UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Desarrollo de un sistema automático de selección de paltas Hass por sus
índices de calidad para la empresa Agroindustrias Verdeflor S.A.C.

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR(ES)

Bermeo Vargas, Elias Israel (0000-0002-7866-1250)

Zorrilla Pascual, Dario Antonio (0000-0001-7013-4192)

ASESOR

Vinces Ramos, Leonardo Nikolai (0000-0002-3518-591X)

Lima, 26 de noviembre de 2019

DEDICATORIA

*A nuestros padres y hermanos, por su gran amor,
comprensión y apoyo incondicional.*

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros padres por habernos forjado como las personas que somos en la actualidad.

Asimismo, agradecemos a nuestros profesores por habernos enseñado los conceptos de la Ingeniería y aconsejarnos a partir de su experiencia.

Agradecemos a la empresa Agroindustrias Verdeflor S.A.C, en especial a los ingenieros Elvis García y Cesar Larrea, por el apoyo en las validaciones de nuestro proyecto.

Por último, pero no menos importante, agradecemos a todos los familiares y amigos que estuvieron en el proceso de elaboración del sistema.

RESUMEN

El presente proyecto de investigación propone el desarrollo e implementación de un sistema automático de selección para paltas tipo Hass, mediante sus diferentes índices de calidad (rozamiento, quemaduras y manchas negras). El sistema integra hardware y software para mejorar la calidad de exportación y la productividad en la industria agrícola.

Este proyecto es la propuesta de solución a la problemática actual de las empresas exportadoras de paltas en la etapa de selección. La palta, también conocido como aguacate o avocado, en su variedad Hass, es la más conocida y se cultiva exclusivamente para la exportación, por tal motivo es necesario un control de calidad óptimo; sin embargo, actualmente este proceso es ineficiente al ser artesanal.

Con el fin de mejorar este proceso, se propone su automatización, el cual consiste en diversas etapas mecánicas, diseñadas para realizar el movimiento de las paltas y un algoritmo de procesamiento de imágenes, encargado de detectar los desórdenes en los frutos. Finalmente, se muestran las pruebas de validación y los resultados del análisis empleado en la evaluación de la solución propuesta.

Palabras clave: Palta; Automatización; Control de calidad; Etapa de selección; Aguacate; Índice de calidad; Procesamiento de imágenes.

Development of an automatic sorter system for Hass avocados based on its quality indexes
for the company Agroindustrias Verdeflor S.A.C.

ABSTRACT

The following research project proposes the development and implementation of an automatic sorter system for Hass avocados, through its different quality indexes (burns, frictions and black spots). The system integrates hardware and software to improve export quality and productivity in the agricultural industry.

This project is the proposed solution to the current problem avocado exporting companies are facing in the selection stage. The avocado, also known as aguacate or palta, in its Hass variety, is grown exclusively for export, which is why optimal quality control is necessary. However, this process is currently inefficient because it is a manual process.

In order to improve it, an automatic method is proposed, which consists of various mechanical phases, designed to perform the movement of avocados and an image processing algorithm, responsible for detecting disorders in the fruits. Finally, the validation tests and results of the analysis used in the evaluation of the proposed solution are shown.

Keywords: Avocados; Automation; Quality control; Selection stage; Quality indexes; Image processing.

TABLA DE CONTENIDOS

1	CAPÍTULO 1: ASPECTOS INTRODUCTORIOS	13
1.1	SITUACIÓN PROBLEMÁTICA Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	13
1.1.1	Situación problemática	13
1.1.2	Definición del problema	15
1.1.2.1	Árbol del problema	16
1.1.2.2	Problema general	16
1.1.2.3	Problema ingenieril	16
1.2	ESTADO DEL ARTE	18
1.2.1	Productos y soluciones existentes	18
1.2.1.1	Spectrim	18
1.2.1.2	Combisort	19
1.2.2	Publicaciones científicas / ingenieriles	20
1.3	JUSTIFICACIÓN	22
1.3.1	Justificación de la solución propuesta	22
1.3.2	Justificación ingenieril	22
1.3.3	Justificación económica	23
1.3.4	Justificación apoyo del cliente	25
1.4	OBJETIVOS	25
1.4.1	Árbol de objetivos	25
1.4.2	Objetivo general	26
1.4.3	Objetivos específicos	26
1.5	DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA	28
1.5.1	Funcionamiento	29
1.5.2	Limitaciones de la solución	29
1.5.3	Resultados esperados	30
1.6	APLICACIONES Y USUARIOS POTENCIALES	30
1.6.1	Aplicaciones	30
1.6.2	Usuarios potenciales del producto	30
1.7	VIABILIDAD	31
1.7.1	Viabilidad técnica	31
1.7.2	Viabilidad económica	31

1.7.3	Viabilidad operativa	32
1.7.4	Viabilidad social	32
1.8	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	32
2	CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	34
2.1	CONCEPTOS BÁSICOS	34
2.1.1	La palta o aguacate Hass	34
2.1.2	Índices de calidad	35
2.1.2.1	Daños por rameado, rozadura o raspado	35
2.1.2.2	Daños por quemaduras	35
2.1.2.3	Daños por manchas o lenticelas.....	36
2.2	PRINCIPIOS DE MECÁNICA.....	36
2.2.1	Velocidad tangencial y angular	36
2.2.2	Engranajes	37
2.2.3	Normas ISO 128 y 129: dibujos técnicos	37
2.2.4	Normas IEC 60617	38
2.2.5	Normas ANSI/ISA-S5.1 y 5.4	38
2.3	PRINCIPIOS DE INSTRUMENTACIÓN	38
2.3.1	Sensores ópticos	38
2.3.2	Cámara web	39
2.3.2.1	Campo de visión	39
2.3.3	Iluminación LED	40
2.3.4	Motores de corriente alterna	40
2.3.5	Variador de frecuencia.....	40
2.3.6	Guardamotor.....	40
2.3.7	Interruptor termomagnético.....	41
2.3.8	Norma Técnica Peruana 370.304.....	41
2.3.9	Controlador lógico programable.....	42
2.3.10	Programación ladder (escalera)	42
2.3.11	Pistón de doble efecto.....	43
2.3.12	Compresor	43
2.3.13	Electroválvula.....	44
2.3.14	Unidad de mantenimiento (neumática)	44

2.4	FUNDAMENTOS DEL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....	45
2.4.1	MATLAB	45
2.4.2	Iluminación sobre objetos.....	45
2.4.3	Píxel.....	45
2.4.4	Procesamiento digital de imágenes	45
2.4.5	Modelos de color	46
2.4.5.1	Modelo de color RGB (rojo, verde, azul).....	46
2.4.5.2	Modelo de color YCbCr	46
2.4.5.3	Modelo de color HSV	46
2.4.5.4	Modelo de color YIQ.....	47
2.4.6	Vecindad de un píxel	47
2.4.7	Etiquetado.....	48
2.4.8	Histograma	48
2.4.9	Transformación de intensidad	49
2.4.10	Operaciones aritméticas con imágenes.....	49
2.4.11	Operaciones morfológicas	50
2.4.11.1	Erosión.....	50
2.4.11.2	Dilatación	51
2.4.11.3	Clausura.....	51
2.4.12	Umbralización	52
2.4.13	Umbral adaptivo	52
2.4.14	Segmentación de imágenes.....	53
2.4.15	Media y varianza	53
2.4.16	Porcentaje de área de imagen	54
2.5	FUNDAMENTOS DE VALIDACIÓN	54
2.5.1	Índice de concordancia	54
2.5.2	Índice Kappa de Cohen.....	55
2.5.3	Evaluación cuantitativa.....	56
2.5.4	Porcentaje de error relativo.....	57
2.6	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	57
3	CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE PROPUESTO	58
3.1	ARQUITECTURA Y FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL HARDWARE.....	58

3.2	ETAPA DE TRANSPORTE	58
3.2.1	Diseño de la banda transportadora de rodillos.....	59
3.2.2	Construcción de la banda transportadora de rodillos	61
3.3	ETAPA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.....	63
3.3.1	Diseño del recinto de adquisición de imágenes.....	63
3.3.2	Diseño de la distribución del sistema de iluminación	65
3.3.3	Selección del fondo del recinto	66
3.3.4	Construcción del recinto de adquisición de imágenes.....	67
3.4	ETAPA DE SELECCIÓN	69
3.4.1	Diseño de la etapa de selección	69
3.4.2	Construcción de la etapa de selección	70
3.5	ETAPA DE CONTROL.....	71
3.5.1	Diseño del tablero eléctrico	71
3.5.2	Ensamblaje del tablero eléctrico.....	72
3.5.3	Integración del sistema	74
3.6	DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS Y SOLUCIONES	74
3.7	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	75
4	CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE PROPUESTO	76
4.1	FILOSOFÍA DE CONTROL.....	76
4.2	DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN	77
4.2.1	Adquisición de imágenes.....	79
4.2.2	Pre-procesamiento	80
4.2.3	Segmentación de la palta	83
4.2.4	Dilatación	85
4.2.5	Erosión.....	86
4.2.6	Resultado de la segmentación.....	87
4.2.7	Elección del modelo de color	87
4.2.8	Cálculo de umbrales	92
4.2.9	Cálculo de porcentajes de áreas.....	95
4.2.10	Resultados del procesamiento	98
4.3	DISEÑO DE LA INTERFAZ EN MATLAB	98
4.4	DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS Y SOLUCIONES	100

4.5	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	101
5	CAPÍTULO 5: PRUEBAS DE VALIDACIÓN Y RESULTADOS	102
5.1	MÉTODOS DE VALIDACIÓN	102
5.2	VALIDACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	102
5.3	VALIDACIÓN DE SEGMENTACIÓN	103
5.4	VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN	104
5.5	VALIDACIÓN DE LA SELECCIÓN CONTINUA	110
5.6	INFORME FINANCIERO.....	112
5.7	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	114
6	CONCLUSIONES	116
7	RECOMENDACIONES	117
8	REFERENCIAS	118
9	ANEXOS	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación de alternativas de soluciones.....	24
Tabla 2 Principales empresas exportadoras de paltas Hass	25
Tabla 3 Valorización del índice Kappa	56
Tabla 4 Tabla de datos preliminares del sistema	59
Tabla 5 Parámetros de configuración de las cámaras.....	80
Tabla 6 Resultados de la segmentación evaluada por analista.	104
Tabla 7 Índice Kappa para paltas aceptadas	105
Tabla 8 Índice Kappa para paltas con rozamiento o quemaduras por sol	106
Tabla 9 Índice Kappa para paltas con manchas negras	107
Tabla 10 Índice Kappa para paltas	109
Tabla 11 Índice de concordancia para el escenario 1	110
Tabla 12 Índice de concordancia para el escenario 2	111
Tabla 13 Índice de concordancia para el escenario 3	111
Tabla 14 Costos del prototipo.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de evolución de las exportaciones de paltas peruanas.	14
Figura 2. Actividades y proceso productivo de Verdeflor.	15
Figura 3. Árbol del problema.	17
Figura 4. Plataforma Spectrim.	18
Figura 5. Sistema Combisort.	20
Figura 6. Árbol de objetivos.	27
Figura 7. Diagrama de bloques pictórico de la solución prototipo.	28
Figura 8. Gráfico 3D del hardware propuesto.	28
Figura 9. Palta Hass.	34
Figura 10. Daño por rameado entre paltas Hass.	35
Figura 11. Daño por quemaduras en palta Hass.	36
Figura 12. Daño por manchas negras en palta Hass.	36
Figura 13. Sensores ópticos autoreflex.	39
Figura 14. Guardamotor MS116.	41
Figura 15. Interruptor termomagnético S262M.	41
Figura 16. PLC Siemens S7-1200.	42
Figura 17. Descripción lógica Ladder.	43
Figura 18. Cilindro de doble efecto.	43
Figura 19. Unidad de Mantenimiento.	44
Figura 20. Ejemplo de etiquetado.	48
Figura 21. Histograma de imagen de palta con rozamiento.	49
Figura 22. Ejemplo de erosión morfológica.	51
Figura 23. Ejemplo de dilatación morfológica.	51
Figura 24. Diagrama de bloques del hardware.	58
Figura 25. Rodillos y engranes con cadena.	61
Figura 26. Soporte mecánico y chumacera.	62
Figura 27. Construcción del sistema de transmisión.	62
Figura 28. Resultado de la construcción de la banda transportadora.	63
Figura 29. Iluminación final del prototipo.	66
Figura 30. Análisis de la selección de fondo de recinto.	67
Figura 31. Validación de adquisición de imágenes.	68
Figura 32. Recinto de acero inoxidable.	69

Figura 33. Mecánica de la etapa de selección.	71
Figura 34. Tablero eléctrico del sistema.....	73
Figura 35. Sistema final implementado.....	74
Figura 36. Diagrama de flujo general del algoritmo de detección.	78
Figura 37. Adquisición de 3 caras de una palta.	79
Figura 38. Ejemplo de transformación de intensidad	82
Figura 39. Operación aritmética resultante.....	83
Figura 40. Histograma de una imagen operada.	84
Figura 41. Imagen umbralizada resultante $Iu(x, y)$	84
Figura 42. Operación de etiquetado.....	85
Figura 43. Operación de dilatación.....	86
Figura 44. Operación de erosión.....	86
Figura 45. Resultado de segmentación.	87
Figura 46. Análisis de una palta con rozamiento.....	89
Figura 47. Análisis de una palta con quemaduras.	90
Figura 48. Análisis de palta con manchas negras.	91
Figura 49. Ejemplo de análisis de paltas con rozamientos y quemaduras de sol.	93
Figura 50. Diagrama de flujo del umbral adaptivo.....	95
Figura 51. Comparación visual del algoritmo de detección.	97
Figura 52. Imagen de la interfaz diseñada.	99

1 CAPÍTULO 1: ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1 Situación problemática y definición del problema

En los siguientes puntos se presentará el contexto actual en el que la exportación de paltas del Perú se encuentra, la problemática de la empresa Agroindustrias Verdeflor S.A.C., sus causas, consecuencias y la definición del problema.

1.1.1 Situación problemática

La palta, también conocida como aguacate o avocado, es un fruto de origen centroamericano, de uso multifuncional en medicina y en la alimentación, que presenta una variedad de híbridos. En el Perú, la variedad Hass se cultiva exclusivamente para la exportación mientras que las variedades Fuerte y Nabal, tienen una gran demanda en el mercado interno peruano (Armando, 2019).

Según el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), la exportación de palta Hass es uno de los rubros más importantes y de gran crecimiento económico para el Perú, donde el país ha logrado ubicarse como el segundo exportador más grande del mundo. En la *Figura 1*, se muestra la evolución de la exportación de paltas peruanas entre 2001 y 2018, donde al 2018 se estima una exportación de 359 mil toneladas, con una tasa de crecimiento de un 45% respecto al año 2017 y un valor de 716 millones de dólares, lo que significa un incremento del 23% con respecto al 2017, siendo sus principales mercados Holanda, Estados Unidos y España (Armando, 2019).

La producción de paltas en el Perú cuenta con una tasa de crecimiento promedio anual de 32%, y del total un 95% se destina para la exportación. Por este crecimiento y demanda del mercado nace la importancia de garantizar calidad en los productos que se exportan, para que sean apreciados y obtengan mejores precios en cualquier mercado extranjero, además de entrar a más mercados y cumplir con los estándares del mercado internacional, mejorando así la competitividad (Armando, 2019).

Figura 1. Gráfico de evolución de las exportaciones de paltas peruanas.

Adaptado de “La Situación del Mercado Internacional de la Palta”, por Armando, 2019.

Dada la importancia que la exportación de paltas representa, es de vital necesidad para las empresas agroexportadoras, como la empresa Agroindustrias Verdeflor S.A.C., cumplir con ciertas garantías y certificados de calidad como son: el GLOBALGAP (Good Agricultural Practice) que abarca los reglamentos y controles para la ejecución de Buenas Prácticas Agrícolas; y la “Norma Internacional para el Aguacate” (CODEX STAN 197-1995), que exige los requisitos de calidad y madurez mínimos tolerados. La empresa también cumple con el certificado del Sistema de Análisis de Peligros y de Puntos Críticos de Control (HACCP), lo que le da autorización para la exportación de frutas a nivel internacional (Verdeflor, 2019).

La empresa Verdeflor S.A.C. con RUC 20386367664, empaca y comercializa principalmente paltas Hass, Fuerte y Nabal, además de otras frutas como granadas, higo y mango, siendo sus principales clientes: Reino Unido, Francia, España, Bélgica, Holanda, Alemania, Canadá y el resto de América (Verdeflor, 2019).

