

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ



MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

---

# Diseño de un Sistema de Visión Artificial para la Clasificación de Chirimoyas basado en medidas

---

*Autor:*

César Javier VALDIVIA ARIAS

*Asesor:*

Julio Cesar TAFUR SOTELO,  
Ph.D

*Tesis presentada para optar el grado de  
Magíster en Ingeniería Mecatrónica*

Lima 22 de marzo de 2016

*"Para el optimista, el vaso está medio lleno. Para el pesimista, el vaso está medio vacío.  
Para el ingeniero, el vaso es el doble de grande de lo que debería ser."*

Anónimo

# *Resumen*

## **Diseño de un Sistema de Visión Artificial para la Clasificación de Chirimoyas basado en medidas**

El desarrollo de este trabajo, presenta el diseño de un sistema de visión artificial, capaz de medir *Annona Cherimola Mill* (Chirimoya) del ecotipo *Aurora*, las cuales provienen de la comunidad de Callahuanca, para posteriormente clasificar aquellas que cumplan con una dimensión de 10 x 12 cm empleando para la etapa de procesamiento: *Ajuste de contraste* y para la etapa de segmentación, *Cierre*, *Apertura* y *Código Cadena*; los métodos seleccionados cumplen con los tiempos de computo de diseño.

Fue posible clasificar exitosamente 91 de 91 Chirimoyas de Categorías Extra y Primera estudiadas con un 100% de efectividad, una precisión de medida de 0,35mm y un error permisible de 2,18mm. Las pruebas se efectuaron en un prototipo diseñado para tal motivo y no en el equipo final; el error obtenido durante las pruebas es menor al establecido en los requerimientos en cuanto a la selección del fruto.

En la memoria descriptiva, se presentan los cálculos referentes a la selección del dispositivo de captura, lentes y requerimientos de la iluminación empleando la metodología de diseño *VDI-2221*. El control del banco de pruebas, empleado para validar los algoritmos realizados, se realizó con un PLC y para realizar el procesamiento de imágenes, se optó por un computador de escritorio con procesador *Intel® Core i5 CPU 2.53GHz* junto con una cámara con comunicación USB 3.0. El diseño mecánico-eléctrico no es motivo de estudio en la presente investigación.

## *Agradecimientos*

A mi familia, por su apoyo incondicional.

A la Pontificia Universidad Católica del Perú y *CONCYTEC*, por la oportunidad de estudiar esta Maestría.

Al Ph.D. Tafur, por su conocimiento y asesoría durante el desarrollo de esta tesis.

Al M.Sc. Calderón por sus consejos y pasión por las ciencia e ingeniería que me motivaron a continuar investigando.

Al Ing. Ticona y M.Sc. Böhme, por su invaluable aporte.

# Índice general

|   |           |
|---|-----------|
| Resumen   | II        |
| Agradecimientos   | III       |
| Índice general  | IV        |
| Índice de figuras                                       | VI        |
| Índice de tablas  | VIII      |
| <br>  |           |
| <b>1. Introducción</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1. Objetivos . . . . .                                | 4         |
| <b>2. Estado del arte</b>                               | <b>5</b>  |
| <b>3. Marco teórico</b>                                 | <b>9</b>  |
| 3.1. Componentes de la visión artificial . . . . .      | 9         |
| 3.2. Procesamiento digital de imágenes . . . . .        | 10        |
| 3.2.1. Etapas de la visión artificial . . . . .         | 11        |
| 3.2.1.1. Acondicionamiento . . . . .                    | 11        |
| 3.2.1.2. Adquisición de la imagen . . . . .             | 11        |
| 3.2.1.3. Preprocesamiento . . . . .                     | 12        |
| 3.2.1.4. Segmentación . . . . .                         | 13        |
| 3.2.1.4.1. Umbralización . . . . .                      | 14        |
| 3.2.1.5. Extracción de características . . . . .        | 14        |
| 3.2.1.6. Reconocimiento e interpretación . . . . .      | 14        |
| 3.3. Característica del a chirimoya . . . . .           | 15        |
| <b>4. Diseño del hardware y software</b>                | <b>19</b> |
| 4.1. Comprensión de la solicitud . . . . .              | 20        |
| 4.1.1. Estructura de funciones . . . . .                | 21        |
| 4.1.1.1. Abstracción (Black-Box) . . . . .              | 22        |
| 4.1.1.1.1. Secuencia de operación y funciones . . . . . | 23        |

---

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 4.1.1.1.2. | Agrupación de funciones . . . . .          | 25        |
| 4.1.1.1.3. | Estructura de funciones . . . . .          | 25        |
| 4.1.2.     | Concepto de solución . . . . .             | 27        |
| 4.1.2.1.   | Matriz morfológica de ZWICKY . . . . .     | 27        |
| 4.2.       | Proyecto Preliminar . . . . .              | 29        |
| 4.2.1.     | Comprensión del dominio mecánico . . . . . | 34        |
| 4.2.2.     | Selección de la cámara . . . . .           | 35        |
| 4.2.3.     | Selección de la iluminación . . . . .      | 38        |
| 4.2.4.     | Selección de los sensores . . . . .        | 41        |
| 4.2.5.     | Programación del procesador . . . . .      | 42        |
| 4.2.6.     | Selección del procesador . . . . .         | 43        |
| 4.2.7.     | Selección del controlador . . . . .        | 44        |
| 4.2.8.     | Programación del controlador . . . . .     | 47        |
| 4.3.       | Proyecto definitivo . . . . .              | 47        |
| <b>5.</b>  | <b>Pruebas y resultados</b>                | <b>49</b> |
| 5.1.       | Banco de pruebas . . . . .                 | 49        |
| 5.2.       | Calibración . . . . .                      | 53        |
| 5.3.       | Método empleado . . . . .                  | 55        |
| 5.4.       | Pruebas realizadas . . . . .               | 57        |
| 5.4.1.     | Costos . . . . .                           | 62        |
| <b>6.</b>  | <b>Conclusiones y recomendaciones</b>      | <b>65</b> |
| 6.1.       | Conclusiones . . . . .                     | 65        |
| 6.2.       | Recomendaciones . . . . .                  | 66        |

# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Ubicación geográfica de Callahuanca . . . . .                          | 2  |
| 1.2. Tamaño de chirimoyas requeridas . . . . .                              | 3  |
| 3.1. Componentes de la visión artificial . . . . .                          | 10 |
| 3.2. Clasificación del procesamiento digital de imágenes . . . . .          | 10 |
| 3.3. Iluminación del objeto a capturar . . . . .                            | 12 |
| 3.4. Umbralización . . . . .  | 14 |
| 3.5. Cultivos de la comunidad de Callahuanca . . . . .                      | 16 |
| 3.6. Diferencia de tamaños en Cosecha . . . . .                             | 16 |
| 3.7. Categorías del fruto de chirimoya . . . . .                            | 18 |
| 3.8. Etiqueta amarilla Callahuanca . . . . .                                | 18 |
| 4.1. Proceso generalizado de desarrollo y diseño VDI 2221 02.1993 (11.1986) | 21 |
| 4.2. Método de diseño y sus fases . . . . .                                 | 22 |
| 4.3. La máquina como caja negra . . . . .                                   | 24 |
| 4.4. Abstracción Black-Box sistema de visión . . . . .                      | 24 |
| 4.5. Funciones secuenciales agrupadas . . . . .                             | 25 |
| 4.6. Estructura de funciones: Dominio de la visión . . . . .                | 26 |
| 4.7. Dominio de funciones: Dominio del control . . . . .                    | 26 |
| 4.8. Balance técnico – económico del dominio de la visión . . . . .         | 33 |
| 4.9. Balance técnico – económico del dominio del control . . . . .          | 33 |
| 4.10. Bosquejo del dominio mecánico . . . . .                               | 34 |
| 4.11. Detalle del cangilón con bandejas . . . . .                           | 35 |
| 4.12. Field of view (FOV) . . . . .   | 36 |
| 4.13. Flea3 FL3-U3-13S2M-CS 1/3” Monochrome USB 3.0 Camera . . . . .        | 36 |
| 4.14. Varifocal CS mount lens 3.5-8mm F1.2 CCTV . . . . .                   | 37 |
| 4.15. Tiempo de exposición . . . . .  | 38 |
| 4.16. Iluminación frontal oblicua y direccional en anillo . . . . .         | 38 |
| 4.17. Sombra proyectada en paralela opuesta . . . . .                       | 40 |
| 4.18. Sombra proyectada en paralela . . . . .                               | 40 |
| 4.19. Disposición de los sensores . . . . .                                 | 41 |
| 4.20. Algoritmo de medición . . . . .                                       | 43 |
| 4.21. Diagrama de flujo del procesador . . . . .                            | 45 |
| 4.22. Especificaciones del procesador . . . . .                             | 45 |
| 4.23. Tiempo requerido para realizar el procesamiento . . . . .             | 46 |

---

|  |    |
|--|----|
| 4.24. Diagrama de flujo del procesador . . . . .                             | 46 |
| 4.25. <i>M-DUINO PLC Arduino 42 I/Os Analog/Digital</i> . . . . .            | 46 |
| 4.26. Diagrama de flujo del controlador . . . . .                            | 48 |
| 5.1. Vistas isométricas del banco de pruebas . . . . .                       | 50 |
| 5.2. Cinta transportadora . . . . .  | 51 |
| 5.3. Zona de captura . . . . .   | 52 |
| 5.4. Banco de pruebas implementado . . . . .                                 | 52 |
| 5.5. Plantilla de calibración . . . . .                                      | 53 |
| 5.6. Circulo de calibración post-procesamiento . . . . .                     | 54 |
| 5.7. Regresión lineal: Diámetro . . . . .                                    | 54 |
| 5.8. Regresión lineal: Área . . . . .  | 55 |
| 5.9. Diferencia de una captura en movimiento frente a una estática . . . . . | 56 |
| 5.10. Chirimoya de muestra . . . . .   | 56 |
| 5.11. Dimensiones acorde al método empleado . . . . .                        | 57 |
| 5.12. Error de criogenización . . . . .                                      | 58 |
| 5.13. Error de asincronía de faja . . . . .                                  | 58 |
| 5.14. Chirimoya preservada . . . . .   | 58 |
| 5.15. Variaciones según la altura . . . . .                                  | 59 |
| 5.16. Variación de altura de una chirimoya . . . . .                         | 59 |
| 5.17. Chirimoyas menores a 10cm . . . . .                                    | 60 |
| 5.18. Procesamiento de la chirimoya . . . . .                                | 61 |
| 5.19. Resultado del procesamiento . . . . .                                  | 62 |

# Índice de cuadros

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Clasificación arancelaria . . . . .   | 15 |
| 3.2. Evolución de las exportaciones peruanas . . . . .   | 15 |
| 3.3. Ficha de exportación chirimoya Callahuanca . . . . .                                      | 17 |
| 3.4. Categoría de peso del fruto de Chirimoya . . . . .  | 17 |
| 3.5. Etiquetas de las chirimoyas . . . . .   | 17 |
| 3.6. Requerimientos en cuanto a la selección . . . . .   | 18 |
| 4.1. Lista de exigencias . . . . .   | 23 |
| 4.2. Matriz morfológica en el dominio de la visión . . . . .                                   | 27 |
| 4.3. Matriz morfológica en el dominio del control . . . . .                                    | 28 |
| 4.4. Aspectos posibles de evaluación del concepto de solución . . . . .                        | 28 |
| 4.5. Escala de calificación para los aspectos de evaluación del concepto de solución . . . . . | 29 |
| 4.6. Evaluación de la matriz morfológica – Dominio de la visión . . . . .                      | 29 |
| 4.7. Evaluación de la matriz morfológica – Dominio del control . . . . .                       | 30 |
| 4.8. Matriz de enfrentamiento – Propiedades técnicas . . . . .                                 | 32 |
| 4.9. Matriz de enfrentamiento – Propiedades económicas . . . . .                               | 32 |
| 4.10. Evaluación del proyecto preliminar - Propiedades técnicas . . . . .                      | 32 |
| 4.11. Evaluación del proyecto preliminar - Propiedades económicas . . . . .                    | 33 |
| 4.12. Balance técnico – económico del proyecto preliminar . . . . .                            | 33 |
| 4.13. Requerimientos del dominio mecánico . . . . .  | 34 |
| 4.14. Especificaciones <i>OPTEX ZT-L3000N</i> . . . . .  | 42 |
| 4.15. Algoritmos empleados en el procesamiento de imágenes . . . . .                           | 44 |
| 4.16. Cantidad de entradas y salidas del controlador . . . . .                                 | 47 |
| 5.1. Regresión lineal : Diámetro . . . . .   | 53 |
| 5.2. Regresión lineal : Área . . . . .   | 55 |
| 5.3. Resultados obtenidos . . . . .  | 63 |
| 5.4. Costos del proyecto . . . . .   | 64 |

*Dedicado a los que no estudian el mundo tal como es, sino a los  
que crean el mundo que nunca ha sido. . .*

# Capítulo 1

## Introducción

Callahuanca, denominada como 'El Paraíso de la Chirimoya', se encuentra en la provincia de Huarochiri a dos horas de la ciudad de Lima, situada a 1465 msnm al margen del río Santa Eulalia, tal como se aprecia en la Figura 1.1; esta zona cumple con las exigencias edafoclimáticas requeridas en el cultivo de la chirimoya. La producción nacional de chirimoyas es de 20 000 toneladas anuales, de las cuales Lima produce el 50 %, lo que significa 11 mil 300 toneladas, en tanto Huarochiri produce 8 mil 500 toneladas [1].

La producción y el cultivo más importante de Callahuanca es la chirimoya, fruto de pulpa blanca suave y aroma incomparable, siendo el ingrediente ideal para realizar variedad de dulces, helados, mermeladas y cocktails. Chauca y Callahuanca, con sus 180 comuneros en las 350 hectáreas aproximadas cultivan alrededor de 100 ecotipos diferentes de Chirimoyas nativas, alcanzando una producción anual de 2200 toneladas; La oxidación del fruto dura aproximadamente 5 días, por tal motivo el 40 % de la chirimoya que se produce en el Perú es destinado al mercado nacional y la exportación, pero el 60 % debe ser destinado a productos con valor agregado, tales como deshidratados, harina de Chirimoya, néctar y licores [1].

Los principales mercados de destino de las exportaciones de chirimoya fresca son Canadá, Estados Unidos, Japón, España, Italia y Suecia, siendo Canadá el principal receptor, habiéndose destinado más del 75 % del total exportado durante el año 2012, dicho monto asciende al valor exportado de 90297.3 dólares. Para E.E.U.U. como segundo receptor se destinó el 20 %, lo que equivale a un valor de 23,700 dólares [2].

Debido a la demanda, los agricultores están motivados por exportar sus productos, pero requieren cada vez de equipos con aplicaciones múltiples de alta funcionalidad en tiempo real, mayor interconexión, menor coste.



FIGURA 1.1: Ubicación geográfica de Callahuanca [3].

En Callahuanca la producción de chirimoya oscila entre 2200 toneladas al año es decir aproximadamente 5 toneladas día, en los meses de marzo a junio hay una producción tendencial en aumento más del 98% de fruta de chirimoya se cosecha [4]; hoy existe una creciente demanda mundial del producto por su agradable sabor y los productores se encuentran motivados debido a la apertura de nuevos mercados internacionales, sin embargo, actualmente los productores de Callahuanca seleccionan manualmente la chirimoya requerida para fines de exportación, siendo su mano de obra costosa, lenta e inexacta, pudiendo incurrir en error del operario al manipular la fruta.

En junio del 2014 se realizó una visita de campo con apoyo de Sierra Exportadora, entidad gubernamental encargada de incentivar y aperturar mercados de exportación para los frutos de la zona andina del Perú. Los agricultores entrevistados manifestaron que intentaron exportar, pero no pudieron llenar la cuota de chirimoyas solicitada en el plazo requerido por: dificultad en la clasificación, falta de conocimiento, capacitación, asistencia técnica y nueva tecnología; consecuentemente desaprovecharon la oportunidad de ingresar con su producto al mercado exterior.

Sierra Exportadora señala que en cuatro días se debe llenar un contenedor de 20 toneladas de chirimoya, lo que significa que en un día 5 toneladas de chirimoyas de de 10

cm en altura y 12 cm en proyección tal como se muestra en la Figura 1.2, ya que esta fruta será almacenada en cajas diseñadas para exportar, ciertamente la mano de obra humana no podría ejecutar la clasificación en segundos.

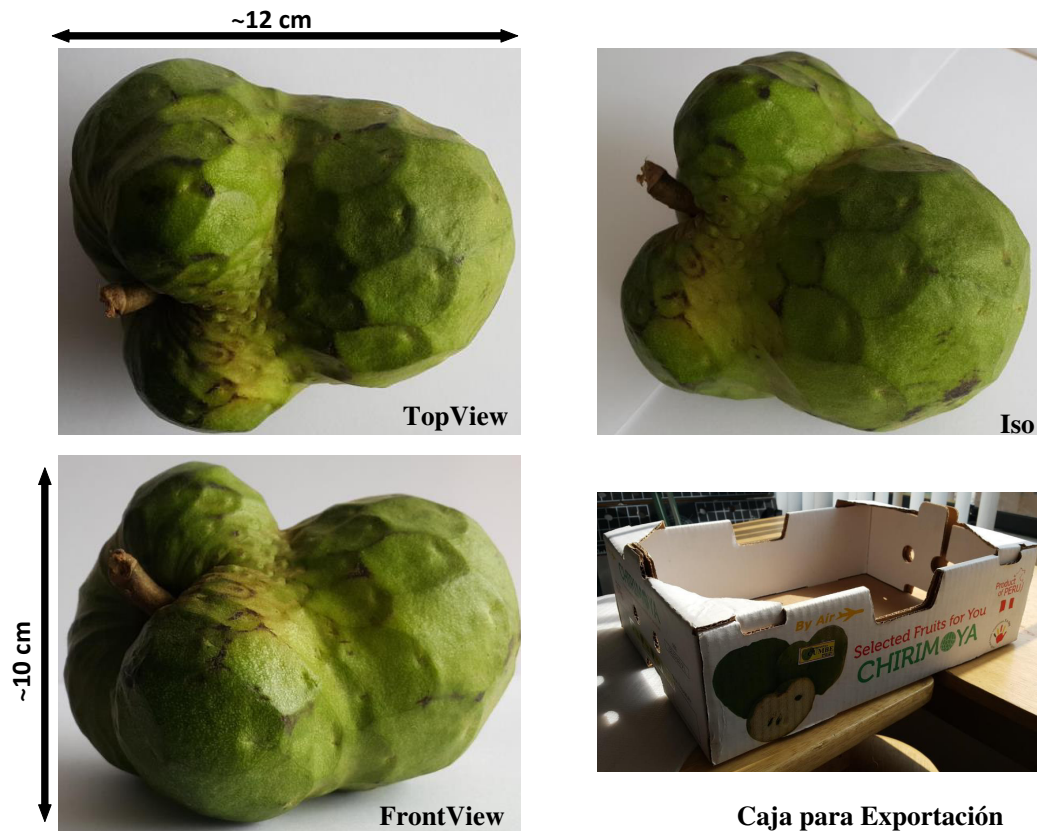


FIGURA 1.2: Tamaño de chirimoyas requeridas

Por lo expuesto, el presente trabajo trata de mejorar el criterio de la interpretación humana y su mano de obra; por tanto se opta por diseñar un sistema automatizado que efectúe mediciones sin contacto y clasifique las chirimoyas del ecotipo Aurora que para su exportación, las cuales corresponderían según la categoría por peso a las de categoría EXTRA y PRIMERA (301gr – 1000gr Aproximadamente). El uso de esta técnica en la clasificación de las chirimoyas no solo permitirá un considerable ahorro de tiempo, sino también una medición mas consistente, lo que implica una calidad más homogénea en el lote procesado sin verse afectado por factores como: cansancio y fatiga visual como ocurre con los operadores humanos; por otra parte el sistema automático permite almacenar fácilmente la información sobre la producción la misma que al ser analizada rápidamente será de utilidad en la toma de decisiones. Este prototipo podrá beneficiar a los productores de Callahuanca, así como también a la entidad promotora de planes de negocio agroexportador.

## 1.1. Objetivos

Se puede definir claramente los objetivos de esta investigación:

### 1. Objetivo Principal

- Diseñar un sistema de visión artificial para la clasificación de chirimoyas que cumplan con las dimensiones de  $10 \times 12\text{cm}$ .

### 2. Objetivos Específicos

- Realizar el acondicionamiento para la captura de imagen.
- Seleccionar el dispositivo de adquisición de imágenes.
- Seleccionar el controlador.
- Determinar la disposición de la iluminación en la zona de visión artificial.
- Implementar el algoritmo de medición.
- Ejecutar la programación del controlador.

## Capítulo 2

# Estado del arte

La visión artificial es una disciplina en creciente auge, una de sus aplicaciones en el sistema del control de calidad en el ámbito agro industrial ha tenido grandes avances debido a la creciente demanda de las técnicas del procesamiento digital de imágenes. Para la realización de la presente investigación, fue necesario estudiar los antecedentes de esta novedosa tecnología.

Leonario [5], diseñó un sistema de detección y clasificación de defectos en frutas mediante el procesamiento digital de imágenes utilizando el algoritmo de *retropropagación*, encargado de detectar y cuantificar los defectos de las naranjas, sus resultados alcanzan niveles de efectividad superiores al 90 %,concluyendo que no es posible determinar todos los parámetros por medio de la inspección visual como el aroma, textura ,contenido de pulpa, azúcar etc. por lo cual su trabajo es una solución parcial en la determinación de calidad de la fruta.

Empleando *Matlab* en la primera etapa y posterior implementación de los algoritmos de visión artificial en *Visual C*, en el Perú, en la PUCP, Sobrado [6] aplicó visión artificial usando redes neuronales como clasificador; el algoritmo de *retropropagación* del error que utilizo describe e identifica las características de los objetos en tiempo real, para lo cual empleó 4 momentos invariantes de menor orden, como elementos discriminadores, sus resultados mejoran los tiempos del proceso en las fases de pre procesamiento (*binarización*) y de extracción de características (código de cadena y cálculo de los momentos a partir del código de cadena), a su vez integro el sistema de visión con una celda de trabajo robotizado realizando una tarea de trayectoria lineal a  $200mm/s$  .

La importancia de utilizar de *Matlab* como herramienta para la implementación de algoritmos de procesamiento de imágenes radica en que los complejos algoritmos de visión ahora consumen algunos minutos, además de la facilidad para realizar cambios. Por tal motivo, Porras [7], diseñó un sistema de clasificación de objetos por forma y color basado en visión artificial con *Matlab* junto con la librería *vfm.dll* para la captura y procesamiento de imágenes concluyendo que con esta técnica controla la calidad del envío al 100 % y permite una inspección rápida y automatización del proceso de control supervisión y manipulación .

Morales et al [8] diseñó un sistema de visión artificial para la inspección, selección y control de calidad de fresas, desarrollado en *Matlab* aplicándolo a 100 imágenes de fresas comparando su efectividad con el criterio del ojo humano respecto a calibración, estado de madurez y categoría, en sus resultados importantes resalta el tiempo que toma la inspección de la fresa que oscila entre 1.7 y 2.1 segundos lo cual es aceptable en comparación con lo que tardaría un operador humano.

En la PUCP, Salazar [9], identificó objetos en movimiento mediante visión artificial y transmisión de datos a un brazo robótico utilizando la plataforma de programación *C++* y *OpenCV*, calculando las características de los objetos por color y forma con el *código de cadena*. Actualmente, el Grupo de *Reconocimiento de Patrones e Inteligencia Artificial Aplicada* [10], gracias al uso de Visión Computacional detecta el estado en el que se encuentran las hojas de cafeto ante el ataque de la Roya Amarilla, su intención es automatizar este diagnóstico examinando las hojas empleando dos criterios distintos: textura y color.

Diaz [11], midió el volumen de la fosa de una herida de Leishmaniasis para evaluar la evolución de la enfermedad empleando visión artificial con una precisión volumétrica de 0.191 ml empleando una segmentación manual y el software *ITK-Snap*. Sato [12], demostró que es posible contar bacilos de tuberculosis empleando técnicas de procesamiento de imágenes digitales empleando el método Otsu para una umbralización adaptativa a muestras de esputo; los objetos detectados son clasificados como bacilos o no-bacilos con una exactitud del 90 %.

Sanchez [13] en Arequipa, diseñó un sistema de Identificación y clasificación de figuras geométricas por colores y formas por Visión Artificial mediante el software *Labview 7.0* creado por *National Instruments* aplicando un lenguaje de programación visual, implementando por computador algoritmos y diagramas de bloques, que permiten comparar patrones .

Benavides et al [14], expone un sistema automático para la clasificación de Palta Hass el cual tuvo un 82.22% de precisión utilizando el software *Matlab/Simulink*; se empleó un *filtro Adaptativo de Wiener* para minimizar los efectos de objetos indeseados en la imagen y *Fisher's Linear Discriminant* como método de segmentación además de *K-means* como algoritmo de clasificación; para reducir los costos de la investigación, el software fue posteriormente migrado a *Scilab/Xcos*.

