver Figura 3.3), de esta manera la imagen se aumentó 4.76 veces. Se consideraron estas dimensiones de manera que el área enfocada y el área del sensor de la videocámara tengan la misma proporción entre la base y la altura. Con el aumento de 4.76 y considerando la distancia de 30 cm entre objeto y plano imagen, se determinaron con ayuda de las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3, y de la Figura 2.9 los valores  $p = 5.2$ ,  $q = 24.8$  y  $f = 4.3$ .

Como la longitud del punto focal debe corresponder a los puntos focales nominales de las lentes comerciales, se eligió un punto focal de 5 cm. Usando el nuevo punto focal, se recalcularon las distancias  $p$  y  $q$  (Ecuación 2.1), obteniendo:  $p = 6.0504$  cm y  $q = 28.8$  cm. Con la Ecuación 2.2 se determinó la distancia del sensor de la videocámara al extremo de la sonda  $x = 34.8504$  cm.

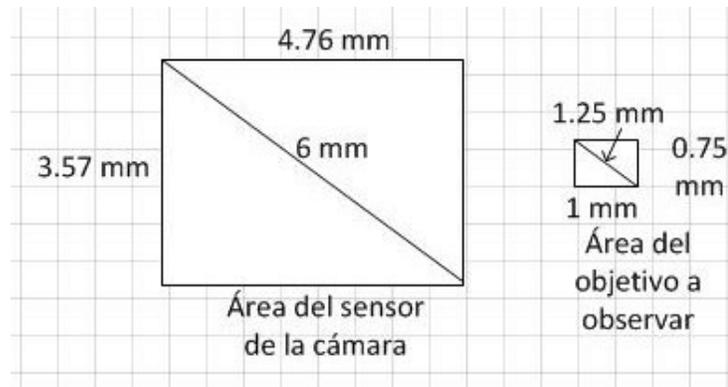


Figura 3.3: Área del sensor de la videocámara y de la escena a observar

### 3.1.2. Control de luminosidad

Adicionalmente, se consideró diseñar y construir un sistema de iluminación difusa. Para ello se propuso utilizar luz blanca provista por LEDs de alta luminosidad. Como el interior de la sonda de acero inoxidable es reducido, se propuso la utilización de LEDs de 3 mm de diámetro en un arreglo circular (ver Figura 3.4). Este tamaño permitió alojar un máximo de 9 LEDs.

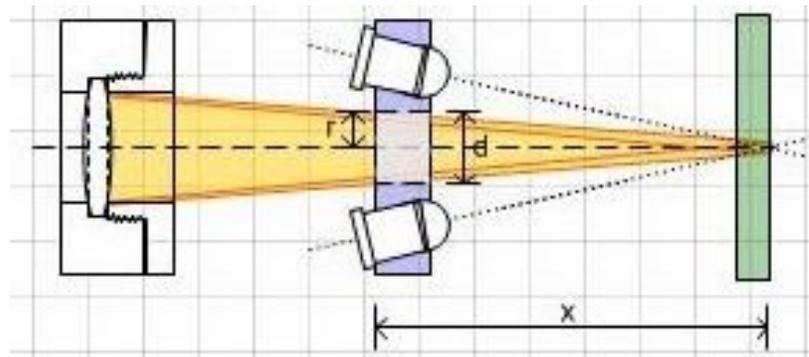


Figura 3.4: Sistema de iluminación en el interior de la sonda.

En la Figura 3.4 se muestra el concepto de diseño para el sistema de iluminación difusa. La cantidad total de LEDs que se encenderán dependerá de la intensidad de iluminación requerida de acuerdo a las características ópticas (absorbancia) de la escena que se esté observando; sin embargo, se eligió poder encender ya sea tres, seis o nue-

ve LEDs a la vez para tener una iluminación uniformemente distribuida. Para ello se diseñó un sistema de control de intensidad luminosa de cuatro posiciones. El sistema hace uso de máquinas de estado, donde cada posición corresponde a un estado (Figura 3.5).

El estado 000 representa la posición de apagado, donde ninguno de los 9 LEDs estará encendido. La posición 001 activa la iluminación de tres LEDs uniformemente distribuidos (por ejemplo los tres sombreados en color azul de la Figura 3.5). La posición 011 representa la iluminación de seis LEDs (por ejemplo los sombreados en azul y rojo), y la posición 111 representa la iluminación de los nueve LEDs. Si se avanza otra posición, la máquina de estados regresa al estado apagado.

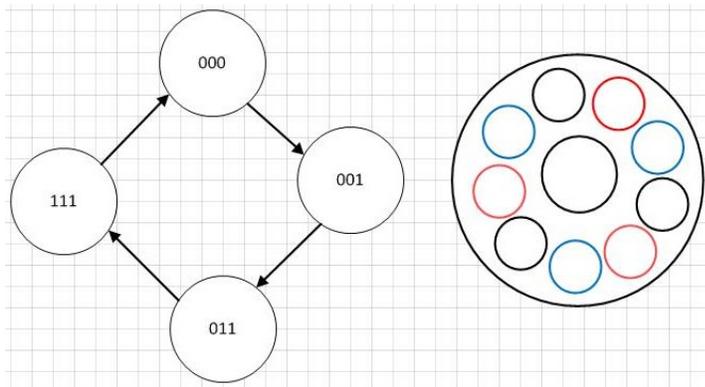


Figura 3.5: Máquina de estados y distribución de los LEDs

Este sistema se realiza con un solo botón, lo que ayuda a ahorrar espacio en el PCB (del inglés Printed Circuit Board) y hace que el sistema tenga un diseño simple y fácil de usar. El circuito consta de dos partes principales, la generación de pulsos y la emulación de una máquina de estados. La generación de pulsos se hizo mediante el NE555. Por su parte la emulación de la máquina de estados se hizo mediante la programación de un circuito lógico programable (en una GAL22V10). En la Figura 3.6 se observa el circuito esquemático donde se encuentran R1, R2, C1 y C2 que son los elementos pasivos que determinan la frecuencia del pulso y el tiempo en alto de este. Dadas las formulas  $t1 = \ln(2)(R1 + R2)C$  y  $f = 1/\ln(2)(R1 + 2R2)C$ . Donde R1=10 KΩ, R2= 4.7 KΩy C=100nf.

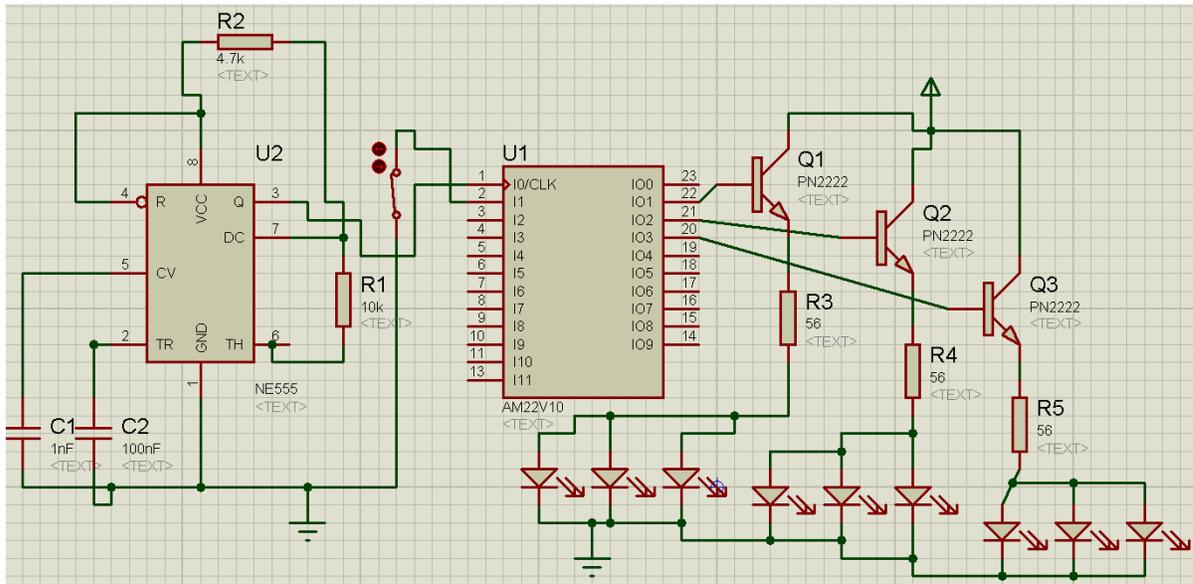


Figura 3.6: Circuito esquemático

### 3.1.3. Carcasa

La seguridad en el manejo del dispositivo es crucial debido a que los sistemas de medición y de control de iluminación son delicados. Se diseñó una carcasa para contener la cámara y la circuitería en un solo módulo, y también para reforzar el acoplamiento entre la sonda y la cámara.

En el diseño se consideraron las dimensiones del sistema de control de iluminación y de la videocámara. Buscando que la carcasa ocupe el mínimo espacio y sea ergonómica, se eligió un diseño cilíndrico con un diámetro adecuado para ser sujetado con una sola mano. Como el diámetro utilizado para contener la videocámara es diferente del diámetro de la sonda, el diámetro de la carcasa se redujo gradualmente tomando la forma de un pequeño cono a la mitad de la carcasa. Para darle estética al diseño, se construyó una tapa semiesférica para cubrirla (Figura 3.1).

### 3.1.4. Sistema para reducir la velocidad de flujo e iluminación a contraluz

El sistema de monitoreo de color in situ estará sumergido en procesos en los que se tendrá un flujo del líquido a monitorear generado por dispositivos mecánicos como agitadores o bombas. Debido a esto, es de gran importancia disminuir la velocidad del flujo del líquido monitoreado. Para este fin, se diseñó una extensión de la sonda fabricada de Nylamid blanco con un conducto de 0.7 cm de separación justo frente a la ventana de zafiro. En el interior de la extensión se integró un LED de luz blanca de alta luminosidad de 5 mm de diámetro que iluminará la muestra a contraluz para proveer la luz necesaria al sistema para la correcta visualización y monitoreo de color de muestras traslucidas (Figura 3.1). Con esto se da por concluido el concepto de diseño del dispositivo propuesto. El diseño provee solución a todos los requerimientos técnicos, de forma y de estructura que se plantearon en el concepto de diseño del prototipo.

## 3.2. Manufactura del dispositivo

Una vez que se realizó el concepto de diseño, se procedió a la manufactura del dispositivo para la que se consideran las siguientes etapas:

- a) Manufactura de la sonda.
- b) Manufactura del soporte para la lente.
- c) Manufactura del soporte para la ventana de zafiro.
- d) Manufactura de reductor de velocidad.
- e) Manufactura de la carcasa y tapa.
- f) Ensamble de las piezas.

Para ello se utilizaron los planos de cada una de las piezas a manufacturar que se encuentran en el Apéndice E.

### 3.2.1. Manufactura de la sonda

Primero se comenzó con la manufactura de la pieza llamada sonda de acero (ver Figura E.1). Esta pieza es fundamental, pues se conecta a la cámara. En su interior se montaron posteriormente otras piezas. Para su realización, la pieza se montó sobre el torno paralelo, se alineó, se rectificó una de sus caras y se maquinó una cuerda (ver Apéndice G los pasos para el maquinado de la cuerda).



(a) Acoplamiento.

(b) Cables de alimentación.

Figura 3.7: Pieza sonda de acero

En la Figura 3.7a se observa el acoplamiento entre la sonda de acero y la cámara. Enseguida se le hizo una perforación a 2 cm de su extremo con la fresadora vertical manual y con la ayuda de un cortador vertical plano (ver Figura 3.7b). Este orificio tiene como propósito comunicar el cableado del interior al exterior de la sonda. Finalmente se montó la sonda de acero inoxidable sobre un torno, el cual se hizo girar a la velocidad a cilindrar para darle un acabado superficial fino.

### 3.2.2. Manufactura del soporte para la lente.

Esta pieza (ver Figura E.5) se extiende desde el extremo proximal de la sonda hasta la ubicación de la lente, lo cual hace fácil su extracción ya que la sonda irá sellada herméticamente en su extremo distal, además de que permite colocar fácilmente la lente a la distancia correcta. La pieza se hizo de PTFE (Teflón) pues sus propiedades mecánicas lo hacen idóneo para conservar su longitud a las temperaturas a las que estará expuesto. Esto es vital, ya que es necesario conservar la distancia entre el sensor de la videocámara

CCD y la lente, y de éste con la ventana de zafiro. Como se puede observar, el diseño es simple, cuenta con una ranura en forma de escalón en donde se aloja la lente y un barreno en su superficie, por donde pasa el cable de alimentación y comunica al sistema electrónico de control de iluminación con el sistema de iluminación propiamente dicho.

Para su realización primeramente se montó la barra de teflón sobre el torno paralelo



Figura 3.8: Desbaste de la pieza soporte de lente en el torno horizontal

en donde se le hizo un desbaste a lo largo de toda su longitud, para tener el diámetro adecuado (ver Figura 3.8), subsecuentemente, se le hizo un barreno concéntrico a lo largo de toda la pieza con una broca de 3/8 de pulgadas con zanco largo recto. Posteriormente, se le hizo el escalón en el cuál se monta la lente, el cual se tuvo que maquinar con mucho cuidado, pues se necesitaba que la lente entrara a presión. Finalmente el soporte de la lente se montó en la fresadora vertical manual donde se le hizo el desbaste por donde se introduce el cableado del sistema de iluminación (ver Figura 3.9).

### 3.2.3. Manufactura del soporte para la ventana de zafiro

Para la realización de la pieza llamada porta zafiro que soporta la ventana de zafiro (ver Figura E.4), primeramente se procedió a hacer un desbaste de una barra de 10 cm de largo de PTFE en el torno horizontal con el propósito de ajustarlo a las dimensiones necesarias para que la sonda entrara de manera justa a la sonda. Posteriormente se realizó un chaffán a la pieza de 15 grados.



Figura 3.9: Maquinado de la pieza soporte de la lente en la fresadora manual vertical



Figura 3.10: Pieza porta ventana de zafiro montada en la fresa vertical y el cabezal divisor

La realización del maquinado de los nueve barrenos implicó utilizar un cabezal divisor, éste a su vez tuvo que estar a 15 grados de inclinación para que todos los barrenos apuntaran hacia el mismo foco. Debido a las dimensiones del cabezal divisor y a su difícil maniobrabilidad, la pieza se tuvo que montar sobre una fresadora de control numérico (ver Figura 3.10), ya que es la máquina que presenta una mayor exactitud y menor oscilación al momento de hacer los barrenos.

### 3.2.4. Manufactura de la carcasa y tapa

Por las características del diseño, se llegó a la conclusión que era necesario maquinar las piezas llamadas carcasa y tapa (ver Figuras E.2 y E.3) sobre un torno de control numérico. Es así que los dibujos se realizaron en el software *SolidWorks*® en donde se generaron los códigos para poder maquinar las piezas en el torno CNC (Figura 3.11). El tiempo de maquinado fue de 18 minutos para la carcasa principal y 9 minutos para la tapa.

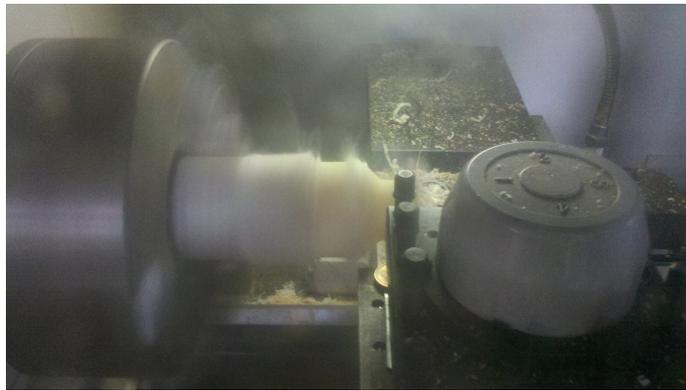


Figura 3.11: Manufactura de la carcasa en el torno CNC

Sobre la carcasa principal se colocaron 3 prisioneros de 5 mm de diámetro que le dieron soporte y agarre a la sonda de acero inoxidable. Para hacer la cuerda de los prisioneros la carcasa principal se montó sobre un cabezal divisor, el cual hace que la carcasa pueda rotar sobre su propio eje 120 grados, para que los barrenos queden separados uniformemente. Después de realizar los barrenos con un taladro vertical, la carcasa principal se montó sobre un tornillo y ahí se hizo una cuerda  $M5 \times 0.8$  con un machuelo. Lo anterior mencionado se puede observar en la Figura 3.12.

Una vez manufacturada la carcasa y su tapa se procedió a pintarla. Nylamid es un polímero difícil de pintar, se le aplicó promotor de adherencia. Posteriormente se pintó con pintura de esmalte de color azul.

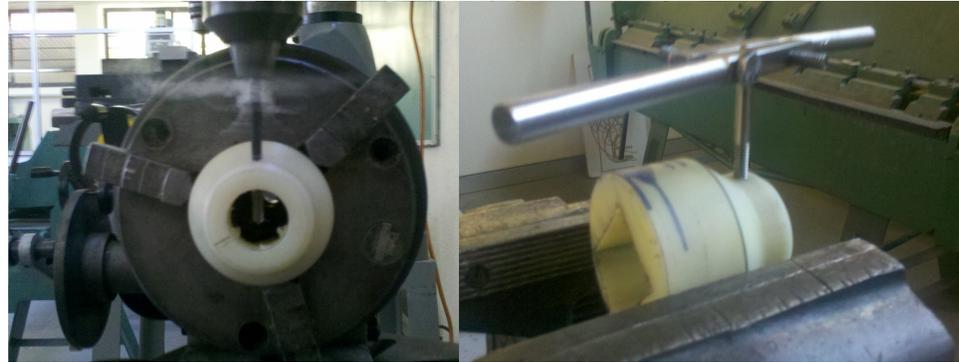


Figura 3.12: Manufactura de cuerda para los prisioneros en la carcasa

### 3.2.5. Manufactura del reductor de velocidad

El sistema de reducción de la velocidad del flujo e iluminación a contraluz se hizo también de Nylamid. El plano de la pieza se muestra en la Figura E.6. Su proceso de manufactura fue similar al de las piezas que se han mencionado anteriormente. Primero se desbastó en el torno paralelo manual. Posteriormente se trasladó a la fresadora manual vertical donde se le hizo un cuerda para un prisionero y el corte necesario para que el flujo de la muestra no fuera interrumpido. Una vez manufacturado se le montó el sistema de iluminación a contraluz que consta de un LED blanco de 5 mm de diámetro y su respectivo sistema de encendido manual (Figura 3.13).



Figura 3.13: Sistema de iluminación a contraluz.

### 3.2.6. Ensamble de piezas

Para ensamblar las piezas, fue necesario mantener fija la lente y la ventana de zafiro a sus soportes de teflón, por lo que se procedió a pegarlos. Se utilizó una espátula de acero inoxidable, una pipeta plástica, y un contenedor de 100 ml de PET y la resina con la que se pegaron las lentes (NIC TONE) (Figura 3.14).



Figura 3.14: Material necesario para el pegado de la lente y la ventana de zafiro

En primer lugar, se limpió el teflón con acetona industrial. Posteriormente se tomó el NIC TONE en polvo con la espátula y se depositó en el contenedor de PET. Con la pipeta plástica se tomó el monómero líquido y se vació sobre el polvo. Se mezclaron de manera uniforme los dos componentes. Subsecuentemente, se tomó con la pipeta el adhesivo y con mucho cuidado se vació una ligera capa sobre el teflón (sobre la ranura), para posteriormente sobreponer la ventana de zafiro; posteriormente, se puso otra ligera capa de adhesivo sobre la unión de la ventana y el teflón. Antes de que el adhesivo se cristalizará, se retiraron los excesos.

El siguiente paso fue montar los LEDs sobre el sistema de iluminación y posteriormente cablearlo. Primero se cableó la tierra. Por cuestiones de diseño se colocaron los LEDs de manera que la tierra quedará en el círculo exterior, tal como se muestra en la Figura 3.15. Posteriormente se cablearon las terminales ánodo de los 9 LEDs en grupos de tres, de manera alternada para conseguir una iluminación uniformemente distribuida.

Todo dispositivo de instrumentación necesita un estuche que lo contenga, donde se

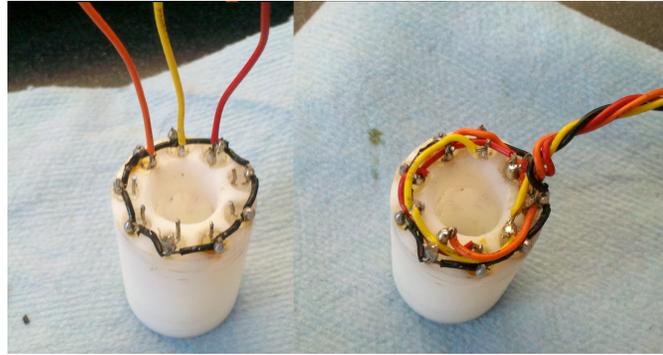


Figura 3.15: Cableado del sistema de iluminación

pueda guardar y transportar para que este no sufra daños. El estuche diseñado consta de una caja de madera, cuyo interior está relleno de espuma de poliuretano con compartimientos a medida para cada elemento de la sonda. En la Figura 3.16 se muestra su estuche.



