



# **SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN PARA MEDICIÓN DE PROPIEDADES EN PELÍCULAS POLIMÉRICAS DESARROLLADAS PARA EMPACAR FRUTAS TROPICALES.**

## **TRABAJO DE GRADO**

Presentado por:

*Julio David Hernández Segura*  
*Juan Pablo Rojas Montoya*

Director:

Alexander Vera TASAMÁ

Co-Director:

Jorge Ivan MARIN

Programa de Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería

Universidad del Quindío

Armenia-Quindío

14 de enero de 2021

## AGRADECIMIENTOS

Julio David Hernández Segura: Le dedico todos mis logros y se los debo al eterno, seguido de mi familia que me acompañó en mi formación, a todos esos profesores que estuvieron día a día en el transcurso de mi carrera todo el conocimiento y aptitud que me dieron, gracias a todos los directores y colaboradores que estuvieron involucrados en el desarrollo de nuestro trabajo final, por todo el apoyo y dedicación que sin él no hubiera sido posible, gracias a todos los que durante el trayecto me aportaron también en mi crecimiento profesional.

Juan Pablo Rojas Montoya: En primer lugar, quiero dar gracias a Dios por guiarme en todo el recorrido de mi carrera, Seguidamente, le doy las gracias a mis padres y hermanos, quienes representaron para mí el apoyo incondicional, ánimo y alegría en cada paso que daba en el transcurso de la carrera. Por último, Gracias a todos los maestros que aportaron a mi crecimiento personal y profesional, al director y codirector de tesis por sus asesorías, apoyo y dedicación que tuvieron, para la realización de este proyecto.

# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>10</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>12</b>
3.1. Generales . . . . .	12
3.2. Específicos . . . . .	12
<b>4. CONCEPTOS RELACIONADOS</b>	<b>13</b>
4.1. Agricultura colombiana . . . . .	13
4.2. Alimentos . . . . .	13
4.2.1. Clasificación de los alimentos . . . . .	13
4.2.2. Frutas tropicales . . . . .	14
4.2.3. Calidad en los alimentos . . . . .	14
4.3. Películas poliméricas . . . . .	15
4.4. Método de medición . . . . .	15
4.4.1. Área de contacto . . . . .	15
4.5. Ángulo de contacto . . . . .	15
4.5.1. Tensión superficial . . . . .	16
4.6. Propiedades de los materiales . . . . .	17
4.6.1. Humedad relativa . . . . .	17
4.6.2. Humectabilidad . . . . .	17
4.6.3. Permeabilidad . . . . .	17
4.6.4. Mojabilidad . . . . .	18
4.6.5. Capilaridad . . . . .	18
4.7. Curvatura y radio de curvatura . . . . .	19
4.8. Deducción de la ecuación de la Laplace . . . . .	20
4.9. Implementación artificial de los métodos matemáticos . . . . .	21
4.10. Visión artificial . . . . .	21
4.10.1. Modelo de color RGB . . . . .	22
4.11. Raspberry Pi 3 modelo B+ . . . . .	23
<b>5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN</b>	<b>24</b>
5.1. Análisis de requerimientos . . . . .	27
5.2. Hardware . . . . .	31
5.2.1. Microscopio digital . . . . .	32
5.2.2. Base para muestras . . . . .	33

5.2.3.	Jeringa dispensadora . . . . .	33
5.2.4.	Motor paso a paso . . . . .	34
5.2.5.	Polímero . . . . .	35
5.3.	Software . . . . .	35
5.3.1.	Calibración . . . . .	35
5.3.2.	Filtración, detección y deformación . . . . .	36
5.3.3.	Medición del ángulo de contacto . . . . .	38
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>40</b>
6.1.	Calibración del dispositivo en materiales . . . . .	40
6.2.	Análisis del ángulo de contacto . . . . .	41
6.3.	Interfaz de usuario (UI) . . . . .	45
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>48</b>
<b>8.</b>	<b>TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>49</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>50</b>
9.1.	Protocolo de verificación . . . . .	50
9.1.1.	Operación inicial . . . . .	50
9.1.2.	Mantenimiento periódico . . . . .	53
9.1.3.	Precauciones . . . . .	53
<b>10.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>54</b>

## Índice de tablas

1.	Levantamiento de requerimientos . . . . .	28
2.	Solución a requerimiento suministro de líquido de $6 \mu \text{ L}$ . . . . .	28
3.	Solución al requerimiento para el desarrollo de la prueba . . . . .	29
4.	Solución al requerimiento de adquisición de datos . . . . .	29
5.	Solución de requerimiento de costos . . . . .	30
6.	Microscopios USB . . . . .	32
7.	Regresión lineal y cálculo de la pendiente de la recta tangente a partir de 10 datos . . . . .	39
8.	Procesamiento digital para el ángulo de contacto de una gota de agua en superficie de parafina . . . . .	40

# Índice de figuras

1.	Ejemplo cadena de transporte [2] . . . . .	14
2.	Ángulo de contacto de un gota líquido sobre una superficie . . . . .	16
3.	Cohesión y tensión superficial por M Olmo R Nave [9] . . . . .	16
4.	Esquema de la región de contacto de una gota depositada sobre la superficie de un sólido. [15] . . . . .	18
5.	La atracción adhesiva hacia el vidrio es mayor que la adhesión intermolecular del agua. [4] . . . . .	19
6.	Círculo osculante de radio R a la curva C. [11] . . . . .	20
7.	Esquema de una gota de líquido inmersa en un fluido. [29] . . . . .	20
8.	Cubo unitario modelo RGB y las combinaciones [20] . . . . .	22
9.	Modelo en V . . . . .	25
10.	Diagrama de bloques del proceso de hardware . . . . .	26
11.	Diagrama de bloques del proceso de software . . . . .	27
12.	Dispositivo de medición . . . . .	31
13.	Microscopio USB 1600x . . . . .	32
14.	Base de laboratorio . . . . .	33
15.	Jeringa de 10 microlitros . . . . .	34
16.	Motor paso a paso con tornillo y tuerca deslizante . . . . .	34
17.	Película biopolimerica desarrollada por el grupo CYTA . . . . .	35
18.	Distorsión radial de la imagen [19] . . . . .	36
19.	Plano de ajedrez para la calibración . . . . .	36
20.	Filtración, detección y deformación . . . . .	37
21.	Región donde se mide el ángulo de contacto . . . . .	38
22.	Diferentes ángulos de contacto que existen . . . . .	39
23.	Deformación en la morfología de la gota en función del tiempo de mojado ( $t_0 \leq t_1$ ) a) cuando el líquido y el sustrato no han interactuado b) solvencia parcial del sustrato en el líquido. . . . .	41
24.	Estudio de la deformación de la gota con respecto al tiempo ( $t_0 \leq t_1$ ) por medio de regresión lineal. a) Deformación al instante que se suministra la gota, b) Deformación después de haber transcurrido 10 segundos. . . . .	42
25.	Procesamiento de imágenes para la prueba en película de cáscara de plátano. a) Imagen en blanco y negro de la gota sobre la película. b) Binarización de la imagen en blanco y negro. c) Recorte de la región más cercana al vértice donde se mide el ángulo de contacto . . . . .	43
26.	Regresión lineal a partir de los píxeles desde el vértice de la gota con el sustrato de cáscara de plátano . . . . .	43

27.	Control de iluminación en la imagen a) Sin ambiente controlado b) Con ambiente controlado . . . . .	44
28.	Recta tangente de cada imagen a) imagen sin ambiente controlado b) imagen con ambiente controlado . . . . .	45
29.	Interfaz de usuario . . . . .	46
30.	Gráfica de la prueba . . . . .	46
31.	Recorte procesado de la gota de líquido . . . . .	47
32.	Ángulo de contacto en grados . . . . .	47
33.	Mesa de muestras . . . . .	50
34.	Interfaz de usuario . . . . .	51
35.	Calibración microscopio . . . . .	52
36.	Interfaz gráfica y resultados . . . . .	52
37.	Jeringa con el soporte de acrílico . . . . .	53

# Capítulo 1

## 1. INTRODUCCIÓN

La población mundial actual requiere un flujo constante de toneladas de alimentos, entre los estudios que se ha encontrado coinciden en que más de la mitad de la población posee una mala alimentación, por ello, se debe optimizar los procesos de cosechas y post-cosecha. Las pérdidas por manejos en los procesos de cosechas, como el mal acopio, maltrato en el transporte, empackado, y almacenamiento de las frutas, resulta en una considerable afectación del resultado final, además que se afectan directamente los ingresos del agricultor [17].

En países como México, India, Colombia, Argentina, Chile y Costa Rica el proceso de post-cosecha comienza en el momento que el producto es extraído de su fuente natural hasta el momento que es convertido, ya sea por medio de algún método culinario o una transformación industrial. Durante estos procesos se ven afectados diversos factores que garantizan la calidad del producto, estos factores se dividen en intrínsecos y extrínsecos [17].

Los factores extrínsecos son tales como: temperatura, humedad, daños mecánicos, transporte, empaque, entre otros. En la investigación que se lleva a cabo se hace énfasis en los factores de humedad relacionados con el transporte, ya que el factor de humedad tiene un efecto directo en el desarrollo de microorganismos; en gran parte este efecto se controla mediante el empaque, el cual forma parte vital en el transporte y a lo largo de la cadena de post-cosecha.

Algunas frutas tropicales como el mango, banano, papaya y piña son muy sensibles a daños, por ese motivo es necesario de generar un correcto empackado y transporte para garantizar que a los comercializadores y consumidores finales les llegue una buena calidad de fruta. En el proceso de empackado de



la fruta no existe un envase predeterminado para que conserve su calidad, es por esto, que se busca usar polímeros con excelentes propiedades de humedad que le permita respirar y conservar la calidad a la fruta.

La gran cantidad de envases elaborados con polímeros que se encuentran en el mercado, es la razón por la cuál se necesita de un instrumento que sea capaz de caracterizarlos, es decir, que se pueda saber con certeza cual es el empaque que le proporciona a la fruta un ambiente adecuado para ser usados en su transporte.

Por otra parte, el ataque de los microorganismos está ligado a la cantidad de agua o humedad que pueda presentar el empaque en donde se encuentra contenido el alimento, si el empaque presenta un ambiente óptimo, es decir, lo más seco posible no dejará que se desarrollen microorganismos en la fruta.

Dado que el empaque juega un papel fundamental en el proceso de post-cosecha, es necesario contar con un sistema de instrumentación que permita realizar esta caracterización. Por esta razón, en este proyecto de grado se propone construir un máquina de bajo costo que sea asequible para los pequeños empresarios o agricultores, con la cual poder medir la propiedad de permeabilidad que poseen algunos materiales, enfocados a películas de cáscara de plátano desarrollada por el grupo de investigación CYTA de la facultad de Ciencias Agroindustriales de la Universidad del Quindío usada para el proceso de empacado de frutas tropicales.

Finalmente, este documento está distribuido de la siguiente manera, en el Capítulo 2 se describe la agricultura con el paso de los años y el reto al que se enfrenta hoy en día, además, se habla sobre los métodos usados para hacer las mediciones del ángulo de contacto, posteriormente en el Capítulo 3 se muestran los objetivos generales y específicos del proyecto, seguidamente en el Capítulo 4 se habla sobre conceptos relacionados con el tema de la agricultura, métodos de medición y propiedades de los materiales, El Capítulo 5 relata el diseño e implementación que se desarrollaron para llevar a cabo la construcción de la máquina, en el Capítulo 6 están consignados los resultados obtenidos y una breve discusión de ellos, por último en los Capítulos 8 y 9 se

encuentran las conclusiones pertinentes y algunos puntos fuertes que pueden ser mejorados por otras personas en trabajos futuros.

# Capítulo 2

## 2. ANTECEDENTES

La agricultura, es una disciplina llevada a cabo desde épocas ancestrales conformada por una serie de invenciones y procedimientos humanos, los cuales le han permitido al hombre modificar el ecosistema para satisfacer la demanda de alimento de la población en torno al crecimiento de ésta; como toda actividad humana, ha conocido durante su historia fracasos y éxitos, hoy en día, la agricultura forma parte de la principal manera de alimentar a la población mundial [24].

El reto que enfrenta la agricultura actualmente es transportar a cualquier parte del mundo sus productos, las frutas, entre ellas las tropicales que son unas de las más apetecidas en el mercado mundial tienen condiciones especiales en cuanto a almacenamiento, transporte y conservación, estas condiciones añaden dificultades para su proceso de exportación [24].

En el sector agrícola colombiano y en particular la producción de frutas tropicales, requiere de manipulación especializada por medio de procesos que se pueden efectuar de manera manual o automatizada; es decir la realización de ellos se llevan a cabo por maquinaria dedicada o trabajadores expertos, ya que los procesos requieren de alta precisión en el momento de su ejecución. El transporte de las frutas tropicales es uno de los pasos en el proceso de post cosecha, en este se debe de garantizar la inocuidad del producto la cual se asegura por medio de un control de calidad manteniendo características como: la humedad, temperatura, maduración, entre otros [24], [12].

En el proceso de post-cosechas, para que los productos conserven sus propiedades y características, se han desarrollado empaques que aseguran las condiciones de las frutas durante su transporte y almacenamiento. Los empaques se fabrican a partir de múltiples materias que se encuentran en el mercado, pero, la mayor parte de estos empaques perjudican el medio ambiente ya que están elaborados de materia que contamina. Para evitar esto, los empaques se elaboran a partir de materiales poliméricos, siendo amigables con el medio. El grupo de investigación CITA en la Universidad del Quindío está desarrollando estos materiales, para asegurar que estos empaques poliméricos cumplan con los requerimientos se realizan mediciones de humedad y humectabilidad en ellos.

Investigaciones realizadas por laboratorios a materiales y películas poliméricas, hallaron múltiples métodos para determinar características de humedad, los métodos consisten en realizar una medición del ángulo de contacto formado por una gota de líquido en una superficie. Entre los métodos usados para medir este ángulo se encuentra la burbuja cautiva, la gota sésil también llamada gota yacente y el de la balanza de Wilhelmy. El método de la gota sésil es el más usado según J. Solano, F. Lima y colaboradores, para aplicar la técnica ellos construyeron un tensiómetro digital con el cual midieron el ángulo de contacto en varios polímeros. La investigación de J. Solano arrojó un error de apenas 2% contrastando los resultados reportados por Admanson Gast en el año 1997 dando firmeza y veracidad a la investigación, ya que encontraron los mismos resultados [21], [6].

