



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GONIÓMETRO PARA LA
MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO ENTRE UN LÍQUIDO
Y UNA SUPERFICIE SÓLIDA”**

AUTORES:

ARROYO CANO, ANDREA DARYNKA

BRAVO BRAVO, CHRISTINA ESTEFANÍA

DIRECTOR: OROZCO BRITO, LUIS ALBERTO

SANGOLQUÍ

2016



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GONIÓMETRO PARA LA MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO ENTRE UN LÍQUIDO Y UNA SUPERFICIE SÓLIDA" realizado por las señoritas Arroyo Cano Andrea Darynka y Bravo Bravo Christina Estefanía, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a las señoritas Arroyo Cano Andrea Darynka y Bravo Bravo Christina Estefanía para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, Agosto de 2016

LUIS ALBERTO OROZCO BRITO MSc.
DIRECTOR



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Arroyo Cano Andrea Darynka, con cédula de identidad No. 180361190-2 y Bravo Bravo Christina Estefanía, con cédula de identidad N° 190052317-4, declaramos que este trabajo de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GONIÓMETRO PARA LA MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO ENTRE UN LÍQUIDO Y UNA SUPERFICIE SÓLIDA" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, Agosto de 2016

Andrea Darynka Arroyo Cano

C.I. 1803611902

Christina Estefanía Bravo Bravo

C.I. 1900523174



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Arroyo Cano Andrea Darynka y Bravo Bravo Christina Estefania, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GONIÓMETRO PARA LA MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO ENTRE UN LÍQUIDO Y UNA SUPERFICIE SÓLIDA" cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolqui, Agosto de 2016

Andrea Darynka Arroyo Cano

C.I. 1803611902

Christina Estefanía Bravo Bravo

C.I. 1900523174

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por ser el faro que ha guiado mi camino cada día y porque a Él consagro cada éxito que logre alcanzar en mi vida.

A mis padres, por ser la voz, las manos y oídos de Dios en la Tierra; por llenarme de valores, amor y el convencimiento de que no hay otro camino para alcanzar los sueños que el trabajo que se realiza con integridad y dignidad.

A mis hermanos, que serán para siempre mis mejores amigos y con quienes deseo compartir todas mis alegrías; Paúl no existe mejor hermano mayor, mejor ejemplo y hombre más integro que tú, tu apoyo es la piedra sobre la cual reposo segura. Emilia José que esto sea la prueba del maravilloso ejemplo de nuestros padres, del cual siempre te puedas sentir orgullosa y puedas continuar en tu vida.

Darynka Arroyo

Dedico este trabajo a Dios, por su protección y punto de refugio para la renovación espiritual.

A mi familia que son mi apoyo y figuras de ejemplo. Mis padres que mediante su esfuerzo me han permitido ir cumpliendo mis metas tanto académicas como personales. Personas que con su ejemplo de trabajo y perseverancia me han demostrado que los objetivos trazados son alcanzables y satisfactorios de cumplir. A mis hermanos que siempre serán mi red de seguridad.

Christina Bravo

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios porque gracias a su protección infinita hemos caminado seguras en cada paso, por cada pequeño milagro y bendición cotidiana que nos ha regalado y porque nuestra fe en Él ha sido la brújula que ha dirigido nuestro accionar cada día.

A nuestras familias por el apoyo incondicional, consejos y cariño brindados a lo largo de nuestro paso por la Universidad.

A nuestro director de proyecto por guiarnos con profesionalismo, gentileza y entusiasmo.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE porque por siempre será nuestra Alma mater, el lugar donde aprendimos no solo el fundamento académico de nuestra carrera, sino a dirigirnos con ética, responsabilidad y tenacidad en la vida profesional; gracias al ejemplo de aquellos maestros que se convirtieron en mentores y compañeros que se convirtieron en grandes amigos.

Arroyo Darynka y Bravo Christina

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e importancia.....	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Descripción y alcance.....	4
1.5. Organización de la memoria del proyecto.....	6
CAPÍTULO II	
ESTADO DEL ARTE	
2.1. Fundamentos de mojabilidad.....	7
2.1.1. Tensión superficial	7
2.1.2. Ángulo de contacto y mojabilidad	8
2.2. Goniómetro de ángulo de contacto.....	11
2.2.1. Características y tipos de goniómetro de ángulo de contacto	11
2.2.2. Evaluación goniométrica mediante medición fotográfica.....	12
2.2.3. Otros métodos	13
2.2.4. Alternativas comerciales	14
2.3. Procesamiento digital de imagen.....	16
2.3.1. Perturbaciones en una imagen digital	17
2.3.2. Correcciones de color (ajuste de brillo y contraste).....	22
2.3.3. Binarización de una imagen	22
2.3.4. Detección de contornos en una imagen.....	23

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL GONIÓMETRO

3.1.	Componentes del sistema	26
3.2.	Requerimientos del prototipo	26
3.2.1.	Sistema de goteo	28
3.2.2.	Sistema de iluminación	33
3.2.3.	Sistema de adquisición de imagen en entorno controlado	35
3.3.	Control de entorno y sistema de goteo	40
3.3.1.	Controlador	40
3.3.2.	Alimentación del equipo	42
3.3.3.	Control de matriz de LEDs	43
3.3.4.	Control de motor	43
3.4.	Diseño de software especializado.....	43
3.4.1.	Énfasis en píxeles de interés	44
3.4.2.	Obtención de contornos.....	46
3.4.3.	Cálculo del ángulo de contacto	48
3.5.	Diseño del HMI	53
3.5.1.	Características del usuario.....	53
3.5.2.	Capacidades del HMI.....	54
3.5.3.	Arquitectura del HMI.....	54
3.5.4.	Distribución de las pantallas	55
3.5.5.	Uso del color	56
3.5.6.	Información textual	58
3.5.7.	Comandos e ingreso de datos	59

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1.	Implementación de los sistemas	60
4.1.1.	Sistema de iluminación	60
4.1.2.	Sistema de goteo	62
4.1.3.	Sistema de adquisición de imagen en entorno controlado	64
4.1.4.	Caja de control	65
4.2.	Integración de los sistemas del prototipo	65
4.3.	Implementación del software especializado.....	66
4.3.1.	Énfasis en píxeles de interés	66

4.3.2.	Obtención de contornos.....	69
4.3.3.	Cálculo del ángulo de contacto	71
4.4.	Integración del software mediante HMI.....	72
4.5.	Integración total del goniómetro	74
4.6.	Diseño de las pruebas a los sistemas	75
4.7.	Pruebas de rendimiento	79

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	Conclusiones	96
5.2.	Recomendaciones	97

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de elección para pipeta	28
Tabla 2. Parámetros de elección para pinza de pipeta	30
Tabla 3. Parámetros de elección para motor	32
Tabla 4. Características motor MG958	32
Tabla 5. Parámetros de elección de matriz RGB	34
Tabla 6. Parámetros de elección para entorno controlado	37
Tabla 7. Parámetros de elección para cámara Celestron.....	37
Tabla 8. Parámetros de selección para el controlador.....	40
Tabla 9. Características de transformador.....	43
Tabla 10. Selección de color	58
Tabla 11. Código RGB de los colores en la HMI	58
Tabla 12. Estilo y tamaño para información textual	59
Tabla 13. Especificación de comandos del operador	59
Tabla 14. Valores definitivos para brillo, contraste y umbral.....	69
Tabla 15. Formato N° 1.....	76
Tabla 16. Formato N° 2.....	77
Tabla 17. Formato N° 3.....	79
Tabla 18. Tabulación de resultados para prueba No. 4	84
Tabla 19. Tabulación de resultados para prueba No. 5 a 25°C	86
Tabla 20. Tabulación de resultados para prueba No. 5 a 16°C	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Prototipo de goniómetro	4
Figura 2. Esquema de funcionamiento	5
Figura 3. Representación gráfica de la tensión superficial	8
Figura 4. Representación de la gota para el ángulo de contacto	8
Figura 5. Alteración de una gota estática en un periodo de 60 segundos	10
Figura 6. Medida del ángulo de avance y retroceso	10
Figura 7. Primer goniómetro de ángulo de contacto	11
Figura 8. Goniómetro PG-X.....	15
Figura 9. Goniómetro JYSP-360.....	15
Figura 10. Goniómetro Attension Theta	16
Figura 11. Imagen afectada por ruido gaussiano	18
Figura 12. Imagen afectada por ruido impulsional	19
Figura 13. Clasificación de métodos de reducción de ruido en una imagen.....	20
Figura 14. Imagen binarizada.....	22
Figura 15. Diagrama general del goniómetro	27
Figura 16. Sistema de goteo	28
Figura 17. Pipeta mecánica de una solo canal Dragon Lab	29
Figura 18. Soporte pipeta goniómetro prototipo No. 1	30
Figura 19. Pinza universal de 3 dedos.....	31
Figura 20. (a) "Pared lateral" 1er diseño (b) "pared lateral" 2do diseño.....	31
Figura 21. Accesorios motor MG958.....	32
Figura 22. Dimensiones en milímetros del motor MG958	33
Figura 23. Soporte para motor. (a) Vista superior (b) Vista 3D	33
Figura 24. Sistema de iluminación.....	33
Figura 25. Módulo LED RGB.....	34
Figura 26. Base para luz posterior goniómetro No. 1	35
Figura 27. Sistema de adquisición de imagen en entorno controlado.....	35
Figura 28. Entorno controlado No. 1	36
Figura 29. Entorno controlado No. 2	36
Figura 30. Entorno controlado No. 3	37
Figura 31. Cámara Celestron.....	38
Figura 32. Soporte para cámara goniómetro No.1	39
Figura 33. Soporte cámara Celestron	39
Figura 34. Sistema para movimiento de entorno controlado	39
Figura 35. Diagrama de bloques del sistema de control de entorno y sistema de goteo.....	40
Figura 36. Flujograma de programación de controlador.....	41
Figura 37. Módulo CP2102.....	42
Figura 38. Software de manipulación de parámetros de exposición de imagen	45
Figura 39. Diagrama de flujo para énfasis en pixeles de interés.....	46
Figura 40. Diagrama de flujo segunda etapa de software	47

Figura 41. Software de detección de contornos (a) Imagen de fuente (b) Imagen filtrada y ajuste de umbral (c) Imagen de salida (contornos).....	48
Figura 42. Diagrama de flujo tercera etapa de software	49
Figura 43. Circunferencia circunscrita a un triángulo.....	50
Figura 44. Software para cálculo de ángulo de contacto (a) Imagen de fuente (b) Área para introducción de usuario y salida de resultados.....	53
Figura 45. Arquitectura de HMI.....	54
Figura 46. Distribución pantalla de inicio.....	55
Figura 47. Distribución pantalla de proceso	56
Figura 48. Paleta de colores Qt Creator	57
Figura 49. Herramienta gradiente Qt Creator	57
Figura 50. Prueba color azul con (a)25% (b)50% (c)100%	61
Figura 51. Prueba color rojo con (a)25% (b)50% (c)100%	61
Figura 52. Prueba color verde con (a)25% (b)50% (c)100%	61
Figura 53. Prueba color blanco con (a)25% (b)50% (c)100%	61
Figura 54. Imagen con luz color blanca y con 100% PWM	62
Figura 55. Implementación del sistema de goteo.....	63
Figura 56. Acción de pipeteo	63
Figura 57. Implementación del sistema de adquisición de imagen en entorno controlado.....	64
Figura 58. Movimiento de la paleta del entorno controlado	64
Figura 59. Caja de Control.....	65
Figura 60. Integración del goniómetro.....	66
Figura 61. Aplicación para énfasis en píxeles de interés	67
Figura 62. Efectos de procesamiento de imagen con brillo (a) muy alto (b) muy bajo.....	68
Figura 63. Efectos de procesamiento de imagen con contraste (a) muy alto (b) muy bajo.....	68
Figura 64. Efectos de procesamiento de imagen con umbral (a) muy alto (b) muy bajo.....	68
Figura 65. Imagen procesada con niveles adecuados de brillo, contraste y umbral ..	69
Figura 66. Aplicación para obtención de contornos.....	70
Figura 67. Efectos de binarización con umbral muy bajo.....	70
Figura 68. Efectos de binarización con umbral muy alto.....	70
Figura 69. Contornos obtenidos con umbral adecuado.....	71
Figura 70. Aplicación para cálculo de ángulo de contacto	72
Figura 71. HMI para cálculo de ángulo de contacto (a) Pantalla de inicio (b) Pantalla de procesamiento (c) Pantalla de configuración	74
Figura 72. Integración del goniómetro.....	74
Figura 73. Imagen resultante del entorno controlado.....	78
Figura 74. Pantalla de procesamiento	81
Figura 75. Pantalla de contornos.....	81
Figura 76. Resultados de medición con software CAM 100 para agua destilada en vidrio.....	82
Figura 77. Resultado ensayo 1	82

Figura 78. Resultado ensayo 2	83
Figura 79. Resultado ensayo 3	83
Figura 80. Resultado ensayo 4	83
Figura 81. Resultado ensayo 5	84
Figura 82. Mapa de dispersión Prueba No. 4.....	85
Figura 83. Pantalla de procesamiento	82
Figura 84. Pantalla de contornos.....	82
Figura 85. Habitación para pruebas de variación de temperatura.....	83
Figura 86. Control de temperatura a 25 °C	83
Figura 87. Resultado ensayo 1 a 25 °C	84
Figura 88. Resultado ensayo 2 a 25 °C	84
Figura 89. Resultado ensayo 3 a 25 °C	85
Figura 90. Resultado ensayo 4 a 25 °C	85
Figura 91. Resultado ensayo 5 a 25 °C	85
Figura 92. Control de temperatura a 16°C	86
Figura 93. Resultado ensayo 1 a 16 °C	87
Figura 94. Resultado ensayo 2 a 16 °C	87
Figura 95. Resultado ensayo 3 a 16 °C	87
Figura 96. Resultado ensayo 4 a 16 °C	88
Figura 97. Resultado ensayo 5 a 16 °C	88
Figura 98. Mapa de dispersión Prueba No. 5 a 25°C	89
Figura 99. Mapa de dispersión Prueba No. 5 a 16°C	89
Figura 100. Pantalla de procesamiento	90
Figura 101. Pantalla de contornos.....	91
Figura 102. Configuración de luminarias externas al ambiente controlado.....	92
Figura 103. Nivel bajo de iluminación externa.....	92
Figura 104. Ensayo para 195 Lux de iluminación externa.....	93
Figura 105. Nivel medio de iluminación externa.....	93
Figura 106. Ensayo para 255 Lux de iluminación externa.....	94
Figura 107. Nivel alto de iluminación externa.....	94
Figura 108. Ensayo para 599 Lux de iluminación externa.....	94

RESUMEN

El presente proyecto “Diseño y construcción de un goniómetro para la medición del ángulo de contacto entre un líquido y una superficie sólida” propone una alternativa portátil, de bajo costo, con un software especializado desarrollado en código abierto. En contraste con modelos de goniómetro disponibles en el mercado que por lo general cuentan con un diseño y construcción de alto costo y trabajan con un software especializado bajo licencia, aumentado en Ecuador por impuestos y plazos extendidos de entrega, lo que limita su uso a laboratorios y centros de investigación con altos presupuestos. El análisis del ángulo de contacto y la mojabilidad, son los métodos estándar para la evaluación de la calidad de una superficie. En el desarrollo se implementó un prototipo de goniómetro que cumpla con las funcionalidades necesarias de hardware para la colocación de las muestras líquidas y sólidas; y un software especializado encargado del trabajo computacional para el cálculo del ángulo de contacto. Además se proveyó al goniómetro de una Interfaz Humano-Maquina (HMI) amigable y funcional que facilite su interacción con el usuario y sirva como nexo entre el hardware y el software implementados. Los resultados obtenidos han sido comparados con los de un goniómetro comercial de alta gama, para validar la precisión del diseño del prototipo y los algoritmos implementados.

PALABRAS CLAVE:

GONIÓMETRO

ÁNGULO DE CONTACTO

MOJABILIDAD

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

ENTORNO CONTROLADO

ABSTRACT

The analysis of the contact angle and wettability are standard methods for evaluating the quality of a surface. This has prompted the investigation of several companies to provide technology solutions for industries such as biochemistry, medicine, oil extraction, among others. The contact angle goniometers currently available on the market have a high cost and usually works with a specialized licensed software.

In Ecuador the presence of these companies is not direct, increasing the acquisition cost of the equipment with taxes and extended delivery deadlines, limiting its use to laboratories and research centers with high budgets. This project proposes a portable-low cost alternative, with a specialized open source software. It presents the design and construction of a goniometer prototype and indicates the design of the specialized software to calculate the contact angle between a liquid sample and a solid surface.

The goniometer was tested to calculate the contact angle between water and glass. The results were compared with those of a high-end commercial goniometer (CAM100) to validate the accuracy of the design of the prototype and the implemented algorithms.

KEY WORDS:

GONIOMETER

CONTACT ANGLE

WETTABILITY

DIGITAL IMAGE PROCESSING

CONTROLLED ENVIRONMENT.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El presente capítulo describe los antecedentes del tema de proyecto, la justificación y el alcance del mismo.

1.1. Antecedentes

El goniómetro de ángulo de contacto es un equipo usado para la medición del ángulo formado entre dos interfases como por ejemplo un líquido y una superficie. Según Kruss (2015) existen varios usos para el valor ángulo de contacto, como: caracterización de tratamientos superficiales, caracterización de nuevas superficies, investigación de las propiedades de adhesión, pruebas de pureza en la superficie, medida del comportamiento de limpiadores en soluciones surfactantes, caracterización de capacidad e impresión en superficies, pruebas de propiedades de mojabilidad en plástico, vidrio o metal, etc. Un ejemplo de las aplicaciones mencionadas pueden ser los revestimientos anti-niebla para parabrisas de los autos, donde se hace un estudio del ángulo de contacto entre el agua proveniente de las gotas de lluvia con el vidrio del parabrisas recubierto con el revestimiento mencionado, el cual debe cambiar las características del vidrio de hidrófilo a hidrofóbico.

Dado a su amplio abanico de aplicaciones existen diversas investigaciones en el extranjero sobre el método y equipos necesarios para la correcta medida del ángulo de contacto. Por ejemplo el método explicado por Gutiérrez Farfán y López Blas (2012), donde se montan una o dos láminas de cristal pulido en una celda de material inerte llena de salmuera sintética, en medio de las láminas de cristal se coloca una gota de aceite. Después de unos días se mueven las láminas paralelamente y se mide el ángulo de contacto.

Existen también trabajos como el de Kwok et al. (1996), donde se investiga el ángulo de contacto dinámico y estático con trece líquidos que usan el método del

goniómetro, y trabajos donde la investigación se centra en la construcción de un goniómetro de bajo costo. (Kwok et al., 1997) y (Dionisio & Joao, 2000)

Dentro de nuestro país existen pocos estudios sobre el tema del goniómetro, sin embargo, la determinación del ángulo de contacto mediante otros métodos de medida son utilizados en especial en el campo de petróleos y fabricación de láminas biodegradables.

El ángulo de contacto en el campo de petróleos permite el conocimiento de las propiedades de las rocas del yacimiento y de los fluidos contenidos en su interior, y así determinar la caracterización del yacimiento. (Araujo et al., 2011). En cuanto a las películas biodegradables, el ángulo de contacto permite determinar sus propiedades físicas para establecer su uso como envoltorio, paquete, envase, entre otros.

Los métodos utilizados dentro del país, ajenos a la gota sessil (método en el cual se coloca una gota de la muestra sobre la superficie, para medir el ángulo de contacto mediante el goniómetro), tienen las siguientes desventajas: los altos tiempos de espera para obtener resultados, no existen equipos portátiles y limitaciones tanto en la estructura como en la limpieza de la muestra.

El estudio del ángulo de contacto puede ser utilizado para la mejora de los modos de producción de materiales compuestos de matriz metálica, cerámica, plástico, unión de materiales cerámicos mediante soldadura (brazing), sintetización en fase líquida, refinado y fundición de metales. (Savov, 1977)

1.2. Justificación e importancia

El interés en el ángulo de contacto de acuerdo a Hubbard (2002) se debe a que desempeña un papel importante en numerosos fenómenos tecnológicos, medioambientales y biológicos. El conocimiento del ángulo de contacto es además usado en diferentes ramas como: biomateriales, adhesivos, medicina, flujo y distribución de fluidos en un reservorio, entre otros. (Ramos & Blas, 2003)

La teoría de imbibición de agua en medios porosos ha demostrado tener una validez multidisciplinar en ingeniería de alimentos, física del suelo, geología,

impresiones y más. La imbibición depende de la mojabilidad del medio poroso, que por lo general se determina al medir los ángulos de contacto que los líquidos forman con el sólido. (Saguy et al., 2005)

El objetivo del presente proyecto de investigación, es generar un prototipo portátil, de bajo costo, con software de código abierto, que permita obtener el ángulo de contacto de un líquido sobre una superficie sólida, mediante el procesamiento de la imagen microscópica de una muestra, para adaptarlo a diferentes ámbitos y necesidades.

Por tal motivo se propone el diseño y construcción de un goniómetro, equipo necesario para la medición del ángulo de contacto, que lleva consigo una cámara, una estructura que permite el goteo de una muestra líquida sobre una superficie y el software necesario para procesar dicha imagen.

En Ecuador la existencia de estos equipos es limitada y su adquisición es posible solo en el extranjero. Su implementación y programación economizaría el tiempo, los costos de importación, así como el valor elevado del dispositivo comercial y su respectivo software especializado (no libre).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de goniómetro portátil para la medición del ángulo de contacto entre un líquido y una superficie sólida, cuyo software especializado esté basado en código abierto, que será instalado en la Universidad de la Fuerzas Armadas-ESPE.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir el prototipo del goniómetro, para apoyar el desarrollo del software y pruebas posteriores.
- Desarrollar algoritmos que permitan la implementación del software requerido para la obtención del ángulo de contacto a través de la imagen obtenida.

- Implementar un sistema de control para el dispensado de las muestras líquidas.
- Diseñar una interfaz para el usuario del equipo que le permita la manipulación y visualización del proceso.

1.4. Descripción y alcance

El presente proyecto pretende desarrollar un prototipo de goniómetro capaz de procesar la imagen de una muestra microscópica (gota), para determinar el ángulo de contacto de un líquido sobre una superficie.

En la Figura 1 se observa el prototipo del goniómetro propuesto (Ramé-Hart, 1960). El mecanismo para la captura de la imagen de una gota sobre una superficie está formado por estructuras de soporte para la pipeta, la cámara y la muestra.

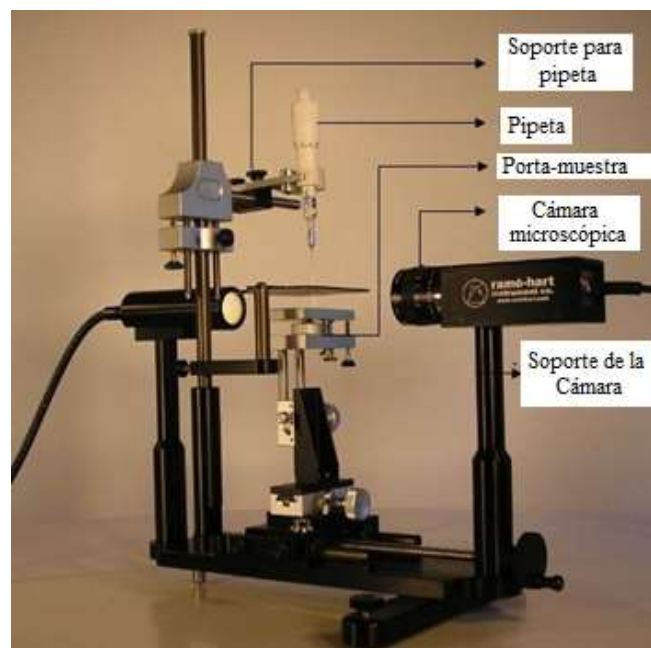


Figura 1. Prototipo de goniómetro.

Fuente: (Ramé-Hart, 1960)

En la Figura 2 se observa el funcionamiento propuesto para el goniómetro:

1. El usuario carga la muestra líquida en el dispensador, luego mediante la interfaz cargada en el computador interactúa con los demás sistemas del goniómetro.
2. El sistema de goteo permite el depósito de la gota en la superficie provista para tal propósito.
3. Para la toma de la imagen se utiliza una cámara microscópica.
4. El procesado digital de las imágenes se realiza por medio de una computadora provista de un software desarrollado en una plataforma abierta, el mismo que se encarga de obtener de la imagen el valor del ángulo de contacto.



Figura 2. Esquema de funcionamiento

Para facilitar el desarrollo del proyecto, la posterior detección de errores y mejoras en el mismo se propone dividir el trabajo en etapas, de la siguiente manera:

En la primera etapa se realiza la construcción del prototipo del goniómetro, conformado por el hardware necesario.

La segunda etapa realiza la adquisición de la imagen de la gota en la superficie, mediante la cámara microscópica y su filtrado, de tal manera que pueda ser utilizada por las etapas siguientes.

En la tercera etapa se transforma la imagen de la gota previamente adquirida en una imagen 2D conformada por sus modelos geométricos.

La cuarta etapa va orientada a calcular el ángulo de contacto, para la determinación de la mojabilidad de la muestra.

En la quinta etapa se desarrolla la automatización del sistema de goteo, mediante el dispensador de líquido provisto en el prototipo; encargado de depositar la muestra líquida de manera dosificada en el porta muestras. En el sistema se realiza un control en lazo abierto de tipo ON-OFF.

La sexta etapa va dirigida hacia el usuario y se encarga de desarrollar una interfaz mediante la cual se pueda controlar los procesos de dispensado de la muestra líquida, toma de la imagen microscópica, y obtención de los datos de interés para el presente estudio.

Como etapas finales, se prevé realizar de ser necesario, mejoras en el prototipo, pruebas de funcionamiento en el escenario propuesto, comparación con los valores estándar de equipos comerciales, y la corrección de errores.

1.5. Organización de la memoria del proyecto

El capítulo I describe los trabajos previos al proyecto de investigación propuesto, los objetivos y el alcance del mismo. El capítulo II desarrolla el estado del arte del proyecto, recopila los conocimientos previos necesarios para el diseño y construcción del goniómetro. El capítulo III contiene el diseño del prototipo a través de tres etapas: estructura mecánica y control, procesamiento digital de la imagen, HMI. El capítulo IV detalla el diseño y aplicación de las pruebas a realizarse en el prototipo, y se comparan resultados. El capítulo V formula las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación realizado.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo describe los conceptos para el desarrollo del proyecto de investigación. Se estudia el estado del arte de los temas más importantes como: fundamentos de mojabilidad, tipos de gota, ángulo de contacto, goniómetro, y procesamiento de imagen.