Figura 3.16: Estuche terminado.

### 3.3. Software desarrollado

Con el objetivo de utilizar el sistema INI-LAB y de obtener valores de color en el espacio CIELAB, se desarrolló una interfaz (Apéndice H) que incluye un algoritmo de procesamiento de imágenes. La implementación del software se realizó en LabVIEW 2013. Dicho software tiene una flexibilidad potente como lenguaje de programación, pues incorpora sistemas gráficos para el control y monitoreo, y una programación intuitiva.

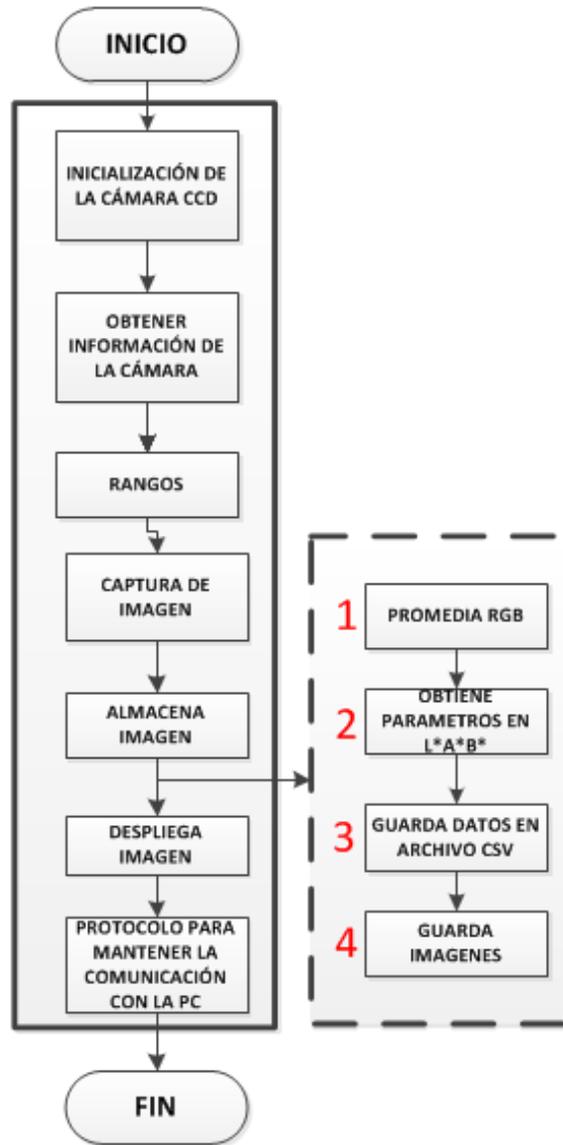


Figura 3.17: Diagrama de flujo del proceso para determinar los valores  $L^*a^*b^*$ .

Para la implementación del software para la aplicación del monitoreo de color, se tomó como base el programa UC480\_LiveStrea\_32bits\_Vision\_sequence.VI que viene en la paquetería instalada en el software de la cámara. Se trata de un programa completamente funcional que permite adquirir y mostrar la secuencia de imágenes en tiempo real, además de que cuenta con los protocolos de seguridad necesarios para no dañar la cámara y para mantener la correcta comunicación con la PC, de manera que solo se agregaron los bloques de procesamiento necesarios. En la Figura 3.17 se muestra la

estructura del programa original (dentro de los recuadros con línea sólida). La secuencia de operación del programa original es como sigue: En primer lugar se identifica e inicializa la cámara (en este caso es la DCU223C), enseguida se obtiene su información, se delimitan sus rangos de operación, se captura la imagen, se almacena en un buffer, se despliega en una ventana en forma de vídeo, y se mantiene en estado de alerta para no perder la comunicación. La inicialización implica configurar los parámetros de la cámara a través de la interfaz de usuario (ver Figura I.2 en el Apéndice I). En este caso la cámara se configuró para adquirir imágenes a una velocidad de 4 FPS (la velocidad puede ser mayor), con un tiempo de exposición del sensor de 80 ms.

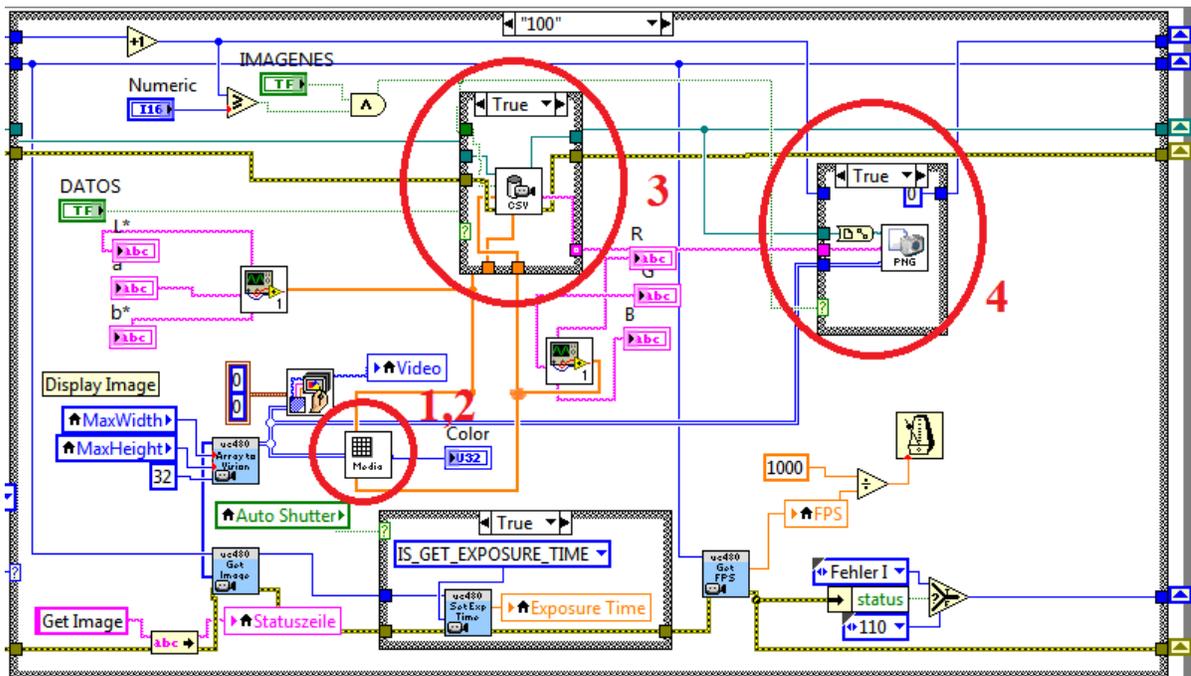


Figura 3.18: Estructura de la secuencia 100 del programa en LabVIEW.

Los elementos de procesamiento requerido para nuestra aplicación específica se insertaron entre los bloques ALMACENA IMAGEN y DESPLIEGA IMAGEN (cuadro con líneas punteadas de la Figura 3.17). Los bloques desarrollados se insertaron en el caso número 100 del programa. Dichos elementos permiten procesar los datos capturados por la imagen, y hacer la conversión de parámetros RGB a  $L^*a^*b$ . Para ello se crearon 4 módulos. En la Figura 3.18 se observa la caso número 100 del programa donde se

insertaron los módulos.

El primer módulo (1) separa los datos capturados (provenientes del bloque azul, con nombre Array) en sus componentes RGB. Una vez separadas las componentes RGB, la secuencia calcula el valor promedio de cada una de ellas (bloque 1 de la Figura 3.17). El segundo módulo (2) permite determinar los parámetros  $L^*a^*b^*$  de cada imagen, ya sea por medio de RNAs o por medio de una matriz de corrección.

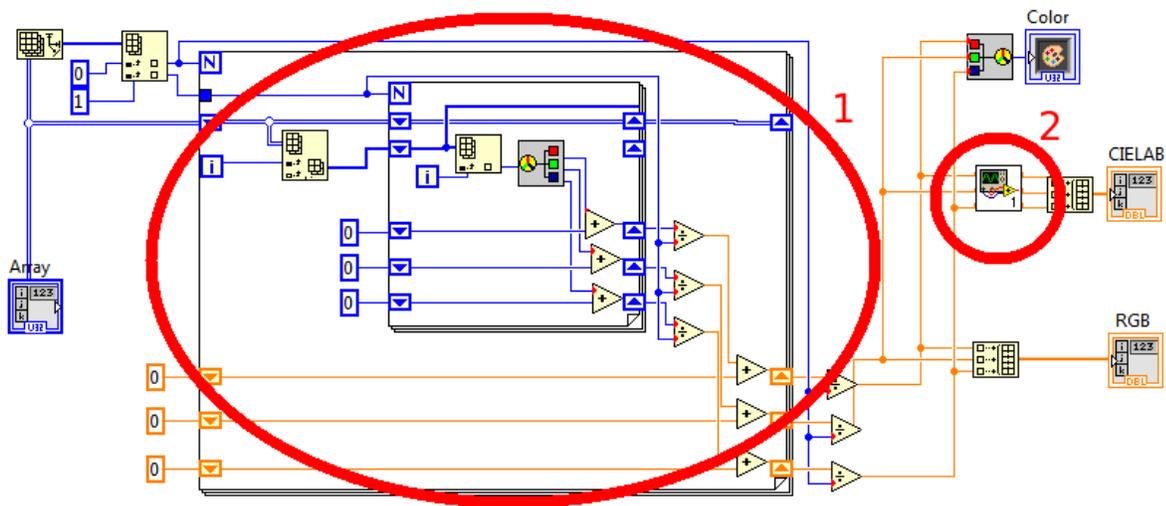


Figura 3.19: Módulos para determinar el promedio de las componentes RGB y las componentes  $L^*a^*b^*$ .

El tercer módulo (3) permite guardar cada uno de los datos (ver Figura 3.20). El módulo tiene como entrada dos arreglos: un bloque con los datos expresados en unidades  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  (bloque naranja llamado Array LAB) y otro bloque con datos en formato RGB (bloque naranja llamado Array RGB). El módulo está estructurado para guardar la información del monitoreo (hora, fecha, componentes  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , valores R, G y B y el nombre de la imagen) en un archivo CSV.

Finalmente se implementó un cuarto módulo (4) para guardar en disco duro las imágenes (ver Figura 3.21). El módulo recibe el nombre de la imagen, que consiste en la hora de su captura y la imagen que se va a guardar. El módulo crea una carpeta que

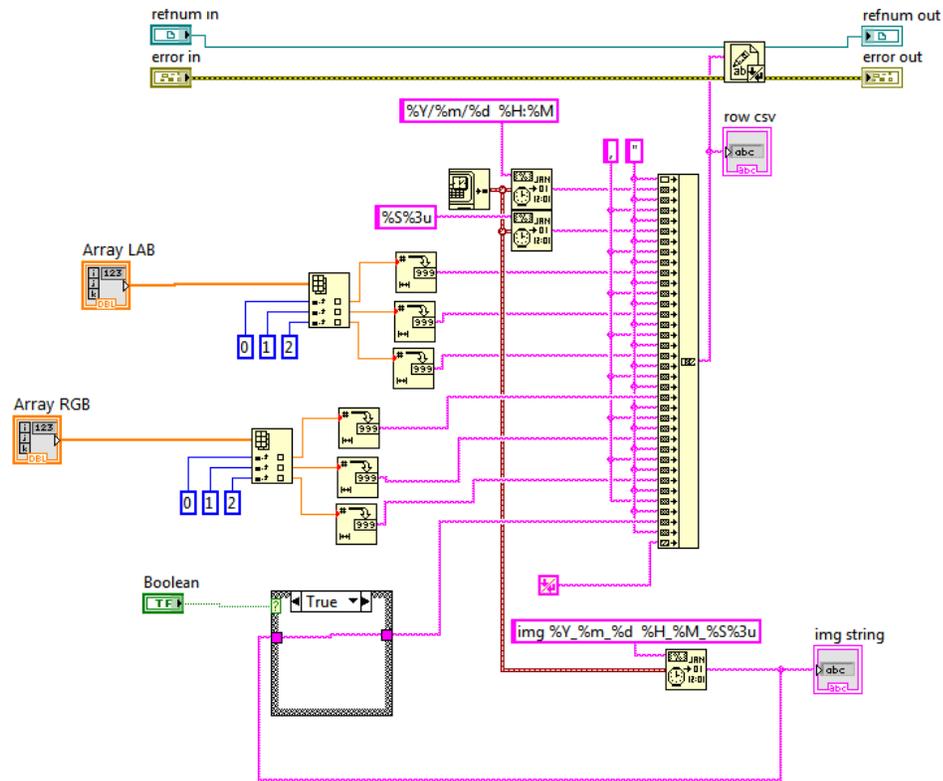


Figura 3.20: Módulo para guardar datos en un archivo CSV.

lleva por nombre la hora de la captura de la primera imagen.

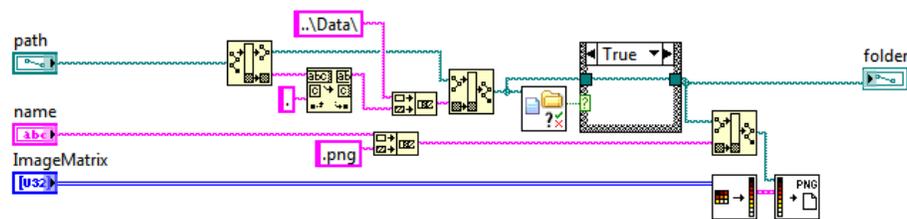


Figura 3.21: Módulo para guardar imágenes.

Es importante señalar que dado el objetivo de la tesis es desarrollar un sistema de medición puntual del color, sólo se utilizaron valores promedios de los valores de color para cada imagen. Sin embargo, considerando que el equipo puede captar imágenes digitales constituidas por una matriz de  $3 \times 1027 \times 768$  elementos, el sistema puede ser utilizado para determinar los valores  $L^*$ ,  $a^*$ , y  $b^*$  correspondientes a cada pixel de la imagen.

El programa funciona de tal manera que una vez que comienza, se puede visualizar las imágenes de la muestra observada. Adicionalmente, se presentan en la pantalla los valores  $L^*a^*b^*$  correspondientes a la medición, de tal forma que la estimación de estos parámetros es en tiempo real.

# Capítulo 4

## Metodología experimental

### 4.1. Pruebas de funcionalidad, sensibilidad y reproducibilidad del equipo

Antes de proceder a correlacionar los parámetros RGB que captura la cámara CCD con las mediciones  $L^*a^*b^*$  del espectrofotómetro HunterLab, se verificó el correcto funcionamiento del dispositivo: se probó que el equipo soportara las condiciones de inmersión y que la interfaz funcionara adecuadamente (visualización de la interfaz y almacenamiento de los parámetros de color en un archivo). Las pruebas de sensibilidad del equipo se hicieron mediante la medición de muestras con el equipo INI-LAB. Estas muestras fueron preparadas con concentraciones diluidas de colorantes: 8 mg/L (amarillo y verde) y de 6 y 7 mg/L para el rojo y el azul, respectivamente. Por otra parte, se obtuvo la reproducibilidad del equipo para medir una sola muestra 10 veces considerando 2 escenarios: 1) mediciones de muestra con calibración entre mediciones y 2) mediciones de muestra continuas.

### 4.2. Correlación de datos

La etapa de correlación de datos consistió en tomar mediciones de color puntuales de muestras, con el objetivo de recabar suficientes datos para establecer la relación

de las mediciones de los parámetros RGB medidos con la videocámara CCD, con las mediciones CIELAB realizadas con el colorímetro HunterLab. Se usaron dos métodos para determinar los parámetros  $L^*a^*b$  en línea: 1) Propuesta de una matriz de correlación e 2) implementación de una Red Neuronal Artificial (RNA).

#### 4.2.1. Correlación de datos usando una matriz de corrección

La matriz de corrección propuesta es la matriz que sustituye a la matriz de transformación (Ecuación 2.6) que depende del iluminante. La matriz se obtuvo de forma heurística: mediante la observación y el comportamiento de los resultados obtenidos, se propusieron ganancias en un proceso iterativo hasta el punto de obtener los valores esperados.

#### 4.2.2. Correlación de datos por RNA

El segundo método para la correlación de datos se realizó mediante una RNA, en la que se utilizó el método de retropropagación como algoritmo de entrenamiento. Al igual que con el método anterior, para la selección de la arquitectura de la RNA se utilizó un proceso heurístico, para lo cual se estuvieron probando diferentes arquitecturas usando la regla de la pirámide geométrica<sup>1</sup>, en el Apéndice C se describe la manera para entrenar una RNA usando el Toolbox *nntool* del software *MATLAB*® .

#### 4.2.3. Preparación y captura de muestras para correlación RGB- $L^*a^*b^*$

Se prepararon una serie de 28 soluciones acuosas de diferentes colores mediante la adición de colorantes con diferentes concentraciones para entrenar la RNA con los parámetros de color obtenidos con la cámara CCD (RGB) y con las mediciones del colorímetro HunterLab ( $L^*a^*b^*$ ).

---

<sup>1</sup>La regla de la pirámide geométrica establece que a medida que el número de neurona ocultas se aleja de  $\sqrt{n_i n_o}$  pierde generalidad la red neuronal para la estimación de datos.

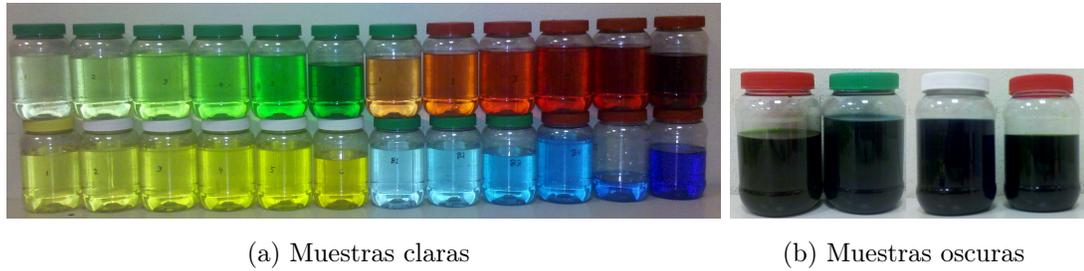


Figura 4.1: Banco de muestras puntuales

El banco de muestras (ver Figura 4.1) consta de muestras de color verde, rojo, amarillo y azul. Estos colores representan las 4 coordenadas del espacio cromático CIELAB (+a rojo, -a verde, +b amarillo y -b azul). Se prepararon 6 muestras de cada color con diferentes concentraciones de colorante. También se prepararon 4 muestras oscuras para obtener colores con luminosidad ( $L^*$ ) baja. Adicionalmente, se realizaron experimentos para registrar los valores intermedios entre el color rojo y verde, y el amarillo y azul. Con este fin, se hicieron 2 experimentos de cambio de color mediante la adición de colorantes: 1) cambio de rojo a verde (Figura 4.2a); 2) cambio de amarillo a azul (Figura 4.2b). A partir de este experimento se tomaron 6 mediciones, las cuales se agregaron al banco de muestras, por lo que finalmente el banco de muestra se constituyó de 34 muestras.

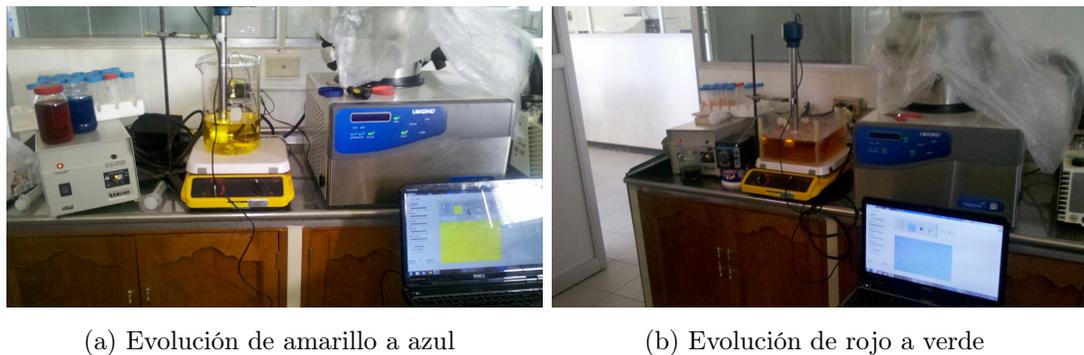


Figura 4.2: Evoluciones de color

#### 4.2.4. Mediciones al banco de muestras

Las mediciones al banco de muestras se realizaron en línea y fuera de línea. Las mediciones fuera de línea se realizaron con el colorímetro espectrofotométrico comercial ScanVis HunterLab <sup>®</sup> (E.U.A.) (ver Figura 4.3a). Para esto se tomaron 20 mL de muestra y se vertieron en una celda de cuarzo (1 cm de grosor). El colorímetro se usó en modo de transmitancia total. Se realizó la calibración del blanco (con agua destilada) y del negro, y se procedió a realizar las mediciones de color. Se tomaron tres mediciones de color por cada muestra.