El método de la burbuja cautiva fue desarrollado en el año 1929 por Bartell y Hatch [16], unos años más tarde, el investigador Taggart introdujo cambios. El método consiste en insertar una pequeña burbuja de aire bajo la superficie de un líquido de interés, de esta manera calcular el ángulo que se forma de la altura y el diámetro de la burbuja en equilibrio sobre la superficie usando relaciones trigonométricas [32]. Este método proporciona la ventaja de controlar la atmósfera donde se introduce la burbuja, esto quiere decir, que en lugar de una burbuja de aire se introduce una gota de líquido insoluble en un líquido envolvente y así realizar la medición.

El método de la gota sésil o gota colgante se implementó por Andreas y colaboradores en 1938 por primera vez. En el cual planteó un cálculo de la tensión superficial a partir de 3 parámetros geométricos: diámetro máximo de la gota, diámetro del cuello y radio de curvatura en el ápice. Ya que no es posible en todas las ocasiones tener los valores exactos de dichos parámetros, se ha visto modificado este método y hoy en día este tiene muchos cambios a su estructura original combinando una serie de ecuaciones para obtener la curvatura más aproximada [5].

Hoy en día, la aplicación de los métodos de caracterización para la fabricación de empaques se lleva a cabo por medio de maquinaria, ya que está ofrece mayor precisión y rápida medición, pero esta solución trae consigo altos costos de adquisición. Para poder minimizar los costos en estas mediciones se desarrollan de manera artesanal con instrumentos mucho más económicos que realizan la tarea de medición con la precisión adecuada. Estos instrumentos logran una reducción promedio de un costo en el mercado de unos millones de pesos a unos cientos de miles.

# Capítulo 3

## 3. OBJETIVOS

### 3.1. Generales

- Diseñar un sistema electrónico para la caracterización de películas poliméricas usadas para el empacado de frutas tropicales, mediante el método de la gota sésil.

### 3.2. Específicos

- Diseñar un sistema electrónico para la adquisición de imágenes y datos mediante un microscopio.

- Diseñar un sistema digital que por medio de procesamiento de imágenes y mediante el método de la gota sésil el cual permita medir el ángulo de contacto de una gota de líquido con una película biopolimérica.

- Desarrollar una interfaz de usuario que permita operar el sistema diseñado de una manera fácil y adecuada para el operario.

- Diseñar un protocolo de verificación que permita el seguimiento funcional y operativo del sistema.

# Capítulo 4

## 4. CONCEPTOS RELACIONADOS

### 4.1. Agricultura colombiana

La agricultura es una actividad humana desarrollada para la siembra, cosecha y producción de alimento. En el mundo existen varios países agrícolas como: Países Bajos, Alemania, Colombia, Brasil, Francia, China, Canadá y España; cuando se habla de Colombia, se piensa en uno de los grandes países agrícolas por la variedad de productos para exportación que ofrece, la gran variedad se debe a la excelente ubicación geográfica ofreciendo una diversidad de climas y una gran cuenca hidrográfica. En Colombia la agricultura tiene un rol importante ya que ésta es una herramienta para mitigar la pobreza y aportar económicamente al crecimiento del país, por medio del cual contribuye al desarrollo sostenible de este, además de aportar al valor del producto interno bruto [2].

### 4.2. Alimentos

En la agricultura se habla de los alimentos como todas sustancias o materias ya sean líquidas, sólidas o de otra naturaleza e inclusive artificiales que forman parte de la alimentación humana, estos alimentos suministran nutrientes para los procesos humanos como la creación de tejidos, formación de estructuras o aporte energético, contribuyendo así al sostenimiento del sistema que conforma el cuerpo humano [1], [2].

#### 4.2.1. Clasificación de los alimentos

Es de vital importancia en la agricultura que los alimentos se clasifiquen estos pueden ser simples o complejos. Los alimentos simples son todos aquellos que nos suministra la naturaleza ya sea por medio de cultivo, recolección, siembra como algunos de los productos vegetales (frutas y verduras), también se incluyen los alimentos adquiridos por sacrificio animal sin ningún tipo de procesamiento. Los alimentos complejos son aquellos que se adquieren por medio de algún proceso o manipulación que convierte el alimento simple en un nuevo alimento, como los son el pan, los embutidos, el azúcar, el aceite, las mermeladas entre otros [2], [1].

#### 4.2.2. Frutas tropicales

Profundizando un poco más en los alimentos simples, se habla de las frutas tropicales que son aquellas provenientes de climas tropicales o subtropicales, otra forma de llamarlas es frutas exóticas. Hoy en día estas frutas son muy codiciadas en todo el mundo por sus inigualables sabores, aromas y su elevado contenido vitamínico. Las frutas tropicales poseen una alta sensibilidad, es decir, que se deterioran con facilidad cuando no se les proporciona un manejo adecuado. Entre las frutas tropicales más cultivadas en la región colombiana se encuentra el mango, la piña, el lulo, el maracuyá, la guayaba y la papaya [30].

#### 4.2.3. Calidad en los alimentos

En las frutas tropicales y los alimentos, su calidad posee diferentes definiciones y una de ellas se la reconoce como el conjunto de características que posee un producto diferenciándolo de otros. Por otra parte, en la sociedad está estrechamente relacionada la calidad en cuanto a lo que el consumidor está dispuesto a pagar por un determinado artículo.



Figura 1: Ejemplo cadena de transporte [2]

En la Figura 1 se aprecia la calidad de las frutas en la cadena de transporte, se evidencia como estas se mantienen humedecidas por medio de aspersión de agua, también se aprecia el material de las bandas transportadoras y la estructura que poseen, siendo esta ideal para el tratamiento de calidad de este producto en una línea de procesamiento. En este procesamiento el control de calidad abarca diferentes aspectos, tales como: inspección en la recepción de la materia prima uso correcto de químicos y envasados adecuados, así como el peso neto y las condiciones de almacenamiento y por último el etiquetado [2].

### 4.3. Películas poliméricas

Para garantizar una buena calidad en el producto se usan películas biopoliméricas especialmente en el empaque de alimentos. Éstas son elaboradas de materiales orgánicos, que a partir de recursos renovables se degradan fácilmente. En la fabricación de éstas películas se usan 4 fuentes animales (Colágeno/gelatina), marinas (Quitina/quitosan), agrícolas (lípidos y grasas hidro coloides; proteínas y polisacáridos) y microbianas que están compuestas de [(ácido poliláctico (PLA) y polihidroxialcanoatos (PHA)] [28].

### 4.4. Método de medición

Las películas poliméricas que se van a usar en este proyecto deben cumplir con ciertas propiedades y para ellas se realiza una prueba mediante la cual se obtienen parámetros de humedad, humectabilidad entre otros. Para realizar estas pruebas fue usado el método de la gota sésil, al aplicar el método de la gota sésil es necesario conocer sobre los conceptos de área de contacto, ángulo de contacto y tensión superficial, los cuales se discuten en las siguientes secciones.

#### 4.4.1. Área de contacto

El área de contacto es aquella interacción que tiene dos materiales entre sí está puede ser: líquido/líquido, sólido/líquido, líquido/sólido o sólido/sólido. La interacción de estos materiales tiene diferentes efectos sobre cada uno de ellos, en el caso de sólido/líquido, en el que el sólido es la superficie, cada molécula del sólido tiende a soportar cierta cantidad del líquido. Este efecto hace que el líquido se disperse en la superficie del sólido generando así un comportamiento medible, la medición de este efecto se le conoce como ángulo de contacto que es formado entre 2 materiales [10].

### 4.5. Ángulo de contacto

El ángulo de contacto es el ángulo que forma en un cuerpo con respecto a una superficie como se puede apreciar en la Figura 2. En el estudio realizado se aplica a una gota de líquido sobre una superficie, y este ángulo se puede obtener teóricamente por medio de un mecanismo que consiste en minimizar la energía libre del sistema Gibbs.

Sin embargo, realizar esto empíricamente es difícil debido a una gran cantidad de estados meta estables. Actualmente son usadas diferentes técnicas para medir el ángulo de contacto de manera práctica como son el método de la gota sésil, mediante el instrumento goniómetro, entre otros. Algunos de los métodos pueden ser aplicados mediante procesamiento computacional debido a que se basan en analizar imágenes [26].



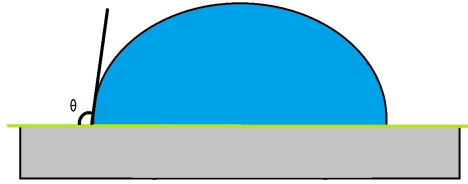


Figura 2: Ángulo de contacto de un gota líquido sobre una superficie

#### 4.5.1. Tensión superficial

La tensión superficial surge a partir de las fuerzas de atracción que actúan sobre la superficie, es decir que una molécula sufre fuerzas hacia todas las direcciones, pero las moléculas de la superficie poseen una atracción hacia el interior del material de su naturaleza. La tensión superficial es responsable de diferentes fenómenos cotidianos, por ejemplo, una gota de agua suspendida en un material las fuerzas de atracción que ejercen sus moléculas mantienen la forma más compacta, en este caso la de una esfera [9].

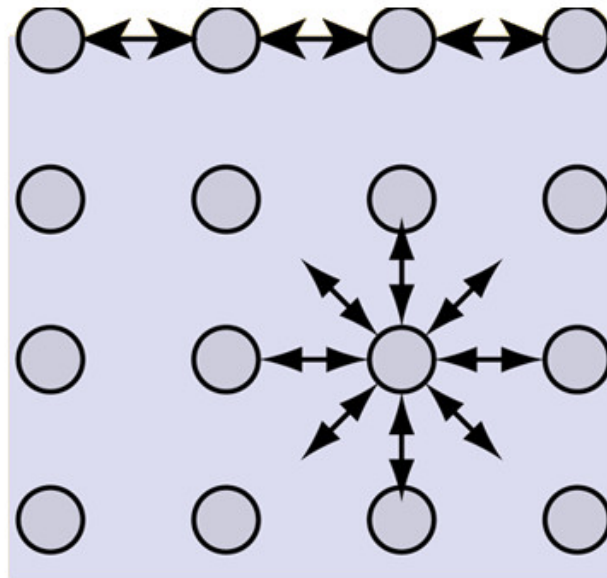


Figura 3: Cohesión y tensión superficial por M Olmo R Nave [9]

En la Figura 3 de M. Olmo R. se aprecia la dirección de las fuerzas que describe la tensión superficial.

## **4.6. Propiedades de los materiales**

Existe una amplia variedad de materiales en el momento de la elaboración o construcción de un proyecto, estos materiales ofrecen una amplia gama de condiciones especiales las cuales pueden llevar a que el proyecto sufra efectos benéficos o se vea perjudicado, unas de las propiedades más influyentes en el desarrollo de éste proyecto de investigación son humedad relativa, humectabilidad, permeabilidad, mojabilidad, capilaridad, propiedades que se describen a continuación [8].

### **4.6.1. Humedad relativa**

La medida de humedad relativa es denominada como higrometría, está se realiza con un instrumento denominado higrómetro. Un método de medición es en el que usan un material el cual se comporta de diversas formas dependiendo de la humedad en el ambiente. También existe un método más complejo el cual consta de reacciones químicas en el que se miden volúmenes de vapor por medio de tecnología más avanzada. Ambos métodos son confiables y usados en la investigación [14].

### **4.6.2. Humectabilidad**

La humectabilidad es una propiedad que poseen los materiales, resulta en la capacidad que tiene el material para que un líquido se extienda sobre su superficie; Ésta propiedad depende directamente de la energía de superficie del material, es decir, entre mayor sea la energía de superficie, el líquido se extenderá más sobre la superficie del material. La humectabilidad es común verla en procedimientos como revestimiento, recubrimiento y unión química. Una forma de determinar la humectabilidad en un material es midiendo el ángulo de contacto que se forma al depositar una gota de algún líquido sobre la superficie del material [27].

### **4.6.3. Permeabilidad**

La permeabilidad es la capacidad que presentan los materiales para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna, también se conoce como impermeabilidad. Cuando un material es permeable deja pasar una cantidad considerable de fluido a través de él, de lo contrario se diría que el material es impermeable, es decir que la cantidad de fluido que lo atraviesa no es considerable; la velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de

tres factores: la presión a la que se encuentre el fluido, la porosidad del material y la densidad del fluido a utilizar [13], [18].

#### 4.6.4. Mojabilidad

Es un fenómeno que poseen los líquidos y se mide como la capacidad que tiene un líquido de extenderse y dejar una huella sobre un sólido. La mojabilidad depende de la interacción que tiene las moléculas de los materiales, es decir, las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido provocan que el líquido se extienda por la superficie, mientras que las cohesivas del líquido hacen que éste se abulte y tienda a evitarla [23]. Un ejemplo, es cuando se deja caer una gota de mercurio sobre una superficie lisa como el vidrio que no deja ningún rastro sobre él, ya que el mercurio no moja el vidrio. Por el contrario, si se deja caer una gota de agua sobre el vidrio ésta se distribuye sobre el vidrio es decir lo moja [3], [15].

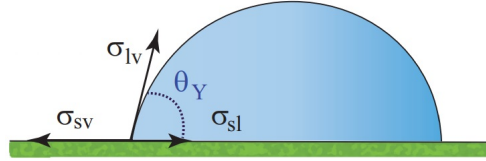


Figura 4: Esquema de la región de contacto de una gota depositada sobre la superficie de un sólido. [15]

En la Figura 4 se observa el esquema de fuerzas que resulta al depositar una gota de agua sobre una superficie sólida.  $\sigma_{sv}$  corresponde a la energía superficial por unidad de superficie del sólido seco y  $\sigma_{sl} + \sigma_{lv}$  es la energía superficial del sólido mojado.

En el fenómeno de mojabilidad se puede medir el parámetro de expansión (S), el cual indica el tipo de expansión que tiene la gota al depositarse sobre la superficie que puede ser parcial o total.

$$S = \sigma_{sv} - (\sigma_{sl} + \sigma_{lv}) \quad (1)$$

Este parámetro S, si es mayor que cero, el líquido se extiende totalmente sobre el sólido, por el contrario, si es menor que cero, entonces el líquido forma una gota sobre la superficie del sólido, es decir la extensión es parcial.