Deepa et al [15], realizó un estudio para el procesamiento de imágenes en manzanas, logro superar los inconvenientes de la segmentación tradicional presente en los bordes suaves de los frutos empleando un detector de bordes Multi-escala (*Canny*) para luego utilizar el resultado como entrada para una segmentación *Watershed*. como resultado se pudo segmentar con éxito todas las partes y defectos de las manzanas, aumentando la precisión, calidad y consistencia de la clasificación de frutos.

Naglea et al [16], junto a grupos de investigación de Tailandia y Alemania, realizaron estudios en procesamiento de imágenes en mangos, los investigadores recomiendan encarecidamente utilizar cámaras de buen desempeño para la detección de defectos, sus investigaciones en visión artificial mostraron una mejora en la selección y clasificación automática para la industria de exportación de mangos en Tailandia. Nandi et al [17], trabajó con mangos de la India para presentar una técnica para predecir el nivel de madurez y el tamaño de la fruta a partir de su imagen a 120lux utilizando el Software *LabView Real Time Enviroment* .

Nandi [18], logró calcular el tamaño de la fruta estimando el área cubierta binarizada en base al número de pixeles; después del procesamiento de imagen, clasificaron los mangos utilizando un Algoritmo basado en *Logica Difusa* utilizando funciones de membresías y reglas basadas en tres expertos en 5 variedades diferentes de mangos basándose en el color de la piel, tamaño, defectos superficiales, forma, firmeza, peso y olor .

Según Gastelum et al [19], "los avances de la tecnología en la agricultura, dan pie a una nueva era automatizada de métodos no invasivos que dejan las hojas y los frutos intactos para así no interferir con su crecimiento normal". Un claro ejemplo se puede apreciar en el diseño de un sistema el cual es capaz de detectar la locación de plantas (hierbas, cosechas), según la forma de sus hojas utilizando el detector de bordes *Canny* [20]; el sistema, puede estar montado en un tractor así como también a un vehículo no tripulado, tiene como objetivo identificar malezas e eliminarlas de forma puntual, sin afectar el resto de la cosecha, del mismo modo detectar plantas que no tengan un crecimiento normal y eliminarlas para asegurar una cosecha homogénea [21].

Otro estudio para imágenes en ambientes no controlados fué investigado por Deepa et al [22], quien para el reconocimiento de naranjas empleó *Canny* y un algoritmo basado en Color en el software *Matlab*. 20 imágenes fueron extraídas de internet, las cuales contenían hojas, ramas y sombras las cuales fueron separadas del objeto de interés utilizando un *Filtro de Gauss*. El método por color fue capaz de detectar las naranjas con un 85% de precisión .

El año 2012, estudiando la detección de defectos en papas Navid et al [23], demostró que fue posible clasificar los tuberculos en un 95% utilizando como clasificador *Support Vector Machines* (SVM). Chetna V. Maheshwari et al [24], propuso un método no destructivo y accesible para contar la cantidad de *Oryza Sativa L* (Semillas de Arroz) sin considerar elementos extraños, utilizando la segmentación utilizando *Canny*.

Afrisal et al [25], logró diseñar una maquina portable para los agricultores de Indonesia, capaz de clasificar frutos de características esféricas entre 25mm-75mm en una máquina que hace rodar los frutos por una pendiente de 10-30 grados de inclinación con respecto a la horizontal para evitar el uso de costosas fajas transportadoras. La captura se realizó utilizando una webcam Logitech C920 ubicada sobre el área de captura, la cual se mantuvo iluminada entre 150-500 lux; el procesamiento se efectuó a una velocidad de 500ms (Procesador 2.2 Ghz, comunicación servo serial 1Mbps).

Un sistema de clasificación de frutos de alta velocidad fue propuesto el 2004 en China por Guo Feng [26], el proceso de segmentación fue realizado en 50ms, ya que procesar de 4-5 frutos por segundo exigía que el sistema emita un juicio sobre el fruto analizado en 200ms utilizando un clasificador *Bayesiano*. Para detectar los bordes del fruto se utilizó *Interpolación Spline*, el cual consiste en ubicar 24 puntos desde el centro de gravedad, distanciados a 15 grados uno respecto del otro para luego utilizar el algoritmo de *Interpolación Spline* para formar un contorno suave.

A pesar de los considerables avances en el procesamiento de imágenes para el procesamiento y clasificación de productos agrícolas, muchos agricultores prefieren la clasificación convencional utilizando mano de obra humana, principalmente debido a la elevada inversión inicial [27]. Aún existe un campo de investigación abierto para mejorar la velocidad de procesamiento de imágenes, para reducir los costos computacionales [28].

## Capítulo 3

# Marco teórico

La Inspección Asistida por Computadora (IAC), permite una alternativa automatizada, no destructiva y accesible para lograr de manera precisa, rápida y objetiva los parámetros necesarios para que el producto logre satisfacer las expectativas del consumidor frente a otros productos de la misma categoría [27], el incremento en el cuidado y la sofisticación del consumidor, generaron mayor expectativa en los productos del mercado, ya que un producto con un defecto de origen orgánico puede causar serios daños al consumidor. Esto ha aumentado la presión en las industrias para producir productos accesibles de alta calidad y consistencia, vislumbrando como alternativa los sistemas de inspección asistidas por computadora para el sector Hortifrutícola cuyo fin es detectar grados de calidad en los frutos, los cuales superan ampliamente a los sistemas de clasificación convencionales [29] . El objetivo de este capítulo es la de realizar una revisión de las bases teóricas de la IAC utilizando Visión Artificial.

### 3.1. Componentes de la visión artificial

La configuración del hardware son prácticamente estándar [27], y se encuentran representados en la Figura 3.1 :

1. Un dispositivo de iluminación, el cual ilumina la muestra con la cual se está trabajando.
2. Una cámara CCD (Charged Couple Device) para adquirir la imagen.

3. Un capturador, el cual será el encargado de convertir de Analógico a Digital los elementos capturados de ser necesario.
4. Una Computadora Personal o un Microprocesador, para poder almacenar las imágenes y dar al sistema capacidades computacionales con software específico para las tareas.

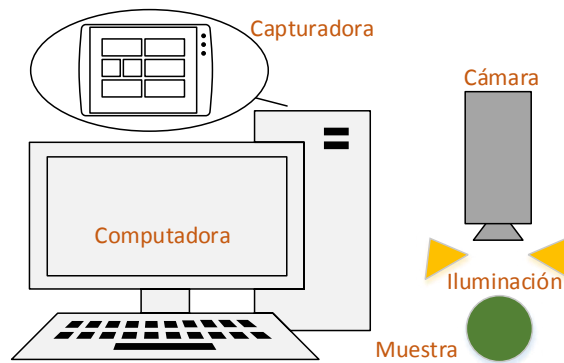


FIGURA 3.1: Componentes de la visión artificial

### 3.2. Procesamiento digital de imágenes

La visión artificial, también conocida como *computer vision* o *visión técnica*, es un subcampo de la inteligencia artificial, cuyo propósito es del de programar un computador para que 'entienda' las características de una imagen, más precisamente para deducir las propiedades del mundo tridimensional a partir de imágenes en dos dimensiones. El procesamiento digital de imágenes puede estar clasificado de la forma mostrada en la Figura 3.2 :

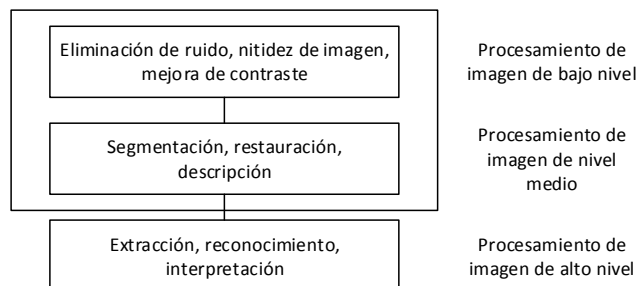


FIGURA 3.2: Clasificación del procesamiento digital de imágenes

1. Low Level Image Processing, por su traducción, Procesamiento de imagen en bajo nivel; consiste en la eliminación de ruidos y mejoras en la imagen. (Preprocesamiento).
2. Middle level Image Processing, por su traducción, Procesamiento de imagen en nivel medio (Segmentación).
3. High Level Image Processing, por su traducción, Procesamiento de imagen de alto nivel; consiste en el análisis del resultado de la segmentación

### **3.2.1. Etapas de la visión artificial**

#### **3.2.1.1. Acondicionamiento**

El acondicionamiento, hace referencia a todos los cálculos y consideraciones necesarias para realizar un correcto procesamiento de imágenes, tales como: la iluminación, sombras proyectadas, selección de la cámara, entre otros. Estos cálculos se detallan en el Capítulo 4.

#### **3.2.1.2. Adquisición de la imagen**

En esta etapa se obtiene la imagen adecuada del objeto a estudiar bien sea a través de una cámara de video, una cámara fotográfica, un escáner, etc. La adquisición se hace por medio de algún tipo de sensor el cual modifica su señal eléctrica en función de la intensidad luminosa que percibe. Dentro de las tecnologías más usadas se encuentran los sensores *Charge Coupling Device* (CCD) o por su traducción *Dispositivo de Almacenamiento de Carga* en el cual los elementos fotosensibles y el conjunto de puertas lógicas y circuitos de control asociados son integrados en un mismo chip. La luz que penetra en el semiconductor lleva los electrones de valencia a la banda de conducción, por lo que el número de electrones es proporcional a la intensidad de la luz. Los diodos están formados por fotolitografía, así que tienen un patrón perfectamente regular, sin distorsión de imagen [30].

La iluminación es el aspecto más decisivo en cualquier aplicación de visión artificial, a nivel mundial, en Italia [31] se estudió la iluminación y procesamiento de imagen en la industria, sustentando la cátedra: Visión en color y reconocimiento de patrones . Eligiendo la técnica adecuada de iluminación se puede lograr un aumento en la exactitud, en la fiabilidad del sistema y en su tiempo de respuesta. Es un error muy serio y

costoso asumir que se puede compensar una iluminación inadecuada con un algoritmo' [32]. Para este fin, se utilizara el sistema de iluminación Frontal Oblicua y Direccional, mostrada en la Figura 3.3, la dirección de la luz (ángulo de incidencia) es el ángulo por el plano normal a la superficie y el rayo incidente.

En la iluminación frontal direccional, el ángulo entre los rayos incidentes y la superficie es de 30 grados, lo que reduce un poco el contraste pero incrementa la cantidad de información obtenible de las superficies planas. La fuente de luz será LED (Light Emitting Diodes) blanca, de alta intensidad que proporciona una iluminación más potente, tiene una vida larga 100,000 horas y solo requiere un cable de alimentación. Estará distribuida en forma de anillo [32].

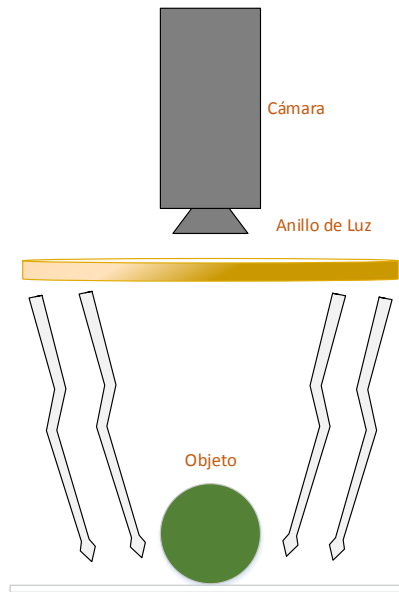


FIGURA 3.3: Iluminación del objeto a capturar

### 3.2.1.3. Preprocesamiento

Hace referencia al proceso inicial de una imagen la cual no ha sido trabajada, la imagen capturada es capturada a través de los sensores y es transferida hacia el computador, en aquel momento, la imagen se convierte en digital formada por dígitos que pueden ser leídos por la computadora, dichos dígitos son convertidos en pequeños puntos llamados Pixels, donde 0 es Negro y 255 es Blanco. Cada Pixel en Color es representado por 3 dígitos RGB (Red, Green, Blue) también en intervalos de 0 a 255 dependiente de la intensidad del color. En algunos casos la imagen capturada puede contener elementos y

distorsiones no deseadas. Por tal motivo, el propósito del Preprocesamiento es mejorar la calidad de la imagen adquirida eliminando las partes indeseables o realzando las partes de mayor interés en ellas, de esta forma se aumentan las posibilidades de éxito del trabajo.

1. Conversión de los niveles de grises.
2. Transformaciones geométricas.
3. Transformaciones del histograma.
4. Filtrado espacial y frecuencial.

#### **3.2.1.4. Segmentación**

Es el proceso en el cual se logra descomponer la imagen en sus partes u objetos constituyentes que guarden una fuerte relación con los objetos o el área de interés utilizada en la matriz principal de análisis. Es una de las partes más difíciles e importantes en el procesamiento de la imagen dado que una correcta segmentación simplificará en gran medida la solución del problema. Así mismo, una segmentación incorrecta hará que el sistema arroje resultados erróneos. Los diferentes objetos que aparecen en una imagen pueden ser detectados fijándose en aspectos como sus contornos o su textura. Algunas técnicas comúnmente usadas para la segmentación son:

1. Umbralización (Thresholding): Proceso en el cual donde solo las regiones oscuras son de interés, las otras regiones son convertidos a los colores del fondo. Es una técnica muy útil para determinar la madurez, defectos y daños para la clasificación.
2. Técnicas basadas en detección de contornos: Se basa en la detección de discontinuidades en el nivel de gris, color de píxeles, texturas, etc. Es una técnica muy útil para determinar la forma y el tamaño para la clasificación.
3. Técnicas basadas en crecimiento de regiones: implica un agrupamiento y luego la extracción de píxeles similares para formar una región que represente un único objeto en la imagen, en esta técnica, las otras regiones son eliminados, dejando solo la característica de interés.

**3.2.1.4.1. Umbralización** Proceso por el cual se convierte una imagen en escala de grises a otra en blanco y negro, con la finalidad de que los puntos que sobrepasen el valor de umbral tomen por color el blanco y los que no pasen el valor umbral, se tomen el color negro tal como indica la Figura 3.4 y la Ecuación 3.1.

$$g(u, v) = \begin{cases} 0, & f(u, v) < T \\ 1, & f(u, v) \geq T \end{cases} \quad (3.1)$$

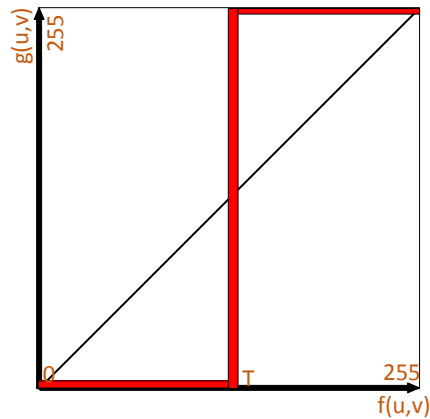


FIGURA 3.4: Umbralización

### 3.2.1.5. Extracción de características

Una vez se han separado adecuadamente los objetos que componen la imagen se procede a aplicar un método con el cual sea posible extraer los datos de interés. El objetivo entonces es extraer rasgos que proporcionen información cuantitativa o que permitan diferenciar una clase de objetos de otra. Estas características pueden ser de tipo morfológico como área, perímetro, esqueletos, así como características basadas en textura y color [30].

### 3.2.1.6. Reconocimiento e interpretación

En este procesamiento de alto nivel de reconocimiento, se le asigna una etiqueta a un objeto con base en la información que brindan sus descriptores. La interpretación le da un sentido o significado a los objetos reconocidos para finalmente llegar a clasificarlos según sus propiedades. Una técnica comúnmente usada en la etapa de clasificación se

basa clasificadores estadísticos o modelos neuronales multicapa mediante el algoritmo de retro propagación [27].

### 3.3. Característica del a chirimoya

La chirimoya es oriunda de los valles andinos del Perú, es una planta de aspecto arbustivo, el fruto tiene forma cordiforme o cónica, la piel delgada suave de color verde pálido y cubierta de escamas o protuberancias redondas, contiene abundante pulpa blanca dulce y jugoso, con un agradable aroma y delicioso sabor semiácido, contiene semillas café o negras, la planta tiene un longevidad de 15 años y entra en producción a los 3 o 4 años, la clasificación Arancelaria se muestra en el Cuadro 3.1. En el cultivo de la chirimoya existe una gran variedad genética, con selecciones de biotipos de diferentes características morfológicas fonológicas, y organolépticas tal como se muestra en la Figura 3.5.

CUADRO 3.1: Clasificación arancelaria

| SITUACION COEMRCIAL       |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| CLASIFICACIÓN ARANCELARIA |                       |
| Nombre del producto       | Chirimoya             |
| Nombre científico         | Annona Cherimola Mill |
| Código Arancelario        | 0810.90.20.00         |

Existe una gran demanda de la Chirimoya en mercados extranjeros, la evolución de las exportaciones de la chirimoya fresca ha mostrado una tendencia positiva, incrementando notablemente al pasar del año 2011 al 2012, expresado en una variación del 21 % lo que representa el valor FOB un total de 120570.62 USD como es mostrado en el Cuadro 3.2.

CUADRO 3.2: Evolución de las exportaciones peruanas

| EXPORTACIONES DE CHIRIMOYA |           |        |            |           |           |                     |
|----------------------------|-----------|--------|------------|-----------|-----------|---------------------|
| Años                       | 2008      | 2009   | 2010       | 2011      | 2012      | % Variac. 2011-2012 |
| FOB ( US\$)                | 17,642.17 | 351.1  | 105,547.64 | 99,937.48 | 120,508.1 | 21                  |
| PESO NETO (kg)             | 4,198.62  | 102.92 | 40,706.41  | 28,365.61 | 38,371.15 | 35                  |
| PRECIO FOB PROMEDIO        | 4.20      | 3.41   | 2.59       | 3.52      | 3.14      | -11                 |

Fuente: ADUANA - PERU

Elaboración: Área de Comercio Exterior – AREX Lambayeque

Los requerimientos de las Chirimoyas Callahuanca para la cosecha y distribución se encuentran detalladas en el *Marca Colectiva Chirimoya Callahuanca - Reglamento de*

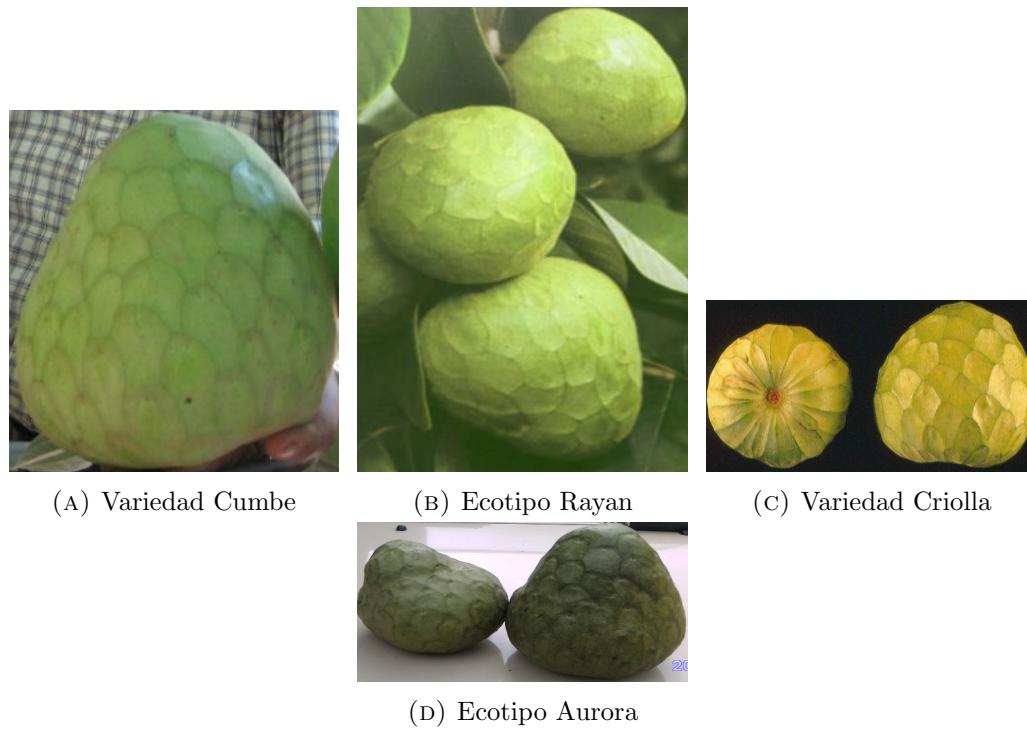


FIGURA 3.5: Cultivos de la comunidad de Callahuanca

uso - Resolución N° 004214-2013/DSD-INDECOPI [33]. El dicho reglamento se estipula que las características del a chirimoya de exportación que cumplan con lo detallado del Cuadro 3.3.

Como se puso en evidencia en el Capítulo 1, existe una gran diferencia de tamaños en la cosecha de Chirimoyas de un mismo árbol de Chirimoyo en el valle de Huarochirí, dando frutos que pueden oscilar entre 50gr y 5kg como se puede apreciar en la Figura 3.6, siendo la Figura3.6a correspondiente a la chirimoya de 5kg y la Figura 3.6b a una chirimoya de 50gr con una moneda como una referencia de tamaño.

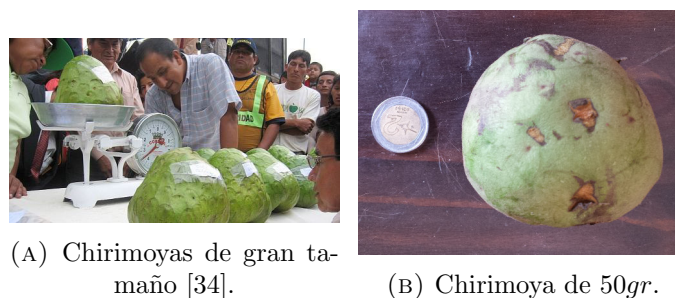


FIGURA 3.6: Diferencia de tamaños en Cosecha

CUADRO 3.3: Ficha de exportación chirimoya Callahuanca

| <b>Chirimoya Callahuanca</b>   |  |
|--|--|
| <b>Presentación/Especificaciones de calidad</b>  |  |
| En frutos de diversos tamaños con pocas semillas.<br>Enteras, Limpias, sin plagas y aspecto fresco.<br>Sabor: Característico e intenso<br>Dulzor: 23° Brix<br>Peso promedio: 300-500gr |  |
| <b>Conservación</b>  |  |
| El fruto maduro puede durar 4 días a temperatura ambiente  |  |
| <b>Volumen de producción</b>   |  |
| En temporada de mayor producción los rendimientos son de 13 Tn/ha  |  |
| <b>Meses de oferta</b>   |  |
| Desde Diciembre hasta Octubre, el mayor volumen de producción está entre los meses de Marzo y Junio  |  |
| <b>Certificados</b>  |  |
| Marca Colectiva - Chirimoya Callahuanca<br>Resolución N°004214-2013/DSD-INDECOPI   |  |

Es por esto, que el reglamento *Marca Colectiva - Chirimoya Callahuanca* [33], en *Anexo 1 Calidad de Selección y Clasificación* sección B, *Requerimientos en cuanto a la clasificación*, indica los rangos de peso y las clasificaciones correspondientes para las Chirimoyas cosechadas en la comunidad de Callahuanca, por lo tanto, es una obligación Seleccionar y Clasificar las diferentes variedades de Chirimoya conforme las Normas Técnicas determinadas en el Cuadro 3.4, cabe resaltar que este último cuadro presenta una incongruencia de pesos en la fila correspondiente a la Segunda categoría proveniente de la referencia consultada.

Clasificar las chirimoyas, da como resultado una proporción de tamaño similar a la mostrada en la Figura 3.7, adicionalmente las Chirimoyas deben ser marcadas etiquetas adhesivas como se muestra en el Cuadro 3.5, en la Figura 3.8, se muestra la etiqueta amarilla Callahuanca, correspondiente a las Chirimoyas Categoría II.