Las mediciones en línea se realizaron con el sistema INI-LAB. Una vez que se calibraba el sistema (ajustar el tiempo de obturación y la velocidad en fps), simplemente se insertaba la sonda a la muestra y de forma inmediata determinaba los valores RGB que se despliegan en la pantalla de una PC a la cual está conectado el sistema INI-LAB.



(a) Mediciones de color fuera de línea.

(b) Mediciones de color en línea.

Figura 4.3: Mediciones de color al banco de muestras.

### 4.3. Validación utilizando bebidas comerciales

Se probó la precisión del equipo en comparación con el colorímetro HunterLab mediante la medición del color de 19 bebidas comerciales con un amplio espectro de color (ver Figura 4.4).



Figura 4.4: Bebidas comerciales

Tabla 4.1: Relación de muestras comerciales.

No.	Bebida comercial	No.	Bebida comercial
M1	Fresa (Peñafiel)	M11	Cola (Pepsi)
M2	Té verde (Fuze tea)	M12	Moras (Powerade)
M3	Manzana (Crush)	M13	Limón (Peñafiel)
M4	Jugo de manzana (Jumex)	M14	Toronja (Be light)
M5	Manzana (Manzanita)	M15	Naranja (Mirinda)
M6	Fresa (Fanta)	M16	Piña (Jarrito)
M7	Jugo de uva (Jumex)	M17	Naranja (Peñafiel)
M8	Tamarindo(Jarrito)	M18	Conga (Jumex)
M9	Sangría (Peñafiel)	M19	Jugo de naranja (Citrus)
M10	Morado (Powerade)		

Las bebidas refrescantes comerciales se vaciaron de sus envases a contenedores plásticos que contienen 500 ml de la muestra y una tapa lo suficientemente grande para que se pueda insertar el sistema INI-LAB. En la Tabla 4.1 se describen las 19 bebidas

comerciales que se midieron.

#### 4.4. Pruebas en línea: Proceso de extracción sólido-líquido de flor de jamaica

Para validar y probar la aplicación del sistema propuesto en un problema real de monitoreo de color en línea, el equipo se sometió a experimentos de extracción sólido-líquido a partir de flor de jamaica. Se usó un vaso de precipitados de vidrio de 4 L como tanque de extracción y se le añadió 2 L de agua pasada por ósmosis. Se compró flor de jamaica deshidratada obtenida en el mercado local. Se envolvieron 30 g de flor de jamaica con tela de rayón. Se calentó el líquido a la temperatura fijada con ayuda de un plato de calentamiento con agitación magnética. El agitador tiene la función de disolver el extracto de manera homogénea en el agua. El sistema de monitoreo de color propuesto se montó sobre un soporte universal, que con la ayuda de una pinza de sujeción mantuvo la sonda suspendida sobre el tanque. La sonda se introdujo hasta quedar inmersa en el líquido y se calibró. Una vez alcanzada una temperatura constante, el contenedor de flor de jamaica se sumergió en el líquido de manera que el sustrato vegetal quede completamente sumergido (ver Figura 4.5).

Se realizaron dos experimentos. En la primera prueba se monitoreó el proceso de extracción de flor de jamaica en línea a 40°C mediante el sistema INI-LAB. Simultáneamente, se tomaron muestras de 25 mL de extracto durante la corrida experimental para medir el color en el equipo HunterLab. De esta manera se obtuvieron datos  $L^*a^*b^*$  en línea y fuera de línea para su comparación. En el segundo experimento se realizaron pruebas cinéticas de la extracción de jamaica en función de la temperatura (23, 30, 40, 50 y 60 °C, +/- 1 °C). Para estas pruebas se usó únicamente el sistema INI-LAB, con un intervalo de monitoreo de 4 mediciones por segundo durante 90 min.

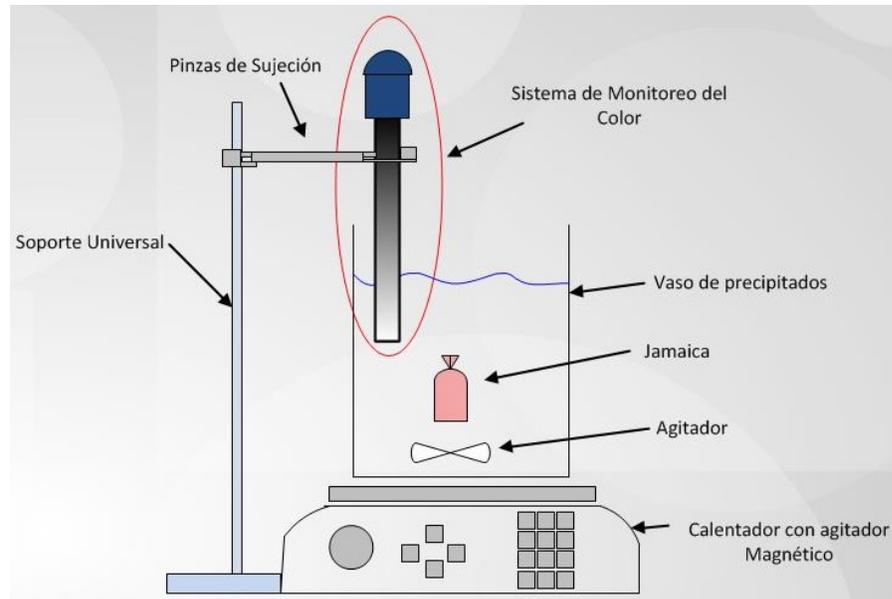


Figura 4.5: Proceso de extracción sólido-líquido a partir de la flor de jamaica.



# Capítulo 5

## Resultados

En la Figura 5.1 se puede observar el sistema INI-LAB desarrollado, capaz de medir las variables de color de líquidos en unidades  $L^*$ ,  $a^*$   $b^*$  dentro de un proceso. El sistema se compone de una sonda de monitoreo (hardware) y de una aplicación (software) que permite visualizar los resultados en una PC. La sonda de monitoreo se conecta mediante un cable USB 2.0 a una PC. Los resultados de la medición se despliegan en la pantalla de la PC: se observan las imágenes a color de las muestras y los valores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  en tiempo real que corresponde a la muestra observada.

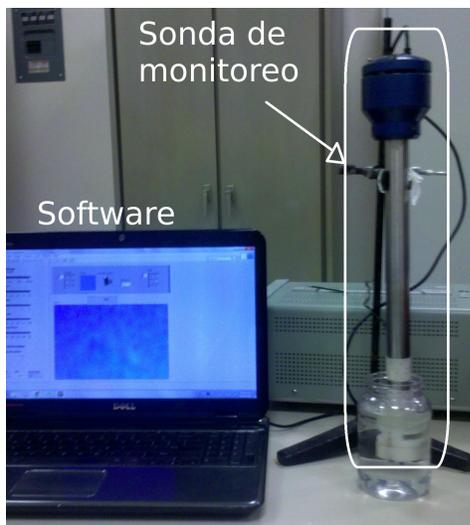


Figura 5.1: Sistema de monitoreo de color INI-LAB.

## 5.1. Correlación de datos RGB a $L^*a^*b^*$ usando el banco de muestras

A partir de las mediciones puntuales realizadas al banco de muestras de color (34 muestras) se obtuvo un conjunto de datos de color en línea (RGB obtenidos con la videocámara CCD) y fuera de línea ( $L^*a^*b^*$  obtenidos con el colorímetro HunterLab) con un amplio espectro de valores cromáticos ( $a^*$  y  $b^*$ ) y de luminosidad ( $L^*$ ).

Las mediciones al banco de 34 muestras aparecen en la Tabla J del Apéndice J. En esta tabla se enlistan 9 parámetros: 3 corresponden a las variables  $L^*a^*b^*$  que se midieron con el espectrofotómetro fuera de línea de HunterLab, 3 más se obtuvieron de convertir los datos anteriores a RGB utilizando la matriz de transformación del iluminante D65 2.6 que aparece en la literatura [21] y por lo cual se han llamado  $R_{D65}$ ,  $G_{D65}$  y  $B_{D65}$ . Y finalmente los otros 3 datos corresponden a los parámetros de RGB que se midieron en línea, con la cámara CCD y con un iluminante no estandarizado (LED blanco de alta luminosidad).

En la Figura 5.2 se observa el comportamiento de la componente R del banco de muestras. Para tal efecto, las muestras se organizaron en cinco grupos (verde, rojo, amarillo, azul y colores oscuros respectivamente). Haciendo una comparativa se observa que la componente R medida con la cámara es mucho menor que  $R_{D65}$ . Se podría pensar que sumándole una constante a la componente R medida con la cámara podría solucionar el problema, para así acercarse a la componente  $R_{D65}$ , pero también se observa que su comportamiento no es uniforme, si bien para las muestras de color verde pareciera que solo está a 50 unidades por debajo, para las muestras de color rojo, amarillo y azul su comportamiento es distinto. Para las componentes G y B se obtuvieron resultados similares, siempre estaban por debajo de las componentes  $G_{D65}$  y  $B_{D65}$  respectivamente y para cada tipo de color mostraban comportamientos diferentes.

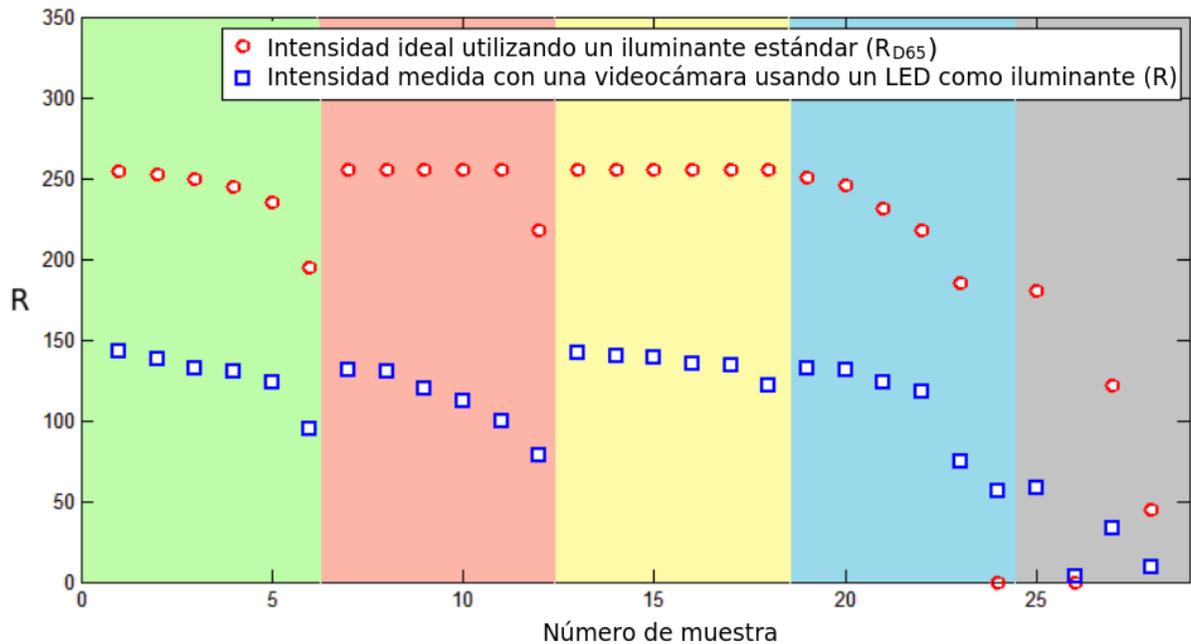


Figura 5.2: Comparativa del comportamiento de la componente R.

De lo anterior es evidente que no solo basta con hacer un ajuste, se debe de dar un tratamiento a los datos. Para ello fue necesario hacer una correlación de datos por distintos métodos. A partir de este momento se utilizarán los parámetros RGB que se miden con la videocámara CCD como datos de entrada, y los valores  $L^*a^*b^*$  que nos proporciona el espectrofotómetro en línea como datos deseados.

El tratamiento de los datos obtenidos del banco de muestras se realizó usando dos métodos de correlación: 1) matriz de corrección, la cual sustituye a la matriz de transformación estándar (iluminante D65); 2) correlación mediante el empleo de una RNA. Para probar de manera preliminar el sistema, se alimentaron tanto la matriz como la RNA con los valores RGB del banco de muestras y los resultados  $L^*a^*b^*$  de ambos métodos de correlación se compararon con los valores medidos en el equipo HunterLab. Para calcular los errores de los métodos de correlación (matriz de transformación y RNA) se tomó como el valor deseado los datos que arroja el colorímetro HunterLab, y como valor estimado los datos que arroja el sistema INI-LAB.

### 5.1.1. Implementación del método por matriz de corrección

Para el método de matriz de corrección se analizó el comportamiento de los valores de las componentes RGB: se observó que éstos se concentran en el rango de intensidades entre 80 y 180 (las intensidades de los valores de color en el espacio RGB van de 0 a 255). Para incrementar el rango observado se implementó una compensación gamma positiva<sup>1</sup> a los valores RGB. Experimentalmente se observó que con una compensación gamma de 1.8 los valores CIELAB obtenidos por la matriz de transformación eran más cercanos a los valores deseados (HunterLab) que sin la aplicación de la corrección. En la ecuación 5.1 se detallan las ganancias con las que se obtuvieron los mejores resultados de la matriz de corrección (M) que se emplea para determinar los valores XYZ, para posteriormente transformarlos a valores L\*a\*b.

$$M = \begin{pmatrix} 0,6524 & 0,0275 & 0,10 \\ 0,5096 & 0,4655 & 0,1072 \\ 0,040 & 0,0092 & 0,9505 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

### 5.1.2. Implementación del método RNA

Inicialmente se probó una arquitectura con 3 entradas (R, G y B), una capa con 9 neuronas ocultas y 3 salidas (L\*, a\*, b\*) en donde todas las neuronas de salida dependían de las neuronas de la capa oculta. El problema que presentó ésta arquitectura fue que los valores de las salidas no convergieron al mismo tiempo; es decir, cuando se disminuía el error de L\*, el error de a\* o b\* (o ambos) se incrementaba. Para lograr que las tres salidas tuvieran errores pequeños era necesario aumentar el número de neuronas; sin embargo, esto causaba que la RNA perdiera capacidad de generalización. Para solucionar este problema las conexiones entre las neuronas ocultas y las salidas se realizaron por separado; es decir, se realizaron conexiones de tal manera que cada salida solo estuviera conectada a 2 neuronas ocultas, y estas últimas interconectadas a las 3 neuronas de entrada (ver Figura 5.3). Esta arquitectura no presentó problemas de convergencia para

---

<sup>1</sup> $V_{new} = 255 * \left(\frac{V_{old}}{255}\right)^{\left(\frac{1}{gamma}\right)}$ .

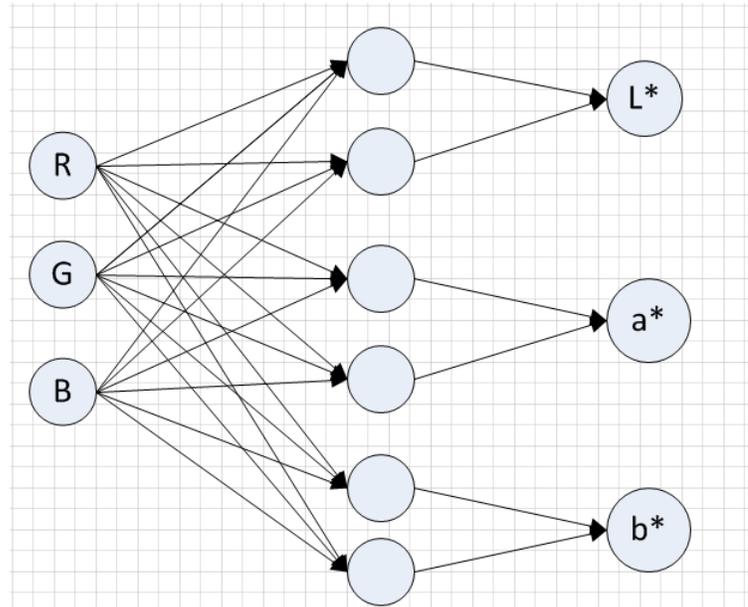


Figura 5.3: Arquitectura que presentó los mejores resultados.

la minimización del error, ni tampoco la reducción en la capacidad de generalización de la RNA. Mediante experimentos y casos de éxito se ha probado en la literatura que un sistema de 3 entradas y 1 salida, alcanza la máxima generalidad con 1 capa de 2 neuronas ocultas [30, 32, 20]. En la Figura 5.4 se observa la arquitectura de la RNA que obtuvo los mejores resultados.

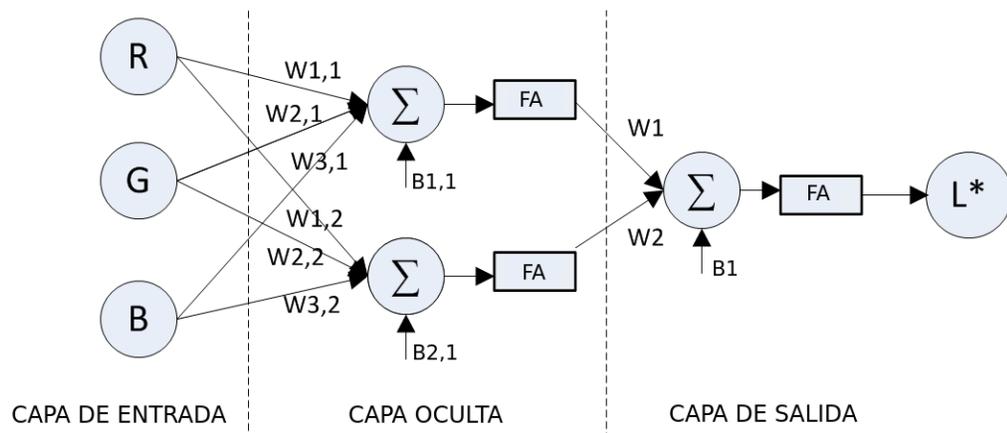


Figura 5.4: Diagrama de los componentes de la arquitectura utilizada para la componente  $L^*$ .

A continuación se enuncian los pesos ( $W1, W2, W1,1, W2,1, W3,1, W1,2, W2,3, W3,2$ ) y sesgos ( $B1, B1,1, B2,1$ ) en forma de matrices (ecuaciones 5.2-5.13) con los cuales se obtuvieron los mejores resultados, de acuerdo a las simulaciones realizadas con el software *MATLAB*®.

Matrices para la salida L\*

$$W_o = \begin{pmatrix} W1,1 & W2,1 & W3,1 \\ W1,2 & W2,2 & W3,2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,060658 & -0,74769 & -0,17247 \\ 1,9642 & 2,1892 & 0,59549 \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

$$W_s = (W1 \ W2) = (-4,588 \ 3,1544) \quad (5.3)$$

$$b_o = \begin{pmatrix} B1,1 \\ B2,1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,1936 \\ 4,6193 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

$$b_s = (B1) = (1,3051) \quad (5.5)$$

Matrices para la salida a\*

$$W_o = \begin{pmatrix} W1,1 & W2,1 & W3,1 \\ W1,2 & W2,2 & W3,2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,95216 & -0,635770,050395 \\ 1,7518 & -1,0911 & -1,0253 \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

$$W_s = (W1 \ W2) = (2,9162 \ 0,93886) \quad (5.7)$$

$$b_o = \begin{pmatrix} B1,1 \\ B2,1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,84627 \\ -1,1654 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

$$b_s = (B1) = (-0,91356) \quad (5.9)$$

Matrices para la salida  $b^*$

$$W_o = \begin{pmatrix} W_{1,1} & W_{2,1} & W_{3,1} \\ W_{1,2} & W_{2,2} & W_{3,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,3093 & -0,6587 & 0,72963 \\ -0,45197 & -0,4359 & 2,6201 \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

$$W_s = (W1 \quad W2) = (-1,2254 \quad -1,3718] \quad (5.11)$$

$$b_o = \begin{pmatrix} B_{1,1} \\ B_{2,1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,85817 \\ 2,9586 \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

$$b_s = (B1) = (0,46371) \quad (5.13)$$

Donde  $W_o$  es el peso de la matriz oculta,  $W_s$  es el peso de la matriz de salida,  $b_o$  es el sesgo de la matriz oculta,  $b_s$  es el sesgo de la matriz de salida.

## 5.2. Comparativa de métodos de correlación

Haciendo una comparativa con los resultados obtenidos del banco de muestra, la matriz de corrección tuvo una diferencia de color<sup>2</sup>  $\Delta E=11.7$ , es decir una diferencia en luminancia  $\Delta L^*=2.35$ , y en cromaticidad  $\Delta a^*=7.58$  y  $\Delta b^*=8.64$ , mientras tanto la RNA tuvo mejores resultados teniendo un coeficiente de diferencia de color  $\Delta E=5.3$ , es decir  $\Delta L^* = 1.52$ ,  $\Delta a^* = 2.9$  y  $\Delta b^* = 4.2$ . En la Figura 5.5 se muestra el comportamiento de la componente  $L^*$  en línea y fuera de línea (las componentes  $a^*$  y  $b^*$  tuvieron comportamientos similares).