Para ello, Verdeflor sigue el proceso productivo mostrado en la *Figura 2* en el cual emplean a más de 260 trabajadores, desde la recepción de las paltas, pasando por la clasificación hasta terminar en el almacenamiento y despacho (Verdeflor, 2019).

Figura 2. Actividades y proceso productivo de Verdeflor.

Adaptado de “Agroindustrias Verdeflor”, por Verdeflor, 2019.

Luego del proceso de lavado, desinfección y secado, en el proceso 5 de selección, se clasifican las paltas Hass según sus índices de calidad, lo que incluye rozamiento, quemaduras y manchas negras. Esta selección se realiza de forma manual, donde la empresa emplea de 6 a 8 operarios en épocas de alta producción donde trabajan bajo un régimen agrario de aproximadamente 15 horas por día. Por su naturaleza manual, alta subjetividad y error humano, se traduce a un dato estadístico de la empresa de 5 a 8% de paltas mal clasificadas, dependiendo de la temporada.

Adicionalmente, la cantidad de operarios se contrata dependiendo de las temporadas, lo que ocasiona rotación de personal. Esto es un problema debido a que no se mantienen los mismos operarios que ya cuentan con la experiencia de previas temporadas, lo cual se agrava en temporadas de alta producción.

Otra consecuencia del procesamiento manual de control de calidad que la empresa emplea actualmente es no poseer una base de datos adecuada de los registros de calificación de sus proveedores de paltas Hass, lo que se traduce en un desorden de los lotes de producción.

Lo anteriormente expuesto se traduce en un alto porcentaje de error en la etapa de selección, ya sea por paltas mal clasificadas producto de la subjetividad o cambio de personal a través de las temporadas. Por ello, aparece la necesidad de desarrollar un sistema de selección de paltas Hass automatizado.

1.1.2 Definición del problema

Para definir el problema planteado se presentará el árbol del problema, el problema en general y el problema ingenieril.

1.1.2.1 Árbol del problema

En la *Figura 3* se presenta el diagrama del árbol del problema, donde se indica las causas primarias, secundarias, consecuencias principales y secundarias que traen consigo el problema principal.

1.1.2.2 Problema general

Errores en la selección de paltas Hass empleado en la empresa Agroindustrias Verdeflor S.A.C.

1.1.2.3 Problema ingenieril

¿Qué consideraciones tecnológicas e ingenieriles de diseño mecatrónico se tienen que tener en cuenta, a fin de desarrollar un sistema automático de selección de paltas Hass que satisfaga los requerimientos de confiabilidad, velocidad de respuesta y sencillez de operación con el objetivo de minimizar el porcentaje de error en la selección?

Figura 3. Árbol del problema.

Elaboración propia.

1.2 Estado del arte

En el sector agroindustrial, los métodos utilizados para el control de calidad en la etapa de selección son de forma artesanal en la mayoría de casos y pocas empresas utilizan sistemas complejos de alto costo que se adquieren de otros países.

A continuación, se describen los productos existentes que se pueden considerar una alternativa de solución parcial a la situación problemática planteada, indicando sus ventajas y desventajas. Además, se señalan estudios científicos que brindan información y métodos para enfrentar el problema principal.

1.2.1 Productos y soluciones existentes

1.2.1.1 Spectrim

Spectrim es una solución de clasificación modular de la empresa Compac Sorting Equipment, con sede en Nueva Zelanda, que incorpora avances en la detección de defectos, la clasificación y la facilidad de uso del operador. La plataforma ha sido diseñada para automatizar tareas complejas que normalmente tienen que hacer los operadores manualmente mediante algoritmos avanzados de aprendizaje. Además, el sistema tiene la capacidad de tomar hasta 500 imágenes de alta definición de una pieza de fruta a su paso por la máquina a una velocidad de 12 piezas de fruta por segundo, lo que asegura detectar los defectos externos más difíciles de encontrar. En la *Figura 4* se visualiza la plataforma Spectrim, el cual es utilizado para clasificar paltas, manzanas, peras, kiwi y otras frutas (Compac Sorting Equipment, 2019; Jones, 2016).

Figura 4. Plataforma Spectrim.

Adaptado de “The Spectrim Story”, por Compac Sorting Equipment, 2019.

Ventajas:

- Alta velocidad de respuesta. Toma 500 imágenes de una fruta al pasar por el sistema.
- Gran número de frutos analizados. 12 frutas por segundo por línea.
- Potente sistema de detección que es fácil de usar para el operario. Genera un modelo 3D de la fruta.
- El uso de un sistema con algoritmos de aprendizaje automático, para que se acomode a las especificaciones de la empresa que lo compra.

Desventajas:

- Escasa disponibilidad. Se debe hacer pedido con anticipación y proceso demora entregar.
- Alto costo de implantación por tiempo invertido en el tratamiento de datos.
- Un sistema de tamaño considerable, comparando a fajas de la empresa.
- Adquisición de plataforma es sumamente costosa, aproximadamente 450,000.00 dólares.

1.2.1.2 Combisort

Combisort, de la empresa Greefa, es un sistema de clasificación especialmente adecuado para frutas redondas y alargadas. Fue introducida en el 2010 y tiene implementado 10 líneas donde 5 frutas pueden ser clasificadas por segundo por línea. El sistema puede medir diferentes factores de un producto; por ejemplo: tamaño, color, peso, densidad y su calidad externa. En la *Figura 5* se observa el Combisort, el cual es utilizado para clasificar manzanas, peras, tomates, mangos, naranjas, paltas y otras frutas (Greefa, 2019).

Figura 5. Sistema Combisort.

Adaptado de “Combisort”, por Greefa, 2019.

Ventajas:

- Alta velocidad de respuesta. Toma 60 imágenes de una fruta al pasar por el sistema.
- Gran número de frutos analizados. 5 frutas por segundo por línea.
- Capacidad de conectarse a un sistema ERP. Con ello se obtiene control desde el nivel administrativo.
- Genera un modelo 3D de la fruta para una detección ideal.

Desventajas:

- Alto costo en la implementación del producto, aproximadamente 400,000.00 dólares.
- Tedioso proceso para incorporar el producto en línea.
- Un sistema de tamaño considerable, comparando a fajas de la empresa.

1.2.2 Publicaciones científicas / ingenieriles

Los trabajos de investigación que se presentan a continuación son aquellos enfocados al tratamiento de paltas previa exportación y al análisis automático en los procesos de selección.

Kassim et al. (2013), en la publicación titulada “A review on postharvest handling of avocado fruit” en la revista African Journal of Agricultural Research, presenta un estudio de los efectos del tratamiento pre y post cosecha en la calidad de paltas. El artículo menciona diferentes factores para analizar la calidad del fruto, los cuales incluyen propiedades físicas

y sensoriales. Ejemplos de propiedades físicas son el color de la cáscara, su firmeza, textura y trastornos fisiológicos. La propiedad sensorial analizada fue el sabor el cual es un componente importante de la calidad comestible de la palta. Se demostró que los factores tienen un papel significativo en el desarrollo de postcosecha del fruto, y por ende en la exportación de ellos mismos. Sin embargo, las propiedades analizadas reaccionan de diferentes formas dependiendo de qué tipo de palta es. Por lo que no se puede concluir que todos estos factores son cruciales para el análisis de las paltas Hass (Kassim, Workneht, & Bezuidenhout, 2013).

Arzate-Vasquez et al. (2011), en la publicación titulada “Image Processing Applied to Classification of Avocado Variety Hass (Persea Americana Mill.) During the Ripening Process” en el artículo Food Bioprocess Technol, presenta una metodología para analizar el proceso de maduración en paltas Hass mediante procesamiento de imágenes. Para obtener la mejor aproximación, se tuvieron que examinar parámetros de color, textura, firmeza y pérdida de masa. Características de las imágenes obtenidas proporcionan una buena descripción del proceso de maduración. Esto se refleja mediante los análisis de color y textura, que dieron una clasificación correcta al 80.5% de sus muestras; no obstante, este proceso se ha hecho especialmente para el uso de laboratorio, no en línea como se requiere en la empresa Verdeflor y se utilizaron 26 muestras, lo que es muy poco para dar confiabilidad (Arzate et al., 2011).

Moreno et al. (2013), en la publicación titulada “Image analysis for automatic feature estimation of the Mangifera indica fruit” en el artículo Ingeniería y Desarrollo, presenta una metodología para determinar características de un mango como el peso, grado de madurez y nivel de manchas a partir de un conjunto de imágenes obtenidas del fruto. Para poder determinar las principales características mediante la imagen, se siguieron una serie de pasos: preprocesamiento, la estimación del peso, grado de maduración y la medición de puntos. En cada uno de los pasos, se utilizó el software Matlab y las funciones estadísticas del Toolbox. Los métodos para la clasificación basada en color y el nivel de manchas mostraron una efectividad de 96.47% y 90.66% respectivamente. Sin embargo, todos los métodos no son tan confiables debido a que la estimación de los puntos depende en gran medida de la posición de la fruta durante la adquisición de la imagen, lo que indica que no se está dando una proyección exacta de la fruta (Moreno, Ballesteros, & Sánchez, 2013).

Roa et al. (2014), en la publicación titulada “Automated system for classifying Hass avocados based on image processing techniques” en el Communications and Computing (COLCOM), 2014 IEEE Colombian Conference, presenta un sistema basado en procesamiento de imágenes para la clasificación de paltas después de haber sido cosechadas. El método propone un algoritmo de procesamiento sobre el modelo de color RGB para hacer la segmentación, detección y clasificación correcta de madurez que presenta la palta. Los resultados mostrados fueron los esperados llegando a un 87.85% de precisión al clasificar el fruto en tres diferentes grupos, verde, maduro o muy maduro. No obstante, para evaluar el algoritmo implementado, solo se utilizaron 90 paltas, lo cual hace que los resultados no sean tan fiables para una empresa que utiliza un monto mucho mayor para sus pruebas (Roa & Meneses, 2014).

1.3 Justificación

Se justifica el desarrollo de proyecto planteado por los siguientes motivos.

1.3.1 Justificación de la solución propuesta

La solución propuesta resuelve la situación problemática planteada debido a que:

- Reducirá la probabilidad de error humano, ya que este no intervendrá en el análisis de detección de calidad de las paltas.
- Propondrá una solución comercial al alcance de diversas empresas productoras de paltas Hass, ya que la solución será hecha a medida de uno de los principales exportadores de paltas, lo cual podría adaptarse a la problemática de otras empresas peruanas del mismo rubro.
- Disminuirá el número de lotes observados y de paltas mal clasificadas, ya que este proceso será automático debidamente validado.
- Disminuirá la necesidad de personal especializado, ya que el proceso de detección será automatizado y se requerirá menor personal capacitado para la tarea.

1.3.2 Justificación ingenieril

El desarrollo de la solución propuesta implica resolver diferentes problemas de ingeniería como:

- **Diseño del recinto de adquisición de imágenes**, este deberá tener la capacidad de soportar las cámaras asignadas, además de brindar una fuente de iluminación adecuada para la captura de imágenes.
- **Diseño del sistema de captura**, el cual sincroniza la captura de la imagen con la detección de la palta, evitando el desenfoque y obtener una buena calidad de imagen.
- **Diseño de un algoritmo de procesamiento de imágenes**, capaz de reconocer y clasificar de forma correcta y rápida el índice de calidad de las paltas mediante el procesamiento de imágenes.
- **Diseño mecánico prototipo** del proyecto el cual incluye la banda transportadora, el motor, el soporte y la forma de la estructura, para el desplazamiento y posicionamiento de los frutos.
- **Diseño de control e instrumentación** el cual se requiere para integrar los sensores y actuadores para la clasificación y detección de paltas automáticamente.

Los cursos de la carrera que han brindado la mayor base de conocimiento para poder resolver los problemas ingenieriles son:

- Procesamiento Avanzado de Señales e Imágenes.
- Electrónica Industrial.
- Automatización Industrial.
- Sistemas CAD/CAM.
- Manufactura Integrada por Computador.

Por tanto, el proyecto será desarrollado con todas las habilidades y conocimientos adquiridos durante los estudios universitarios tal cual lo recomienda la acreditadora Accreditation Board for Engineering and Technology (ABET).

1.3.3 Justificación económica

Se estima que el producto final a generar podría ser más simple y económico que las soluciones tecnológicas integrales encontradas en el mercado actual, a pesar de ofrecer las

mismas ventajas, opciones de usuario y de no contar con mucha competencia en el mercado. En la *Tabla 1* se muestra la comparación de un aproximado en costos de la solución propuesta con diez líneas de procesamiento y las alternativas, el cual se obtuvo al consultar a los proveedores y empresas agrícolas.

Tabla 1
Comparación de alternativas de soluciones

Soluciones	Costo Total
Solución propuesta	\$. 100,000.00
Spectrim	\$. 450,000.00
Combisort	\$. 400,000.00

Nota: Se han obtenido los costos mediante consultas a los proveedores y empresas. Elaboración propia.

El producto propuesto presenta un gran mercado potencial de ventas, pues es un proyecto orientado a la agroindustria y en especial a las empresas exportadoras de palta Hass, puesto que no existen muchas soluciones comerciales y económicas. En la *Tabla 2* se muestran los principales exportadores de paltas en el Perú del año 2018, quienes estarían interesados en el proyecto. Adicionalmente, en el país existen otras 180 empresas productoras de paltas Hass las cuales también representan un potencial comprador (Gestión, 2019; Sistema Integrado de Información de Comercio Exterior (SIICEX), 2018).

El desarrollo de la solución prototipo, con el objetivo de demostrar que sí puede ser utilizado en la empresa con las condiciones adecuadas, implica una inversión estimada de S/. 9496.89, un monto que será afrontado en su totalidad por los autores del proyecto, el cual se detalla más adelante.

Tabla 2
Principales empresas exportadoras de paltas Hass

Empresas Exportadoras de Paltas (en millones de US\$)	
Empresa	2018
Camposol S.A.	99
Sociedad Agrícola Drokasa S.A.	64
Avocado Packing Company S.A.C.	57
Agrícola Cerro Prieto S.A.C.	46
Camet Trading S.A.C.	36
Viru S.A.	28
Consorcio de Productores de Fruta S.A.	24
ASR Trading Sociedad Anónima Cerrada	20
Agroindustrias Verdeflor S.A.C.	18

Nota: Se visualiza a Verdeflor como una de las principales empresas exportadoras del Perú. Adaptado de “Estas son las 10 principales empresas exportadoras de palta del país”, por Gestión, 2019.

1.3.4 Justificación apoyo del cliente

Es un problema planteado directamente por la empresa Agroindustrias Verdeflor S.A.C. dedicada a la agroexportación de paltas Hass, Fuerte y Nabal, quien va a apoyar el proyecto en los siguientes aspectos:

- Posibilidad de hacer visitas a planta.
- Oportunidad de realizar pruebas con los frutos de paltas.
- Acceso a la línea de producción.

1.4 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos trazados para este proyecto.

1.4.1 Árbol de objetivos

En la *Figura 6* se muestra el árbol de objetivos propuesto.

1.4.2 Objetivo general

Desarrollar un sistema automático de selección de paltas Hass por sus índices de calidad de rozamiento, quemaduras y manchas negras para la empresa Agroindustrias Verdeflor S.A.C.

1.4.3 Objetivos específicos

- Diseñar un recinto de calidad que permita una captura de imagen uniforme y que no sea afectado por perturbaciones exteriores. Indicador: Un recinto con un sistema de iluminación.
- Implementar un sistema de captura de imágenes que permita el análisis de las propiedades físicas del fruto. Indicador: Un sistema de adquisición de imágenes sincronizado con un sensor de proximidad óptico.
- Implementar un sistema de clasificación por procesamiento de imágenes capaz de categorizar las paltas según sus índices de calidad de rozamiento, quemaduras y manchas negras. Indicador: Sistema mecatrónico capaz de realizar la clasificación del producto según los índices de calidad mencionados.
- Desarrollar un prototipo mecánico que permita transportar las paltas desde el inicio del proceso hasta su selección. Indicador: Un sistema mecánico de transporte de paltas.
- Desarrollar un software capaz de identificar los índices de calidad (rozamiento, quemaduras y manchas negras) de las paltas Hass, lo que indica los frutos hábiles para exportación. Indicador: Sistema de procesamiento de imágenes diseñado con algoritmos que cuantifiquen datos obtenidos de factores de calidad para exportación.
- Validar los resultados de las pruebas con los expertos de Agroindustrias Verdeflor S.A.C. Indicador: Acta de validación de la solución propuesta firmada por el gerente de planta de Agroindustrias Verdeflor S.A.C.
- Demostrar que solución propuesta es factible para un desarrollo macro industrial para el uso de la empresa. Indicador: Sistema prototipo capaz de solucionar la situación problemática, integrando los objetivos específicos anteriormente mencionados.