2.1. Fundamentos de mojabilidad

La mojabilidad se determina por el valor de ángulo de contacto que se forma sobre una muestra líquida y una superficie sólida. El conocimiento de la mojabilidad de ciertos elementos tiene relevancia en algunas aplicaciones donde se utilizan metales fundidos, líquidos de revestimiento, aceites, etc. Incluso para nuevas tecnologías como las superficies super-hidrofóbicas, usadas para el estudio de superficies de auto-limpieza, nano-fluidos, electrohumectación, etc. Los fundamentos de mojabilidad están ligados con la tensión superficial y la determinación del ángulo de contacto.

2.1.1. Tensión superficial

Uno de los parámetros a tomar en cuenta por su importante relación con el ángulo de contacto, es la tensión superficial del líquido. “La tensión superficial de un líquido está asociada a la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$) o, de forma equivalente, a la fuerza normal que actúa por unidad de longitud ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$).” (Rodríguez, 2010, p. 7)

La tensión superficial es causada por los efectos de las fuerzas intermoleculares como describe Yuan & Lee (2013): las moléculas de un líquido puro, aplican a sus vecinos una fuerza igual en todas las direcciones que da como resultado una fuerza neta de cero, sin embargo las moléculas ubicadas en la superficie no poseen vecinos

que apliquen dicha fuerza, por lo tanto no existe una fuerza neta de cero. Las moléculas generan una presión interna para una contracción voluntaria sobre su área de superficie para mantener la menor energía superficial libre. Dicho concepto se encuentra representado en la Figura 3. La tensión superficial tiene varios puntos a considerar como la temperatura, el medio que rodea la gota y las características propias de la misma.

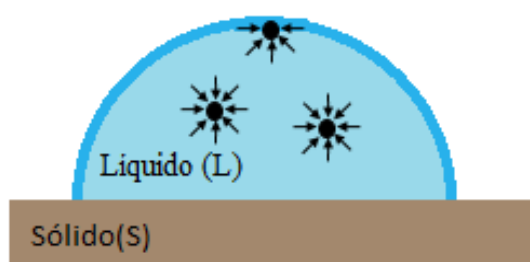


Figura 3. Representación gráfica de la tensión superficial

2.1.2. Ángulo de contacto y mojabilidad

El ángulo de contacto es el que se forma con la superficie de un líquido cuando entra en contacto con una superficie sólida, su valor depende de las fuerzas adhesivas del propio líquido y del sólido con el líquido. Cuando un líquido y un sólido entran en contacto forman una interfase común donde el sólido, líquido y vapor forman una “línea de contacto trifásico”. (Rodríguez, 2010) (Yuan & Lee, 2013)

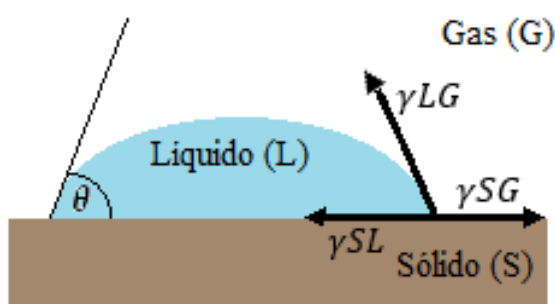


Figura 4. Representación de la gota para el ángulo de contacto

La Figura 4 muestra el ángulo de contacto θ , formado por el líquido (L) sobre la superficie (S) dentro de una atmósfera de gas (G). El ángulo de contacto está

representado matemáticamente por la ecuación de Young (2.1) donde relaciona las tres tensiones γ_{SG} , γ_{SL} y γ_{LG} de las interfaces sólido/gas, sólido/líquido y líquido/gas, respectivamente.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (2.1)$$

La mojabilidad la determina el ángulo de contacto θ , Rodríguez (2010) define que cuando el ángulo es menor a 90 grados el líquido moja al sólido, mientras que cuando es mayor a 90 grados el líquido no moja. El caso extremo es cuando existe un mojado perfecto con un ángulo muy aproximado a 0 grados.

2.1.2.1. *Tipos de gota de acuerdo a su comportamiento*

Existen dos tipos de gotas según su comportamiento en un determinado tiempo y esto influye directamente en el método para medir el ángulo de contacto. En primer lugar se tiene la gota estática la cual tiene una misma forma durante un determinado período de tiempo.

Rodríguez (2010) define que dentro del mencionado período de tiempo la gota alcanza su condición de equilibrio, que depende de las reacciones entre las fases. Se debe mencionar que el ángulo de contacto estático no siempre permanece igual ya que existen interacciones que hacen que al ángulo varíe en el tiempo, como se indica en la Figura 5, algunas condiciones para el cambio del ángulo de la gota son: evaporación de líquido, reacciones químicas entre el sólido y el líquido, disolución o hinchamiento del sólido por parte del líquido, etc.

En segundo lugar se tiene la gota dinámica que es producida cuando el líquido penetra en superficies porosas, el ángulo producido cambia constantemente en función del tiempo. Para el cálculo del ángulo de contacto dinámico se necesita una secuencia de imágenes durante la interacción.

Los ángulos de contacto de gota dinámica como se muestra en la Figura 6, indican las interacciones entre el líquido y el sólido ya sea en ángulo de avance o retroceso

(aumento o disminución del volúmen de la gota en el proceso de mojado). (Rodríguez, 2010)

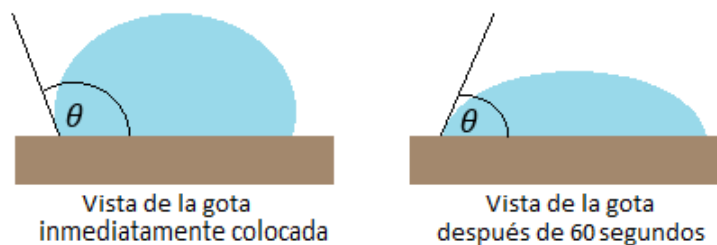


Figura 5. Alteración de una gota estática en un periodo de 60 segundos

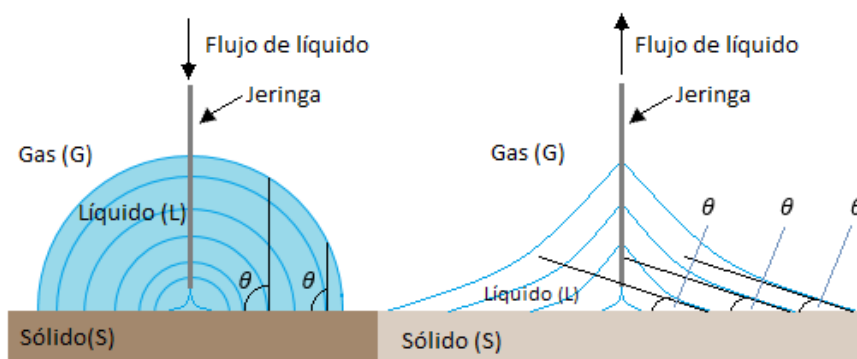


Figura 6. Medida del ángulo de avance y retroceso

2.1.2.2. Métodos de medida del ángulo de contacto

Existen diferentes métodos para obtener el ángulo de contacto, que depende del tipo de superficie, la viscosidad del líquido, incluso el porcentaje necesario de pureza de la muestra para obtener una correcta medida.

Alhunaim et al. (2015) mencionan que los métodos más usados son la gota sésil, Wilhelmy plate y la penetración del líquido. Donde el método de la gota sésil es usado típicamente para superficies llanas, planas y no porosas. También, al poseer algunas ventajas en cuanto a su simplicidad y el hecho de que sólo se requieren pequeñas cantidades de líquido (unos pocos microlitros) y pequeños sustratos de superficie (unos pocos milímetros cuadrados). (Yuan & Lee, 2013)

Además, una precisión de ± 2 grados en el valor del ángulo de contacto al usar el método de la gota sésil, puede lograrse cuando el ángulo de contacto es mayor de 20 grados. (Alghunaim et al., 2015)

Pero por el hecho ya mencionado que solo requiere una pequeña cantidad de muestra y una pequeña superficie del sustrato, existe un impacto relativamente más alto de impurezas. En cuanto a la precisión y la reproducibilidad, la medición se basa en la consistencia del operador en la asignación de la línea de tangente, que puede conducir a error significativo y la inconsistencia entre varios usuarios. (Yuan & Lee, 2013)

2.2. Goniómetro de ángulo de contacto

2.2.1. Características y tipos de goniómetro de ángulo de contacto

Típicamente, los ángulos de contacto se miden simplemente al depositar una gota de líquido sobre una superficie sólida dada, mediante la colocación de una tangente a la gota en su base que usa, por ejemplo, un goniómetro. (Kwok et al., 1997). Un goniómetro de ángulo de contacto es entonces, el equipo provisto de las herramientas (mecánicas o de software) necesarias para medir dicho fenómeno.

El primer goniómetro de ángulo de contacto comercial mostrado en la Figura 7 (Zisman, 1960), fue fabricado por la empresa de instrumentos Ramé-Hart. Consistía en un prototipo que usaba un lente microscópico graduado. A través de los años, se han hecho modificaciones del equipo para mejorar su exactitud y precisión. (Leja & Poling, 1960)



Figura 7. Primer goniómetro de ángulo de contacto

Fuente: (Zisman, 1960)

La goniometría a través de los años ha visto el desarrollo de principalmente dos tipos de prototipos: mecánicos, como el goniómetro estándar universal (UG) y digitales, como por ejemplo los electrogoniómetros o inclinómetros digitales. (Rusell et al., 2003) y (Huang et al., 2012)

Con base a ello, el ángulo de contacto se puede determinar ya sea con un lente equipado con un goniómetro ocular, o, mediante la captura de una fotografía digital y el ángulo ser medido en ella.

2.2.2. *Evaluación goniométrica mediante medición fotográfica*

En el presente trabajo, se busca desarrollar un prototipo apoyado en una técnica digital. Las ventajas de la evaluación goniométrica de ángulo mediante medición fotográfica son descritas por Blonna et al. (2012), quienes establecen que la medición en una fotografía produce un archivo permanente e imprimible, los investigadores pueden tomar mediciones sobre la fotografía en cualquier momento, entre otras.

No obstante a pesar de las ventajas anteriormente mencionadas, existen varios problemas inherentes a la adquisición de la imagen desde un medio digital y el procedimiento adjunto. A menudo se trata de un proceso complicado: la imagen debe descargarse de la cámara a un computador y, a continuación, debe ser editada en un programa informático específico. (Ferriero, y otros, 2012)

Debido a efectos dinámicos, mencionados en el inciso 2.1.2.1, la reproducibilidad de las fotografías de gotas individuales es comúnmente pobre. Para obtener una alta precisión, se requieren gran número de fotografías, y muchas mediciones en una sola fotografía sin que constituyan un equivalente de la misma serie de mediciones en fotografías de diferentes gotas. (Neumann & Good, 1979)

Una forma de no incurrir en demasiadas imprecisiones al momento de la medición, es definir un protocolo para el uso de la técnica de goniometría elegida por el investigador/usuario. En general para medición en una fotografía se puede hacer uso de un procedimiento simple como el sugerido por Ferriero, y otros (2012): tomar una

imagen adecuada de acuerdo con un procedimiento estándar y después colocar un goniómetro virtual en la imagen con un software dedicado.

El método de la gota sésil mencionado en el inciso 2.1.2.2 requiere de un equipo como el descrito por Neumann y Good (1979). Una estructura horizontal sobre la cual se monta la muestra plana (sólido), una pipeta micrométrica con una pequeña punta u otro dispositivo para la formación de la gota, una fuente de iluminación para la gota proveniente desde atrás, un filtro de luz para minimizar el calentamiento por la fuente de luz, y un telescopio con una pieza ocular móvil.

Actualmente existen varias mejorías del equipo base, necesario para medir el ángulo de contacto mediante un lente. Una cámara se puede integrar para tomar fotografías del perfil de salida con el fin de medir el ángulo de contacto en la imagen. (Leja & Poling, 1960) El uso de relativamente grandes aumentos (zoom) en la imagen permite un examen detallado de dicho perfil. (Smithwich, 1988) Una jeringa accionada por motor se puede utilizar para controlar la velocidad de adición de líquido. (Kwok et al., 1996)

Otro aspecto importante para la goniometría mediante medición fotográfica es el entorno dispuesto para alojar la muestra sobre la cual se trabajará. Para gotas sésiles, es preferible utilizar una cámara cerrada con al menos la pared frontal de vidrio de alta calidad. El ambiente cerrado tiene dos propósitos: el primero es la de proteger a la gota de la contaminación debido al polvo o aceite en la atmósfera, etc., el segundo es para que la atmósfera alrededor de la gota sea saturada con el vapor del líquido. Esta precaución es particularmente importante con líquidos volátiles. (Neumann & Good, 1979)

2.2.3. *Otros métodos*

La evaluación goniométrica presenta además otras técnicas, con grandes avances destinados principalmente al campo de la medicina entre sus aplicaciones más destacadas. Para mencionar algunos, se tiene los electrogoniómetros flexibles, ampliamente utilizados para medir los movimientos articulares humanos (Nicol,

1989), con aplicaciones que van desde la medicina como por ejemplo kinesiología (de Oliveira et al., 2009), la rehabilitación (Assai, y otros, 2003), el diagnóstico (Maksimovic & Popovic, 1999) a interfaces de realidad virtual y periféricos de ordenador.

Los inclinómetros por otra parte, son pequeños cilindros de metal con una base plana que se puede conectar a la piel mediante almohadillas adhesivas de doble cara. Cada uno contiene un péndulo en miniatura como parte de un circuito optoelectrónico que tiene una salida de voltaje proporcional al ángulo entre la base plana y la vertical. (Adams et al., 1986)

2.2.4. Alternativas comerciales

Los goniómetros de ángulo de contacto comerciales en la actualidad, se caracterizan por ser en general portátiles y por estar provistos en su mayoría de un software dedicado altamente versátil, capaz de procesar no solo el cálculo del ángulo de contacto mediante varios métodos, sino además de diferentes tipos de análisis de las características de tensión superficial y fuerzas ligadas a la interfase líquido-sólido. El inciso hace referencia brevemente a las prestaciones de algunas alternativas comerciales.

2.2.4.1. Goniómetro de bolsillo PG-X

El goniómetro de bolsillo PG-X (Figura 8) es descrito por Plasmatreteat USA, Inc (2016) como un instrumento compacto, con el que se puede medir el ángulo de contacto de casi todas las superficies, como por ejemplo: tableros, techos de automóviles o parachoques, botellas de vidrio o latas de metal. Los resultados proporcionan una base fiable para la evaluación y el control de diversos parámetros como la humectación (impresión, aplicación de lacado o recubrimientos), adhesión (pegado) o contaminación superficial (limpieza exhaustiva).

La bomba interna administra una gota en la superficie. La cámara integrada graba una secuencia de la gota y los resultados se presentan como un ángulo estático o funciones dinámicas de humectación y penetración.



Figura 8. Goniómetro PG-X.

Fuente: (Plasmateat USA, Inc, 2016)

2.2.4.2. Goniómetro JYSP-360

El goniómetro de ángulo de contacto JYSP-360 (Figura 9) es una alternativa similar en su construcción al goniómetro de Zisman. Se utiliza para determinar las propiedades de humectación de líquido a sólido, a través de la medición del ángulo de contacto, medición de fuerza adhesiva, fuerza de tensión, etc. Es ampliamente utilizado en petróleos, productos químicos, medicina, fabricación de papel, industria del tinte así como investigación científica. (Beijing United Test Co., Ltd., 2016)



Figura 9. Goniómetro JYSP-360.

Fuente: (Beijing United Test Co., Ltd., 2016)

2.2.4.3. *Goniómetro Attension Theta*

Attension Theta (Figura 10) es una alternativa altamente sofisticada que permite mediciones tanto estáticas como dinámicas, parte de la nueva generación de goniómetros digitales. Sus funciones y campos de aplicación son descritos por Biolin Scientific (2016): realiza gran variedad de mediciones automatizadas, que lo convierte en un instrumento muy versátil en laboratorios de investigación, industriales y de control de calidad.

Las mediciones incluyen: ángulo de contacto estático con el método de la gota sésil, método de la burbuja, ángulo de contacto dinámico con caída inclinada, energía libre superficial, tensión superficial/interfasial con la gota colgante, superficies 3D, rugosidad con el método de desplazamiento de fase, entre otros.

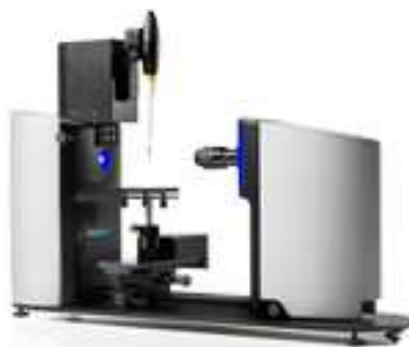


Figura 10. Goniómetro Attension Theta.

Fuente: (Biolin Scientific, 2016)

2.3. **Procesamiento digital de imagen**

La sección trata brevemente el campo encargado del procesado digital de imágenes (DIP), su captura por medios electrónicos, y las técnicas de DIP utilizadas en el trabajo, como son: reducción de ruido y detección de contornos en una imagen.

El proceso de digitalización de una imagen consiste en la adquisición que normalmente es realizada por cámaras digitales basadas en sensores CCD o CMOS. Dentro de las operaciones más comunes de procesamiento se encuentran

transformaciones geométricas (reducción, rotación, alargamiento), correcciones de color (ajustes de brillo y contraste), alineación de imágenes, segmentación, interpolación, reconocimiento de patrones o características en una imagen, etc. (González González, 2010)

2.3.1. Perturbaciones en una imagen digital

Las dos principales limitaciones en la precisión de la imagen son: el desenfoque y el ruido (Buades et al., 2005). Sin importar que características posea la cámara en una aplicación dedicada a imagen es siempre deseable mejorar la calidad de la misma para obtener mejores resultados.

El desenfoque en una imagen acorde a Shannon y Weaver (1998) es intrínseco a los sistemas de adquisición de imágenes, debido a que las imágenes digitales tienen un número finito de muestras y deben cumplir con las condiciones de muestreo de Nyquist-Shannon.

El ruido está siempre presente en imágenes digitales durante su adquisición, codificación, transmisión, y etapas de procesamiento. (Boyat & Joshi, 2015)

El efecto más indeseable producido por el ruido es la introducción de información basura en imágenes digitales, que resulta en efectos como los descritos por Dougherty (2009): Bordes poco realistas, líneas invisibles, esquinas, objetos borrosos y perturbaciones en escenas de fondo.

2.3.1.1. Tipos de ruido en una imagen

El ruido puede ser introducido durante la adquisición de la imagen o la transmisión de la información a través del canal. Debido a ello se recomienda la aplicación de un proceso de filtrado previo a un procesamiento de imagen de nivel superior.

Los investigadores han propuesto variedad de filtros lineales y no lineales para la eliminación de ruido de las imágenes. Las técnicas de filtrado se utilizan para eliminar

píxeles ruidosos, sin cambiar los valores de los píxeles no corrompidos. (Patel et al., 2016)

Para reducir dichos efectos, el conocimiento previo de los modelos de ruido es esencial para su posterior procesamiento. (Dougherty, 2009) Depende el modelo utilizado para caracterizar el ruido, la clasificación toma en cuenta la forma en que el ruido afecta a la imagen, llamados ruidos aditivos son: gaussiano, o de sal y pimienta. (Patel et al., 2016)

A. *Ruido gaussiano*

El ruido gaussiano también llamado ruido electrónico porque surge en los amplificadores o detectores, perturba por lo general a los valores de gris en las imágenes digitales (Boyat & Joshi, 2015). Es causado por fuentes naturales tales como vibración térmica de los átomos y la naturaleza discreta de la radiación en objetos calientes. (Boyat & Joshi, 2013)

El ruido gaussiano es un ruido estadístico, y toma su nombre debido a que su función de densidad de probabilidad es de distribución normal (también conocida como distribución de Gauss). Aquí, cada píxel de la imagen con ruido es la suma del valor real de píxeles y un valor aleatorio. La imagen se ve suave y ligeramente borrosa (Figura 11), cuyos píxeles son modificados a partir de su valor original una pequeña cantidad. (Petrou & Petrou, 2011)

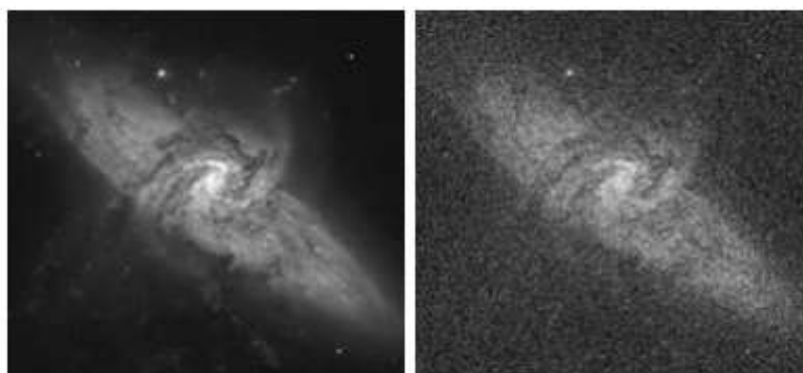


Figura 11. Imagen afectada por ruido gaussiano.
Fuente: (Gonzalez & Woods, 2002)

B. Ruido impulsional (ruido sal y pimienta)

El ruido conocido comúnmente como sal y pimienta, estadísticamente representa la caída de los valores de los datos originales de una imagen. El ruido no afecta totalmente a la imagen, sino a algunos píxeles cuyos valores son modificados. (Joshi, Boyat, & Joshi, 2014)

La Figura 12 muestra una imagen corrompida por ruido impulsional, en ella se puede notar la perturbación en varios píxeles aleatorios, lo que da la impresión de que sobre la imagen se han derramado sal (píxel blanco) o pimienta (píxel negro), efecto del cual toma su nombre el ruido.

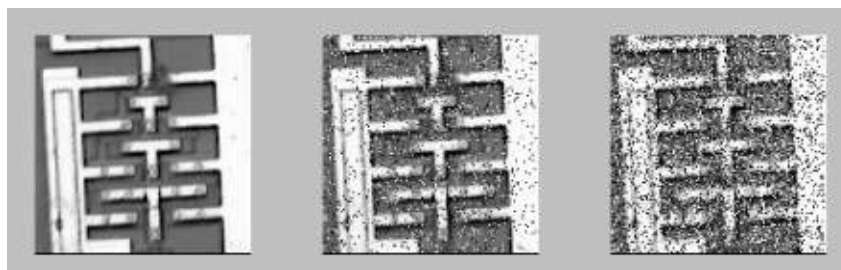


Figura 12. Imagen afectada por ruido impulsional.

Fuente: (González Cid, 2010)

De acuerdo a Boyat y Joshi (2015) el ruido sal y pimienta se ve en la transmisión de datos. Los valores de píxel de la imagen se sustituyen por los valores de los píxeles dañados o bien por el valor de píxel máximo o mínimo, es decir, 255 ó 0, respectivamente.

2.3.1.2. Reducción de ruido en una imagen (Denoising)

De acuerdo a lo estudiado en la sección anterior la eliminación de ruido permite la mejora en la calidad de la imagen, lo que la hace la primera técnica de procesamiento de imagen necesaria en el presente trabajo.

Los métodos de filtrado en el dominio espacial y filtrado en el dominio de la frecuencia son las dos técnicas fundamentales de eliminación de ruido en una imagen de acuerdo a Motwani et al. (2004) (Figura 13).

A. Filtrado de dominio espacial

La técnica de filtrado de imagen más tradicional es mediante filtros espaciales que pueden clasificarse en filtros no lineales y lineales:

- Filtros no lineales

Un filtro no lineal tiene por objetivo eliminar el ruido sin necesariamente identificarlo (Motwani et al., 2004). En general un filtro espacial aplica un filtro pasabajos a grupos de píxeles bajo la premisa de que el ruido ocupa la región superior en el espectro de frecuencias. En contraste, a pesar de que los filtros espaciales suprimen el ruido favorablemente, producen desenfoque en las imágenes.

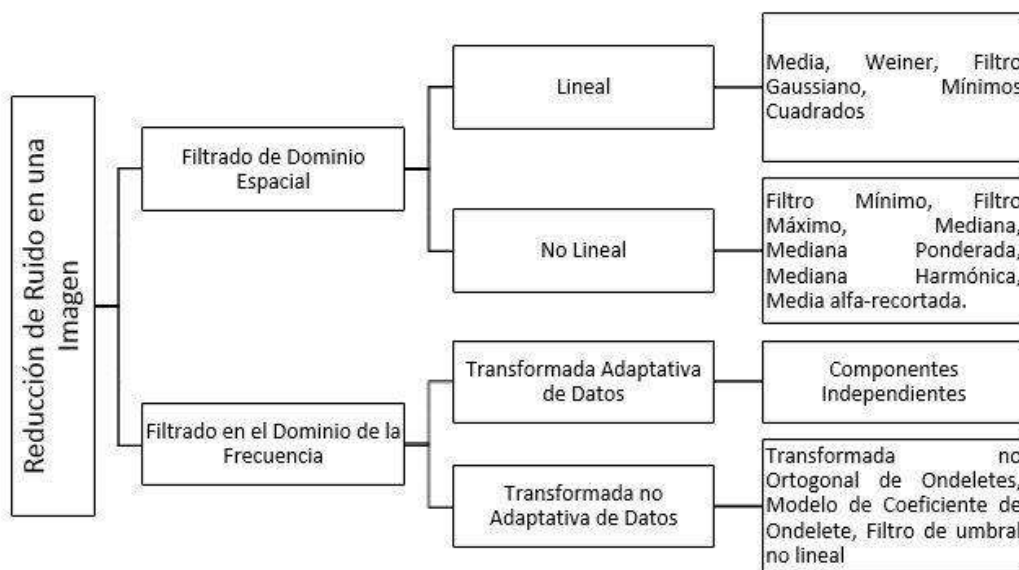


Figura 13. Clasificación de métodos de reducción de ruido en una imagen
Fuente: (Motwani et al., 2004)

- Filtros lineales

Un filtro lineal actúa de manera en que el valor de cada píxel de la imagen de salida es una suma ponderada de los vecinos al píxel correspondiente en la imagen de

entrada. (Gonzalez & Woods, 2002) El filtrado lineal se puede utilizar para suavizar así como para enfocar la imagen.

B. Filtrado en el dominio de la frecuencia

El filtrado de dominio espacial conocido como filtrado en el dominio de la frecuencia se basa en el teorema de convolución (Gonzalez & Woods, 2002). Hace uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) que es una implementación eficiente de la Transformada Discreta de Fourier (DFT).

- Transformada no adaptativa

En representaciones no adaptativas según Jung (2001), los parámetros de la transformación siguen siendo los mismos para todas las series de tiempo, independientemente de su naturaleza.