Como era de esperarse los resultados de la etapa de entrenamiento de la red neuronal arrojaron de manera general resultados muy cercanos entre los valores del sistema

<sup>2</sup> La diferencia de color  $\Delta E$  hace referencia a la distancia euclidiana de los valores medidos de forma off-line (con un espectrofotómetro) e in-line (con el sistema INI-LAB) con la siguiente fórmula  $\Delta E = \sqrt{(L^*_{off} - L^*_{in})^2 + (a^*_{off} - a^*_{in})^2 + (b^*_{off} - b^*_{in})^2}$

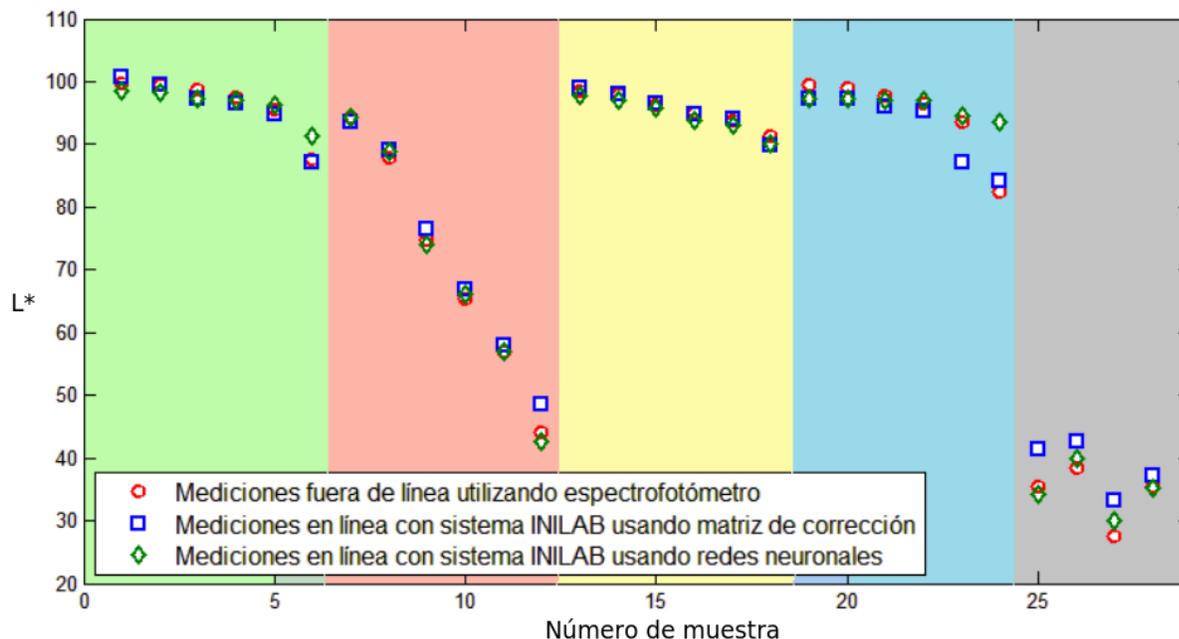


Figura 5.5: Comportamiento de la componente  $L^*$  del banco de muestras.

fuera de línea y el sistema en línea (Figura 5.5). La capacidad de generalización de la red se observará al comparar las mediciones con colores que no fue entrenada la red, como lo es el caso de la determinación del de las bebidas comerciales y el monitoreo en línea de un proceso de extracción a sólido-líquido de jamaica que se describen en las secciones siguientes.

### 5.3. Análisis de sensibilidad del dispositivo

Se comparó la sensibilidad y repetitividad del sistema INI-LAB con el colorímetro HunterLab. En la Tabla 5.1 se observa que el coeficiente de variación ( $C_v$ ) es muy bajo en ambos dispositivos, tanto para las mediciones con calibración intermedia y las mediciones continuas. El equipo INI-LAB tuvo una alta precisión para medir el color con calibraciones intermedias ( $C_v < 0.7\%$ ) y con mediciones continuas ( $C_v < 0.1\%$ ). La precisión del equipo INI-LAB es relativamente menor con la obtenida con el equipo HunterLab; sin embargo, se puede considerar que la precisión del equipo desarrollado en este trabajo es aceptable para medir el color en procesos in situ y en tiempo real.

Tabla 5.1: Precisión de las mediciones del color realizadas a una misma muestra usando diferentes modos de medición.

Dispositivo	Método	Coeficiente de variación (Cv, %)		
		L*	a*	b*
HunteLab	Calibración intermedia	0.195	0.014	0.160
	Medición continua	0.023	0.011	0.055
INI-LAB	Calibración intermedia	0.614	0.206	0.371
	Medición continua	0.096	0.034	0.047

## 5.4. Validación de las bebidas comerciales

En la Figura 5.6 se muestran ordenadas de forma ascendente, la diferencia de color  $\Delta E$ , entre los valores  $L^*a^*b^*$  medidos con el colorímetro HunterLab y los valores estimados con el sistema INI-LAB para las 19 bebidas comerciales. Se reportan las diferencias de color para ambas correlaciones: RNAs y matriz de corrección.

Las muestras traslucidas (M1-M11) tuvieron valores de diferencia de color  $\Delta E$ , menores o cercanos a 20. Estas diferencias se pueden considerar como adecuadas, considerando que la RNA y la matriz de corrección no fueron ajustados con esos colores e intensidades de color. Las muestras M1-M6 (muestras totalmente traslucidas) tuvieron una diferencia de color baja ( $\Delta E < 10$ ). Los resultados con mayores  $\Delta E$  los obtuvieron las muestras opacas (M12-M19). Estas muestras contienen componentes que le dan turbidez a las bebidas, que provocan que la luz sea transmitida sólo de manera parcial a través de la muestra.

El efecto antes mencionado causó que los valores de  $L^*$  para estas muestras (M12-M19) fueran extremadamente bajos (datos mostrados en discusión posterior), cuando a

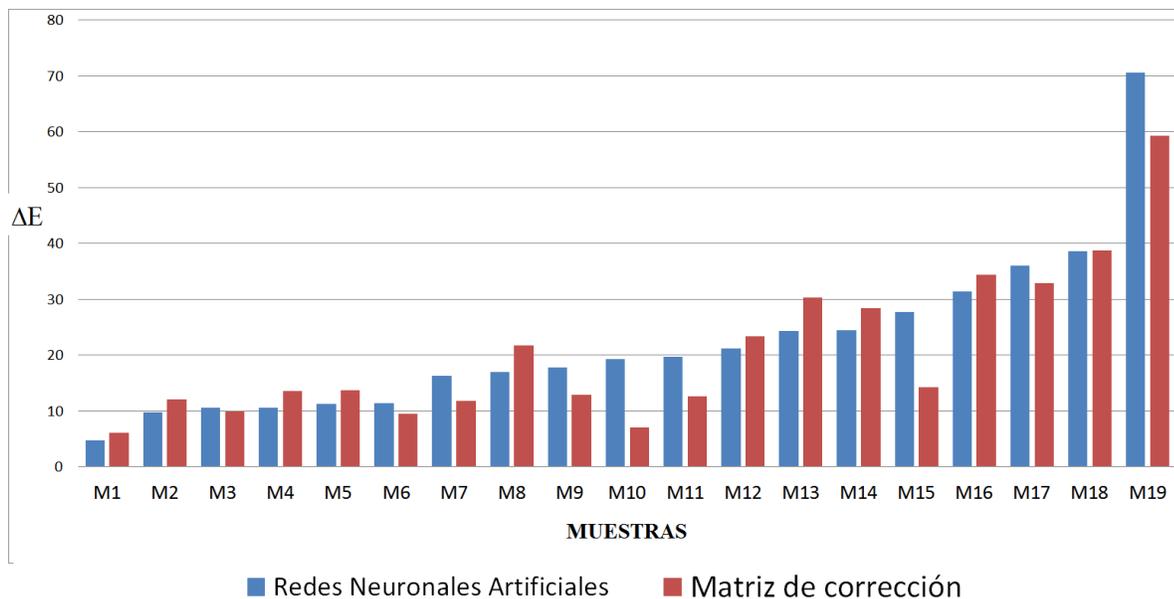


Figura 5.6: Diferencia de color  $\Delta E$  entre mediciones en línea y fuera de línea realizadas a las muestras comerciales.

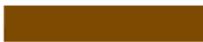
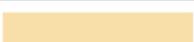
simple vista se puede observar que las muestras son claras (para las muestras claras se esperan valores altos de  $L^*$ ). Estas diferencias de  $L^*$  se vieron reflejadas en un aumento considerable de  $\Delta L^*$  para las muestras con alta opacidad; por el contrario, de manera general los valores de  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$  no se ven afectados tan considerablemente.

Las ganancias de la red neuronal y de la matriz de corrección se determinaron utilizando muestras traslucidas y las mediciones del equipo HunterLab ( $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ) se realizaron en modo de transmitancia. Se pudo observar que la opacidad de las muestras causaron que las mediciones realizadas con el colorímetro HunterLab fueran mucho más oscuras (bajos niveles de  $L^*$ ) que las estimadas con el sistema INI-LAB. Considerando lo anterior se hizo un análisis más detallado sobre los valores de color de las muestras opacas.

Por ejemplo, la muestra número 19 a simple vista es de color amarilla, por lo tanto, se espera un valor de  $L^*$  alto; sin embargo, la componente  $L^*$  medida con el equipo HunterLab fue de 12.0 (ver Tabla 5.2), valor que corresponde a un color oscuro. Por otro lado, el valor de  $L^*$  estimado con el sistema INI-LAB fue de 61.8, valor que es mucho más

cercano al que visualmente corresponde a la muestra. Resultados similares se obtuvieron para las muestras opacas restantes. Se puede observar que para la medición del color de muestras opacas, los mejores resultados (los valores más apegados a la realidad) se obtuvieron con el sistema INI-LAB. Asimismo, el análisis demostró que el colorímetro HunterLab tiene limitaciones importantes para la medición de muestras opacas.

Tabla 5.2: Comparativa de mediciones de muestras opacas

MUESTRA	PRODUCTO	HUNTERLAB	INI-LAB (RNA)	INI-LAB (MATRIZ)
M19		 L*=12 a*= 11.8 b*=19.7	 L*= 61.8 a*= 15.1 b*=69.7	 L*=55.1 a*=-0.98 b*=15.0
M18		 L*=34.4 a*= 18.6 b*= 30.6	 L*=72.1 a*= 17.8 b*=21.9	 L*=67.7 a*=3.29 b*=46.8
M17		 L*= 36.2 a*= 16.1 b*=49.9	 L*=71.3 a*= 12.1 b*=56.9	 L*=66.3 a*=18.3 b*=10.8
M16		 L*= 58.4 a*= 2.9 b*=33.0	 L*= 89.5 a*=1.1 b*=29.3	 L*=87.6 a*=4.96 b*=59.6

En la Tabla 5.2 se observan bloques de color, estos se obtuvieron utilizando un algoritmo computacional [14] el cual se alimenta con valores  $L^*a^*b^*$  y el programa muestra el color que corresponde a esas coordenadas. Los resultados más lógicos los entrega el sistema INI-LAB utilizando RNA, y es evidente que el espectrofotómetro comercial tiene una limitante para la medición de este tipo de muestras.



Figura 5.7: Bebidas comerciales. Muestra M2, M3, M4, M5 y M8 respectivamente.

Adicionalmente, se probó la capacidad del sistema INI-LAB para distinguir el color de muestras semejantes (Figura 5.7) utilizando tres muestras comerciales de manzana de diferente marca, una de tamarindo y una de té verde. En la Tabla 5.3 se en listan las mediciones realizadas por el sistema INI-LAB (utilizando RNA). Como se puede apreciar, es posible diferenciar todas las muestras a partir de los datos proporcionados por el sistema INI-LAB. Al observar las muestras más parecidas M8 y M4 resulta difícil distinguirlas al verlas incluso una al lado de la otra sin embargo, al realizar la comparación con los datos arrojados por el sistema INI-LAB, se observan que los intervalos de confianza de los parámetros  $L^*$  y  $a^*$  se traslapan; pero no así el intervalo del parámetro  $b^*$  (Tabla 5.3).

Tabla 5.3: Comparativa de mediciones de muestras similares.

Muestra	INI-LAB		
	(Media $\pm$ intervalo de confianza (99 %))		
M2	$L^* = 95.7 \pm 0.30$	$a^* = 9.1 \pm 0.31$	$b^* = 15.0 \pm 0.30$
M3	$L^* = 91.8 \pm 0.31$	$a^* = 14.1 \pm 0.31$	$b^* = 26.4 \pm 0.30$
M4	$L^* = 90.7 \pm 0.31$	$a^* = 12.1 \pm 0.31$	$b^* = 30.2 \pm 0.31$
M8	$L^* = 89.9 \pm 0.30$	$a^* = 11.4 \pm 0.30$	$b^* = 22.3 \pm 0.30$
M5	$L^* = 88.7 \pm 0.29$	$a^* = 13.8 \pm 0.30$	$b^* = 33.9 \pm 0.30$

## 5.5. Validación extracción sólido-líquido de la flor de jamaica

Se compararon los resultados del monitoreo del color en línea (INI-LAB) y las mediciones fuera de línea (HunterLab) durante la extracción de color a partir de flor de jamaica a 40 °C (Figuras 5.8, 5.9 y 5.10).

La correlación de RNA empleada en el sistema en línea INI-LAB para estimar los valores CIELAB tienen una diferencia de color promedio  $\Delta E$  de 4.58 (diferencias promedio de  $\Delta L^*=1.94$ ,  $\Delta a^*=1.89$  y  $\Delta b^*=3.7$ ), mientras tanto la matriz de corrección tiene una diferencia de color promedio de  $\Delta E= 6.9$  (diferencias promedio de  $\Delta L^*=3.14$ ,  $\Delta a^*=2.85$  y  $\Delta b^*=5.44$ ). Las diferencias más pequeñas se obtuvieron para el parámetro  $L^*$ , seguidas de  $a^*$  y se pueden considerar como aceptables (Figuras 5.8 y 5.9). La mayor diferencia se detectó para la componente  $b^*$ , correspondiente a los colores en la escala amarillo-azul (Figura 5.10).

Por otra parte, se puede observar en la Figura 5.9, que la estimación de la componente  $a^*$  mediante el sistema en línea fue más precisa después del minuto 3. Esto se debe a que después de este tiempo de proceso, el color se distribuyó de manera homogénea en todo el tanque, a diferencia de lo sucedido al arranque de la extracción. Durante el comienzo de la extracción, la pigmentación se concentró alrededor de la bolsa que contiene a la jamaica (Figura 5.11). Esto evidencia que el sistema en línea provee información más confiable de los cambios de color durante el desarrollo de procesos en comparación con los sistemas fuera de línea.

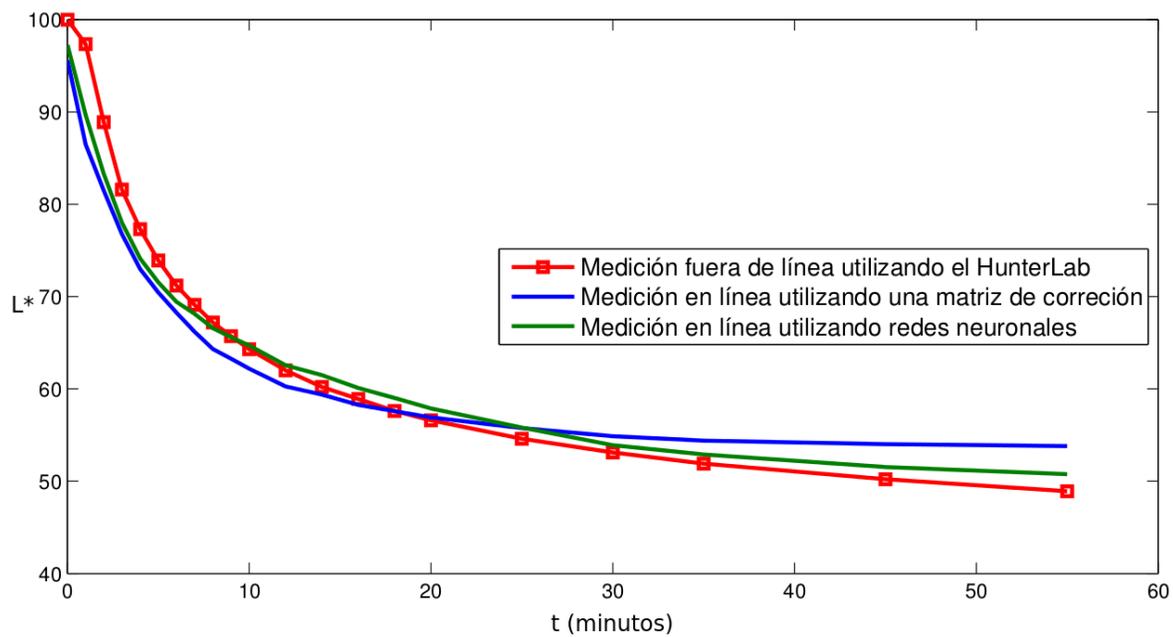


Figura 5.8: Comportamiento de la componente  $L^*$  durante el monitoreo del proceso de extracción de jamaica.

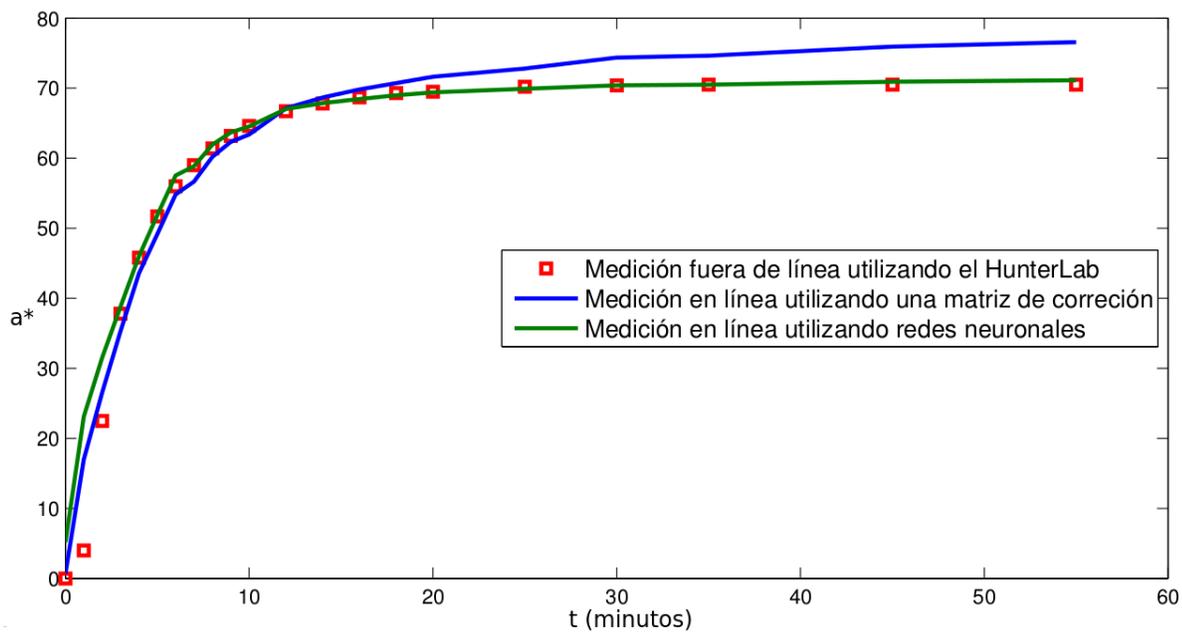


Figura 5.9: Comportamiento de la componente  $a^*$  durante el monitoreo del proceso de extracción de jamaica.