Figura 6. Árbol de objetivos.

Elaboración propia.

1.5 Descripción de la solución propuesta

A continuación, se presentará en la *Figura 7* el diagrama de bloques pictórico de la solución prototipo propuesta y en la *Figura 8* se muestra el gráfico 3D de proyecto prototipo, en el cual la palta inicia su recorrido colocada en la faja transportadora, luego se captura una foto que será procesada por el algoritmo desarrollado, para finalmente ser clasificada.

Figura 7. Diagrama de bloques pictórico de la solución prototipo.

Elaboración propia.

Figura 8. Gráfico 3D del hardware propuesto.

Elaboración propia.

1.5.1 Funcionamiento

A continuación, se mencionan los pasos a seguir en el sistema autónomo de control de calidad de paltas Hass.

1. Encender el sistema: Una vez conectado todos los equipos adecuadamente, se procede a dar inicio al proceso mediante un pulsador “START” conectado a controlador.
2. Colocar las paltas en la banda transportadora de manera manual antes de pasar por el recinto.
3. Se detecta la palta en el recinto mediante un sensor óptico y se procede a capturar la imagen.
4. Se procesa la imagen mediante un algoritmo que detecta los índices de calidad.
5. Se manda la información al controlador con la decisión de clasificación para activar el actuador correspondiente.
6. Se detecta la recepción de las paltas y se genera el reporte. Se repite el proceso desde el paso 2 hasta presionar el pulsador “STOP”.

1.5.2 Limitaciones de la solución

Este prototipo de sistema automático de selección por sus índices de calidad tiene limitaciones tanto tecnológicas como académicas, las cuales se describen a continuación:

- Se desarrollará un prototipo de la solución propuesta que analizará una línea de producción de palta, con el fin de demostrar su viabilidad en desarrollar una solución macro industrial.
- La detección de índices de calidad mediante procesamiento de imágenes RGB es un método de medición empírica, el cual implica ser calibrado según el criterio de la empresa.
- Se utilizará software proporcionado por la universidad para realizar las pruebas y validaciones del sistema propuesto.

- La velocidad del sistema dependerá de la capacidad del algoritmo y del computador. Sin embargo, igual cumplirá con la velocidad requerida por la empresa.
- El prototipo requerirá de una persona que coloque las paltas en la banda transportadora.

1.5.3 Resultados esperados

Para satisfacer la necesidad planteada se espera que el producto cumpla los siguientes resultados:

- Un sistema automático capaz de detectar y clasificar las paltas Hass según sus índices de calidad de rozamiento, quemaduras y manchas negras.
- Reducir probabilidad de error de la empresa a menos de 5% al clasificar las paltas defectuosas.
- Mejora en la línea de producción.
- Alto grado de concordancia entre los resultados adquiridos mediante el algoritmo diseñado y los obtenidos por el criterio de los expertos de la empresa Verdeflor.
- Un producto adaptable y reproducible a una escala macro para empresas del rubro.

1.6 Aplicaciones y usuarios potenciales

A continuación, se presenta las posibles aplicaciones del producto final como sus potenciales usuarios.

1.6.1 Aplicaciones

La aplicación directa de este proyecto es el control de calidad automatizado de paltas Hass. Sin embargo, esta podría ser utilizada en otras variedades de paltas o frutos afines como: la palta Fuerte, manzanas, peras, etc.

Como una aplicación indirecta se podría considerar la detección del calibre de la palta.

1.6.2 Usuarios potenciales del producto

El principal usuario potencial del proyecto sería la empresa Agroindustrias Verdeflor S.A.C; a su vez otras empresas nacionales dedicadas a la agroindustria también serían potenciales

usuarios, como se muestra en la *Tabla 2*. Otros usuarios indirectos serían las empresas productoras de paltas Fuerte, Nabal, Ettinger, Zutano, etc. u otros frutos afines.

1.7 Viabilidad

A continuación, se presenta el estudio de la viabilidad de la solución planteada.

1.7.1 Viabilidad técnica

Para el desarrollo del proyecto, se requerirán principalmente conocimientos de procesamiento de imágenes, instrumentación, automatización industrial y manufactura. Los conocimientos se han desarrollado en los cursos mencionados a continuación:

- Procesamiento de imágenes: Procesamiento Avanzado de Señales e Imágenes, Programación Avanzada de Computadoras.
- Instrumentación: Electrónica Industrial, Sensores y Actuadores.
- Automatización Industrial: Sistemas de Automatización Industrial, Control de Procesos.
- Manufactura: Sistemas CAD/CAM, Mandos Neumáticos e Hidráulicos.

Se contará con acceso a equipamiento e infraestructura de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Además, la compra de los materiales y componentes se realizarán en distribuidores locales, de fácil acceso y entrega rápida ya que todos los equipos son comerciales.

Adicionalmente, se cuenta con el apoyo técnico de los especialistas de la empresa Verdeflor y acceso a planta de producción.

Finalmente, se concluye que técnicamente el proyecto es viable debido a que se tiene los conocimientos necesarios para su desarrollo, se cuenta con el apoyo de la universidad y empresa, y la adquisición de materiales no presenta mayores inconvenientes.

1.7.2 Viabilidad económica

El costo estimado del producto prototipo es de S/. 9496.89, monto que será afrontado por los autores del proyecto. El aporte no monetario de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas se estima a S/. 7990.00 y el coste monetario de un producto final con diez líneas

de procesamiento para una empresa se estima en \$100,000.00, menos de la mitad del costo de un producto similar del extranjero.

El producto propuesto presenta un gran mercado potencial, pues es un proyecto orientado a la agroindustria y en especial a las empresas exportadoras de palta Hass las cuales se visualizan en la *Tabla 2*.

1.7.3 Viabilidad operativa

El requerimiento operativo para el funcionamiento del producto es una conexión eléctrica de 220VAC para la alimentación de todo el sistema.

En cuanto al espacio necesario para la instalación del producto depende del usuario final ya que la instalación es adaptable a las necesidades de la empresa. El prototipo presenta unas medidas de 1.80x0.80m.

En cuanto a condiciones de operatividad, se garantiza un eficiente trabajo en la costa del Perú.

Además, el proyecto cumplirá con los requisitos planteados por la institución sin demasiadas complicaciones. Por tanto, se puede concluir que es viable operativamente.

1.7.4 Viabilidad social

Si bien es cierto la solución propuesta reemplazará el trabajo de 6 a 8 personas, estas pueden ser reubicadas y a largo plazo, con la mejora instalada y un crecimiento de la empresa, se podrá dar trabajo a una mayor cantidad de personas en las diversas áreas de la empresa, como en las etapas de recepción, empaque, paletizado, almacenado o despacho.

1.8 Conclusiones y comentarios

Una vez conocidos los aspectos introductorios del proyecto descritos en este capítulo, los siguientes serán desarrollados como se describe a continuación. En el capítulo 2, se definirán todos los conceptos necesarios para que el lector pueda entender técnicamente lo desarrollado en esta tesis. En ese sentido, se detallarán los conceptos básicos de la palta Hass y sus índices de calidad. Asimismo, se desarrollará el marco teórico necesario de mecánica, instrumentación, procesamiento digital de imágenes y fundamentos de validación. En el capítulo 3, se describe el hardware necesario y utilizado para un correcto sistema de selección. En el capítulo 4, se describe la filosofía de control, el software y los algoritmos

de procesamiento de imágenes desarrollados en el proyecto, a partir de los fundamentos detallados en el capítulo 2. Finalmente, en el capítulo 5 se muestran las pruebas realizadas, los resultados obtenidos y la validación final del sistema; así como el reporte económico de todo el proyecto, recomendaciones para trabajos futuros y las conclusiones.

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos básicos

2.1.1 La palta o aguacate Hass

La palta y sus aceites derivados son ampliamente utilizados como productos de belleza tanto para la piel como para el cabello; no sólo en la preparación de alimentos, sino como medicamento en problemas dermatológicos y en variados productos estéticos. Sus ácidos grasos son fuente de energía y ayudan a regular la temperatura corporal, a proteger órganos vitales como el corazón y los riñones, y a transportar las vitaminas liposolubles (A, D, E, K) facilitando su absorción (Armando, 2019).

La palta “Hass” es el principal cultivo comercial en el mundo, resultado del cruce de progenitores desconocidos, pero más cercanos al guatemalteco. La raza mexicana les da una menor adaptación a climas más templados, por lo que le confiere la posibilidad de ubicarse en una gran amplitud de altitudes (Armando, 2019).

El fruto de 170 gramos a 350 gramos, con contenido de aceite de 23,7%, cáscara coriácea, rugosa, color púrpura oscuro al madurar y de semilla pequeña, tiene un grado de conservación y de resistencia al transporte mayor a sus similares. La palta Hass en la costa central se cosecha de noviembre a diciembre, y en la selva, en épocas más tempranas. En la *Figura 9* se muestra una palta Hass (Armando, 2019).

Figura 9. Palta Hass.

Adaptado de “Paltas. Requisitos”, por INDECOPI, 2014.

2.1.2 Índices de calidad

A continuación, se mencionan los principales índices de calidad de la palta que toma en cuenta la empresa Agroindustrias Verdeflor al pasar por el proceso de preselección.

2.1.2.1 Daños por rameado, rozadura o raspado

Alteración de la piel, que se manifiesta con una superficie áspera o rugosa al tacto o un reticulado característico, de color marrón claro, originado por el rozamiento de las hojas con las paltas o de paltas entre sí, por acción del viento. La *Figura 10* muestra un ejemplo del daño (Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI), 2014).

Figura 10. Daño por rameado entre paltas Hass.

Adaptado de “Paltas. Requisitos”, por INDECOPI, 2014.

2.1.2.2 Daños por quemaduras

Pigmentación de la epidermis de la palta de color amarillo oscuro y rojo en caso de quemadura por sol y negro por quemadura al frío, ocasionalmente con depresión y compromiso de la pulpa, por sobre exposición al sol o al frío. La *Figura 11a* y *Figura 11b* muestran ejemplos de daño de quemaduras por sol y frío respectivamente (Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI), 2014).

(a) Quemadura por sol

(b) Quemadura por frío

Figura 11. Daño por quemaduras en palta Hass.

Adaptado de “Paltas. Requisitos”, por INDECOPI, 2014.

2.1.2.3 Daños por manchas o lenticelas

Diversas alteraciones en la superficie de la piel, sin compromiso de la pulpa, que se manifiestan como un cambio de color negro en la zona afectada. En la *Figura 12* se muestra un ejemplo de este tipo de daño (Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI), 2014).

Figura 12. Daño por manchas negras en palta Hass.

Adaptado de “Paltas. Requisitos”, por INDECOPI, 2014.

2.2 Principios de mecánica

2.2.1 Velocidad tangencial y angular

La velocidad tangencial, V_t , de un objeto es igual a la velocidad angular por el radio, como se aprecia en la *ecuación 1*. Se llama tangencial porque es tangente a la trayectoria y su

unidad es centímetros por segundo (cm/seg). En este proyecto se usa para hallar la velocidad tangencial en la etapa de transporte (Norton, 2011).

$$V_t = w \times r = w \times \frac{d}{2} \quad (1)$$

Dónde:

- “ V_t ”: *Velocidad tangencial.*
- “ w ”: *Velocidad angular.*
- “ r ”: *Radio.*
- “ d ”: *Diámetro.*

2.2.2 Engranajes

Los engranajes son mecanismos que transfieren potencia de un componente a otro dentro de una máquina. Los engranes transmiten torque y velocidad angular en variedad de aplicaciones, y existen muchos tipos de engranes, por ejemplo: engranajes cilíndricos (de dientes rectos y helicoidales), engranajes cónicos y engranajes de tornillo sinfín. La ecuación 2 muestra la relación del diámetro de un engrane, en centímetros, con su velocidad angular, en radianes por segundo (Norton, 2011).

$$\frac{d_{E1}}{d_{E2}} = \frac{w_{E2}}{w_{E1}} \quad (2)$$

Dónde:

- “ d_{E1} ”: *Diámetro de engrane 1.*
- “ d_{E2} ”: *Diámetro de engrane 2.*
- “ w_{E1} ”: *Velocidad angular del engrane 1.*
- “ w_{E2} ”: *Velocidad angular del engrane 2.*

2.2.3 Normas ISO 128 y 129: dibujos técnicos

La Organización Internacional de Normalización (ISO) es una organización para la creación de estándares internacionales compuesta por diversas organizaciones nacionales de estandarización. La norma ISO 128 es un estándar internacional sobre los principios

generales de presentación de dibujos técnicos, específicamente la representación gráfica de objetos en dibujos técnicos. La norma ISO 129 es un estándar internacional sobre los principios de dibujos técnicos, centrado en la indicación de dimensiones y tolerancias (International Organization of Standardization (ISO), 2003; International Organization of Standardization (ISO), 2018).

2.2.4 Normas IEC 60617

La norma del International Electrotechnical Commission (IEC) 60617 es una norma a nivel internacional que se ha adoptado a nivel europeo, que brinda los símbolos gráficos correspondiente al generar un esquema eléctrico. La norma cuenta de 13 diferentes partes, donde se describen los elementos de símbolos, conductores y dispositivos de conexión, componentes pasivos básicos, semiconductores y tubos electrónicos, entre otras descripciones para la correcta implementación de un diagrama eléctrico (International Electrotechnical Commission (IEC), 2012).

2.2.5 Normas ANSI/ISA-S5.1 y 5.4

La norma ANSI/ISA-S5.1 es una norma a nivel internacional centrada en la identificación y símbolos de instrumentación. Esta norma establece un medio uniforme para representar e identificar instrumentos, sistemas de instrumentación y sus funciones, presentando un sistema de designación que incluye esquemas y símbolos gráficos (International Society of Automation (ISA), 2009).

La norma ANSI/ISA-S5.4 informa sobre los diagramas de lazo de instrumentación. Esta norma proporcionará pautas para la preparación y uso de diagramas de bucle de instrumentos en el diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y modificación de los sistemas de instrumentación (International Society of Automation (ISA), 1991).

2.3 Principios de instrumentación

2.3.1 Sensores ópticos

El sensor óptico tiene la función de detectar todo tipo de objeto, independiente del material, y consiste en la emisión y recepción de luz. Hay diferentes tipos de sensores ópticos, como los sensores de barrera, sensores de retroreflexión (autoreflex) y difuso. Para este proyecto de investigación, se escogió el sensor de retroreflexión debido a que cuenta con amplio rango de detección, no necesita un receptor externo y mejor fiabilidad dado que la luz es permanente (Torres & Jara, 2011).

Se adquirieron dos modelos de sensores, uno más idóneo para el recinto y el otro para la etapa de selección, las cuales se pueden visualizar en las *Figura 13a* y *13b* respectivamente. En el *Anexo D* se encuentran las hojas de datos de ambos sensores (Riko, 2017).

(a) Sensor RIKO PMF-R2NP1

(b) Sensor RIKO R3JK-R5KP2

Figura 13. Sensores ópticos autoreflex.

Adaptado de “R3JK – Retroreflective”, por Riko, 2017.

2.3.2 Cámara web

Una cámara web es una pequeña cámara digital que se encuentra conectada a una computadora, ya sea directamente o de manera inalámbrica, y permite captar imágenes. Las cámaras web varían por sus capacidades y características, por lo que para el proyecto se utilizan cámaras capaces de tomar fotos con mejor calidad en el movimiento de imágenes y cuenten con características que habiliten un mejor procesamiento de imágenes. Por ello, se adquiere la cámara C110 de marca Logitech y su hoja de dato se encuentra en el *Anexo D* (Tecnología & Informática, 2018).

2.3.2.1 Campo de visión

También conocido por sus siglas en inglés FOV (field of view), se refiere al ángulo abarcable a través del cual un sensor, en este caso una cámara, puede detectar la radiación electromagnética que se desee capturar. Según el tipo de lente utilizado varía el tamaño de esa porción adquirida. En la *ecuación 3* se ve cómo se calcula el FOV (Fulton, 2017).

$$\alpha = 2 \times \tan^{-1}\left(\frac{L1}{HR}\right) \quad (3)$$

Dónde:

- “ α ”: Ángulo de campo de visión.