CUADRO 3.4: Categoría de peso del fruto de Chirimoya [33].

| CATEGORÍA | PESO (gr)           |
|-----------|---------------------|
| Extra     | $\geq 601$          |
| Primera   | $\geq 301 \leq 600$ |
| Segunda   | $\geq 150 \leq 300$ |
| Tercera   | $\geq 50 \leq 95$   |

CUADRO 3.5: Etiquetas de las chirimoyas [33]

| <b>ETIQUETAS</b> |                 |
|------------------|-----------------|
| Rojo             | Categoría Extra |
| Verde            | Categoría I     |
| Amarillo         | Categoría II    |
| Blanco           | Categoría III   |

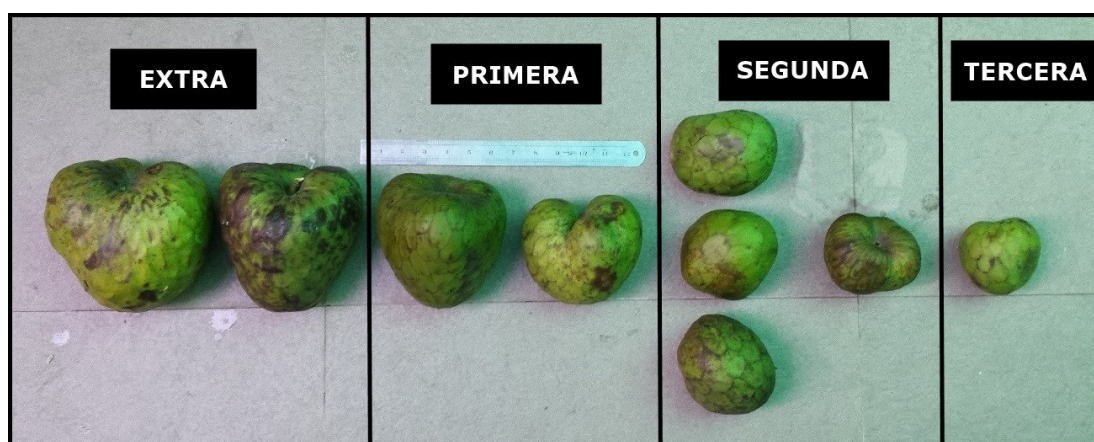


FIGURA 3.7: Categorías del fruto de chirimoya



FIGURA 3.8: Etiqueta amarilla Callahuanca

El reglamento *Marca Colectiva - Chirimoya Callahuanca*, en *Anexo 1 Calidad de Selección y Clasificación* sección A, *Requerimientos en cuanto a la selección* indica lo mostrado en el Cuadro 3.6. En otros términos el productor esta en la obligación de cosechar frutos que se encuentren en punto óptimo de madurez en árbol, quedando excluidas chirimoyas con deformaciones, protuberancias, punto de madurez incorrecta y daños detectados a simple inspección con un error no mayor al 5%. Es importante resaltar que, no todas las Chirimoyas de la Categoría Extra y Primera cosechadas son aptas para su exportación, por tal motivo es importante el desarrollo de esta investigación.

CUADRO 3.6: Requerimientos en cuanto a la selección [33].

| Requerimientos en cuanto a la Selección   |  |
|---|--|
| a) Menos de 5% de los frutos muestreados - en base al peso - tienen los siguientes defectos:                                  |  |
| Deformidad  |  |
| Daño mecánico   |  |
| Daño por insecto  |  |
| Daño por enfermedades   |  |
| Daño por aves   |  |
| Pudrición   |  |
| Mezclas de ecotipos (Presencia de protuberancias en frutos que tienen piel con relieves carpelares fundidos o poco aparentes) |  |
| Exentas de daños causados por bajas temperaturas y lesiones solares   |  |
| Desprovistas del péndulo y conservando el pezón   |  |
| b) Quedarán excluidas las chirimoyas verdes, recolectadas antes del punto óptimo de madurez en arbol.                         |  |

## Capítulo 4

# Diseño del hardware y software

El diseño ha sido una tarea que se ha venido desarrollando en base a la propia experiencia del diseñador. La necesidad de desarrollar rápidamente nuevos productos ha hecho que se estudie e investigue esta actividad dando como resultado diversas metodologías. 'Hoy en día el diseño es una técnica que se puede enseñar y aprender' [35].

El proceso de diseño del hardware y Software se realizó tomando como referencia la norma VDI 2221 [36] desarrollada por la Asociación Alemana de Ingenieros. La metodología del diseño aplicado se puede resumir de la siguiente forma:

- **Comprensión de la solicitud:** Consiste en comprender el problema, definir las características del producto a diseñar, restricciones y recursos disponibles (Tecnología, mano de obra, tiempos, costos, plazos, etc).
- **Concepto de Solución:** Permite obtener los conceptos de ingeniería que se empleara en la solución y el diseño cualitativo del producto, es decir contar con un bosquejo de la solución completa, la forma en que van a trabajar las juntas y los posibles materiales a utilizar.
- **Elaboración del proyecto:** Terminando esta etapa, se habrán realizado todos los cálculos necesarios, se contara con un plano de ensamble y un listado de todas las piezas, asi como también estarán definidos circuitos electrónicos, programas, comunicaciones y estrategias de control.

- **Elaboración de Detalles:** En esta etapa se obtendrán todos los planos de fabricación y montaje de la máquina, también se contará con todos los cálculos documentados. Así como también estarán detalladas las tarjetas de control y programas desarrollados de ser necesarios.

En la Figura 4.1 se puede apreciar las fases del diseño: Fase I de información, Fase II correspondiente a la creación, Fase III desarrollo y la fase IV de la elaboración de la ingeniería de detalle; cualquiera que sea el método que se elabore para realizar un diseño, se verán estas fases de alguna manera, aunque algunos autores las definan de diferentes. En la Fase I, es necesario aclarar y precisar el problema para determinar las funciones y su estructura, para ello el método dispone de la Lista de exigencias y de la estructura de funciones como herramientas; durante la Fase II, se desarrolla el concepto de solución para cada estructura dividiéndolos en módulos realizables; en la Fase III, se determina el proyecto preliminar configurando los módulos apropiados y en la Fase IV, se configura el producto total elaborando la documentación de fabricación y uso.

En la Figura 4.2, se puede identificar las principales fases del método de diseño (Comprensión de la solicitud, concepto de solución, elaboración del proyecto y la elaboración de los detalles). La comprensión de la solicitud requiere que se realice un estado de la tecnología, una lista de exigencias y un plan de trabajo; para formalizar el concepto de solución, todas las funciones que realizará la máquina y sus posibles soluciones deben ser analizadas; para la elaboración del proyecto, los cálculos preliminares, planos de ensamble y lista de piezas deben ser efectuados; en la elaboración de detalles, es necesario presentar los planos de despiece y fabricación de la máquina, del mismo modo se debe presentar la memoria de cálculos e instrucciones para el montaje.

## 4.1. Comprensión de la solicitud

Para esta parte, debemos asumir el problema en forma crítica, el pedido debe ser comprendido sin tener lugar a dudas para evitar malos entendidos, falsas construcciones, duplicidad de trabajos y naturalmente, evitar consecuencias económicas y legales que pudieran ocurrir debido a la falta de información. Se debe tomar el problema como un contrato, donde estén escritas las especificaciones del problema como se detalla en el Cuadro 4.1 denominado Lista de Exigencias. En el Capítulo 2 de esta investigación, evaluamos el estado de la tecnología referente a los métodos y técnicas de la Visión Artificial y sus aplicaciones en el procesamiento de frutos en fresco. También en el Capítulo

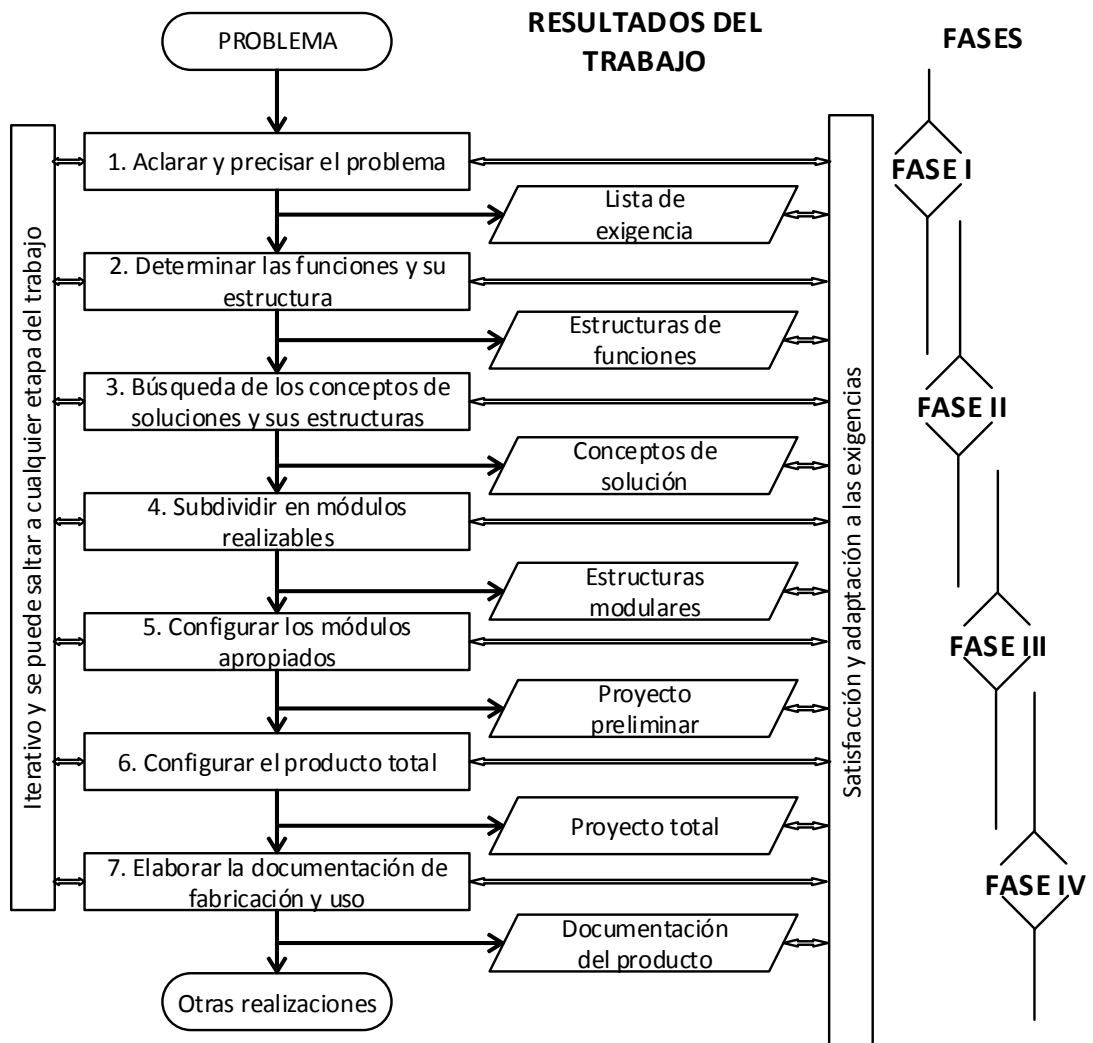


FIGURA 4.1: Proceso generalizado de desarrollo y diseño VDI 2221 02.1993 (11.1986)

3, tras una entrevista con la asociación de productores de Chirimoya de Callahuanca, información técnica y revistas, se pudo comprender las características del fruto con el cual se está trabajando.

#### 4.1.1. Estructura de funciones

Para la elaboración de la estructura de funciones, es necesario partir del concepto, el cual es una parte del proceso de diseño que se realiza después de detallar un problema a través del proceso de abstracción; la formulación de una estructura de funciones

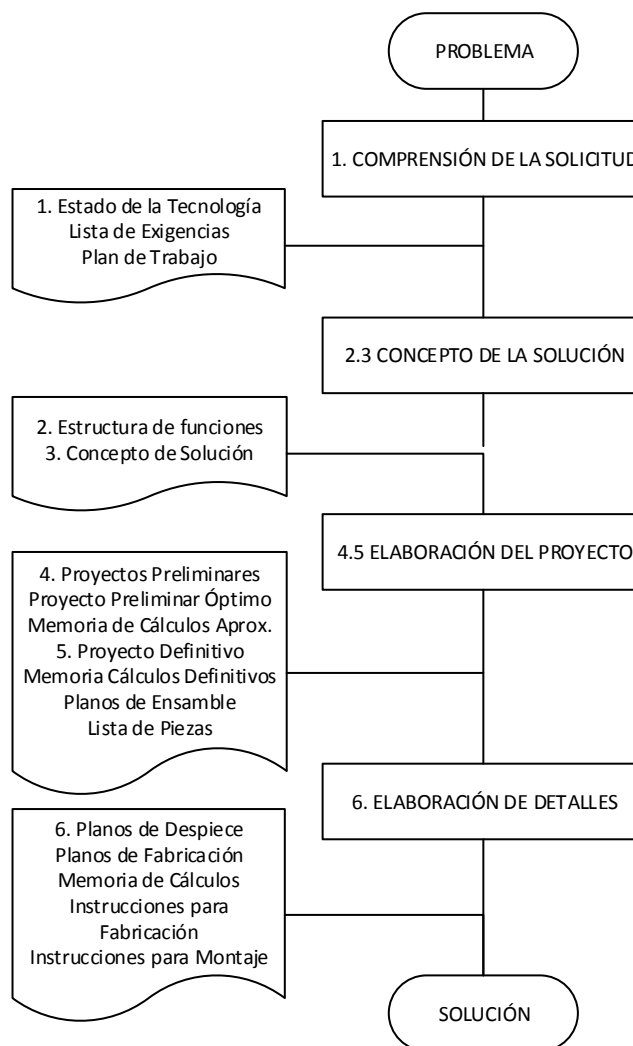


FIGURA 4.2: Método de diseño y sus fases [35]

así como la combinación de posibles soluciones nos permitirán determinar un óptimo concepto de solución.

#### 4.1.1.1. Abstracción (Black-Box)

Los datos de entrada en esta etapa del diseño se encuentran en la lista de exigencias del sistema técnico, el proceso de abstracción tiene como propósito abarcar la mayor cantidad de soluciones posibles con la participación de la nueva tecnología, los nuevos materiales, los nuevos procesos de fabricación, así como los últimos avances de la ciencia,

CUADRO 4.1: Lista de exigencias

| SIERRA EXPORTADORA<br>RUC: 20514859559 |  |  |
|--|--|--|
| PROYECTO                               | DISEÑO DE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL<br>PARA LA CLASIFICACIÓN DE CHIRIMOYAS BASADO EN MEDIDAS |  |
| CLIENTE                                | DESEO /<br>EXIGENCIA   | DESCRIPCION  |
| FUNCION                                | E  | Diseñar un sistema de Vision Artificial (VA) para la clasificación de Chirimoyas de 10x12cm.   |
| FUNCION                                | E  | El transporte de chirimoyas a través del área de Captura de Imagen se realizara de forma mecánica a 0.33m/s.<br>Las chirimoyas pasaran por el área de captura una a continuación de otra.<br>El diseño del Transporte Mecánico, NO está contemplado en el presente trabajo |
| FUNCION                                | E  | La tolerancia máxima de defectos en la clasificación de chirimoyas no debe superar un 5% de los frutos muestreados en base al peso   |
| FUNCION                                | E  | Las mediciones realizadas empleando VA debe tener una precisión en el orden de los milímetros.   |
| CONTROL                                | E  | Se realizara el Control de los motores, variadores, sensores y actuadores seleccionados durante el proceso de diseño del transporte mecánico. Garantizando una correcta comunicación con el sistema de Visión Artificial.  |
| CONTROL                                | E  | El control de la selección será utilizando un Controlador Lógico Programable (PLC)   |
| HARDWARE                               | E  | El sistema contara con una Zona de Captura de imagen, el cual será ubicado en la parte superior del Transporte Mecánico y montado al suelo para evitar vibraciones indeseadas  |
| ILUMINACION                            | E  | El sistema contara con un área de Iluminación LED de Chirimoyas montada sobre la zona de captura de imagen para garantizar una correcta iluminación.   |
| MATERIA                                | E  | Se trabajara con Chirimoyas del ecotipo Aurora, de categorías extra y primera.   |
| MONTAJE                                | E  | La instalación, montaje y desmontaje del sistema serán de la manera más simplificada posible.  |
| MANTENIMIENTO                          | E  | Sera necesario limpiar con un paño limpio seco, suave de microfibra el lente de la cámara después de cada 8 horas de funcionamiento continuo.  |
| SEGURIDAD                              | E  | El diseño del sistema debe asegurar la integridad física de los operarios.   |
| ENERGIA                                | E  | La alimentación será eléctrica domestica de 220V AC  |
| GEOMETRIA                              | E  | Las dimensiones de la zona de captura serán determinadas de tal forma que el resultado sea compacto en tamaño.   |
| FABRICACION                            | E  | La Cámara, PLC y accesorios seleccionados, serán de Importación.   |
| FABRICACION                            | E  | Los materiales de la Zona de Captura podrán ser adquiridos fácilmente en el mercado nacional.  |
| ERGONOMIA                              | E  | El equipo deberá ser intuitivo y de cómoda manipulación.   |
| CALIBRACION                            | E  | Es necesario calibrar y entrenar el equipo con muestras antes de utilizarlo.   |
| SOFTWARE                               | E  | La programación será efectuada empleando software y librerías de libre uso.  |
| HARDWARE                               | D  | El equipo requerirá de una PC de 4Gb RAM, Procesador Intel® Core™ i5 CPU 2.53GHz o superior, USB 3.0 Windows 7 (x86), incluyendo monitor, teclado y mouse genéricos.   |

de esta manera se consigue nuevas combinaciones y muchas nuevas y mejores soluciones [35].

Cualquier función se puede representar en forma de una caja negra donde se consideran solo 3 magnitudes de entrada y salida: Señal, Energía y Materia

La utilización del modelo mostrado en la Figura 4.3, da como resultado la abstracción de caja negra del Sistema de Visión, el cual esta representad Figura 4.4.

#### 4.1.1.1.1. Secuencia de operación y funciones

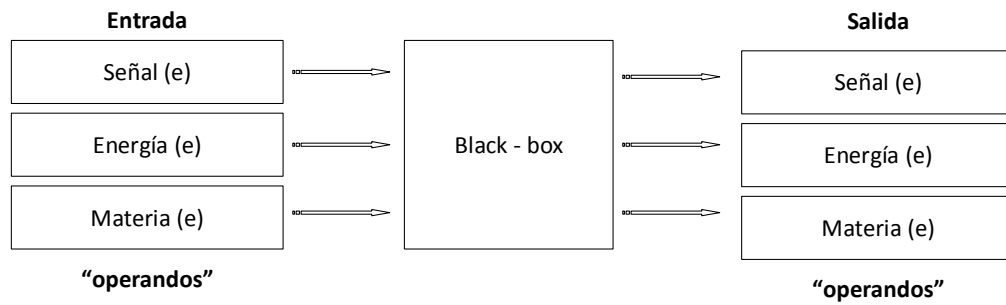


FIGURA 4.3: La máquina como caja negra [35]

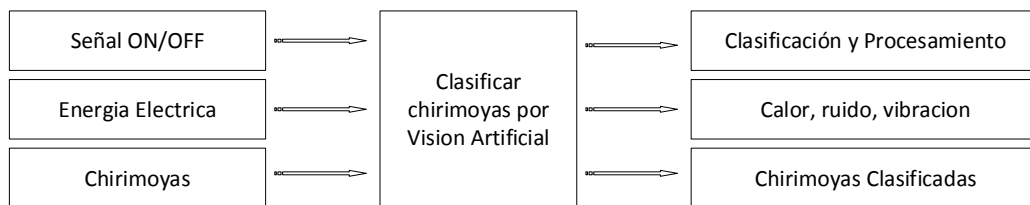


FIGURA 4.4: Abstracción Black-Box sistema de visión

### 1. Preparación

- *Mover* todo el sistema a sus condiciones iniciales para poder iniciar la clasificación.
- *Recepcionar* las chirimoyas y ubicarlas bajo la zona de captura.

### 2. Ejecución

- *Verificar* si la chirimoya mide más de 10cm empleando un sensor.
- *Asegurarse* si la chirimoya se encuentra bajo la zona de captura empleando un sensor.
- *Capturar* la imagen de las chirimoyas para poder obtener información de ellas.
- *Analizar* la información obtenida para poder medir los parámetros necesarios.
- *Clasificar* las chirimoyas por tamaño (10cm x 12cm).
- *Enviar* una señal al controlador que informe si la chirimoya cumple con los parámetros establecidos.
- *Asegurarse* de que la chirimoya se encuentre en el área de trabajo del actuador final.

- *Separar* las chirimoyas basándose en la señal recibida utilizando un actuador final.

### 3. Control

- *Verificar* que la cámara se encuentre operativa.
- *Encender* la maquina e iniciar el proceso de selección.
- *Controlar* que las chirimoyas no midan mas de 10 cm de altura
- *Controlar* el procesamiento de imagen y la clasificación.
- *Controlar* la presencia de chirimoyas bajo la zona del actuador final y la zona de captura.
- *Controlar* la parada de emergencia en caso existiese.
- *Controlar* el proceso de inicio a fin.

### 4. Fase final

- *Retornar* los elementos a condiciones iniciales.
- *Reiniciar* la secuencia de operaciones

**4.1.1.1.2. Agrupación de funciones** Después de definir claramente la secuencia de operación y funciones, es posible agrupar las funciones para obtener como resultado una secuencia de funciones como se muestra en la Figura 4.5.



FIGURA 4.5: Funciones secuenciales agrupadas

**4.1.1.1.3. Estructura de funciones** La estructura de funciones se separará en Dominios de acción, en este caso se cubrirá el Dominio de la Visión y el Dominio de Control mostradas en las Figuras 4.6 y 4.7 respectivamente.

De las Figuras 4.6 y 4.7 entendemos por:

- **CAPTURA:** Toma de imagen

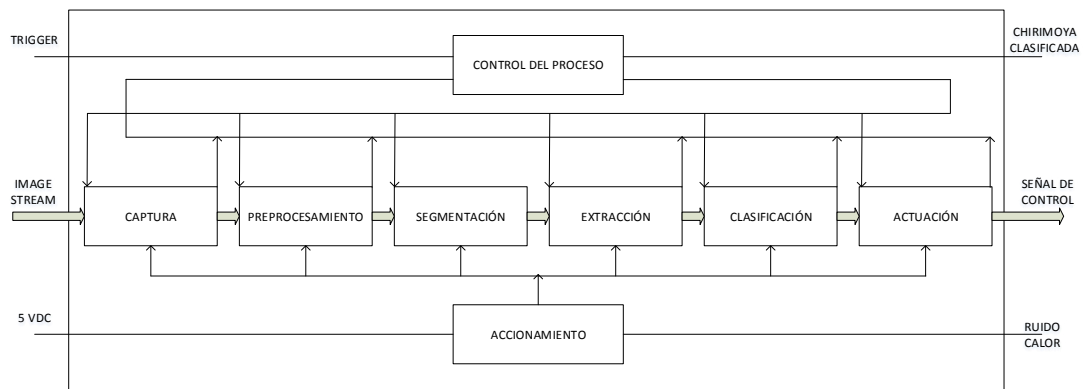


FIGURA 4.6: Estructura de funciones: Dominio de la visión

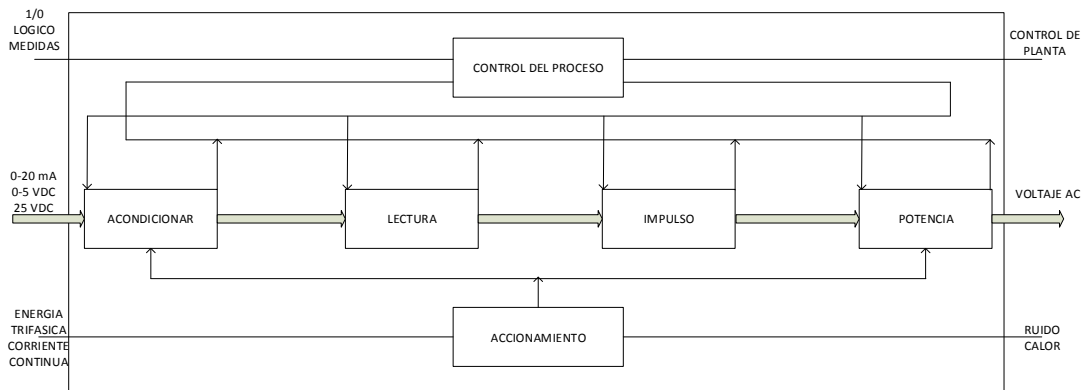


FIGURA 4.7: Dominio de funciones: Dominio del control












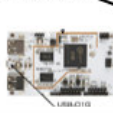












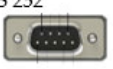



- PREPROCESAMIENTO: Aplicación de filtros
- SEGMENTACIÓN: Dividir los objetos de interés
- EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS: Seleccionar información relevante.
- CLASIFICACIÓN: Decidir si la materia cumple con las características requeridas.
- ACTUACIÓN: Se produce una señal de control.
- ACONDICIONAR: Convertir las señales adquiridas.
- LECTURA: Leer los datos adquiridos.
- IMPULSO: Generar un pulso o voltaje.
- POTENCIA: Circuito de potencia.