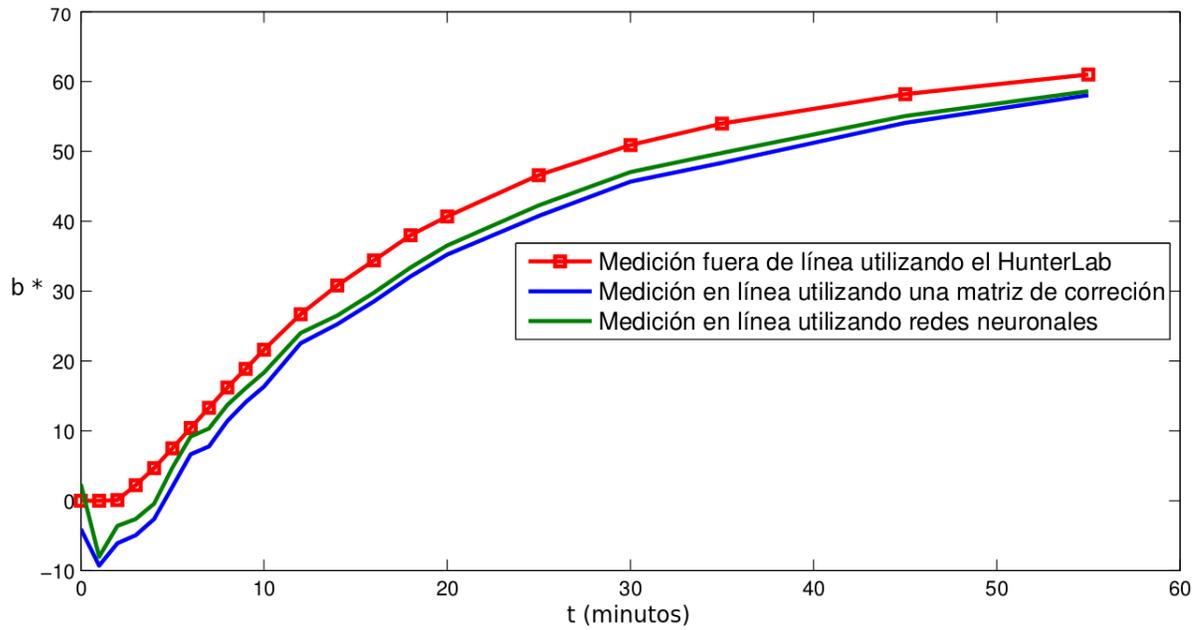


Figura 5.10: Comportamiento de la componente  $b^*$  durante el monitoreo del proceso de extracción de jamaica.

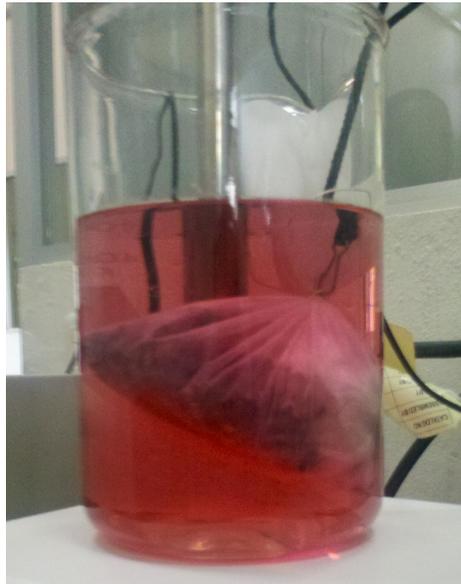


Figura 5.11: Evolución del color del proceso de extracción de la jamaica.

## 5.6. Cinéticas de extracción sólido-líquido de flor de jamaica en función de la temperatura

El sistema INI-LAB se puede utilizar para monitorear un proceso en tiempo real con intervalos de tiempo de hasta 4 mediciones por segundo. Se utilizó el sistema INI-LAB para monitorear la cinética de extracción de compuestos coloridos a partir de flor de jamaica en función de la temperatura. Se probaron temperaturas de 23, 30, 40, 50 y 60 °C  $\pm$  1°C. Al realizar el análisis de los datos se determinó que el parámetro de color que mejor se correlacionaba con la temperatura era  $L^*$  (Figura 5.12).

Esta prueba ayudó a demostrar experimentalmente la potencialidad del sistema INI-LAB para el monitoreo en línea de procesos con cambios rápidos de color.

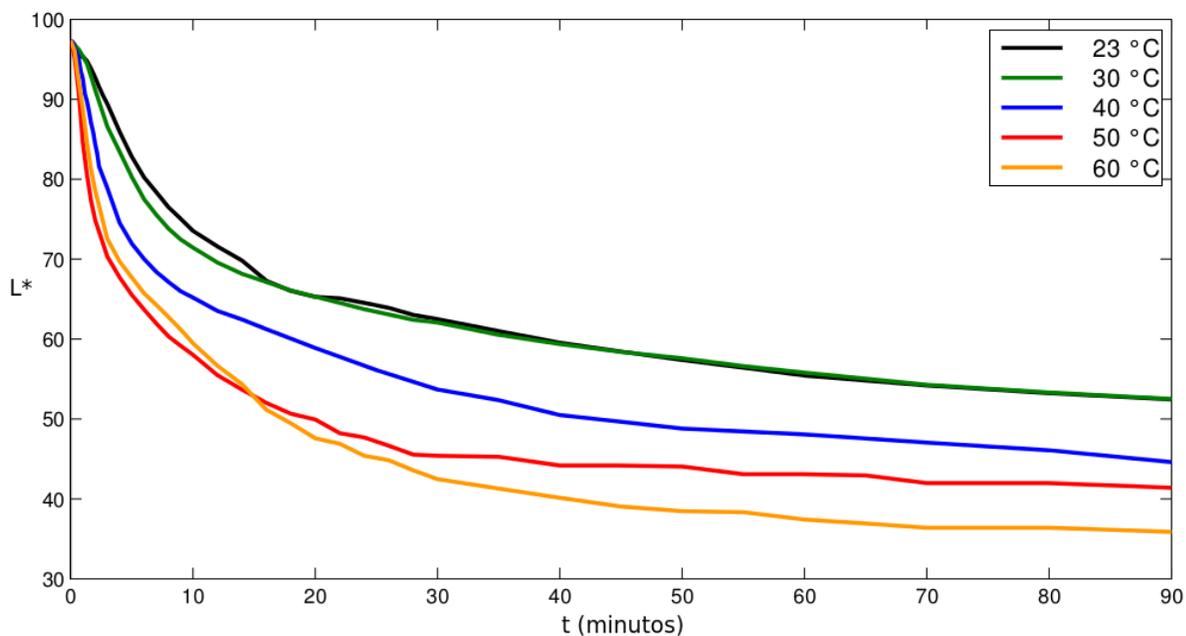


Figura 5.12: Evolución de la componente  $L^*$  durante el proceso de extracción de jamaica a diferentes temperaturas.

## 5.7. Otros resultados interesantes

En el capítulo 3 de esta tesis se detalló el desarrollo del concepto de diseño, también se hizo referencia al cálculo de las dimensiones de la escena a observar ( $0.75 \text{ mm}^2$ ). Los beneficios de tener un área de estas dimensiones y utilizar una cámara son dos:

1) A diferencia de los sistemas tradicionales, el sistema INI-LAB no es un sistema puntual, es decir, determina los valores RGB de  $1024 \times 768$  puntos uniformemente distribuidos sobre la superficie muestreada. Por lo tanto, es posible determinar la distribución de color de la zona muestreada, y su grado de uniformidad en el espacio de color CIELAB.

2) Si bien el propósito de esta tesis es el monitoreo de color, el equipo también fue diseñado para observar micropartículas. La escena de enfoque de  $0.75 \text{ mm}^2$  visualiza una imagen de  $1024 \times 768$  píxeles. La Figura 5.13 muestra la imagen de un cabello humano de aproximadamente  $0.08 \text{ mm}$  de diámetro adquirida con la sonda, utilizando iluminación frontal. La imagen observada se ha sido magnificada 4.6 veces, por la relación de distancia entre el sensor, la lente y la imagen a observar.

Para adquirir imágenes en las que se observen de manera clara y nítida los detalles de las micro-partículas es importante utilizar el tipo de iluminación que sea más apropiado de acuerdo a la naturaleza de dichas micro-partículas, así como el color del fondo.

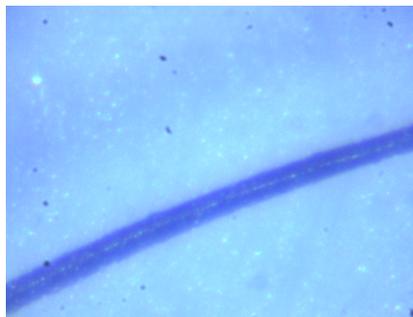


Figura 5.13: Imagen de un cabello humano observado por el sistema INI-LAB.



# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajo futuro

En este capítulo se presentan las conclusiones sobre el desarrollo del sistema de monitoreo de color INI-LAB y de su aplicación a un sistema de extracción de flor de jamaica. También se describen los trabajos futuros recomendados para la mejora del desarrollo actual.

### 6.1. Conclusiones

- Usando una cámara CCD y algoritmos de Redes Neuronales Artificiales (RNA) se diseñó y construyó un sistema de monitoreo de color, INI-LAB, capaz de estimar los parámetros de color CIELab de procesos in situ, en línea y en tiempo real.
- El sistema tuvo una precisión aceptable ( $\Delta E < 20$ ) con respecto a las mediciones realizadas con el colorímetro de laboratorio (HunterLab), para la estimación del color de bebidas comerciales translúcidas con un amplio rango de colores. El sistema de monitoreo fue sensible en el rango de las concentraciones de colorante empleadas (6-600 mg/L).
- Se obtuvo una alta precisión para medir el color ( $Cv_{max} < 0,7\%$ ). Debido a su alta precisión, el sistema fue capaz de distinguir los parámetros de color CIELAB de muestras parecidas con un intervalo de confianzas del 99 %.
- Se aplicó el sistema de medición para el monitoreo del color durante el proceso de

extracción de flor de jamaica, obteniendo una diferencia de color ( $\Delta E$ ) de 4.6 con respecto al equipo de medición fuera de línea HunterLab.

- Se demostró la capacidad del equipo para obtener cinéticas de la extracción de compuestos coloridos a partir de jamaica en función de la temperatura. Este trabajo ayudó a mostrar la potencialidad del sistema INI-LAB para el monitoreo en línea de cambios rápidos en el color en procesos industriales.

## 6.2. Trabajo futuro

- Ampliar el número de muestras del banco de muestras que se utiliza para entrenar el sistema.
- Desarrollar un nuevo diseño de la sonda. El nuevo diseño debe incorporar en su interior todos los elementos, el sistema de iluminación difusa y a contraluz y el sistema de reducción de flujo. Este último también deberá de ser de acero inoxidable.
- Utilizar más LEDs en la iluminación a contraluz, para tener un sistema de iluminación completamente blanco (tener un espectro parecido al D65).
- Mejorar la interfaz, para que desde ella se controle la iluminación difusa y a contraluz, con el propósito de tener una fuente de luz confiable.
- Incorporar un algoritmo para determinar el tamaño y forma de micropartículas.
- Extender la aplicación para determinar los valores  $L^*a^*b^*$  de cada pixel en la escena a muestrear.
- Optimizar los parámetros de la matriz de correlación mediante un método iterativo de optimización.

# Bibliografía

- [1] Análisis no destructivo: instrumentos y técnicas para las salvaguardias del organismo. Website, 2014. [http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull195/Spanish/19503403437\\_es.pdf](http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull195/Spanish/19503403437_es.pdf).
- [2] Automatización y control en la industria de alimentos y bebidas. Website, 2014. <http://www.edigarnet.com/noticias/noticiamuestra.asp?Id=2885>.
- [3] Equipos de inspección de color para productos. Website, 2014. <http://www.segman.com/colorlite.html>.
- [4] Particle System Characterization Mettler Toledo. Website, 2014. [http://us.mt.com/us/en/home/products/L1\\_AutochemProducts/FBRM-PVM-Particle-System-Characterization.html](http://us.mt.com/us/en/home/products/L1_AutochemProducts/FBRM-PVM-Particle-System-Characterization.html).
- [5] RGB Color Space Conversion. Website, 2014. <http://www.ryanjuckett.com/programming/rgb-color-space-conversion/>.
- [6] Mark Azam, Jan-Chistoph Haag, y Peter Jeschke. Application Concept of Artificial Neural Networks for Turbomachinery Design. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 16:143–160, 2009.
- [7] Xabier Basogain-Olabé. Redes Neuronales Artificiales y sus aplicaciones. Website, 2014. [http://cvb.ehu.es/open\\_course\\_ware/castellano/tecnicas/redes\\_neuro/contenidos/pdf/libro-del-curso.pdf](http://cvb.ehu.es/open_course_ware/castellano/tecnicas/redes_neuro/contenidos/pdf/libro-del-curso.pdf).
- [8] S. Beutel y S. Henkel. In situ sensors techniques in modern bioprocess monitoring. *Applied Microbiology Biotechnology*, 91(6):1493–1505, 2011.

- [9] A. Bluma, T. Höpfner, P. Lindner, C. Rehbock, S. Beutel, D. Riechers, Bernd Hitzmann, y Thomas Scheper. In-situ imaging sensors for bioprocess monitoring : state of art. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 398(6):2429–2438, November 2010.
- [10] T. Brosnam y D. Sun. Improving quality inspection of food products by computer vision. *Journal of Food Engineering*, 39(10):3–16, 2004.
- [11] R. Carballo. Redes Neuronales. Website, 2014. [http://personales.unican.es/carballor/TercerCiclo/curso\\_10\\_11\\_tercera\\_parte.pdf](http://personales.unican.es/carballor/TercerCiclo/curso_10_11_tercera_parte.pdf).
- [12] M. Corbalán. Sistema de visión por computador para control industrial. Website, 2014. <http://www.jcee.upc.edu/JCEE2001/PDFs%202000/12CORBALAN.pdf>.
- [13] Arturo De la Escalera Hueso. *Visión por computador, fundamentos y métodos*. Editorial Practice Hall, 3a edition, 2001.
- [14] EasyRGB. Color Calculator. Website, 2014. <http://www.easyrgb.com/index.php?X=CALC>.
- [15] James A Freeman y James M. Skapura. *Neural Networks Algorithms, Applications and Programming Techniques*. Edison-Wesley, 1991.
- [16] Marcos Gestal Pose. Introducción a las redes neuronales. Website, 2014. <http://www.ryanjuckett.com/programming/r>.
- [17] Koivo Heikki N. Neural Network. Website, 2014. [http://www.baskent.edu.tr/~herdem/downloads/EEM654/ders\\_notlari/Neural\\_networks\\_basics\\_matlab\\_.pdf](http://www.baskent.edu.tr/~herdem/downloads/EEM654/ders_notlari/Neural_networks_basics_matlab_.pdf).
- [18] Carlos Herranz-Dorremochea. La iluminación con led y el problema de la contaminación lumínica. Website, 2014. <http://www.celfosc.org/biblio/general/herranz-olle-jauregui2011.pdf>.
- [19] Horng Jui-Hong. Hybrid MATLAB and LabVIEW with neural network to implement a SCADA system of AC servo motor. *Advances in Engineering Software*, 39:149–155, 2008.

- [20] Steve Laurence, C. Lee Giles, y Ah Chung Tsoi. What Size neural network gives optimal generalization? convergence properties of backpropagation. *Technical Report, University of Maryland, Computer Science Department (UMIACS-TR-96-22)*, 1998.
- [21] Katherine León, Domingo Mary, y Jorge León. Color measurement in L\*a\*b\* units from RGB digital images. *Food Reserch International, Elsevier*, 39(10):1084–1089, 2006.
- [22] O. Levenspiel. *Ingeniería de las reacciones químicas*. Editorial Reverté, S.A, 3a edition, 2004.
- [23] Yoandrys Morales-Tamayo, Roberto Pérez-Rodríguez, y Patricia Zambrano-Robledo. Comportamiento del desgaste del flanco en el torneado en seco de alta velocidad del acero AISI 316L. *Ingeniería Mecánica*, 16(3):238–245, 2013.
- [24] Miguel G. Ochoa-Neira. Producción de jamaica en México. Website, 2014. <http://eleconomista.com.mx/columnas/agro-negocios/2013/03/06/produccion-jamaica-mexico>.
- [25] Chistopher S. Robertson-Gilmore. In-line color monitoring of polymers during extrusion using a charge couple device spectrometer. Master's thesis, University of Canada, Toronto, Canada, 2000.
- [26] Gerardo Rodríguez. *Manual de Diseño Industrial*. 3a edition, 1994.
- [27] Mohamed A. Shahin, Mark B. Jaksa, y Holger R. Maier. Forecasting with Neural Networks:The State of The Art. *ELSEVIER science: International Journal Of Forecasting*, 14:35–62, 1998.
- [28] Mohamed A. Shahin, Mark B. Jaksa, y Holger R. Maier. State of The Art of Artificial Nueral Networks in Geotechnical Engineering. *Electronic Journal in Geotechnical Engineering*, 2008.
- [29] Thorlabs. DCU223C. Website, 2014. <http://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=DCU223C>.

- 
- [30] O. Timothy. *Practical neural network recipes in C++*. Editorial Reverté, S.A, 1993.
- [31] Rogelio Valadez-Blanco, A. Viridi, y S.T. Balke. In-line colour monitoring during food extrusion: Sensitivity and correlation with product color. *Food Reserch International, Elsevier*, 40(9):1129–1139, 2007.
- [32] Xiao-Hu Yu. Can backpropagation error surface not have local minima. *Neural Networks, IEEE Transactions on Neural Networks*, 3:1019–1021, 1992.
- [33] Ramón J. Zaragoza-Cardells. Iluminación con leds blancos. Website, 2014. <http://www.espeleomalaga.com/ges/index.php/apuntes-tcnicos-mainmenu-66/150-iluminacin-con-leds-blancos>.
- [34] Ahmed S. Zidan, Ziyaur Rahman, y Mansoor A. Khan. Online monitoring of PLGA Microparticles Formation Using Lasentec Focused Beam Reflectance (FBRM) and Particle Video Microscope (PVM). *The AAPS Journal*, 12(3):254–262, September 2011.

# Apéndice A

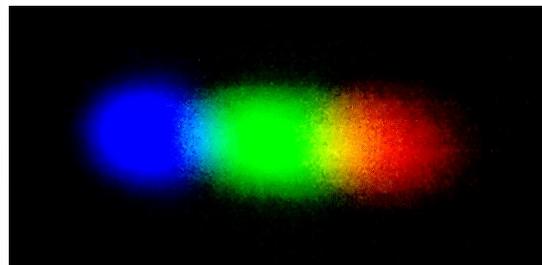
## Espectro de emisión de los LEDs blancos de alta luminosidad

La figura [A.1a](#) muestra un sistema de rejillas utilizado para descomponer la luz emitida por los LED's, y en la Figura [A.1b](#) se observa la luz que se dispersó en las longitudes de onda de los diferentes colores que componen la luz blanca de los LEDs.

En la Figura [A.2a](#) se observa la medición del espectro de la luz emitida con un espectrofotómetro comercial Compact Spectrometer 467 251. En la Figura [A.2b](#) se observa en la gráfica las intensidades de cada longitud de onda que compone la Luz blanca del LED.



(a) Sistema de rejillas

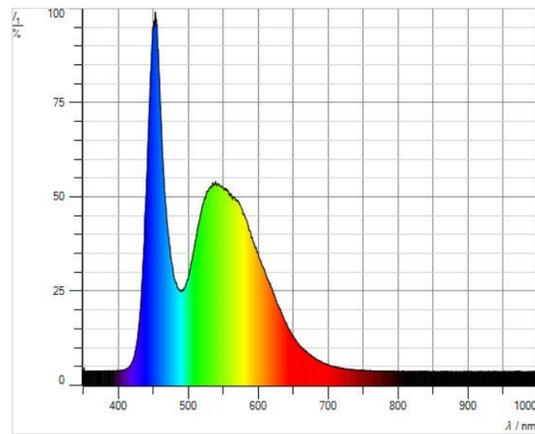


(b) Descomposición de la luz al atravesar las rejillas utilizando un sistema de rejillas

Figura A.1: Pruebas de iluminación del LED blanco de alta luminosidad



(a) Medición con el espectrofotómetro



(b) Resultados de la medición con el espectrofotómetro

Figura A.2: Pruebas de iluminación del LED blanco de alta luminosidad utilizando un espectrofotómetro comercial

# Apéndice B

## Instalación

### B.1. Requerimientos

Para poder hacer uso del sistema INI-LAB en una computadora, esta tendrá que tener características mínimas:

- Windows 7.
- Puerto USB 2.0.
- 10 GB de espacio libre para poder almacenar la información (las imágenes y los archivos .xlsx).
- Velocidad del disco duro a 2.8 GHz.
- Memoria RAM de 512 MB.

Se necesita instalar previamente los siguientes softwares y módulos en el siguiente orden:

- LabVIEW 2013.
- Módulo NI Vision.
- Módulo MathScript RT.
- THORLABS DCx versión 4.2.

Instalar LabVIEW 2013 (Figura B.1). Este es el software en donde se ejecutará la interfaz desarrollada del sistema INI-LAB.



Figura B.1: Ventana de instalación de LabVIEW 2013

Instalar módulo NI Vision. Es el complemento que contiene bibliotecas de procesamiento de imágenes y de visión artificial.

Instalar el módulo MathScript RT. Es el complemento para poder acoplar código de *Matlab*®.

Para corroborar que ha instalado adecuadamente el software LabVIEW con el módulos de Visión y el módulo MathScript RT, en la ventana de inicio de LabVIEW se observan dos imágenes, una cámara (la cámara corresponde al módulo de visión) y un recuadro que dice  $y=f(x)$  (que corresponde al módulos MathScript RT), tal como se aprecia en la Figura B.2.