- “L1”: *Longitud horizontal del campo de visión.*
- “HR”: *Altura entre la cámara y el campo de visión.*

2.3.3 Iluminación LED

Un LED (Lighting Emitting Diode) es un diodo semiconductor capaz de emitir luz y hoy en día han evolucionado a no sólo brindar luces de color rojo, verde o amarillo, sino se ofrecen arreglos de LEDs en luz blanca y suficiente para iluminar una habitación. Ventajas de la iluminación LED son su mayor vida útil, eficiencia energética, iluminación regulable y mínimo mantenimiento. Además, al ser dispositivos pequeños, son manejables para arreglar y colocar a disposición del usuario (Santamaria, 2012).

2.3.4 Motores de corriente alterna

El motor AC es una máquina constituida por dos elementos fundamentales: el rotor y el estator. El primero constituye la parte móvil del motor y proporciona el par necesario para mover la carga. Por otro lado, el estator representa la parte fija de la máquina, cuya función es suministrar el flujo magnético que será utilizado por el bobinado del rotor para efectuar su movimiento rotatorio (De Vandelvira, 2011).

De esta forma, en los motores AC circula una corriente alterna a través del bobinado, por lo cual el motor gira a la frecuencia de la forma senoidal. Cabe resaltar que los motores AC más utilizados son los asíncronos de inducción (De Vandelvira, 2011).

2.3.5 Variador de frecuencia

Es un dispositivo utilizado en el control de la velocidad para motores de inducción de AC, el cual se alimenta con un voltaje y una frecuencia constantes, y entrega al motor un voltaje y frecuencia variables.

Los equipos más modernos utilizan IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistors) inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobre corriente, sobre tensión, baja tensión, cortocircuitos y puesta a marcha del motor (Araya, 2011).

2.3.6 Guardamotor

Los guardamotores están diseñados para accionar y proteger motores contra sobrecargas, cortocircuitos y falta de fase. Posee alta capacidad de interrupción, permitiendo utilización en instalaciones con elevado nivel de corriente de cortocircuito. El guardamotor adquirido,

MS116 de la marca ABB, se puede apreciar en la *Figura 14* (Asea Brown Boveri (ABB), 2013).

Figura 14. Guardamotor MS116.

Adaptado de “Capítulo 1: Distribución de Potencia y Protección Eléctrica”, por ABB, 2013.

2.3.7 Interruptor termomagnético

Los interruptores automáticos modulares protegen las instalaciones de sobrecargas y cortocircuitos, garantizando fiabilidad y seguridad para las operaciones (ver *Figura 15*) (Asea Brown Boveri (ABB), 2013).

Figura 15. Interruptor termomagnético S262M.

Adaptado de “Capítulo 1: Distribución de Potencia y Protección Eléctrica”, por ABB, 2013.

2.3.8 Norma Técnica Peruana 370.304

Esta Norma Técnica Peruana establece la aplicación de las medidas para garantizar la seguridad mediante la verificación inicial, previa a la puesta en servicio, de las instalaciones eléctricas en edificios y en establecimientos industriales. Esta norma se utiliza para el diseño e implementación del tablero eléctrico y verificación de los componentes instalados dentro

del tablero (Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI), 2002).

2.3.9 Controlador lógico programable

Un controlador lógico programable (Programmable Logic Controller PLC) es un dispositivo electrónico de control desarrollado para realizar trabajos de automatización, especialmente centrado en procesos de diferentes industrias. Realiza diferentes funciones como secuenciales, lógicas, operaciones aritméticas, entre otros para controlar procesos a través de entradas/salidas digitales o analógicas (Centro de Tecnología e Innovación (CTIN), 2013).

Para el proyecto, se requiere control de salidas y entradas digitales con posibilidad de expandir, por lo que se decidió en adquirir el PLC Siemens S7-1200 (ver *Figura 16*) (Siemens, 2012).

Figura 16. PLC Siemens S7-1200.

Adaptado de “S7-1200 Programmable Controller: System Manual”, por Siemens, 2012.

2.3.10 Programación ladder (escalera)

Existen distintos tipos de lenguaje de programación de un PLC, donde el más común es la programación tipo escalera o ladder. Los diagramas de escalera son esquemas de uso común para representar la lógica de control de sistemas industriales. Se le llama diagrama "escalera" porque se asemejan a una escalera, con dos rieles verticales (de alimentación) y "escalones" (líneas horizontales), en las que hay circuitos de control que definen la lógica a través de funciones. Un ejemplo de la descripción de la lógica Ladder se muestra en la *Figura 17*, donde las instrucciones de entrada se introducen a la izquierda e instrucciones de salida a la derecha (Kuphaldt, 2007).

Figura 17. Descripción lógica Ladder.

Adaptado de “Lessons In Electric Circuits, Volume IV”, por Kuphaldt, 2007.

2.3.11 Pistón de doble efecto

Los cilindros de doble efecto son aquellos que realizan tanto su carrera de avance como la de retroceso por acción del aire comprimido. Su denominación se debe a que emplean las dos caras del émbolo (aire en ambas cámaras), por lo que estos componentes pueden realizar trabajo en ambos sentidos. El pistón de doble efecto se puede visualizar en la *Figura 18* (Escalera & Rodríguez, 2015).

Figura 18. Cilindro de doble efecto.

Adaptado de “Actuadores Neumáticos”, por Escalera & Rodríguez, 2015.

2.3.12 Compresor

El compresor se define como aquella máquina de fluido que tiene la capacidad de aumentar la presión o flujo de un gas. El uso para aumentar presión puede ser directo como inflar neumáticos (llantas), limpiar piezas, despolvar, etc. o para accionar algún equipo como

sistema de lubricación neumática, equipos de perforación, válvulas de control, etc. Hay diferentes tipos de compresores, de desplazamiento positivo y dinámico (Starline, 2017).

2.3.13 Electroválvula

Una electroválvula, también conocida como válvula solenoide, es una válvula que abre o cierra el paso de un líquido o gas en un circuito. La apertura y cierre de la válvula se efectúa a través de un campo magnético generado por una bobina en una base fija que atrae el émbolo. Las electroválvulas tienen diferentes tipos de accionamiento: directa, indirecta, mixta y proporcional (Alta Tecnología de Vanguardia (Altec), 2017).

2.3.14 Unidad de mantenimiento (neumática)

Los dispositivos conectados en los diferentes puntos de un circuito neumático necesitan recibir aire con una presión uniforme y libre de impurezas. Además, muchos de estos dispositivos tienen elementos móviles que precisan ser lubricados.

La preparación del aire comprimido que consumen los dispositivos neumáticos conectados en diferentes puntos se realiza mediante las llamadas unidades de mantenimiento. Estas unidades están formadas por tres elementos diferentes: el filtro, el regulador y el lubricador; y tiene como objetivo detener las impurezas que arrastra el aire comprimido (polvo, polen, restos de pequeñas oxidaciones, etc.). En la *Figura 19* se muestran los equipos que componen la unidad de mantenimiento (Control Valves, 2018).

Figura 19. Unidad de Mantenimiento.

Adaptado de “Unidad de Mantenimiento”, por Control Valves, 2018.

2.4 Fundamentos del procesamiento digital de imágenes

2.4.1 MATLAB

MATLAB, abreviatura de Matrix Laboratory, es un software que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con su propio lenguaje de programación. Millones de ingenieros y científicos de todo el mundo usan MATLAB para analizar y diseñar sistemas y productos alrededor del mundo. Se utiliza para aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión artificial, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica y muchos otros campos (Mathworks, 2018).

2.4.2 Iluminación sobre objetos

Cuando la luz incide sobre un objeto, su superficie absorbe ciertas longitudes de onda y refleja otras. Sólo las longitudes de onda reflejadas podrán ser vistas por el ojo, por lo tanto, en el cerebro sólo se percibirán esos colores. En los colores que percibimos en un objeto hay que tener en cuenta también el objeto en sí, que tiene capacidad de absorber ciertas longitudes de onda y reflejar las demás (Niebla et al., 2010).

Consideremos una manzana "roja". Cuando es vista bajo una luz blanca, parece roja. Pero esto no significa que emita luz roja, que sería el caso de una síntesis aditiva. Si lo hiciese, seríamos capaces de verla en la oscuridad. En lugar de eso, absorbe algunas de las longitudes de onda que componen la luz blanca, reflejando sólo aquellas que el humano ve como rojas. Los humanos ven la manzana roja debido al funcionamiento particular de su ojo y a la interpretación que hace el cerebro de la información que le llega del ojo (Niebla et al., 2010).

2.4.3 Píxel

La palabra píxel deriva de la expresión "Picture Element", la cual traducida del inglés significa "elemento de imagen". El píxel constituye el elemento más pequeño de la imagen digital, y contiene un valor numérico el cual es la unidad de información básica de dicha imagen para una resolución espacial y nivel de cuantización dado. Dicho valor numérico puede ser solamente uno (imagen monocroma) o varios (imágenes a color) (Solomon & Breckon, 2011).

2.4.4 Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes puede ser definido como la ciencia que modifica las imágenes digitales por medio de un computador digital. Dichos cambios son usualmente hechos de manera automática y se basan en algoritmos diseñados cuidadosamente. Se resalta

este hecho para diferenciarlo del proceso por el cual se retoca una fotografía en los softwares de edición de fotografías, debido a que en dicho caso el proceso se hace de manera manual (Marques, 2011).

2.4.5 Modelos de color

Los modelos de color proporcionan varios métodos para definir los colores, y cada modelo define los colores mediante componentes de color específicos. Existen diversos modelos de color, como el RGB, YCbCr, HSV y YIQ (Gonzalez & Woods, 2017).

2.4.5.1 Modelo de color RGB (rojo, verde, azul)

Modelo en el cual se representa a cada color mediante la mezcla por adición de los tres componentes espectrales primarios: rojo, verde y azul. En la práctica, el modelo RGB es utilizado para monitores a color y una amplia gama de cámaras de video. Este modelo se basa en el sistema de coordenadas Cartesiano (Gonzalez & Woods, 2017).

2.4.5.2 Modelo de color YCbCr

Codificación no lineal del espacio RGB. El parámetro Y indica la luminancia, los parámetros Cb y Cr indican el tono del color: Cb ubica el color en una escala entre el azul y el amarillo, Cr indica la ubicación del color entre el rojo y el verde. El espacio YCbCr es una versión escalada y desplazada del espacio de color YUV. El parámetro Y representa la luminancia (es decir, información en blanco y negro), mientras que U y V representan la crominancia (es decir, información con respecto al color). Cb (Cr respectivamente) es la diferencia entre la componente azul (rojo, respectivamente) y un valor de referencia. En la práctica, generalmente se usa en los estudios de televisión europeos y en la compresión de imágenes (Molinero, 2010).

2.4.5.3 Modelo de color HSV

El modelo de color HSV utiliza el matiz (H, del inglés "Hue"), la saturación (S, del inglés "Saturation") y el valor (V, del inglés "Value") como componentes para definir los colores. El matiz describe el pigmento de un color y se expresa en grados para representar la ubicación del espectro de colores estándar. Por ejemplo, el rojo tiene 0 grados, el amarillo 60 grados, el verde 120 grados, el cian 180 grados, el azul 240 grados y el magenta 300 grados. La saturación determina si un color es vivo o apagado. Los valores de saturación varían de 0 a 100 y representan porcentajes (cuanto mayor es el valor, más vivo es el color). El valor o brillo determina la cantidad de blanco que contiene el color. Como ocurre con la

saturación, los valores de brillo varían de 0 a 100 y representan porcentajes (cuanto mayor es el valor, más brillante es el color) (Corel Corporation, 2012).

2.4.5.4 Modelo de color YIQ

El modelo YIQ se utiliza en las emisiones comerciales de televisión. Básicamente el YIQ es una recodificación del RGB utilizada por su eficacia en la transmisión y para mantener la compatibilidad con los estándares de televisión en blanco y negro. La componente Y del sistema YIQ, proporciona toda la información de vídeo que necesita un sistema de televisión monocromático. Además de tratarse de un estándar ampliamente difundido, la ventaja principal del modelo YIQ en el procesamiento de imágenes es que la luminancia (Y) y la información del color (I y Q) están desacopladas, así la importancia de este desacoplamiento radica en que la componente de luminancia de una imagen puede procesarse sin afectar a su contenido cromático (Molinero, 2010).

2.4.6 Vecindad de un píxel

Sea un píxel que pertenece a una imagen, (donde “x” representa a las filas e “y” las columnas), que tiene cuatro vecinos horizontales y verticales. Estos son denominados los 4 vecinos del píxel. Sus coordenadas se representan en la *ecuación 4* (Gonzalez & Woods, 2017):

$$\{I(x_0 - 1, y_0), I(x_0, y_0 - 1), I(x_0, y_0 + 1), I(x_0 + 1, y_0)\} \quad (4)$$

Dónde:

- “ x_0 ”: *Coordenada de fila.*
- “ y_0 ”: *Coordenada de columna.*

También se tiene a los cuatro vecinos en diagonal del píxel $I(x_0, y_0)$. Sus coordenadas se representan en la *ecuación 5*:

$$\{I(x_0 - 1, y_0 - 1), I(x_0 - 1, y_0 + 1), I(x_0 + 1, y_0 - 1), I(x_0 + 1, y_0 + 1)\} \quad (5)$$

Estos puntos junto a los cuatro vecinos de píxel se denominan los ocho vecinos del píxel (Gonzalez & Woods, 2017).

2.4.7 Etiquetado

El etiquetado es una de las tareas fundamentales más comunes que se encuentra presente en todas las aplicaciones del procesamiento de imágenes digitales. Para el caso de una imagen binaria, representada como una matriz de píxeles con valores 0 o 1, es el proceso de asignar la misma etiqueta a todos los elementos con valores iguales que poseen alguno de los tipos de conectividad definidos previamente (Samet & Tamminen, 1988).

En la *Figura 20*, se muestra un ejemplo de resultado del método de etiquetado. En la *Figura 20a*, se observa dos grupos de píxeles con diferente coloración, que al realizarles el método de etiquetado da como resultado dos objetos, cuyos valores de píxel han variado por una etiqueta. La *Figura 20b*, muestra la diferencia en los grupos, donde un grupo posee la etiqueta “1” y el otro grupo presenta la etiqueta “2” (Samet & Tamminen, 1988).

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) Imagen con dos grupos de píxeles diferentes

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	2	2	0	0	0	0
0	1	1	1	1	0	0	2	2	2	0	0
0	1	1	0	0	0	0	2	2	0	0	0

(b) Imagen con los dos grupos y sus debidas etiquetas

Figura 20. Ejemplo de etiquetado.

Elaboración propia.

2.4.8 Histograma

El histograma de una imagen digital, cuyos valores de intensidad se encuentran en el rango $[0, L-1]$, donde L es el valor máximo de tonalidades, es una función discreta expresada en la *ecuación 6*.

$$h(r_k) = n_k \quad (6)$$

Dónde:

- “ r_k ”: Valor de intensidad número k .
- “ n_k ”: Número de píxeles presentes en la imagen con dicho valor de intensidad.

En la *Figura 21*, se observa un ejemplo de la gráfica de un histograma de palta con rozamiento. En la abscisa se encuentran las tonalidades y en la ordenada el número de píxeles que presentan dicha intensidad (Gonzalez & Woods, 2017).

Figura 21. Histograma de imagen de palta con rozamiento.

Elaboración propia.

2.4.9 Transformación de intensidad

La transformación de intensidad puede variar las tonalidades de píxeles específicos sin alterar las tonalidades de los otros píxeles, siendo muy útil cuando se tiene diferentes tonalidades y se desea variar solo la tonalidad de algún conjunto de píxeles. Con ello se puede resaltar o variar su tonalidad, para presentar una mayor diferenciación con el grupo de píxeles que se desea extraer. En la ecuación 7 se aprecia la función de correspondencia relacionado a la transformación de intensidades (Gonzalez & Woods, 2017).

$$I_{out}(x,y) = \begin{cases} 255, & I_{in}(x,y) > ra_2 \\ 0, & I_{in}(x,y) < ra_1 \\ \frac{(I_{in}(x,y) - ra_1) \times (L - 1)}{ra_2 - ra_1}, & \text{otros casos} \end{cases} \quad (7)$$

Dónde:

- " $I_{out}(x,y)$ ": Imagen de salida de la transformación de intensidad.
- " $I_{in}(x,y)$ ": Imagen de entrada de la transformación de intensidad.
- " ra_1 ": Rango mínimo de umbralización.
- " ra_2 ": Rango máximo de umbralización.