### 4.1.2. Concepto de solución

#### 4.1.2.1. Matriz morfológica de ZWICKY

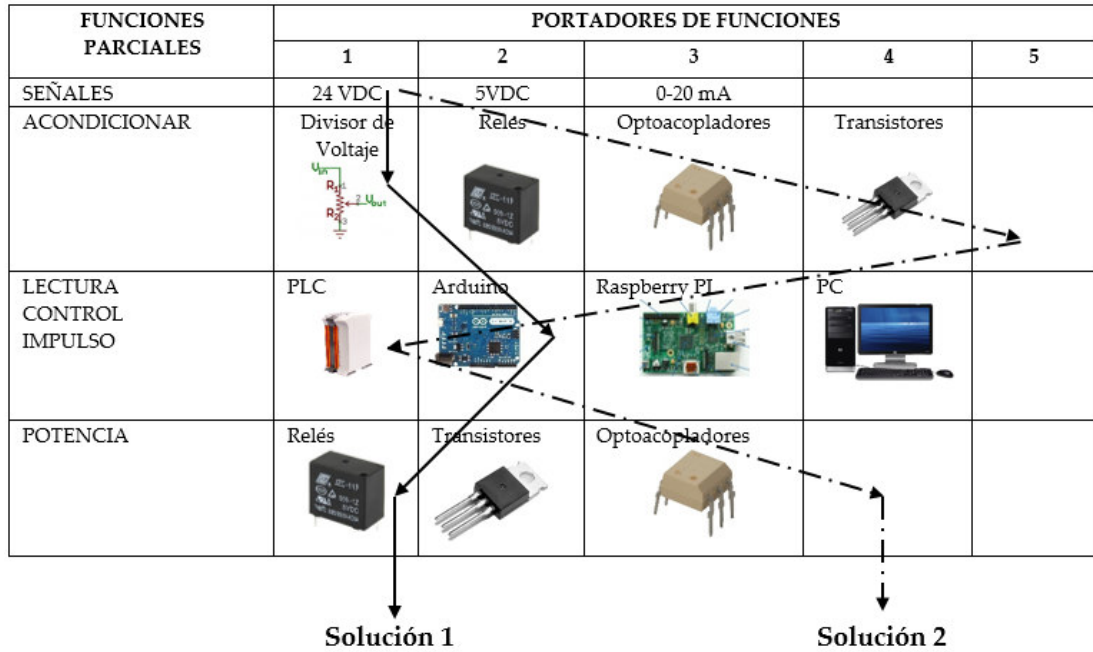
Existen muchos métodos para la búsqueda de las soluciones, el método empleado en esta investigación, presenta las soluciones en forma de una Matriz Morfológica de Zwicky [37], el cual permite subdividir una función total en funciones parciales y mostrar las posibles soluciones de forma ordenada. Es posible obtener más de una solución a un mismo problema, sin embargo queda a criterio del diseñador vincular las opciones para obtener las mejores soluciones posibles. A continuación en los Cuadros 4.2 y 4.3, se muestran gráficamente las combinaciones para obtener el concepto de solución.

CUADRO 4.2: Matriz morfológica en el dominio de la visión

| FUNCIONES PARCIALES                            | PORTADORES DE FUNCIONES  |   |   |   |  |
|--|--|---|---|---|--|
|  | 1  | 2   | 3   | 4   | 5  |
| ENERGIZAR                                      | 5 VDC  | 12 VDC  | 24VDC   |   |  |
| ILUMINAR                                       | LED  | Luz Natural   |   |   |  |
| CAPTURA  | Cámaras Embebidas<br> | Webcam<br>   | Cámaras Semi Industriales<br>   | Cámaras Industriales<br> |  |
| COMUNICACION                                   | USB 2.0<br>           | USB 3.0<br>  | Giga Ethernet<br>               | TCP/IP<br>               | CANopen<br>         |
| PREPROCESAMIENTO<br>SEGMENTACION<br>EXTRACCION | Raspberry PI<br>      | Beaglebone<br>                                       | PcDuino y8<br>                  | PC<br>                   | DSP<br>             |
| CLASIFICACION                                  | Matlab<br>            | C++<br>Open CV<br>Microsoft<br>OpenCV Visual C++<br> | Python<br>Open CV<br>OpenCV<br> | Labview<br>              | Vision Software<br> |
| ENVIAR   | USB 2.0<br>           | USB 3.0<br>  | Giga Ethernet<br>               | TCP/IP<br>               | CANopen<br>         |
| ACTUACION                                      | Serial RS 232<br>     | RLC<br>  | Relés<br>                       | Transistores<br>         |  |

Una vez comprobadas cuidadosamente las combinaciones resultantes, la etapa final de la elaboración del concepto óptimo requiere de una evaluación además de una verificación. Se deben tomar aspectos técnicos y económicos, el criterio económico no debe tomarse

CUADRO 4.3: Matriz morfológica en el dominio del control



como único criterio de evaluación. En el Cuadro 4.4 se muestran los aspectos posibles para la evaluación del concepto de solución





CUADRO 4.4: Aspectos posibles de evaluación del concepto de solución

| ASPECTOS TÉCNICOS       | ASPECTOS ECONÓMICOS      |
|-------------------------|--------------------------|
| Buen uso de la energía. | Numero de piezas.        |
| Seguridad.              | Productividad.           |
| Rapidez.                | Costos de la tecnología. |
| Estabilidad.            | Numero de operarios.     |
| Robustez.               | Facilidad de montaje.    |
| Manipulación.           | Fácil mantenimiento.     |
| Facilidad de manejo.    | Costo de operación.      |
| Transportabilidad.      |                          |
| Calidad de trabajo.     |                          |
| Fácil instalación.      |                          |

Tanto los aspectos técnicos, como los aspectos económicos, se calificaran en criterios de 0 a 4 de la forma mostrada en el Cuadro 4.5.

las calificaciones se estructuraron en los Cuadros 4.6 y 4.7 para los dominios de Visión y Control respectivamente, se reservó el puntaje máximo de 4 para la solución ideal, la mejor solución propuesta es la que obtiene el mayor puntaje en la suma total.

CUADRO 4.5: Escala de calificación para los aspectos de evaluación del concepto de solución

|   |   |   |  |   |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |
| 0   | 1   | 2   | 3  | 4   |
| No satisface  | Aceptable a las justas  | Suficiente  | Bien   | Muy Bien  |

CUADRO 4.6: Evaluación de la matriz morfológica – Dominio de la visión

| DOMINIO DE LA VISIÓN        |            |            |                |
|-----------------------------|------------|------------|----------------|
| PROPIEDAD TÉCNICA/ECONÓMICA | SOLUCIONES |            |                |
|                             | Solución 1 | Solución 2 | Solución Ideal |
| Buen uso de la energía.     | 3          | 3          | 4              |
| Seguridad.                  | 1          | 3          | 4              |
| Rapidez.                    | 1          | 3          | 4              |
| Estabilidad                 | 2          | 3          | 4              |
| Robustez                    | 2          | 3          | 4              |
| Manipulación                | 1          | 2          | 4              |
| Confiabilidad               | 2          | 3          | 4              |
| Facilidad de manejo         | 1          | 2          | 4              |
| Transportabilidad           | 3          | 3          | 4              |
| Calidad de trabajo          | 2          | 3          | 4              |
| Fácil instalación           | 3          | 3          | 4              |
| Numero de piezas            | 2          | 3          | 4              |
| Productividad               | 3          | 2          | 4              |
| Costos de la tecnología     | 2          | 3          | 4              |
| Numero de operarios         | 3          | 2          | 4              |
| Facilidad de montaje        | 3          | 3          | 4              |
| Fácil mantenimiento         | 1          | 3          | 4              |
| Costo de operación          | 3          | 3          | 4              |
| <b>TOTAL</b>                | <b>38</b>  | <b>50</b>  | <b>72</b>      |

## 4.2. Proyecto Preliminar

En esta etapa del diseño, es necesario elaborar un proyecto definitivo a partir de la estructura de construcción óptima determinada en las secciones anteriores, esta etapa, el diseñador debe configurar todas las piezas, también determinar su disposición entre ellas tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Determinar las medidas principales.
- Averiguar las relaciones de espacio.
- Calcular las medidas de las piezas.

CUADRO 4.7: Evaluación de la matriz morfológica – Dominio del control

| <b>DOMINIO DEL CONTROL</b>         |                   |                   |                       |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| <b>PROPIEDAD TÉCNICA/ECONÓMICA</b> | <b>SOLUCIONES</b> |                   |                       |
|                                    | <b>Solución 1</b> | <b>Solución 2</b> | <b>Solución Ideal</b> |
| Buen uso de la energía.            | 3                 | 3                 | 4                     |
| Seguridad.                         | 3                 | 3                 | 4                     |
| Rapidez.                           | 2                 | 3                 | 4                     |
| Estabilidad                        | 2                 | 3                 | 4                     |
| Robustez                           | 1                 | 3                 | 4                     |
| Manipulación                       | 1                 | 3                 | 4                     |
| Confiabilidad                      | 2                 | 3                 | 4                     |
| Facilidad de manejo                | 2                 | 3                 | 4                     |
| Transportabilidad                  | 3                 | 3                 | 4                     |
| Calidad de trabajo                 | 2                 | 3                 | 4                     |
| Fácil instalación                  | 2                 | 3                 | 4                     |
| Numero de piezas                   | 1                 | 3                 | 4                     |
| Productividad                      | 2                 | 3                 | 4                     |
| Costos de la tecnología            | 3                 | 3                 | 4                     |
| Numero de operarios                | 3                 | 3                 | 4                     |
| Facilidad de montaje               | 2                 | 3                 | 4                     |
| Fácil mantenimiento                | 3                 | 3                 | 4                     |
| Costo de operación                 | 3                 | 3                 | 4                     |
| <b>TOTAL</b>                       | <b>40</b>         | <b>54</b>         | <b>72</b>             |

- Escoger los materiales.
- Completar los conceptos de solución.
- Determinar los procesos de fabricación.
- Configurar todas las piezas y sus uniones.
- Determinar los circuitos eléctricos de potencia.
- Determinar la estrategia de control para la automatización del sistema.
- Determinar los circuitos eléctricos y electrónicos de control.
- Determinar y seleccionar el lenguaje de programación del sistema.
- Determinar los grupos constructivos.
- Determinar las piezas a adquirir.
- Analizar los puntos débiles.
- Evaluar y escoger las mejores soluciones.

También se deberán realizar los cálculos de:

- Resistencia de materiales para determinar las dimensiones de las estructuras mecánicas.
- Componentes eléctricos de potencia para terminar y seleccionar los actuadores.
- Circuitos electrónicos.
- Desarrollo aproximado del modelo de control y automatización.

Una vez alcanzado este punto, es posible representar una estructura aproximada a través de un bosquejo a mano alzada del proyecto preliminar; es posible obtener o estimar los datos de factores que influyen en los costos de fabricación, para así poder practicar un análisis técnico económico de las alternativas. A continuación, se presentan las formas de realizar las evaluaciones utilizando la recomendación VDI 2225.

En los Cuadros 4.6 y 4.7, se establecieron criterios de evaluación tanto técnicos como económicos, sin embargo al momento de escoger dichos criterios, no se les puede dar el mismo peso ya que tienen distintos niveles de importancia en el proyecto.

De acuerdo a Nassir Sapag Chain [38], se debe asignar valores ponderados de peso relativo de acuerdo a la importancia que se les atribuye, un método para determinar de forma apropiada la ponderación es la utilización de la Matriz de Enfrentamiento o Matriz de selección, la cual es una herramienta para tomar decisiones y asignar prioridades a problemas, tareas u otras opciones posibles.

En los Cuadros 4.8 y 4.9 se puede apreciar las Matrices de enfrentamiento de las propiedades técnicas y económicas respectivamente.

Empleando el Método cualitativo por puntos, podemos asignar una calificación con valores ponderados de peso, de este modo podemos seleccionar las alternativas que sumen el mayor puntaje de las calificaciones ponderadas, el resultado del análisis se muestra en los los Cuadros 4.10 y 4.11; los máximos resultados se resaltan en el Cuadro 4.12.

Es importante seleccionar la solución que presente el mejor balance entre las propiedades técnicas y económicas. En los Diagramas de Evaluación mostrados en las Figuras 4.8 y 4.9, se puede apreciar una diagonal la cual representa el balance ideal técnico-económico en el cual se encuentra la solución ideal, es por tal motivo que debemos elegir la opción mas cercana a la diagonal.

CUADRO 4.8: Matriz de enfrentamiento – Propiedades técnicas

| MATRIZ DE ENFRENTAMIENTO | Buen uso de la energía | Seguridad | Rapidez | Estabilidad | Robustez | Manipulación | Confiabilidad | Facilidad de manejo | Transportabilidad | Calidad de trabajo | Fácil instalación | Conteo | %    | Ponderación |
|--------------------------|------------------------|-----------|---------|-------------|----------|--------------|---------------|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------|------|-------------|
|                          | Buen uso de la energía | -         | 0       | 0           | 0        | 0            | 0             | 0                   | 0                 | 0                  | 0                 | 0      | 0    | 0           |
| Seguridad                | 1                      | -         | 1       | 1           | 1        | 1            | 1             | 1                   | 1                 | 1                  | 1                 | 10     | 23.8 | 24          |
| Rapidez                  | 1                      | 0         | -       | 0           | 0        | 1            | 0             | 1                   | 1                 | 0                  | 1                 | 5      | 11.9 | 12          |
| Estabilidad              | 1                      | 0         | 0       | -           | 1        | 1            | 0             | 0                   | 0                 | 0                  | 1                 | 4      | 9.52 | 9.5         |
| Robustez                 | 1                      | 0         | 0       | 0           | -        | 1            | 0             | 1                   | 1                 | 0                  | 0                 | 4      | 9.52 | 9.5         |
| Manipulación             | 0                      | 0         | 0       | 0           | 0        | -            | 0             | 0                   | 0                 | 0                  | 1                 | 1      | 2.38 | 2.4         |
| Confiabilidad            | 1                      | 0         | 1       | 1           | 1        | 1            | -             | 1                   | 1                 | 1                  | 1                 | 9      | 21.4 | 21          |
| Facilidad de manejo      | 1                      | 0         | 0       | 0           | 0        | 0            | 0             | -                   | 1                 | 0                  | 0                 | 2      | 4.76 | 4.8         |
| Transportabilidad        | 1                      | 0         | 0       | 0           | 0        | 0            | 0             | 0                   | -                 | 0                  | 0                 | 1      | 2.38 | 2.4         |
| Calidad de trabajo       | 1                      | 0         | 0       | 0           | 0        | 0            | 0             | 1                   | 1                 | -                  | 1                 | 4      | 9.52 | 9.5         |
| Facil instalación        | 1                      | 0         | 0       | 0           | 0        | 0            | 0             | 0                   | 1                 | 0                  | -                 | 2      | 4.76 | 4.8         |
| TOTAL                    |                        |           |         |             |          |              |               |                     |                   |                    |                   | 42     | 100  | 100         |

CUADRO 4.9: Matriz de enfrentamiento – Propiedades económicas

| MATRIZ DE ENFRENTAMIENTO | Número de piezas | Productividad | Costos de la tecnología | Número de operarios | Facilidad de montaje | Fácil mantenimiento | Costo de operación | Conteo | %    | Ponderación |
|--------------------------|------------------|---------------|-------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------|------|-------------|
|                          | Número de piezas | -             | 0                       | 1                   | 0                    | 1                   | 0                  | 0      | 2    | 12.5        |
| Productividad            | 1                | -             | 1                       | 1                   | 1                    | 1                   | 1                  | 6      | 37.5 | 38          |
| Costos de la tecnología  | 1                | 0             | -                       | 0                   | 1                    | 0                   | 0                  | 2      | 12.5 | 13          |
| Número de operarios      | 1                | 0             | 0                       | -                   | 1                    | 1                   | 1                  | 4      | 25   | 25          |
| Facilidad de montaje     | 0                | 0             | 0                       | 0                   | -                    | 0                   | 0                  | 0      | 0    | 0           |
| Fácil mantenimiento      | 0                | 0             | 1                       | 0                   | 0                    | -                   | 0                  | 1      | 6.25 | 6.3         |
| Costo de operación       | 0                | 0             | 1                       | 0                   | 0                    | 0                   | -                  | 1      | 6.25 | 6.3         |
| TOTAL                    |                  |               |                         |                     |                      |                     |                    | 16     | 100  | 100         |

CUADRO 4.10: Evaluación del proyecto preliminar - Propiedades técnicas

| PROPIEDAD TÉCNICA      | Pond | DOMINIO DE LA VISIÓN |       |            |       |                |       | DOMINIO DEL CONTROL |       |            |       |                |       |
|------------------------|------|----------------------|-------|------------|-------|----------------|-------|---------------------|-------|------------|-------|----------------|-------|
|                        |      | Solución 1           |       | Solución 2 |       | Solución ideal |       | Solución 1          |       | Solución 2 |       | Solución ideal |       |
|                        |      | Calific.             | Punt. | Calif.     | Punt. | Calific.       | Punt. | Calific.            | Punt. | Calific.   | Punt. | Calific.       | Punt. |
| Buen uso de la energía | 0    | 3                    | 0     | 3          | 0     | 4              | 0     | 3                   | 0     | 3          | 0     | 4              | 0     |
| Seguridad              | 24   | 1                    | 23.8  | 3          | 71.43 | 4              | 95.25 | 3                   | 71.43 | 3          | 71.43 | 4              | 95.24 |
| Rapidez                | 12   | 1                    | 11.9  | 3          | 35.71 | 4              | 47.62 | 2                   | 23.81 | 3          | 35.71 | 4              | 47.62 |
| Estabilidad            | 9.5  | 2                    | 19    | 3          | 28.57 | 4              | 38.1  | 2                   | 19.05 | 3          | 28.57 | 4              | 38.1  |
| Robustez               | 9.5  | 2                    | 19    | 3          | 28.57 | 4              | 38.1  | 1                   | 9.52  | 3          | 28.57 | 4              | 38.1  |
| Manipulación           | 2.4  | 1                    | 2.38  | 2          | 4.76  | 4              | 9.52  | 1                   | 2.38  | 3          | 7.14  | 4              | 9.52  |
| Confiabilidad          | 21   | 2                    | 42.9  | 3          | 64.29 | 4              | 85.71 | 2                   | 42.86 | 3          | 64.29 | 4              | 85.71 |
| Facilidad de manejo    | 4.8  | 1                    | 4.76  | 2          | 9.52  | 4              | 19.05 | 2                   | 9.52  | 3          | 14.29 | 4              | 19.05 |
| Transportabilidad      | 2.4  | 3                    | 7.14  | 3          | 7.14  | 4              | 9.52  | 3                   | 7.14  | 3          | 7.14  | 4              | 9.52  |
| Calidad de trabajo     | 9.5  | 2                    | 19    | 3          | 28.57 | 4              | 38.1  | 2                   | 19.05 | 3          | 28.57 | 4              | 38.1  |
| Fácil instalación      | 4.8  | 3                    | 14.3  | 3          | 14.29 | 4              | 19.05 | 2                   | 9.52  | 3          | 14.29 | 4              | 19.05 |
| TOTAL                  |      | 164                  |       | 292.9      |       | 400            |       | 214.3               |       | 300        |       | 400            |       |

CUADRO 4.11: Evaluación del proyecto preliminar - Propiedades económicas

| PROPIEDAD TECNICA       | Pond | DOMINIO DE LA VISIÓN |       |            |       |                |       | DOMINIO DEL CONTROL |       |            |       |                |       |
|-------------------------|------|----------------------|-------|------------|-------|----------------|-------|---------------------|-------|------------|-------|----------------|-------|
|                         |      | Solución 1           |       | Solución 2 |       | Solución ideal |       | Solución 1          |       | Solución 2 |       | Solución ideal |       |
|                         |      | Calific.             | Punt. | Calif.     | Punt. | Calific.       | Punt. | Calific.            | Punt. | Calific.   | Punt. | Calific.       | Punt. |
| Número de piezas        | 12.5 | 2                    | 25    | 3          | 0     | 4              | 37.5  | 1                   | 12.5  | 3          | 37.5  | 4              | 50    |
| Productividad           | 37.5 | 3                    | 112.5 | 2          | 71.43 | 4              | 75    | 2                   | 75    | 3          | 112.5 | 4              | 150   |
| Costos de la tecnología | 12.5 | 2                    | 25    | 3          | 35.71 | 4              | 37.5  | 3                   | 37.5  | 3          | 37.5  | 4              | 50    |
| Número de operarios     | 25   | 3                    | 75    | 2          | 28.57 | 4              | 50    | 3                   | 75    | 3          | 75    | 4              | 100   |
| Facilidad de montaje    | 0    | 3                    | 0     | 3          | 28.57 | 4              | 0     | 2                   | 0     | 3          | 0     | 4              | 0     |
| Fácil mantenimiento     | 6.25 | 1                    | 6.25  | 3          | 4.76  | 4              | 18.75 | 3                   | 18.75 | 3          | 18.75 | 4              | 25    |
| Costo de operación      | 6.25 | 3                    | 18.75 | 3          | 64.29 | 4              | 18.75 | 3                   | 18.75 | 3          | 18.75 | 4              | 25    |
| TOTAL                   |      |                      | 262.5 |            | 237.5 |                | 400   |                     | 237.5 |            | 300   |                | 400   |

CUADRO 4.12: Balance técnico – económico del proyecto preliminar

|                | DOMINIO DE LA VISIÓN |                 | DOMINIO DEL CONTROL |                 |
|----------------|----------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|                | Prop. técnica        | Prop. económica | Prop. Técnica       | Prop. Económica |
| Solución 1     | 164                  | 262.5           | 214.3               | 237.5           |
| Solución 2     | 292.9                | 237.5           | 300                 | 300             |
| Solucion ideal | 400                  | 400             | 400                 | 400             |

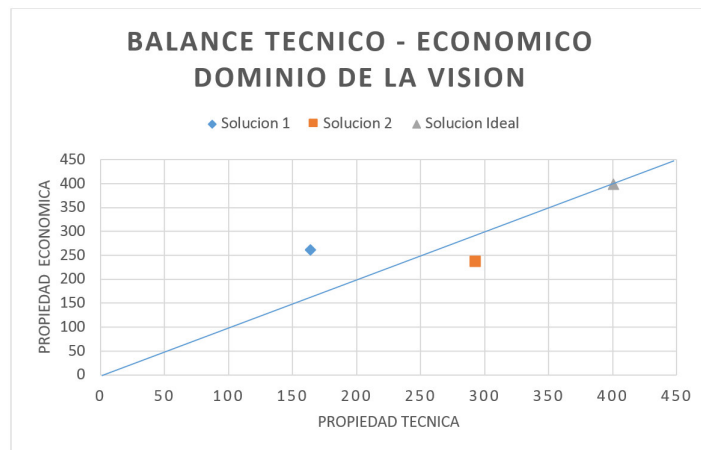


FIGURA 4.8: Balance técnico – económico del dominio de la visión

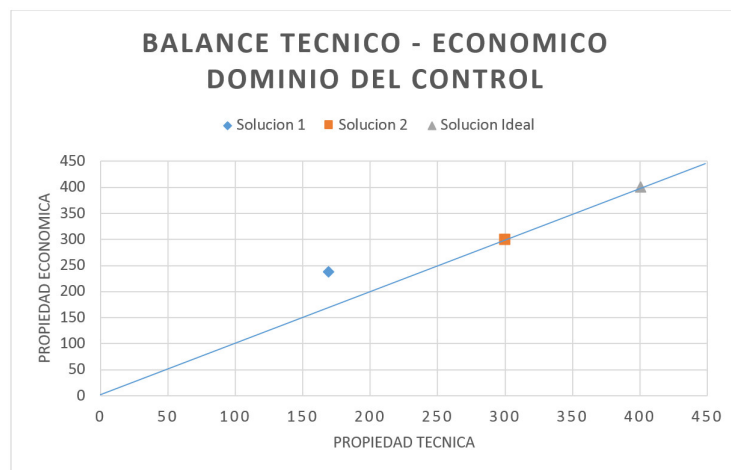


FIGURA 4.9: Balance técnico – económico del dominio del control

### 4.2.1. Comprensión del dominio mecánico

En esta etapa de la investigación se da una formalidad matemática a los modelos matemáticos del dominio mecánico, esta formalidad permite determinar de cuánto tiempo disponemos para procesar una Chirimoya y así conocer si el procesador seleccionado es el adecuado. El diseño de la parte mecánica mostrada en la Figura 4.10, no es motivo de estudio en esta investigación, sin embargo existen variables resaltantes son indicadas en el Cuadro 4.13.