Instalar el software THORLABS DCx versión 4.2. Nota: es importante que sea esta versión, de lo contrario no se podrán abrir los VIs que trae de ejemplo para LabVIEW.



Figura B.2: Ventana de inicio de LabVIEW 2013

En la Figura B.3 se aprecia la ventana de instalación del software THORLABS.



Figura B.3: Ventana de instalación de THORLABS

## B.2. Pruebas de compatibilidad

Conectar la cámara a la computadora mediante el cable de datos USB 2.0, la computadora detectara el dispositivo e instalará sus drivers. A continuación la cámara encenderá un LED de color rojo, que posteriormente cambia a verde. Si esto ocurre es señal que el software THOTLABS DCx versión 4.2 se instaló de manera adecuada. En la Figura B.4 se observa el LED de la cámara CCD.

Abrir la interfaz de LabVIEW y abrir el programa INI-LAB para checar que todo



Figura B.4: Cámara CDU223C vista posterior

el sistema en general está funcionando adecuadamente. En el programa existe el botón de RUN (es una flecha hacia la derecha) que debe de estar completamente construida, si eso no ocurre se deberá de checar los pasos de la instalación pues quiere decir que algo anda mal. Debe de verse tal como se muestra en la figura B.5

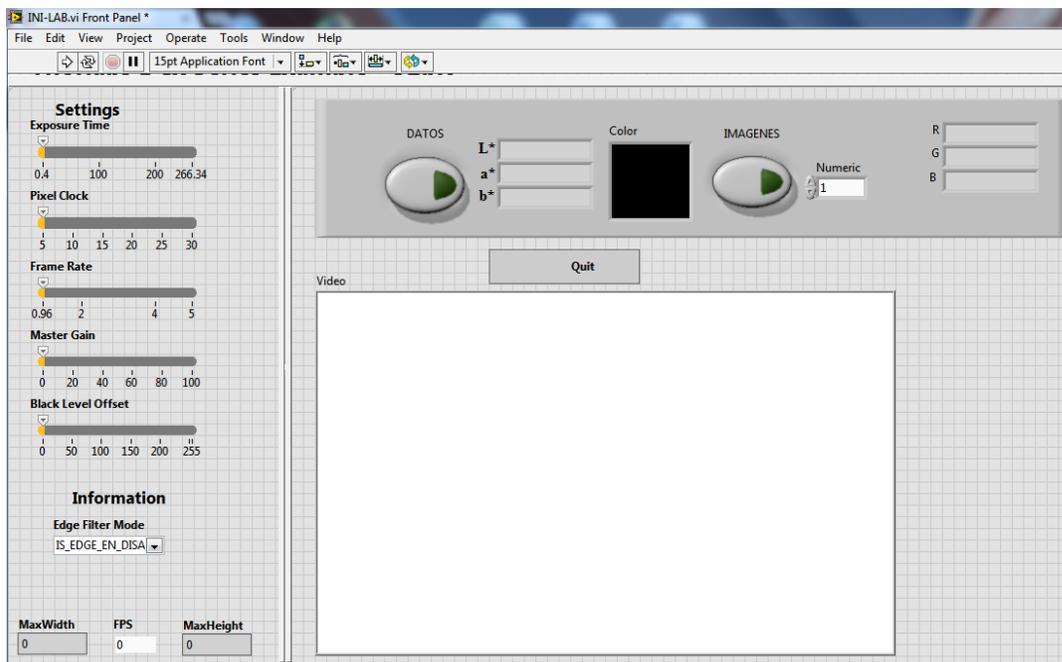


Figura B.5: Correcta visualización de la interfaz del sistema INI-LAB

# Apéndice C

## Entrenando redes neuronales en Matlab 2013 A

Para el entrenamiento de la red Neuronal Artificial que se implementó en este trabajo de tesis se utilizó la herramienta de *nntool*. A continuación de manera muy gráfica se describirán los pasos para entrenar la red.

En la ventana de comandos escribimos *nntool*, tal como se muestra en la figura C.1

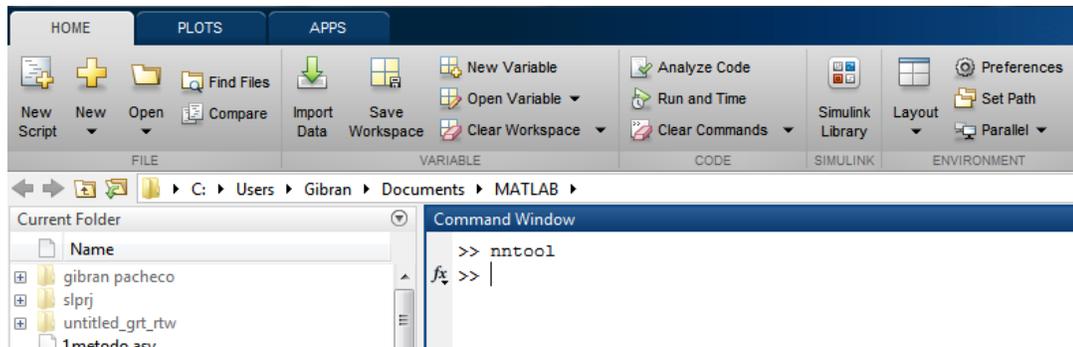


Figura C.1: Interfaz en Matlab.

Aparecerá la ventana del manejador de datos. En ella se encuentran los espacios donde se insertarán los valores que vamos a entrenar. Insertaremos los datos de entrada (Data Input) con sus respectivos datos de entrenamiento (Target Data).

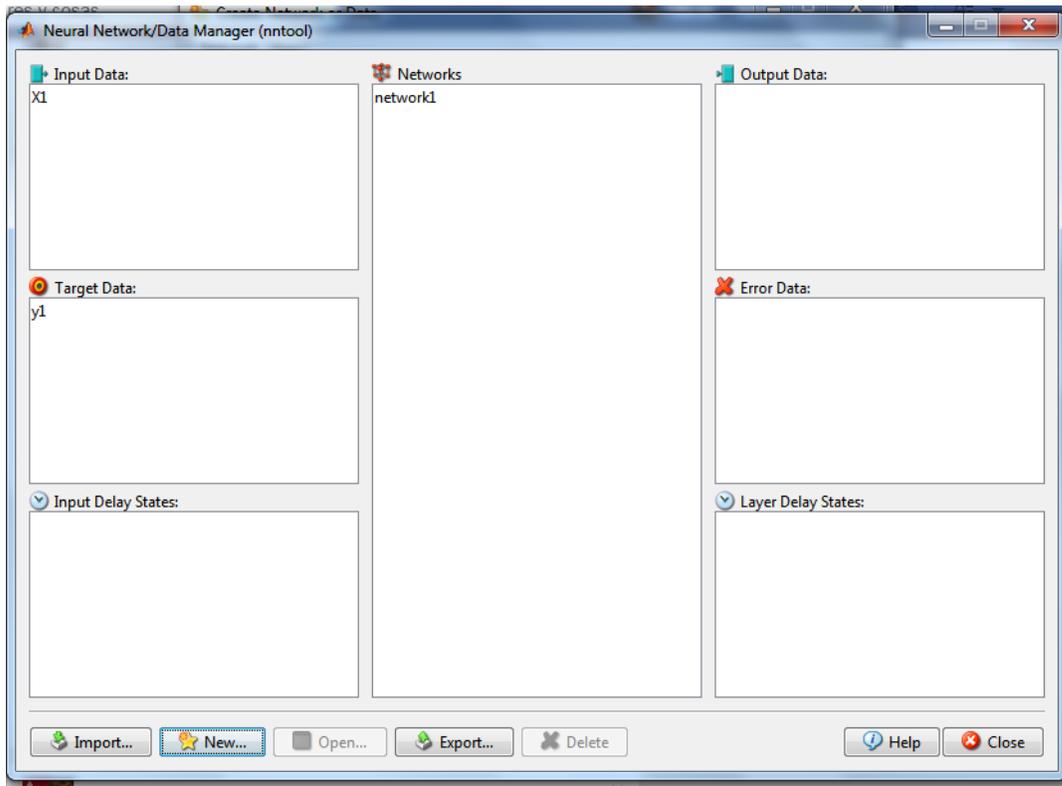


Figura C.2: Ventana del manejador de datos de las redes neuronales

Seleccionar el icono que dice Import (Figura C.2). Aparecerá la ventana para importar los datos. En esa ventana se seleccionará la ubicación donde está los datos, ya sea un documento .m o en su caso importar desde el *workspace* de Matlab®. Es recomendable que sea desde el *workspace*. Una vez seleccionas la variables se determina si es dato de entrada (data input) o si es dato de entrenamiento (Target Data), la Figura C.3 ejemplifica lo anterior mencionado.

Dar click al botón de NEW de la ventana del manejador de datos para crear una nueva RNA. Este botón abrirá la ventana para configurar la red. En esta ventana se selecciona el tipo de red, los datos de entrada, los datos de entrenamiento, la función de entrenamiento, la función de aprendizaje, la función de rendimiento, el número de capas, el número de neuronas y finalmente la función de transferencia.

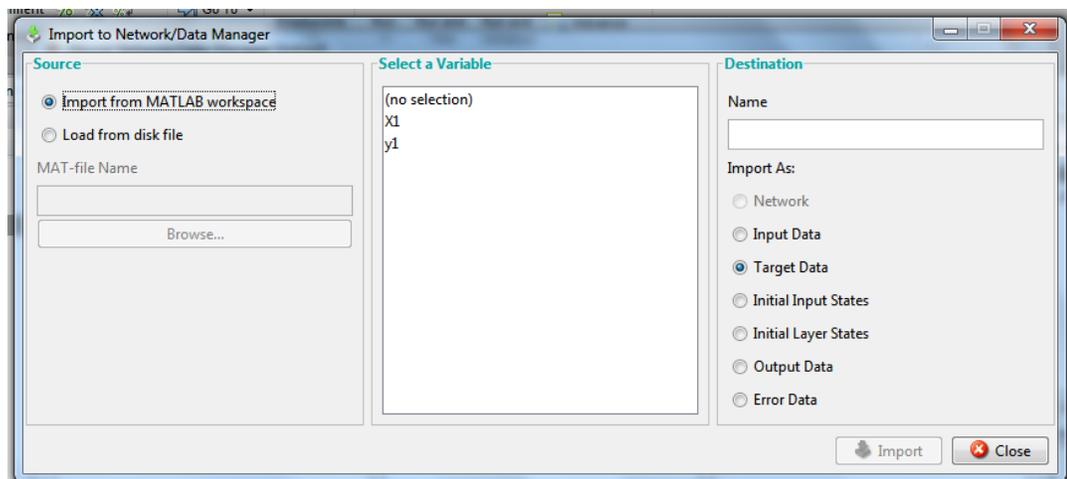


Figura C.3: Ventana de datos para importar

Configurar la RNA como se muestra en la Figura C.4, se selecciona la arquitectura por retropropagación (feed-forward backpropagation), se selecciona como dato de entrada (Input data) los datos contenidos en el vector X1, se selecciona los datos de entrenamiento (Target data) los datos contenidos en el vector Y1, se utiliza la función de aprendizaje (Training function) Levenberg-Marquardt (LEARNLM), el método de gradiente descendiente como función de aprendizaje adaptativo (LEARNGDM), como función de rendimiento el error cuadrático medio (MSE). Se utilizará 2 capas, una oculta y otra de salida, 2 neuronas en la capa oculta y como función de transferencia la función (TANSING). Cabe aclarar que para llegar a esta configuración se probaron varios tipos de configuraciones, donde los mejores resultados se obtuvieron con estos parámetros.

Hecho lo anterior presionar el botón de crear. La ventana del manejador de datos se debe de ver como se muestra en la Figura C.2, es decir, con datos de entrada (X1), datos de entrenamiento (Y1) y una RNA (Network1). En esa ventana presionar el botón abrir (Open ...). Se abrirá la ventana donde se observará la configuración de la RNA, tal como se ve en la Figura C.5.

En la ventana que se observa en la Figura C.6a, configurar los parámetros de entrenamiento, el número de iteraciones, el gradiente mínimo, la constante  $\mu$ , el  $\mu$  máximo,

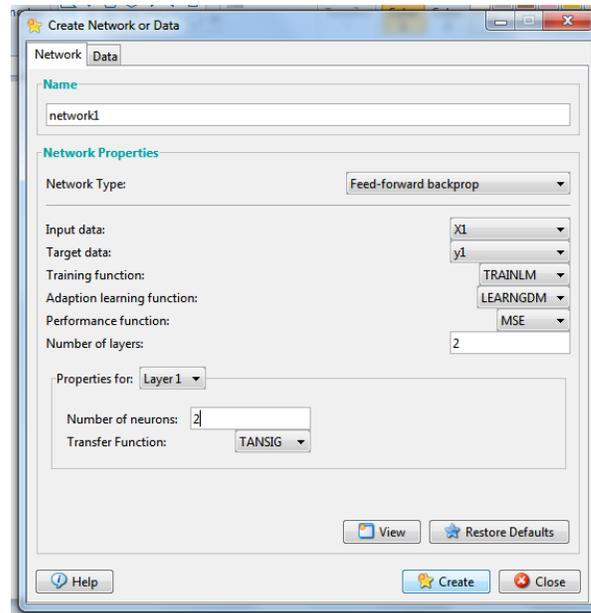


Figura C.4: Ventana de configuración de la red neuronal artificial

entre otros. Los resultados de las iteraciones se pueden ver en la Figura C.6b.

Para visualizar los pesos ( $W$ ) y el sesgo ( $b$ ) de cada una de las neuronas presionar el botón View/Edit Weights como se muestra en la Figura C.7.

En el proceso de entrenamiento se busca que el performance sea bajo, en otras palabras, que el error entre los datos deseados y los obtenidos con la red propuesta sean mínimos. Cabe recordar que la mejor red no es la que tenga el menor error, sino la que sea lo suficientemente robusta como para poder predecir de mejor manera los datos de test.

Algo importante por decir, es que la herramienta *nntool* propone los primeros valores de los pesos de forma aleatoria, cada vez que se corre el algoritmo de entrenamiento de la red se obtienen diferentes pesos y sesgos. Esto se debe a la gran cantidad de mínimos locales que puede haber en el sistema. Es importante anotar las ganancias de los pesos y sesgos cada que obtengamos buenos resultados, para posteriormente poder simular los datos del test.

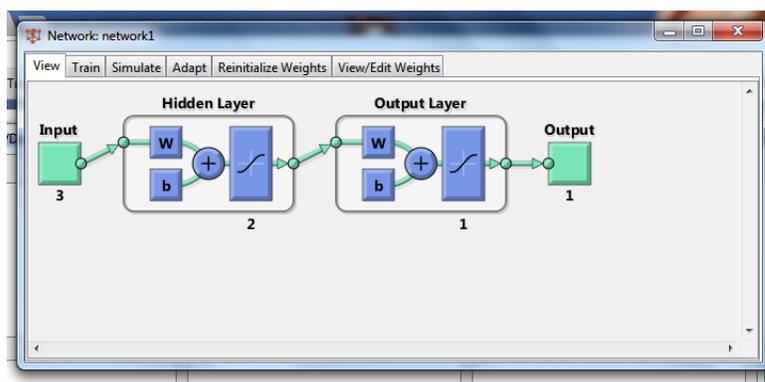
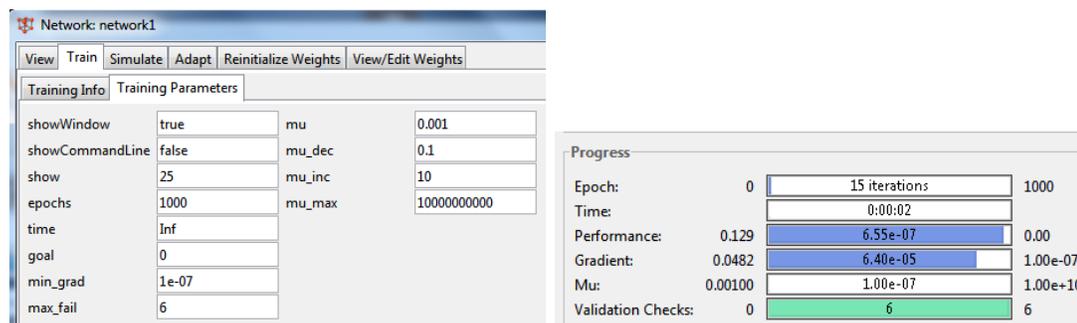


Figura C.5: Ventana de la visualización de la RNA creada



(a) Ventana para la configuración del entrena- (b) Visualización de resultados de entrena-  
 miento de la RNA miento de la RNA

Figura C.6: Entrenamiento de la RNA

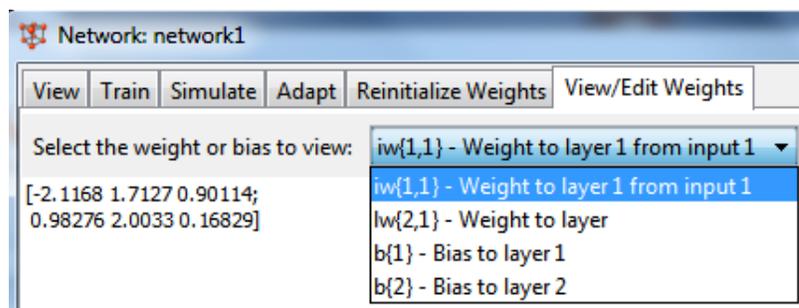


Figura C.7: Ventana de visualización de los pesos y sesgo de la RNA



# Apéndice D

## Proceso de simulación de una RNA

Una vez que se ha terminado la etapa de training de la red neuronal, continúa la etapa de test. Para ello ya debemos de contar con la arquitectura de la red y las debidas ganancias. Así que es necesario generar la arquitectura como se vio en el Apéndice C.

A continuación vaciar las ganancias de los pesos y sesgos que dieron los mejores resultados tal como se ve en la Figura D.1.

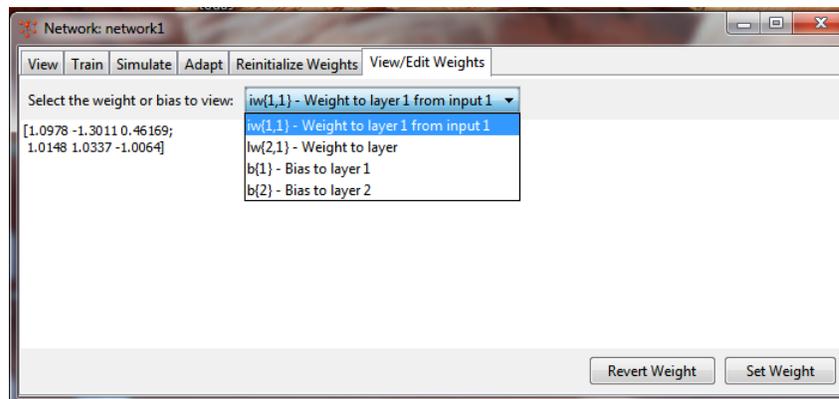


Figura D.1: Ventana de visualización de los pesos y sesgo de la RNA.

Para cada matriz que se vacía en la red es necesario guardarla, para ello se presiona el botón Set Weight. Si no se presiona el botón no se guardarán los datos. Cada que se guardan los datos aparecerá un mensaje que se ha guarda esos datos, tal como se observa

en la Figura D.2.

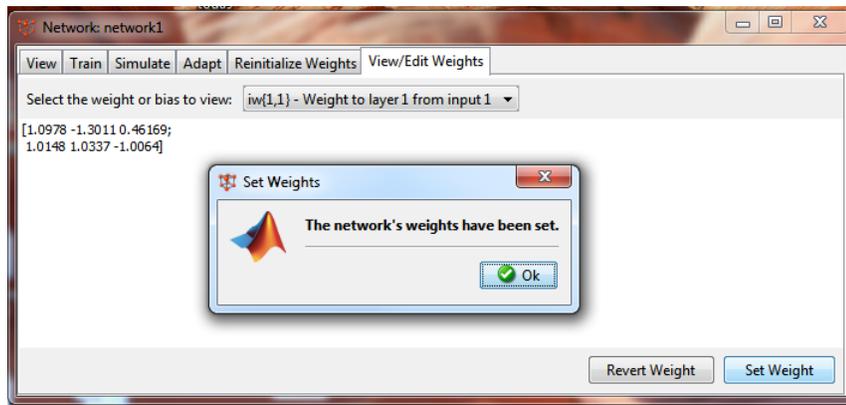


Figura D.2: Ventana de visualización de los pesos y sesgo de la RNA, y mensaje de datos guardados.

Una vez que ya se tienen los pesos y sesgos adecuados, ir a la pestaña de simulación. En esa pestaña seleccionar los valores de entrada con la que se quiere hacer el test, además nombrar el vector de salida de esa simulación. En la Figura D.3 ejemplifica lo antes mencionado.