#### 4.6.5. Capilaridad

La capilaridad, propiedad de los fluidos que consta en la variación de su nivel por orificios tubulares o superficies porosas aun en contra de la fuerza de gravedad. Este fenómeno depende de la tensión superficial y fuerza intermolecular del líquido. Si el líquido sube por el tubo

capilar es porque la fuerza intermolecular del sólido es mayor a la de la adhesión de las moléculas del líquido [4].

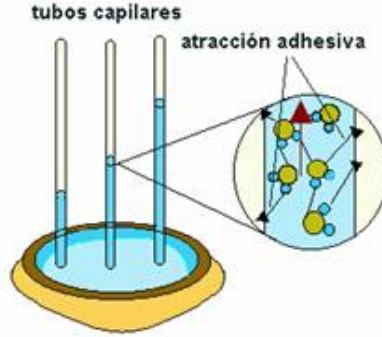


Figura 5: La atracción adhesiva hacia el vidrio es mayor que la adhesión intermolecular del agua. [4]

En la Figura 5 se observa como los tubos capilares se llenan a diferentes niveles de acuerdo al fenómeno de capilaridad que presenta el agua. El líquido se desplaza hacia arriba ascendiendo por el tubo de vidrio logrando así equilibrar las fuerzas involucradas, algunas de estas son: la tensión superficial, el peso del líquido entre otras [7].

#### 4.7. Curvatura y radio de curvatura

En el método de la gota sésil es necesario hablar sobre la curvatura de las superficies y así mismo relacionarla con la ecuación de Laplace para una esfera. La curvatura de una superficie es la forma que puede tomar un determinado objeto en el espacio que lo rodea. La forma más fácil de medir esta curvatura es tomar un círculo oscilante que se aproxime a la curva de radio  $R$  en el ángulo de contacto. La curvatura  $\hat{k}$  está dada por [11].

$$\hat{k} = 1/R \quad (2)$$

La curvatura  $\hat{k}$  y la curvatura de radio  $R$  pueden contener signo por eso se debe determinar si su curvatura es positiva o negativa, la orientación de la curva puede ser:

$$R > 0 \Rightarrow \hat{k} \geq 0 \Leftrightarrow \text{convexa} \quad (3)$$

$$R < 0 \Rightarrow \hat{k} \leq 0 \Leftrightarrow \text{cóncava} \quad (4)$$

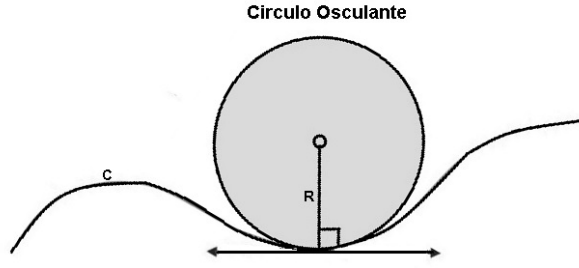


Figura 6: Círculo osculante de radio  $R$  a la curva  $C$ . [11]

La línea curva presenta dos curvaturas, una máxima  $\hat{k}_1$  y otra mínima  $\hat{k}_2$ . [11] Ahora que se tienen todas las curvaturas posibles se puede hablar de la curvatura media  $\mathcal{H}$ , que es el promedio de las dos curvaturas principales [11].

$$\mathcal{H} = 1/2(\hat{k}_1 + \hat{k}_2) \quad (5)$$

#### 4.8. Deducción de la ecuación de la Laplace

La ecuación de Laplace también llamada Ley de Laplace-Young es una ecuación que relaciona el cambio de presión en la superficie que presentan dos líquidos con la curvatura de dicha superficie [29].

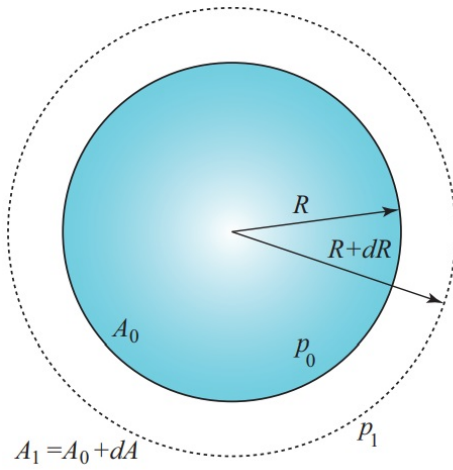


Figura 7: Esquema de una gota de líquido inmersa en un fluido. [29]

Se considera una gota esférica rodeada en un fluido como se observa en la Figura 7, se

desea hallar el trabajo que se necesita para que la gota aumente su volumen desde un radio  $R$  a un radio  $R + dR$ .

$$\delta W_i = -p_o dV_o \quad (6)$$

En (6), el término  $dV_o = 4\pi R^2 dR$  representa el trabajo interno de la gota de agua y  $p_o$  la presión inicial de la misma. El trabajo para desplazar el flujo externo está dado por.

$$\delta W_e = -p_1 dV_1 \quad (7)$$

donde  $dV_1$  es la disminución del volumen externo es decir  $-dV_o$  por lo tanto  $\delta W_e = p_1 dV_o$ . El trabajo que presenta el aumento de la superficie  $A$  de la Figura 7 está dado por.

$$\delta W_s = \sigma dA \quad (8)$$

El valor que toma  $dA = 8\pi R dR$  el cual representa la variación del área de la superficie esférica [29], como ya se tienen los trabajos calculados se puede reescribir la condición de equilibrio mecánico como.

$$\delta W = \delta W_i + \delta W_e + \delta W_s = 0 \quad (9)$$

Ahora sustituyendo desde la ecuación (6) a (8) y (9) se obtiene.

$$\Delta p = p_o - p_1 = 2\sigma/R \quad (10)$$

(10) corresponde a la ecuación de Laplace para una esfera de radio  $R$ .

## 4.9. Implementación artificial de los métodos matemáticos

El sistema de instrumentación para la medición de propiedades en películas poliméricas utiliza métodos matemáticos en el procesamiento de las imágenes adquiridas, por ello es necesario hablar detalladamente sobre: visión artificial, modelo de color RGB y modelo de color HSV.

## 4.10. Visión artificial

La visión artificial se basa en procesamiento de imágenes por computadora, hay dos clasificaciones amplias para gráficos por software, los paquetes de propósitos especiales y paquetes de programación general. Los paquetes de propósito especial son elaborados para personas que no son desarrolladores pero desean usar herramientas de procesamiento visual. Se usan gráficos o cuadros en alguna área de aplicación sin tener en cuenta todos los pasos internos que realiza la máquina para obtener el resultado deseado.

La interfaz para un paquete de propósito especial suele ser un conjunto de menús que permite a los usuarios comunicarse e interactuar con las herramientas que el software le provee. Ejemplos de tales aplicaciones incluyen programas de pintura de artistas y diversos sistemas CAD arquitectónicos, comerciales, médicos y de ingeniería. Por el contrario, los paquetes de programación general proporcionan una serie de bibliotecas que poseen funciones gráficas las cuales pueden ser usadas en un lenguaje de programación como C, C++, Java o Python.

Entre las funciones básicas en una biblioteca típica se tienen aquellas para especificar componentes de imagen (líneas rectas, polígonos, esferas y otros objetos), implementando valores de color, modificando componentes como vistas de una escena, y aplicando rotaciones u otras transformaciones [20].

#### 4.10.1. Modelo de color RGB

De acuerdo a la teoría de la visión tri estímulo, nuestros ojos perciben el color a través de estimulación de tres pigmentos visuales en los conos de la retina. Uno de los pigmentos es más sensible a la luz con una longitud de onda de aproximadamente 630 nm (rojo), otra tiene su sensibilidad máxima a aproximadamente 530 nm (verde), y el tercer pigmento es más receptivo a la luz con una longitud de onda de aproximadamente 450 nm (azul). En el momento de comparar intensidades de una fuente de luz, percibimos el color de la luz. esta teoría de la visión es la base para enseñar como es la emisión de color en un monitor de vídeo usando los tres primarios rojo, verde, y azul, que se conoce como el modelo de color RGB [20].

Podemos representar este modelo usando el cubo unitario definido en los ejes R, G y B, como se muestra en la Figura 8.

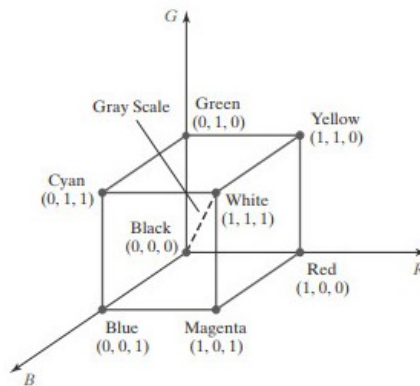


Figura 8: Cubo unitario modelo RGB y las combinaciones [20]

El origen del cubo representa el negro, los vértices de los ejes representan los colores primarios y los vértices restantes son los puntos de color complementarios para cada uno de los colores primarios. Como en el sistema de color XYZ, el esquema de color RGB es un modelo aditivo. Cada punto de color dentro del cubo de la unidad se puede representar como un vector ponderado suma de los colores primarios, utilizando los vectores unitarios R, G y B:

$$C(\lambda) = (R, G, B) = RR + GG + BB \quad (11)$$

donde los parámetros R, G y B son valores asignados en el rango de 0 a 1.0. Por ejemplo, el vértice amarillo se obtiene al agregar el máximo rojo y verde los valores para producir el triple (1, 1, 0) y el blanco en (1, 1, 1) es la suma de los valores máximos para rojo, verde y azul. Las tonalidades de gris se manifiestan a lo largo de la diagonal principal del cubo desde el origen (negro) hasta el vértice blanco. Puntos a lo largo de está diagonal tienen contribuciones iguales de cada color primario y un gris la sombra a medio camino entre blanco y negro se representa como (0.5, 0.5, 0.5).

#### 4.11. Raspberry Pi 3 modelo B+

El dispositivo Raspberry pi es un computador económico en una simple tarjeta de circuito impreso. Esta fue desarrollada en Reino Unido por la fundación Raspberry pi. El dispositivo es usado como un sistema básico en la ciencia y en el aprendizaje sobre computación, ya que, con este se pueden hacer diversas aplicaciones en múltiples áreas, por ejemplo, un sistema dedicado a realizar el procesamiento de un algoritmo para analizar un cierto tipo de archivos [25].

Entre las características más relevantes de este dispositivo se tienen:

- Una CPU de 1.2 Ghz con una arquitectura de 64 bits Quad core ARMv8
- Una GPU Dual-Core Video Core 4 3d
- 1 Gb de ram tipo LPDDR2
- 4 puertos USB 2.0

La Raspberry es uno de los dispositivos muy usados para desarrollo de diferentes aplicaciones ya sea en el área de las telecomunicaciones, en el área del procesamiento en paralelo e inclusive en el control de procesos [25].



# Capítulo 5

## 5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Este proyecto de grado surgió por la necesidad de medir el ángulo de contacto en películas de almidón de plátano, las cuales están siendo desarrolladas por el grupo de investigación CYTA de la facultad de Ciencias Agroindustriales de la Universidad del Quindío, que serán usadas en el proceso de empacado de frutas tropicales. En la caracterización de estas películas es necesario de un instrumento que permita medir el ángulo de contacto, puesto que esta medida está relacionada con la estimación de diferentes propiedades de la película de empaque tales como la humectabilidad y permeabilidad, ente otras.

En el proceso de la obtención del ángulo de contacto existen diversos métodos como: la burbuja cautiva, la gota sésil y la balanza de Wilhelmy. El proyecto de grado se inclinó por usar el método de la gota sésil, el cual consta de suministrar una pequeña gota de agua sobre la película de almidón de plátano. Esto permite que se pueda observar el ángulo de contacto que genera y así determinar si la película es adecuada para usarla en el proceso de empacado.

El proceso general de nuestro dispositivo se explica a continuación: Posee un sistema de inyección para suministrar una gota de líquido sobre la película de prueba, un sistema de procesamiento digital, el cual obtiene una imagen por medio de un microscopio que es compatible con el sistema Linux, un sistema electrónico que controla el mecanismo de inyección, ya que este debe ser de carácter automático, un soporte de fácil extracción y manipulación en el que se depositan las muestras, por último una estructura que conecte y soporte todas las partes del dispositivo.

El instrumento está conformado por las siguientes piezas: Mesa para muestras de laboratorio, caja de acrílico negra, rieles deslizantes, soporte de acrílico transparente, microscopio, SoC (Raspberry Pi3), microcontrolador (Arduino Mega2560), motor paso a paso, tornillo con tuerca deslizante, controlador (A4988) y una jeringa de 10  $\mu$  litros.

Para realización del proyecto de investigación se plantea usar una metodología de trabajo como es el modelo en V (Figura 9). Esta metodología será llevada a cabo para diseñar, probar e implementar una solución en sistemas embebidos. Además, es muy útil porque tiene individualización en etapas, lo que permitirá una localización de fallos fácilmente.

La sección de etapas es una tarea muy importante en el proyecto ya que esta da un control del procedimiento que se está implementando, permitiendo analizar y aislar el funcionamiento individual de las partes que conforman el sistema. Buscando dar más claridad a este proceso



Figura 9: Modelo en V

de diseño, para las etapas que conforman el sistema se elaboraron dos diagramas de bloques, en los que se da una perspectiva de la operación del hardware y software (Figuras 10 y 11).

En la Figura 10 se presenta el proceso llevado a cabo por los componentes físicos del sistema (hardware), desde la activación del operario a través de cada función interna, hasta el resultado que es llevado al procesamiento digital. Por otra parte en la Figura 11 se ilustra el proceso que es llevado a cabo por la parte digital (software), es decir una representación del flujo que posee el algoritmo de procesamiento que se encarga de los diferentes cálculos y métodos usados para la obtención del ángulo de contacto.