2.4.10 Operaciones aritméticas con imágenes

Las operaciones aritméticas que involucran imágenes se realizan píxel a píxel entre dos o más imágenes. Como ejemplo, la resta de dos imágenes da como resultado una nueva imagen

cuyo píxel en las coordenadas (x, y) es la diferencia entre los píxeles en esa misma ubicación en las dos imágenes que se restan. Dependiendo del hardware y/o software que se use, la mecánica real de la implementación de las operaciones aritméticas se puede hacer de forma secuencial, un píxel a la vez, o en paralelo, donde todas las operaciones se realizan simultáneamente. En la *ecuación 8* se aprecia la función de correspondencia relacionado a la resta de dos imágenes como ejemplo (Gonzalez & Woods, 2017).

$$I_{op}(x, y) = I_{arit1}(x, y) - I_{arit2}(x, y) \quad (8)$$

Dónde:

- “ $I_{op}(x, y)$ ” : *Imagen resultante después de la operación aritmética.*
- “ $I_{arit1}(x, y)$ ” : *Imagen de entrada 1.*
- “ $I_{arit2}(x, y)$ ” : *Imagen de entrada 2.*

2.4.11 Operaciones morfológicas

La morfología matemática se basa en operaciones de teoría de conjuntos. En el caso de imágenes binarias, los conjuntos tratados son subconjuntos de Z^2 y en el de las imágenes en escala de grises, se trata de conjuntos de puntos con coordenadas en Z^3 .

Las operaciones morfológicas simplifican imágenes y conservan las principales características de forma de los objetos. Un sistema de operadores de este tipo y su composición permite que las formas subyacentes sean identificadas y reconstruidas de forma óptima a partir de sus formas distorsionadas y ruidosas (Gonzalez & Woods, 2017).

2.4.11.1 Erosión

Dada una imagen AE , y un elemento estructural BE , (ambas imágenes binarias) la erosión de una imagen, AE , por un elemento estructural, BE , es el conjunto de j , todos los elementos de la matriz, para los cuales BE trasladado por la imagen está contenido en AE , como se muestra en la *ecuación 9*.

$$AE \ominus BE = \{j \mid BE_j \subseteq AE\} \quad (9)$$

La erosión es la operación morfológica dual de la dilatación. La erosión se concibe usualmente como una reducción de la imagen original. En la *Figura 22* se muestra un

ejemplo de la erosión. La *Figura 22a* es el elemento estructural, la *Figura 22b* es la imagen a erosionar y la *Figura 22c* muestra el resultado de la operación (Gonzalez & Woods, 2017).

Figura 22. Ejemplo de erosión morfológica.

Adaptado de “Tema 5: Morfología”, por Fisher, Perkins, Walker, & Wolfart, 2000.

2.4.11.2 Dilatación

Dada una imagen AD , y un elemento estructural BD , (ambas imágenes binarias), la dilatación de AD por BD se define en la *ecuación 10* (Gonzalez & Woods, 2017).

$$AD \oplus BD = \{j | (\widehat{BD})_j \cap AD \neq \emptyset\} \quad (10)$$

Esta ecuación se basa en obtener la reflexión de BD sobre su origen y desplazarlo por j . En la *Figura 23* se visualiza un ejemplo de la dilatación. La *Figura 23a* es el elemento estructural, la *Figura 23b* es la imagen a dilatar y la *Figura 23c* muestra el resultado de la operación (Gonzalez & Woods, 2017).

Figura 23. Ejemplo de dilatación morfológica.

Adaptado de “Tema 5: Morfología”, por Fisher et al., 2000.

2.4.11.3 Clausura

Dada una imagen AC , y un elemento estructural BC , la clausura de AC por BC se define en la *ecuación 11* (Gonzalez & Woods, 2017).

$$AC \cdot BC = (AC \oplus BC) \ominus BC \quad (11)$$

En otras palabras, la clausura de AC por BC es la dilatación de AC por BC , seguido por la erosión del resultado por BC (Gonzalez & Woods, 2017).

2.4.12 Umbralización

Proceso que produce una imagen binaria a partir de una imagen en escala de grises o a colores, cambiando los valores de píxeles a 255 ó 0 dependiendo si se encuentran sobre o debajo del valor umbral. Esta técnica representa uno de los métodos de segmentación basados en intensidad mencionados anteriormente (Solomon & Breckon, 2011).

La imagen umbralizada se puede definir con la *ecuación 12*.

$$g(x, y) = \begin{cases} 255, & f(x, y) \geq U \\ 0, & f(x, y) < U \end{cases} \quad (12)$$

Dónde:

- " $f(x, y)$ ": *Imagen de entrada en escala de grises.*
- " $g(x, y)$ ": *Imagen binaria de salida.*
- " U " : *Umbral.*

Cuando U es un valor que no cambia en toda la imagen, se denomina un umbral global; en caso contrario, se denomina umbral variable. La parte más complicada de este procesamiento es establecer el umbral ya que, como se explicó anteriormente, va a depender de las condiciones de iluminación que se tenga en la imagen. De esta manera, en caso la iluminación varía a lo largo de una imagen, el umbral a utilizar deberá adaptarse a dichos cambios (Gonzalez & Woods, 2017).

2.4.13 Umbral adaptivo

El umbral adaptivo nace debido a factores de error en una imagen que no brinda un histograma perfectamente segmentable. Un enfoque para manejar tal situación es dividir la imagen original en sub-imágenes y luego utilizar un umbral diferente para segmentar cada sub-imagen, ya que el umbral utilizado depende del área de píxeles en términos de la sub-imagen. Este tipo de umbral es conocido como adaptivo y puede también ser producto de una operación aritmética (Gonzalez & Woods, 2017).

2.4.14 Segmentación de imágenes

Es el proceso de dividir una imagen en un conjunto de regiones no solapadas, cuya unión da como resultado a la imagen entera. Idealmente, estas regiones deberían corresponder a los objetos y sus partes significativas.

Para que la segmentación sea exitosa, el objeto de interés debe poder ser distinguido del fondo por algún parámetro. A continuación, una breve descripción de los métodos más utilizados (Gonzalez & Woods, 2017):

- Métodos basados en Intensidad: cuando la intensidad del objeto de interés difiere lo suficiente de la intensidad del fondo, es posible utilizar un umbral de intensidad para separar el objeto.
- Métodos basados en Bordes: cuando el objeto está delineado por un gradiente de intensidad más que por una diferencia de intensidad consistente con el fondo.
- Métodos basados en Regiones: se basan en la adyacencia y la conectividad entre los píxeles y sus vecindades.

2.4.15 Media y varianza

La media, también conocida como el promedio, es la suma de los datos de un conjunto de números divididos entre el número total de datos. En el caso de una matriz, devuelve un vector de fila que contiene la media de cada columna. En la *ecuación 13* se visualiza la expresión de la media (PlatinumGMAT, 2015).

La varianza es una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media. La expresión general de la varianza se aprecia en la *ecuación 14* (Science Buddies, 2017).

$$\bar{X} = \frac{1}{mn} \sum_{mi=1}^{mn} x_{mi} \quad (13)$$

Dónde:

- “ $\bar{X}$ ”: *Media.*
- “ x_{mi} ”: *Valor de cada término individual de la media.*

- “ mn ”: *Número de términos de la media.*

$$V = \frac{1}{vn} \sum_{vi=1}^{vn} |x_{vi} - \bar{X}|^2 \quad (14)$$

Dónde:

- “ V ”: *Varianza.*
- “ $\bar{X}$ ”: *Media.*
- “ x_{vi} ”: *Valor de cada término individual de la varianza.*
- “ vn ”: *Número de términos de la varianza.*

2.4.16 Porcentaje de área de imagen

El porcentaje de área es un método para calcular la proporción de una figura. En el caso de una imagen, el porcentaje de un área corresponde a su número de píxeles dividido entre el total de píxeles multiplicado por 100. En la *ecuación 15* se muestra el método para hallar el área (Mathworks, 2018).

$$Ai = \frac{100}{Tpx} \sum_{x=0}^{AM-1} \sum_{y=0}^{AN-1} (I_{img}(x, y)) \quad (15)$$

Dónde:

- “ Ab ”: *Área de imagen.*
- “ Tpx ”: *Cantidad total de píxeles.*
- “ I_{img} ”: *Imagen a analizar.*

2.5 Fundamentos de validación

2.5.1 Índice de concordancia

El índice de concordancia mide el acuerdo entre dos usuarios. El índice se denomina “ $Pr(a)$ ” y se halla con la *ecuación 16* (Carletta, 1996).

$$Pr(a) = \frac{SS + NN}{TP} \quad (16)$$

Dónde:

- “ $Pr(a)$ ”: *Índice de concordancia.*
- “ SS ”: *Número de muestras aceptadas por ambos expertos.*
- “ NN ”: *Número de muestras rechazadas por ambos expertos.*
- “ TP ”: *Total de pruebas realizadas.*

2.5.2 Índice Kappa de Cohen

El índice Kappa (Kp) mide el grado de concordancia de las evaluaciones nominales u ordinales realizadas por múltiples evaluadores cuando se evalúan las mismas muestras. El Kappa de Cohen evalúa el grado de concordancia cuando hay dos evaluadores con un ensayo individual y se halla mediante las ecuaciones 17, 18, 19, 20 y 21 (Carletta, 1996).

$$Kp = \frac{Pr(a) - Pr(e)}{1 - Pr(e)} \quad (17)$$

$$Pr(a) = \frac{Aa + Bb}{Tm} \quad (18)$$

$$Pr(e) = Pr(Si) + Pr(No) \quad (19)$$

$$Pr(Si) = \frac{Aa + Ab}{Tm} \times \frac{Ba + Bb}{Tm} \quad (20)$$

$$Pr(No) = \frac{Aa + Ab}{Tm} \times \frac{Ba + Bb}{Tm} \quad (21)$$

Dónde:

- “ Kp ”: *Índice Kappa de Cohen.*
- “ $Pr(a)$ ”: *Índice de concordancia.*
- “ $Pr(e)$ ”: *Probabilidad de que el acuerdo entre evaluadores sea al azar.*
- “ Aa ”: *Número de muestras aceptadas por ambos expertos.*

- “Ab”: Muestras aceptadas por experto 1 y rechazadas por experto 2.
- “Ba”: Muestras aceptadas por experto 2 y rechazadas por experto 1.
- “Bb”: Número de muestras rechazadas por ambos expertos.
- “Tm”: Total de muestras analizadas.
- “Pr(Si)”: Probabilidad de ambos evaluadores digan “Si”.
- “Pr(No)”: Probabilidad de ambos evaluadores digan “No”.

Cohen sugiere el resultado Kappa interpretarse de la siguiente manera: Valores ≤ 0 indica que no hay acuerdo, 0.01 a 0.20, poca concordancia, 0.21 a 0.40 como justo, 0.41 a 0.60 como moderado, 0.61 a 0.80 tan sustancial, y 0.81 a 1.00, casi un acuerdo perfecto. En la *Tabla 3*, se visualiza la interpretación de los valores del índice Kappa (López & Pita, 1999).

Tabla 3
Valorización del índice Kappa

Valoración del Índice Kappa	
Valor de Índice Kappa	Fuerza de la concordancia
< 0.20	Pobre
0.21 - 0.40	Débil
0.41 - 0.60	Moderada
0.61 - 0.80	Buena
0.81 - 1.00	Muy Buena

Nota. Hay 5 formas de valorizar el índice Kappa. Adaptado de “Medidas de concordancia: el índice de Kappa”, por López & Pita, 1999.

2.5.3 Evaluación cuantitativa

La evaluación continua se orienta por el uso de registros con escala de calificación numérica, de los logros, avances y alcances en cada una de las áreas de aprendizaje. Existe relación de independencia entre el sujeto y el objeto, ya que el investigador tiene una perspectiva desde afuera (De la Cruz & Lopez, 2013).

2.5.4 Porcentaje de error relativo

El error se define como la diferencia entre el valor estimado de una estadística y el valor real. El error absoluto cuantifica la desviación en términos absolutos respecto al valor real. No obstante, en ocasiones es más interesante resaltar la importancia relativa de esa desviación. Por ello, se define el error relativo como el cociente entre el error absoluto y el valor verdadero. El error relativo se denomina como “ ε ” y se halla mediante la *ecuación 22* (Posadas, 2017).

$$\varepsilon = \left| \frac{p - p_0}{p_0} \right| \times 100 \quad (22)$$

Dónde:

- “ ε ”: *Porcentaje del error relativo.*
- “ p ”: *Valor estimado de una estadística.*
- “ p_0 ”: *Valor real de la estadística.*

2.6 Conclusiones y comentarios

Una vez definidos todos los conceptos básicos de la palta Hass, mecánica, instrumentación, procesamiento digital de imágenes y validación, es posible realizar la descripción del proyecto desarrollado. Por tanto, en los siguientes capítulos se detallarán las etapas de hardware y software del proyecto, donde el último capítulo mostrará los resultados y validaciones.

3 CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE PROPUESTO

En el presente capítulo se describe la arquitectura y el funcionamiento general de la etapa de hardware de la presente tesis, el cual muestra un diagrama de bloques que detalla todos los procesos seguidos para el cumplimiento de esta etapa. Posteriormente, se mencionan algunas conclusiones y sugerencias recapituladas tras el transcurso de esta implementación.

3.1 Arquitectura y funcionamiento general del hardware

Esta etapa tiene como objetivo explicar de forma general el funcionamiento y los pasos tomados para integrar las diferentes etapas del hardware. Es por lo que en la *Figura 24* se visualiza el diagrama de bloques del hardware, con los sub-procesos seguidos.

Figura 24. Diagrama de bloques del hardware.

Elaboración propia.

La etapa de transporte integra el diseño y la construcción de la banda transportadora. La etapa de adquisición de imágenes está compuesta por el diseño del recinto, sistema de iluminación y su implementación. La etapa de selección está formada por el diseño y construcción de su mecánica. La etapa de control se conforma del diseño del tablero y su construcción. Finalmente, se describen problemas y soluciones enfrentados durante el desarrollo del hardware.

3.2 Etapa de transporte

El objetivo de la etapa de transporte es realizar una banda transportadora capaz de desplazar y girar las paltas para su completo análisis, cumpliendo los requerimientos de tiempo de procesamiento a la vez. Por ello se establecen los siguientes objetivos a cumplir.

- Diseñar una banda transportadora capaz de desplazar y rotar las paltas para su correcto análisis.
- Construir una banda transportadora que cumpla con el diseño y la integración de las siguientes etapas.

3.2.1 Diseño de la banda transportadora de rodillos

El objetivo de esta sección es hallar los cálculos necesarios para un correcto diseño mecánico de los rodillos transportadores que cumpla con los requerimientos de tiempo de procesamiento.

El primer paso para el diseño de los rodillos transportadores es hallar la velocidad tangencial y angular de los rodillos, que se muestran en la *ecuación 1*. El segundo paso es hallar el número de rodillos a utilizar en la mecánica y el tamaño de las cadenas que los une. El tercer paso es calcular el diámetro de los engranajes con la *ecuación 2*. Para estos cálculos se debe tener en cuenta los datos preliminares del sistema, que se muestran en la *Tabla 4*.

Tabla 4
Tabla de datos preliminares del sistema

Tiempo de procesamiento (t_p)	$t_p < 1 \text{ seg}$
Altura máxima de una palta (h_p)	$h_p = 12 \text{ cm}$
Diámetro máximo de la palta (d_p)	$d_p = 8 \text{ cm}$
Velocidad angular de la palta (w_p)	$w_p = \frac{4\pi}{3} \text{ rad/seg}$
Longitud aproximada de banda transportadora (L_m)	$L_m = 105 \text{ cm}$

Elaboración propia.