La transformada de ondeletes o análisis de ondeletes es la solución más reciente para superar las deficiencias de la transformada de Fourier. (Gonzalez & Woods, 2002) La eliminación de ruido de imagen que utiliza ondeletes consta de tres pasos: la descomposición de imagen, determinar el umbral de los coeficientes del ondelete y reconstrucción de la imagen. (Patel et al., 2016)

- Transformada adaptativa

El método implica que los parámetros de la transformación se modifican al depender de los datos disponibles. Mediante la adición de una etapa de selección de datos, casi todos los métodos no adaptativos pueden llegar a ser adaptativos. (Jung, 2001)

2.3.2. Correcciones de color (ajuste de brillo y contraste)

Mediante operaciones lineales de cada píxel se puede manejar el brillo, contraste y convertir fotografías en negativo. Gonzales & Woods (2002) menciona que las imágenes son representadas en forma de matrices. Por ejemplo, en el caso de la división se refiere a una operación como "una imagen que se divide para otra", la división se lleva a cabo entre los píxeles correspondientes en las dos imágenes. Otras operaciones aritméticas y lógicas se definen de manera similar entre los píxeles correspondientes en las imágenes implicadas.

2.3.3. Binarización de una imagen

La umbralización es una herramienta ampliamente utilizada en la segmentación de imágenes, donde el interés está en la identificación de los diferentes componentes homogéneos de la imagen. (Fu & Mui, 1981) Es útil en la discriminación de objetos de su fondo en muchas escenas, necesaria en procedimientos como la binarización.

Hay dos tipos de umbrales: binivel y multinivel. Para binarizar una imagen resulta conveniente la utilización del primero, la cual supone que la imagen viene de dos componentes, frontal y fondo que tienen claramente diferente distribución de niveles de gris. (Abljtaleb, 1989)

Por tanto se trata de encontrar el valor umbral entre los dos grupos. Cada píxel de nivel de gris que está por encima del umbral se asigna al primer plano y en el caso contrario se asigna al fondo. De esta manera se obtiene una imagen con valores en formato binario, como se muestra en la Figura 14.

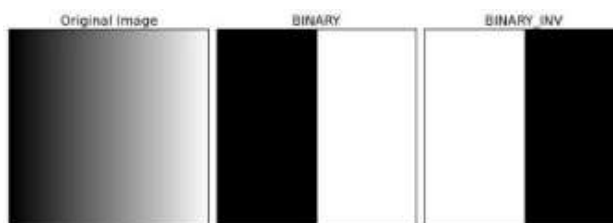


Figura 14. Imagen binarizada.
Fuente: (Gonzalez & Woods, 2002)

2.3.4. *Detección de contornos en una imagen*

Los bordes de una imagen digital (Satorres Martínez, 2006) se pueden definir como transiciones entre dos regiones de niveles de gris significativamente distintos. La detección de contorno es parte de un proceso de aislamiento, que consiste en la identificación de objetos dentro de una imagen (Macrini & Baruh, 2007).

La mayoría de las técnicas para detectar bordes emplean operadores locales basados en distintas aproximaciones discretas de la primera y segunda derivada de los niveles de grises de la imagen. (Satorres Martínez, 2006)

No obstante surgen varias complicaciones para aplicar una técnica válida para la detección de contornos en una imagen. La primera complicación ocurre debido a la digitalización. Es poco probable que una imagen sea muestreada de manera tal que todos los contornos correspondan exactamente con un pixel del borde. La segunda complicación es el clásico problema del ruido. (Macrini & Baruh, 2007)

2.3.4.1. *Métodos generales de detección de bordes*

Existe una amplia bibliografía en lo que se refiere a detección de bordes en una imagen digital, varios métodos y algoritmos han sido desarrollados para dicho propósito, pero básicamente se puede resumir en dos clases: el método basado en operadores diferenciales (Haralick, 1984) y, el fundamentado en momentos invariantes (Ghosal & Mehrotra, 1994).

Operadores diferenciales

Para el modelo de operadores diferenciales, se tienen los operadores direccionales o Diferenciación Direccional (DD), como la derivada direccional y para los operadores rotacionales invariantes o Diferenciación Rotacional Invariante (RID), el Laplaciano y segunda derivada direccional en dirección del gradiente. Su utilización depende de la aplicación.

El operador de Diferenciación Direccional (DD) más comúnmente usado en la detección de bordes es representado por las derivadas direccionales hacia una determinada dirección.

Dentro de los operadores rotacionales invariantes los de mayor uso para la detección de bordes son el Laplaciano (∇^2) y la primera y segunda derivada direccional a lo largo del gradiente ($\frac{d}{dn}, \frac{d^2}{dn^2}$).

Tanto los operadores DD como los operadores RID se basan en las derivadas de una función que puede ser en una dimensión (fila o columna), o en dos dimensiones (fila, columna) y las propiedades de los operadores como son cruces por cero o cuantificación de cambios. (Freire Espinoza, 1998)

Varios autores han hecho uso de estos operadores para el desarrollo de algoritmos de detección de bordes, como fue sugerido en primera instancia por Prewitt (1970). Le siguieron estudios de Haralick (1984), Hueckel (1973), Brooks (1978), entre otros.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL GONIÓMETRO

El siguiente capítulo detalla los componentes del goniómetro, propuesto en el inciso 1.4 correspondiente a la descripción y alcance del proyecto. También consta el procesamiento digital de la imagen para obtener el ángulo de contacto y el diseño de la Interfaz Humano-Maquina HMI para el manejo del equipo por el usuario.

3.1. Componentes del sistema

La construcción del goniómetro se basa en el modelo propuesto por Neumann y Good (1979), descrito en el inciso 2.2.2. El proyecto posee dos componentes principales, el prototipo (formado por: la estructura mecánica, el sistema de goteo, el sistema de adquisición de imagen en entorno controlado y el sistema de iluminación) y el software especializado.

En el diagrama general de bloques de la Figura 15 se describen los principales componentes del equipo, los cuales marcan los requerimientos mínimos de funcionamiento (Figura 2).

3.2. Requerimientos del prototipo

El goniómetro posee tres componentes principales: el primero encargado del goteo, es decir, el sistema que permite la caída de una gota de 10ul, 20ul o 30ul sobre una superficie determinada por el usuario. El segundo, un entorno controlado que permite la adquisición de la imagen y por último un sistema de iluminación que pueda ser controlado.

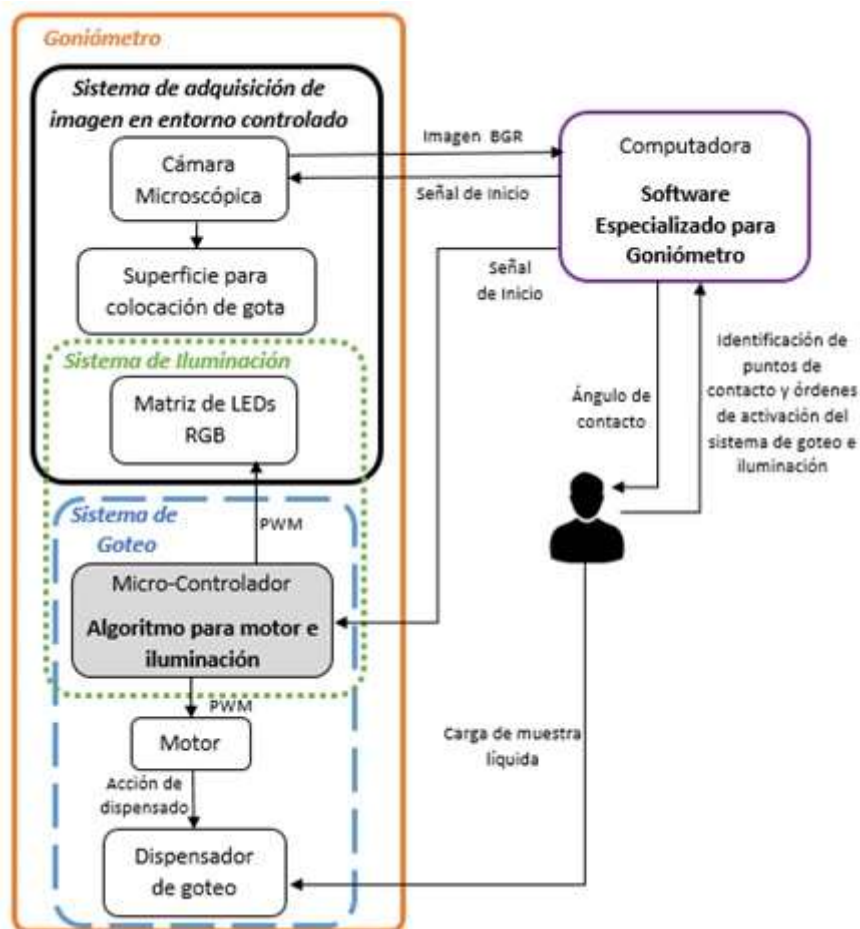


Figura 15. Diagrama general del goniómetro

Para la construcción del goniómetro se requiere:

- **Sistema de goteo:** para dispensar el líquido es necesario una pipeta con capacidad mínima de 10ul y máxima de 100ul, con puntas desechables resistentes para el tratamiento en autoclave. Un motor de peso menor a 100g, de tamaño compacto y un torque apropiado para el pulsador de pipeteo.
- **Sistema de iluminación:** con la finalidad de obtener una buena imagen de la gota, es preciso tener una iluminación LED RGB; ya sea directa o indirecta sobre la muestra, tensión de alimentación menor a 12VDC y

corriente continua para su control de brillo a través de Modulación por Ancho de Pulsos (PWM).

- **Sistema de adquisición de imagen en entorno controlado:** debe permitir al usuario colocar con comodidad la superficie donde se ubica la gota del líquido. No debe permitir el paso de luz externa sobre la gota. El entorno puede modificar su altura y debe tener una superficie no reflectora.
- **Control del sistema de iluminación y goteo:** es necesario un microcontrolador con 2 salidas PWM para la iluminación LED RGB y el motor, el sistema debe ser alimentado con 110-120VAC y con una salida USB para la comunicación con el computador.
- **Tamaño y peso del goniómetro:** el peso debe ser menor a 4Kg, con una dimensión de 32x25x45cm para su transportación. El equipo no debe tener piezas desmontables para el usuario a excepción de la pipeta.

3.2.1. Sistema de goteo

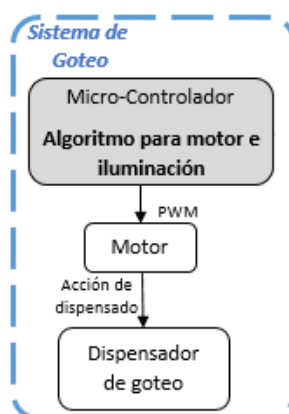


Figura 16. Sistema de goteo

Tabla 1.
Parámetros de elección para pipeta

Pipeta TopPette Monocanal DragonLab	Pipeta Monocanal E4 XLS+	Jeringa para insulina
---	-----------------------------	--------------------------

➔ **Continúa**

Capacidad de volumen	10 - 100 uL	10 – 100 uL	0 – 1 mL
Precisión	100 μ L: $\leq 0,15$ % 50 μ L: $\leq 0,40$ % 10 μ L: $\leq 1,50$ %	0,1 μ L: $\leq 1,0$ % 0,12 μ L: $\leq 0,24$ % 0,15 μ L: $\leq 0,15$ %	No Aplica
Dispensado automático	No	No	No
Puntas Intercambiables	Si	Si	No
Costo	USD 30,00	USD 600,00	USD 0,30

Para el sistema de goteo se requiere un dispensado de 10ul, 20ul y 30ul y puntas intercambiables para evitar contaminación en la muestra, las opciones para el mecanismo de goteo se presentan en la Tabla 1.

Por características de capacidad volumétrica y costos, se propone el uso de la pipeta TopPette de un solo canal, con capacidad de 10-100ul. La pipeta es de peso ligero y diseño ergonómico, tiene una pantalla analógica que permite leer claramente el volumen y se encuentra calibrada con la norma ISO 8655-2. Posee las siguientes medidas: altura de 26,5cm (incluida la punta), ancho de 2cm y un largo de 4cm. La punta desechable de la pipeta es de capacidad de 100ul, color amarillo y de material resistente para el tratamiento en autoclave.

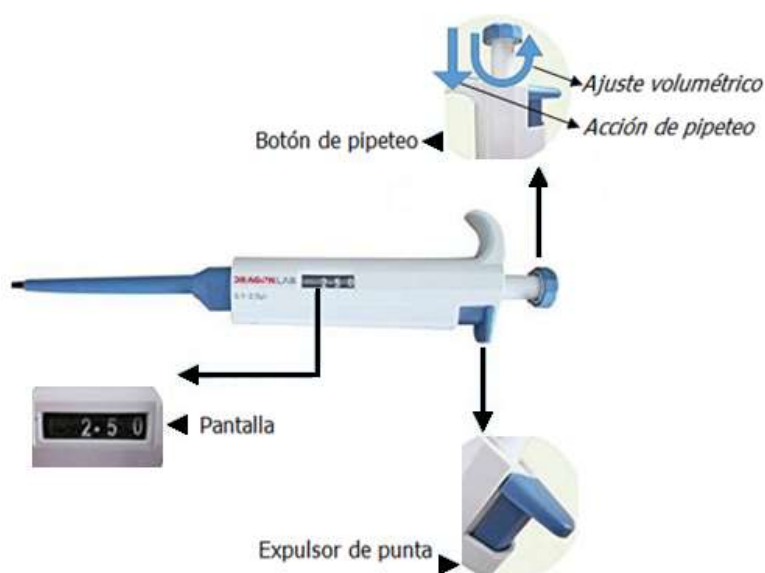


Figura 17. Pipeta mecánica de una sola canal Dragon Lab
Fuente: (DragonLab, 2016)

La ubicación de la gota debe realizarse sobre una superficie plana, como se menciona en el método utilizado de la gota sésil, descrito en el inciso 2.1.2.2., en consecuencia el dispensador debe ser colocado de forma perpendicular sobre la superficie de muestra. El principal parámetro de elección es la sujeción, la Tabla 2 indica otros parámetros.

Tabla 2.
Parámetros de elección para pinza de pipeta

	Soporte para Pipeta de prototipo No.1	Pinza universal de 3 dedos
Sujeción de la pipeta	Baja	Alta
Integración con la estructura	Alta	Media
Aspecto Visual (Estética)	Alta	Alta
Material	PVA	Acero Inoxidable
Ergonomía (pipeta)	Baja	Alta
Costo	USD 30,00	USD 11,00

Dado que existirá presión sobre el pulsador de pipeteo se debe asegurar la pipeta de manera firme pero con la posibilidad de desmontar la pipeta. La opción seleccionada es la pinza universal de 3 dedos (Figura 19) por la alta sujeción de la pipeta a diferencia del soporte del primer prototipo (Figura 18).

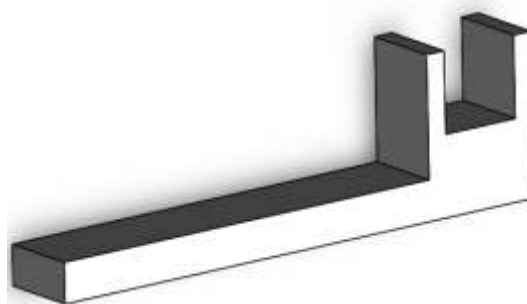


Figura 18. Soporte pipeta goniómetro prototipo No. 1

Para la ubicación de la pinza universal de 3 dedos debe existir una pared lateral. La altura donde debe ser fijada está dada por la dimensión de la pipeta y la altura del entorno controlado. Dado que la pinza debe estar fija se realiza un roscado en la pinza universal.



Figura 19. Pinza universal de 3 dedos.

Fuente: (Proinca, 2016)

Dentro de la pared lateral se ubica el motor y la pinza de sujeción. En la Figura 20(A) se muestra los cortes de la pared lateral del primer prototipo para colocar el soporte de la pipeta, mientras que la Figura 20(B) muestra la pared lateral donde se ubica la pinza para la pipeta y el soporte del motor, el material de la pieza es Polimetilmetacrilato (PMMA) de 9mm de espesor o más conocido como acrílico, el material permite realizar cortes exactos en una máquina laser, además de ser un material liviano.

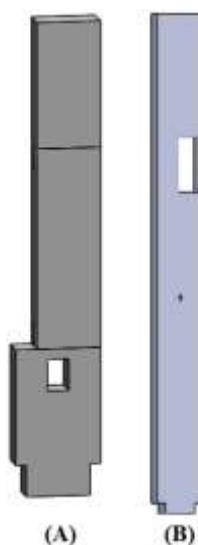


Figura 20. (a) "Pared lateral" 1er diseño (b) "pared lateral" 2do diseño

Sobre el pulsador de pipeteo se debe realizar la presión necesaria para despachar el líquido. Las características principales son el tamaño, peso y torque del motor que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.
Parámetros de elección para motor

	Nema 17 STP-MTR-17048 (Motor a pasos)	Motor MG958 (Servo motor)
Peso	210 gramos	65 gramos
Dimensiones	55,1 x 42,1 x 55,1mm	40,2 x 20,1 x 36,8mm
Torque	5,97Kg-cm	15Kg-cm
Alimentación	12VDC	4,8 a 6,6VDC
Accesorios para eje	Si	No
Costo	USD 30,00	USD 33,00

El motor que se elige es el motor MG958 por su peso de 65 gramos y un torque aproximado de 15Kg.cm, torque necesario para realizar el pipeteo de la muestra. Otras características del motor se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.
Características motor MG958

Par en parada (4.8VDC):	18,0kg.cm
Par en parada (6,6 VDC):	20,0kg.cm
Temperatura de funcionamiento:	-20 a 60°C
Velocidad de funcionamiento (4.8V):	0,003 grados/s
Velocidad de funcionamiento (6.0V):	0,0025 grados/s

Fuente: (TowerPro, 2016)

El eje del motor posee accesorios (Figura 21) para realizar la presión necesaria en el dispensado del producto, el mismo debe ser colocado exactamente sobre el pulsador del pipeteo; por lo tanto se debe realizar un “soporte” al motor.



Figura 21. Accesorios motor MG958

El diseño del soporte para el motor está basado en las dimensiones del motor y se muestra en la Figura 22:

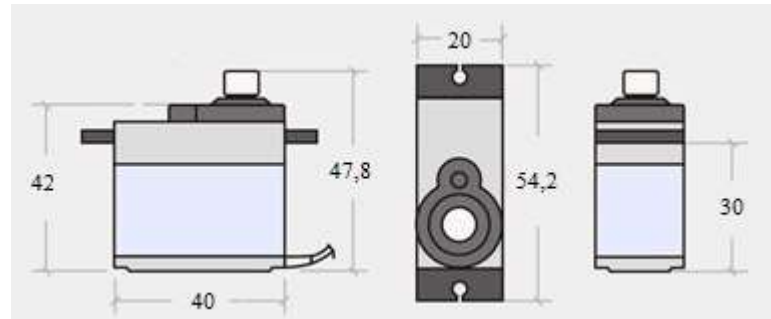


Figura 22. Dimensiones en milímetros del motor MG958.
Fuente: (TowerPro, 2016)

El soporte para motor (Figura 23) se imprime en una máquina 3D con acetato de polivinilo (PVA).

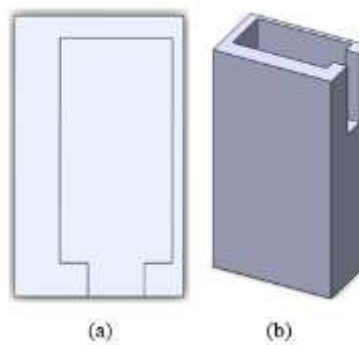


Figura 23. Soporte para motor. (a) Vista superior (b) Vista 3D

3.2.2. Sistema de iluminación



Figura 24. Sistema de iluminación

El sistema de iluminación se realiza mediante un arreglo de LED RGB, para la realización de pruebas con 4 colores (rojo, verde, azul y blanca) y una alimentación menor a 12VDC para el control de brillo. El sistema tiene como objetivo evitar que exista un reflejo de la gota en la superficie e impedir que la luz externa intervenga en el entorno controlado. Las opciones para la Matriz de LEDs RGB son (Tabla 5):

Tabla 5.
Parámetros de elección de matriz RGB

	Módulo LED RGB	Cinta de LED's Sylvania
Tipo de LED	RGB SMD (5050)	RGB SMD (5050)
Lúmenes	1280 Lm	1000 Lm
Alimentación	12VDC	24VDC
Encapsulamiento	Módulo de plástico rígido IP65	Manguera de plástico flexible
Dimensión de la matriz	3 x 1	10 x 1
Costo	USD 0,80/módulo	USD 5,00/metro

Se escoge el módulo LED RGB dado que su alimentación es de 12VDC, voltaje que puede ser suministrado por una fuente de tamaño acorde a las dimensiones del prototipo. Posee 3 entradas para los colores rojo(R), verde(G) y azul(B) (Figura 25). El encapsulamiento permite que sea ubicado de una manera apropiada y estable en el entorno controlado.

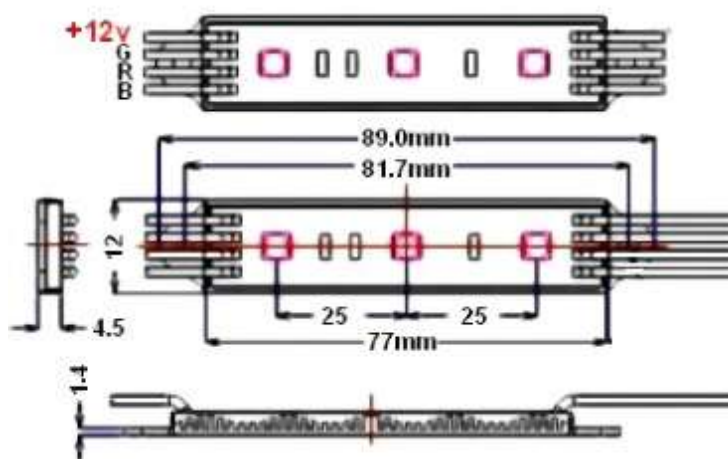


Figura 25. Módulo LED RGB.
Fuente: (ShopTronica, 2016)

Existen dos opciones para la configuración de la luminaria: la primera consiste en una iluminación directa al colocar las luminarias en la parte posterior de la muestra

(Figura 26); y la segunda, una iluminación indirecta al ubicar la matriz de LEDs RGB sobre la superficie de la muestra.

La ubicación más apropiada de la matriz de LEDs RGB, es la segunda opción dado que se debe controlar la luz externa y la luz de la muestra debe ser indirecta para obtener una imagen más clara, que evitan los problemas ya mencionados.

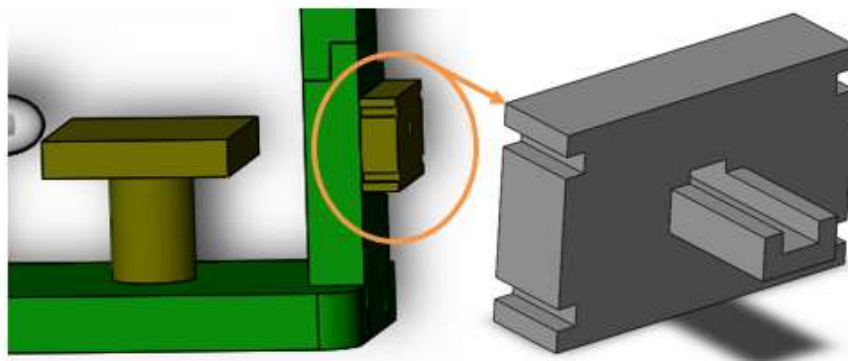


Figura 26. Base para luz posterior goniómetro No. 1

3.2.3. Sistema de adquisición de imagen en entorno controlado



Figura 27. Sistema de adquisición de imagen en entorno controlado

Una de las características más importantes del entorno controlado es proteger la muestra de la contaminación como se menciona en el inciso 2.2.2. y debe permitir una imagen de la gota que exponga un contorno definido y la diferenciación del fondo del entorno y la gota; el usuario debe tener comodidad para manipular la superficie y la muestra.

Para la superficie de colocación de la gota se diseñaron 3 opciones para cubrir los requerimientos del goniómetro. En primer lugar se realizó un porta-muestras sin recubrimiento para permitir la entrada de la luz posterior (Figura 28).

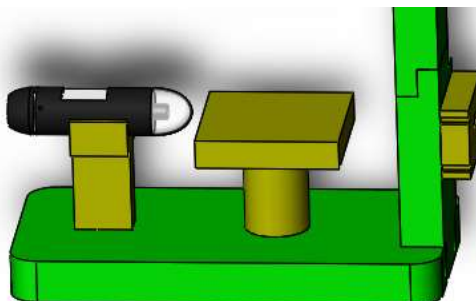


Figura 28. Entorno controlado No. 1

En segundo lugar un entorno cubierto donde se permite el ingreso de la punta de la pipeta (parte superior del entorno controlado), la cámara (parte frontal del entorno controlado) y una pared lateral que se remueve completamente, como se muestra en la Figura 29.

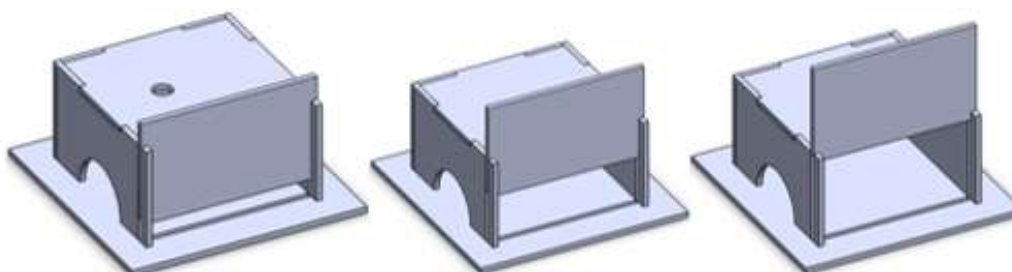


Figura 29. Entorno controlado No. 2

En tercer lugar un entorno cubierto que permite el ingreso de la punta de la pipeta y la cámara, pero no existe una pared lateral que se puede remover. La muestra es colocada con una paleta que se retira completamente como se muestra en la Figura 30.

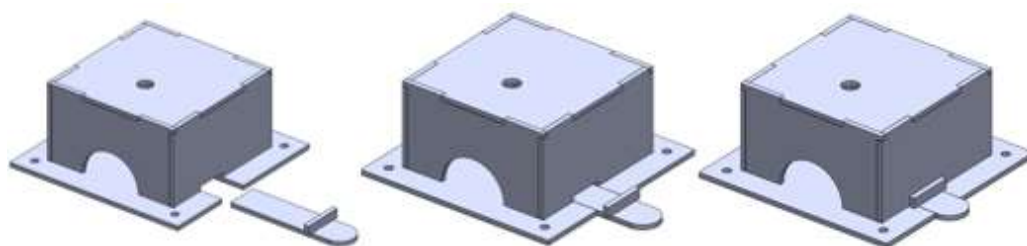


Figura 30. Entorno controlado No. 3

Tabla 6.
Parámetros de elección para entorno controlado

	Entorno No.1	Entorno No.2	Entorno No. 3
Evita perturbaciones externas	No	Si	Si
Fácil manejo de la muestra	No	No	Si
Evita la contaminación de la muestra	No	Si	Si

Mediante las características resumidas en la Tabla 6 de los 3 entornos controlados se escogió el entorno controlado No.3 porque evita las perturbaciones externas como la luz de ambiente, permite un fácil manejo de la muestra por su paleta y evita contaminación de la muestra por agentes externos.