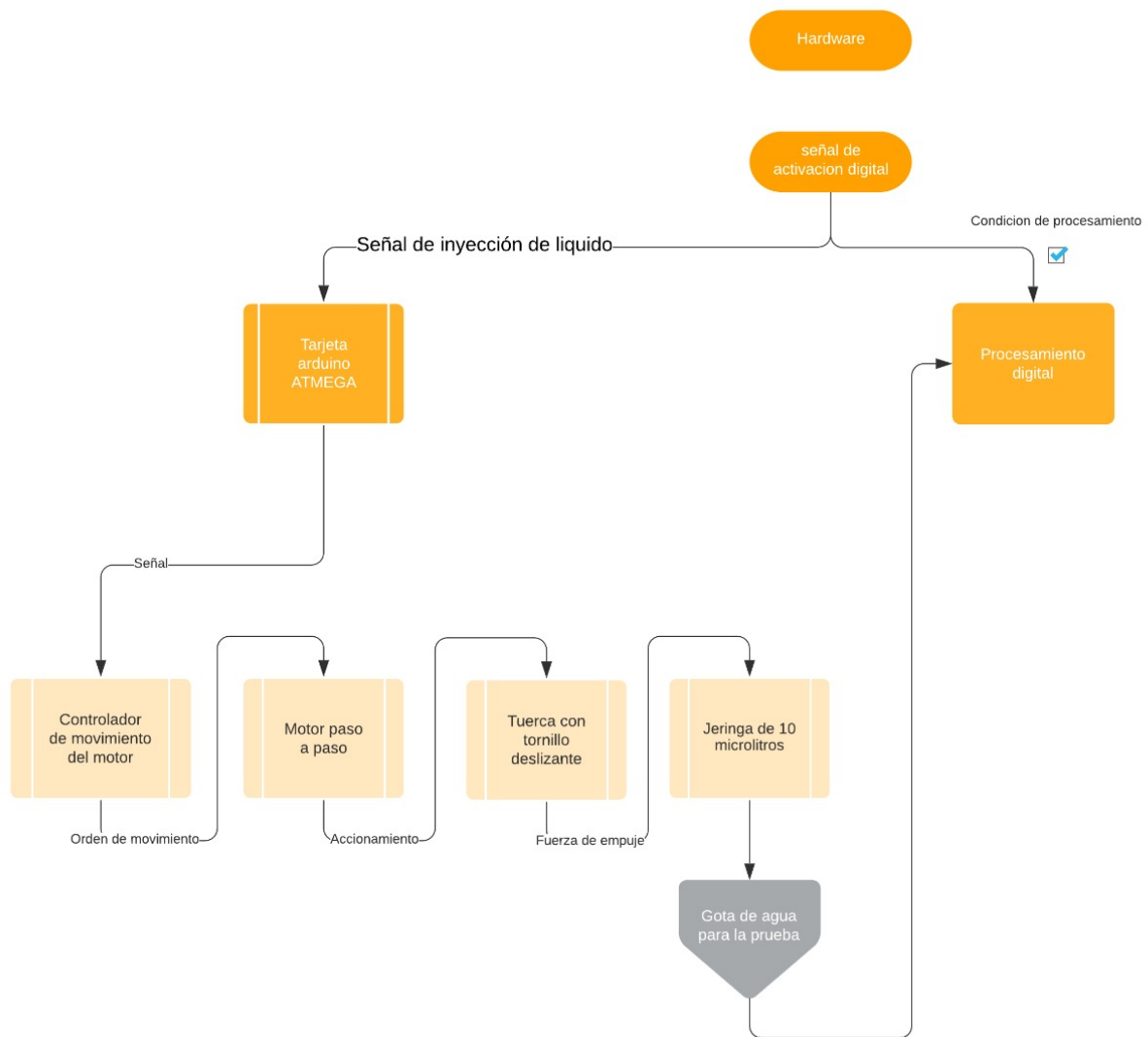


Figura 10: Diagrama de bloques del proceso de hardware

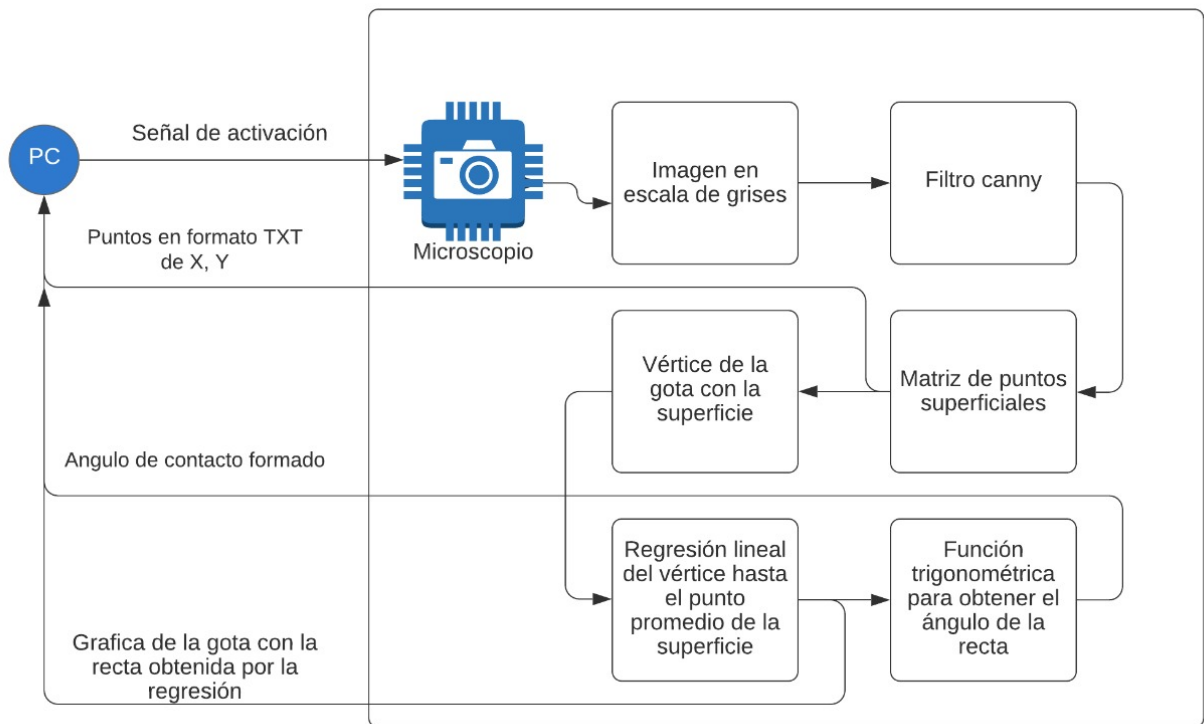


Figura 11: Diagrama de bloques del proceso de software

### 5.1. Análisis de requerimientos

Se inicia con una orientación del proyecto buscando delimitarlo en 4 requerimientos principales; suministro de líquido para hacer el análisis del material, adquisición de la imagen, entorno de desarrollo de la prueba y por último el bajo costo de los materiales.

Como resultado del levantamiento de estos requerimientos se obtuvieron las restricciones para el desarrollo del proyecto que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Levantamiento de requerimientos

Requerimientos	Especificaciones		
Suministro de líquido	10 micro litros	Suministro controlado	Accionamiento digital
Microscopio	Comunicación USB	Al menos 500x de zoom	Compatibilidad con sistemas linux
Entorno para la prueba	Ambiente con luz controlada	Fácil acceso	Fácil manipulación para el operario
Precio	El costo de fabricación no sobrepase el 10 % del precio que poseen los equipos de medición del ángulo de contacto en el mercado actual (20.000 USD)		

En la búsqueda de cumplir el primer requerimiento (Tabla 2) se usó controlador a4988, para accionar el sistema de inyección compuesto por: El motor paso a paso, la tornillo deslizante y la jeringa.

Tabla 2: Solución a requerimiento suministro de líquido de  $6 \mu L$

Referencia	01	Precio	323.000 COP
Nombre	Suministro de líquido en la prueba	Prioridad	Alta
Entrada:	Microcontrolador Módulo 4988 Motor paso a paso Tuerca deslizante Jeringa		
Salida:	Señal de activación Voltaje para el movimiento del motor Accionamiento de la tuerca Desplazamiento del émbolo Suministro de la gota para la muestra		
Restricciones	3.3 - 5 voltios, 4.6 x 2.4 x 1 pulgadas, memoria SRAM Voltaje 8V - 35V DC, Corriente Max 2A Voltaje de conducción en DC 4-9 V/500mA, 2 Fase 4 Alambre de DC 18 grados ángulo por cada paso del motor 10 $\mu$ litros, Agujas movibles, largo 2 "		

Para este caso, el controlador es el que va a suministrar la señal de activación con el que el motor funcionará, el módulo a4988 le brinda la potencia necesaria para que se ponga en

movimiento la tuerca deslizante y una vez así se pueda accionar la jeringa de 10  $\mu$  L que suministrará sobre la muestra la cantidad exacta de una gota de agua para hacer el proceso de caracterización; otras características del sistema actuador son el uso de voltaje continuo de 3.3 a 5V con una corriente máxima de 2A, y un motor de 18 grados por paso.

Para el requerimiento dos (Tabla 3), adquisición de la imagen, todo se centra en el microscopio, el SoC Raspberry Pi 3 y una caja de acrílico negra. La Raspberry pi 3 al ser una SoC económica y muy usada ofrece una flexibilidad para el uso de diferentes lenguajes de programación usados en el procesamiento de imágenes. Por último, la caja de acrílico negra proporciona un ambiente oscuro y adecuado solucionando cualquier tipo de inconveniente relacionado con la luz exterior.

Tabla 3: Solución al requerimiento para el desarrollo de la prueba

Referencia	02	Precio	135.000
Nombre	Entorno de desarrollo de la prueba	Prioridad	Media
Entrada:	Mesa de muestra Caja de acrílico negra		
Salida:	Proporciona el nivel apropiado de la captura Genera un ambiente perfecto para la captura		
Restricciones	Acero inoxidable, tamaño 100mm x 100mm Acrílico color humo evita luz externa, dimensiones 13cm x 13cm, frágil		

Para cumplir el requerimiento tres, la adquisición de datos (Tabla 4), se usaron los siguientes instrumentos: microscopio y Raspberry Pi 3. El microscopio de aumento 1000x y su iluminación por 8 LED proporcionan una buena imagen para el procesamiento digital. La comunicación USB del microscopio facilita que los datos sean usados fácilmente por la Raspberry Pi 3.

Tabla 4: Solución al requerimiento de adquisición de datos

Referencia	03	Precio	425.000 COP
Nombre	Adquisición de la imagen	Prioridad	Alta
Entrada:	Microscopio Raspberry Pi 3		
Salida:	Aumento de 40 a 1000, tamaño 4,5 "X 1,3 ", imagen de 2MP Procesar la imagen de la gota		
Restricciones	Aumento de 40 a 1000, tamaño 4,5 "X 1,3 ", 2MP, luz artificial, USB		
—	Pines de 3.3 V		

Para cumplir el último requerimiento bajo costo de materiales (Tabla 5), busca presentar al equipo de investigación y a los agricultores un sistema de instrumentación asequible, que facilite la caracterización de las películas de pulpa de celulosa de una forma confiable, pero con instrumentos de bajo costo. La estructura se diseñó en acrílico debido a la elegancia y rigidez que proporciona este material, además de ser un material barato y fácil de manipular. La ventaja del motor paso a paso y el tornillo con tuerca deslizante es que por un bajo precio proporciona una alta precisión al depositar la gota de líquido adecuadamente. El microscopio siendo genérico se acopla al requisito de bajo costo y aun así proporciona una imagen excelente evitando costos adicionales. Cuenta con una conexión USB que permite acoplarse fácilmente con el SoC que se está trabajando. Por último, se tiene la mesa de muestras, que permite ajustar el nivel de la muestra en la imagen adquirida con el microscopio y así garantizar una excelente vista de la gota.

Tabla 5: Solución de requerimiento de costos

Referencia	04	Precio	1.114.300 \$
Nombre	Bajo costo de materiales	Prioridad	Alta
Entrada:	Estructura en acrílico Motor paso a paso con tuerca deslizante Microscopio USB genérico Microcontrolador genérico atmega 2560 Raspberry Pi 3 Mesa de muestra Jeringa		
Salida:	Ahorro de dinero debido a los bajos costes de los componentes		
Restricciones	Precio bajo-medio		

Después de delimitar los requerimientos, se procede a indicar las características funcionales del sistema propuesto. El sistema se considera como una caja negra traducido a una función global, esta caja se caracteriza por las funciones que son directa o indirectamente visibles para el usuario final, del cual se desprende un documento de análisis funcional.

Por consiguiente, se procede a una verificación funcional en la que se elabora una serie de pruebas para el testeo del sistema, con el cual se realiza una revisión individual de las funciones y los diseños estructurales que se hayan realizado. Al chequear el correcto funcionamiento de los diferentes componentes y funciones, como son la medición correcta del ángulo de contacto y la interfaz de usuario, se asegurará un funcionamiento individual correcto. Por último paso, se integran los componentes verificando y validando que el sistema cumpla con los requerimientos planteados. El funcionamiento global del sistema asegurará posibles

mejoras, con el cual se da una fiabilidad para trabajos futuros.

El sistema de instrumentación para la medición de propiedades en películas poliméricas que fuera acorde a los requerimientos y objetivos planteados se implementó de una manera tal que fuera fácil de manejar por cualquier usuario y que estuviera conformado por materiales de bajo costo y de fácil adquisición. Con esto se planea realizar el hardware y software con base en el diagrama propuesto en Figura (10 y 11). A continuación, se evidencia cómo la metodología empleada da cumplimiento a los requerimientos del proyecto en el entorno de hardware y software.

## 5.2. Hardware

Para la elaboración del dispositivo, se realiza una selección de las piezas para el cumplimiento adecuado de los requisitos, para esto se elaboró un listado de partes como se puede ver en la Figura (12).