Para hallar la velocidad tangencial de los rodillos (V_{tR}), se sabe que las velocidades tangenciales de la palta (V_{tp}) y de los rodillos son iguales, por lo que se tiene la *ecuación 23*.

$$V_{tR} = V_{tp} = w_p \times \frac{d_p}{2} = \frac{4\pi}{3} \times \frac{8}{2} = 16.76 \text{ cm/seg} \quad (23)$$

De la *ecuación 23* y utilizando el valor estándar del diámetro de los rodillos $d_R = 2 \text{ pulg} = 5.08 \text{ cm}$, se calcula la velocidad angular de los rodillos (w_R) en la *ecuación 24*:

$$w_R = \frac{2 \times V_{tp}}{d_R} = 6.598 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \cong 2\pi \text{ rad/seg} \quad (24)$$

Con las medidas de la mecánica, mencionadas en la *Tabla 4*, y una distancia de separación entre rodillos de $S_r = 3.5 \text{ pulg}$, se calcula el número de rodillos (N_R) a emplear en la

estructura y la longitud total de la cadena (L_C) que los une, como se muestra en las ecuaciones 25 y 26 respectivamente.

$$N_R = \left(\frac{L_m \times 2}{\frac{t_p \times V_{tR}}{2}} \right) = \left(\frac{105 \times 2}{\frac{1 \times 16.76}{2}} \right) \cong 26 \text{ rodillos} \quad (25)$$

$$L_C = N_R \times S_r = 26 \times 3.5 = 91 \text{ pulg} \quad (26)$$

Para calcular los diámetros de los engranes, se utiliza la ecuación 2 y el dato estándar del primer engrane ($R_1 = 7.5 \text{ cm}$), como se muestra en la ecuación 27. Además, se obtiene el radio del segundo engrane (R_2) y del tercer engrane (R_3) mediante la ecuación 28, donde se establece un motor convencional de 1800 rpm a ¼ Hp de potencia y un factor de 40 por la caja reductora para hallar correctamente las medidas.

$$w_{R2} = w_{R1} = \frac{V_{tR}}{R_1} = \frac{16.76 \frac{\text{cm}}{\text{seg}}}{7.5 \text{ cm}} = 2.23 \text{ rad/seg} \quad (27)$$

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{w_{R3} \times f_r}{w_{R2}} = \frac{1800 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \times \frac{2 \pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \times \frac{1}{40}}{2.23 \text{ rad/seg}} = \frac{4.71}{2.23} = \frac{4.23}{2} \quad (28)$$

Dónde:

- “ w_{R1} ”: Velocidad angular del engranaje 1.
- “ w_{R2} ”: Velocidad angular del engranaje 2.
- “ w_{R3} ”: Velocidad angular del engranaje 3.
- “ R_1 ”: Radio de engrane 1.
- “ R_2 ”: Radio de engrane 2.
- “ R_3 ”: Radio de engrane 3.
- “ f_r ”: Factor de la caja reductora.

Con los diferentes cálculos realizados anteriormente, se obtuvo los siguientes resultados importantes para comenzar la construcción de la banda transportadora:

- Velocidad lineal de los rodillos transportadores: $V_{tR} = 16.76 \text{ cm/seg}$
- Velocidad angular de los rodillos transportadores: $w_R \cong 2\pi \text{ rad/seg}$
- Número de rodillos a utilizar: $N_R \cong 26 \text{ rodillos}$
- Longitud de la cadena que une los rodillos: $L_C = 91 \text{ pulg} = 231.14 \text{ cm}$
- Velocidad y potencia del motor: 1800 rpm a $\frac{1}{4}$ Hp de potencia
- Radio de los engranajes: $R_1 = 7.5 \text{ cm}$; $R_2 \cong 4.5 \text{ cm}$; $R_3 = 2 \text{ cm}$

Finalmente, se utilizaron los resultados para diseñar y simular la etapa de transporte con el software SolidWorks, el cual se aprecia en el plano con código “MC-01”, ubicado en el *Anexo A*. Además, se adjuntan las diferentes piezas mecánicas y ensambles diseñados para la unión de la etapa de transporte, en los códigos “MC-02”, “MC-03”, “MC-04” y “MC-05”, que utilizan la normas ISO 128 y 129.

3.2.2 Construcción de la banda transportadora de rodillos

El siguiente objetivo es la construcción de la banda transportadora de rodillos, el cual es parte importante del sistema automático de selección de paltas.

El primer paso para la construcción de la banda transportadora de rodillos es implementar el sistema de transporte, el cual es conformado por los rodillos, los piñones y cadenas que los unen, en base a los cálculos previamente hallados. En la *Figura 25a* se puede ver el rodillo utilizado y en la *Figura 25b* los engranes con la cadena.

(a) Rodillo de la etapa de transporte

(b) Engranes y cadena

Figura 25. Rodillos y engranes con cadena.

Elaboración propia.

El segundo paso es la construcción del soporte mecánico, el cual consiste en la estructura de 105x90x40cm sobre la cual recaerá toda la banda transportadora de rodillos. Este cálculo se obtiene mediante las medidas del sistema del transporte anterior mencionado. En las *Figura 26a* y *Figura 26b*, se puede apreciar el soporte mecánico y una de las cuatro chumaceras para mantener tensionado la cadena.

(a) Soporte mecánico

(b) Chumacera

Figura 26. Soporte mecánico y chumacera.

Elaboración propia.

Colocado el sistema de transporte y el motor en el soporte mecánico como se muestra en la *Figura 27a*, el tercer paso es la construcción del sistema de transmisión. Según los radios de los engranajes hallados en la sección anterior y la distancia entre el eje principal y del motor, se calcula la longitud de la cadena requerida. En la *Figura 27b* se ve el sistema de transmisión.

(a) Unión del soporte con el sistema de transporte

(b) Sistema de transmisión (rotado 90 grados antihorario)

Figura 27. Construcción del sistema de transmisión.

Elaboración propia.

Como resultado se obtiene la banda transportadora de rodillos ensamblado. En la *Figura 28a* se muestra la implementación completa, el cual está conformado principalmente por el sistema de transporte y el sistema de transmisión anclado al soporte mecánico. Finalmente, en la *Figura 28b* se visualiza el prototipo final de la banda transportadora de rodillos.

(a) Etapa de transporte implementada

(b) Etapa de transporte finalizada

Figura 28. Resultado de la construcción de la banda transportadora.

Elaboración propia.

3.3 Etapa de adquisición de imágenes

La etapa de adquisición de imágenes se centra en la correcta captura de las paltas Hass al entrar al sistema. Para ello, se tienen en cuenta los siguientes objetivos.

- Diseñar un recinto que cumpla con las especificaciones de la empresa.
- Diseñar la distribución del sistema de iluminación que permita realizar la captura de una imagen de manera uniforme.
- Seleccionar el color de fondo para una buena segmentación y umbralización.
- Construir un recinto que no sea afectado por perturbaciones exteriores.

3.3.1 Diseño del recinto de adquisición de imágenes

Para diseñar el recinto de adquisición de imágenes, se tomó en cuenta diferentes criterios.

- La medida de la palta Hass de mayor tamaño: para que las paltas ingresen al recinto sin problema.

- Diámetros comerciales de tubos de policloruro de vinilo (PVC), los cuales serán usados de rodillos transportadores y determinarán el largo del recinto.
- Desplazamiento del fruto en banda transportadora: el cual indicará la separación entre las cámaras para capturar las tres caras de las paltas correctamente, con una mínima tolerancia de solape entre imágenes.
- Separador de paltas: para evitar el acceso de dos frutas a una misma línea.

La medida de las paltas Hass de mayor tamaño son en promedio de 8 cm de ancho y 12 cm de largo y el valor estándar de diámetro de los rodillos es de 2 pulgadas, según las medidas de la banda transportadora actual de la empresa y la realizada.

Para hallar la distancia entre cámaras, se establece que después de la primera captura de imagen de la palta, se tome la siguiente captura después de una rotación de 240 grados cada segundo, que equivale una velocidad angular (w_c) de $\frac{4\pi}{3}$ rad/seg. El mismo proceso se repite para la tercera cámara, y así se asegura la toma de toda a palta. Se halla la velocidad tangencial de este desplazamiento (V_{tc}) que se muestra en la *ecuación 29*, donde se establece una distancia de 17 cm por cada cámara siguiendo la primera.

$$V_{tc} = w_c \times \frac{d_p}{2} = \frac{4\pi}{3} \times \frac{8}{2} = 16.76 \cong 17 \text{ cm/seg} \quad (29)$$

Con estos datos, se determina una medida de 60 cm de largo y 31 cm de ancho para el recinto, con un corte semicircular en la parte posterior que apoya en el desplazamiento correcto del fruto a la etapa de selección. Se decide 60 cm de largo para cubrir un máximo de dos tercios de la banda transportadora y 31 cm para que puedan ingresar por lo menos dos paltas en el recinto. Además, se instala un divisor para la separación de las paltas en dos líneas de procesamiento.

La distancia entre los rodillos y la cámara se obtiene mediante la suma de la distancia vertical HC_1 , proporcionada por el campo de visión (Field of View), y la altura de la palta. Para ello, se utiliza la *ecuación 3*, los datos de la cámara Logitech C170, con campo de visión de 58 grados y la longitud horizontal del campo de visión de 12 cm, que es el largo promedio de la palta. En la *ecuación 30* se halla la altura HC_1 de 11 cm y en la *ecuación 31* la altura de

HC_2 , que es de 19 cm. Además, la ecuación 32 muestra la altura final de recinto, HT , que es igual a 40 cm.

$$58 = 2 \times \tan^{-1}\left(\frac{12}{2 \times HC_1}\right) \rightarrow HC_1 = 10.82 \cong 11 \text{ cm} \quad (30)$$

$$HC_2 = HC_1 + h_m = 11 + 8 = 19 \text{ cm} \quad (31)$$

$$HT = HC_2 + h_r = 19 + 21 = 40 \text{ cm} \quad (32)$$

Dónde:

- “ HC_1 ”: *Altura del campo de visión.*
- “ HC_2 ”: *Altura entre rodillos y cámara.*
- “ h_m ”: *Altura máxima de la palta.*
- “ h_r ”: *Altura de anclaje del recinto.*
- “ HT ”: *Altura final del recinto.*

Finalmente, se obtiene el diseño final con las medidas obtenidas anteriormente. En el plano con código “MC-06”, ubicado en el *Anexo A*, se aprecia el diseño en la plataforma SolidWorks, donde se utiliza las normas ISO 128 y 129.

3.3.2 Diseño de la distribución del sistema de iluminación

El segundo objetivo es diseñar la distribución del sistema de iluminación para que permita una captura de imagen uniforme. Por ello, se deben cumplir los siguientes criterios.

- Iluminación uniforme para una buena captura de imagen.
- Intensidad de luz adecuada para evitar error por brillo o sombras.
- Enfatizada diferencia entre la parte buena de la palta y los desórdenes de esta.

En consecuencia, para el sistema de iluminación se utiliza un arreglo de 144 leds blancos tipo SMD (Surface Mount Device), de 2.5 metros de largo y potencia de 19.2 watts, con reflexión mediante vidrio pavonado para generar una luz difusa y regulado a un voltaje de 9V. En contraste a otras soluciones, como iluminación directa y reflexión, se escoge el

anteriormente mencionado ya que tiene como ventaja sobre estas la disminución de las sombras y brillo, brindando una mejora en las diferencias del fruto y su captura. En la *Figura 29*, se visualiza la distribución final del sistema de iluminación. En el *Anexo D*, se muestra la hoja de dato del arreglo de leds modelo S30217.

Figura 29. Iluminación final del prototipo.

Elaboración propia.

Además, el arreglo de leds brinda una luminosidad de 1020 Lumen por metro, que resultó adecuada para la captura de imágenes en el recinto después de pruebas in situ.

3.3.3 Selección del fondo del recinto

En esta sección se tiene como objetivo seleccionar el color del fondo del recinto que brinde una mejor captura de imagen. Para ello, se toman en cuenta los siguientes criterios.

- La correcta segmentación de la pata.
- El correcto análisis de los defectos de las paltas, en los componentes rojo y verde.
- Reducidas sombras de fondo.

Se efectuó el análisis con tres posibles colores: azul, magenta y blanco, donde se escogió el color blanco. Esta elección mostró mejores resultados que sus contrapropuestas, con una buena segmentación y reconocimiento de los índices de calidad del algoritmo propuesto. En la *Figura 30a* se visualiza el componente azul de la imagen original, donde se muestra la diferencia entre la pata y el fondo para la segmentación. Como se ve en el ejemplo, solo toma la parte oscura, que refleja la imagen de la pata.

Así mismo, en la *Figura 30b* se muestra la componente verde de la imagen original, en la que se ven las diferencias entre el área de palta aceptada y sus desordenes de calidad: en círculos azules se ven los puntos negros que representan las manchas negras y en círculo rojo la tonalidad oscura de gris el defecto de rozamiento o quemaduras por sol.

(a) Análisis de la segmentación con fondo blanco en la componente azul

(b) Análisis de los defectos de la palta con fondo blanco en la componente verde

Figura 30. Análisis de la selección de fondo de recinto.

Elaboración propia.

3.3.4 Construcción del recinto de adquisición de imágenes

El último objetivo de esta etapa es construir el recinto que no sea afectado por perturbaciones exteriores y cumpla con lo establecido en su diseño y sistema de iluminación. Además, el recinto debe cumplir los siguientes criterios.

- Rígido y resistente a vibraciones de la banda transportadora con el fin de mantener estables las cámaras.
- Cumplir con estándares de la industria alimentaria.

Se proponen tres diferentes materiales como solución: cartón, melamina, y acero inoxidable donde se escoge la última por su robustez, durabilidad y estabilidad. Además, el material cumple con los requerimientos que exigen las empresas alimentarias, como su inalterabilidad y la norma internacional ASTM A240.

Después de la construcción, se realizan las pruebas de adquisición de imágenes con las tres cámaras para capturar las tres caras de la palta correctamente. La *Figura 31* muestra el

proceso de los ensayos para verificar la toma de las tres caras, el cual se validará en el capítulo 5.

Figura 31. Validación de adquisición de imágenes.

Elaboración propia.

En la *Figura 32* se visualiza el recinto a utilizar según las medidas halladas en el capítulo 3.3.1 y de material acero inoxidable AISI 304, para industrias alimentarias.

Figura 32. Recinto de acero inoxidable.

Elaboración propia.

3.4 Etapa de selección

La etapa de selección se encarga de separar las paltas aceptadas de las paltas rechazadas. En la industria, esta selección dirige el fruto a dos diferentes etapas: si la palta es exportable se va a la etapa de empaquetado, y si es rechaza se va al almacén de los frutos no exportables.

Es por ello, que los siguientes objetivos se deciden cumplir:

- Diseñar una etapa de selección capaz de acoplar a la etapa de transporte.
- Construir una etapa de selección con el correcto accionamiento para realizar la clasificación.

3.4.1 Diseño de la etapa de selección

El objetivo de esta sección es diseñar una etapa de selección que pueda cumplir con su funcionalidad y a la vez acoplarse a la etapa de transporte. Se utilizan criterios como:

- Largo y ancho de la palta Hass más grande, 12 y 8 cm respectivamente.
- Medidas del soporte mecánico de la etapa de transporte.

Con las medidas de la palta, se diseña la compuerta que simula el rechazo de las frutas con defectos. Para ello, se escoge un pistón mecánico con un vástago suficientemente largo para el desplazamiento de la compuerta, una electroválvula de 5/2 vías encargada de controlar dicho pistón y un sensor óptico dedicado a la detección del paso de la palta. El diagrama del pistón se puede ver en el plano de equipos, con código “MC-05”, ubicado en el *Anexo A*. Asimismo, el diseño del diagrama neumático se aprecia en el plano con código “NEU-01”, dentro del *Anexo C*.

Las medidas del ancho del soporte mecánico es igual que la etapa de transporte, y el largo se cambió a 34 cm, que se decide por la inclinación de la plancha de selección. Sin embargo, para evitar alguna caída del fruto al trasladarse de la etapa de transporte a la de selección, se modificó el diseño para que la plancha pueda desplazarse y ajustar a una distancia adecuada.

Finalmente se hace el diseño mecánico de la selección, que se puede apreciar en el plano con código “MC-07”, ubicado en el *Anexo A*.

3.4.2 Construcción de la etapa de selección

El siguiente objetivo es la construcción de la selección. Con el plano mecánico y las medidas obtenidas en el capítulo 3.4.1, se construye el soporte mecánico de la selección. Luego, se instala el pistón neumático, el cual desplaza la compuerta para abrir y cerrar cuando indicado, y posteriormente se prueba su correcta funcionalidad al ingresarle aire comprimido.

En la *Figura 33*, se visualiza la mecánica de la selección, donde la *Figura 33a* muestra el soporte mecánico de la etapa de selección y la *Figura 33b* muestra la compuerta, cerrada en la imagen, el cual se encarga de la selección. Finalmente cae en una bandeja donde se dividen entre paltas aceptadas y paltas rechazadas dependiendo de su clasificación.