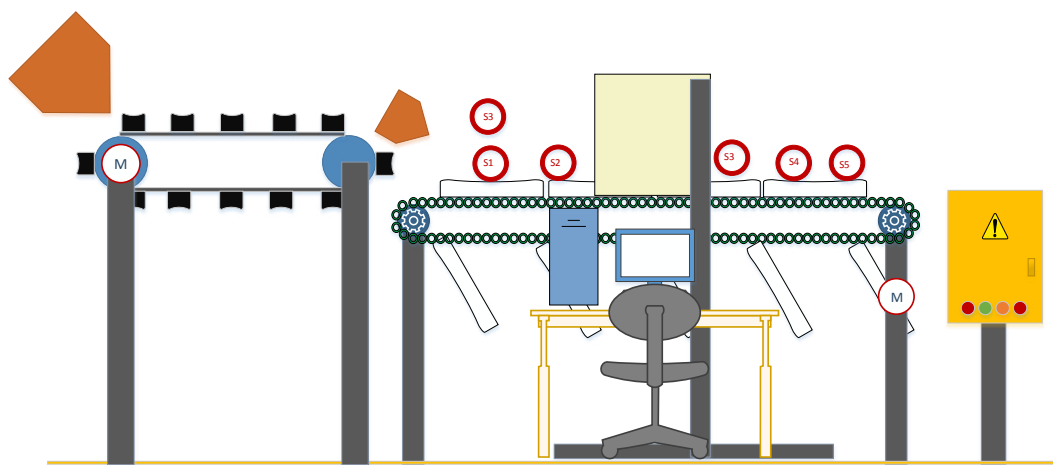


FIGURA 4.10: Bosquejo del dominio mecánico

CUADRO 4.13: Requerimientos del dominio mecánico

| VARIABLE | REQUERIMIENTO    | DESCRIPCIÓN   |
|----------|------------------|---|
| Qty      | 15000 Chirimoyas | Cantidad mínima de Chirimoyas necesarias a procesar por día |
| Mchiri   | 0.5 kg           | Masa promedio de una Chirimoya                              |
| Vc       | 0.33 m/s         | Velocidad del Transportador                                 |
| e        | 1100 mm          | Longitud del Transportador                                  |
| Lcaptura | 300 mm           | Longitud de la zona de Captura                              |
| -        | 600 mm           | Ancho de la maquina   |
| -        | 200 mm           | Diámetro de la bandeja                                      |

La parte mecánica consta de un dosificador mediante cangilones horizontales para que luego las chirimoyas pasen a un transportador de bandejas horizontales, 05 sensores se ubicarán a lo largo del transportador como se aprecia en la Figura 4.11. Las bandejas se mueven a una velocidad constante  $V_c$ , siendo la longitud del transportador  $e$ , una sola chirimoya tarda  $3,333s$  en pasar de un extremo a otro; utilizando el mismo análisis es posible determinar el Tiempo que tarda en pasar 01 Chirimoya a través de la zona de captura de una longitud  $L_{captura}$  de  $335mm$ , dando como resultado  $1,015s$ .

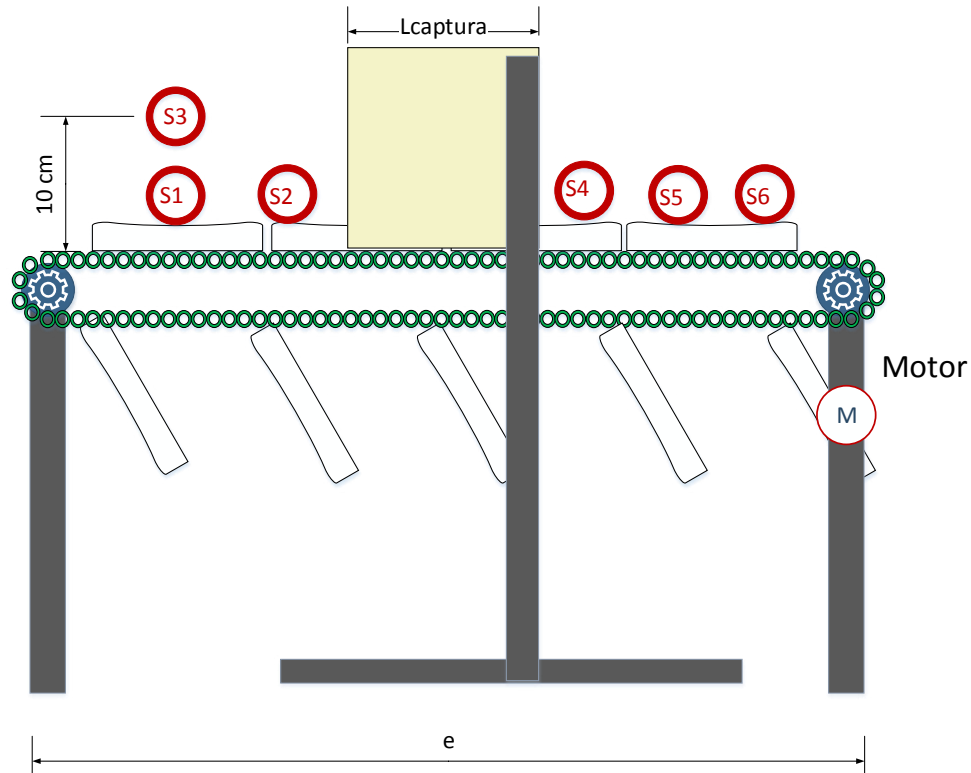


FIGURA 4.11: Detalle del cangilón con bandejas

#### 4.2.2. Selección de la cámara

La cámara seleccionada debe tener por característica ser de alta velocidad ( $> 90\text{ fps}$ ), también contar con interfaz USB 3.0 para una rápida comunicación y transmisión de datos con el Computador. Para la selección del dispositivo de Captura se consideraran 2 cálculos, el primero es Field of View (FOV) mostrado en la Figura 4.12.

El metodo utilizado en esta investigacion para determinar el FOV de una camara consiste en una estimación de los valores  $P_P$ ,  $A_P$  y  $F_L$  (Distancia entre pixeles, pixeles activados, longitud focal) respectivamente, intentando acercarse lo más posible al área de interés deseado. Dicha estimación es realizada tomando como referencia las hojas de datos de las cámaras comerciales que cumplan con las características deseadas.

Se tomaron los datos de la Camara “Flea3 FL3-U3-13S2M-CS 1/3” Monochrome USB 3.0 Camera” con sensor CMOS 1/3” Sony IMX035 el cual tiene una resolución de  $1328 \times 1048\text{ px}$ , dicha cámara con sus  $35\text{ gr}$  cuenta con  $1,3\text{ MP}$  y  $120\text{ fps}$  cuenta con una interfaz  $USB3,0$  para una rápida comunicación y transmisión de información.

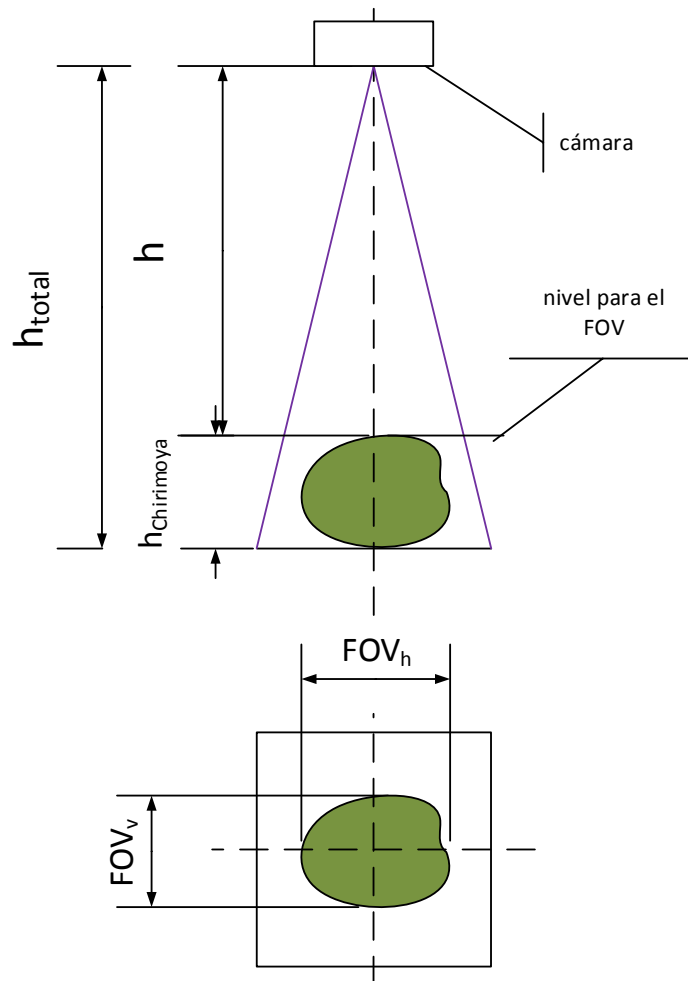


FIGURA 4.12: Field of view (FOV) [39]



FIGURA 4.13: Flea3 FL3-U3-13S2M-CS 1/3" Monochrome USB 3.0 Camera [40]

Para observar una región de interés de  $200 \times 200 \text{mm}$ . Con ayuda de la Ecuación 4.1 [41], calculamos la altura  $H$  entre el lente y el área de interés, para ello son necesarios los datos de la cámara los cuales son determinados por las variables  $P_P$ ,  $A_P$ ,  $F_L$  (Distancia entre pixeles, pixeles activados, longitud focal) respectivamente. Estimando los valores de la longitud focal, se logró obtener un FOV adecuado de  $0,263\text{m}$  y altura  $H$  de  $0,28\text{m}$  para una longitud focal  $F_L$  de  $5\text{mm}$  que indica el lente genérico mostrado en la Figura 4.14, necesario para nuestro objetivo.

$$FOV = \frac{P_P \times A_P \times H}{F_L} \quad (4.1)$$



FIGURA 4.14: Varifocal CS mount lens 3.5-8mm F1.2 CCTV

El siguiente calculo a efectuar determina el Tiempo de Exposición, este análisis asegura de que la imagen no quede distorsionada al ser capturada en movimiento, para este analisis tomaremos como referencia la imagen 4.15

Empleando la Ecuación 4.2 [42], determinaremos el Tiempo de Exposición, es decir el tiempo que el sensor tarda en capturar 1 imagen para objetos en movimiento, para la velocidad de la faja  $V$  de  $300\text{mm/s}$ , Pixels activos mínimos  $B$  con un valor de  $240\text{px}$ , y un Máximo Desenfoque permitido  $D$  de  $4\text{px}$ , obtenemos un Tiempo de exposición  $T$  de  $13,33\text{ms}$ .

$$T = \frac{D}{\frac{B}{FOV} V} \quad (4.2)$$

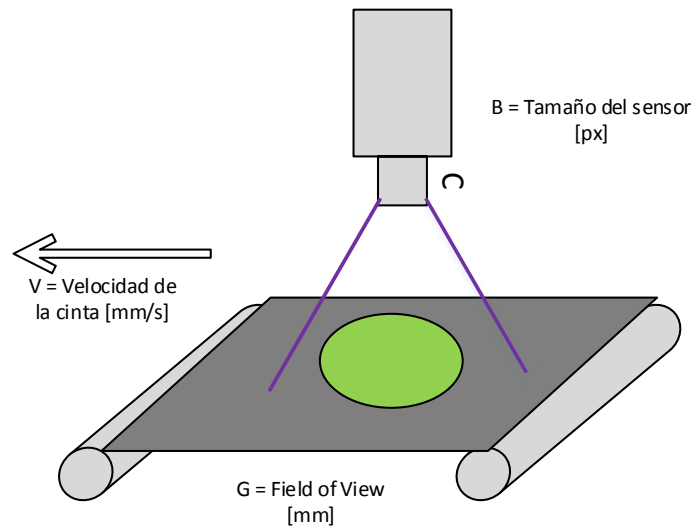


FIGURA 4.15: Tiempo de exposición [42]

### 4.2.3. Selección de la iluminación

El objetivo de la iluminación es mejorar el contraste entre el objeto capturado y el fondo para así poder facilitar la segmentación presente durante el proceso de Visión Artificial, la iluminación estará dispuesta en forma frontal oblicua y direccional en anillo como se muestra en la Figura 4.16.

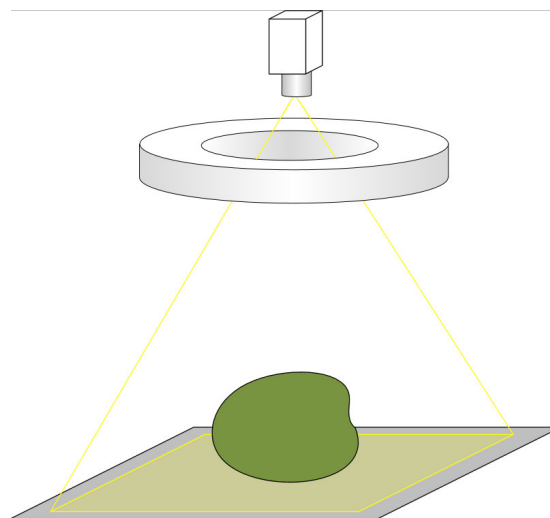


FIGURA 4.16: Iluminación frontal oblicua y direccional en anillo

Es necesario determinar la cantidad de iluminación necesaria en la zona de captura, asimismo la cantidad de luminarias utilizadas, la altura de iluminación  $r$  será de  $0,28m$ , el color de la iluminación blanca para asegurar un buen contraste entre el fondo y las

Chirimoyas, la tensión de energía será de  $12VDC$ . La iluminancia recomendada según [43], para trabajos con color y pruebas  $E$  es de  $1000lx$ . Para determinar la cantidad de luminarias según [44], hallamos el ángulo sólido  $\Omega_1$  para un cono con la Ecuación 4.3, donde el ángulo de vista de la luminaria  $\gamma_1$  es  $120^\circ$  y  $\Omega_0$  con valor de  $1sr$ , el resultado es un ángulo solido de  $3,142sr$ ; el flujo luminoso  $I$  fue calculado utilizando la Ecuación 4.4 en la cual el valor de  $\gamma_2$  es  $0^\circ$ , por ser un plano perpendicular a la fuente de Iluminación.

$$\Omega_1 = 2\pi(1 - \cos(\gamma_1))\Omega_0 \quad (4.3)$$

$$I = \frac{Er^2}{\Omega_0\gamma_1\cos(\gamma_2)} \quad (4.4)$$

Finalmente la Ecuación 4.5 indica la cantidad de iluminación necesaria en lúmenes, siendo  $\Phi$  con un valor de  $235,2lm$ . Dicho requerimiento de Intensidad de Iluminación pueden ser cubiertos utilizando como mínimo 04 luminarias de  $60lm$  cada una.

$$\Phi = I\Omega_1 \quad (4.5)$$

También es importante estimar la sombra proyectada [45] debido a la posición de las luminarias a una altura  $h$ , para efectos prácticos modelamos la Chirimoya como un elipsoide y analizaremos los efectos que ocasiona una fuente de luz T, que genera una iluminación que entrara por el lado redondeado paralelo y opuesto a dicha fuente tal como se muestra en la Figura 4.17, luego se analizaran los efectos producidos por la iluminación que entrara por el lado redondeado paralelo a la fuente T como se muestra en la Figura 4.18.

Los valores de las variables referentes a las proporciones geométricas de la chirimoya modelada fue obtenida experimentalmente, para  $X1$  con un valor de  $50mm$ ,  $Y1$  es  $95mm$ ,  $a$  tiene un valor de  $70mm$ , empleando la semejanza de triángulos en ambos casos e igualando sus ecuaciones, es posible despejar la sombras  $S1$  para la Figura 4.17 como se muestra en la Ecuación 4.6, para nuestro caso, la sombra  $S1$  mide  $82,162mm$ .

$$S1 = (X1 + a + d)\left(\left(\frac{h}{h - Y1}\right) - 1\right) \quad (4.6)$$

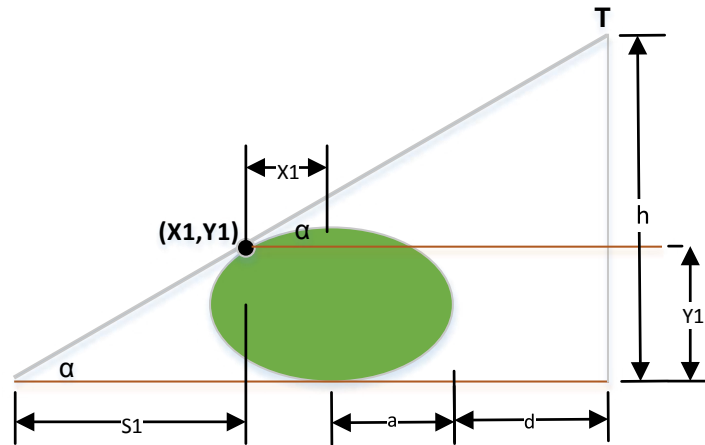


FIGURA 4.17: Sombra proyectada en paralela opuesta

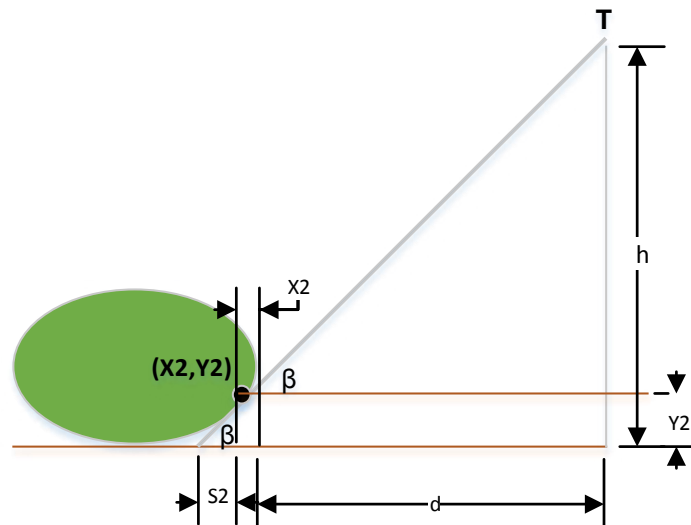


FIGURA 4.18: Sombra proyectada en paralela

De forma análoga para la Figura 4.18, podemos estimar la sombra proyectada  $S_2$  utilizando la Ecuación 4.7, los valores  $d, X_2, Y_2$  son  $4mm, 50mm$  y  $95mm$  respectivamente, la sombra  $S_2$  tiene un valor de  $46,216mm$ .

$$S_2 = (X_2 + d) \left( \left( \frac{h}{h - Y_2} \right) - 1 \right) \tag{4.7}$$

Usando esta idea, se decidió utilizar 06 luminarias LED de  $40lm$  de tal forma que la imagen sea correctamente iluminada. La simetría garantiza que la Chirimoya no tenga puntos sin ser iluminados, si se tiene en cuenta el efecto de la luz opuesta, el efecto de

la sombra es atenuada lo suficiente como para descartar errores considerables durante la medición.

#### 4.2.4. Selección de los sensores

Son necesarios 06 sensores dispuestos a lo largo del Transportador de chimimoyas dispuestas como se muestra en la Figura 4.19, de tal manera que:

- S1,S2 : Sensores encargados de enviar la señal de *Trigger* de la cámara.
- S3 : Sensor ubicado a  $10cm$  de la base de las chimimoyas, cuya función es la de detectar chimimoyas con alturas mayores a la del sensor.
- S4: Habilita interrupción para sensores S5,S6
- S5,S6: Sensores encargados de enviar una señal para que los actuadores neumáticos se activen.

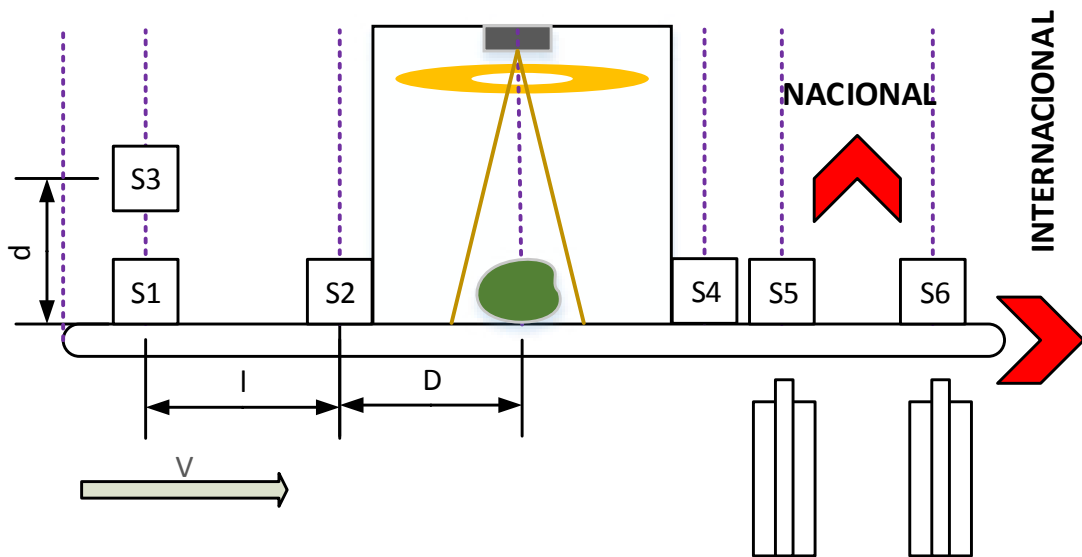


FIGURA 4.19: Disposición de los sensores

Como el ancho de la zona de captura tiene un ancho de  $300mm$ , requerimos un sensor óptico tipo barrera, capaz de detectar presencia en distancias menores a  $200mm$ , por tal motivo seleccionamos el sensor *OPTEX ZT-L3000N*, capaz de detectar de  $30mm$  a  $30m$ , sus especificaciones técnicas se encuentran detalladas en el Cuadro 4.14.

CUADRO 4.14: Especificaciones *OPTEX ZT-L3000N*

| <b>OPTEX ZT-L3000N</b> |                        |
|------------------------|------------------------|
| Tipo de Cable          | NPN                    |
| Voltaje                | DC 10-30               |
| Consumo de corriente   | 30mA max.              |
| Distancia de detección | 30mm -30 m             |
| Tamaño del haz de luz  | 30 mm/30m              |
| Tiempo de respuesta    | 0.25ms                 |
| Histéresis             | -                      |
| Temp. de trabajo       | -10°C +70°C            |
| Humedad                | 35 % 85 %              |
| Vibración              | 10 - 55 Hz ancho 1.5mm |
| Golpe                  | 500 m/s <sup>2</sup>   |
| Grado de protección    | IP 67                  |
| Emisor                 | Láser                  |
| Clase de láser         | Clase 1                |
| Salida de indicación   | LED                    |
| Ajuste de sensibilidad | 1 vuelta               |
| Conexión               | 2 m cable              |

#### 4.2.5. Programación del procesador

La plataforma elegida para la programación del procesador fue *Python 2.7* con ayuda de la librería *OpenCV*, *Numpy*, *Pyfly2*, *Serial*, *time* y *datetime*, el diagrama de flujo utilizado se muestra en la Figura 4.21, mientras que los algoritmos utilizados en los diferentes niveles de procesamiento se encuentran detallados en el Cuadro 4.15.

Fue necesario realizar un ajuste en el contraste empleando una función lineal para poder segmentar con facilidad la imagen utilizando un umbral de 0 a 120, el resultado de la imagen después de realizar los procesos de *apertura* y *cierre* (con una matriz de 5x5) es una imagen más simplificada y menos detallada que la original. Los valores de umbral y de apertura y cierre fueron determinados experimentalmente hasta lograr el mejor resultado.

La operación de *circularidad* o también llamado *coeficiente isoperimétrico*, esta determinado por la Ecuación 4.8, da como resultado un valor numérico, siendo 1 la circularidad de un círculo, permitirá determinar que tan circular es la imagen medida, esto para impedir que el sistema realice mediciones a imágenes que no parezcan pertenecer a una chirimoya.

$$A_r = \frac{4 \times \pi \times Area}{Perimetro^2} \quad (4.8)$$

El Algoritmo de Medición se explica en la Figura 4.20, consiste en determinar el centro geométrico  $CG$  de la chirimoya umbralizada, a continuación se ubica geoméricamente el punto  $A$  al punto  $B$  siendo este el más alejado del centro geométrico  $CG$ , finalmente se ubica geoméricamente el punto  $B$  más alejado del punto  $A$ . De esta manera el vector  $Trazo2$ , garantiza obtener siempre la máxima longitud en la imagen capturada. Una vez conocida la distancia máxima, se compara con un patrón establecido para luego poder clasificar las chirimoyas.

En la Figura 4.21, se puede observar el Diagrama de Flujo de la programación del Procesador, mas el código se encuentra en el *Apéndice ??* del presente documento.

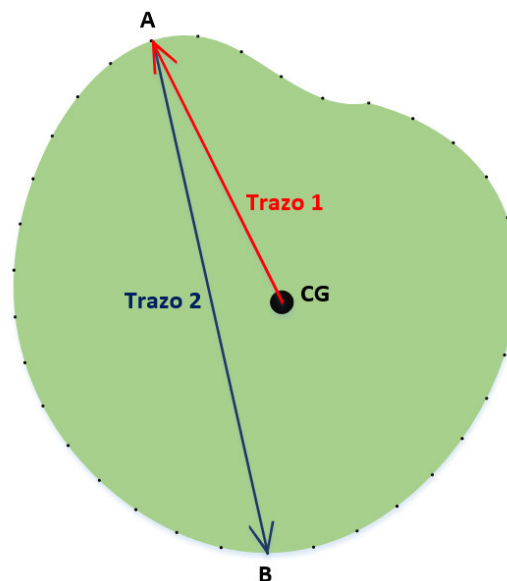


FIGURA 4.20: Algoritmo de medición

#### 4.2.6. Selección del procesador

Para definir un procesador, debemos asegurar que el tiempo de procesamiento sea mínimo, para este fin, se empleó un método experimental el cual consiste en probar el código diseñado, en un computador con los requerimientos mostrados en la Figura 4.22 y contrastar el tiempo que tarda en realizarse el procesamiento de imágenes

CUADRO 4.15: Algoritmos empleados en el procesamiento de imágenes

|                                      |
|--------------------------------------|
| <b>Preprocesamiento</b>              |
| Ajuste de Contraste                  |
| <b>Segmentación</b>                  |
| Umbralización                        |
| Cierre & Apertura                    |
| Código cadena                        |
| <b>Extracción de Características</b> |
| Centroide                            |
| Circularidad                         |
| Algoritmo de Medición                |
| <b>Clasificación</b>                 |
| Comparación                          |

(*t*<sub>procesamiento</sub>) frente al tiempo máximo el cual una chirimoya tarda en pasar la zona de captura (1,015s), es decir, *t*<sub>procesamiento</sub> < 1,015s como se puede confirmar en la Figura 4.23.