El siguiente punto del entorno controlado es la cámara la cual debe permitir ver a detalle el contorno de la gota, por ende es necesaria una cámara microscopio. Dos opciones están indicadas en la Tabla 7.

Tabla 7.
Parámetros de elección para cámara Celestron.

	Cámara Celestron #44302	Cámara Celestron #44308
Sensor de imagen	2 MP CMOS (1600x1200 matriz de píxeles)	5 MP CMOS (1600x1200 matriz de píxeles)
Aumento	10 a 40x y 150x para un monitor de 19 "	20 y 200x para un monitor de 19 "
Conexión USB	2.0 (para la alimentación de un ordenador)	2.0 (para la alimentación de un ordenador)

→ Continúa

Compatibilidad de software	Windows XP o superior	Windows XP o superior
Resolución de video	25 fps	30 fps
Iluminador	6 LEDs blancos (en configuración de anillo)	8 LEDs blancos (en configuración de anillo)
Accesorios	El soporte del metal ajustable	NA
Peso	4 onzas. (113 gramos)	2 libras. (907gramos)
Dimensiones	108 mm x 32 mm	110 mm x 35 mm
Costo	USD 25,00	USD 40,00

Fuente: (Celestron, 2016)

La elección es la cámara Celestron #44302 (Figura 31), dado que su peso es de 113 gramos e incluye un soporte de metal ajustable. Además los sensores de imagen permiten una fotografía de la gota con las características anteriormente mencionadas.



Figura 31. Cámara Celestron.

Fuente: (Celestron, 2016)

Se realizó el diseño de una pieza que se muestra en la Figura 32, el cual permite a la cámara estar de manera paralela al entorno controlado, mas no permite un agarre de la cámara. Por lo tanto se usa el soporte que incluye la cámara que permite una manipulación de la altura al igual que brinda agarre a la cámara.



Figura 32. Soporte para cámara goniómetro No.1

El soporte permite obtener el correcto perfil de la gota a diferencia del primer diseño donde la cámara puede ser ubicada en posiciones equivocadas y tener falsos ángulos de contacto.



Figura 33. Soporte cámara Celestron
Fuente: (Celestron, 2016)

Para mover el entorno controlado, se realiza dos piezas por separado. La primera, es la base del recubrimiento del entorno controlado y la segunda, es un soporte para el entorno controlado, entre las dos piezas se colocará un perno el permite un movimiento hacia arriba y abajo, para regular la altura del entorno controlado y obtener la imagen de la gota, esto se muestra en la Figura 34.

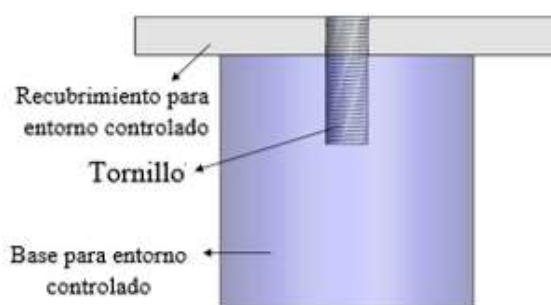


Figura 34. Sistema para movimiento de entorno controlado

La integración de los sistemas diseñados (sistema de goteo, sistema de iluminación y sistema de adquisición de imagen en entorno controlado) se muestra en el Anexo A.

3.3. Control de entorno y sistema de goteo

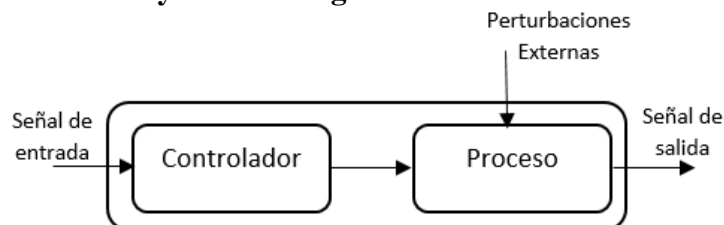


Figura 35. Diagrama de bloques del sistema de control de entorno y sistema de goteo

3.3.1. Controlador

El prototipo dentro de su proceso posee las siguientes variables:

- **Variables de entrada:** señal de inicio del computador.
- **Variable de salida:** PWM de matriz RGB y del motor.
- **Perturbaciones externas:** luz externa al entorno controlado.

Dichas variables se maneja a través de un controlador el cual permite una oportuna manipulación. Las variables que maneja el controlador son tres: dos de tipo analógicas (PWM) y un contador. También debe contar con comunicación serial para el intercambio de datos con el computador (software especializado para goniómetro). En la Tabla 8 están detalladas 4 opciones para controlador del sistema.

Tabla 8.
Parámetros de selección para el controlador

	FPGA	Arduino	ATMEGA	Microchip
Comunicación	USB	USB	USB	USB
Memoria	18MB	1KB	1KB	1KB
Modularidad	No	Si	Si	Si
Tamaño	15x15cm	4x4cm	3,5x1cm	3,5x1cm
Costo	USD 30,00	USD 40,00	USD 6,50	USD 10,00

El controlador que se elige es un ATMEGA328P, dado que su tamaño permite ser ubicado en la caja de control y su programación puede ser realizada en plataformas libres como Arduino IDE (Arduino, 2005). El código (Figura 36) para el manejo del motor y la matriz de LEDs RGB es embebido en el microcontrolador.

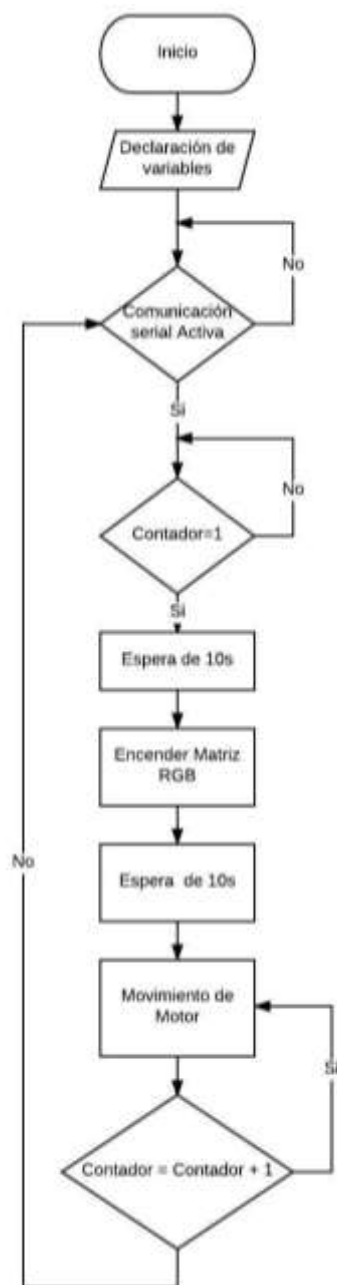


Figura 36. Flujograma de programación de controlador

3.3.1.1. Comunicación del prototipo con el software

Para la comunicación del prototipo (controlador) y el computador (software especializado para goniómetro) es necesario establecer el protocolo adecuado. Las principales características para la elección del protocolo son la velocidad y la universalidad del conector. El protocolo de comunicación que se elige es el serial USB1.1 con una velocidad de comunicación de 12Mbps, debido a que la aplicación no requiere una conexión de alta velocidad por la reducida cantidad de variables a controlar en el sistema. Además se consideró que el puerto USB tipo A se encuentra en la gran mayoría de computadores.

La comunicación USB con el controlador debe realizarse mediante un circuito CP2102. En el mercado existe dicho circuito de forma empaquetada que permite una fácil interconexión con el controlador ATMEGA328P (Figura 37). La velocidad de comunicación es de 12 Mbps, alimentación de 5VDC y puerto tipo A (Macho).



Figura 37. Módulo CP2102

Fuente: (Electronic Product Solutions, 2016)

3.3.2. Alimentación del equipo

Para la alimentación de la matriz de LEDs es necesario un voltaje de 12VDC (Tabla 6) y aproximadamente 1A, mientras que para el motor es necesario una alimentación de 5VDC y una corriente máxima de 2A. El peso del transformador debe ser inferior a 300 gramos. El transformador existente en el mercado con estas características (Tabla 9) es el LLEST.

Tabla 9.
Características de transformador

Voltaje de entrada	110VAC
Voltaje de salida	12VDC
Corriente de salida	2 ^a
Tamaño	110 x 78 x 36 mm
Peso	270 gramos
Costo	USD 25,00

3.3.3. Control de matriz de LEDs

Para controlar la matriz de LEDs, se menciona en el inciso 3.2.2, una señal PWM del controlador que permite la variación del flujo luminoso. A través del desarrollo experimental se desea encontrar el flujo luminoso adecuado para la aplicación mediante la variación del ciclo de trabajo de la señal. Para realizar el control de la señal se utiliza un mosfet IRF540 con un tipo de empaquetado TO0220, que disipa menos calor y permite obtener la máxima cantidad de flujo luminoso en la matriz de LEDs. (Anexo B)

3.3.4. Control de motor

Para controlar el motor que activa sobre la pipeta la acción de dispensado una gota del líquido, se utiliza una señal PWM mencionada en el inciso 3.3.1. El motor MG958 posee tres entradas: dos de alimentación de 5VDC y una de PWM.

Como la entrada de alimentación del sistema es de 12VDC se requiere un regulador de voltaje a 5VDC. (Anexo B)

3.4. Diseño de software especializado

El software especializado para goniómetro tiene como propósito manipular la imagen adquirida con la cámara para facilitar el ingreso de datos por parte del usuario

y las tareas de cálculo matemático, que permitan llegar al objetivo final, que es la obtención del ángulo de contacto.

Para ello se optó por dividir el trabajo computacional en tres programas, que posteriormente son integrados: énfasis en píxeles de interés, detección de contornos, cálculo del ángulo de contacto. Adicional se prevé el desarrollo de una HMI, que permita la interacción entre el prototipo y el usuario, que integra el hardware y el software anteriormente descrito.

En la etapa de adquisición de la imagen, la calidad de la misma dependerá netamente de la precisión en el control del entorno dispuesto para la colocación de la gota, caso contrario resultará bastante complicado obtener una imagen legible para las demás etapas del programa únicamente vía software.

Con el fin de satisfacer el requerimiento de portabilidad del software y programación en código abierto, los algoritmos anteriormente mencionados fueron sido implementados en C++ (Stroustrup & Bell Labs, 1983), con el soporte de las funciones de la biblioteca libre especializada en visión mediante computadora OpenCV (Intel Corp., 1991).

3.4.1. Énfasis en píxeles de interés

Se requiere desarrollar un programa capaz de realizar las tareas descritas por el diagrama de flujo de la Figura 39. Se debe iniciar la conexión del programa con la cámara microscópica para visualizar la imagen en tiempo real, luego de ello se captura una imagen sobre la cual se realiza el procesamiento.

Inicialmente se mejora la exposición de imagen (ajuste de brillo y contraste), a la parte de interés en la misma (gota). A continuación, mediante un umbral de blanco sobre negro; se transforman a blancos todos los píxeles por debajo del umbral, mientras que únicamente la gota y la superficie horizontal sobre la cual fue depositada son transformadas a píxeles negros.

Para tal propósito se propone un programa que permite la adquisición de una imagen desde la cámara microscópica en tiempo real y la manipulación de estos tres parámetros en una pantalla con la distribución de la Figura 38.

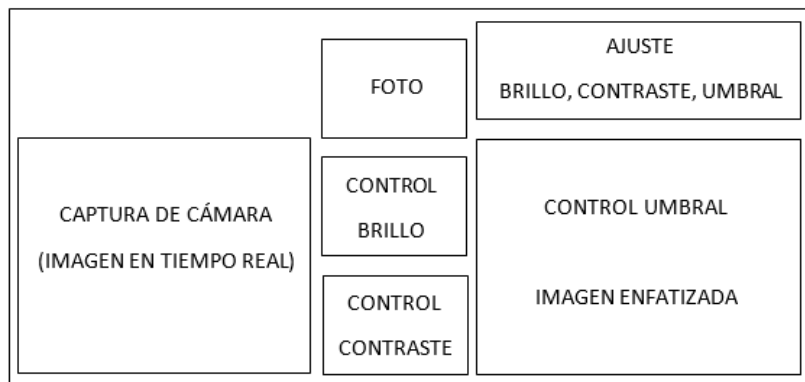


Figura 38. Software de manipulación de parámetros de exposición de imagen

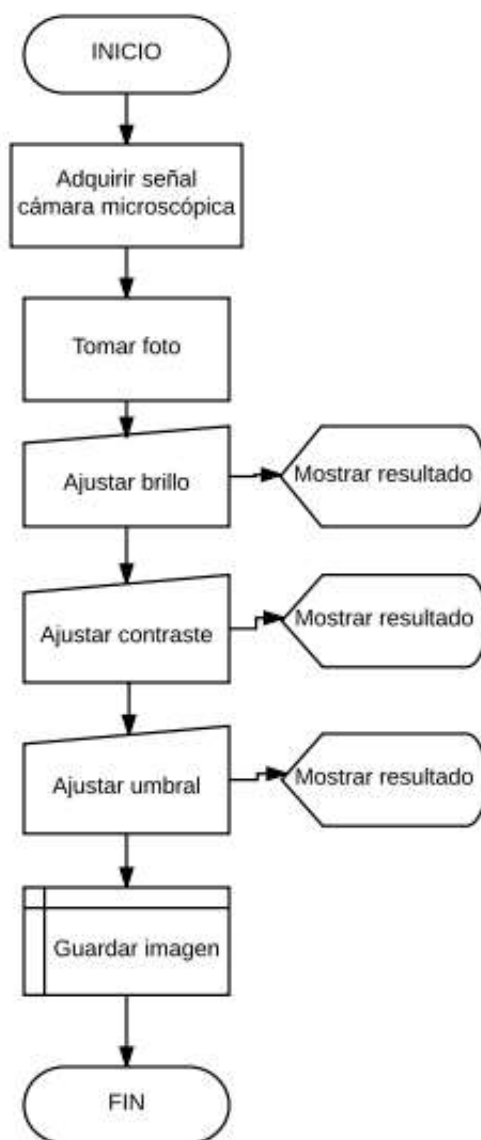


Figura 39. Diagrama de flujo para énfasis en pixeles de interés

3.4.2. Obtención de contornos

El segundo programa debe acceder a la imagen guardada por el primero, para la obtención de sus contornos se sigue el procedimiento descrito por el diagrama de flujo de la Figura 40.

Una vez que el proceso de énfasis en los píxeles de interés haya tenido lugar, la gota necesita ser descrita mediante su contorno. Para lo cual se desarrolla un programa

que utiliza el algoritmo propuesto en el trabajo de Suzuki y Abe (1985) disponible en la librería OpenCV para detección de contornos.

En primera instancia se realiza un proceso de umbralización de la imagen, que no es otra cosa que convertir la imagen de entrada (escala de grises, color) en una imagen en formato binario de la siguiente manera:

$$salida(x,y) = \begin{cases} \text{valor max, si} & \text{entrada}(x,y) > \text{umbral} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3.1)$$

El problema se presenta cuando existe ruido en la imagen de entrada que casualmente tiene un valor cercano al de los bordes que se busca detectar, por lo que la algoritmia prevé la introducción de una técnica de filtrado previo a la umbralización, para reducir el efecto perjudicial.

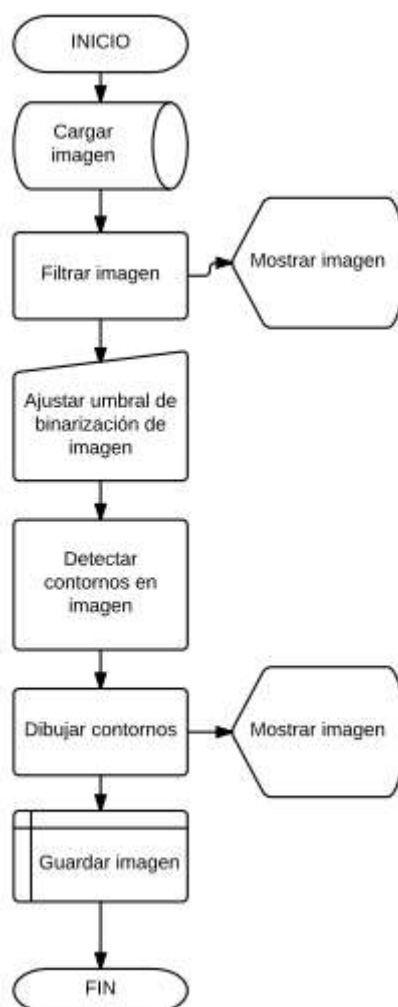


Figura 40. Diagrama de flujo segunda etapa de software

Una vez detectados los puntos del contorno de la gota, es necesario únicamente dibujarlos y guardarlos en una imagen que es utilizada en la siguiente etapa. El programa propuesto permite la selección del valor de umbral adecuado para la imagen de entrada, que da como resultado el contorno de la gota y la superficie de contacto, en tres pantallas con una distribución como se muestra en la Figura 41.

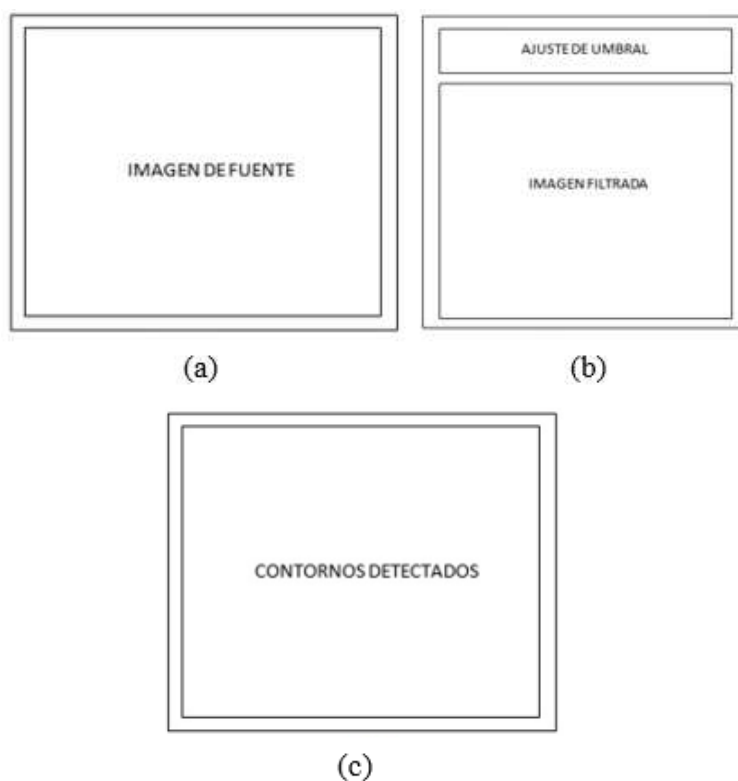


Figura 41. Software de detección de contornos (a) Imagen de fuente (b) Imagen filtrada y ajuste de umbral (c) Imagen de salida (contornos)

3.4.3. Cálculo del ángulo de contacto

En la última etapa se realiza el cálculo del ángulo de contacto, para lo que se diseñó un programa con las capacidades detalladas en el diagrama de flujo de la Figura 42. En primera instancia se debe cargar la imagen entregada por la etapa anterior, para con ella realizar el proceso predeterminado definido de la siguiente manera:

1. Determinar los puntos de contacto. Son el lugar de la intersección entre la circunferencia y la línea horizontal.

2. Determinar la ecuación de la superficie del sustrato. Es el lugar donde la gota toca el sustrato (horizontal).
3. Determinar la ecuación de la circunferencia que mejor se ajuste al contorno de la gota.
4. Determinar el ángulo de contacto. Se define como el ángulo entre las pendientes de la circunferencia en los puntos de contacto y la línea horizontal.



Figura 42. Diagrama de flujo tercera etapa de software

Se requiere la intervención del usuario para la identificación de los puntos de contacto de las interfases: donde la gota entra en contacto con el sustrato, y un punto adicional en el contorno.

La intervención del usuario se utiliza debido a que la determinación de los puntos de contacto resulta mucho más fácil para un ser humano que la implementación de un algoritmo que implique solamente la lógica del computador.

Al partir de esta premisa, la ecuación de la horizontal que representa el sustrato se puede definir como:

$$m_{sustrato} = \frac{y_{izq} - y_{der}}{x_{izq} - x_{der}} \quad (3.2)$$

Dónde:

$m_{sustrato}$: es la pendiente de la superficie

x_{izq}, x_{der} : son las coordenadas en el eje x de los puntos de contacto definidos por el usuario

y_{izq}, y_{der} : son las coordenadas en el eje y de los puntos de contacto definidos por el usuario.

Los tres puntos definidos por el usuario, permiten además la determinación de la circunferencia de “ajuste” al contorno de la gota, mediante su ecuación ordinaria.

$$(x - h)^2 + (y - k)^2 = r^2 \quad (3.3)$$

Donde el centro de la circunferencia es el punto (h, k) y su radio es r . Para tal propósito se define en primera instancia el triángulo formado por estos tres puntos, cuyos vértices circunscriben la circunferencia en cuestión, como se muestra en la Figura 43.

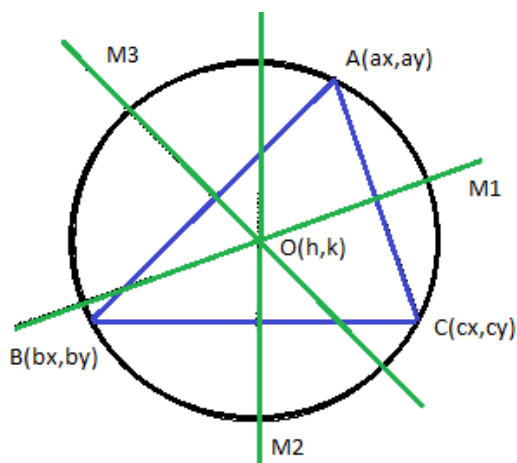


Figura 43. Circunferencia circunscrita a un triángulo

El lugar de la intersección de las mediatrices, es el centro de la circunferencia de interés, de la siguiente manera:

Para:

$$A(a_x, a_y) B(b_x, b_y) C(c_x, c_y) \rightarrow \text{Puntos definidos por el usuario}$$

Se puede obtener:

$$m_{M1} = \frac{-1}{\frac{a_y - c_y}{a_x - c_x}} \quad m_{M3} = \frac{-1}{\frac{b_y - a_y}{b_x - a_x}} \quad m_{M2} = \frac{-1}{\frac{c_y - b_y}{c_x - b_x}} \quad (3.4)$$

Dónde:

m_M : es la pendiente de las mediatrices del triángulo.

Se sabe que la ecuación de una recta viene dada por:

$$y = mx + b \quad (3.5)$$

Se tiene el siguiente sistema de ecuaciones para encontrar el valor del centro (h, k) :

$$\begin{cases} k = m_{M1}h + b \\ k = m_{M2}h + b \\ k = m_{M3}h + b \end{cases} \quad (3.6)$$

El radio de la circunferencia se obtiene a partir de la distancia entre el centro y uno de los vértices del triángulo conocidos:

$$r = \sqrt{(a_x - h)^2 + (a_y - k)^2} \quad (3.7)$$

Ahora se pueden combinar todos los datos recogidos y por lo tanto determinar el ángulo de contacto de una gota sobre un sustrato. La pendiente de la tangente a una curva en cualquier punto viene dada por la derivada en dicho punto. Al usar derivación implícita, se sabe que la pendiente de la línea tangente a un círculo está dada por:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}((x - h)^2 + (y - k)^2) &= \frac{d}{dx}(r^2) \\ 2(x - h) + 2(y - k)y' &= 0 \\ y' &= -\left(\frac{x - h}{y - k}\right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Al reemplazar por cada punto de contacto:

$$m = -\left(\frac{x-h}{y-k}\right) \quad (3.9)$$

Para cada lado:

$$m_{izq} = -\left(\frac{x_{izq}-h}{y_{izq}-k}\right) \quad m_{der} = -\left(\frac{x_{der}-h}{y_{der}-k}\right)$$

Finalmente el ángulo de contacto se encuentra descrito entre la pendiente de la superficie del sustrato y las pendientes de las tangentes a la circunferencia en los puntos de contacto:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{m - m_{sustrato}}{1 + m * /m_{sustrato}} \quad (3.10)$$

Al reemplazar:

$$\theta_{izq} = \tan^{-1} \frac{m_{izq} - m_{sustrato}}{1 + m_{izq}m_{sustrato}} \quad \theta_{der} = \tan^{-1} \frac{m_{der} - m_{sustrato}}{1 + m_{der}m_{sustrato}}$$

El programa propuesto permite la selección y almacenamiento de los tres puntos requeridos por el algoritmo matemático mediante acción del ratón del computador. El usuario hace clic sobre los puntos y el programa devuelve el valor de los ángulos de contacto izquierdo y derecho, además del trazo de las líneas y curvas obtenidas en cada etapa del cálculo matemático, dispuesto en tres pantallas con una distribución como en la Figura 44.

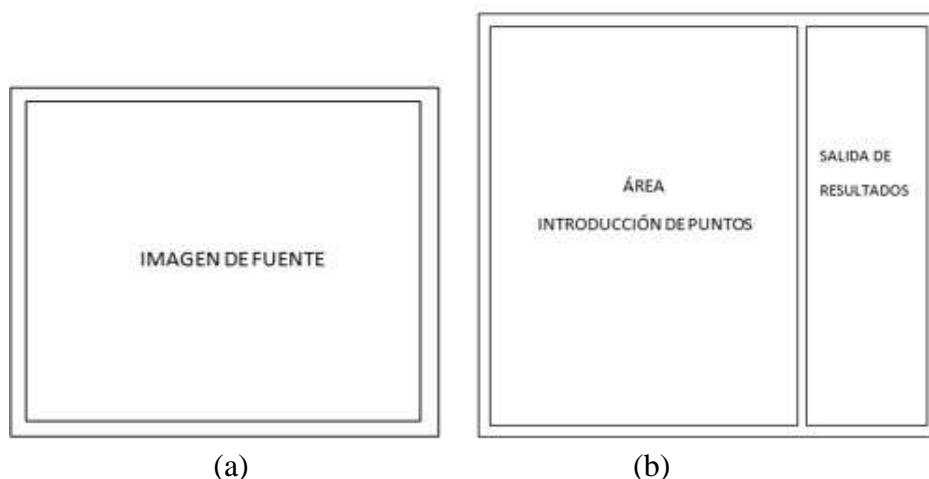


Figura 44. Software para cálculo de ángulo de contacto (a) Imagen de fuente (b) Área para introducción de usuario y salida de resultados

3.5. Diseño del HMI

El software descrito anteriormente debe enlazarse con el prototipo mediante una HMI, que posibilite al operador navegar por un entorno simple e intuitivo, con el fin de realizar el control de los sistemas definidos en el prototipo, supervisión del procesamiento de la imagen y obtención de los resultados.