(a) Soporte mecánico de selección

(b) Compuerta de selección

Figura 33. Mecánica de la etapa de selección.

Elaboración propia.

3.5 Etapa de control

En esta etapa se tiene como objetivo controlar el sistema de selección con un dispositivo de hardware, en este caso un tablero eléctrico. Los tableros eléctricos son parte principal en una instalación de una máquina eléctrica y dentro cuentan con un sistema de seguridad y mecanismos de maniobra para el sistema. Además, se describe la integración de todas las partes del hardware.

Por ello, los siguientes objetivos se deben cumplir:

- Diseñar un tablero eléctrico que se integre con el sistema realizado.
- Ensamblar un tablero eléctrico capaz de hacer el inicio y parada del sistema, y a la vez, darle una presentación industrial.

3.5.1 Diseño del tablero eléctrico

Para el diseño del tablero eléctrico, se toma en cuenta la “Norma IEC-61439”, un estándar definido por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)”, el cual se aplica principalmente en el diseño de tableros de distribución de potencia y maniobra. Esta norma implementa los siguientes criterios para el tablero:

- Código de colores para los cables
- Tamaño y calibre de los cables

Además, se deciden los componentes que se instalan dentro del tablero, los pulsadores y las luces pilotos. Los siguientes componentes se adquirieron:

- 4 pulsadores: para iniciar, parar, resetear el sistema y un pulsador de emergencia.
- 3 luces pilotos: como indicadores para los pulsadores.
- Guardamotor: para proteger el motor de sobrecorrientes o falta de fase.
- Interruptor termomagnético: para proteger el motor de sobrecargas.
- Variador de frecuencia: el funcionamiento de la banda transportadora.
- PLC: control de los sensores y actuadores del sistema.
- Borneras: para facilitar la conexión con los equipos de campo.

Cabe mencionar que, al ser un prototipo, se combinaron los componentes de control y fuerza en un tablero de dimensiones 40x30x20 cm, el cual contaba con el espacio suficiente para almacenar los componentes anteriormente mencionados.

Finalmente, se realizan los planos del tablero. El diseño de la mecánica se visualiza en el plano con código “MC-08” en el *Anexo A* y los diagramas eléctricos de distribución, fuerza y control se aprecian en los planos con códigos “ELEC-02”, “ELEC-03”, “ELEC-04” y “ELEC-05” en el *Anexo B*.

3.5.2 Ensamblaje del tablero eléctrico

El objetivo de esta sección es construir el tablero eléctrico con las especificaciones recapituladas en el diseño.

El tablero está compuesto de tres pulsadores, tres luces piloto y un botón de emergencia. Dos de los pulsadores se utilizan para el encendido y el apagado del sistema, y se usa el tercer pulsador para el reset de los resultados del PLC y el procesamiento.

Además, el tablero se conecta con sus componentes internos, los cuales incluyen el variador, el guardamotor, el interruptor termomagnético, el PLC y borneras. En este proceso se une el tablero con el sistema de selección.

Posteriormente, se utilizan prensaestopas, un tubo corrugado para la protección del cableado eléctrico y etiquetas para identificar los diferentes pulsadores y luces pilotos del tablero. En

la *Figura 34a* se muestra el exterior del tablero eléctrico del sistema con las especificaciones de su funcionamiento y la *Figura 34b* muestra el interior del tablero.

a) Exterior del tablero eléctrico.

b) Interior del tablero eléctrico.

Figura 34. Tablero eléctrico del sistema.

Elaboración propia.

Dónde:

- “A”: *Título del prototipo.*
- “B”: *Luz piloto que indica el sistema está energizado.*
- “C”: *Luz piloto que indica el sistema está prendido.*
- “D”: *Luz piloto que indica el sistema está apagado por emergencia.*
- “E”: *Pulsador que prende el sistema.*
- “F”: *Pulsador de reinicio.*
- “G”: *Pulsador que para el sistema.*
- “H”: *Pulsador de paro de emergencia.*

3.5.3 Integración del sistema

El siguiente objetivo es la integración del sistema con las diferentes etapas de hardware realizadas. Para ello, se unen las etapas en el diseño mecánico, como se aprecia en el plano con código “MC-09”, ubicado en el *Anexo A*. Mediante el plano, se hacen ajustes para el correcto ensamble y se comienza la construcción. En la *Figura 35*, se puede apreciar el sistema final implementado.

Figura 35. Sistema final implementado.

Elaboración propia.

3.6 Descripción de problemas y soluciones

Problemas:

- En los cálculos realizados, se encontraron gran cantidad de parámetros y medidas no comerciales.
- Cadena con separación de rodillos deseada no es comercial.
- Las distancias de los engranajes principales no eran completamente exactas, debido a los cortes y soldaduras.
- Dificultad en fijar el pistón neumático para que esté estable.

Solución:

- Se buscó valores estándares para reemplazar ciertas medidas.
- Comprar una cadena con pasos comerciales aproximados a los deseados y ajustar los cálculos de distancias.
- Colocar chumaceras para ajustar y templar la cadena.
- Se utilizaron rieles pequeños y un soporte adicional para que toda la compuerta pueda desplazarse sin problemas.

3.7 Conclusiones y comentarios

Se diseñó y ensambló un recinto capaz de acoplarse con el soporte mecánico.

La distancia entre las paltas y las cámaras es crucial para obtener la mejor captura.

El color del fondo fue elegido para resaltar mejor las diferencias de la palta.

Es importante que las piezas mecánicas a maquinar sean lo más cercanas posibles a las calculadas para no tener errores en tiempo y velocidad.

Dado que el diámetro exterior del tubo comprado para los rodillos es mayor a 2 pulgadas, se cambió la separación de rodillos de 3 a 3.5 pulgadas.

Dado que la velocidad de la faja no es una variable crítica, es prescindible controlarla.

La presión mínima necesaria para poder desplazar el pistón correctamente es de 6 bares.

El pistón neumático se controlará según los resultados del procesamiento de imágenes descrito en el capítulo siguiente.

4 CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE PROPUESTO

El presente capítulo describe y detalla la etapa de software desarrollado como parte del proyecto de tesis. Primero se describe la filosofía de control empleada, en el cual se explica la lógica que gobierna el sistema completo.

Luego se explica el algoritmo de detección y clasificación de los índices de calidad de las paltas Hass implementado. Este algoritmo está dividido en cuatro etapas fundamentales, un pre-procesamiento para preparar la imagen, la identificación de la palta, la clasificación según los índices de calidad de la palta y una etapa de presentación de los resultados tomados.

Finalmente, se hace la descripción de la interfaz del software en Matlab, donde se visualiza el procesamiento de las imágenes y los resultados, así como las decisiones tomadas por el algoritmo.

4.1 Filosofía de control

Esta etapa tiene como objetivo explicar la lógica del controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés) usada para gobernar e integrar las diversas etapas que conforman el sistema planteado. Cabe mencionar que se utilizan tres cámaras con el fin de capturar los 360° de una misma palta.

Luego de la integración mecánica, el primer paso fue realizar la filosofía de control, que facilita la descripción del funcionamiento del sistema y se muestra a continuación:

- Al energizar el sistema, se enciende el indicador de luz 1 “*LV1*”.
- Al presionar inicio “*PVerde*”, se enciende el motor “*M_ON*” e indicador de luz 2 “*LV2*”.
- Al presionar pause “*PRojo*”, se detiene el motor “*M_ON*” y se apaga el indicador de luz 2 “*LV2*”.
- Al presionar el botón de emergencia “*PEmerg*”, se detiene y bloquea todo el sistema, y se enciende el indicador de luz 3 “*LRI*”.
- Al presionar el botón reset “*PNegro*”, se reinician todas las variables, desbloquea todo el sistema y apaga el indicador de luz 3 “*LRI*”.

- Al activarse el primer sensor “*Sen1*”, se captura y procesa la imagen de la cámara 1 “*Capt0*”.
- Al activarse el segundo sensor “*Sen2*”, se captura y procesa la imagen de la cámara 2 “*Capt1*”.
- Al activarse el tercer sensor “*Sen3*”, se captura y procesa la imagen con la cámara 3 “*Capt2*”, luego se almacena el resultado en una tabla de respuestas.
- Al activarse el cuarto sensor “*Sen4*”, se incrementa el contador de respuestas “*cont*” y se activa la electroválvula “*EValv*” según la tabla de respuestas almacenadas.

Esta filosofía de control se complementa con un diagrama P&ID, que muestra el plano de los instrumentos utilizados en el sistema, siguiendo la norma ISA (International Society of Automation) 5.1, 5.2 y 5.3. El plano se adjunta en el *Anexo C*, “Diagrama P&ID”.

Según la lógica descrita anteriormente, se implementa el programa en el PLC usando el lenguaje de programación Ladder, que se muestra en el *Anexo C*, “Programación Ladder”, el cual se encarga de gobernar el sistema.

4.2 Descripción del algoritmo de detección

El objetivo de esta etapa es la descripción del algoritmo de detección y clasificación de paltas Hass según sus índices de calidad. En la *Figura 36* se presenta el diagrama de bloques general desarrollado, el cual está dividido en cuatro etapas fundamentales y se ejecutará de inicio a fin cada vez que los sensores detecten una palta.

Dada la orden de procesamiento, se adquiere la imagen a través de la cámara designada, para luego ser analizada por el algoritmo de detección. Este procesamiento sucederá tres veces por cada palta, ya que, con el fin de capturar toda el área de la palta, se utilizan tres cámaras por cada línea implementada.

Figura 36. Diagrama de flujo general del algoritmo de detección.

Elaboración propia.

El pre-procesamiento prepara la imagen para un análisis más efectivo, ajustando los valores de intensidad de la imagen capturada. Luego, se realiza una operación entre las componentes de la imagen. Este paso logra, en primera instancia, descartar gran parte de la imagen que no será analizada posteriormente.

La identificación de la palta o segmentación de la palta, consta de una serie de funciones que permiten eliminar las secciones no deseadas de la imagen, y así analizar la región de interés, que es la palta. Los métodos utilizados en esta sección son: umbralización, etiquetado, dilatación y erosión.

Una vez segmentada la palta, se procede al análisis de calidad. Para ello, primero se elige un modelo de color óptimo y luego se calcula en ellos los umbrales de detección, los cuales son necesarios para hallar las áreas de la palta según sus índices de calidad, considerando: área buena, área de rozamiento o quemadura por sol y área de manchas negras: lenticelas o quemadura por frío.

Finalmente, se presentan los resultados hallados: las áreas calculadas en porcentaje, la respuesta de aceptado o rechazado y el registro de este, para después retornar una respuesta al PLC según la decisión tomada.

4.2.1 Adquisición de imágenes

En esta primera parte, se adquirirán 3 imágenes por cada palta a través de 3 cámaras, con el fin de capturar todas las caras de una palta. Un ejemplo se muestra en la *Figura 37* y se validará en el capítulo siguiente.

Figura 37. Adquisición de 3 caras de una palta.

Elaboración propia.

Una vez recibida la orden de procesamiento del PLC, el primer paso del algoritmo propuesto es capturar inmediatamente una imagen de la cámara designada (*Capt0*, *Capt1*, *Capt2*) en formato MJPG, con una resolución de 640x480 píxeles y con rango de <0,255>. En la *Figura 38a* se muestra un ejemplo de la imagen capturada y la *Tabla 5* muestra los parámetros de configuración de las cámaras establecidas; estos se eligieron en base a estudios empíricos y condiciones del recinto e iluminación. Cabe mencionar que los parámetros configurados son los permitidos por el modelo propio de la cámara.

Tabla 5
Parámetros de configuración de las cámaras

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Backlight Compensation	“off”	Pan	0
Brightness	0	Saturation	38
Contrast	13	Sharpness	35
Exposure	-5	Tilt	0
ExposureMode	“manual”	WhiteBalance	5000
FrameRate	“30.0000”	WhiteBalanceMode	“auto”
Gamma	100	Zoom	1
Hue	0	-	-

Nota: Los valores de los parámetros se establecen mediante pruebas realizadas para obtener la mejor imagen.

Adaptado de “Webcam C110”, por Logitech, 2011.

4.2.2 Pre-procesamiento

De la imagen adquirida $I_1(x, y)$, se obtiene: $I_{R1}(x, y)$, $I_{G1}(x, y)$ y $I_{B1}(x, y)$ que son sus componentes rojo, verde y azul respectivamente, las cuales son sometidos a una transformación de intensidad, explicado en el capítulo 2. Este proceso se realiza con el fin de resaltar las diferencias entre el fondo, la palta y sus defectos. Esta operación de transformación es expresada en las *ecuaciones 33, 34 y 35*, obteniendo como resultado las ecuaciones de las componentes de $I_2(x, y)$: $I_{R2}(x, y)$, $I_{G2}(x, y)$, $I_{B2}(x, y)$.

$$I_{R2}(x, y) = \begin{cases} 255, & I_{R1}(x, y) > 80 \\ 0, & I_{R1}(x, y) < 40 \\ \frac{(I_{R1}(x, y) - 40) \times 255}{80 - 40}, & \text{otros casos} \end{cases} \quad (33)$$

$$I_{G2}(x, y) = \begin{cases} 255, & I_{G1}(x, y) > 80 \\ 0, & I_{G1}(x, y) < 12 \\ \frac{(I_G(x, y) - 12) \times 255}{80 - 12}, & \text{otros casos} \end{cases} \quad (34)$$

$$I_{B2}(x, y) = \begin{cases} 255, & I_{B1}(x, y) > 80 \\ 0, & I_{B1}(x, y) < 10 \\ \frac{(I_B(x, y) - 10) \times 255}{80 - 10}, & \text{otros casos} \end{cases} \quad (35)$$

La imagen original adquirida $I_1(x, y)$ y sus componentes RGB se muestran en las *Figuras 38a, 38c, 38e, 38g* respectivamente. Estas imágenes son sometidas a las ecuaciones anteriormente descritas, obteniendo como resultado un aumento de contraste lo que mejora de la calidad de la imagen para su análisis. Este resultado de la imagen original transformada $I_2(x, y)$ y sus componentes RGB, se visualizan en la *Figuras 38b, 38d, 38f, 38h* respectivamente. De esta forma se contrasta la imagen transformada con la imagen original capturada y sus componentes.

a) Imagen original capturada.

b) Imagen original transformada.

(continua)

c) Componente R de la imagen original.

d) Componente R transformada.

e) Componente G de la imagen original.

f) Componente G transformada.

g) Componente B de la imagen original.

h) Componente B transformada.

Figura 38. Ejemplo de transformación de intensidad

Elaboración propia.

Luego de la transformación de intensidad, las componentes RGB de la imagen I_2 , son sometidos a una operación aritmética entre ellas, con el fin de eliminar el fondo no deseado de la imagen, y así obtener una matriz en la que se puede reconocer fácilmente la palta. Dicha operación aritmética se indica en la *ecuación 36*, obteniendo como resultado la imagen en escala de grises: $I_{ope}(x, y)$. En la *Figura 39* se muestra el resultado de dicha operación.

$$I_{ope}(x, y) = I_{R2}(x, y) + I_{G2}(x, y) - 2 \times I_{B2}(x, y) \quad (36)$$

a) Imagen original transformada.

b) Imagen operada resultante.

Figura 39. Operación aritmética resultante.

Elaboración propia.

4.2.3 Segmentación de la palta

Como parte de la segmentación, en primer lugar, se tiene la umbralización de la imagen obtenida de la operación anterior. Para la elección del umbral más óptimo, se analizaron 100 histogramas de diferentes imágenes de $I_{ope}(x, y)$, superponiendo uno encima de otro para luego elegir el umbral que separa el fondo negro de la palta, donde una muestra se aprecia en la *Figura 40*.

De este estudio, se concluyó que un umbral fijo es idóneo para la umbralización de la imagen, teniendo en cuenta que el tiempo de procesamiento debe ser el menor posible entretanto segmente la palta correctamente. En este sentido, se obtiene la *ecuación 37* de umbralización fija y su resultado, $I_u(x, y)$, se plasma en la *Figura 41*.

$$I_u(x, y) = \begin{cases} 255, & I_{ope}(x, y) \geq 38 \\ 0, & I_{ope}(x, y) < 38 \end{cases} \quad (37)$$

Figura 40. Histograma de una imagen operada.

Elaboración propia.

Figura 41. Imagen umbralizada resultante $I_u(x, y)$.