#### 4.2.7. Selección del controlador

Se requiere un Controlador Logico Programable (PLC) que cuente con al menos 18 Entradas y 8 Salidas digitales, las cuales son detalladas en el Cuadro 4.16, además el controlador debe poseer una interfaz de comunicación USB 2.0. En el mercado se pudo encontrar el controlador *M-DUINO PLC Arduino 42 I/Os Analog/Digital* [46] mostrado en la Figura 4.25, una propuesta industrial que apuesta por la tecnología *Open Source* empleando plataformas *Arduino*.

Para determinar el instante adecuado para realizar la captura de imagen se vio por conveniente emplear un algoritmo de estimación de tiempo de captura aprovechando la condición de velocidad constante como se muestra en la Ecuación 4.9, para lo cual se considera de la Figura 4.24.

$$t_3 = \frac{D}{l} \frac{1}{t_2 - t_1} \quad (4.9)$$

Donde *l* es la distancia desde la primera columna de sensores *S1*, *S3* hasta el sensor *S2*, la variable *D* es la distancia necesaria desde el sensor *S2* hasta el centro de la zona de captura.

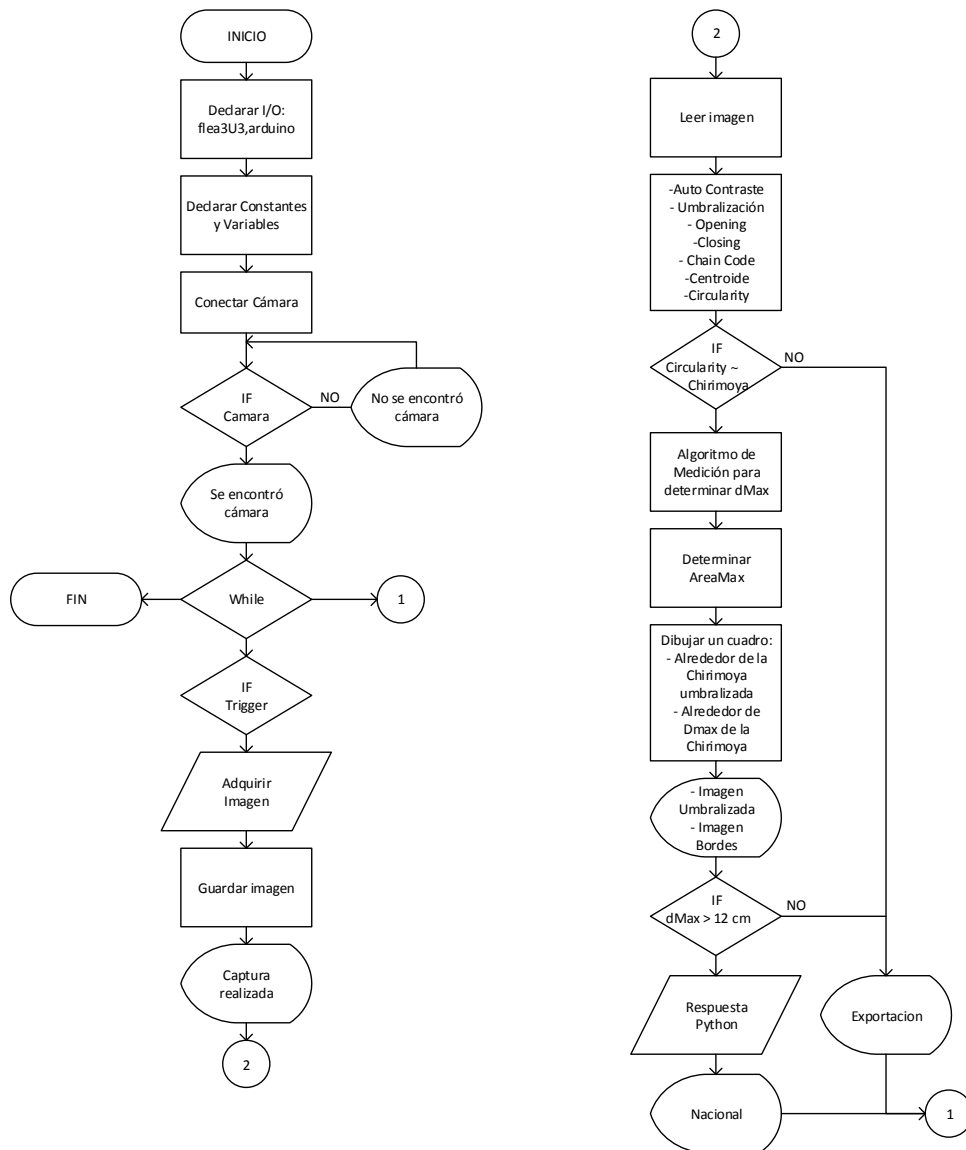


FIGURA 4.21: Diagrama de flujo del procesador

System

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Rating:                 | <b>5.9</b> Windows Experience Index                 |
| Processor:              | Intel(R) Core(TM) i7-3770K CPU @ 3.50GHz 3.50 GHz   |
| Installed memory (RAM): | 16.0 GB (3.46 GB usable)                            |
| System type:            | 32-bit Operating System                             |
| Pen and Touch:          | No Pen or Touch Input is available for this Display |

FIGURA 4.22: Especificaciones del procesador

```

Python 2.7.9 (default, Dec 10 2014, 12:24:55) [MSC v.1500 32 bit (Intel)] on win
32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> ===== RESTART =====
>>>
Inicio del procesamiento
2015-11-30 16:49:38.266
Fin del Procesamiento
2015-11-30 16:49:38.380
    
```

FIGURA 4.23: Tiempo requerido para realizar el procesamiento

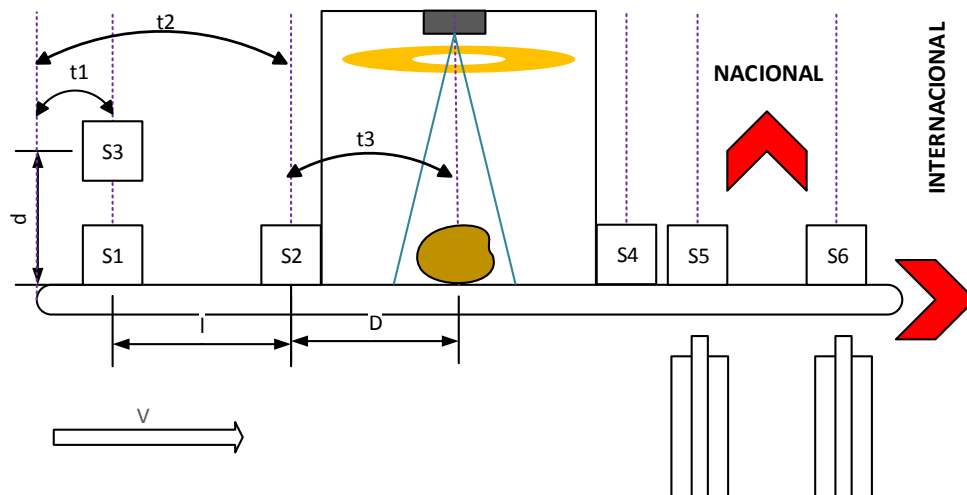


FIGURA 4.24: Diagrama de flujo del procesador



FIGURA 4.25: M-DUINO PLC Arduino 42 I/Os Analog/Digital [46].

CUADRO 4.16: Cantidad de entradas y salidas del controlador

| I/O | DEFINICIÓN                | CANTIDAD |
|-----|---------------------------|----------|
| I   | Sensor <i>Trigger</i>     | 2        |
| I   | Sensor altura             | 1        |
| I   | Sensor Actuadores         | 1        |
| I   | Sensor Actuador Pistón 1  | 1        |
| I   | Sensor Actuador Pistón 2  | 1        |
| I   | Sensor Pistón 1 Retraído  | 1        |
| I   | Sensor Pistón 1 Extendido | 1        |
| I   | Sensor Pistón 2 Retraído  | 1        |
| I   | Sensor Pistón 2 Extendido | 1        |
| I   | Switch AUTO/SEMI          | 2        |
| I   | Botón Start               | 2        |
| I   | Botón Stop                | 2        |
| I   | Botón Emergencia          | 1        |
| I   | Botón Motor1              | 1        |
| I   | Botón Motor2              | 1        |
| I   | Botón Pistón1             | 1        |
| I   | Botón Pistón2             | 1        |
| O   | Motor 1 ON                | 1        |
| O   | Motor 2 ON                | 1        |
| O   | Solenoide                 | 2        |
| O   | Baliza ON/OFF             | 1        |
| O   | Baliza AUTO/SEMI          | 1        |
| O   | Baliza Emergencia         | 1        |

#### 4.2.8. Programación del controlador

La programación del Controlador fue realizado empleando el lenguaje propio *Arduino* con ayuda de la librería *Timer.h*, basado en el lenguaje de alto nivel *Processing* el cual es similar a C++. En la Figura 4.26, se puede observar el Diagrama de Flujo de la programación del Controlador, mas el código se encuentra en el *Apéndice ??* del presente documento.

### 4.3. Proyecto definitivo

Este es el último paso en la metodología de diseño, esta sección implica entregar al cliente las partes, métodos, diseños y cálculos desarrollados con la metodología y mostrados en el transcurso del presente capítulo. Las pruebas y resultados obtenidos se detallan en el Capítulo 5, los códigos de los programas se muestran en el Apéndice ??, los planos mecánicos y de borneras se encontrara en el Apéndice ?? y las cotizaciones se indican en el Apéndice ??.

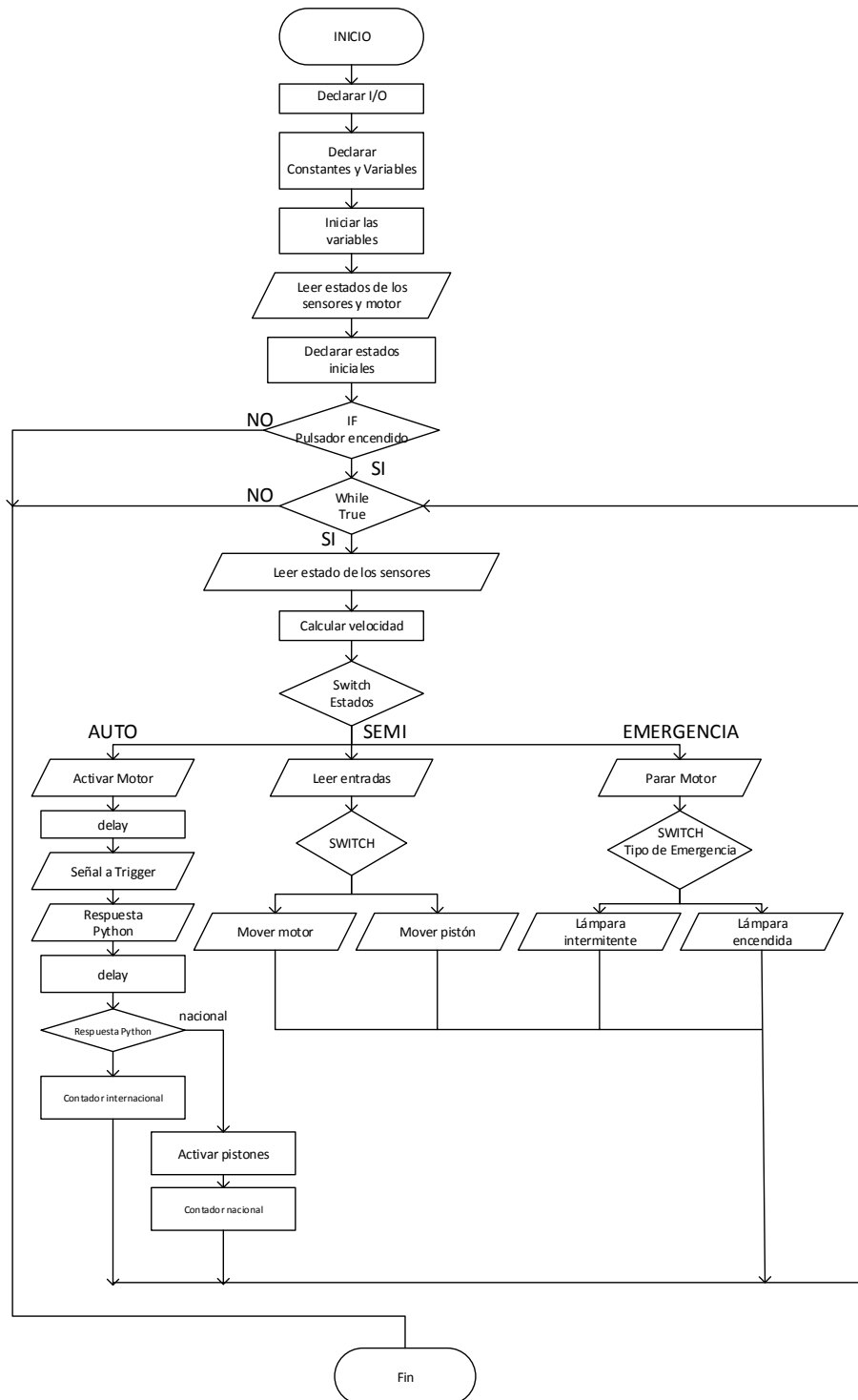


FIGURA 4.26: Diagrama de flujo del controlador

## Capítulo 5

# Pruebas y resultados

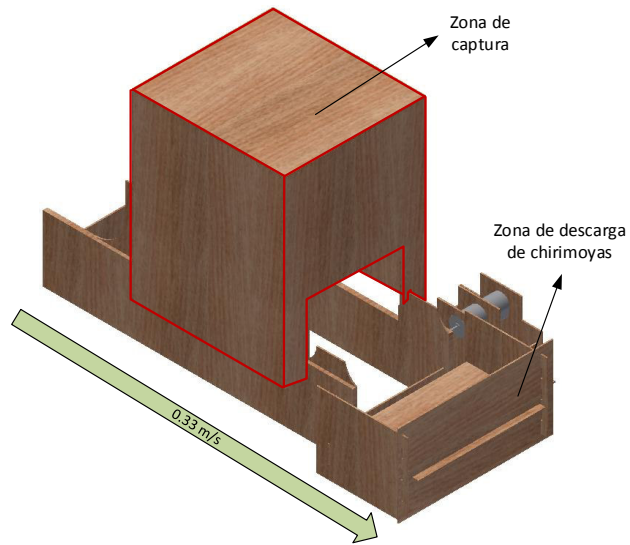
### 5.1. Banco de pruebas

Para validar los algoritmos desarrollados durante este trabajo de investigación, se vio por conveniente elaborar un Banco de pruebas a escala real. El diseño del banco de pruebas dio como resultado las Figuras 5.1a y 5.1b. Este modelo consta principalmente de una Zona de captura y una Cinta transportadora, la cual transporta las chirimoyas desde la Zona de alimentación hacia la Zona de descarga a una velocidad de  $0,33m/s$ .

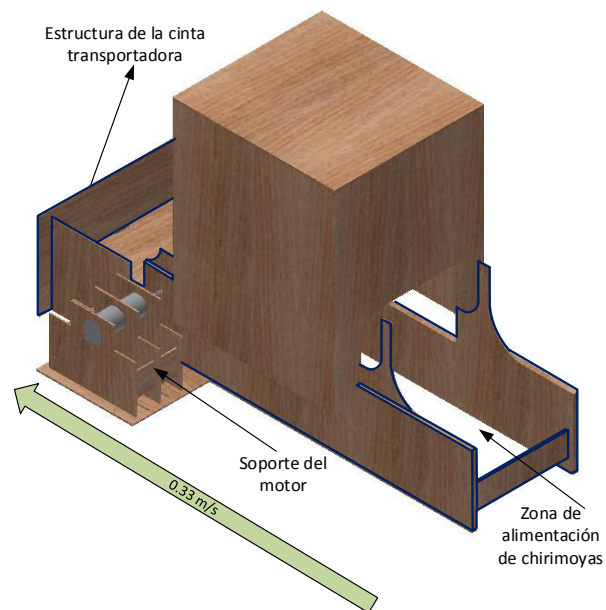
El banco fue concebido para cumplir los requerimientos mínimos explicados en el Capítulo 4; Tanto la zona de captura como la estructura de la cinta transportadora mostrado en la Figura 5.2a, están manufacturados en su mayoría con planchas de MDF de  $3mm$  contraplacadas; el motor utilizado para las pruebas se sujetó a presión en una base diseñada a medida y el acople entre el motor y el árbol encargado de transmitir energía rotacional fue construido empleando manufactura aditiva.

La estructura de la Zona de Captura, contempla un arreglo de perfiles de aluminio en  $L$ , mostrado en la Figura 5.3a que sirve de soporte interno, además de servir como soporte para la cámara y luminarias seleccionadas en el Capítulo 4.

En la Figura 5.3c se puede observar el resultado de la iluminación Frontal Oblicua y Direccional en anillo, la cual esta mostrada en la Figura 5.3b,06 luminarias LED iluminan la zona de captura para atenuar sombras no deseadas durante la captura la iluminación brindada cumple con los requerimientos estimados en el Capítulo 4;

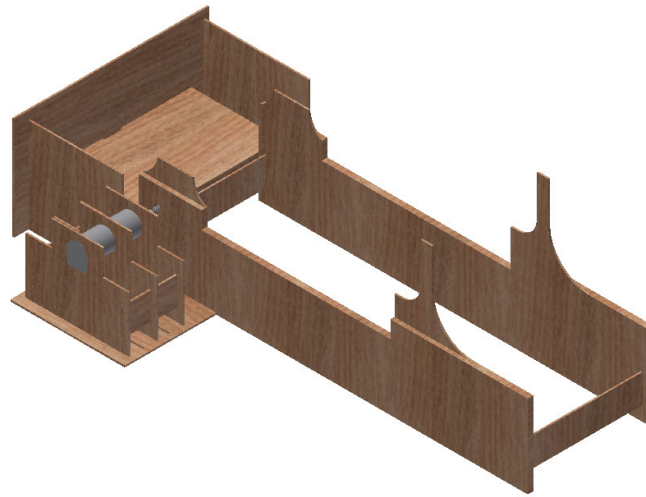


(A) Vista isométrica 1

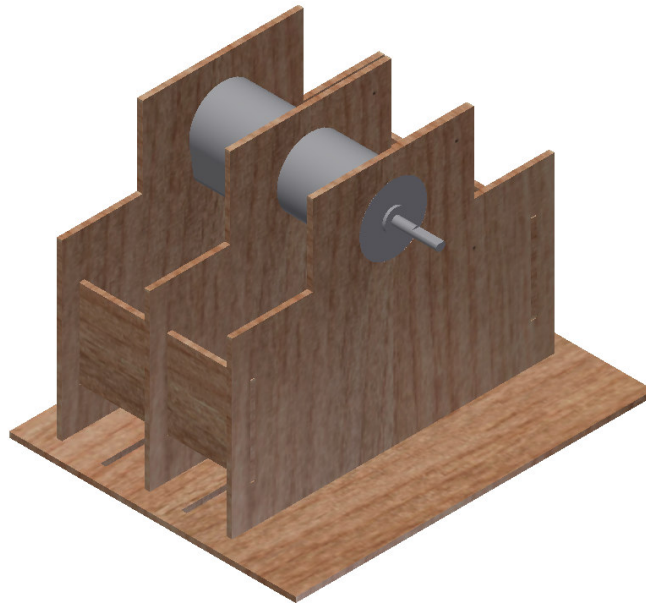


(B) Vista isométrica 2

FIGURA 5.1: Vistas isométricas del banco de pruebas



(A) Detalle de la estructura de la cinta transportadora



(B) Detalle del soporte del motor

FIGURA 5.2: Cinta transportadora

Está controlado por un PLC "M-DUINO PLC Arduino 42 I/Os Analog/Digital"[46] y un Computador es el encargado de realizar el procesamiento de imágenes las cuales son capturadas por una cámara de alta velocidad "Flea3 FL3-U3-13S2M-CS 1/3" monochrome USB 3.0 Camera, también es capaz realizar capturas de Chirimoyas en movimiento las cuales son movilizadas a 30cm/s a través de una cinta transportadora mostrada en la Figura 5.2a,

04 barreras infrarrojas led emisor - receptor de 5mm, dispuestos a lo largo del banco de prueba, simulan los sensores finales y brindan información sobre la ubicación de la

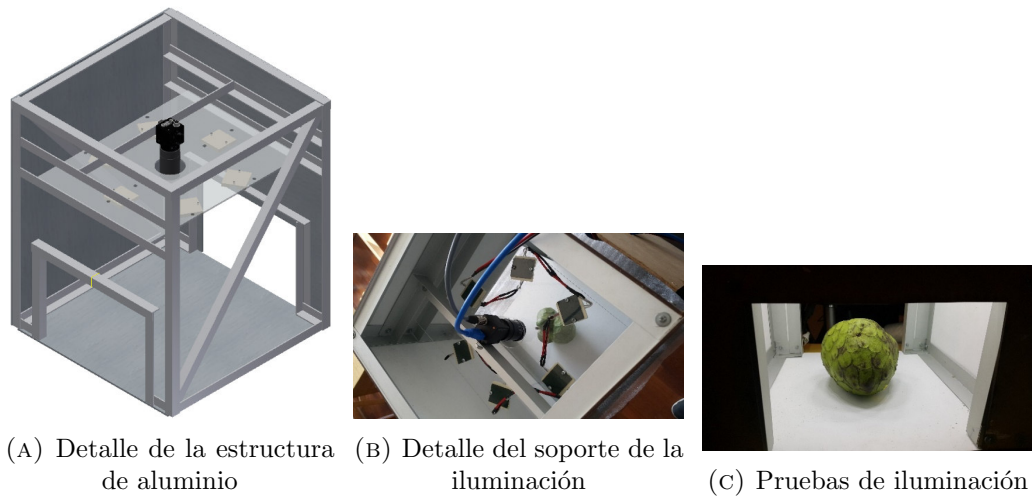


FIGURA 5.3: Zona de captura



FIGURA 5.4: Banco de pruebas implementado

chirimoya para enviar la señal de captura de imagen, 04 leds brinda información visual sobre el estado de los sensores (verde para el trigger, ambar para indicar procesamiento de imagen y rojo para una chirimoya demasiado grande).

## 5.2. Calibración

Para estimar la precisión del equipo se utilizó la plantilla con círculos color negro de diversos diámetros conocidos similares a los mostrados en la Figura 5.5 las cuales se vieron después del procesamiento de la forma ilustrada en la 5.6. Después de realizar 10 mediciones para cada uno de los 06 círculos empleados, se registraron las áreas y diámetros que se obtuvieron tras el procesamiento de imágenes indicados en los cuadros del Anexo ??, dando como resultado una desviación estándar máxima ( $SD$ ) de  $0,35mm$  para los diámetros y  $43,54mm^2$  para las áreas. Empleando el método de regresión lineal por mínimos cuadrados en los Cuadros 5.1 y 5.1, se obtuvieron para cada caso los valores de  $a$  y  $b$  para formar las funciones indicadas en las Ecuaciones 5.2 y 5.2 de la forma de la Ecuación 5.1; Las gráficas de las Figuras 5.7 y 5.8, corresponden a las ecuaciones 5.2 y 5.2 con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,99 para ambos casos.