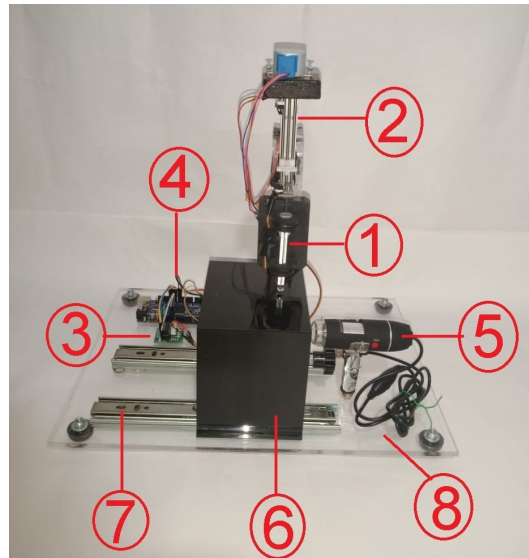


Figura 12: Dispositivo de medición

La superficie donde se coloca la muestra (mesa para muestras de laboratorio y caja de acrílico negra) (6), soporte de acrílico transparente para ubicar todos los instrumentos (8) , microscopio (5), rieles para deslizar la mesa para muestras (7) el dispositivo encargado del procesamiento (Raspberry Pi3 y arduino mega) (4), el mecanismo para suministrar el líquido por medio del cual se realiza la prueba de humedad (motor paso a paso con tuerca deslizando, controlador para motor y jeringa 10  $\mu$  litros) (2, 3 y 1), la mayor parte de estas partes



poseen un precio económico en el mercado, con lo cual, se buscó mantener precio general del dispositivo, ya que el proyecto busca ayudar a los agricultores aminorando los costes de producción. A continuación, se explica más a fondo algunas de las partes ya mencionadas.

### 5.2.1. Microscopio digital

La selección del dispositivo de visualización, fue una etapa muy importante ya que en la búsqueda de este dispositivo se debe tener en cuenta características puntuales para realizar el procesamiento de la imagen, tales como: la resolución, el tamaño de imagen, la compatibilidad del dispositivo con el sistema operativo en el que se trabaja y precio. El microscopio seleccionado USB 1600x, presenta una excelente resolución, compatibilidad con los otros dispositivos utilizados y un precio bastante bajo para los atributos que tiene, se ilustra en la Figura 13.



Figura 13: Microscopio USB 1600x

Tabla 6: Microscopios USB

Marca	Compatibilidad	Aumento	Precio(COL)
Genérico	Windows Linux Mac y Android	1600x	96600
SONYVIDEO	Windows-wifi	1600-1200x	365000
USB DINO-LITE	Windows Linux	1050x	530411

Los microscopios digitales que se tuvieron en cuenta y las características más relevantes en la selección de este se aprecian en la Tabla 6.

### 5.2.2. Base para muestras

La base para las muestras es un requerimiento puntual ya que este debe cumplir con requisitos como:

Poder extraer fácilmente para depositar las muestras, variar la altura para calibrarla a la del microscopio. Que sea de un material adecuado para el procesamiento de imágenes.

En la búsqueda de cumplir con todos estos requerimientos se encontró una que cumplía con la mayor cantidad de requisitos está es un soporte de laboratorio ajustable en acero inoxidable de 100x100mm la cual es regulable en altura y posee una base que puede ser añadida a un sistema de rieles para facilitar la extracción además pudo ser modificado su color en caso de una necesidad u obstrucción para el procesamiento de imágenes.



Figura 14: Base de laboratorio

### 5.2.3. Jeringa dispensadora

El requerimiento para realizar el suministro de una gota de agua en el sistema de pruebas es uno de los más importantes debido a que este determina un factor crucial ya que controla la cantidad de líquido con la que interactúa la muestra. Buscando la mayor precisión se optó por una jeringa cuyo volumen está en los 10 micro litros. Esta jeringa es óptima para la aplicación porque solamente puede suministrar hasta 2 gotas de agua y para las pruebas de caracterización se necesita únicamente de 1 gota de agua, este requisito de una única gota vuelve a esta jeringa la más eficaz en el momento de realizar el trabajo (Figura 15).

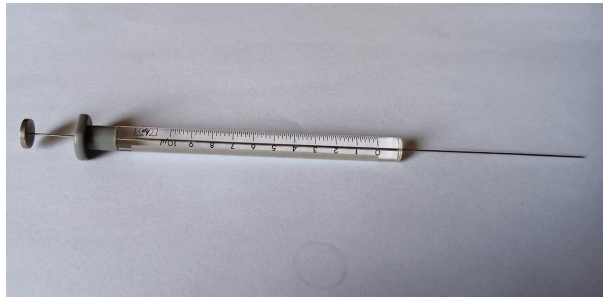


Figura 15: Jeringa de 10 microlitros

#### 5.2.4. Motor paso a paso

El motor eléctrico es un dispositivo muy usado en electrónica ya que con este se pueden realizar diferentes tareas y aplicaciones. En el momento de escoger el motor para usar en el proyecto se debe tener en cuenta aspectos muy importantes, como lo son: La fuerza con la que realiza el movimiento, la rapidez, la precisión, la corriente y voltaje. Estas necesidades condujeron a usar un motor paso a paso de cinco voltios el cual realiza el movimiento para accionar la jeringa que dispensa la gota en la prueba de caracterización, debido a que la jeringa posee un émbolo muy sensible el motor debe realizar el proceso de dispensar muy lento y delicado pero constante.

Para la realización completa de esta tarea se usó un tornillo con tuerca deslizante junto con el motor como se observa en la Figura 16.

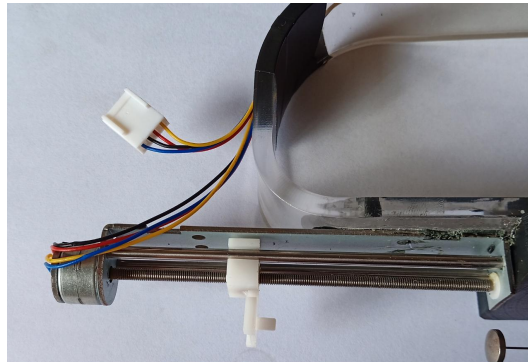


Figura 16: Motor paso a paso con tornillo y tuerca deslizante

### 5.2.5. Polímero

El grupo de investigación CYTA de la Universidad del Quindío se ha propuesto en desarrollar películas compuestas biodegradables que puedan incorporar sustancias bioactivas y proporcionen un papel activo en el envasado de alimentos en especial de frutas tropicales. En investigaciones realizadas ellos proponen el desarrollo y caracterización de películas compuestas de almidón de plátano y gel de áloe vera incorporados con nanopartículas de almidón nativo y acetilado con carga de curcumina [22].



Figura 17: Película biopolimerica desarrollada por el grupo CYTA

## 5.3. Software

### 5.3.1. Calibración

Cuando se utilizan elementos ópticos como cámaras, microscopios, estereoscopio entre otros, siempre es necesario antes de usarlos hacer un procedimiento de calibración. El procedimiento de calibración es un paso muy importante ya que con este se puede adquirir una exactitud en la medida para así generar una buena obtención de información partir de imágenes 2D. En la fotogrametría existen distorsiones radiales, tangenciales y descentrado de la imagen, todas estas se pueden corregir haciendo un buen uso de la calibración. La distorsión radial es la más fácil de identificar debido a que en la imagen las líneas rectas reales se convierten en líneas curvas haciendo que se deforme la imagen como se aprecia en la Figura 18. Esta distorsión puede ser positiva llamada distorsión de barril o negativa llamada distorsión de cojín [19].

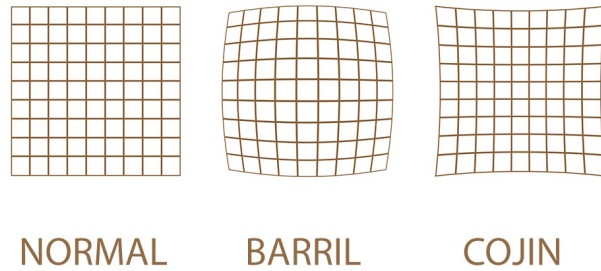


Figura 18: Distorsión radial de la imagen [19]

La forma de corregir esta distorsión es usando un figura patrón de cuadros blancos y negros como se observa en la Figura 19, a la cual se toman varias capturas en diferentes posiciones y ángulos para así poder obtener parámetros intrínsecos de la imagen como el punto principal, centro óptico y la distancia focal de la imagen con los cuales se va a poder corregir la distorsión que presente la imagen.

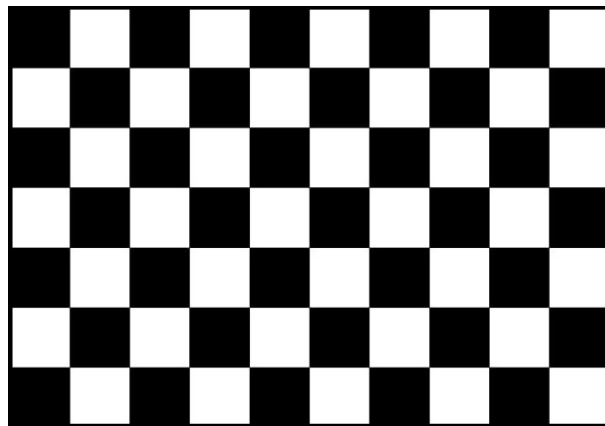


Figura 19: Plano de ajedrez para la calibración

### 5.3.2. Filtración, detección y deformación

El procesamiento de imágenes fue realizado en el lenguaje de programación python 3 y el uso de librerías como numpy, cv2, matplotlib. El proceso consta de una detección del área donde se encuentra una gota de agua, una posterior extracción de esta región y una transformación de ella. La detección del área se realiza mediante una transformación de la imagen RGB a una imagen en escala de grises con el uso de la función `cv2.COLOR_BGR2GRAY` posteriormente se realiza un conteo de píxeles que cambian en la zona donde se encuentra

la muestra realizada. Este cambio se identifica mediante una diferencia de imágenes, es decir, una imagen anterior se resta con una actual y está proporciona una cantidad de píxeles blancos. Si la imagen no cambia, el número tiende a ser pequeño, pero si la imagen cambia se traduce en un objeto nuevo en la región. Hallando así el momento exacto en el que la gota está sobre el material en los primeros instantes, posteriormente se realiza una binarización de la imagen mediante la función `cv2.THRESH_BINARY` con la cual se obtiene la imagen umbral es decir en 0 o 255 dejando así la imagen en píxeles blancos y negros para proceder a extraer los bordes de la imagen como se observa en la Figura 20. Es de vital importancia capturar la gota en los primeros instantes después de ser depositada sobre el material, porque si se hace un tiempo después la gota va a cambiar su forma, debido a que el material la absorbe y esto le agrega error a la media del ángulo.

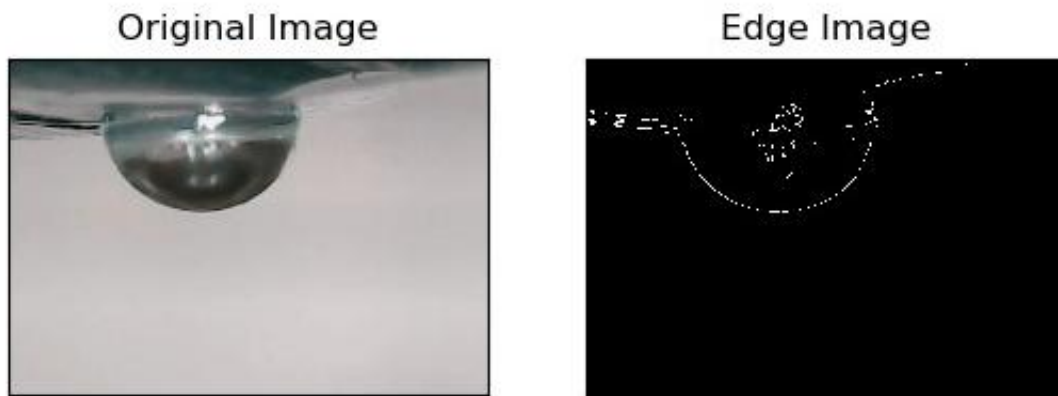


Figura 20: Filtración, detección y deformación

Por medio del proceso ya descrito se obtiene la imagen como una matriz de blancos y negros con únicamente los bordes de la gota y de algunas partes del material. En este punto se debe realizar una selección para determinar el ángulo de contacto y esto se hace por medio de la búsqueda del punto más alto en Y el cual representa el centro de la gota. Se procede a comparar muestras desplazándose en el eje X hasta llegar a un punto donde la quinta muestra anterior no sea la misma que la actual. Esta condición indica la existencia de una línea recta en esta parte de la imagen, en otras palabras se ha encontrado una región plana, lo que indica que la superficie de la gota ha finalizado. Para hallar el ángulo de contacto se realiza una regresión lineal con los primeros 5 a 20 puntos tomados desde la línea recta hacia la superficie de la gota, debido a que la medición debe ser la más cercana posible al borde de la gota; si se llega a tomar un valor mayor crea la posibilidad de error en la medida, porque la recta tangente que arroja la regresión lineal (por medio de la técnica de mínimos cuadrados)

al tener más puntos se aleja del vértice.

### 5.3.3. Medición del ángulo de contacto

En la medición del ángulo de contacto del método de la gota sésil, este es determinado a partir de la región en la que se encuentra el límite de la gota y la superficie que se está analizando, como se puede observar en la Figura 21; el recuadro rojo muestra el límite de las dos regiones. La imagen es procesada como una matriz, de la cual se extrae un vector de puntos que corresponden a la región superficial de la gota y una parte de la superficie.

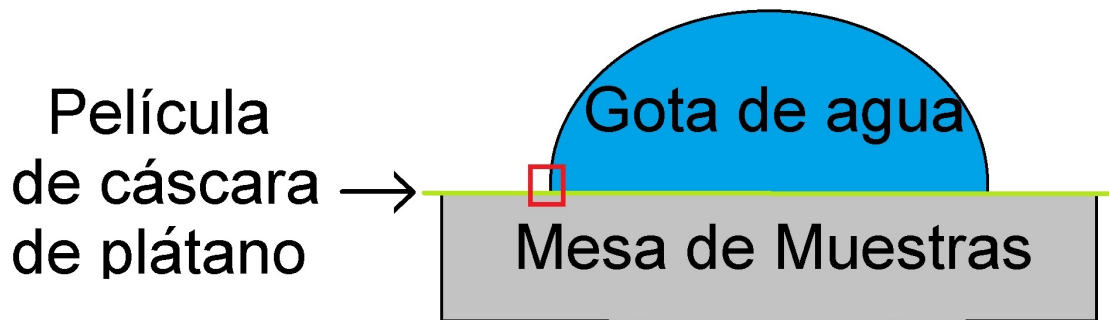


Figura 21: Región donde se mide el ángulo de contacto

Usando el vector de puntos en una función de regresión lineal, se obtiene la recta tangente de la gota con la superficie, mediante la pendiente de la recta usando la función arco-tangente se obtiene el ángulo de la región. Para este proyecto de grado se usó el criterio que la medición se debe realiza al menos unas 10 veces, esta cantidad de pruebas es parte de la investigación del grupo CYTA, principalmente se realizan esta cantidad de pruebas para reproducibilidad y evitar errores de procesamiento, garantizando así una mayor precisión.