3.5.1. Características del usuario

3.5.1.1. Pre-requisitos

El usuario que va a operar el HMI debe cumplir ciertos requisitos, en cuanto a su formación académica debe ser un bachiller técnico o tecnólogo industrial como mínimo.

3.5.1.2. Discapacidades visuales

El usuario que va a operar el HMI debe cumplir con un límite en su discapacidad visual hasta:

- **Discapacidad visual moderada:** Posibilidad de realizar tareas visuales con el empleo de ayudas especiales e iluminación adecuada similares a las que realizan las personas con visión normal (Barraga, 1992). Esto esta en los rangos de la escala de Wecker entre AVL 2.0 y 0.8.

3.5.1.3. *Discapacidades motrices*

Se debe considerar que el usuario que va a operar el HMI no debe sufrir de ninguna clase de discapacidad de las extremidades superiores.

3.5.2. *Capacidades del HMI*

- Adquisición de imagen en tiempo real.
- Visualización de transformaciones en la imagen.
- Entradas del operador.
- Obtención de datos y generación de históricos.

3.5.3. *Arquitectura del HMI*

La arquitectura empleada para la HMI, tiene una estructura en forma de mapa que refleja la organización del proceso, como se muestra a continuación en la Figura 45:

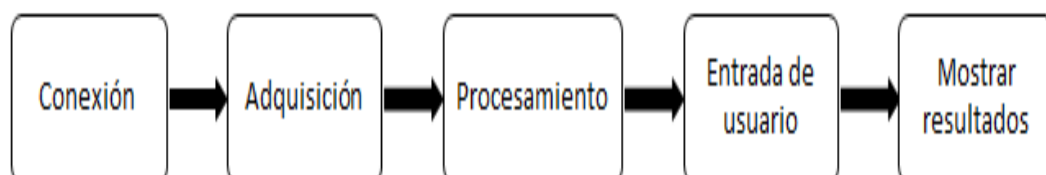


Figura 45. Arquitectura de HMI

3.5.4. Distribución de las pantallas

3.5.4.1. Pantalla de presentación

La pantalla presenta la información más importante del proyecto y un mímico del prototipo asociado al software.

- **Botón tutorial:** permite dirigirse a un video educativo sobre el uso de la HMI.
- **Botón inicio:** permite dirigirse a la pantalla de proceso e iniciar con el control del prototipo.
- **Botón configuración:** permite establecer la configuración de los parámetros para el procesamiento de la imagen.

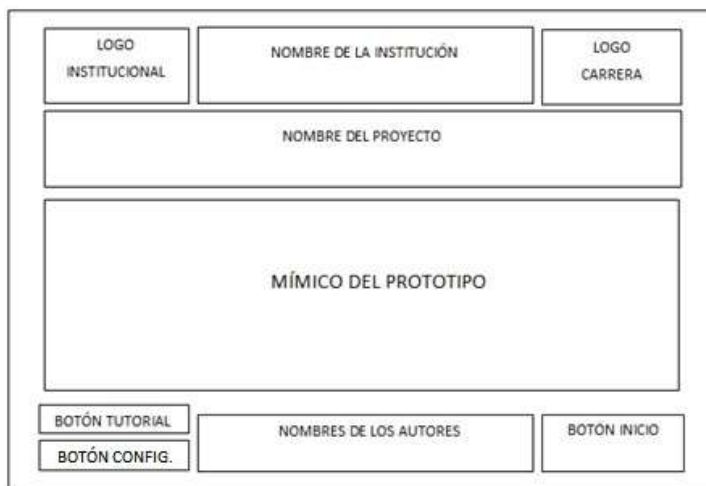


Figura 46. Distribución pantalla de inicio

3.5.4.2. Pantalla de proceso

La pantalla permite la interacción del usuario con el prototipo, la captura de la imagen microscópica, la visualización del procesamiento digital de la misma y la obtención del ángulo de contacto.

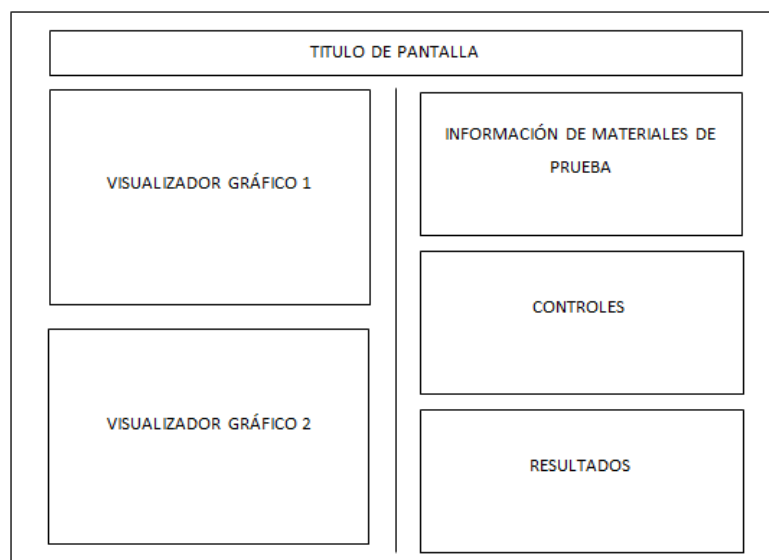


Figura 47. Distribución pantalla de proceso

- **Visualizador gráfico:** permite dirigirse a un video educativo sobre el uso de la HMI.
- **Información de materiales de prueba:** permite ingresar los nombres de los materiales usados en la prueba.
- **Controles:** permiten realizar las etapas de procesamiento para la obtención del ángulo de contacto.
- **Resultados:** permiten visualizar el valor numérico resultante para el ángulo de contacto.

3.5.5. *Uso del color*

Para la elección de colores es necesario dirigirse a la paleta de colores de QtCreator (Qt Project, 2009) mostrada en la Figura 48, donde se puede seleccionar la gama y combinaciones apropiadas para la HMI.

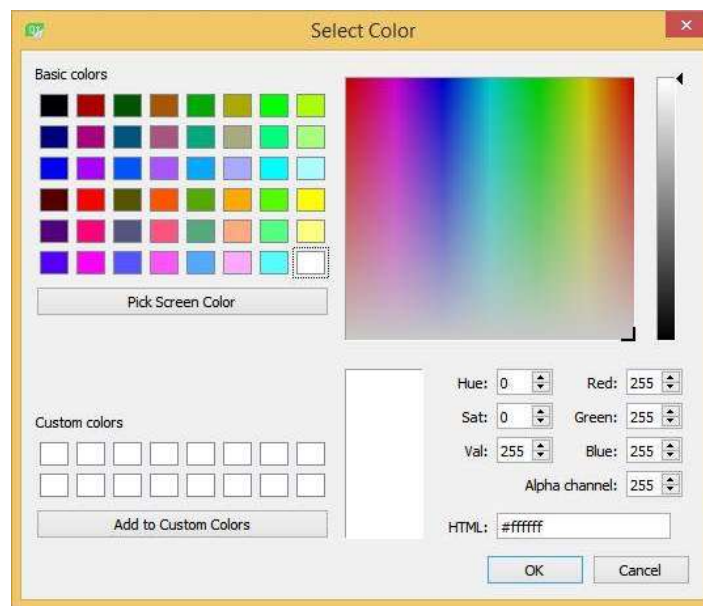


Figura 48. Paleta de colores Qt Creator

- **Color de fondo de la pantalla:** para el color del fondo de las pantallas se hace uso de la herramienta Gradiente de la paleta de color en QtCreator (Figura 49), con la finalidad de lograr un efecto de realce sobre los elementos de la interfaz y que además aporte un mayor valor estético.

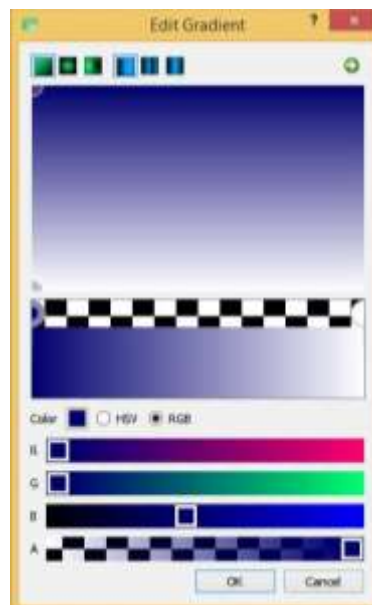


Figura 49. Herramienta gradiente Qt Creator

- **Color de texto:** Para generar alto contraste con el color de fondo se sugiere utilizar: para títulos color amarillo y para texto normal color blanco

3.5.5.1. Resumen de la selección

Las Tablas 10 y 11 muestran los colores elegidos para cada elemento establecido en las pantallas de la HMI, para generar un efecto visual adecuado sobre el usuario, que le permita identificar con claridad los comandos dispuestos en la HMI.

Tabla 10.
Selección de color


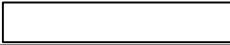




Color		
Fondo pantalla		Azul
Fondo texto normal 1		Blanco
Fondo texto normal 2		Azul
Texto título		Amarillo
Texto normal 1		Negro
Texto normal 2		Blanco

Tabla 11.
Código RGB de los colores en la HMI

Color	Rojo (R)	Verde (G)	Azul (B)
Azul	32	50	96
Blanco	255	255	255
Amarillo	250	250	22
Negro	0	0	0

3.5.6. Información textual

La información textual presentada en la interfaz debe ser de fácil reconocimiento y lectura para el usuario, por lo que se sugiere la selección indicada en la Tabla 12.

Tabla 12.
Estilo y tamaño para información textual




	Estilo	Tamaño	Color
Título	MS Sans Serif	24	Amarillo
Texto normal	MS Sans Serif	18	Negro
Texto normal	MS Sans Serif	18	Blanco

3.5.7. Comandos e ingreso de datos

En esta fase, se establece la intervención del operador al suministrar datos al algoritmo de manera que se llegue al resultado. Las características principales que deben tener los comandos son su visibilidad y su facilidad de operación.

En el caso de los controles se debe cuidar que su área de acción en pantalla sea de buen tamaño, estén perfectamente etiquetados y por ello sean fácilmente reconocibles por el usuario. Los comandos utilizados en la HMI son descritos en la Tabla 13.

Tabla 13.
Especificación de comandos del operador

Comando	Descripción	Retroalimentación
	Botón de procesamiento con icono asociado al comando y número de orden en el proceso	Cambio de color del icono y número de orden
	Caja de introducción de texto para proporcionar al software información de los materiales usados en la prueba	
	Caja de salida de texto que indica el resultado del proceso	Aparición de datos

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

El siguiente capítulo figura la implementación e integración de cada uno de los sistemas descritos previamente en el capítulo III, el diseño de las pruebas a aplicarse a los componentes del goniómetro, y los resultados obtenidos después de la realización de las mismas.

4.1. Implementación de los sistemas

El prototipo tiene tres sistemas principales descritos en el inciso 3.2. e ilustrados en el anexo A, los cuales permiten el manejo de la muestra, la superficie y la imagen. Dichos datos son necesarios para la obtención del ángulo de contacto mediante el software especializado.

4.1.1. Sistema de iluminación

El sistema de iluminación permite la obtención de una imagen que evita la eliminación de los bordes. También impide el reflejo de la luz en el fondo del entorno controlado, para que la gota y el fondo estén claramente diferenciados y evitar la pérdida de información en el proceso de binarización.

El sistema de iluminación cuenta con dos elementos principales: el primero es el microcontrolador ATMEGA328P y el segundo es la matriz de LEDs RGB. El microcontrolador se encuentra en la caja de control, el cual envía una señal de control a la matriz de LEDs que se encuentra dentro del entorno controlado.

Como se menciona en el inciso 3.2.2., se realiza pruebas con 4 colores de la matriz de LEDs RGB, para determinar el color ideal y el flujo luminoso necesario para la imagen. Los colores que se utilizan para las pruebas son rojo, verde, azul y blanco. El

control de brillo se realizó mediante el microcontrolador que genera una señal PWM y se utiliza 3 diferentes valores para el ciclo de trabajo: 25%, 50% y 100% (Figura 50, 51, 52 y 53).

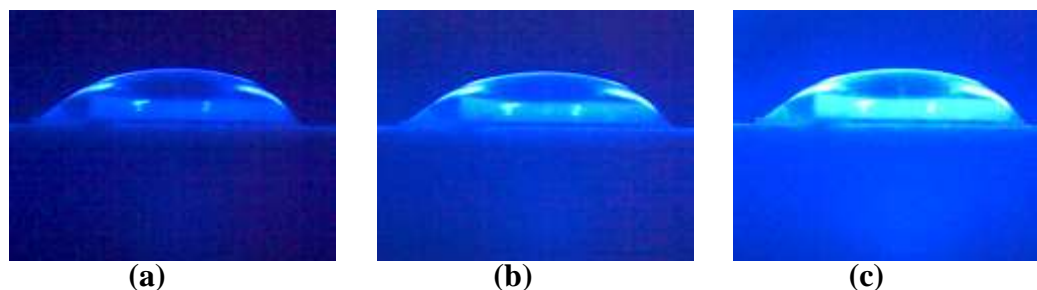


Figura 50. Prueba color azul con (a)25% (b)50% (c)100%

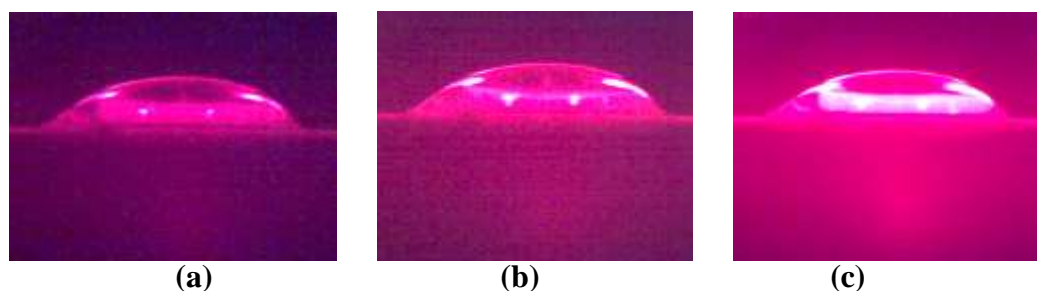


Figura 51. Prueba color rojo con (a)25% (b)50% (c)100%

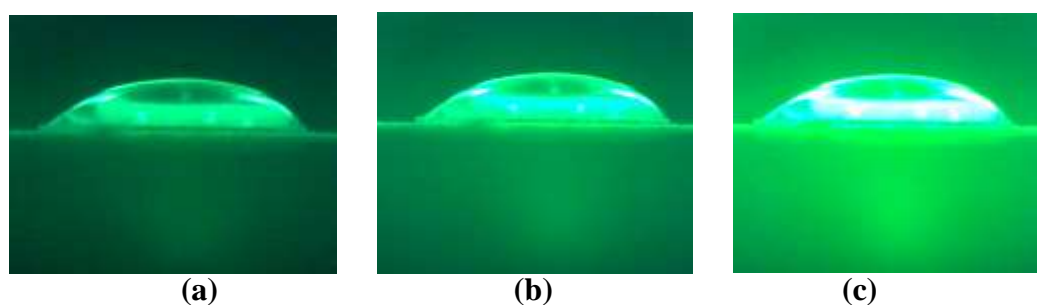


Figura 52. Prueba color verde con (a)25% (b)50% (c)100%

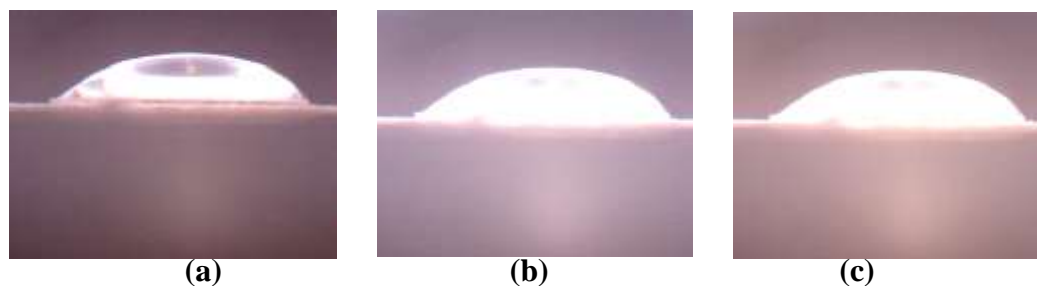


Figura 53. Prueba color blanco con (a)25% (b)50% (c)100%

De los resultados obtenidos de forma experimental las luces: roja, verde y azul no permiten una completa definición de la forma de la gota y se pueden observar el reflejo de los elementos dentro del entorno controlado, situación perjudicial para las etapas del procesamiento digital de la imagen.

La luz blanca con un ciclo de trabajo del 100% para la señal PWM, dispone una definición completa e inalterada de la forma real de la gota, como se muestra en la Figura 54.

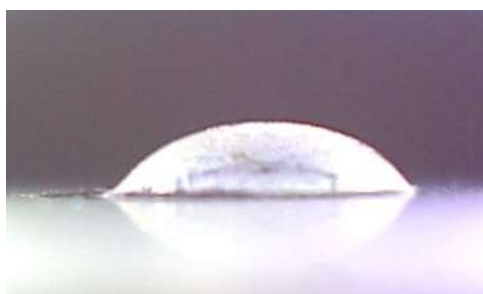


Figura 54. Imagen con luz color blanca y con 100% PWM

4.1.2. Sistema de goteo

El sistema de goteo permite el dispensado de muestra líquida de 10ul, 20ul y 30ul sobre la superficie sólida. Consta de 3 elementos: el primero es un dispensador de líquido (pipeta), el segundo un motor y por último un microcontrolador ATMEGA328P que es compartido con el sistema de iluminación (Figura 55). La pipeta es colocada en la pared lateral mediante una pinza universal de 3 dedos y el motor está dentro de un soporte para motor.

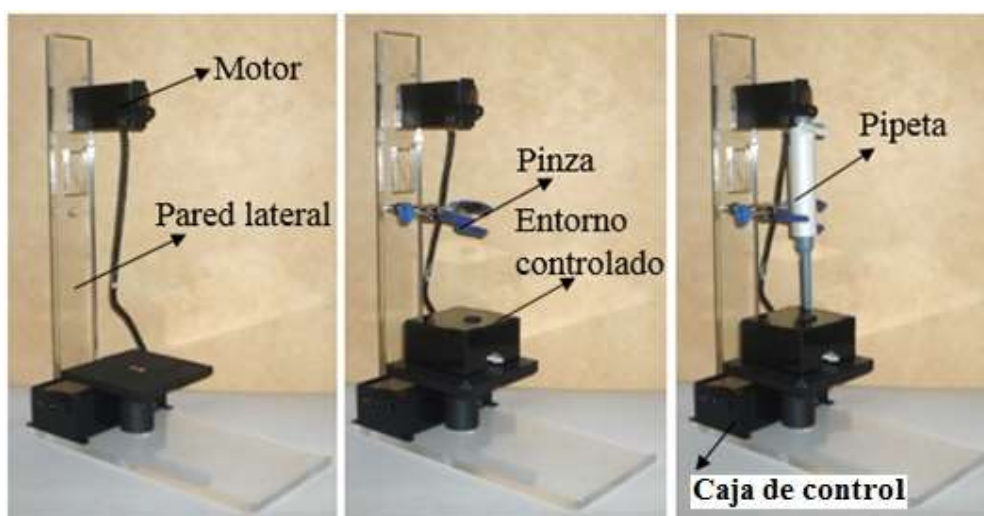


Figura 55. Implementación del sistema de goteo

El motor posee un accesorio en su eje (Figura 56) el cual permite el pipeteo, acción generada por una señal PWM del microcontrolador. (1) El eje del motor recorre 60 grados anti-horario, (2) luego espera 1 segundo y (3) regresa 60 grados en sentido horario.

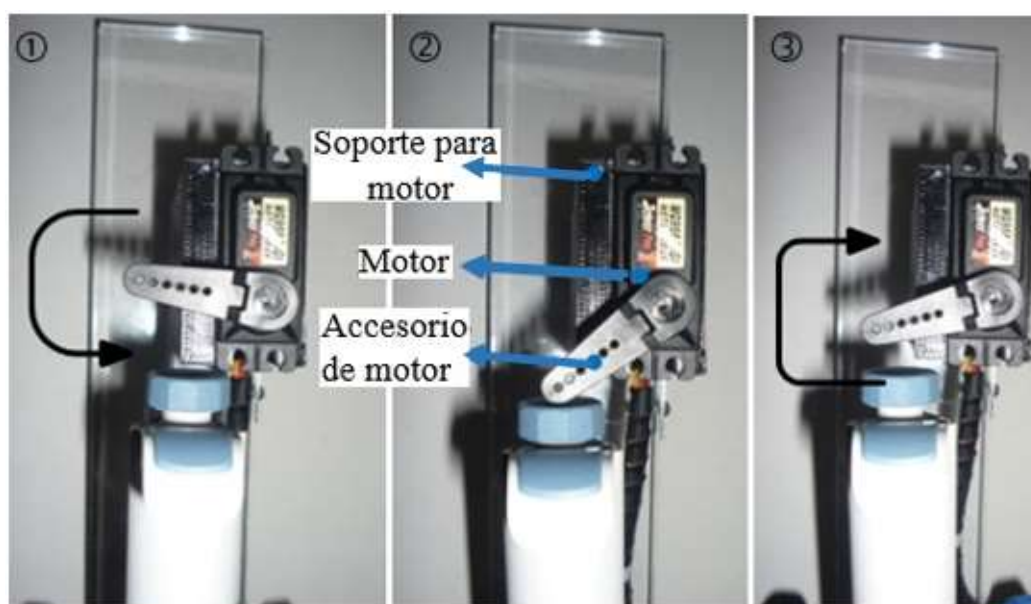


Figura 56. Acción de pipeteo

4.1.3. Sistema de adquisición de imagen en entorno controlado

El sistema de adquisición de imagen en entorno controlado permite la manipulación de la muestra y evita su contaminación, además de las condiciones necesarias para la imagen mencionadas en el inciso 3.2.3.

El sistema de adquisición de imagen en entorno posee dos elementos principales: el primero es la superficie de colocación de la gota y el segundo es la cámara microscópica (Figura 57).



Figura 57. Implementación del sistema de adquisición de imagen en entorno controlado

El primer elemento se encuentra dentro del entorno controlado en una paleta móvil, lo cual permite una fácil manipulación de la superficie (Figura 58). El segundo elemento (cámara microscópica) es conectado directamente al computador.



Figura 58. Movimiento de la paleta del entorno controlado

4.1.4. Caja de control

Dentro de la caja de control se encuentran los elementos necesarios para los dos sistemas del prototipo (sistema de goteo y sistema de iluminación). La alimentación se realiza por medio de un transformador LLEST. El sistema de iluminación tiene un mosfet IRF540 y el control del sistema de goteo posee 2 reguladores LM7805 con un disipador de calor. Ambos sistemas están controlados por el microcontrolador ATMEGA328P (Figura 59).



Figura 59. Caja de Control

4.2. Integración de los sistemas del prototipo

Los sistemas fueron integrados dentro una estructura de acrílico, donde la base y la pared lateral forman un ángulo recto. El entorno controlado se encuentra sobre un soporte que encaja en la base del goniómetro. La pipeta, la pinza universal de 3 dedos y el motor están dispuestos en la pared lateral. La cámara microscópica se ubica frente al entorno controlado sobre la base de goniómetro y la caja de control bajo el entorno controlado (Figura 60).



Figura 60. Integración del goniómetro

4.3. Implementación del software especializado

Se consiguió implementar los tres programas descritos en el inciso 3.4, con el objetivo de manipular los parámetros para el procesamiento de la imagen adquirida por la cámara microscópica. El ajuste de los valores correspondientes a brillo, contraste y umbral por separado en cada aplicación permite la discriminación de las posibles fuentes de error, además de facilitar un ajuste más fino para mejores resultados.

4.3.1. Énfasis en píxeles de interés

Con el objetivo de manipular el brillo, contraste y umbral de blanco sobre negro en la imagen de entrada obtenida a través de la cámara microscópica, se desarrolló una aplicación de escritorio (Figura 61) acorde al diseño propuesto en el inciso 3.4.1.

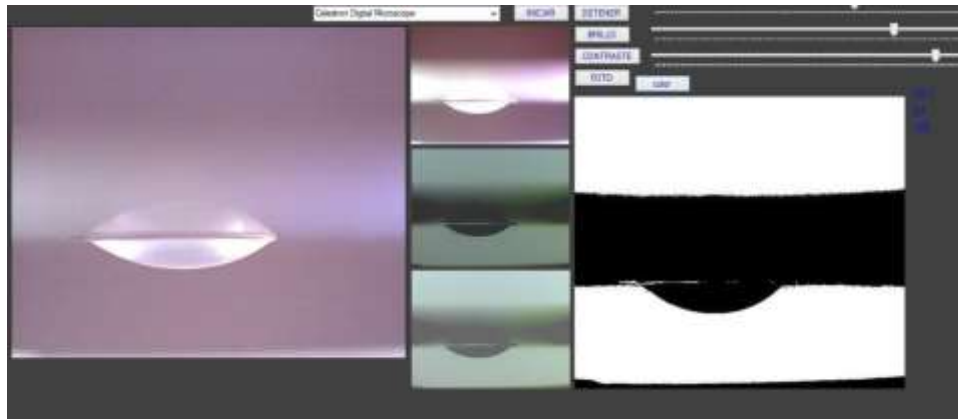


Figura 61. Aplicación para énfasis en píxeles de interés

La aplicación cuenta con dos componentes principales:

- **Controles:** permiten ajustar el valor numérico para la transformación en brillo, contraste y la umbralización de la imagen de entrada.
- **Recuadros de visualización:** permiten visualizar los cambios realizados a la imagen de entrada para cada parámetro, lo que facilita el proceso de calibración de los valores numéricos.

La variación del brillo permite el aporte de luz en la imagen, por lo que su incorrecta calibración mediante el control de barra ocasiona efectos no deseados como manchas blancas o negras en la imagen, combinación de la gota con el fondo, entre otros. La Figura 62(A) muestra una imagen procesada con niveles muy altos y la Figura 62(B) con niveles muy bajos de brillo.