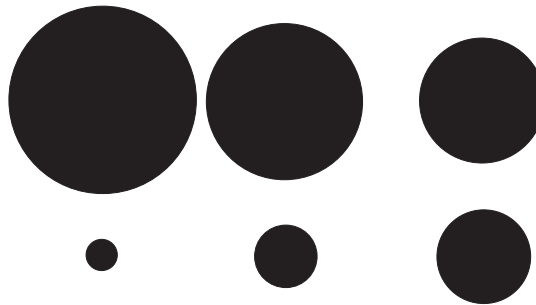


FIGURA 5.5: Plantilla de calibración

CUADRO 5.1: Regresión lineal : Diámetro

| D [mm] | D [px]  |
|--------|---------|
| 100    | 527.10  |
| 105    | 554.40  |
| 110    | 579.80  |
| 115    | 606.00  |
| 120    | 631.40  |
| 125    | 655.60  |
| a=     | -2.6909 |
| b=     | 0.1945  |

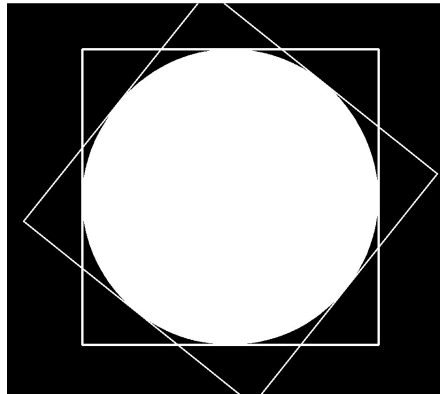


FIGURA 5.6: Circulo de calibración post-procesamiento

$$y = ax + b \tag{5.1}$$

$$y_D = 0,1945x - 2,6909 \tag{5.2}$$

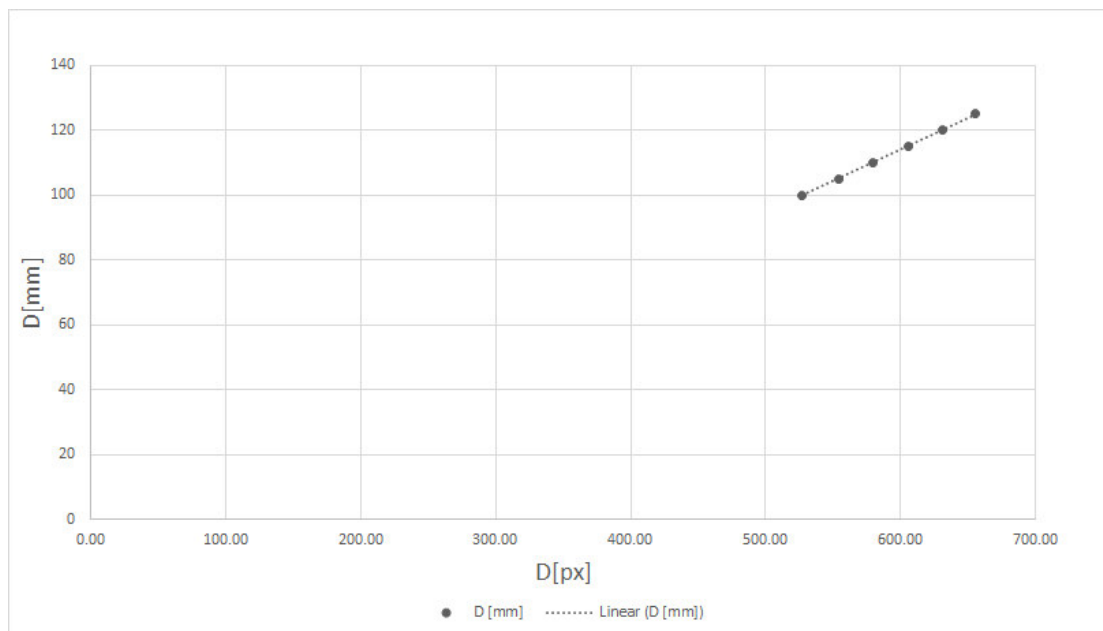


FIGURA 5.7: Regresión lineal: Diámetro

$$y_A = 0,0369x - 165,8000 \tag{5.3}$$

CUADRO 5.2: Regresión lineal : Área

| A [mm <sup>2</sup> ] | D [px <sup>2</sup> ] |
|----------------------|----------------------|
| 7853.98              | 216543.15            |
| 8659.01              | 239209.30            |
| 9503.32              | 262591.60            |
| 10386.89             | 286240.80            |
| 11309.73             | 311135.25            |
| 12271.85             | 336254.45            |
| a=                   | -165.8000            |
| b=                   | 0.0369               |

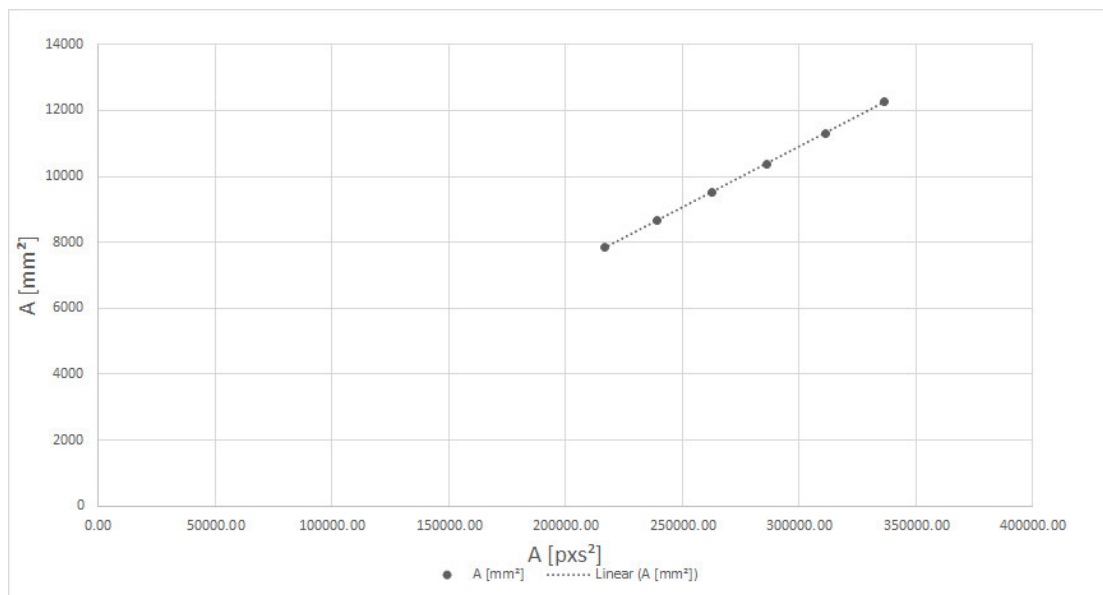


FIGURA 5.8: Regresión lineal: Área

### 5.3. Método empleado

Durante el desarrollo de esta investigación se realizaron capturas de chirimoyas del ecotipo aurora; para garantizar el ecotipo estudiado, dichas chirimoyas fueron adquiridas de sus distribuidores autorizados en la ciudad de Lima, todas las chirimoyas cuentan con Marca Colectiva Callahuanca y fueron medidas y pesadas de la forma indicada en la Figura 5.10. Los algoritmos empleados se pusieron a prueba tanto inicialmente en imágenes estáticas y posteriormente en movimiento. La Figura 5.9, muestra gráficamente el procedimiento empleado para demostrar matemáticamente que es posible emplear en las pruebas tanto imágenes estáticas como en movimiento. El ángulo  $\delta\theta$  formado por un haz de luz, a una velocidad constante de  $2,998 \times 10^8$  m/s, que impacta con la

chirimoya y regresa al lente está determinado por la Ecuación 5.4 y tiene un valor de  $6,306 \times 10^{-8} \text{ deg}$  lo cual es prácticamente despreciable.

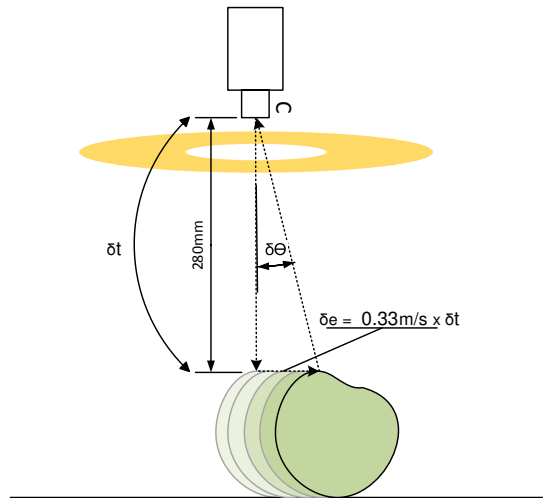


FIGURA 5.9: Diferencia de una captura en movimiento frente a una estática

$$\delta\theta = \text{atan}\left(\frac{0,33 \times \left(\frac{0,28}{2,998 \times 10^8}\right)}{0,28}\right) \quad (5.4)$$



(A) Pesado de las chirimoyas



(B) Medicion de las chirimoyas

FIGURA 5.10: Chirimoya de muestra

Las mediciones se realizaron empleando el modo indicado en la Figura 5.11, se mandaron directamente al mercado Nacional aquellas chirimoyas que tuvieron una altura mayor al de la caja de exportación (10cm) y se midió el diámetro máximo de las chirimoyas restantes en un plano perpendicular al de la altura, aquellas que no superan los 12cm de diámetro, corresponden al mercado de Exportación.

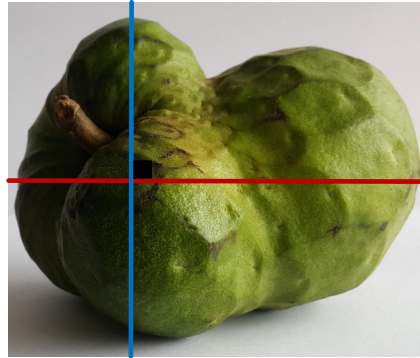


FIGURA 5.11: Dimensiones acorde al método empleado

Durante la elaboración de esta investigación, se vislumbró como solución a la rápida oxidación de las chirimoyas congelar algunas muestras a  $-16^{\circ}C$ , sin embargo se recomienda no emplear este método ya que el rocío solidificado presente en el epitelio de la fruta, puede causar ruido en la segmentación, tal como se ve con claridad en la Figura 5.12, para mayor entendimiento, en la Figura 5.14a se puede observar una chirimoya capturada en el banco de pruebas y su correspondiente segmentación en la 5.14b. El prototipo desarrollado para realizar las pruebas empleó una cinta transportadora en vez de las bandejas que se emplearán en el prototipo final, una asincronía en la cinta ocasionó que la captura no se realice bajo la zona crítica de captura, produciendo sombras mas pronunciadas y ocasionando así errores en la segmentación como la mostrada en la Figura 5.13.

## 5.4. Pruebas realizadas

La población de chirimoyas de categorías Primera y Extra, con las que se realizaron las pruebas fueron 91, las características tales como el peso, las dimensiones tanto reales como obtenidas por software y el resultado de la clasificación manual y obtenida mediante el procesamiento de imágenes de cada chirimoya estudiada se muestra en el Cuadro 5.3.

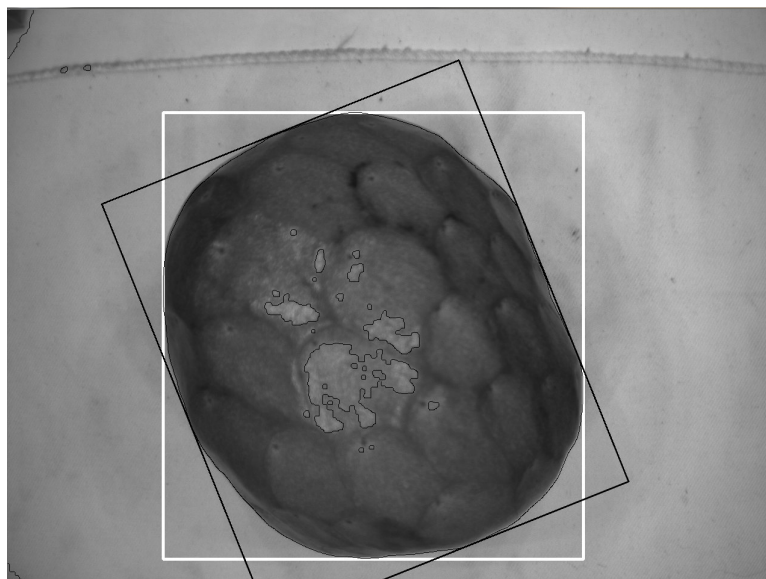


FIGURA 5.12: Error de criogenización

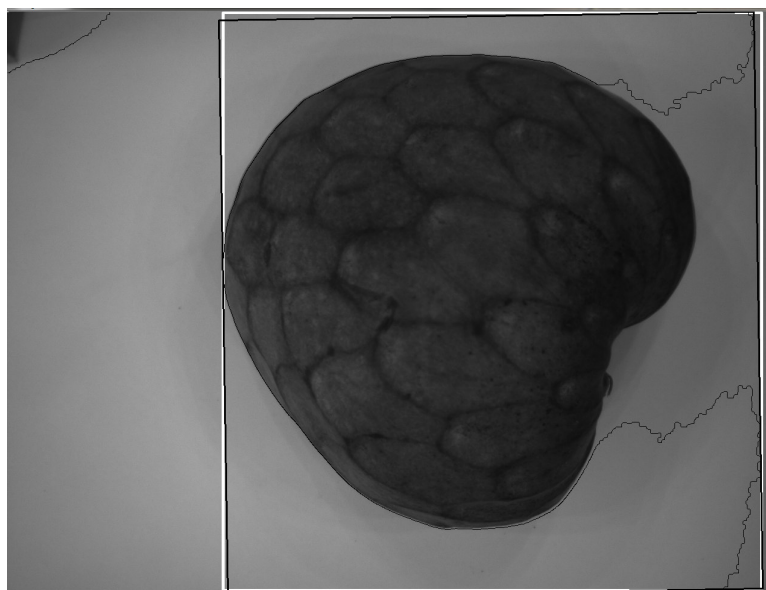
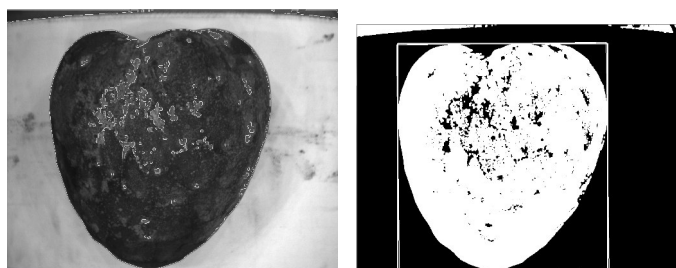


FIGURA 5.13: Error de asincronía de faja



(A) Chirimoya Capturada (B) Chirimoya Procesada

FIGURA 5.14: Chirimoya preservada

Como se explicó en el Capítulo 4, la medida obtenida depende de la altura presente desde el lente de la cámara hasta la zona de interés; las medidas son precisas mientras la altura sea conocida y constante, una referencia gráfica se puede encontrar en la Figura 5.15. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 5.16, las chirimoyas son frutos irregulares y no se puede predecir a que altura se encuentra el diámetro máximo de cada muestra.

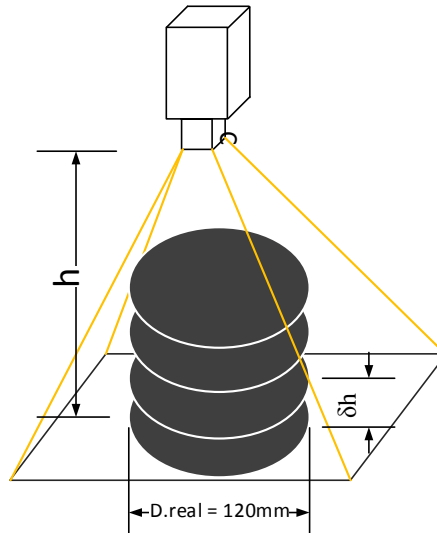


FIGURA 5.15: Variaciones según la altura

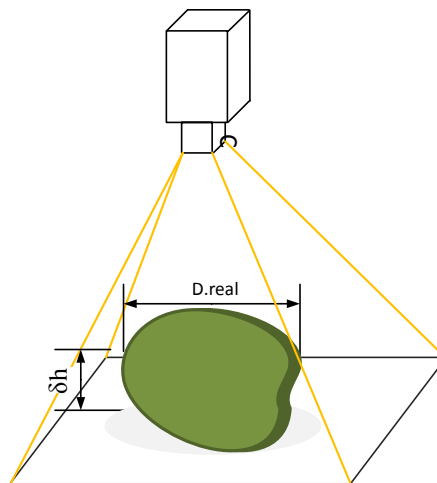


FIGURA 5.16: Variación de altura de una chirimoya

Para solucionar esta variación, se realizó una regresión cuadrática con aquellas muestras que no superan los  $10\text{cm}$  de altura, para esto se consideraron las medidas reales y las medidas obtenidas en píxeles, el resultado se muestra en la Figura 5.17; tras este análisis

se obtuvo la función de orden 2 indicada en la Ecuación 5.5 la cual posee una correlación  $R^2$  de 0.93; tras incorporar la función a las mediciones, se obtuvo un error de permisible de  $2,18mm$  durante las pruebas.

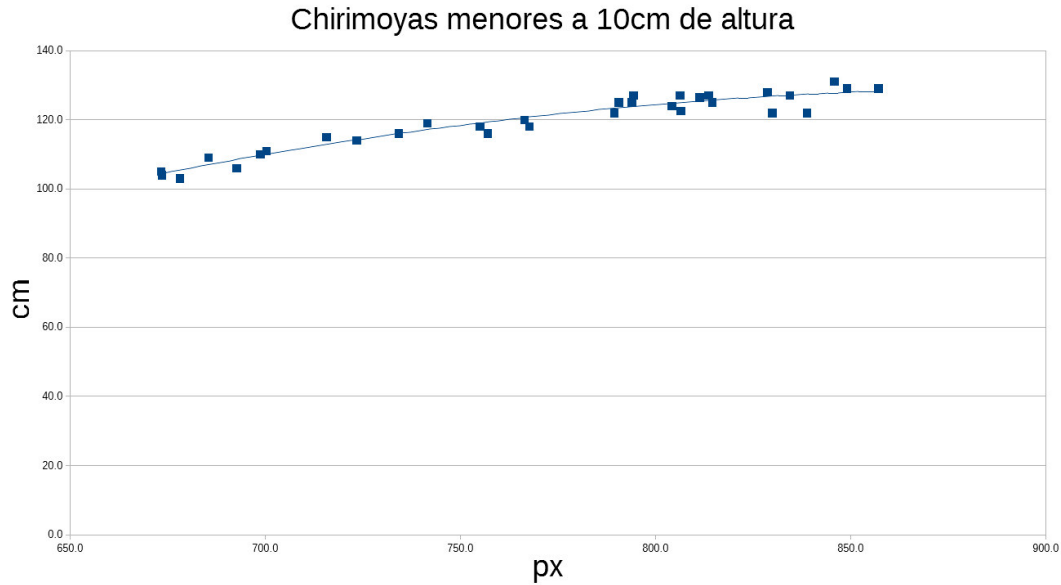


FIGURA 5.17: Chirimoyas menores a  $10cm$

$$D.obt[mm] = f(px) = -0,0040179455 \times px^2 + 1,8359340999 \times px - 42,6957734568 \quad (5.5)$$

La *Marca Colectiva - Chirimoya Callahuanca* [33], en sus Requerimientos en cuanto a la selección, indica que la tolerancia máxima de defectos en su clasificación no debe superar un 5% de los frutos muestreados en base al peso, lo que significa que para una población de 91 chirimoyas como máximo 5 chirimoyas pueden tener errores de selección; tras efectuar las pruebas, ninguna chirimoya fue clasificada incorrectamente, dando como resultado un 100% de efectividad.

En la Figura 5.18 se muestra las imágenes resultantes después de cada etapa del procesamiento de imágenes. En la Figura 5.18a se observa la imagen recién capturada, a continuación se recorta el área de interés como se observa en la Figura 5.18b, también es necesario ajustar el contraste para facilitar el procesamiento, dando como resultado la Figura 5.18c, a continuación se procede con la umbralización de la imagen, cuyo resultado se muestra en la Figura 5.18d, es frecuente la presencia de ruido en la imagen, por tal motivo en la Figura 5.18e se aprecia la chirimoya después del proceso de *cierre*

y apertura, en la Figura 5.18f se puede observar la chirimoya después de reconocer los contornos de la imagen y en la Figura 5.18g se aprecia la figura post-procesamiento, con un cuadro enmarcando la chirimoya y una línea dibujada que representa la máxima distancia determinada.

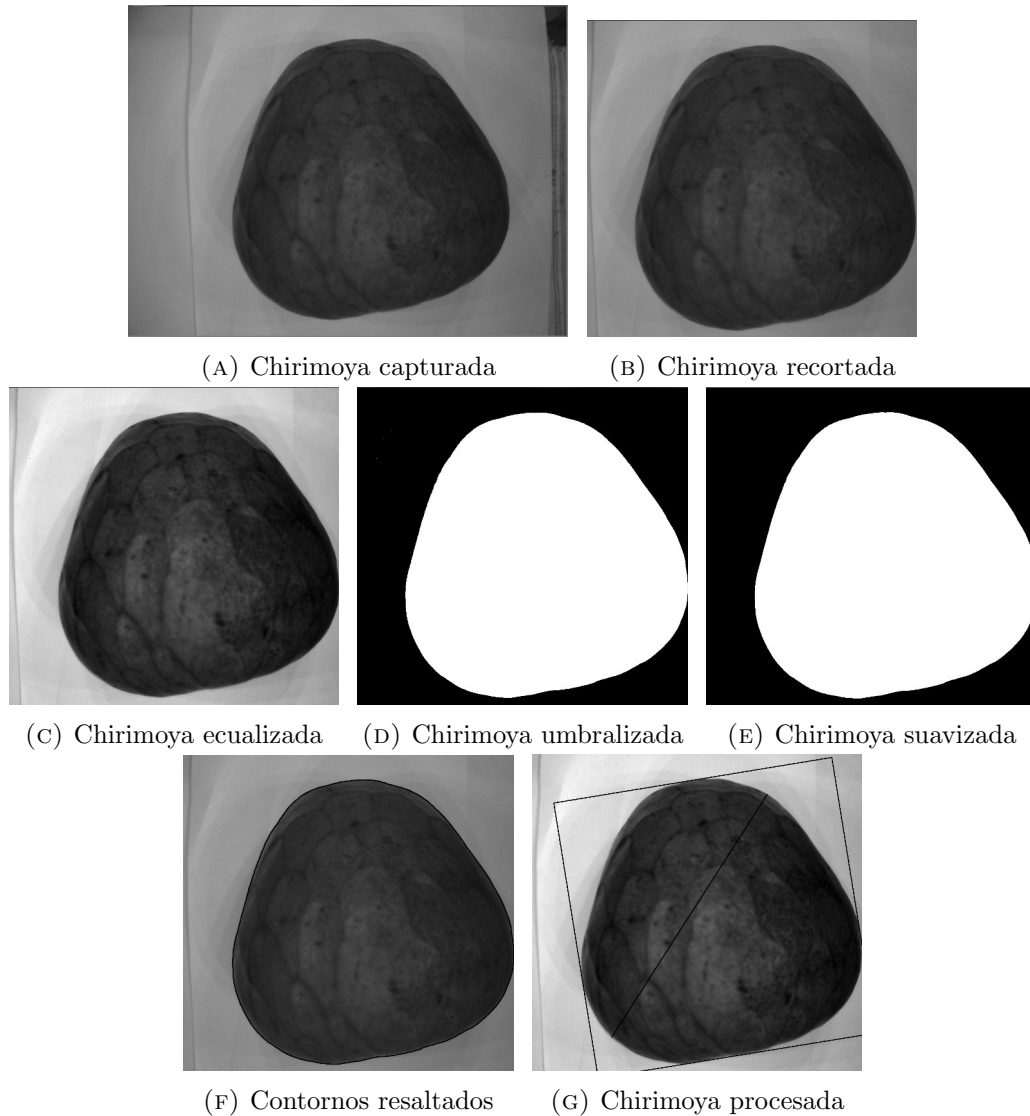


FIGURA 5.18: Procesamiento de la chirimoya

En la Figura 5.19, se presente el resultado en la línea de comandos en la cual se indica el área y la distancia máxima en el fruto, asimismo determina si la chirimoya pertenece al mercado nacional o internacional.

```
Python 2.7.9 (default, Dec 10 2014, 12:24:55) [MSC v.1500 32 bit (Intel)] on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> ===== RESTART =====
>>>
se encontro camara
inicio 2016-03-13 23:17:21.82
captura 1 realizada a V[m/s]= 3.3
diametro_mm= 128.737883608 circularidad0.860650717838
decision 2016-03-13 23:17:29.56
mercado nacional
```

FIGURA 5.19: Resultado del procesamiento

#### 5.4.1. Costos

Para los costos del proyecto se tomaron en cuenta todos los componentes necesarios para el dominio de control y de la visión, existen algunos componentes que no se encuentran en el mercado nacional, los montos se pueden apreciar en el Cuadro 5.4 y las cotizaciones del dispositivo de adquisición y el controlador lógico programable se pueden encontrar en el Apéndice ??; la suma del valor los componentes con un porcentaje del 20% adicional para imprevistos es de 21876.84 Nuevos Soles.