Los resultados obtenidos se evidencian más claramente en la Tabla 7. El ángulo de contacto mide el ángulo que forma un líquido al interactuar con un sólido. Este ángulo puede ser, súper hidrófilo, hidrófilo, hidrófobo o súper hidrófobo. La hidro-filia es la propiedad física que poseen algunos materiales que tiene afinidad con el agua, es decir que, son materiales que interactúan fácilmente con el agua o con cualquier fluido y se disuelven en ellos, son llamados materiales hidrófilos [31]. También existen los materiales que repelen el agua, en otras palabras no permiten la interacción con el agua o fluidos y son llamados materiales hidrófobos; En la Figura 22 se puede observar una representación gráfica de cada uno de los casos antes mencionados.

Tabla 7: Regresión lineal y cálculo de la pendiente de la recta tangente a partir de 10 datos

Intersección	Pendiente
6.747e-05	8.445e-01
7.012e-05	8.580e-01
7.833e-06	8.389e-01
6.697e-05	8.466e-01
7.833e-06	8.389e-01
6.747e-05	8.445e-01
7.833e-06	8.389e-01
6.440e-05	8.332e-01
6.747e-05	8.445e-01
7.833e-06	8.389e-01
Pendiente 0.0101	

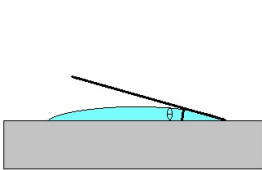
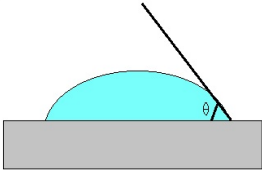
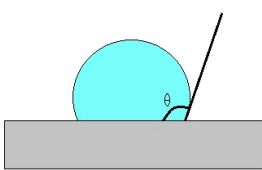
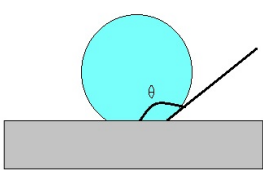
ANGULO DE CONTACTO			
			
<b>super hidrófilo</b>	<b>hidrófilo</b>	<b>hidrófobo</b>	<b>super hidrófobo</b>
$\theta < 10^\circ$	$10^\circ < \theta < 90^\circ$	$90^\circ < \theta < 120^\circ$	$\theta < 120^\circ$

Figura 22: Diferentes ángulos de contacto que existen

Después de observar la Figura 22, el ángulo puede ser medido de forma interna o externa. por ejemplo, si se tiene el valor del ángulo interno y se quiere saber la medida del ángulo externo, lo que se debe hacer es restarle 180 al ángulo interno y así se obtiene la medida del ángulo externo; pero si se tiene la medida del externo y se requiere la del interno se debe hacer el procedimiento contrario, restar 180 al ángulo externo y de esta manera se obtiene la medida del ángulo interno.



# Capítulo 6

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante el proceso experimental, tanto los referidos a la caracterización previa de las películas orgánicas, como los resultados de los ensayos del ángulo de contacto y de permeabilidad.

### 6.1. Calibración del dispositivo en materiales

Las características de las diferentes láminas de almidón de plátano, pulpa de celulosa y parafina, actúan como soporte en los ensayos de mojabilidad debido a que los resultados de algunas estas pruebas pueden ser comparados con los de pruebas científicas. Los parámetros vinculados en la medición del ángulo en el material influyen directa o indirectamente en la medida del ángulo de contacto. Para evidenciar la variación de la medida a continuación se presentan datos de 10 pruebas realizadas en la parafina. Fundamentalmente la prueba en la parafina se realizó para contrastar la medida con estudios realizados por *generalTechnicalReportFPL* [33].

Tabla 8: Procesamiento digital para el ángulo de contacto de una gota de agua en superficie de parafina

Pendiente	Ángulo (°)
1.388	126.662
1.351	127.371
1.310	128.406
1.233	128.559
1.264	128.648
1.301	127.376
1.179	130.224
1.217	128.522
1.205	129.640
1.249	128.668
Ángulo promedio	128.40

Estas pruebas proveen la validación de los datos, se llevaron a cabo mediante el uso del método de la gota sesíl, los resultados de los estudios científicos variaban desde  $130^\circ$  a  $136^\circ$ , las pruebas realizadas mediante el dispositivo variaron desde  $126^\circ$  a  $130^\circ$  con un promedio de  $128.40^\circ$  (Tabla 8), con respecto al promedio teórico de  $133^\circ$  en los estudios científicos, la comparación de estos da como error un  $3.4586\%$  que puede deberse a el agua que se usó, ya que el agua que se usaba en el estudio científico era bidestilada, pero el agua que se usó para el proyecto es agua normal; otra causa del error puede deberse a un error de precisión debido a la resolución de la cámara [33].

## 6.2. Análisis del ángulo de contacto

Las pruebas del ángulo de contacto se realizaron con dos propósitos principales. En primer lugar, ajustar el software del equipo y seleccionar un método para el cálculo del ángulo de contacto a partir de los ensayos en las diferentes muestras. En segundo lugar, mantener un equilibrio entre precisión y costes, esto se obtiene a partir de la implementación adecuada del procesamiento de imágenes. En general, la mojabilidad de un líquido se determina por parámetros como la composición y superficie del material y propiedades atmosféricas, de temperatura a la que ocurre el fenómeno. La morfología de la gota varía dependiendo a la compatibilidad del líquido con el material o sustrato que se esté sometiendo a dicha prueba.

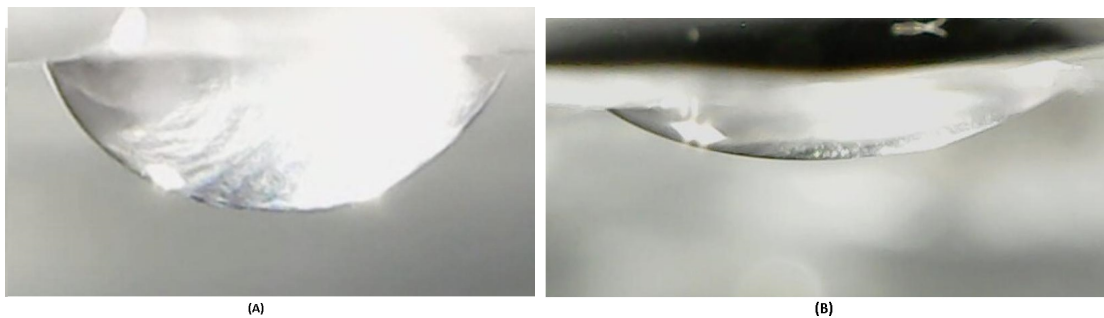


Figura 23: Deformación en la morfología de la gota en función del tiempo de mojado ( $t_0 \leq t_1$ ) a) cuando el líquido y el sustrato no han interactuado b) solvencia parcial del sustrato en el líquido.

En la Figura 23 se muestra la evolución de la gota sobre un sustrato que se disuelve progresivamente, según aumenta el tiempo de interacción. Esta evolución provoca que el ángulo de contacto varíe en el tiempo y en función al material en el que se deposita la gota. Para el tiempo  $t_0$ , la gota mantiene su forma en el material. Para el caso  $t_1$  la gota se expande horizontal y verticalmente. En este último caso, el ángulo de contacto tiende a disminuir al aumentar el tiempo de exposición, ya que el material se comienza a disolver en el líquido.

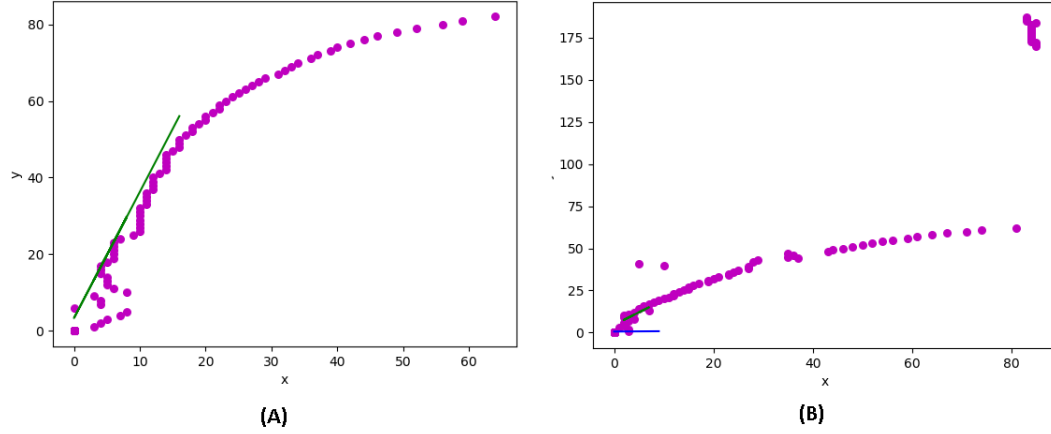


Figura 24: Estudio de la deformación de la gota con respecto al tiempo ( $t_0 \leq t_1$ ) por medio de regresión lineal. a) Deformación al instante que se suministra la gota, b) Deformación después de haber transcurrido 10 segundos.

En la Figura 24 contrastando con lo dicho anteriormente se puede observar más a detalle usando procesamiento de imágenes, se observa como la gota en el caso a) su forma pierde altura aproximadamente de 80 píxeles, y en el caso b) con el transcurso del tiempo se comienza a mezclar con el material en el cual se realizó la prueba.

Para el caso específico de las películas de cáscara de plátano cuando se sometieron a la prueba de la gota de agua, se observa como las películas absorben el agua muy rápidamente. Los datos obtenidos en la prueba son los siguientes: 0.599,  $142.673^\circ$  para la pendiente y el ángulo respectivamente, a continuación, podemos observar más fácilmente como se desarrolla esta prueba sobre las películas.

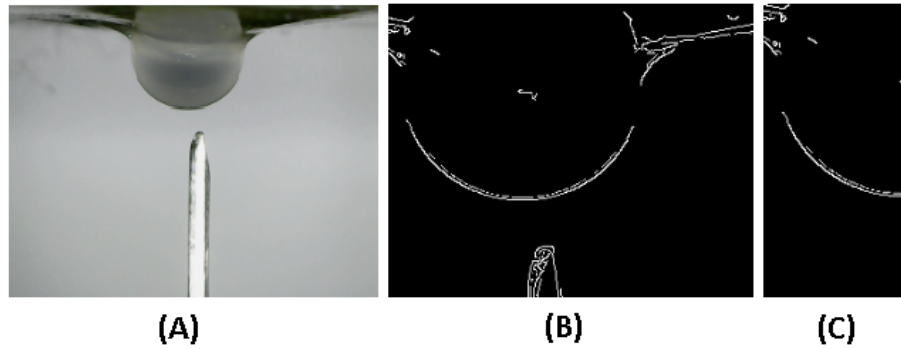


Figura 25: Procesamiento de imágenes para la prueba en película de cáscara de plátano. a) Imagen en blanco y negro de la gota sobre la película. b) Binarización de la imagen en blanco y negro. c) Recorte de la región más cercana al vértice donde se mide el ángulo de contacto

El comportamiento de la gota en la Figura 25 indica que el material tiene una alta propiedad de mojabilidad, es decir, el material es muy hidrófilo. También se evidencia como el procesamiento de imágenes secciona la imagen en la superficie del material y el final de la gota, donde se realiza el cálculo del ángulo de contacto; exactamente donde se crea un vértice de la gota con la superficie. Finalmente, esto arroja los datos por medio de una regresión lineal, la cual, se realiza 10 veces ayudando a que haya menos incertidumbre en los resultados.

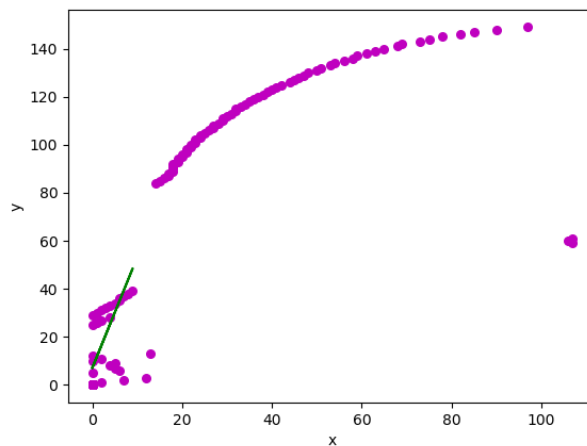


Figura 26: Regresión lineal a partir de los píxeles desde el vértice de la gota con el sustrato de cáscara de plátano

Un material que posee alta mojabilidad es muy fácil de identificar, debido a que su punto

de contacto con el agua o cualquier líquido se desplaza rápidamente, es decir, el material absorbe de manera rápida el líquido y comienza a deformarse. El efecto antes mencionado se puede observar en la Figura 25 y 26. En ellas se evidencia como la regresión lineal toma los datos desde el punto de contacto de la gota para hallar la recta tangente a ella, aplicando la función Arco tangente a la pendiente de la recta y así obtener el ángulo formado por la gota con el material. Al saber que el ángulo formado es de  $142^\circ$  indica que este es un sólido mojado parcialmente, por consiguiente se habla de un material hidrófilo.

Al tomar imágenes es necesario tener un ambiente controlado, de lo contrario, se crea el efecto de las sombras de perspectivas. Este fenómeno se produce cuando se encuentran diferentes focos de luz en un mismo lugar, interfiriendo y afectando las imágenes que están siendo capturadas. Por ende, al analizar las muestras se observa que sufren una alteración y ya no proporciona una información útil para realizar la prueba.