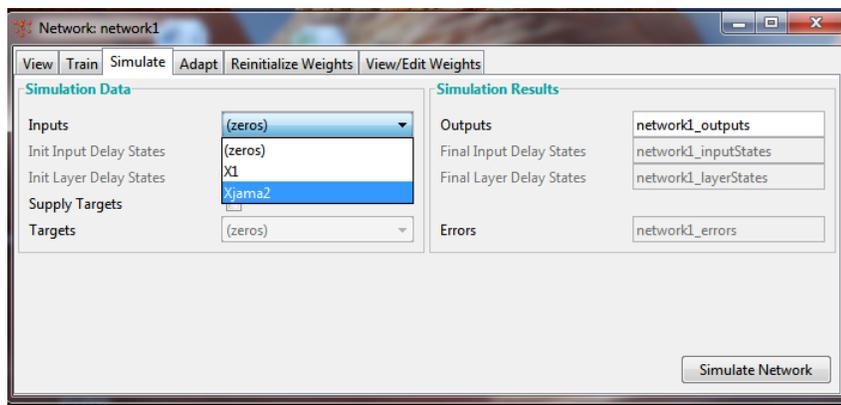


Figura D.3: Ventana de simulación de datos de entrada.

Ahora es necesario importar los datos para graficar los resultados, observar su comportamiento, y determinar si la red propuesta fue lo suficientemente robusta como para predecir los datos del test. Para ello es necesario ir a la ventana del manejador de

datos. En ella presionar el botón de Import. Después seleccionar el dato a importar, que debe de ser el nombre que se le ha dado a la salida de los datos del test (ver Figura D.4). Una vez hecho esto, esos datos ya estarán en el *Workspace* de *Matlab*®), desde donde se determina si los resultados obtenidos son los que se esperan.

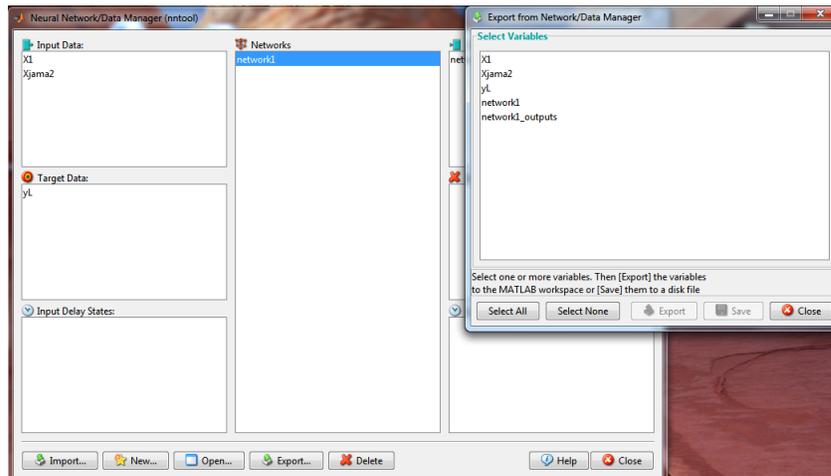


Figura D.4: Ventana para exportar datos al workspace de Matlab.



# Apéndice E

## Planos de piezas

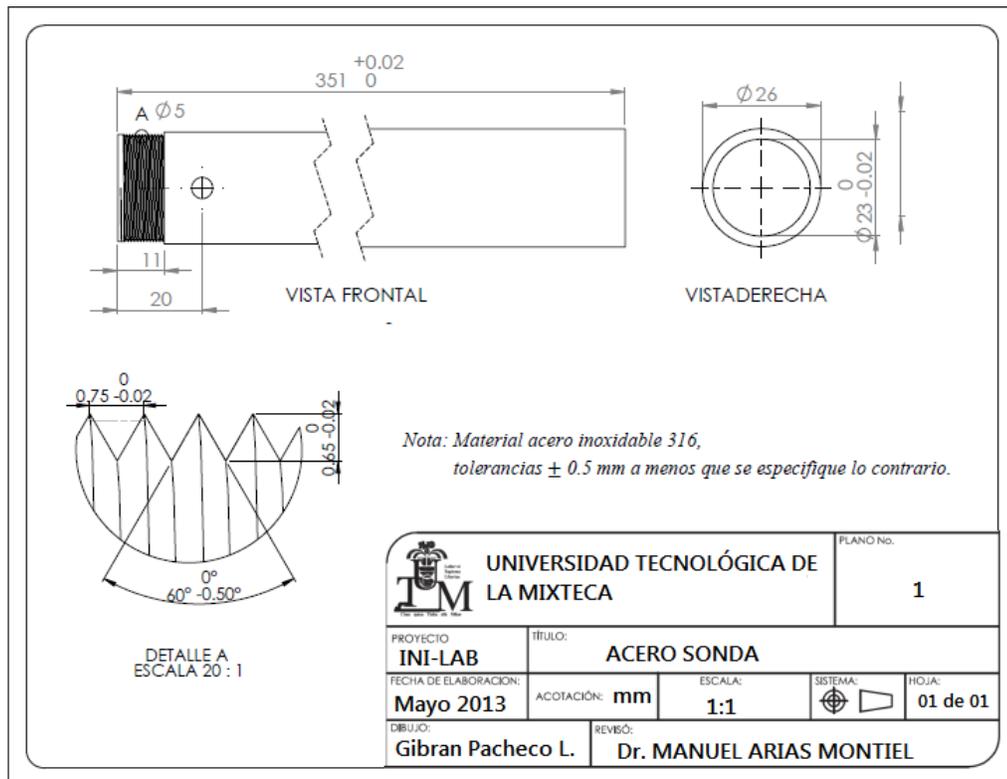


Figura E.1: Sonda de acero inoxidable 316

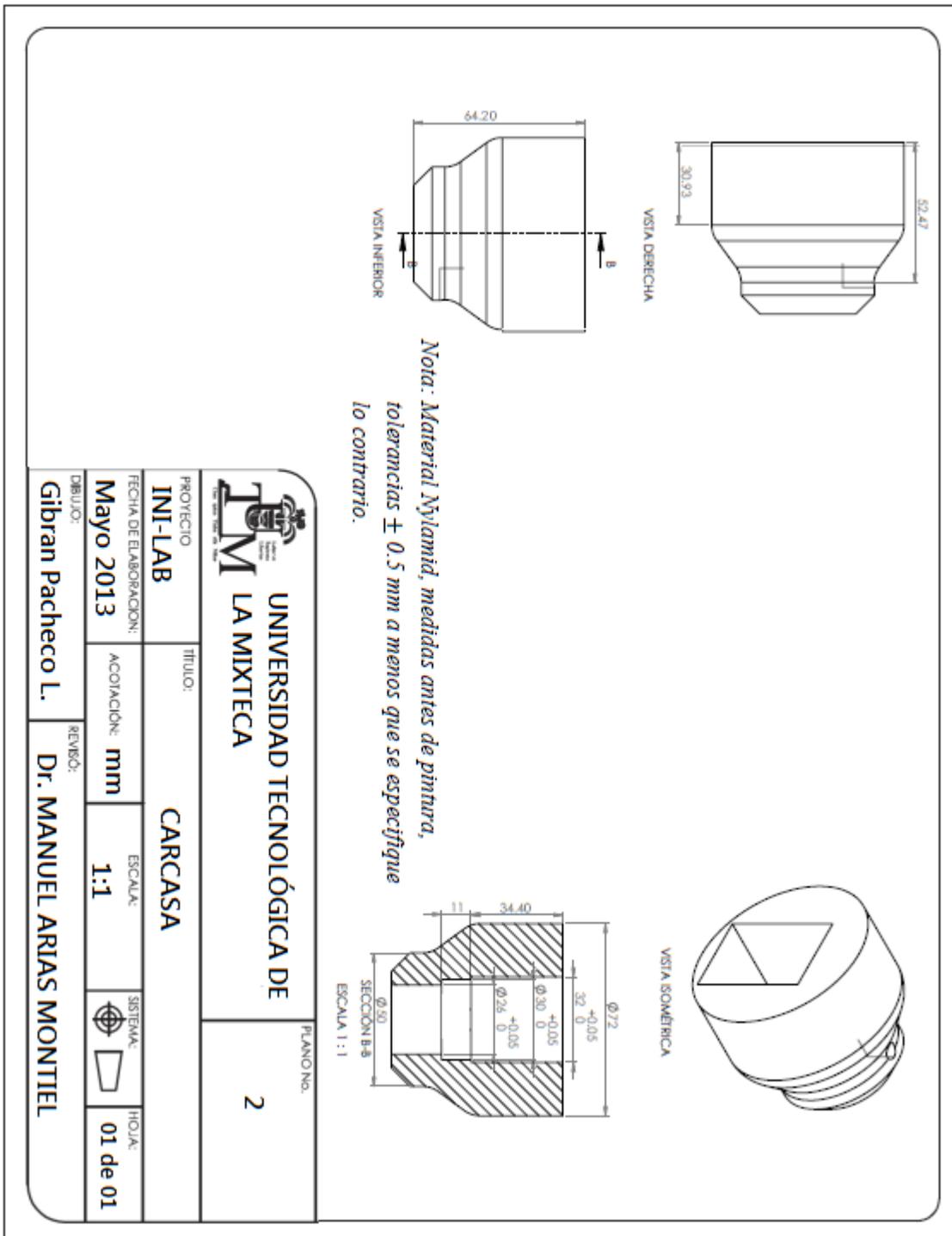


Figura E.2: Carcasa de Nylamid

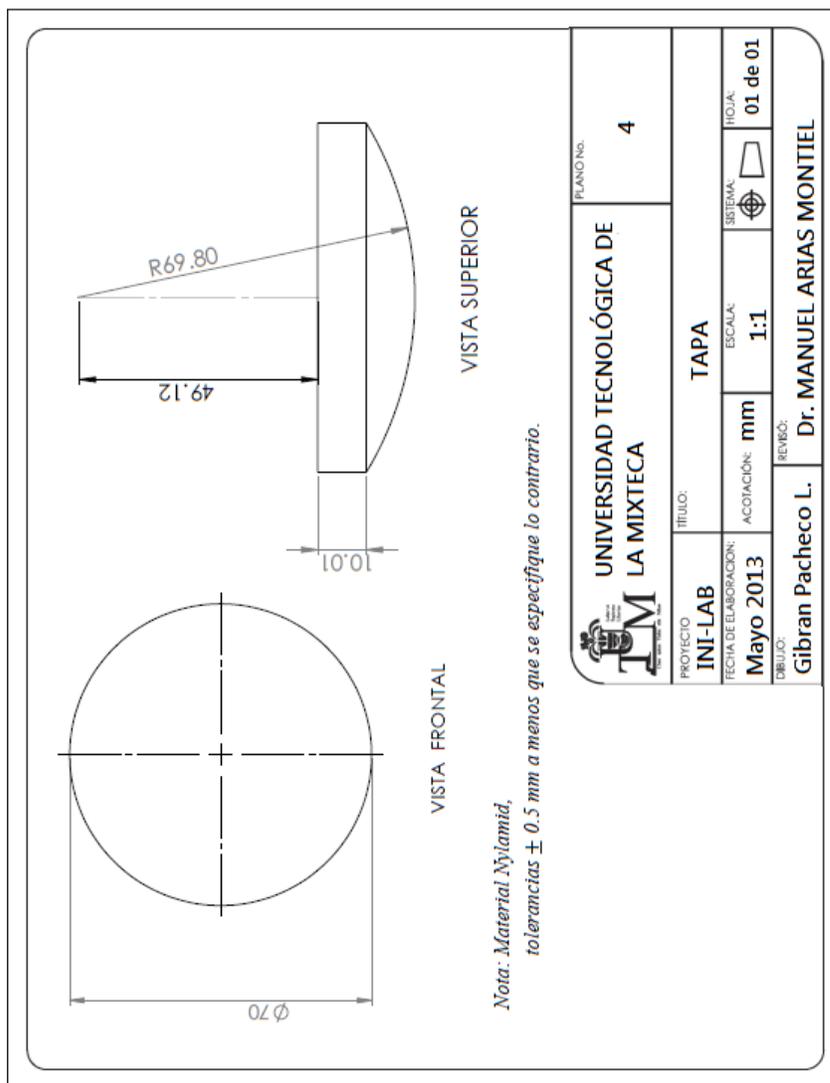


Figura E.3: Tapa de Nylamid

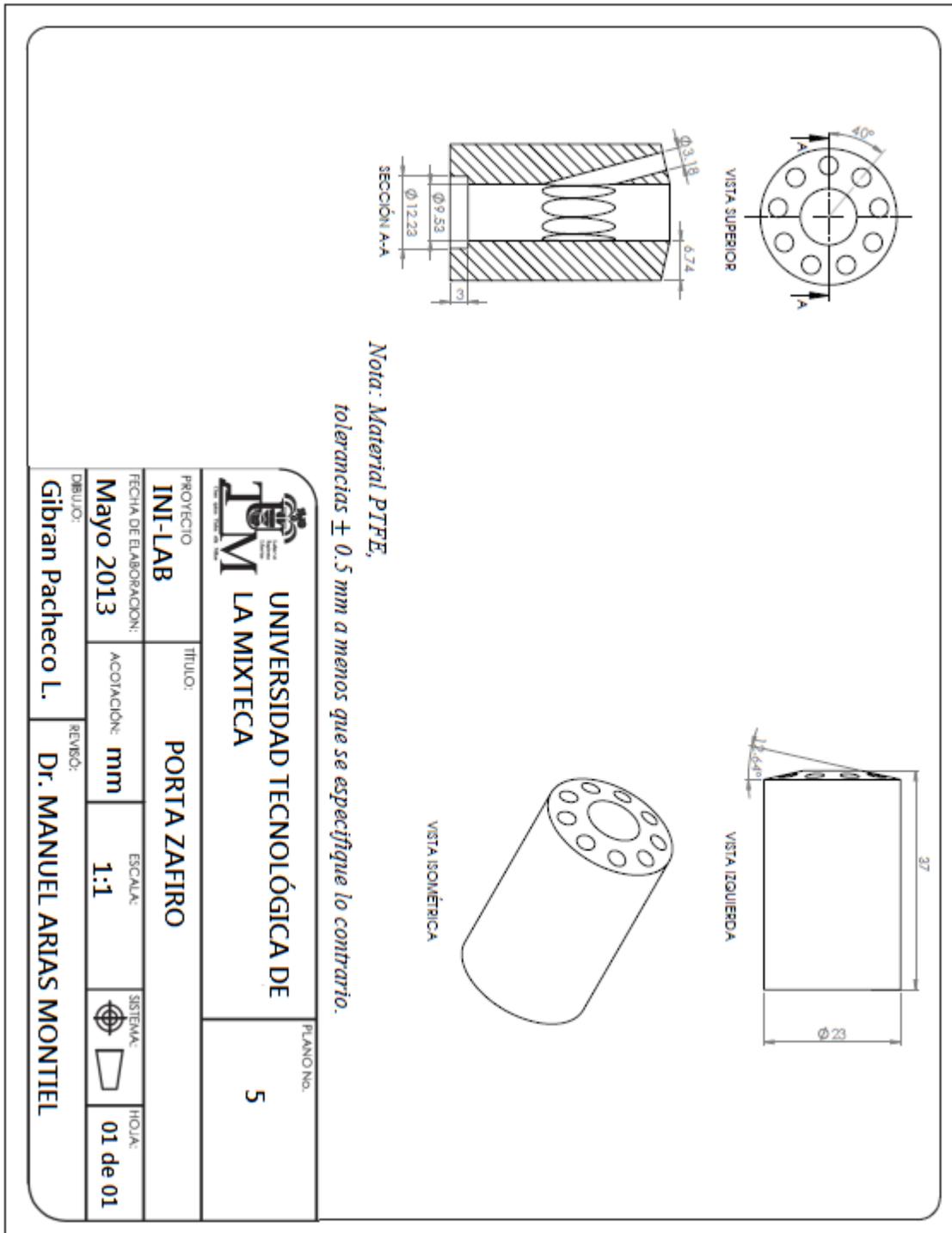


Figura E.4: Porta ventana de zafiro de PTFE

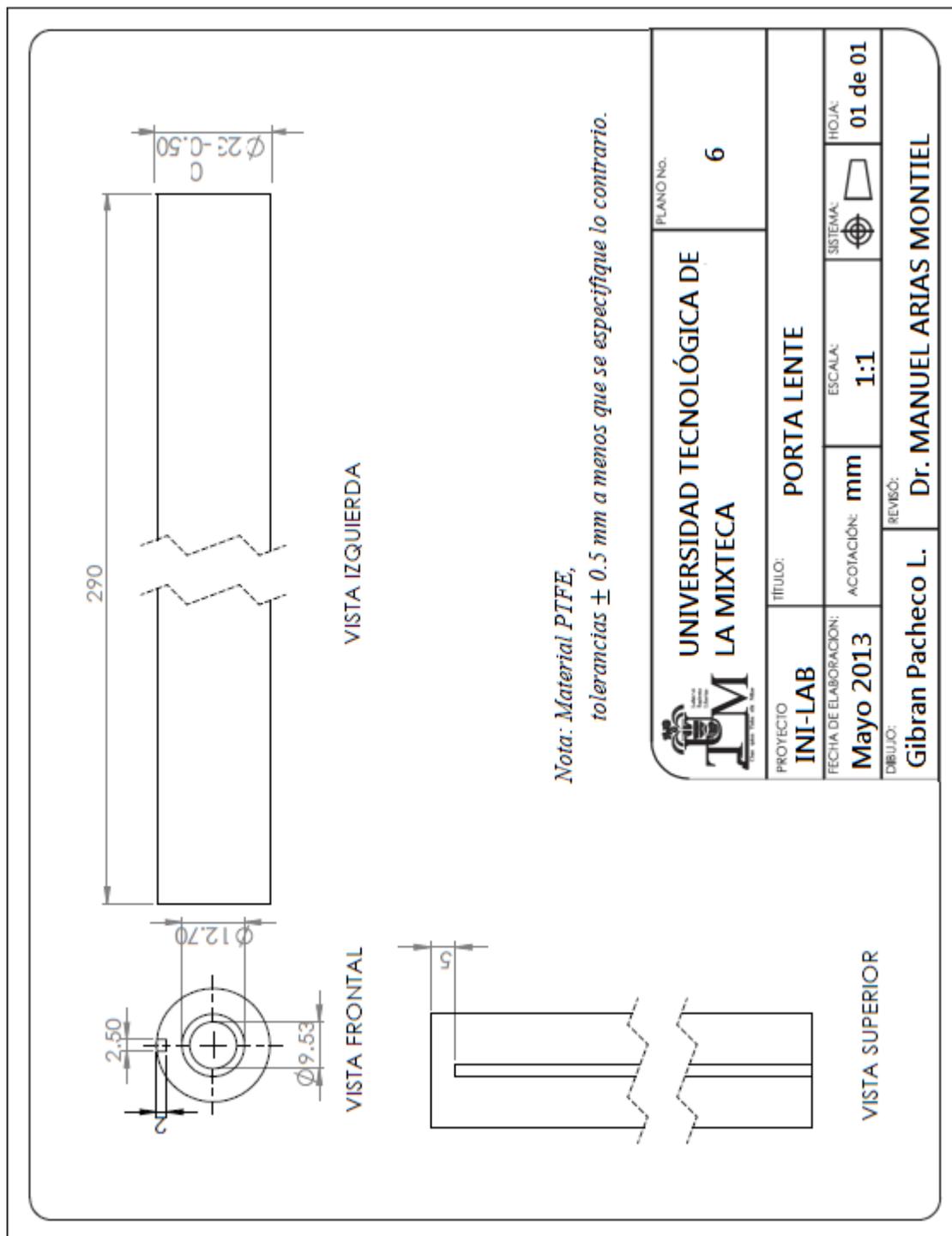


Figura E.5: Porta lente de PTFE

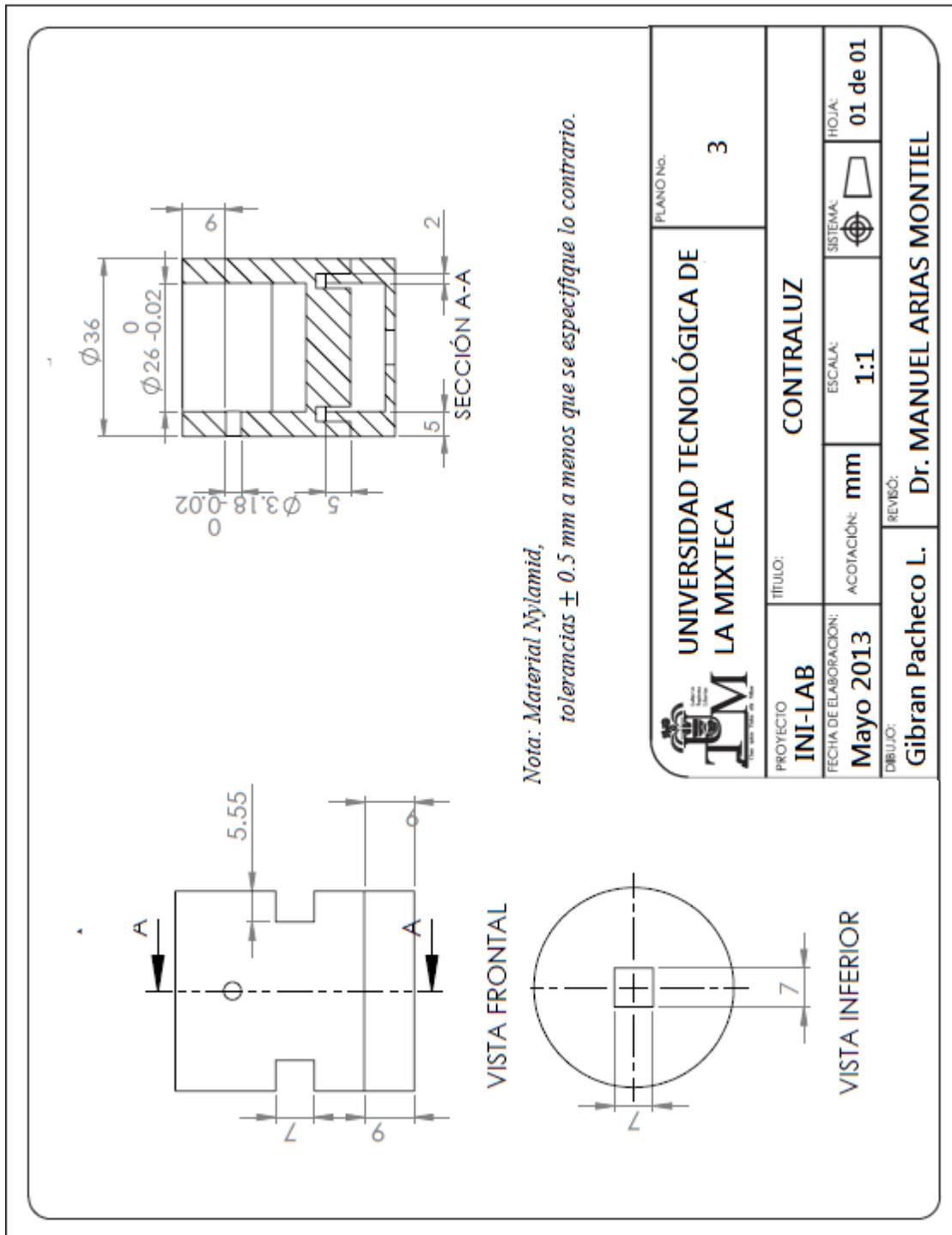


Figura E.6: Sistema de iluminación a contra luz de Nylamid

# Apéndice F

## Control de iluminación difusa

Debido a que la placa debería ser lo más pequeña posible, se tuvo que hacer de doble cara, donde finalmente sus dimensiones fueron  $4 \times 3$  cm.