La variación del contraste permite la variación de la luminosidad entre las zonas más oscuras o claras de la imagen, simulando un efecto de enfoque. Su incorrecta calibración mediante el control de barra ocasiona la pérdida del contorno de la gota. La Figura 63(A) muestra una imagen procesada con un valor muy alto y la figura 63(B) con un valor muy bajo de contraste.

La variación del umbral permite la conversión a blanco y negro, su calibración inadecuada ocasiona pérdida de los píxeles que se pretende enfatizar. La Figura 64(A) muestra una imagen procesada con un valor muy alto y la Figura 64(B) con un valor muy bajo de umbral.

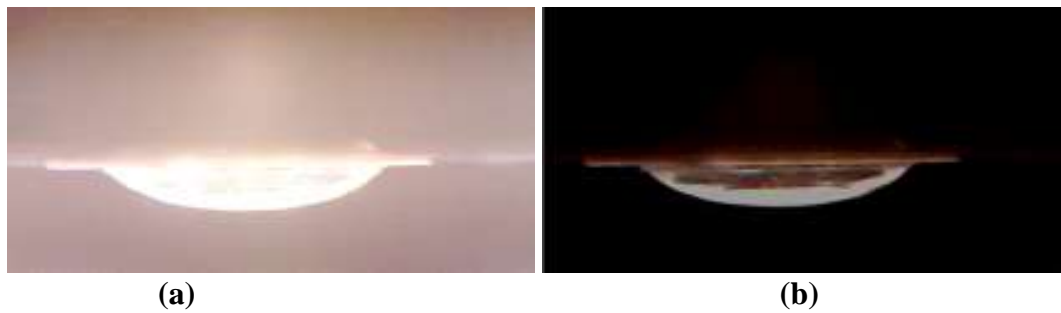


Figura 62. Efectos de procesamiento de imagen con brillo (a) muy alto (b) muy bajo

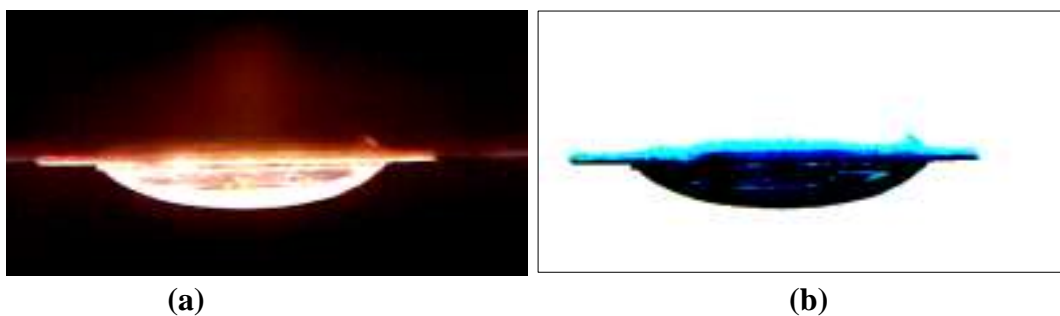


Figura 63. Efectos de procesamiento de imagen con contraste (a) muy alto (b) muy bajo

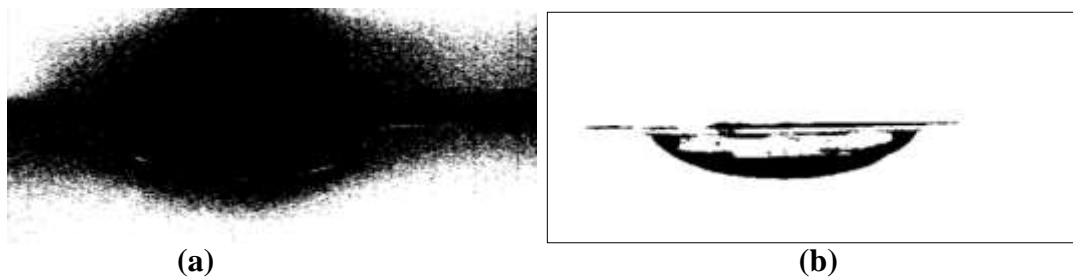


Figura 64. Efectos de procesamiento de imagen con umbral (a) muy alto (b) muy bajo

La Figura 65 muestra una imagen procesada con los niveles adecuados de brillo, contraste y umbral. Acorde a un esquema de prueba y error (procedimiento empírico) se consiguió un resultado final que contiene la información necesaria de la gota y la línea de interfases que van a ser descritas mediante su contorno posteriormente.

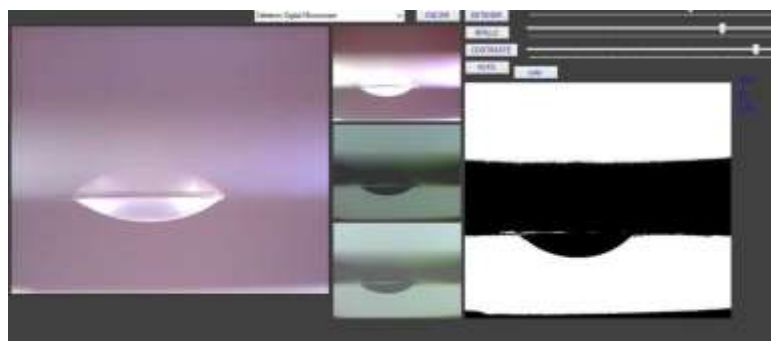


Figura 65. Imagen procesada con niveles adecuados de brillo, contraste y umbral

Los valores definitivos de brillo, contraste y umbral (Tabla 14), obtenidos en el desarrollo experimental, son los que se definen por línea de código en la integración total del software especializado.

Tabla 14.
Valores definitivos para brillo, contraste y umbral

Brillo	Contraste	Umbral
51	-16	161

4.3.2. Obtención de contornos

Una vez obtenida una imagen que haga énfasis en la información de interés que son la gota y la línea de interfases es necesario obtener los contornos que describan estos dos elementos, la aplicación implementada sigue el diseño propuesto en el inciso 3.4.2 de la siguiente manera (Figura 66). La aplicación permite visualizar la imagen de fuente proporcionada por la aplicación anterior y mediante un control de barra horizontal, elegir el valor de umbral con el que se convierte a formato binario la imagen.

En la ventana “Contornos”, se obtiene los contornos que describen la imagen de fuente, que varían de acuerdo al umbral elegido por la barra. Un umbral demasiado bajo introduce pixeles erróneos en los contornos resultantes (Figura 67).



Figura 66. Aplicación para obtención de contornos

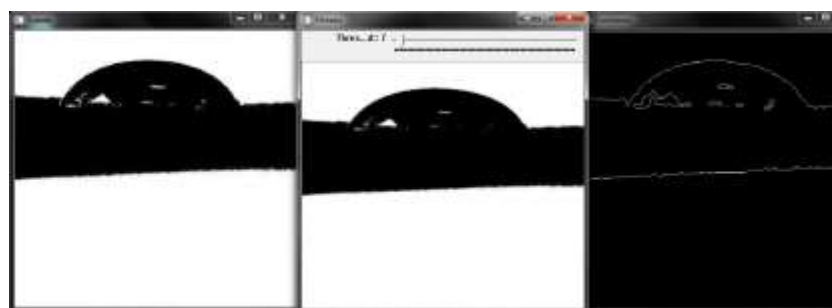


Figura 67. Efectos de binarización con umbral muy bajo

Un umbral demasiado alto ocasiona deformación de los contornos resultantes como se muestra en la Figura 68. Los ensayos de calibración realizados con la aplicación permitieron obtener una imagen como la mostrada en la Figura 69, procesada con un umbral de binarización adecuado, el resultado final muestra los contornos sin deformar de la gota y la línea de interfases.

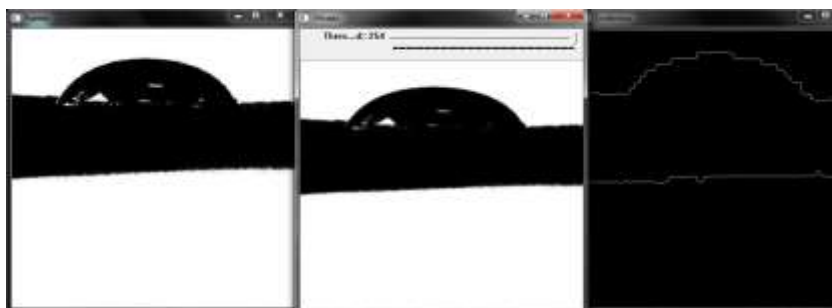


Figura 68. Efectos de binarización con umbral muy alto

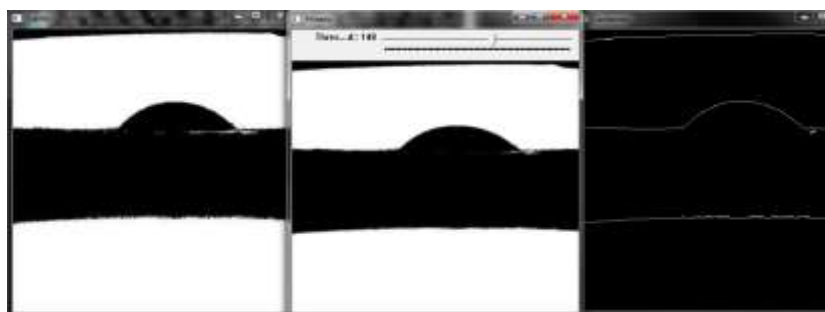


Figura 69. Contornos obtenidos con umbral adecuado

El **umbral de binarización**, se establece por línea de código a 148, en la integración total del software especializado.

4.3.3. Cálculo del ángulo de contacto

Esta última aplicación presenta el resultado final del ángulo de contacto (Figura 70). La aplicación permite visualizar la imagen de fuente descrita por su contorno proporcionada por la aplicación anterior.

En la ventana “Cálculo” se discriminan los datos basura y se observa únicamente el contorno de la gota, el usuario debe seleccionar con el ratón los puntos de contacto como se describe en el inciso 3.4.3, para permitir al algoritmo el cálculo del ángulo de contacto. Los resultados se obtienen en la ventana de la derecha para los dos casos: ángulo de contacto derecho e izquierdo.

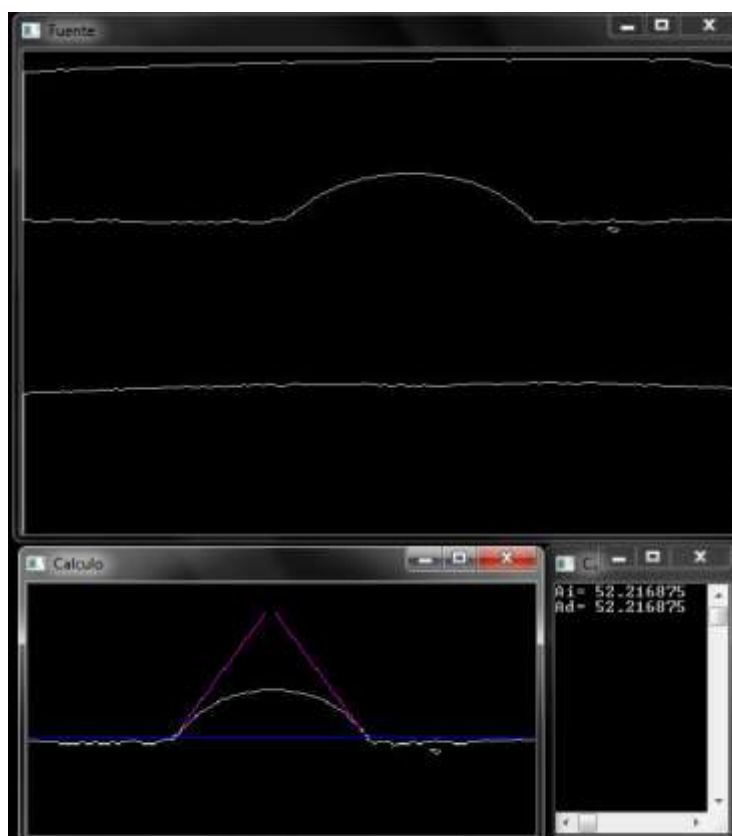


Figura 70. Aplicación para cálculo de ángulo de contacto

4.4. Integración del software mediante HMI

Se desarrolló una interfaz de usuario en la plataforma Qt Creator (Qt Project, 2009) con dos propósitos: integrar mediante línea de código las funcionalidades de las tres aplicaciones desarrolladas anteriormente y comunicar al usuario con el prototipo de una manera sencilla y amigable. La HMI implementada se muestra en la Figura 71.

La aplicación de escritorio con HMI cuenta con una pantalla de inicio que contiene la portada del proyecto y a su vez tres controles:

- **Inicio:** permite iniciar la aplicación para el cálculo del ángulo de contacto.
- **Configuración:** permite acceder a una ventana adicional que contiene un menú de las pruebas y configuración de parámetros permitidos al usuario.
- **Tutorial:** presenta un video explicativo para el uso del goniómetro.

La pantalla “CHRIKA 2.0” contiene los controles para el procesamiento de la imagen y obtención del ángulo de contacto:

- **Datos prueba:** contiene las cajas de introducción de texto para que el usuario defina los materiales empleados en la prueba y la orden de dispensado del líquido.
- **Controles:** contiene la secuencia de botones para la adquisición y procesamiento de la imagen de la gota.
- **Resultados:** presenta la información de salida de los ensayos, el ángulo de contacto derecho e izquierdo y el promedio de ambos.

La pantalla “Configuración” contiene los controles para la ejecución de las pruebas a ser realizadas en el prototipo que se definirán más adelante.



→ Continúa



Figura 71. HMI para cálculo de ángulo de contacto (a) Pantalla de inicio (b) Pantalla de procesamiento (c) Pantalla de configuración

4.5. Integración total del goniómetro

Se consiguió conseguido integrar los componentes de hardware y software al establecer un enlace serial mediante el módulo CP2102 como se describe en el inciso 3.3.2. De esta manera los comandos de activación de cada sistema son gestionados por la HMI contenida en el computador y ejecutados por el microcontrolador ATMEGA328P (Figura 72).



Figura 72. Integración del goniómetro

4.6. Diseño de las pruebas a los sistemas

Se vio la necesidad de diseñar un conjunto de pruebas con parámetros cualitativos para determinar el estado de los componentes de los diferentes sistemas del goniómetro propuesto, previo a la aplicación de pruebas de rendimiento, por lo que se define un procedimiento para cada caso como se muestra a continuación:

PRUEBA 1.- Funcionamiento sistema de goteo

Objetivo de la prueba: Verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema de goteo.

Tipo de Prueba	Cualitativa / interacción motor-pipeta
Formato de Registro	Formato 1 (Tabla 15)

PROCEDIMIENTO:

Etapa 1

- Seleccionar el líquido y una superficie sólida con que se realizará la prueba.
- Ubicar una punta en la pipeta, previamente esterilizada en una autoclave.
- Ajustar el volumen deseado para la prueba mediante el giro del botón de pipeteo ubicado en la parte superior de la pipeta y succionar el líquido.
- Ubicar la pipeta en la pinza universal de tres dedos, y asegurarse que la misma se encuentre correctamente ajustada mediante los tornillos dispuestos para tal propósito.
- Conectar a la energía el prototipo y encenderlo mediante el interruptor ubicado en la caja de control.
- Conectar el prototipo al computador mediante el cable USB.

Etapa 2

- Insertar el CD “GONIÓMETRO DE ÁNGULO DE CONTACTO” en el computador y ejecutar la aplicación GONIOMETRO_AC.exe.
- Dar clic en el botón “Calibración”, luego en “Prueba goteo” y esperar la acción del motor sobre el botón de pipeteo.
- Verificar que el motor haya regresado a la posición inicial.

Etapa 3

- Comprobar el correcto dispensado del líquido sobre la superficie dispuesta en el entorno controlado, caso contrario tomar en cuenta: la posición de la pipeta, la sujeción de la pinza, la acción del motor.

Tabla 15.
Formato N° 1

Sistema de goteo	
Etapa 1	
Estado del mecanismo de ajuste volumétrico de la pipeta (botón de pipeteo)	Óptimo/Defectuoso
Estado del mecanismo de sujeción de la pinza universal	Óptimo/Defectuoso
Etapa 2	
Acción del motor sobre la pipeta	Funciona/ No funciona
Posición de la pipeta	Firme/Inestable
Pulsado de botón de pipeteo	Completado/No realizado
Etapa 3	
Dispensado de la muestra	Correcto/Defectuoso

PRUEBA 2.- Activación/desactivación de la iluminación

Objetivo de la prueba: Verificar el encendido y apagado de la matriz LED mediante la orden enviada por el computador.

Tipo de Prueba Cualitativa / activación matriz LED

Formato de Registro Formato 2 (Tabla 16)

PROCEDIMIENTO:**Etapa 1**

- Conectar a la energía el prototipo y encenderlo mediante el interruptor ubicado en la caja de control.
- Conectar el prototipo al computador mediante el cable USB.

Etapa 2

- Insertar el CD “GONIÓMETRO DE ÁNGULO DE CONTACTO” en el computador y ejecutar la aplicación GONIOMETRO_AC.exe.
- Dar clic en el botón “Calibración”, luego en “Prueba iluminación” y esperar el encendido de las luces dentro del entorno controlado.
- Verificar que las matrices LED hayan regresado al estado apagado.
- Comprobar el encendido de las dos matrices LED dispuestas en el entorno controlado, caso contrario tomar en cuenta: la fuente de voltaje, la conexión con el computador, el estado de la matriz LED.

Tabla 16.
Formato N° 2

Sistema de iluminación	
Etapa 1	
Estado de la fuente de voltaje (LED verde indicador)	Encendido/Apagado
Etapa 2	
Acción de la iluminación	Funciona/ No funciona

PRUEBA 3.- Entorno controlado

Objetivo de la prueba: Verificar la correcta función del entorno controlado.

Tipo de Prueba Cualitativa / entorno controlado

Formato de Registro Formato 3 (Tabla 17)

PROCEDIMIENTO:

Etapa 1

- Previo a la realización de esta prueba se deben haber llenado los Formatos N° 1 y N° 2.
- Conectar a la energía el prototipo y encenderlo mediante el interruptor ubicado en la caja de control.
- Conectar el prototipo al computador mediante el cable USB.

Etapa 2

- Insertar el CD “GONIÓMETRO DE ÁNGULO DE CONTACTO” en el computador y ejecutar la aplicación GONIOMETRO_AC.exe.
- Dar clic en el botón “Calibración”, luego en “Entorno controlado” que establece la conexión con la cámara microscópica, dispensa una gota y enciende la iluminación.

Etapa 3

- Comprobar que la imagen capturada por la cámara dentro del entorno controlado presente un contorno definido en base a una clara diferenciación entre el fondo del entorno y la gota, como se puede apreciar en la Figura 73:



Figura 73. Imagen resultante del entorno controlado

Tabla 17.
Formato N° 3

Entorno controlado	
Etapa 1	
Estado de los sistemas de goteo e iluminación	Óptimo/Defectuoso
Etapa 2	
Adquisición de imagen mediante la cámara	Permitida/ Inválida
Etapa 3	
Imagen capturada	Similar/Errónea

4.7. Pruebas de rendimiento

Para medir el desempeño del goniómetro propuesto en el presente trabajo de investigación para la determinación del ángulo de contacto entre un líquido y una superficie sólida, se propone el esquema de pruebas descrito a continuación.

Para el análisis de los resultados del presente trabajo se tomó como patrón los resultados obtenidos con un goniómetro de ángulo de contacto comercial equipado con el software de análisis de gota CAM 100 (KSV Instruments, 2016).

PRUEBA 4.- Ángulo de contacto resultante entre agua destilada y vidrio.

Objetivo de la prueba: Verificar el resultado final del ensayo en condiciones constantes, con el software especializado para goniómetro de ángulo de contacto “GONIOMETRO_AC” en comparación con el software para goniómetro comercial “CAM100”.

Tipo de Prueba Cuantitativa / prototipo-software especializado

PROCEDIMIENTO:

- Ubicar agua destilada y porta muestras de vidrio a mano para la prueba.

- Ubicar una punta en la pipeta, previamente esterilizada en una autoclave.
- Ajustar un volumen de 20ul para la prueba mediante el giro del botón de pipeteo ubicado en la parte superior de la pipeta y succionar el agua destilada.
- Ubicar la pipeta en la pinza universal de tres dedos, y asegurarse que la misma se encuentre correctamente ajustada mediante los tornillos dispuestos para tal propósito.
- Ubicar el porta muestras de vidrio en la paleta.
- Conectar a la energía el prototipo y encenderlo mediante el interruptor ubicado en la caja de control.
- Conectar el prototipo al computador mediante el cable USB.
- Insertar el CD “GONIÓMETRO DE ÁNGULO DE CONTACTO” en el computador y ejecutar la aplicación GONIOMETRO_AC.exe.
- Dar clic en el botón “Iniciar”.
- Escribir los materiales de la prueba en los campos correspondientes y dar clic en “Dispensar líquido”, para realizar tal acción (Figura 74).
- Para adquirir y procesar la imagen de la cámara microscópica se debe dar clic en los botones de la sección “Controles” con el siguiente orden: “Conectar”→”Foto”→”Usuario”.
- Se despliega una ventana que muestra los contornos de la imagen de entrada, en ella se debe dar clic sobre los puntos de contacto como se explica en el inciso 3.4.3 (Figura 75).



Figura 74. Pantalla de procesamiento



Figura 75. Pantalla de contornos

- Verificar el resultado del ángulo de contacto en la pantalla anterior.
- Realizar 5 ensayos y calcular el valor medio del resultado.
- Se compara los resultados obtenidos con los que se muestran en la Figura 76, pertenecientes al software de análisis de gota CAM 100 para agua contra vidrio.

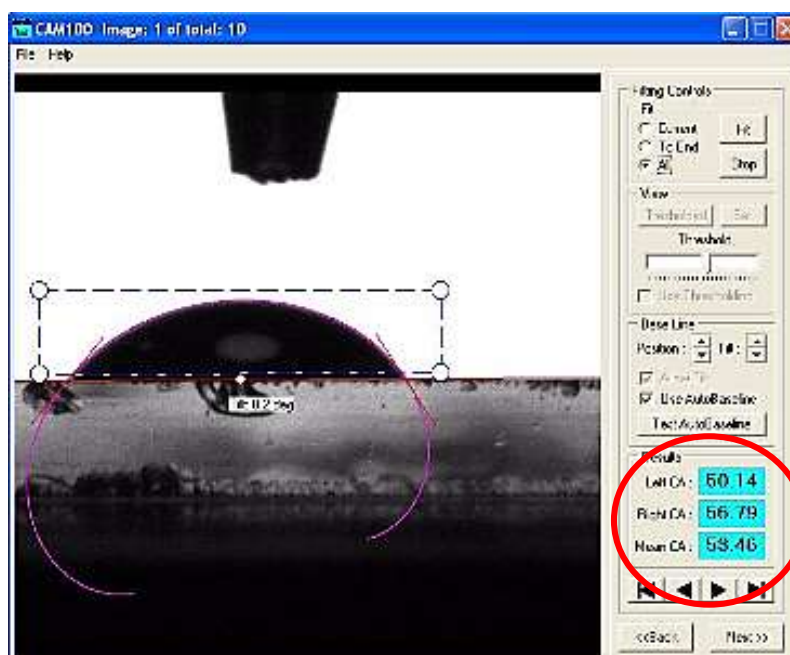


Figura 76. Resultados de medición con software CAM 100 para agua destilada sobre vidrio

APLICACIÓN:

Se siguió el procedimiento indicado previamente y se consiguieron los resultados indicados en las Figuras 77, 78, 79, 80, 81:

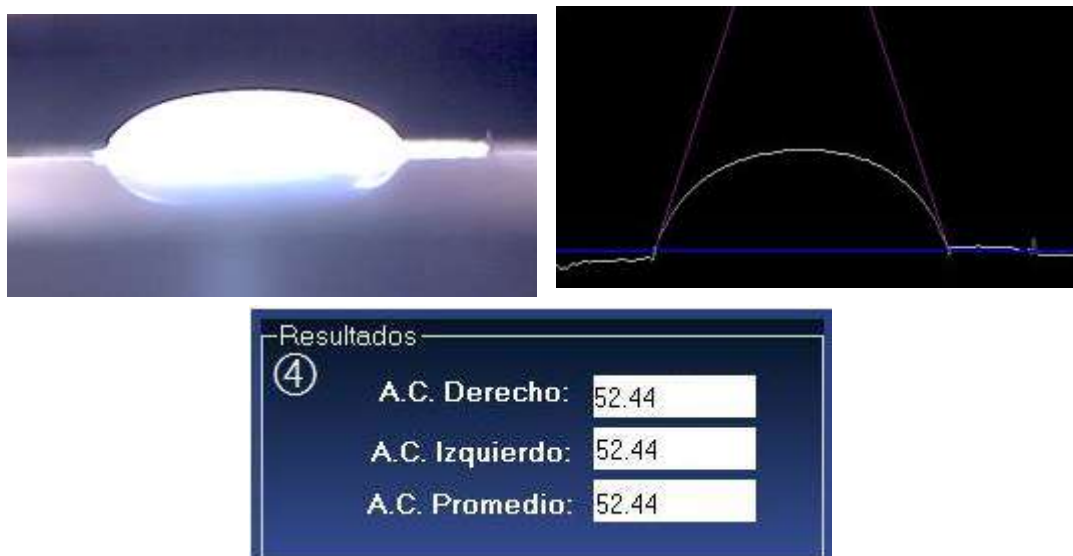


Figura 77. Resultado ensayo 1

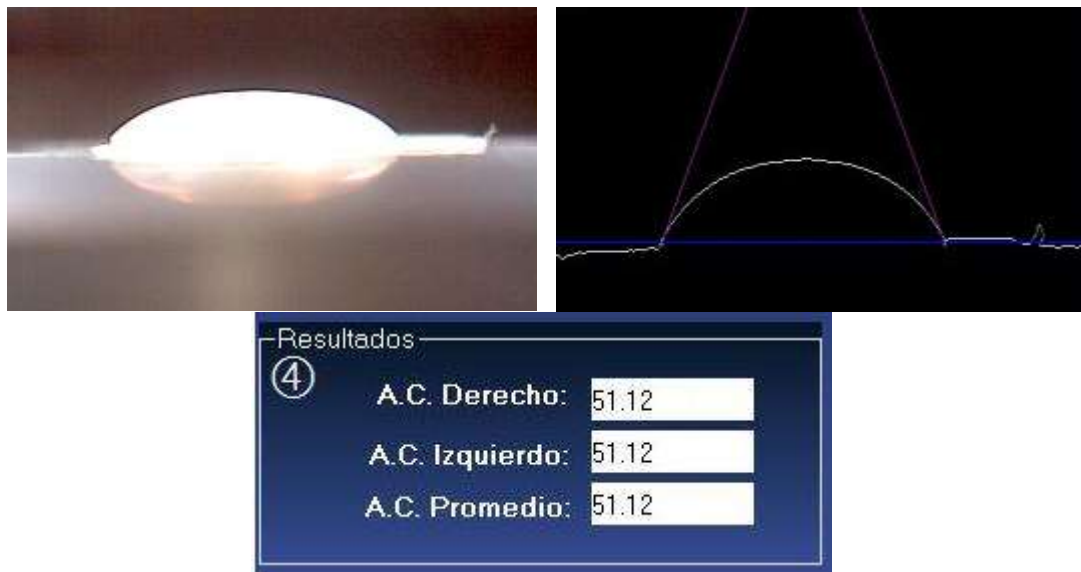


Figura 78. Resultado ensayo 2

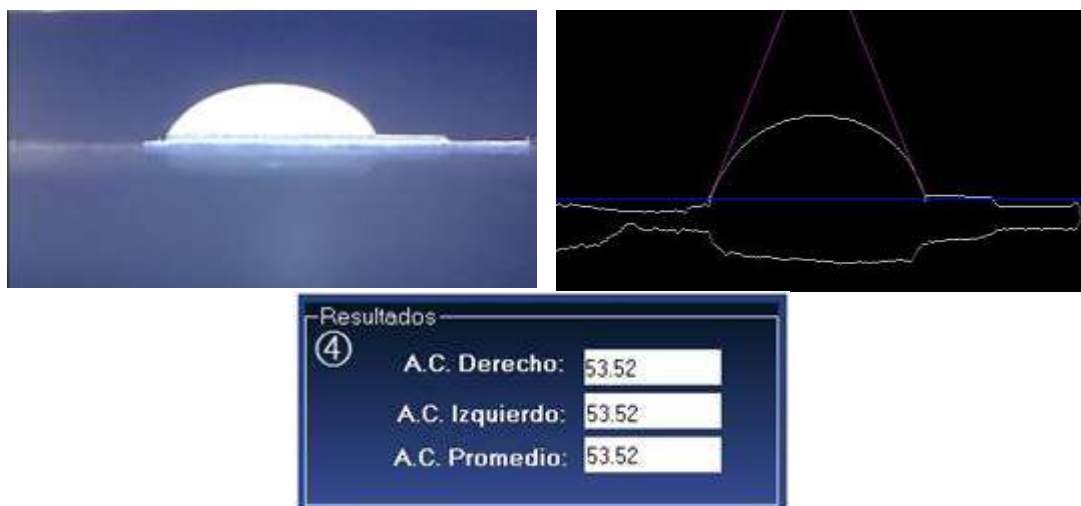


Figura 79. Resultado ensayo 3

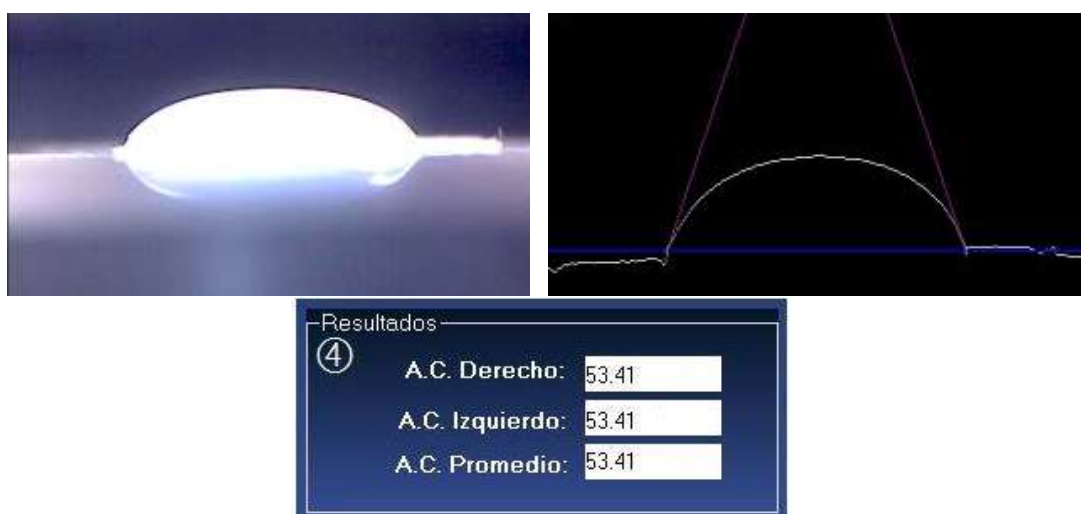


Figura 80. Resultado ensayo 4

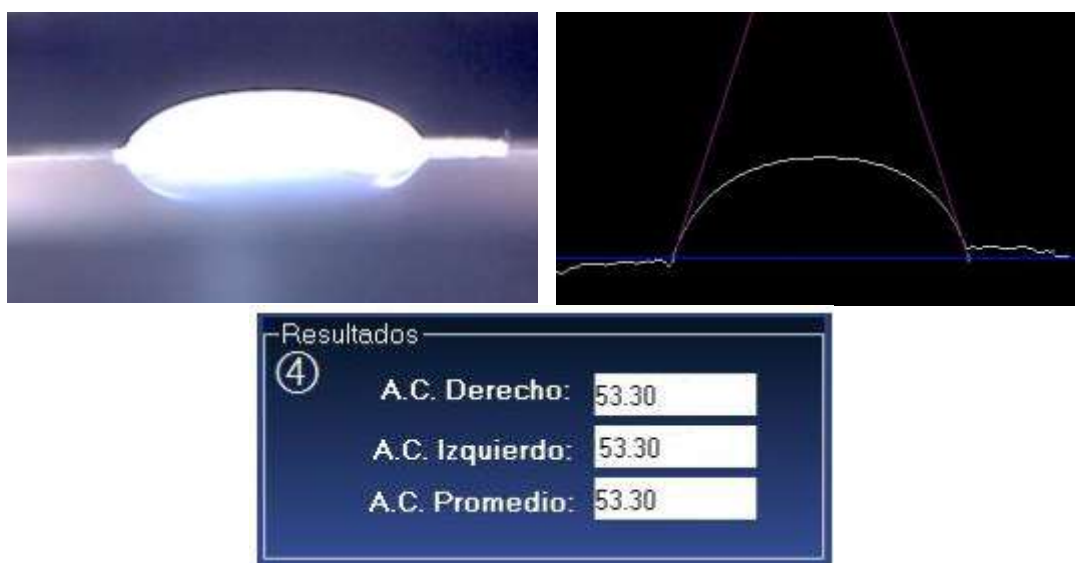


Figura 81. Resultado ensayo 5

La Tabla 18 muestra los valores obtenidos para cada ensayo y el valor medio resultante para la prueba No.4:

Tabla 18.
Tabulación de resultados para prueba No. 4

No. Ensayo	Valor ángulo de contacto
1	52,44
2	51,12
3	53,52
4	53,41
5	53,30
Valor medio \bar{X}	52,76

Se calculó el error porcentual entre el valor medio del ángulo de contacto obtenido por el software asociado al goniómetro implementado en el presente trabajo y el valor nominal para el ángulo de contacto entre agua y vidrio obtenido desde el software comercial CAM100 (Figura 76). El mapa de dispersión de los resultados de la prueba se muestra en la Figura 82.

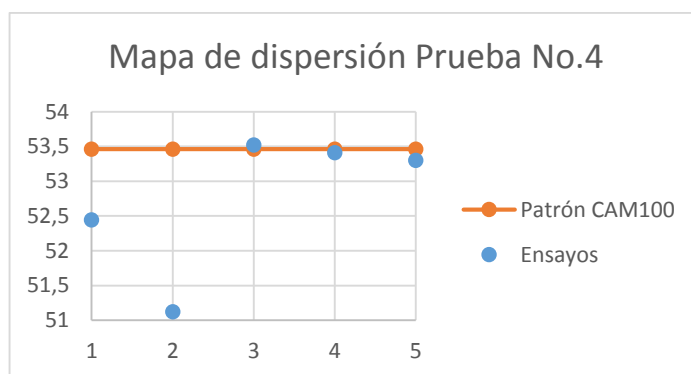


Figura 82. Mapa de dispersión Prueba No. 4

Cálculo de exactitud:

$$E\% = \frac{|\bar{X} - \bar{X}_N|}{\bar{X}_N} \times 100 \quad (4.1)$$

$$E\% = \frac{|52,76 - 53,46|}{53,46} \times 100$$

$$E\% = 1,30\%$$

Cálculo de error máximo:

$$E\% = \frac{|52,52 - 52,76|}{52,76} \times 100$$

$$E\% = 0,45\%$$

Cálculo de precisión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 \dots + (x_n - \bar{x})^2}{N}} \quad (4.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(52,44 - 53,46)^2 + (51,12 - 53,46)^2 + (53,52 - 53,46)^2 + (53,41 - 53,46)^2 + (53,30 - 53,46)^2}{5}}$$

$$\sigma = \pm 1,01$$

ANÁLISIS:

El ángulo de contacto calculado por el goniómetro presenta un error del 1,30% del resultado nominal tomado con CAM100, con lo cual se demuestra la exactitud del equipo.

La precisión de las mediciones es de $\pm 1,01$ grados y un error máximo de 0,45% como se muestra en el mapa de dispersión de la Figura 82.

Para establecer la confiabilidad del equipo en una gama mayor de sustancias, se puede aplicar esta prueba para otras muestras líquidas y sólidas con un ángulo de contacto conocido.

PRUEBA 5.- Valor del ángulo de contacto resultante entre agua destilada y vidrio ante variación de temperatura

Objetivo de la prueba: Verificar el valor del ángulo de contacto ante variación de la temperatura ambiente.

Tipo de Prueba

Cuantitativa / prototipo-software
especializado-HVAC

PROCEDIMIENTO:

- Establecer la temperatura de la habitación de prueba a condiciones normales (25°C).
- Ubicar agua destilada y porta muestras de vidrio a mano para la prueba.
- Ubicar una punta en la pipeta, previamente esterilizada en una autoclave.
- Ajustar un volumen de 20 ul para la prueba mediante el giro del botón de pipeteo ubicado en la parte superior de la pipeta y succionar el agua destilada.
- Ubicar la pipeta en la pinza universal de tres dedos, y asegurarse que la misma se encuentre correctamente ajustada mediante los tornillos dispuestos para tal propósito.
- Ubicar el porta muestras de vidrio en la paleta.
- Conectar a la energía el prototipo y encenderlo mediante el interruptor ubicado en la caja de control.
- Conectar el prototipo al computador mediante el cable USB.

- Insertar el CD “GONIÓMETRO DE ÁNGULO DE CONTACTO” en el computador y ejecutar la aplicación GONIOMETRO_AC.exe.
- Dar clic en el botón “Iniciar”.
- Escribir los materiales de la prueba en los campos correspondientes y dar clic en “Dispensar líquido”, para realizar tal acción (Figura 83).
- Para adquirir y procesar la imagen de la cámara microscópica se debe dar clic en los botones de la sección “Controles” con el siguiente orden: “Conectar”→”Foto”→”Usuario”.



Figura 83. Pantalla de procesamiento

- Se despliega una ventana que muestra los contornos de la imagen de entrada, en ella se debe dar clic sobre los puntos de contacto como se explica en el inciso 3.4.3 (Figura 84).



Figura 84. Pantalla de contornos

- Verificar el resultado del ángulo de contacto en la pantalla anterior.
- Realizar 5 ensayos y calcular el valor medio del resultado.
- Repetir la prueba con variación en la temperatura de la habitación de al menos 10°C.
- Comparar los resultados obtenidos a las diferentes condiciones de temperatura de la habitación.

APLICACIÓN:

La prueba 5 se realizó en una habitación, que contaba con un sistema de Sistema de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) regulable en el techo (Figura 85). En primera instancia se estableció la temperatura a condiciones normales (25°C) (Figura 86).



Figura 85. Habitación para pruebas de variación de temperatura



Figura 86. Control de temperatura a 25 °C

Se siguió el procedimiento indicado previamente y se consiguieron los resultados mostrados en las Figuras 87, 88, 89, 90 y 91:

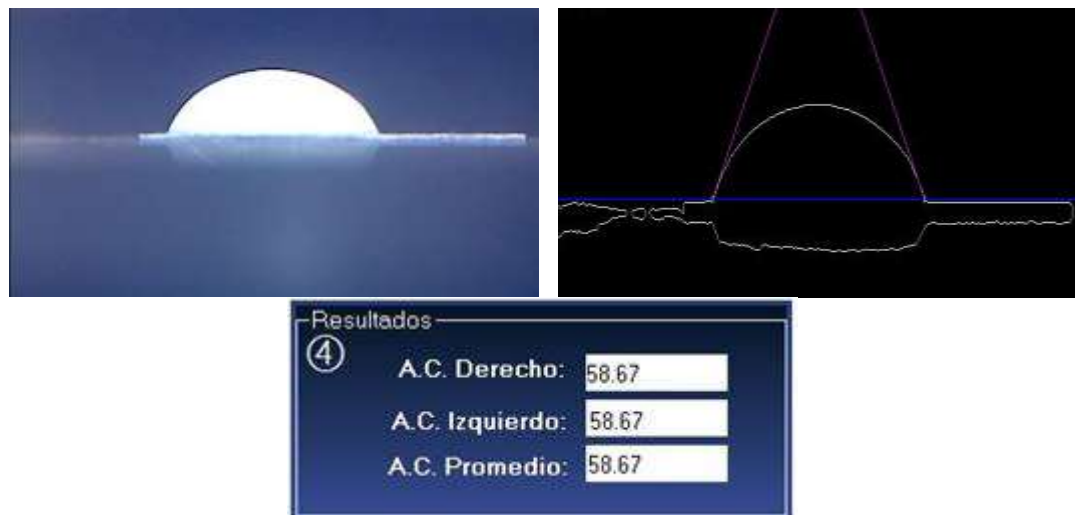


Figura 87. Resultado ensayo 1 a 25 °C

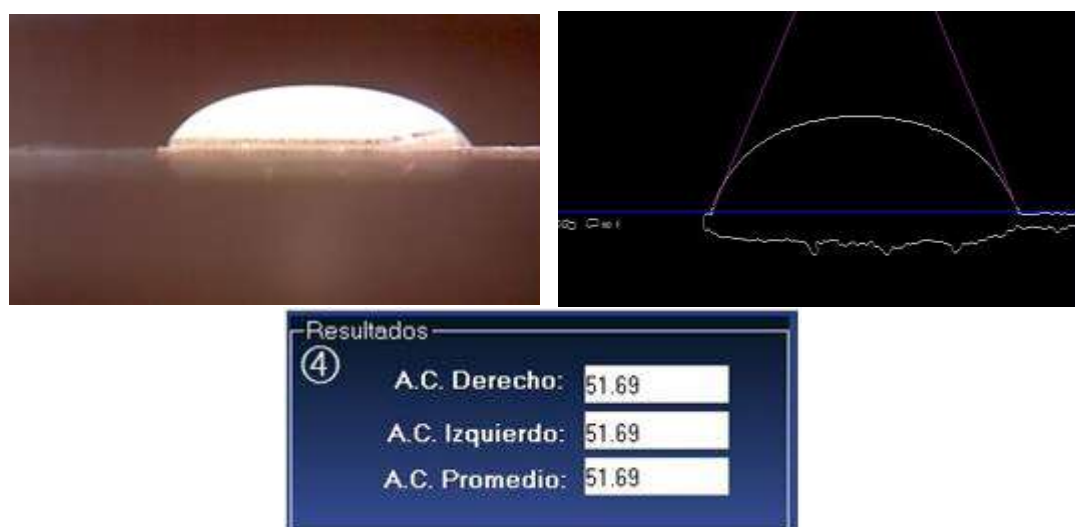
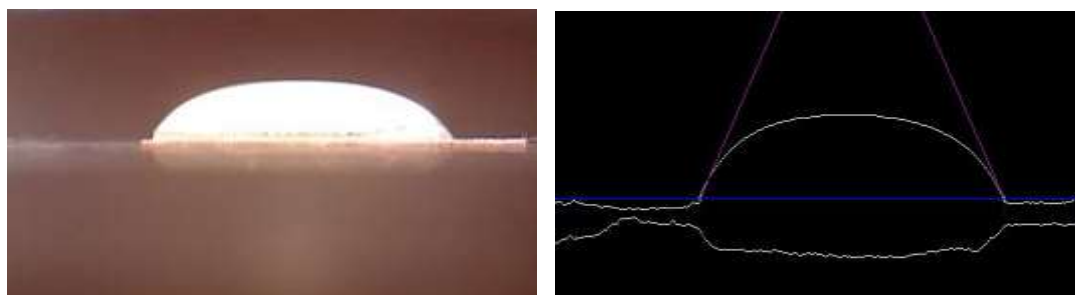
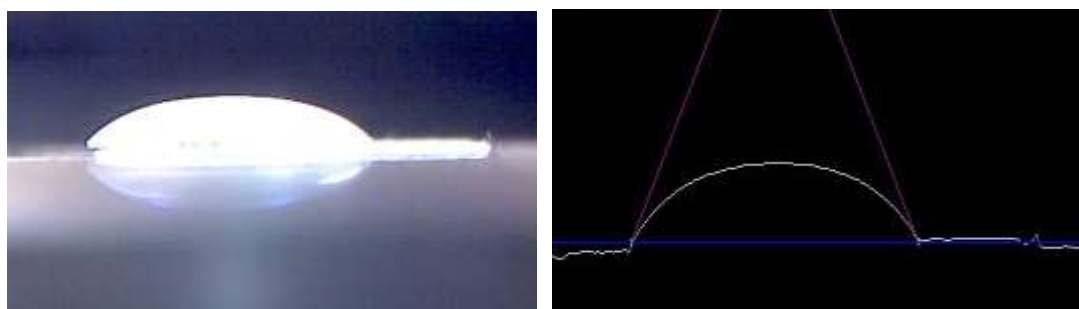


Figura 88. Resultado ensayo 2 a 25 °C



Resultados	
④	A.C. Derecho: 52.27
	A.C. Izquierdo: 52.27
	A.C. Promedio: 52.27

Figura 89. Resultado ensayo 3 a 25 °C



Resultados	
④	A.C. Derecho: 50.40
	A.C. Izquierdo: 50.40
	A.C. Promedio: 50.40

Figura 90. Resultado ensayo 4 a 25 °C



Resultados	
④	A.C. Derecho: 52.50
	A.C. Izquierdo: 52.50
	A.C. Promedio: 52.50

Figura 91. Resultado ensayo 5 a 25 °C

La Tabla 19 muestra los valores obtenidos para cada ensayo y el valor medio resultante para la prueba No.5 a 25°C:

Tabla 19.
Tabulación de resultados para prueba No. 5 a 25°C

No. Ensayo	Valor ángulo de contacto
1	58,67
2	51,69
3	52,27
4	50,40
5	52,50
Valor medio \bar{X}	53,11

Luego se disminuyó la temperatura de la habitación a 16 °C (Figura 92) y se obtuvieron los resultados mostrados en las Figuras 93, 94, 95, 96 y 97:

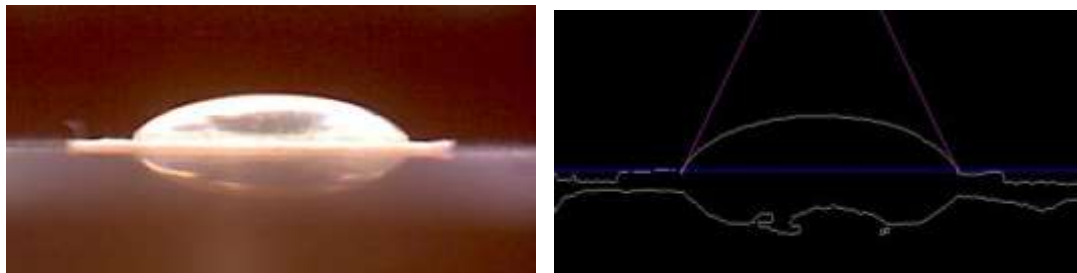


Figura 92. Control de temperatura a 16°C



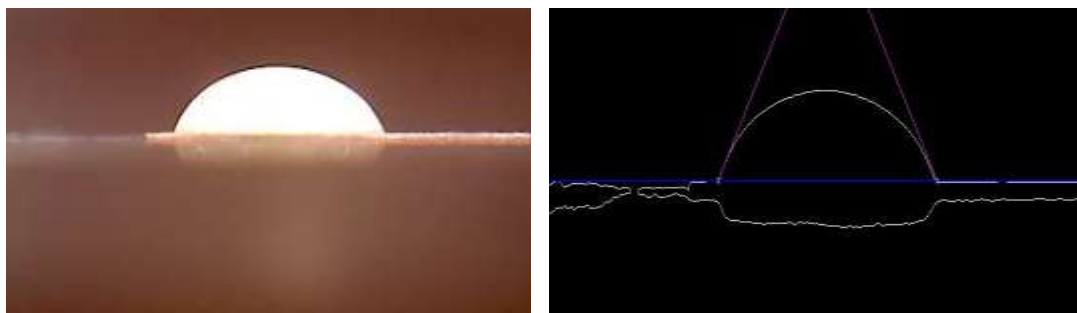
Resultados	
④	A.C. Derecho: 52.77
	A.C. Izquierdo: 52.77
	A.C. Promedio: 52.77

Figura 93. Resultado ensayo 1 a 16 °C



Resultados	
④	A.C. Derecho: 54.54
	A.C. Izquierdo: 54.54
	A.C. Promedio: 54.54

Figura 94. Resultado ensayo 2 a 16 °C



Resultados	
④	A.C. Derecho: 57.42
	A.C. Izquierdo: 57.42
	A.C. Promedio: 57.42

Figura 95. Resultado ensayo 3 a 16 °C

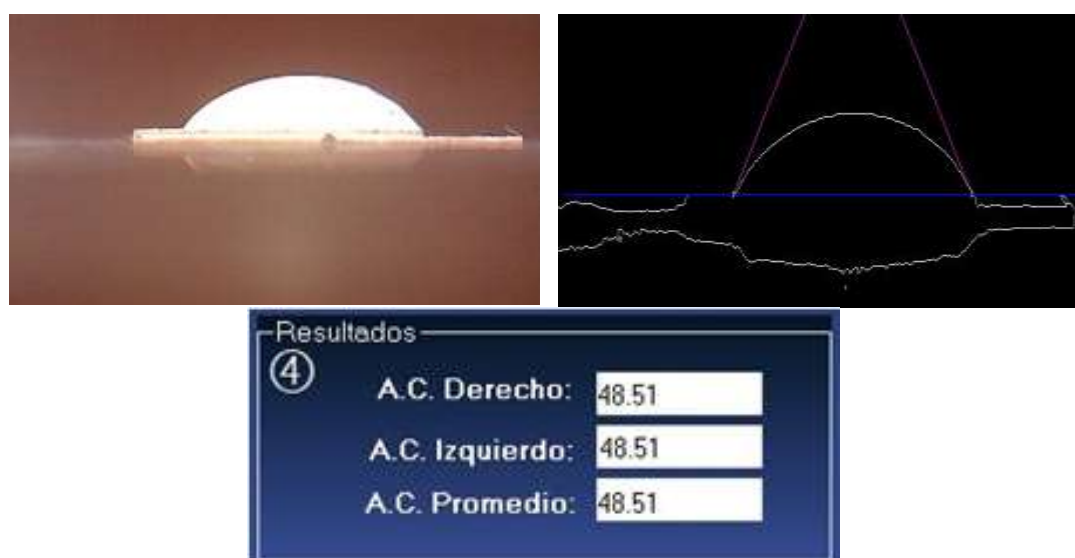


Figura 96. Resultado ensayo 4 a 16 °C

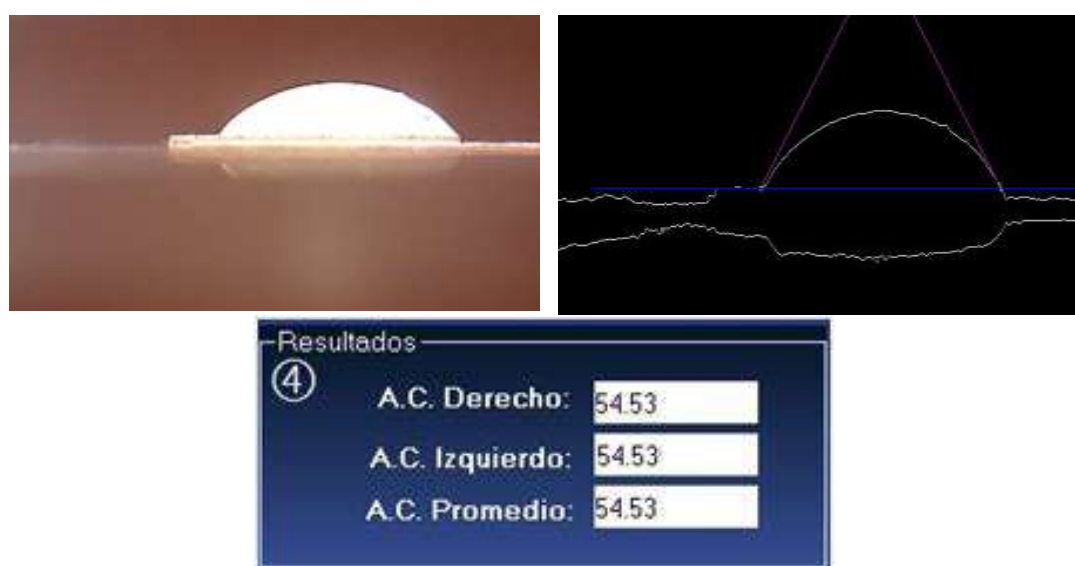


Figura 97. Resultado ensayo 5 a 16 °C

La Tabla 20 muestra los valores obtenidos para cada ensayo y el valor medio resultante para la prueba No.5 a 16°C. Los mapas de dispersión de los resultados de la prueba se muestran en las Figuras 98 y 99.