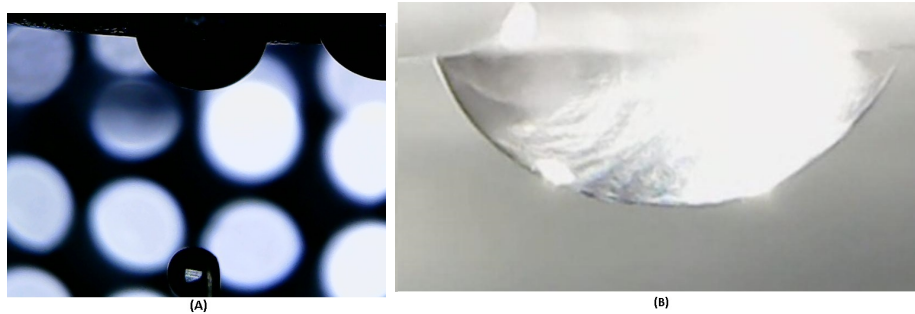


Figura 27: Control de iluminación en la imagen a) Sin ambiente controlado b) Con ambiente controlado

La manipulación de la iluminación es muy importante en la captura de las imágenes, como se puede apreciar en la Figura 27. La primera imagen no presenta un ambiente controlado, se observa que los diferentes focos de luz hacen que la imagen se contamine tornándose opaca y oscura, provocando que la binarización no se pueda desarrollar de la mejor manera. La saturación de color negro, oculta la información de la gota y la superficie. Por el contrario, la segunda imagen presenta un ambiente controlado, en ella se puede observar con claridad la información de la gota en su vértice, quedando así claramente el límite de la gota y la superficie de la muestra para realizar la binarización y sacar la recta tangente.

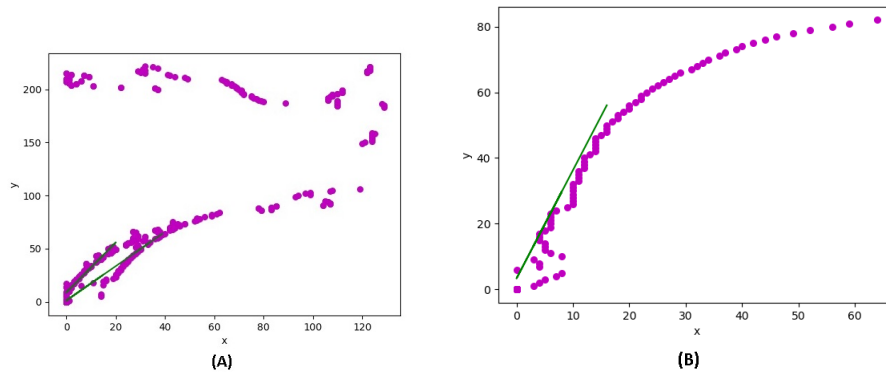


Figura 28: Recta tangente de cada imagen a) imagen sin ambiente controlado b) imagen con ambiente controlado

En la Figura 28 se puede apreciar la recta tangente que se obtuvo para cada uno de los casos. En la Figura a) se observa una contaminación generada por la inapropiada manipulación de la luz, es por esto, que se ve todos los puntos dispersos generando así que la información suministrada sea inútil para el desarrollo de la prueba. En Figura b) se puede observar que existe un contorno o curvatura parecido al de una gota de agua, debido a esto, la recta tangente obtenida en este caso brinda la información que se necesita del ángulo de contacto.

### 6.3. Interfaz de usuario (UI)

La interfaz está pensada en un diseño simple optando por la utilidad y facilidad a la hora de ser usada, esta se presenta únicamente con botones de accionamiento, los cuales abren nuevas ventanas para mostrar los resultados de interés del usuario. La interfaz, Figura 29, permite graficar el resultado que se obtiene del procesamiento, adicionalmente se incluyó la opción de que el usuario pueda guardarla en un dispositivo alterno, también está la función de ejecutar el programa de procesamiento cuando el usuario lo desee y así poder rellenar la jeringa de inyección y ponerla en su lugar.



Figura 29: Interfaz de usuario

Se observa en la Figura 30 el resultado de la regresión lineal, la representación de la gota por los puntos y la recta tangente entregados por la interfaz gráfica.

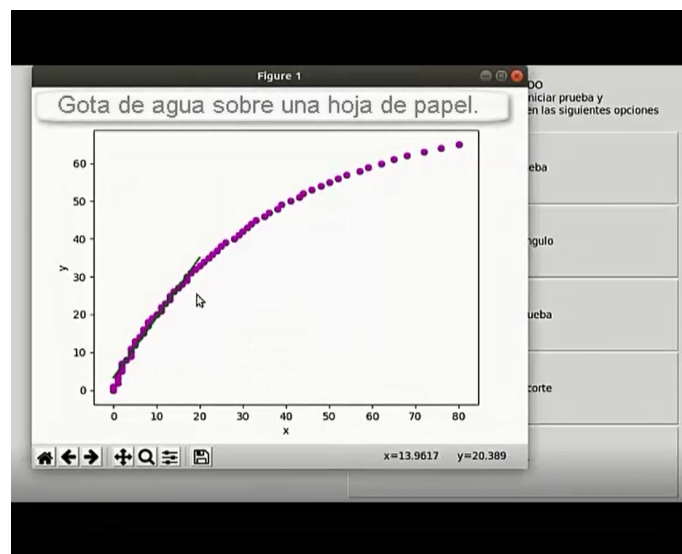


Figura 30: Gráfica de la prueba

En la Figura 31 se aprecia el recorte de la gota. Este corte se encuentra al revés, porque así es como la captura el microscopio. Esta sección corresponde al vértice donde se mide el ángulo de contacto.

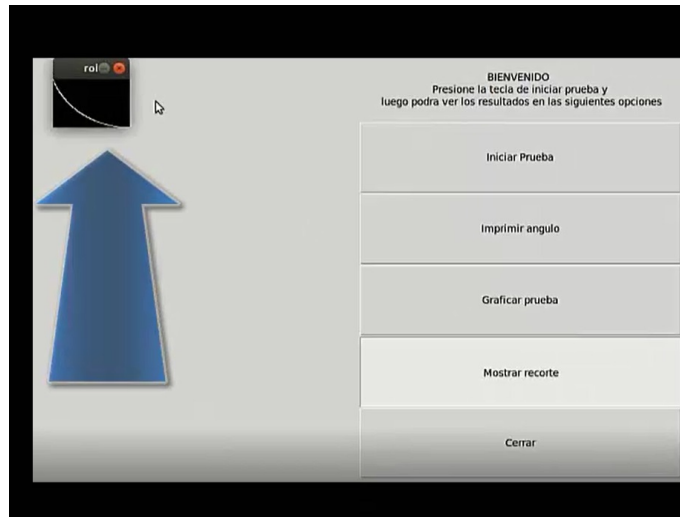


Figura 31: Recorte procesado de la gota de líquido

La Figura 32 muestra el ángulo de contacto (en grados) de la gota de agua sobre la hoja de papel analizada.

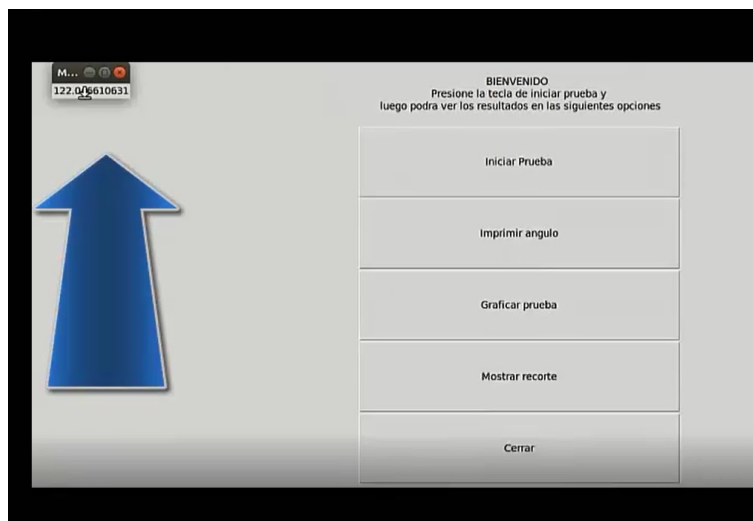


Figura 32: Ángulo de contacto en grados



# Capítulo 7

## 7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de grado se propuso la elaboración de un sistema de instrumentación que mide el ángulo de contacto de una gota que entra en contacto con una superficie. Este ángulo se emplea para el cálculo de propiedades de humedad en películas poliméricas desarrolladas para el empaque de frutas tropicales. El sistema se proyectó de bajo costo pensando principalmente en los pequeños agricultores, ya que estos no cuentan con una alta capacidad adquisitiva para adquirir maquinaria; un dispositivo que permita la medida del ángulo de contacto está alrededor de \$ 20.000 USD, pero este prototipo se logró implementar con un poco más de 200 USD, precio que es asequible a una gran cantidad de agricultores.

Las imágenes fueron capturadas y sus respectivos ángulos de contacto fueron medidos en los instantes de tiempo siguientes después de que la gota fuera depositada sobre el material, ya que es el instante de tiempo que requiere la medición. Si la captura se hace unos segundos después, el material empieza a disolverse en la gota de agua y a deformarse lo cual agrega error a la medida del ángulo.

Los materiales que poseen una mojabilidad alta (materiales hidrófilos) tienden a disolverse en el líquido, es decir, que la gota de agua se mezcla con los materiales, se puede evidenciar en los resultados del proyecto en donde la película de pulpa de celulosa cuando se pone en contacto con el agua está tiende a disolverse a medida que pasa el tiempo.

Al momento de la captura de la imagen, es necesario que se tenga un ambiente de luz controlado para evitar cualquier luz incidente externa, la cual hace cambiar los datos. Es decir, si se le llega a filtrar cualquier luz está generaría sombras y hace que la medida del ángulo por procesamiento de imágenes no sea confiable. El efecto de estas sombras se llama sombras de perspectiva. Al incidir una luz de otra fuente genera sombras las cuales pueden ser detectadas como objetos en la imagen y así causar los errores.

# Capítulo 8

## 8. TRABAJOS FUTUROS

En este proyecto de grado y como en cualquier proyecto de investigación es posible desarrollar mejoras en el prototipo realizado. Se observó que es necesario hacer unas pruebas de usabilidad con los clientes. Además, el sistema de instrumentación para la medición de propiedades en películas poliméricas desarrolladas para el empacado de frutas tropicales presenta nuevos requerimientos como el optimizar la base de laboratorio donde se depositan las muestras. Debido a que ésta actualmente se desplaza manualmente, se podrá buscar la forma de que está se moviera automáticamente una vez se haya depositado la película polimérica para realizar el análisis. También se observó que siempre está la necesidad de llenar la jeringa y esto hace que sea muy engorroso sacarla de su sitio, por ello se necesita pensar en un nuevo método que le permita al prototipo depositar varias gotas de agua sin necesidad de mover la jeringa. Por último, cabe resaltar que los elementos que permiten la visualización y el procesamiento de las imágenes para este proyecto en cuanto a precisión y velocidad son muy buenos, aunque siempre están en constante cambio, por lo tanto, no es de extrañarse que en 1 o 2 años se tenga la necesidad de cambiarse por unos más nuevos que permitan aumentar la fiabilidad y disminuir los tiempos de procesamiento.

# Capítulo 9

## 9. ANEXOS

### 9.1. Protocolo de verificación

Esta sección está compuesta de una serie de pasos a realizar para verificar el funcionamiento y la correcta operación del sistema, tanto de manera física como digital.

#### 9.1.1. Operación inicial

Para operar el instrumento se deberá proceder a extraer la mesa de muestras, en la que se debe colocar la muestra en la región demarcada por el recuadro rojo como se aprecia en la Figura 33.

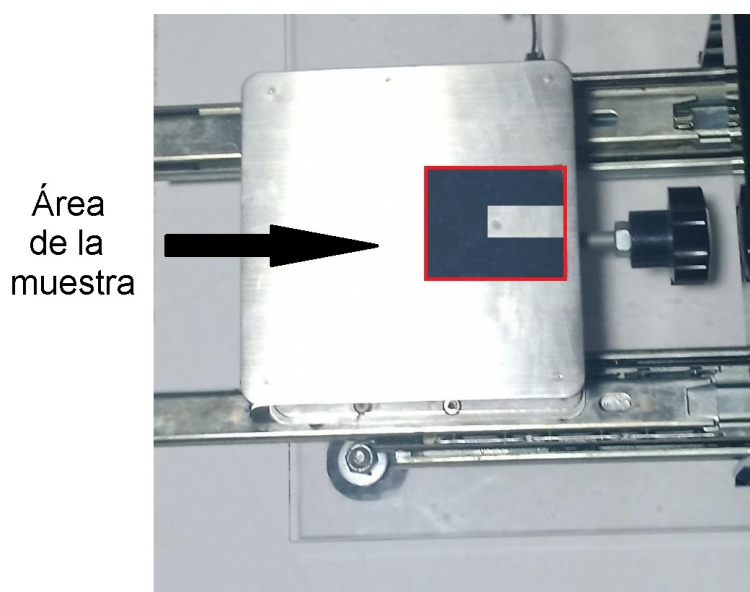


Figura 33: Mesa de muestras

El paso siguiente es introducir de nuevo la mesa corroborando que los rieles lleguen hasta el final del recorrido aplicando un poco de fuerza para que enganche con las gomas. A continuación se debe verificar que la jeringa dispensadora esté en 6 o 7 micro litros de líquido,

sino es el caso se deberá llenar hasta tal medida. Ya hecho todo esto, en la interfaz de usuario, se procederá a iniciar la prueba. Esta se inicia presionando el botón correspondiente como se muestra en la Figura 34.