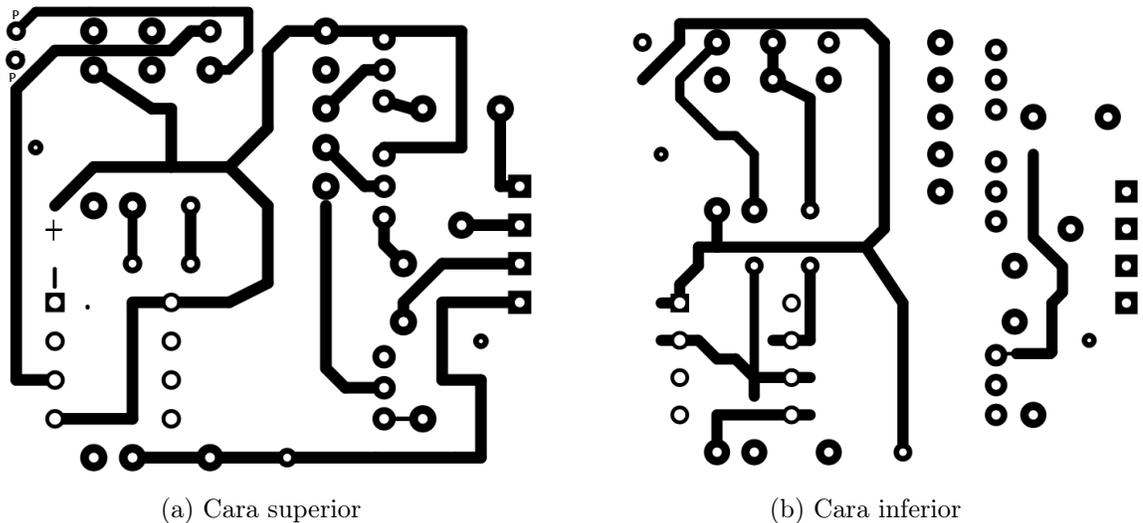


Figura F.1: Pistas de circuito impreso

En la Figura F.1 se observan las pistas del circuito impreso. Nota: la placa inferior se debe de imprimir en espejo, para que no exista problema en el acoplamiento de las pistas.

En la Figura F.2 se observa como quedó el circuito impreso montado sobre la cá-

mará.

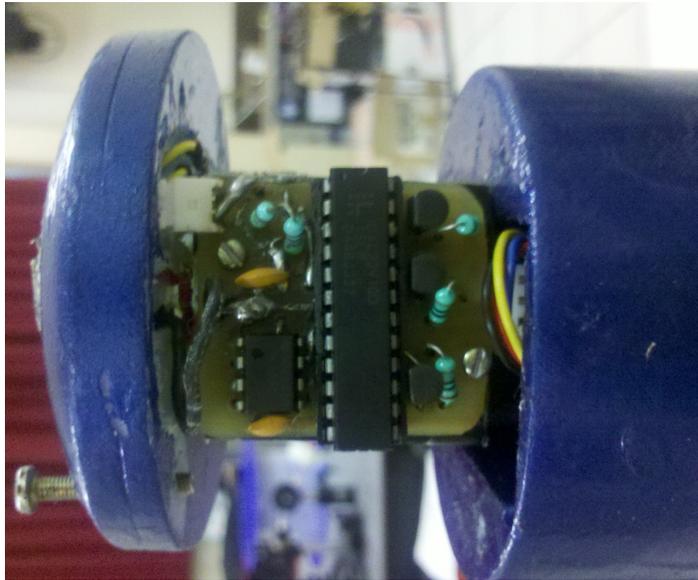


Figura F.2: Vista superior del sistema de iluminación

# Apéndice G

## Maquinado de una cuerda

Realizar una cuerda no es una tarea simple, por lo que a continuación se enumeran los pasos para garantizar su correcto maquinado.

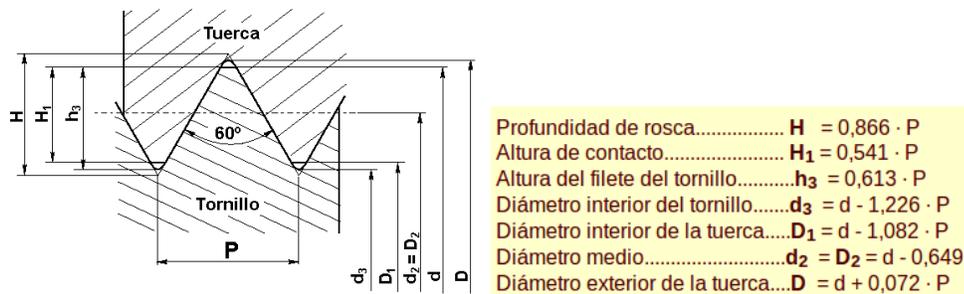


Figura G.1: Características de una cuerda.

1. Realizar todos los cálculos necesarios para poder mecanizar la rosca. Recordar que se hará una cuerda para que embone un inserto tipo SM1. Esto quiere decir que tendrá un diámetro de 1.035 in y 40 hilos por pulgada. De los anteriores datos se obtiene que  $P=0.635$  in y  $D=1.035$  in. En la Figura G.1 se ejemplifica de mejor manera.

2. Afilar la cuchilla (intentando, no sólo, que tenga  $60^\circ$ , sino que el vértice del triángulo esté situado en el centro y el ángulo de desprendimiento sea cero.

3. Una vez torneada la pieza y mecanizadas las ranuras para desahogo de la cuchilla y el chafán de entrada, situar la cuchilla con el triángulo totalmente perpendicular al

eje de la pieza. Para ello se utiliza la plantilla de roscas métricas (60 °).

4. Colocar, mediante las palancas oportunas, la velocidad de giro correcta. Seleccionar una velocidad de rotación baja (25 % de la que correspondería a la de cilindrar, cilindrar con una velocidad de corte (400 m/min) y un avance de 0,08 mm/rev [23]). Por motivos de seguridad es importante hacer esta operación antes de embragar la barra de roscar.

5. Embragar la barra de roscar.

6. Establecer y colocar el paso que queremos fabricar.

7. Acercar la punta de la cuchilla y dar una primera pasada para marcar. Controlar el tambor graduado del carro transversal y colocarlo a cero.

8. Comprobar que el paso fabricado es el deseado. (Usando el peine de roscas) Ir dando las sucesivas pasadas (prestando especial atención para que no tropiece la cuchilla al final de cada una de ellas ni el porta contra el contrapunto al principio. Parar siempre usando el pedal-freno. Usar un rotulador para ir marcando en el tambor graduado. No tocar, en ningún momento, el carro orientable para no perder el paso (incluso sería recomendable fijarlo). Vencer la holgura, del carro principal, hacia la derecha. Las pasadas (dado que se trata de rosca a derechas) deben ser siempre de derecha a izquierda. El retroceso de la cuchilla, tras cada pasada, debe ser siempre en vacío (Cambiando el sentido de giro del plato). Comprobar la profundidad de rosca con el peine de roscas y con la hembra.

# Apéndice H

## Lista de materiales utilizados

Tabla H.1: Lista de materiales.

Cantidad	Referencia	Descripción	Precio por unidad	Distribuidor
1	R1	Resistencia 4.7 K $\Omega$	\$ 1	Steren
1	R2	Resistencia 10 K $\Omega$	\$ 1	Steren
3	R3,R4,R5	Resistencia 100 $\Omega$	\$ 1	Steren
1	U2	NE555	\$ 1	Steren
1	U1	GAL22V10	\$ 1	Steren
1	Q1,Q2,Q3	Transistor PNP	\$ 1	Steren
1	-	Barra de Nylon 3*30in	\$784	La paloma
7	-	Tornillos M3	\$2.5	Centro tornillero
1/4 litro	-	Promotor de adherencia	\$ 448	Du Pont
1/4 litro	-	Pintura azul de esmalte	\$ 220	Du Pont

Tabla H.1: (continuación)

Cantidad	Referencia	Descripción	Precio por unidad	Distribuidor
1	-	Machuelo 5mm	\$56	Centro tornillero
1	-	Machuelo 3mm	\$56	Centro tornillero
1	-	Buril de 1/2 in	\$150	Centro tornillero
1	-	Buril de 1/8 in	\$110	Centro tornillero
1	-	PTFE redondo de 1 *12 in	\$380	La paloma
1	-	Acero 316 tubo de 1 * 15 in	\$680	La paloma
1	-	Broca de zanco extendido	\$380	Travers
9	-	LED 3 mm	\$ 9	Steren
1	-	LED 5 mm	\$ 16	Steren
1	-	micro-switch push	\$ 3	Steren
1	-	Cable #22	\$ 15	Steren
1	-	Pila de botón	\$ 18	Steren
1	-	Eliminador con conector mini-usb	\$ 150	Steren
1	-	Eliminador	\$ 120	Steren
1	-	Placa de cobre doble cara 10*10 cm	\$15	Steren
1	-	Ácido férrico	\$26	Steren
1	-	Plumón de aceite negro	\$ 15	Steren

Tabla H.1: (continuación)

Cantidad	Referencia	Descripción	Precio por unidad	Distribuidor
1	-	Caja de madera	\$200	—
1	-	Espuma de poli- uretano	\$430	Poliformas plás- ticas
1	-	lente $f=50$ mm $D=12.5$ mm	\$800	Thorlabs
1	-	Ventana de Zafi- ro $D=12.5$ mm	\$600	Thorlabs
1	-	Cámara CCD	\$32000	Thorlabs



# Apéndice I

## Guía de usuario

La utilización del sistema INI-LAB es muy sencilla. El sistema cuenta con una interfaz de control de parámetros, visualización de resultados y ajuste de elementos a guardar. Primero se deben de realizar algunos pasos necesarios para garantizar que la medición y la calibración sean correctas.

### A) Instalación del hardware.

Paso 1. Con la ayuda de un hisopo limpiar la ventana de zafiro.

Paso 2. Montar la pieza llamada iluminación a contraluz en la sonda de acero inoxidable. Lo más conveniente es montar la pieza de tal manera que el espacio destinado al paso del flujo no se obstruya y el borde quede alineado a la sonda de acero inoxidable tal como se muestra en la Figura I.1.

Paso 3. Conectar la cámara con su cable de datos a la computadora, y asegurarse que en la cámara encienda el LED verde que indica que se ya existe comunicación entre los dos dispositivos.

A partir de ahora se modifican los parámetros para calibrar la cámara, y para configurar la cantidad de datos a guardar. Para ello también se sigue la siguiente metodología.

### B) Instalación del software.



Figura I.1: Posición adecuada para el sistema de iluminación a contra luz

Paso 1. Abrir la interfaz llamada INI-LAB.

Paso 2. Ejecutar el programa INI-LAB. Para ello se le da un clic al botón situado en la parte superior izquierda que tiene la forma de una flecha apuntando a la derecha (ver Figura I.2). Se debe observar el vídeo en la interfaz.

Paso 3. Modificar el tiempo de exposición (Expesure Time) a cero para evitar la saturación al momento de ajustar los parámetro e configuración.

Paso 4. Ajustar a 5 el pixel clock.

Paso 5. Modificar el frame rate a 4 para guardar 4 imágenes por segundo.

Paso 6. Modificar el Exposure Time hasta tener las siguientes ganancias:  $R \approx 130$ ,  $G \approx 183$  y  $B \approx 253$  (esto es a un valor de aproximadamente 80 milisegundos).

Los parámetros de tiempo de exposición (Expusure Time), frecuencia del pixel (pixel clock) y la velocidad de los fotogramas (frame rate) están relacionadas de tal forma que al modificar un valor en cualquiera de ellas, sus valores se adaptan de manera que solo se muestran los valores permitidos para no dañar el sensor.

Paso 7. Configurar la razón de almacenamiento de imágenes en el recuadro IMAGENES (imagen guardada / Numero de imágenes que observadas)

Paso 8. Dar click en el botón DATOS para activar el modo guardar datos

Paso 9. Para guardar los datos, salga de la aplicación dando click en el botón QUIT. Aparecerá un mensaje indicando el nombre del archivo en donde se guardaron los datos.

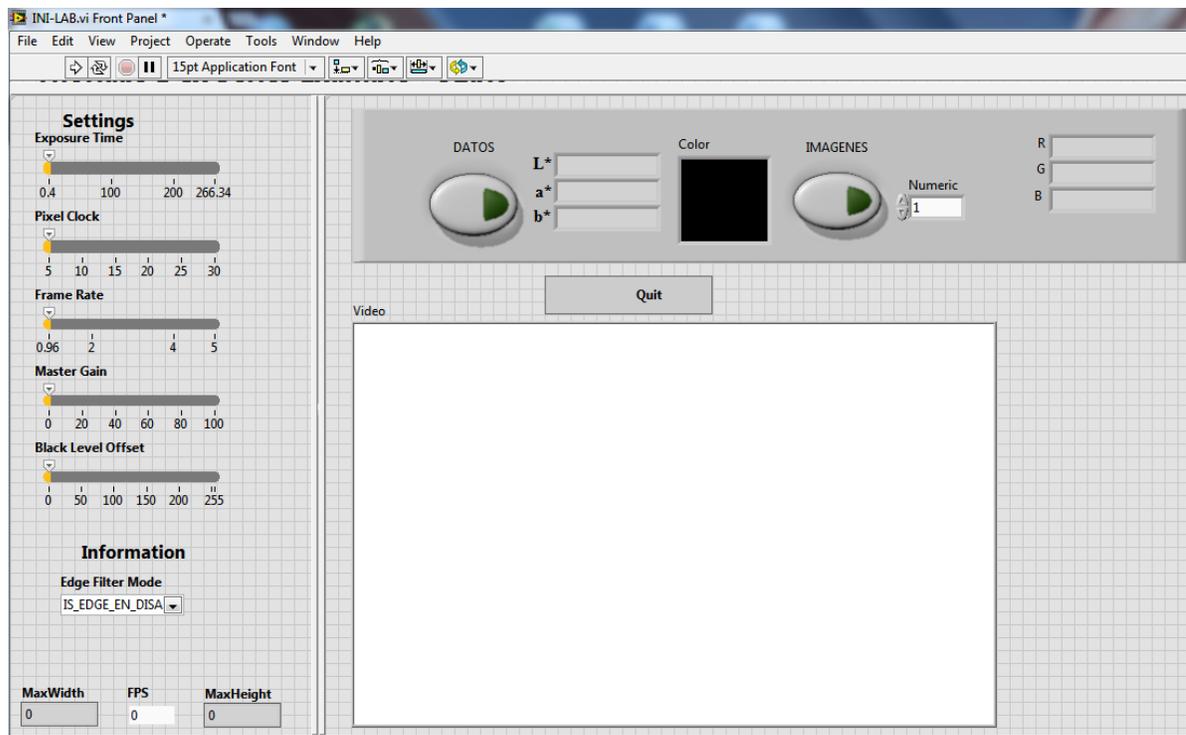


Figura I.2: Interfaz de usuario



# Apéndice J

## Tablas de resultados

Tabla J.1: Concentrado del banco de muestras.

Name	Num	L	A	B	$R_{D65}$	$G_{D65}$	$B_{D65}$	R	G	B
G1	1	99.77	-1.4	2.8	254	255	248	143	199	254
G2	2	99.4	-3.09	6.35	252.6	254.78	240.93	138	195	245
G3	3	98.7	-6.56	13.88	249.63	254.24	224.13	132	186	234
G4	4	97.55	-12.1	26.76	244.7	253.36	195.57	130	191	199
G5	5	95.43	-20.01	47.31	235.45	250.62	148.27	124	196	142
G6	6	87.68	-37.71	92.16	195.13	235.94	0	95	190	27
R1	7	94.3	11.78	4.07	255	230.73	231.22	131	159	233
R2	8	87.78	25.8	7.21	255	202.15	207.48	130	135	198
R3	9	74.85	50.96	20.78	255	143.5	148.75	120	79	109
R4	10	65.29	63.76	44.62	255	99.89	82.45	112	43	44
R5	11	57.03	70.52	77.2	255	61.43	0	100	15	2
R6	12	44.16	74.52	75.95	218	0	0	78	0	0
Y1	13	98.59	-9.64	32.52	255	254	187.23	142	199	194
Y2	14	97.9	-12.88	49.82	255	253.71	150.24	140	202	152
Y3	15	96.25	-15.35	92.55	255	249.08	19.71	139	212	48
Y4	16	95.07	-12.5	114.5	255	243.74	0	135	208	2

Tabla J.1: (continuación)

Name	Num	L	A	B	R	$G_{D65}$	$B_{D65}$	R	G	B
Y5	17	93.85	-8.05	125.85	255	237.58	0	134	204	0
Y6	18	91.3	1.4	135.73	255	224.58	0	122	187	0
B1	19	99.51	-1.3	-0.8	250.13	254.45	255	132	181	252
B2	20	99.12	-2.43	-1.45	246.01	254.06	255	131	183	248
B3	21	97.72	-6.32	-3.65	231.41	252.5	255	119	180	251
B4	22	96.46	-9.75	-5.61	217.99	250.99	255	113	181	251
B5	23	93.51	-17.55	-10.16	185	247	255	75	160	252
B6	24	82.53	-40	-26.15	0	227.59	253.6	56	156	252
S1	25	94.38	11.11	4.6	255	227.59	253.6	56	156	253
S2	26	91.21	-0.67	35.65	252	227.99	161.39	122	168.16	150.4
S3	27	88.48	-9.52	60.33	239	224.51	102.64	107	161.12	103.8
S4	28	93.15	-6.52	128.13	255	234	0	142	219	0
S5	29	85.6	-42.68	6	111.37	235	201.23	50	130	157
S6	30	77.7	-55.82	-9.92	0	218	208	24	99	156
O1	31	35.37	67.14	60.91	180	0	0	58	0	0
O2	32	38.51	-12.18	-59.07	0	102	187	3	4	200
O3	33	27.43	35.82	46.94	121.4	34.91	0	33	8	0
O4	34	35.56	-34.62	57.21	45	95.69	0	9	44	0

NOTA: Los parámetro L, A y B, corresponde a las componentes  $L^*a^*b$  que se obtuvieron de las mediciones realizadas con el colorímetro espectrofotométrico de HunterLab, los valores  $R_{D65}$ ,  $G_{D65}$  y  $B_{D65}$ , se calcularon a partir de los datos L, A y B y la matriz del iluminante D65. Los valores R, G y B, son las mediciones que fueron proporcionadas por la cámara CCD DCU223C.