Tabla 20.
Tabulación de resultados para prueba No. 5 a 16°C

No. Ensayo	Valor ángulo de contacto
1	52,77
2	54,54
3	57,42
4	48,51
5	54,53
Valor medio \bar{x}_t	53,56

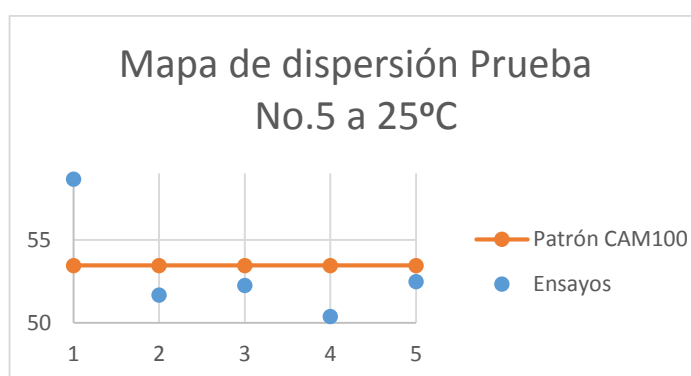


Figura 98. Mapa de dispersión Prueba No. 5 a 25°C

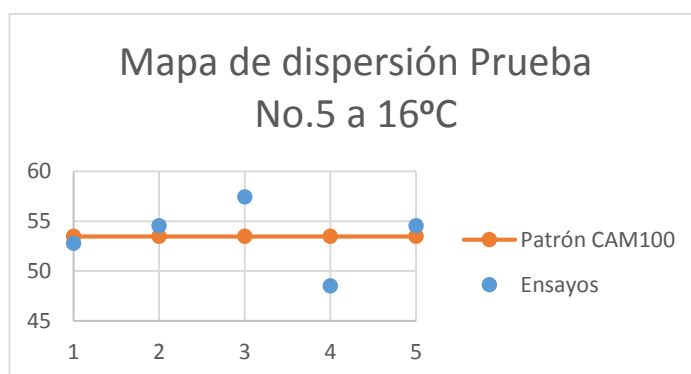


Figura 99. Mapa de dispersión Prueba No. 5 a 16°C

Finalmente se calculó el error porcentual entre el valor medio del ángulo de contacto obtenido en condiciones normales de temperatura y el obtenido con una variación de 10°C en contraste con el valor patrón.

Cálculo de exactitud a 25°C:

$$E\% = \frac{|\bar{X} - \bar{X}_N|}{\bar{X}_N} \times 100 \quad (4.1)$$

$$E\% = \frac{|53,11 - 53,46|}{53,46} \times 100$$

$$E\% = 0,65\%$$

Cálculo de error máximo a 25°C:

$$E\% = \frac{|58,67 - 53,11|}{53,11} \times 100$$

$$E\% = 9,81\%$$

Cálculo de precisión a 25°C:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 \dots + (x_n - \bar{x})^2}{N}} \quad (4.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(58,67 - 53,11)^2 + (51,69 - 53,11)^2 + (52,27 - 53,11)^2 + (50,40 - 53,11)^2 + (52,50 - 53,11)^2}{5}}$$

$$\sigma = \pm 3,22$$

Cálculo de exactitud a 16°C:

$$E\% = \frac{|\bar{X} - \bar{X}_N|}{\bar{X}_N} \times 100 \quad (4.1)$$

$$E\% = \frac{|53,56 - 53,46|}{53,46} \times 100$$

$$E\% = 0,19\%$$

Cálculo de error máximo a 16°C:

$$E\% = \frac{|48,51 - 53,56|}{53,56} \times 100$$

$$E\% = 9,42\%$$

Cálculo de precisión a 16°C:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 \dots + (x_n - \bar{x})^2}{N}} \quad (4.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(52,77 - 53,56)^2 + (54,54 - 53,56)^2 + (57,42 - 53,56)^2 + (48,51 - 53,56)^2 + (54,53 - 53,56)^2}{5}}$$

$$\sigma = \pm 3,28$$

ANÁLISIS:

El ángulo de contacto calculado por el goniómetro al variar 10°C la temperatura de trabajo normal presenta un error del 0,19% del patrón establecido, por lo que se consiguió demostrar que el equipo es robusto ante variaciones de temperatura en un rango corto.

La precisión de las mediciones ante variaciones de temperatura es de $\pm 3,28$ grados con un error máximo de 9,42%, como se puede apreciar en los mapas de dispersión ilustrados en las Figuras 98 y 99.

Para establecer la temperatura de trabajo del equipo tanto en el margen inferior como superior, se puede aplicar esta prueba en un entorno que permita la variación de la temperatura en un rango absoluto (273 K – 373 K).

PRUEBA 6.- Valor del ángulo de contacto resultante entre agua destilada y vidrio ante variación de iluminancia externa

Objetivo de la prueba: Verificar el valor del ángulo de contacto ante variación de la iluminancia externa al entorno controlado.

Tipo de Prueba

Cuantitativa / prototipo-software
especializado-luminarias externas

PROCEDIMIENTO:

- Definir la configuración de la iluminación externa al entorno controlado a ser utilizada en la prueba, de tal manera que permita la variación del parámetro medido por el luxómetro.
- Establecer la iluminación en el nivel más bajo.

- Ubicar agua destilada y porta muestras de vidrio a mano para la prueba.
- Ubicar una punta en la pipeta, previamente esterilizada en una autoclave.
- Ajustar un volumen de 20ul para la prueba mediante el giro del botón de pipeteo ubicado en la parte superior de la pipeta y succionar el agua destilada.
- Ubicar la pipeta en la pinza universal de tres dedos, y asegurarse que la misma se encuentre correctamente ajustada mediante los tornillos dispuestos para tal propósito.
- Ubicar el porta muestras de vidrio en la paleta.
- Conectar a la energía el prototipo y encenderlo mediante el interruptor ubicado en la caja de control.
- Conectar el prototipo al computador mediante el cable USB.
- Insertar el CD “GONIÓMETRO DE ÁNGULO DE CONTACTO” en el computador y ejecutar la aplicación GONIOMETRO_AC.exe.
- Dar clic en el botón “Iniciar”.
- Escribir los materiales de la prueba en los campos correspondientes y dar clic en “Dispensar líquido”, para realizar tal acción (Figura 100).
- Para adquirir y procesar la imagen de la cámara microscópica se debe dar clic en los botones de la sección “Controles” con el siguiente orden: “Conectar”→”Foto”→”Usuario”.



Figura 100. Pantalla de procesamiento

- Se despliega una ventana que muestra los contornos de la imagen de entrada, en ella se debe dar clic sobre los puntos de contacto como se explica en el inciso 3.4.3 (Figura 101).



Figura 101. Pantalla de contornos

- Verificar el resultado del ángulo de contacto en la pantalla anterior.
- Repetir la prueba con variación en la iluminación externa de al menos dos niveles adicionales.
- Comparar los resultados obtenidos a las diferentes condiciones de iluminación externa.

APLICACIÓN:

Se estableció una configuración de luminarias que incidan en el exterior del entorno controlado: dos luminarias de mesa con brillo regulable y seis lámparas fluorescentes compactas en el techo de aproximadamente 560 lúmenes cada una, como se muestra en la Figura 102:



Figura 102. Configuración de luminarias externas al ambiente controlado

Con el uso de un luxómetro se midió el primer nivel de iluminación en 195 Lux (Figura 103), el segundo en 255 Lux (Figura 105) y el tercero en 599 Lux (Figura 107). Se siguió el procedimiento indicado previamente y se consiguieron los resultados mostrados en las Figuras 103, 104, 105, 106, 107 y 108:



Figura 103. Nivel bajo de iluminación externa

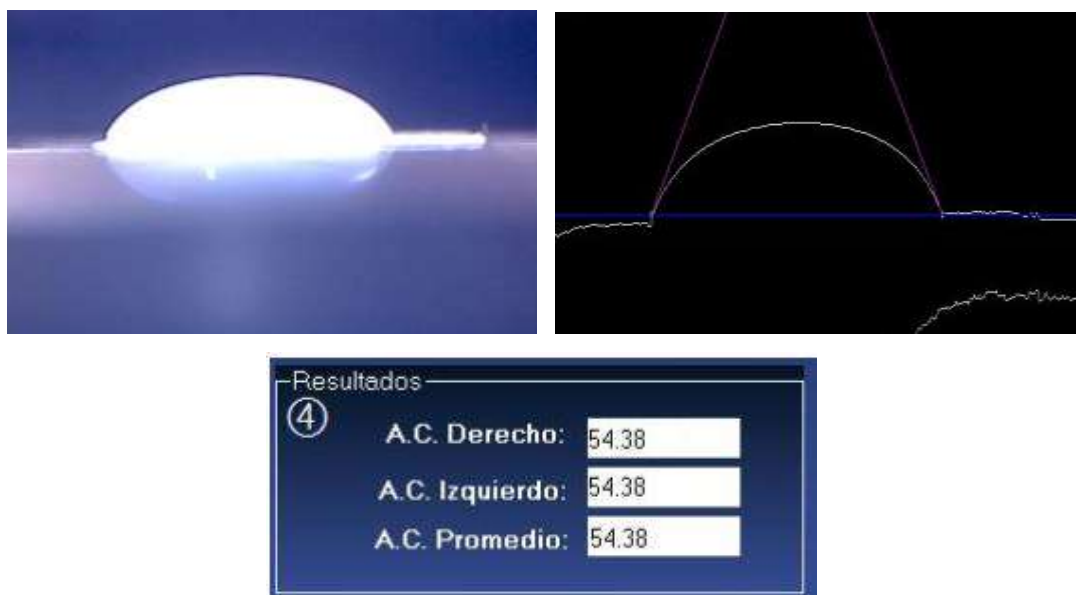
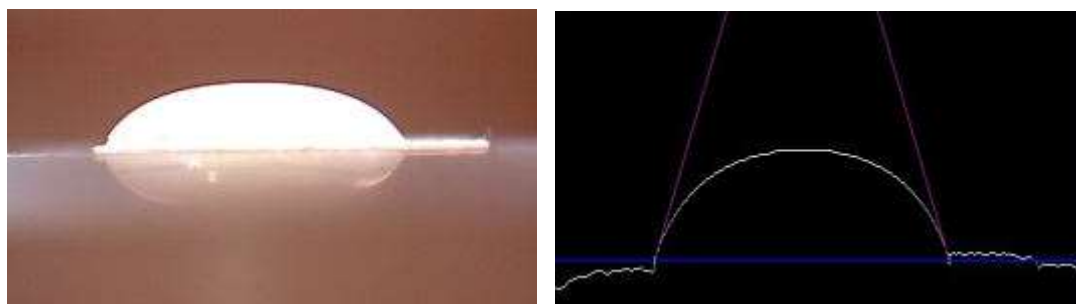


Figura 104. Ensayo para 195 Lux de iluminación externa



Figura 105. Nivel medio de iluminación externa

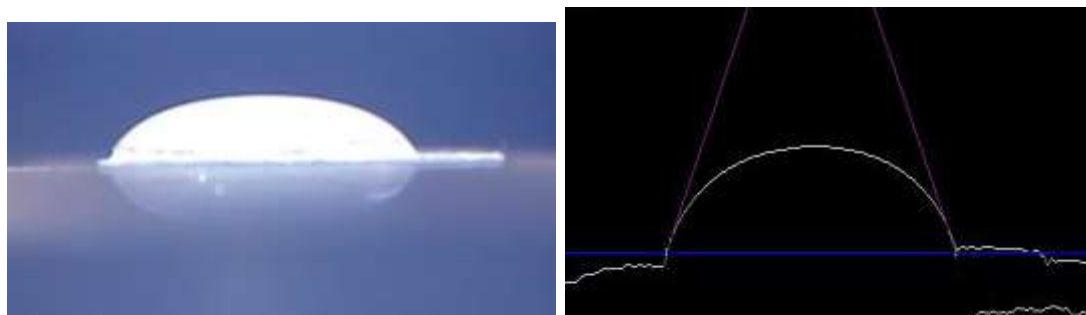


Resultados	
④	A.C. Derecho: 55.59
	A.C. Izquierdo: 55.59
	A.C. Promedio: 55.59

Figura 106. Ensayo para 255 Lux de iluminación externa



Figura 107. Nivel alto de iluminación externa



Resultados	
④	A.C. Derecho: 51.79
	A.C. Izquierdo: 51.79
	A.C. Promedio: 51.79

Figura 108. Ensayo para 599 Lux de iluminación externa

ANÁLISIS:

Se calcula el error de cada una de las mediciones anteriores respecto al valor nominal para ángulo de contacto de agua contra vidrio establecido por el software CAM100 (Figura 76).

$$E_i\% = \frac{|x_i - \bar{X}_N|}{\bar{X}_N} \times 100 \quad (4.3)$$

$$E_1\% = \frac{|54,38 - 53,46|}{53,46} \times 100$$

$$E_2\% = \frac{|55,59 - 53,46|}{53,46} \times 100$$

$$E_3\% = \frac{|51,79 - 53,46|}{53,46} \times 100$$

$$E_1\% = 1,72\% \quad E_2\% = 3,99\% \quad E_3\% = 3,12\%$$

El ángulo de contacto calculado por el goniómetro al variar la cantidad de iluminación externa incidente sobre el entorno controlado presenta un error de hasta 3,99% del resultado nominal, por lo que se consiguió demostrar que el equipo es robusto ante variaciones de iluminación externa en una configuración de luminarias normalmente dispuestas para el trabajo en un laboratorio u oficina.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El siguiente capítulo recoge finalmente, los principales logros y resultados obtenidos en el desarrollo e implementación del presente trabajo, de los cuales se establecen conclusiones y recomendaciones.

5.1. Conclusiones

- El prototipo de goniómetro de ángulo de contacto implementado posee un peso de 3Kg y una dimensión de 32x15x45cm, que lo hacen portátil. La librería para visión artificial OpenCV permitió el desarrollo de software especializado en código abierto. La interacción del hardware y software permiten calcular el ángulo de contacto de un líquido sobre una superficie sólida, con un error de 1,30% con respecto a los resultados obtenidos con el equipo CAM100.
- El diseño e implementación del prototipo de goniómetro permitió el manejo adecuado de la muestra líquida y la superficie sólida dentro de un entorno controlado, que mediante las pruebas de desempeño aplicadas demostraron la robustez del mismo con un error de 3,99% ante perturbación de luz externa y 0,19% ante variación de la temperatura de trabajo.
- Los sistemas de goteo, iluminación y adquisición de imagen en entorno controlado se implementaron siguiendo un protocolo de pruebas cualitativas descrito en el inciso 4.6, que permitirán además en el futuro determinar el estado de los componentes de los sistemas y aplicar mantenimiento de ser necesario.
- Se implementaron tres aplicaciones de escritorio como recurso en el diseño del software especializado, permitieron la calibración de los parámetros necesarios para el procesamiento digital de la imagen y facilitaron la

detección de errores en cada etapa, finalmente fueron combinadas en la aplicación final implementada para interacción con el usuario.

- Se implementó una interfaz para el usuario con capacidad de controlar las etapas para el cálculo del ángulo de contacto, además de reconfigurar los parámetros para el procesamiento de la imagen en caso de incurrir en descalibraciones del equipo y el control independiente de cada sistema definido como parte del prototipo.

5.2. Recomendaciones

- Para obtener el ángulo de contacto el prototipo debe ser colocado sobre una superficie plana y sin inclinaciones. Dado que el ángulo de contacto es un promedio del ángulo izquierdo y derecho, la gota debe estar colocada de manera correcta.
- El software implementado en el presente trabajo incluye al usuario en el proceso de detección de puntos de contacto de la gota en la superficie, por lo que se recomienda la práctica del procedimiento mediante el tutorial adjunto en la aplicación
- Debido a que la variación del ángulo de contacto está sujeta a varias condiciones como la evaporación de líquido, se requiere establecer un tiempo máximo de trabajo para que la matriz de LED RGB no genere calor dentro del entorno controlado. El tiempo recomendado de trabajo máximo es de 20 minutos tiempo prudencial para la toma de varias muestras.
- En un trabajo que involucre procesamiento digital de imagen se recomienda, implementar algoritmos separados para cada transformación aplicada a la imagen; de esta manera se facilita la detección de resultados no deseados y un ajuste más fino en la calibración de parámetros.
- Para el trabajo con la biblioteca de visión artificial OpenCV se recomienda, realizar la programación de la aplicación haciendo uso del lenguaje Python o Java, debido a que los lenguajes nativos como C++ no soportan la creación de GUI de manera directa. En el caso del presente trabajo se hizo

uso de la plataforma Qt Creator que sirve como traductor de código C++ y desarrollador de interfaces gráficas.

- Se recomienda establecer un itinerario (mensual, trimestral, semestral, etc.) de aplicación de las pruebas diseñadas en el inciso 4.6, que den paso a la programación de los tipos de mantenimiento que se pueden aplicar al equipo (preventivo, correctivo).
- Se recomienda usar superficies no refractivas en cuanto a las paredes del entorno y la paleta de muestra para evitar reflejos innecesarios sobre la gota, dado que esto puede producir bordes falsos o ángulos erróneos.
- Como trabajos futuros se propone realizar más pruebas de rendimiento al prototipo estableciendo nuevos parámetros a ser considerados como: variación de presión atmosférica, variación de la humedad ambiente, aumentar el rango de variación de temperatura, por mencionar algunos. Además, resultaría importante introducir el uso del equipo dentro de una aplicación específica para la industria, de tal manera que se tenga la posibilidad de realizar pruebas con nuevos materiales y verificar si los valores de exactitud y precisión actuales resultan convenientes.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abljtaleb, A. (1989). Automatic thresholding of gray-level pictures using two-dimensional entropy. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 47, 22-32.
- Adams, M. A., Phil, P. D., Marx, C., & Hutton, W. C. (1986). An electronic inclinometer technique for measuring lumbar curvature. *Clin Biomech*, 130-4.
- Alghunaim, A., Kirdponpattara, S., & Zhang Newby, B.-m. (2015). *Techniques for determining contact angle and wettability of powders*. Powder Technology.
- Araujo, Y., Araujo, M., Guzman, G., & Moya, G. (2011). Effect of the spreading coefficient on two-phase relative permeability. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, 8.
- Arduino. (2005).
- Assai, M., Shofer, J., Rohr, E., Price, R., Czerniecki, J., & Sangeorzan, B. (2003). Assesment of an electronic goniometer designed to measure equinus contracture. *J Rehabil Res Dev*, 235-9.
- Barraga, N. C. (1992). Desarrollo senso-perceptivo. *ICEVH*.
- Beijing United Test Co., Ltd. (2016). *Product*. Obtenido de JYSP-360 Contact angle goniometer: <http://unitedtest.en.made-in-china.com/product/UqVQDmpPOFku/China-JYSP-360-Contact-Angle-Goniometer.html>
- Berg, J. (1993). *Wettability*. New York: Marcel Dekker.
- Biolin Scientific. (2016). *Product*. Obtenido de Theta: <http://www.biolinscientific.com/product/theta/>
- Blonna, D., Zarkadas, P. C., Fitzsimmons, J., & O'Driscoll, S. W. (2012). Validation of a photography-based goniometry method for measuring joint range of motion. *Journal of shoulder and elbow surgery*.
- Boyat, A., & Joshi, B. K. (2013). Image denoising using wavelet transform and median filtering. *Nirma University International Conference on Engineering* (págs. 1 - 6). Ahmedabad: IEEE.
- Boyat, A., & Joshi, B. K. (2015). A review paper: Noise models in digital image processing. *Signal & Image Processing*.
- Brooks, M. J. (1978). Rationalizing edge detectors. *Computer Graphics and image processing Volume8, Issue 2*, 277-285.

- Buades, A., Coll, B., & Morel, J.-M. (2005). A review of image denoising algorithms, with a new one. *Multiscale Modeling and Simulation*, 490–530.
- Celestron. (06 de Junio de 2016). *Celestron Digital Microscope*. Obtenido de <http://www.celestron.com/browse-shop/microscopes/digital-microscopes/deluxe-handheld-digital-microscope>
- de Oliveira, S., Coury, H., & Hansson, G. (2009). Improving goniometer accuracy by compensating for individual transducer characteristics. *J Electromyogr Kinesiol*, 704-9.
- Dionisio, M., & Joao, S. (2000). A surface chemistry experiment using an inexpensive contact angle goniometer. *Journal of Chemical Education*, 59-62.
- Dougherty, G. (2009). *Digital Image Processing for Medical Applications*. New York: Cambridge University Press.
- DragonLab. (04 de Junio de 2016). *DLAB*. Obtenido de <http://www.dragonlab.com/en/index.php?m=view&a=index&aid=7>
- Electronic Product Solutions. (01 de Julio de 2016). *Micro SATA Cables*. Obtenido de <http://www.microsatacables.com/usb-20-to-ttl-uart-6pin-module-serial-converter-cp2102-usb-ttl-adpt>
- Ferriero, G., Varcelli, S., Sartorio, F., Muñoz Lasa, S., Ilieva, E., Brigatti, E., . . . Foti, C. (2012). Reliability of a smartphone-based goniometer for knee joint goniometry. *International journal of rehabilitation research*.
- Freire Espinoza, M. F. (1998). Detección de bordes de imágenes digitalizadas (Tesis de pregrado). Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Fu, K., & Mui, J. (1981). A survey on image segmentation Volume 13, Issue 1. *Pattern Recognition*, Pages 3-16.
- Ghosal, S., & Mehrotra, R. (1994). Detection of composite edges. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14-25.
- González Cid, Y. (2010). *Universitat de les Illes Balears*. Recuperado el 2 de Abril de 2016, de http://dmi.uib.es/~ygonzalez/VI/Material_del_Curso/Teoria/Tema5_Filtrado.pdf
- González González, R. A. (2010). Algoritmo basado en Wavelets aplicado a la detección de incendios forestales (Tesis postgrado). Universidad de las Américas Puebla, Puebla, México.
- Gonzalez, R., & Woods, R. (2002). *Digital image processing 2nd edition*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.

- Gutiérrez Farfán, J., & López Blas, J. F. (2012). Caracterización de agentes químicos para recuperación mejorada de hidrocarburos (Tesis de Pregrado) . México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Haralick, R. M. (1984). Digital step edges from zero crossing of second directional derivatives. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 58 - 68.
- Huang, S., Luo, C., Ye, S., & Wu, J. (2012). Motor impairment evaluation for upper limb in stroke patients on the basis of a microsensor. *International journal of rehabilitation research*.
- Hubbard, A. T. (2002). *Encyclopedia of surface and colloid science*. Marcel Dekker, Inc.
- Hueckel, M. (1973). A local visual operator wich recognizes edges and lines. *Journal of the ACM (JACM) Volume 20 Issue 4*, 634-647.
- Intel Corp. (1991).
- Joshi, A., Boyat, A., & Joshi, B. K. (2014). Impact of wavelet transform and median filtering on removal of salt and pepper noise in digital images. *International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques* (págs. 838 - 843). Ghaziabad: IEEE.
- Jung, A. (2001). *An introduction to a new data analysis tool: Independent Component Analysis*. Regensburg.
- Kruss. (2015). *Drop Shape Analysis System DAS100*. Recuperado el 14 de Diciembre de 2015, de http://www.upc.edu/sct/es/documents_equipment/d_211_id-672.pdf
- KSV Instruments. (2016).
- Kwok, D., Gietzelt, K., Grundke, H., Jacobasch, H.-J., & Neumann, A. (1997). Contact angle measurements and contact angle interpretation. *Langmuir*, 15.
- Kwok, D., Lin, R., Mui, M., & Neumann, A. (1996). Low-rate dynamic and static contact angles and the determination of solid surface tensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 63–77.
- Leja, J., & Poling, G. W. (1960). On the interpretation of contact angle. *Proceedings [of the] 5th International Mineral Processing Congress*, (pág. 325). Londres.
- Macrini, D. A., & Baruh, G. (2007). *Sistema de reconocimiento automático de formas*. Recuperado el 28 de Marzo de 2016, de University of Toronto: <http://www.cs.toronto.edu/~dmac/images/ProjectFiles/sraf/srafdoc/deteccion.html>
- Maksimovic, R., & Popovic, M. (1999). Classification of tetraplegics through automatic movement evaluation. *Med Eng Phys*, 313-27.

- Motwani, M., Gadiya, M., Motwani, R., & Harris, F. (2004). Survey of image denoising techniques. *Proceedings of GSPx*. Santa Clara, CA.
- Neumann, A. W., & Good, R. J. (1979). Techniques of Measuring Contact Angles. En R. J. Good, & R. R. Stromberg, *Surface and colloid science Volume 11: Experimental methods* (págs. 31-91). New York: Plenum Press.
- Nicol, A. (1989). Measurement of joint motion. *Clin Rehabil*, 3(1):1.
- Patel, P., Jena, B., Sahoo, B., Patel, P., & Majhi, B. (2016). Study of noise removal techniques for digital images. En V. Santhi, D. Acharjya, & M. Ezhilarasan, *Emerging technologies in intelligent applications for image and video*. IGI Global.
- Petrou, M., & Petrou, C. (2011). *Image processing: The fundamentals*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Plasmatreat USA, Inc. (2016). *Productos y sistemas*. Obtenido de Medición automática del ángulo de contacto para determinación de la tensión superficial:
http://www.plasmatreat.es/instalaciones_productos/determinacion_de_la_superficie/medicion_angulo_contacto_determinacion_tension_superficial_goniometro.html
- Prewitt, J. M. (1970). Object enhancement and extraction. *Picture Processing and Psychopictorics*, 75-149.
- Proinca. (06 de Junio de 2016). *Materiales de laboratorio-Proinca*. Obtenido de <http://proinca.com.gt/?p=130>
- Qt Project. (2009).
- Ramé-Hart. (1960).
- Ramos, L., & Blas, G. (2003). Estudio de la mojabilidad y ángulo de contacto en sistemas crudo/sólido/fluido (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela. Recuperado el 2015 de Junio de 13, de Repositorio Digital de la Universidad Central de Venezuela:
<http://saber.ucv.ve/jspui/bitstream/123456789/546/1/Trabajo%20Especial%20de%20Grado.pdf>
- Rodríguez, Á. (2010). Estudio del ángulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales (Tesis de Pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, Leganes, España.
- Rusell, T., Jull, G., & Wootton, R. (2003). Can the Internet be used as a medium to evaluate knee angle? *Manual Therapy*.
- Saguy, I., Marabi, A., & Wallach, R. (2005). Liquid imbibition during rehydration of dry porous foods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*.

- Satorres Martínez, S. (2006). *Detección de bordes en una imagen*. Recuperado el 28 de Marzo de 2016, de Universidad de Jaén:
http://www4.ujaen.es/~satorres/practicas/practica3_vc.pdf
- Savov, L. (1977). Wettability of solids by molten metals and alloys. *Metall*, 51(9), 475-485.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1998). *The mathematical theory of communication*. Chicago: University of Illinois.
- ShopTronica. (06 de Junio de 2016). *Tienda de materiales electrónicos*. Obtenido de <http://www.shoptronica.com/modulos-de-led/2204-modulo-led-rgb-5050-smd-sumergible.html>
- Smithwich, R. W. (1988). Contact-angle studies of microscopic mercury droplets on glass. *Colloid and Interface Science*, 482–485.
- Stroustrup, B., & Bell Labs. (1983).
- Suzuki, S., & Abe, K. (1985). Topological structural analysis of digital binary images by border following. *Comput Vis Graph Image Process. Computer Vision Graphics and Image Processing* 30(1), 32-46.
- TowerPro. (04 de Junio de 2016). *Tower Pro*. Obtenido de <http://www.towerpro.com.tw/product/mg958/>
- Yuan, Y., & Lee, T. R. (2013). Contact Angle and Wetting Properties. En G. Bracco, & B. Holst, *Surface Science Techniques* (págs. 3-34). Springer Berlin Heidelberg.
- Zisman, W. A. (1960).

Anexo A

Anexo B