CUADRO 5.3: Resultados obtenidos

| Nº | Peso [gr] | Altura [mm] | D.real [mm] | D.obt [mm] | e [mm] | Resultado Manual | Resultado Software | Aciertos |
|----|-----------|-------------|-------------|------------|--------|------------------|--------------------|----------|
| 1  | 766       | 96          | 118.0       | 117.0      | 1.05   | exportación      | exportación        | 1        |
| 2  | 586       | 92          | 120.4       | 120.0      | 0.39   | exportación      | exportación        | 1        |
| 3  | 562       | 98          | 115.0       | 115.2      | 0.18   | exportación      | exportación        | 1        |
| 4  | 785       | 87          | 133.0       | 134.2      | 1.20   | nacional         | nacional           | 1        |
| 5  | 688       | 91          | 120.0       | 122.0      | 2.00   | exportación      | exportación        | 1        |
| 6  | 644       | 88          | 114.0       | 114.0      | 0.03   | exportación      | exportación        | 1        |
| 7  | 682       | 99          | 118.0       | 120.9      | 2.91   | exportación      | exportación        | 1        |
| 8  | 704       | 98          | 121.0       | 121.9      | 0.85   | exportación      | exportación        | 1        |
| 9  | 756       | <b>119</b>  | 120.0       | 129.0      | 9.04   | nacional         | nacional           | 1        |
| 10 | 890       | 100         | 130.0       | 132.4      | 2.36   | nacional         | nacional           | 1        |
| 11 | 550       | <b>106</b>  | 105.0       | 112.6      | 7.56   | nacional         | nacional           | 1        |
| 12 | 597       | <b>112</b>  | 100.0       | 108.0      | 8.02   | nacional         | nacional           | 1        |
| 13 | 630       | <b>102</b>  | 110.0       | 112.8      | 2.75   | nacional         | nacional           | 1        |
| 14 | 583       | <b>101</b>  | 117.0       | 120.6      | 3.55   | nacional         | nacional           | 1        |
| 15 | 725       | 98          | 127.0       | 128.9      | 1.94   | nacional         | nacional           | 1        |
| 16 | 901       | 96          | 138.0       | 139.2      | 1.20   | nacional         | nacional           | 1        |
| 17 | 672       | <b>103</b>  | 120.0       | 122.9      | 2.90   | nacional         | nacional           | 1        |
| 18 | 420       | 98          | 114.0       | 115.4      | 1.40   | exportación      | exportación        | 1        |
| 19 | 634       | <b>105</b>  | 120.0       | 123.3      | 3.26   | nacional         | nacional           | 1        |
| 20 | 541       | <b>102</b>  | 112.0       | 113.4      | 1.41   | exportación      | exportación        | 1        |
| 21 | 583       | 94          | 124.0       | 123.1      | 0.95   | nacional         | nacional           | 1        |
| 22 | 562       | <b>102</b>  | 112.0       | 114.6      | 2.55   | nacional         | nacional           | 1        |
| 23 | 915       | 97          | 132.0       | 132.4      | 0.35   | nacional         | nacional           | 1        |
| 24 | 796       | 86          | 133.0       | 132.4      | 0.57   | nacional         | nacional           | 1        |
| 25 | 735       | 98          | 128.0       | 128.9      | 0.86   | nacional         | nacional           | 1        |
| 26 | 849       | <b>118</b>  | 122.0       | 130.0      | 7.99   | nacional         | nacional           | 1        |
| 27 | 849       | <b>118</b>  | 127.0       | 123.7      | 3.26   | nacional         | nacional           | 1        |
| 28 | 847       | <b>106</b>  | 122.5       | 125.5      | 2.95   | nacional         | nacional           | 1        |
| 29 | 847       | <b>111</b>  | 122.0       | 123.1      | 1.07   | nacional         | nacional           | 1        |
| 30 | 727       | 98          | 126.5       | 126.1      | 0.38   | nacional         | nacional           | 1        |
| 31 | 727       | <b>107</b>  | 125.0       | 126.7      | 1.71   | nacional         | nacional           | 1        |
| 32 | 580       | 97          | 116.0       | 115.4      | 0.65   | exportación      | exportación        | 1        |
| 33 | 580       | 87          | 115.0       | 112.8      | 2.21   | exportación      | exportación        | 1        |
| 34 | 631       | <b>105</b>  | 110.0       | 110.4      | 0.43   | nacional         | nacional           | 1        |
| 35 | 631       | <b>104</b>  | 106.0       | 109.6      | 3.59   | nacional         | nacional           | 1        |
| 36 | 677       | 99          | 114.0       | 113.9      | 0.14   | exportación      | exportación        | 1        |
| 37 | 677       | 97          | 116.0       | 118.5      | 2.53   | exportación      | exportación        | 1        |
| 38 | 825       | <b>112</b>  | 124.0       | 125.1      | 1.13   | nacional         | nacional           | 1        |
| 39 | 825       | <b>110</b>  | 125.0       | 123.2      | 1.78   | nacional         | nacional           | 1        |
| 40 | 614       | <b>105</b>  | 104.0       | 106.9      | 2.94   | nacional         | nacional           | 1        |
| 41 | 614       | <b>102</b>  | 105.0       | 106.9      | 1.92   | nacional         | nacional           | 1        |
| 42 | 626       | 86          | 118.0       | 118.3      | 0.26   | exportación      | exportación        | 1        |
| 43 | 626       | 87          | 119.0       | 116.4      | 2.62   | exportación      | exportación        | 1        |
| 44 | 775       | 95          | 125.0       | 123.7      | 1.32   | nacional         | nacional           | 1        |
| 45 | 775       | 95          | 127.0       | 125.4      | 1.58   | nacional         | nacional           | 1        |
| 46 | 598       | 97          | 109.0       | 108.6      | 0.40   | exportación      | exportación        | 1        |
| 47 | 598       | 100         | 103.0       | 107.6      | 4.58   | exportación      | exportación        | 1        |
| 48 | 787       | <b>104</b>  | 118.0       | 120.0      | 2.03   | nacional         | nacional           | 1        |
| 49 | 787       | <b>106</b>  | 120.0       | 119.9      | 0.15   | nacional         | nacional           | 1        |
| 50 | 947       | <b>117</b>  | 128.0       | 128.6      | 0.56   | nacional         | nacional           | 1        |
| 51 | 947       | <b>117</b>  | 125.0       | 126.6      | 1.58   | nacional         | nacional           | 1        |
| 52 | 845       | <b>108</b>  | 127.0       | 126.4      | 0.56   | nacional         | nacional           | 1        |
| 53 | 848       | <b>105</b>  | 131.0       | 131.0      | 0.03   | nacional         | nacional           | 1        |
| 54 | 956       | <b>124</b>  | 122.0       | 128.7      | 6.73   | nacional         | nacional           | 1        |
| 55 | 956       | <b>110</b>  | 129.0       | 131.4      | 2.42   | nacional         | nacional           | 1        |
| 56 | 988       | <b>119</b>  | 127.0       | 129.4      | 2.37   | nacional         | nacional           | 1        |
| 57 | 988       | <b>120</b>  | 129.0       | 132.6      | 3.56   | nacional         | nacional           | 1        |
| 58 | 678       | <b>108</b>  | 111.0       | 110.7      | 0.34   | nacional         | nacional           | 1        |
| 59 | 678       | <b>105</b>  | 109.0       | 113.6      | 4.59   | nacional         | nacional           | 1        |
| 60 | 738       | 94          | 129.0       | 129.9      | 0.92   | nacional         | nacional           | 1        |
| 61 | 738       | 91          | 127.0       | 124.9      | 2.06   | nacional         | nacional           | 1        |
| 62 | 650       | <b>107</b>  | 116.0       | 118.6      | 2.63   | nacional         | nacional           | 1        |
| 63 | 650       | <b>104</b>  | 120.0       | 120.2      | 0.15   | nacional         | nacional           | 1        |
| 64 | 499       | 86          | 107.0       | 107.7      | 0.69   | exportación      | exportación        | 1        |
| 65 | 499       | 86          | 111.0       | 112.3      | 1.34   | exportación      | exportación        | 1        |
| 66 | 657       | <b>105</b>  | 116.5       | 117.3      | 0.84   | nacional         | nacional           | 1        |
| 67 | 657       | 95          | 118.0       | 121.2      | 3.19   | exportación      | exportación        | 1        |
| 68 | 902       | <b>116</b>  | 128.0       | 128.2      | 0.22   | nacional         | nacional           | 1        |
| 69 | 902       | <b>117</b>  | 128.0       | 128.4      | 0.35   | nacional         | nacional           | 1        |
| 70 | 514       | 90          | 104.0       | 100.6      | 3.38   | exportación      | exportación        | 1        |
| 71 | 514       | 90          | 100.0       | 103.0      | 3.01   | exportación      | exportación        | 1        |
| 72 | 527       | 96          | 102.0       | 106.3      | 4.31   | exportación      | exportación        | 1        |
| 73 | 527       | 98          | 100.0       | 102.3      | 2.32   | exportación      | exportación        | 1        |
| 74 | 608       | 99          | 107.0       | 107.3      | 0.31   | exportación      | exportación        | 1        |
| 75 | 608       | 100         | 108.0       | 107.3      | 0.75   | exportación      | exportación        | 1        |

| N°           | Peso [gr] | Altura [mm] | D.real [mm] | D.obt [mm] | e [mm] | Resultado Manual    | Resultado Software | Aciertos |
|--------------|-----------|-------------|-------------|------------|--------|---------------------|--------------------|----------|
| 76           | 705       | <b>106</b>  | 123.0       | 120.0      | 2.99   | nacional            | nacional           | 1        |
| 77           | 705       | 96          | 119.0       | 121.2      | 2.18   | exportación         | exportación        | 1        |
| 78           | 609       | 98          | 111.0       | 109.5      | 1.50   | exportación         | exportación        | 1        |
| 79           | 609       | <b>101</b>  | 109.0       | 108.9      | 0.14   | nacional            | nacional           | 1        |
| 80           | 505       | 93          | 106.0       | 104.8      | 1.20   | exportación         | exportación        | 1        |
| 81           | 505       | 98          | 102.0       | 103.3      | 1.26   | exportación         | exportación        | 1        |
| 82           | 582       | 95          | 115.0       | 109.7      | 5.29   | exportación         | exportación        | 1        |
| 83           | 582       | 97          | 110.0       | 107.6      | 2.38   | exportación         | exportación        | 1        |
| 84           | 612       | 95          | 117.0       | 117.8      | 0.75   | exportación         | exportación        | 1        |
| 85           | 612       | 100         | 116.0       | 117.5      | 1.45   | exportación         | exportación        | 1        |
| 86           | 629       | 100         | 116.0       | 116.1      | 0.06   | exportación         | exportación        | 1        |
| 87           | 629       | 98          | 117.0       | 114.6      | 2.44   | exportación         | exportación        | 1        |
| 88           | 577       | 98          | 103.0       | 109.6      | 6.62   | exportación         | exportación        | 1        |
| 89           | 577       | <b>109</b>  | 111.0       | 112.2      | 1.18   | nacional            | nacional           | 1        |
| 90           | 942       | <b>112</b>  | 123.0       | 132.5      | 9.45   | nacional            | nacional           | 1        |
| 91           | 942       | <b>115</b>  | 126.0       | 129.7      | 3.74   | nacional            | nacional           | 1        |
| Peso Prom. = | 695.84    |             |             | e Prom. =  | 2.18   | Total de aciertos = |                    | 91       |
|              |           |             |             |            |        | Eficiencia =        |                    | 100%     |

CUADRO 5.4: Costos del proyecto

| Cantidad     | Descripción   | P. Unitario (PEN) | Sub Total (PEN) |
|--------------|---|-------------------|-----------------|
| 01           | 1328x1048 Mono USB3.0<br>Flea3Flea3 FL3-U3-13S2M-CS 1/3"<br>Monochrome USB 3.0 Camera | 4331.00           | 4331.00         |
| 01           | Varifocal CS mount lens<br>3.5-8mm F1.2 CCTV  | 109.00            | 109.00          |
| 01           | 8 pins, 4.5m GPIO Cable,<br>Hirose HR25 Circular Connector                            | 212.00            | 212.00          |
| 01           | SUPER SPEED USB 3.0 Male-<br>USB 3 Micro B Male Cable                                 | 35.00             | 35.00           |
| 01           | M-DUINO PLC Arduino 42,<br>I/Os Analog/Digital  | 1451.00           | 1451.00         |
| 01           | Placa conexión<br>RS485/RS232 / I2C   | 100.00            | 100.00          |
| 06           | OPTEX ZT-L3000N   | 585.20            | 3511.20         |
| 06           | PC SHELL 4LED<br>5050 SMD MODULE (3636)<br>SQL-PCG50-04(3636)                         | 5.00              | 30.00           |
| 01           | Toshiba C45 Intel Core I5<br>2.6Ghz Usb 3.0   | 1800              | 1800            |
| 08           | Pulsador 24VDC p/tablero  | 3.50              | 28.00           |
| 01           | Switch 2 estados 24VDC p/tablero  | 3.50              | 3.50            |
| 01           | Baliza 24VDC (GN)   | 140.00            | 140.00          |
| 01           | Baliza 24VDC (OG)   | 140.00            | 140.00          |
| 01           | Baliza 24VDC (RD)   | 140.00            | 140.00          |
| -            | Costos de Ingeniería  | 8000.00           | 8000.00         |
| Total (+20%) |   |                   | 24036.84        |

## Capítulo 6

# Conclusiones y recomendaciones

### 6.1. Conclusiones

1. Se diseñó un sistema de clasificación de chirimoyas, empleando la metodología de diseño *VDI-2221*, capaz de medir sin contacto chirimoyas del ecotipo Aurora desplazadas a  $0,33m/s$ , provenientes de la comunidad de Callahuanca - Perú.
2. Fue posible clasificar exitosamente 91 de 91 Chirimoyas frescas de Categorías Extra y Primera estudiadas con un 100 % de efectividad siendo este valor ideal para los requerimientos en cuanto a la selección de la Marca Colectiva Chirimoya Callahuanca.
3. Se calculó una precisión de medición de  $0,35mm$  y un error permisible de  $2,18mm$  durante la mediciones de la distancia entre los puntos mas extremos de la imagen procesada, cumpliendo así los requerimientos establecidos.
4. Se efectuó los cálculos relacionados al acondicionamiento de la imagen, seleccionando 06 luminarias LED de luz blanca de  $60lm$  cada una, también se ubicaron las luminarias sobre la zona de captura en una formación en anillo para garantizar una correcta iluminación alrededor de la chirimoya.
5. Se modeló la chirimoya como una elipse para poder analizar geométricamente las dimensiones de las sombras proyectadas, la sombra mayor tiene una dimensión de  $42,2mm$ , sin embargo no produce errores en la medición debido a la iluminación que proviene del lado opuesto del punto de iluminación tomado como referencia.

6. La circularidad o coeficiente isoperimétrico de las chirimoyas obtenido durante el procesamiento de imágenes se encuentra entre 0,79 y 0,87.
7. Se seleccionó y programó controlador lógico programable basado en plataforma *Arduino* para controlar un banco de pruebas para validar los algoritmos realizados.
8. Se construyó un banco de pruebas empleando en su mayoría MDF para validar los algoritmos desarrollados, este módulo cuenta con una zona de captura y una cinta transportadora que desplaza los frutos a  $0,33m/s$ , sensores infrarrojos ubicados a lo largo de la faja simulan los sensores utilizados en el prototipo final.
9. Se seleccionaron 06 sensores fotoreflexivos para realizar el disparo de la cámara en el instante correcto, además de brindar información de las chirimoyas cuya altura supere los  $10cm$  e indicar si una chirimoya se encuentra en posición para ser clasificada.
10. Se empleó un computador de escritorio utilizando el lenguaje de alto nivel *Python* y la librería *OpenCV*, para implementar el algoritmo de procesamiento de imágenes.

## 6.2. Recomendaciones

1. Debido a la facilidad de oxidación de la Chirimoya, se preservaron algunas muestras a  $-16^{\circ}C$  por periodos no mayores a 14 días, sin embargo se recomienda emplear chirimoyas de no más de 2 días postcosecha.
2. Se aconseja no utilizar lentes varifocales ya que las variaciones en la longitud focal incurrirán en errores de medición.
3. Es recomendado que no se realicen pruebas con la máquina si la iluminancia es menor a  $800 \times lx$ .
4. Como una futura investigación se sugiere implementar código a una plataforma embebida de bajo consumo que cumpla los requerimientos de procesamiento.

# Bibliografía

- [1] A. Velásquez. El 60 % de chirimoya puede utilizarse para hacer productos con valor agregado, estima sierra exportadora. Technical report, Sierra Exportadora, mayo 2014. URL <http://is.gd/zlunag>.
- [2] SIICEX. Partidas arancelarias de producto, exportadas en los últimos años. Technical report, Sistema integrado de informacion de Comercio Exterior, 2014. URL [http://www.siicex.gob.pe/siicex/portal5ES.asp?\\_page\\_=172.17100&\\_portletid\\_=sfichaproducto&scriptdo=cc\\_fp\\_init&pproducto=69&pnomproducto=Chirimoya](http://www.siicex.gob.pe/siicex/portal5ES.asp?_page_=172.17100&_portletid_=sfichaproducto&scriptdo=cc_fp_init&pproducto=69&pnomproducto=Chirimoya).
- [3] Descubre Callahuanca el paraíso de la chirimoya. Callahuanca, 2014. URL <http://www.demitierraunproducto.gob.pe/callahuanca.html>. Reporte promocional.
- [4] I. Reyna. Callahuanca con sabor a chirimoya, 2013. URL <http://www.rumbosdelperu.com/callahuanca-con-sabor-a-chirimoya-V968.html>. Reporte promocional.
- [5] J. Leonario, E.; Leon. Detección y clasificación de defectos en frutas mediante el procesamiento digital de imágenes. *Revista Colombiana de Física*, 2003.
- [6] E. Sobrado. Sistema de visión artificial para el reconocimiento y manipulación de objetos utilizando un brazo robot. Master's thesis, 2003.
- [7] J. Porras. Sistema de clasificación basado en visión artificial. Master's thesis, 2008.
- [8] H.; Morales A. Sanchez. Sistema de visión artificial para la inspección, selección y control de calidad de fresas. Master's thesis, 2009.
- [9] A Salazar. Identificación de objetos en movimiento mediante visión artificial y transmisión de datos a un brazo robótico. Master's thesis, 2001.
- [10] D. Grimaldo. Control de plaga. *NEO Suplemento de innovación, tecnología e investigación del semanario Puntoedu.*, Abril 2015.

- [11] C. Diaz. Factibilidad de la medición del volumen de heridas de leishmaniasis cutánea haciendo uso de un ecógrafo. Master's thesis, 2011.
- [12] J. Sato. Microscopio automatizado: conteo de bacilos de tuberculosis. Master's thesis, 2013.
- [13] V. Sanchez. Diseño de un sistema de identificación y clasificación por visión artificial. Master's thesis, 2013.
- [14] G. Guerrero, E.; Benavides. Automated System for Classifying Hass Avocados Based on Image Processing Techniques. *Communications and Computing (COLCOM), 2014 IEEE Colombian Conference on*, (3):1 – 6, 2014. doi: 10.1109/ColComCon.2014.6860414.
- [15] S.N. Deepa, P; Geethalakshmi. Improved watershed segmentation for Apple fruit grading. *Proceedings of 2011 International Conference on Process Automation, Control and Computing, PACC 2011*, 2011. doi: 10.1109/PACC.2011.5979003.
- [16] K. Naglea, M.; Intani. Non-destructive mango quality assessment using image processing: Inexpensive innovation for the fruit handling industry. *Conference on International Research on Food Security, National Resource*, septiembre 2012.
- [17] B.; Koley C. Nandi, C.S.; Tudu. An automated machine vision based system for fruit sorting and grading. *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology, ICST*, pages 195–200, 2012. ISSN 21568065. doi: 10.1109/ICSensT.2012.6461669.
- [18] C.S. Nandi. Machine Vision Based Automatic Fruit Grading System using Fuzzy Algorithm. *Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)*, pages 26–30, 2014.
- [19] R. Gastelum, A.; Borquez. Tomato quality evaluation with image processing: A review. *African Journal of Agricultural Research*, Julio 2011.
- [20] J. Canny. A computational approach to edge detection, 1989. Patente.
- [21] M Weyrich, M. ;Scharf. Quality assessment of row crop plants by using a machine vision system. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 2466–2471, 2013. doi: 10.1109/IECON.2013.6699518. URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6699518>.

- [22] S.N. Deepa, P.; Geethalakshmi. A Comparative Analysis of Watershed and Color based segmentation for Fruit Grading. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, (3):11–15, 2012.
- [23] S.; Soleymani F. Razmjooya, N; Mousavib. A real-time mathematical computer method for potato inspection using machine vision. *Computers and mathematics with Applications*.
- [24] C.V. Maheshwari. Quality assessment of oryza sativa ssp indica (rice) using computer vision. *Journal of innovative Research in Computer and Communication Engineering*, June 2013.
- [25] M.; Utomo G.P.; Grezelda L.; Soesanti I.; Mochammad A. Afrisal, H.; Faris. Portable Smart Sorting and Grading Machine for Fruits Using Computer Vision. *Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA)*, pages 71–75, 2013.
- [26] Feng,G; Qixin C. Study on color image processing based intelligent fruit sorting system. *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788)*, 6:4802–4805, 2004. doi: 10.1109/WCICA.2004.1343622. URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1343622>.
- [27] J; Sabareesaan K.J.; George J Janardhana, S.; Jaya. Computer aided inspection system for food products using machine vision — A review. *2013 International Conference on Current Trends in Engineering and Technology (ICCTET)*, pages 29–33, 2013. doi: 10.1109/ICCTET.2013.6675906. URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6675906>.
- [28] V.G.; Hareesh K.S Narendra. Quality inspection and grading of agricultural and food products by computer vision - a review. *International Journal of Computer Applications*, Mayo 2010.
- [29] S. Farrad, N.; Terry. Performance analysis and optimization of shape recognition and classification optimization of shape recognition and classification using ann. *Robot. Comput. Integ. Manuf.*, 2002.
- [30] J. Pajares, G.; Cruz. *Ejercicios resueltos de Visión por Computador*. Alfaomega, 2008.
- [31] F. Bianconi. Vision en color y reconocimiento de patrones, 2011. Cátedra de curso.
- [32] E. Etcheverry. Iluminación para las aplicaciones de visión artificial. Technical report, Universidad Nacional de Quilmes, Agosto 2005. URL

- <http://iaci.unq.edu.ar/materias/vision/archivos/apuntes/Tipos%20de%20Iluminaci%C3%B3n.pdf>.
- [33] INDECOPI. Marca colectiva chirimoya callahuanca - reglamento de uso - resolución n°004214-2013/dsd-indecopi, 2013.
- [34] El comercio. Todo un récord: presentarán chirimoya de 5 kilos en huarochirí. 2010. URL [http://elcomercio.pe/gastronomia/peruana/todo-record-presentaran-chirimoya-kilos-huarochiri-noticia-485021?ref=flujo\\_tags\\_134519&ft=nota\\_9&e=imagen](http://elcomercio.pe/gastronomia/peruana/todo-record-presentaran-chirimoya-kilos-huarochiri-noticia-485021?ref=flujo_tags_134519&ft=nota_9&e=imagen).
- [35] B. Barriga. *Metodos de Diseño en Ingenieria Mecatrónica*. Pontificia Universidad Católica del Peru, 2011.
- [36] VDI. Vdi-richtlinie: Vdi 2221 methodik zum entwickleln un konstruieren technischer systeme und produkte. Technical report, The Association of German Engineers, 2005. URL [http://www.vdi.de/richtlinie/vdi\\_2221-methodik\\_zum\\_entwickeln\\_und\\_konstruieren\\_technischer\\_systeme\\_und\\_produkte/](http://www.vdi.de/richtlinie/vdi_2221-methodik_zum_entwickeln_und_konstruieren_technischer_systeme_und_produkte/).
- [37] F. Zwicky. *Entdecken, Erfinden, Forschen im Morfologischen Weltwild*. Droemer Knaur, 1971.
- [38] R. Sapag, N.; Sapag. *Preparación y evaluación de proyectos*. Mc graw Hill, 2008.
- [39] M. Böhme. Apuntes de clase del curso diseño e integración del sistema mecatrónico, 2011.
- [40] PointGrey. Pointgrey innovation. Technical report, 2015. URL <http://www.ptgrey.com/>.
- [41] NI. Ni vision. Technical report, National Instruments, 2013.
- [42] Vision Doctor. Industrielle bildverarbeitung gelöst. Technical report, Vision Doctor, 2015. URL <http://www.vision-doctor.de/kameraberechnungen/belichtungszeit-berechnen.html>.
- [43] BAuA. Beleuchtung asr a3.4. Technical report, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2011.
- [44] TU-Ilmenau. Technische optik und lichttechnik. Technical report, Technische Universität Ilmenau, 2011.
- [45] C.; Hermoza C.; Calderón, A.; Méndez. Máquina selectora de granos de sachá inchi. 2013.

- 
- [46] Industrial Shields. M-duino plc arduino 42 i/os analog/digital. Technical report, Industrial Shields, 2014. URL <http://www.industrialshields.com/m-duino-plc-arduino-42-i-os-analog-digital>.