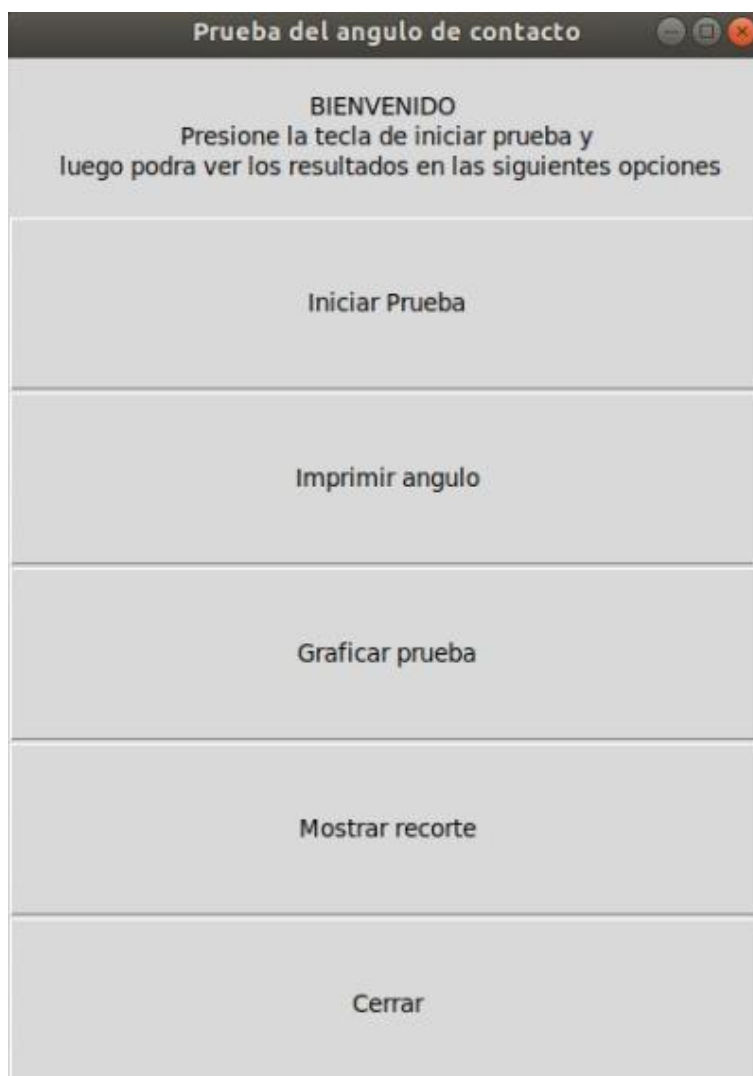


Figura 34: Interfaz de usuario

Una vez iniciada la prueba aparecerá la vista en tiempo real de lo que se observa en el microscopio, para así calibrarlo conjunto con la mesa de muestras como se muestra en la Figura 35.

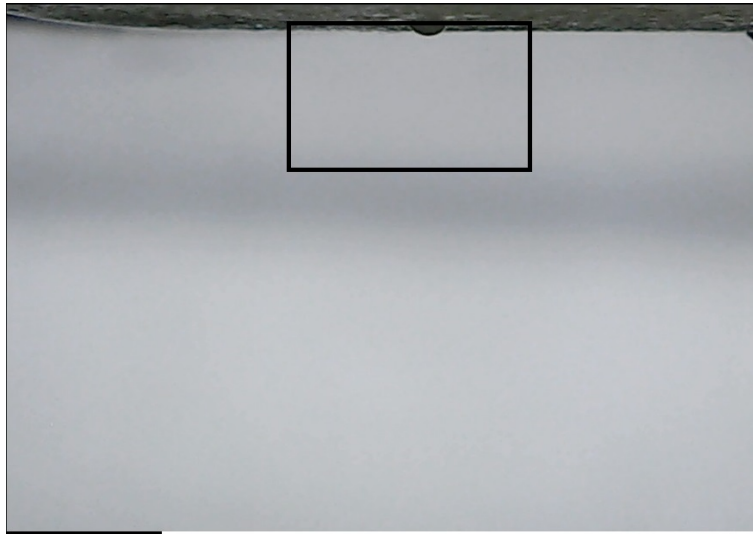


Figura 35: Calibración microscopio

Cuando ya esté ubicada la muestra en la pantalla correctamente se debe presionar la tecla "Q" para que la máquina continúe con el proceso.

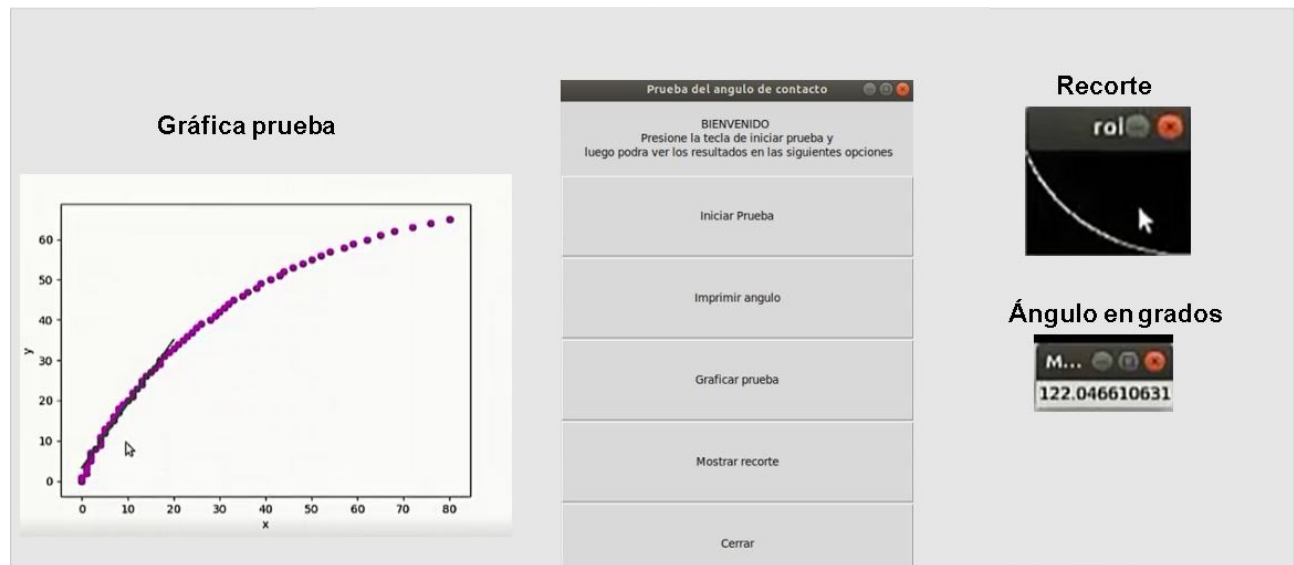


Figura 36: Interfaz gráfica y resultados

Ya completados los pasos anteriores se podrá visualizar los resultados del procesamiento solo presionando los botones de la referencia que necesite (ver Figura 36) como la gráfica

con la recta de regresión, las tomas de la imagen entre otras; Algunos de estos resultados se encuentran en la carpeta de imágenes donde está ubicado el software.

### 9.1.2. Mantenimiento periódico

Periódicamente se debe realizar un mantenimiento, el cual consta de una limpieza y lubricación del dispositivo. En la lubricación se debe aplicar aceite tres en uno en partes como el tornillo deslizante, los rieles y la mesa de muestra. La limpieza se realiza con un paño limpio y seco retirando el polvo que se encuentre sobre el dispositivo principalmente encima de la mesa de muestra.

### 9.1.3. Precauciones

Para que el dispositivo no sufra ningún daño se debe tratar con cuidado y seguir las siguientes indicaciones. Primero, se debe prevenir de no derramar algún líquido sobre él ya que es un dispositivo electrónico, al momento de hacer el llenado de la jeringa se debe tener cuidado de no doblar el émbolo (ver imagen 37), ni su punta, no se debe hacer presión sobre la tuerca de plástico, no se debe forzar el motor y por último evitar romper la superficie con algún objeto.

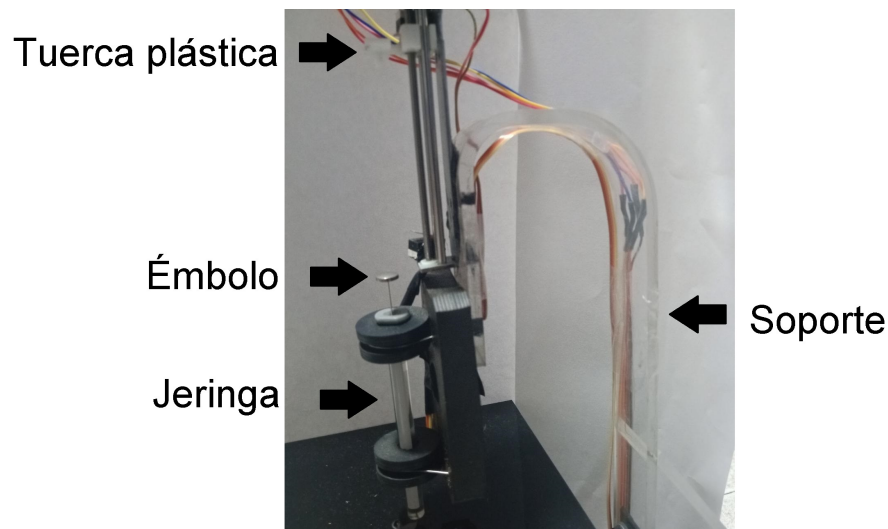


Figura 37: Jeringa con el soporte de acrílico

## 10. Bibliografía

### Referencias

- [1] *Foro Internacional: Agronegocios de Frutas Tropicales*. IICA Biblioteca Venezuela.
- [2] *Manual de Procesamiento de Frutas Tropicales a Escala Artesanal, en El Salvador*. Iica.
- [3] *Visión tecnológica*. Number v. 9,n.º 1 -v. 10,n.º 1. Centro de Información Técnica de Intevep, 2001.
- [4] *Cálculos, trabajos y reparación de averías*. Enciclopedia de fontanería. Ceac, 2007.
- [5] D.F.A.N. A. Albis. *Implementación del método de perfil de gota para la medición de la tensión interfacial de grasas en el proceso de emulsificación en MATLAB®*, utilizando un nuevo sistema de coordenadas de referencia. Revista ReCiTeIA, 2004.
- [6] Alice P. Gast Adamson Arthur W. *Physical Chemistry of Surfaces*. Diccionarios Series Canada. a wiley-interscience publication, 1997.
- [7] B.B. al. *Fundamentos físicos de la Edificación II*. Delta, 2007.
- [8] M.F. Ashby. *Materiales para ingeniería 1. Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño*. Number v. 1 in Materiales para ingeniería 1. Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Reverte Editorial Sa, 2008.
- [9] P.W. Atkins and L. Jones. *Principios de química : los caminos del descubrimiento*. Editorial Médica Panamericana, 2006.
- [10] M.E. Aulton. *Farmacía: La Ciencia y Diseño de Las Formas Farmacéuticas*. Elsevier, 2004.
- [11] J. Berthier. Microdrops and digital microfluidics: Processing, development, and applications. *William Andrew Publishing*, 1:1–30, 2007.
- [12] C. Boutelou. *Elementos de agricultura*. Number v. 1 in Elementos de agricultura. Oficina de Francisco Martinez Dávila, 1817.
- [13] W.D. Callister. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. II*. Number v. 2 in Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. II. Reverté, 1996.

- [14] A.M. Colliou and Derek J. Powney. *Propiedades mecanicas y termicas de los materiales*. Reverté, 1977.
- [15] Sociedad Mexicana de Física and Universidad Nacional Autónoma de México. *Revista mexicana de física*. Number v. 49. Sociedad Mexicana de Física, 2003.
- [16] G. B. Hactch F. E. Bartell. The wetting characteristics of galena. *Journal of Physical-Chemistry*, 1:11–24, 1935.
- [17] Food and Agriculture Organization Of The United Nations. *La Situation Mondiale de L'alimentation Et de L'agriculture 2006: L'aide Alimentaire Pour la Sécurité Alimentaire?* Collection FAO: Agriculture Series. FAO, 2007.
- [18] R.J. Fowler. *Electricidad principios y aplicaciones*. Basic skills in electricity and electronics. Reverte, Editorial S.A., 1994.
- [19] B. Grob. *Television practica y sistemas de video*. ACCESO RÁPIDO. Marcombo, 1990.
- [20] D. Hearn and M.P. Baker. *Computer Graphics with OpenGL*. Pearson Custom Computer Science Series. Pearson Prentice Hall, 2004.
- [21] Enrique Alonso Velazquez Jose Maria Rodriguez Lelis. Jose ManuelTejero Andrade2 Justo Juvenal Solano Perez, Francisco Lima Santos. Tensiometro digital para medir Ángulos de contacto lÍquidosÓlido. *Operations Research*, 1:730–735, 2009.
- [22] Leidy T. Sánchezb Magda I. Pinzónb Cristian C. Villaa Leonardo Nieto-Suazaa, Leonardo Acevedo-Guevaraa. food structure characterization of aloe vera-banana starch composite films reinforced with curcumin-loaded starch nanoparticles. *ScienceDirect*, 1:1–8, 2019.
- [23] E. Levy. *Diccionario Akal de Física*. Akal Diccionarios Series. Ediciones Akal, 1992.
- [24] F.J.V. Martin. *Fitotecnia: Bases y tecnologias de la produccion agricola*. Mundi-Prensa, 2009.
- [25] M. McGrath. *Raspberry Pi 3 in easy steps*. In Easy Steps. In Easy Steps, 2016.
- [26] K.L. Mittal. *Contact Angle, Wettability and Adhesion*. Number v. 6 in Contact Angle, Wettability and Adhesion. Taylor & Francis, 2009.
- [27] K.L. Mittal. *Humectabilidad*. Univ. Nacional de Colombia, 2009.



- [28] M.E.R. Ortiz. *Tendencias de innovación en la ingeniería de alimentos*. OmniaScience, 2015.
- [29] P.S.L. Place. *Traite de mecanique celeste*. 1799.
- [30] H. Rodriguez. *A las frutas tropicales*. Ediciones del Rectorado. Universidad de Los Andes, 2006.
- [31] J.M.L. Romero. *Transformacion de materiales termoplasticos. QUITO 2009*. IC Editorial, 2014.
- [32] A.F. Taggart, T.C. Taylor, and A.F. Knoll. *Chemical Reactions in Flotation*. Technical publication. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Incorporated, 1930.
- [33] Forest Products Laboratory (U.S.). *General Technical Report FPL*. General Technical Report FPL. The Laboratory, 1978.