Elaboración propia.

De la imagen umbralizada resultante, quedan pequeños residuos de fondo por lo que es necesario aplicar la función etiquetado, explicado en el capítulo 2. Para ello, en segundo

lugar, se aplica dicho algoritmo de etiquetado a la imagen $I_u(x, y)$, obteniendo como resultado $I_{eti}(x, y)$, visualizado en la *Figura 42a*.

De este nuevo resultado $I_{eti}(x, y)$, se extraen las etiquetas con mayor número de repeticiones, definido como la imagen $I_{seg}(x, y)$, el cual sería la palta a analizar. En la *Figura 42b* se muestra la imagen de la etiqueta de mayor tamaño extraída.

a) Imagen etiquetada $I_{eti}(x, y)$. Cada color representa una etiqueta diferente

b) Extracción del objeto con mayor cantidad de etiquetas $I_{seg}(x, y)$

Figura 42. Operación de etiquetado.

Elaboración propia.

4.2.4 Dilatación

Con el fin de compensar los vacíos dejados por la operación del pre-procesamiento, se aplica la operación morfológica de dilatación, según la *ecuación 38*, explicada en el capítulo 2. En la *Figura 43a* se muestra la forma del elemento estructural $I_{ker}(x, y)$, de tamaño 8x8 píxeles, y en la *Figura 43b* se presenta el resultado de la operación morfológica definido como $I_{dil}(x, y)$, entre $I_{seg}(x, y)$ y el elemento estructural mencionado.

$$I_{dil}(x, y) = I_{seg}(x, y) \oplus I_{ker}(x, y) \quad (38)$$

$$I_{dil}(x, y) = \left\{ j \mid \left(\widehat{I_{ker}(x, y)} \right)_j \cap I_{seg}(x, y) \neq \emptyset \right\}$$

a) Elemento estructural $I_{ker}(x, y)$.

b) Imagen dilatada $I_{dil}(x, y)$

Figura 43. Operación de dilatación.

Elaboración propia.

4.2.5 Erosión

Luego de la dilatación, se aplica su operación morfológica opuesta, es decir la erosión, descrita en la *ecuación 39*, explicada en el capítulo 2, que también se le conoce como operación de clausura. Esto permite retornar al tamaño original de la palta e incluso eliminar algunos bordes de sombra propia de captura. En la *Figura 44a* se muestra la forma del elemento estructural $I_{ker}(x, y)$ y en la *Figura 44b* se presenta el resultado de esta operación morfológica definido como $I_{fill}(x, y)$, entre $I_{dil}(x, y)$ y el elemento estructural mencionado.

$$I_{fill}(x, y) = I_{dil}(x, y) \ominus I_{ker}(x, y) = \{j \mid I_{ker}(x, y)_j \subseteq I_{dil}(x, y)\} \quad (39)$$

a) Elemento estructural $I_{ker}(x, y)$

b) Imagen erosionada $I_{fill}(x, y)$.

Figura 44. Operación de erosión.

Elaboración propia.

4.2.6 Resultado de la segmentación

Una vez identificada la palta en la imagen adquirida, se procede a eliminar el fondo de la imagen original transformada, para su posterior análisis e identificación de los defectos de la palta. En este proceso se multiplica la imagen original transformada, $I_2(x, y)$, con la imagen final erosionada $I_{fii}(x, y)$, obteniendo como resultado la imagen $I_3(x, y)$, como se muestra en la *ecuación 40*. Un ejemplo de esto se muestra en la *Figura 45*. Cabe aclarar que solo para efectos de mejor visualización y presentación se recorta la imagen, mas no ocurre en el procesamiento.

$$I_3(x, y) = I_2(x, y) \times I_{fii}(x, y) \quad (40)$$

a) Imagen original transformada

b) Imagen transformada segmentada.

Figura 45. Resultado de segmentación.

Elaboración propia.

4.2.7 Elección del modelo de color

Como parte del análisis de calidad, en primer lugar, es necesario elegir un modelo de color en el que se aprecie con mayor diferencia los defectos de la palta: rozamiento, quemaduras y manchas negras. Con este fin es necesario usar distintas paltas con estos defectos y evaluar su comportamiento. Para ello, se hizo uso de la media y la varianza en cada uno de los histogramas de las componentes del modelo de color a comparar: RGB, HSV, YCbCr e YIQ. En las *Figuras 46, 47 y 48* se muestran los modelos de color estudiados con sus respectivos histogramas para el análisis de las paltas con rozamiento, con quemaduras y con manchas negras respectivamente.

a) Imagen original RGB.

b) Histograma del modelo RGB

c) Imagen original en HSV

d) Histograma del modelo HSV

e) Imagen original en Y'CbCr

f) Histograma del modelo Y'CbCr

g) Imagen original en YIQ

h) Histograma del modelo YIQ

Figura 46. Análisis de una palta con rozamiento.

Elaboración propia.

a) Imagen original RGB.

b) Histograma del modelo RGB

c) Imagen original en HSV

d) Histograma del modelo HSV

e) Imagen original en Y'CbCr

f) Histograma del modelo Y'CbCr

g) Imagen original en YIQ

h) Histograma del modelo YIQ

Figura 47. Análisis de una palta con quemaduras.

Elaboración propia.

a) Imagen original RGB.

b) Histograma del modelo RGB

c) Imagen original en HSV

d) Histograma del modelo HSV

e) Imagen original en Y'CbCr

f) Histograma del modelo Y'CbCr

g) Imagen original en YIQ

h) Histograma del modelo YIQ

Figura 48. Análisis de palta con manchas negras.

Elaboración propia.

Del análisis de los histogramas de los modelos de color previos, se observa que la diferencia más notoria y con mayor desviación estándar para los índices de calidad de rozamiento y quemaduras por sol se encuentran en la componente R del modelo de color RGB, y para los índices de calidad de manchas negras, lenticelas o quemaduras por frío, se encuentran en la componente G del mismo modelo. Es por esta inclinación de los defectos al rojo y negro respectivamente, que se eligió agrupar estos defectos para un procesamiento más eficaz y eficiente.

4.2.8 Cálculo de umbrales

Una vez determinado el modelo de color para cada defecto de calidad se procede a determinar el umbral óptimo para diferenciar la intensidad correspondiente al área de la palta de buena calidad y la defectuosa. Teniendo en cuenta el tiempo de procesamiento del método a emplear, se tomaron 2 decisiones: umbral fijo para el análisis de la componente R y un umbral adaptivo para el análisis de la componente G de la imagen original recortada $I_3(x, y)$.

El umbral fijo se define en la *ecuación 41*, el cual se eligió en base al análisis visual de 500 histogramas de la componente R entre paltas con rozamiento y con quemaduras por sol, ya que, en esta componente la diferencia de estos defectos es más notoria, por tal motivo se eligió un umbral común aceptable. En la *Figura 49a* se muestra una palta con rozamiento, que ha sufrido el procesamiento detallado hasta ahora, en *Figura 49b* su componente R y en la *Figura 49c* el histograma de su componente R.

$$U_R = 105 \quad (41)$$

Dónde:

- “ U_R ”: Umbral fijo de la componente R para rozamiento y quemaduras.

a) Imagen transformada segmentada.

b) Componente R de la figura 49a.

c) Histograma de la componente R de una palta con rozamiento.

Figura 49. Ejemplo de análisis de paltas con rozamientos y quemaduras de sol.

Elaboración propia.

Para el análisis de los defectos por manchas negras, se utiliza la componente G y se eligió un método de umbral adaptivo; ya que, la diferencia de intensidades entre aceptado y rechazado por manchas negras no es evidente como en el caso de las paltas con rozamiento o quemaduras por sol. A su vez, estos varían según la posición y la iluminación de la palta en el momento que es capturada.

Es por esta razón que se usó un análisis por bloques, es decir, se divide la imagen en 100 partes iguales. Dado que las imágenes capturadas son de 640x480 píxeles, cada bloque constará de 64x48 píxeles. Luego en cada bloque o porción de imagen se calcula el umbral de palta aceptada de la forma que sigue, según corresponda:

Sea $I_p(x, y)$ una porción de la imagen $I_3(x, y)$, luego, se define a $h_p(r)$ como el histograma de dicho bloque y a r_{Mp} como la intensidad de mayor frecuencia absoluta en dicho bloque, entonces el cálculo del umbral en cada bloque se define en la *ecuación 42*.

$$U_{Gp} = \begin{cases} r_{Mp} - 35, & r_m - 35 > 30 \\ 30, & \text{en otros casos} \end{cases} \quad (42)$$

Dónde:

- “ U_{Gp} ”: *Umbral adaptivo del bloque “p” de la componente G.*
- “ r_{Mp} ”: *Intensidad de mayor frecuencia absoluta.*

Luego de la división, esta ecuación obtiene por cada bloque un umbral que se define como el nivel de intensidad de mayor acumulación de pixeles restado 35, umbral donde se diferencian las manchas negras. De las pruebas realizadas, se halló 30 como la intensidad mínima a ser considerada como palta buena.

Los 100 umbrales calculados se utilizarán en la sección siguiente para: examinar los defectos de calidad por manchas negras, bloque por bloque. La validación de estos umbrales elegidos se verá más adelante en la validación del algoritmo propuesto. El algoritmo del cálculo de umbral adaptivo se muestra en el diagrama de flujo de la *Figura 50*.

Figura 50. Diagrama de flujo del umbral adaptivo.

Elaboración propia.

4.2.9 Cálculo de porcentajes de áreas

Continuando con el análisis de calidad se tiene el cálculo por bloque de porcentajes de las áreas de la palta: porcentaje de área de palta buena, de rozamiento o de manchas negras. Para ello, se utilizan los umbrales hallados anteriormente y se calculan los porcentajes contabilizando el número de píxeles ubicados dentro de dichos umbrales y dividiéndolos entre la cantidad total de píxeles.

Sea $I_p(x, y)$, el bloque de la imagen a analizar, se calcula de este los umbrales de las componentes R y G de las *ecuaciones 41 y 42* respectivamente. Seguidamente se calcula el porcentaje de áreas, como sigue en las *ecuaciones 43, 44 y 45*, para porcentaje de área buena (Ab), con rozamiento (Ar) y con manchas negras (An) respectivamente:

$$Ab = \frac{100}{Tp} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I_{pR}(x, y) < U_R \wedge I_{pG}(x, y) > U_G) \quad (43)$$

$$Ar = \frac{100}{Tp} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I_{pR}(x, y) > U_R) \quad (44)$$

$$An = \frac{100}{Tp} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I_{pG}(x, y) < U_G) \quad (45)$$

Dónde:

- " Ab ": Porcentaje de área de buena calidad de la palta.
- " Ar ": Porcentaje de área con rozamiento de la palta,
- " An ": Porcentaje de área con manchas negras de la palta.
- " Tp ": Cantidad total de píxeles.
- " I_{pR} ": Componente R del bloque de la imagen a analizar.
- " I_{pG} ": Componente G del bloque de la imagen a analizar.
- " U_R ": Umbral fijo de la componente R para rozamiento y quemaduras.
- " U_G ": Umbral adaptivo de la componente G para manchas negras.

Finalmente, con el objetivo de comparar visualmente los resultados obtenidos del algoritmo de control de calidad se hace uso de una imagen en falso color, es decir, se colorea la imagen original con tres distintos colores resaltantes: verde, rojo y azul, según los criterios finales: palta buena, rozamiento o quemaduras por sol y manchas negras, lenticelas o quemaduras por frío respectivamente. Se eligieron estos colores en base a su similitud a los defectos de

la palta y procesamiento simple. La nueva imagen en falso color $I_{fc}(x, y)$ se calcula en la ecuación 46, y un ejemplo de este proceso se muestra en la Figura 51, teniendo como imagen de entrada $I_3(x, y)$ de una palta con rozamiento y manchas negras.

$$I_{fc}(x, y) = \begin{cases} I_{fcR}(x, y) = 255, & I_{pR}(x, y) > U_R \\ I_{fcB}(x, y) = 255, & I_{pG}(x, y) < U_G \\ I_{fcG}(x, y) = 255, & I_{pR}(x, y) < U_R \wedge I_{pG}(x, y) > U_G \\ 0, & \text{en otros casos} \end{cases} \quad (46)$$

Dónde:

- " $I_{fc}(x, y)$ ": Imagen en falso color calculada.
- " $I_{fcR}(x, y)$ ": Componente R de la imagen en falso color calculada.
- " $I_{fcG}(x, y)$ ": Componente G de la imagen en falso color calculada.
- " $I_{fcB}(x, y)$ ": Componente B de la imagen en falso color calculada.
- " $I_{pR}(x, y)$ ": Componente R del bloque de la imagen a analizar.
- " $I_{pG}(x, y)$ ": Componente G del bloque de la imagen a analizar.

a) Imagen con defectos recortada

b) Imagen con defectos en falso color

Figura 51. Comparación visual del algoritmo de detección.

Elaboración propia.

4.2.10 Resultados del procesamiento

Producto del procesamiento de imágenes del análisis de calidad de las paltas, se tiene como resultado el porcentaje de área defectuosa y la imagen en falso color, vistos en el apartado anterior, resultados que se traducirán en una decisión de selección.

Dado que el área de defecto máximo de una palta debe ser de 3 cm² aproximadamente, se establece en 5% del área de la imagen de la palta capturada. A ello se le agrega un margen de error $\pm 3\%$ ya que el porcentaje de área no es la misma para todas las paltas, dando como resultado un máximo de 8% de área defectuosa permisible en la imagen de la palta. Por ende, si el porcentaje del área buena es menor de 92%, se envía un resultado de rechazado al controlador, el cual se muestra en la *ecuación 47*.

$$Res = \begin{cases} Rechazado, & Ab < 92 \\ Aceptado, & Ab \geq 92 \end{cases} \quad (47)$$

Dónde:

- "Res": *Resultado del algoritmo de detección.*
- "Ab": *Porcentaje de área de buena calidad.*

Posteriormente, este resultado del algoritmo de detección, es enviado al controlador para que seleccione la palta según corresponda, al mismo tiempo que lleva un conteo de los resultados obtenidos. El análisis de las pruebas realizadas y validación de la eficiencia del algoritmo diseñado se realizarán en el siguiente capítulo.

4.3 Diseño de la interfaz en MATLAB

La aplicación fue desarrollada con la finalidad de permitir que el usuario pueda visualizar en tiempo real el estado de sistema y los resultados de la selección de las paltas según sus índices de calidad.

En síntesis, el software tiene tres principales funciones: (1) establecer la conexión con las cámaras y la comunicación con el controlador, (2) el procesamiento de las paltas de forma continua, y (3) la creación y almacenamiento de los datos obtenidos en Excel. En la *Figura 52* se presenta una imagen de la interfaz diseñada.

Figura 52. Imagen de la interfaz diseñada.

Elaboración propia.

Dónde:

- a. Muestra las últimas imágenes capturadas / imagen en falso color.*
- b. Guarda las imágenes actuales / los resultados en una base de datos.*
- c. Selección de velocidades.*
- d. Logo de la empresa.*
- e. Título del prototipo.*
- f. Fecha actual.*
- g. Imagen en tiempo real de las cámaras conectadas.*
- h. Porcentaje de los índices de calidad de la palta.*
- i. Leyenda.*
- j. Botón que inicia el procesamiento en línea*
- k. Botón de pausa del programa y la faja.*
- l. Botón de reinicio, que resetea los contadores.*
- m. Decisión tomada de la última palta procesada.*
- n. Resultados de procesamiento.*

4.4 Descripción de problemas y soluciones

Problemas:

- Dificultad al detectar los defectos de manchas negras o lenticelas.
- El pre-procesamiento deja pequeños vacíos dentro de la palta.
- Dificultad al identificar los defectos de la palta solo con porcentajes o números.
- Dado que cada palta tiene que pasar por las tres cámaras, los resultados de cada procesamiento se perdían al pasar por selección.
- El ruido en la sincronización de los sensores con el controlador lógico programable (PLC).

Soluciones:

- Se realizó un análisis por bloques en la componente G.
- Se usó la dilatación seguida de la erosión, conocida como la operación morfológica de clausura, para rellenar dichos vacíos.
- Se usa imágenes en falso color, es decir, se colorea la imagen original con tres distintos resaltantes: verde, rojo y azul, según los criterios finales: palta buena, rozamiento o quemadura por sol y manchas negras, lenticelas y quemadura por frío respectivamente.
- Se realizó un programa secuencial en el controlador que almacena los resultados.
- Se utilizó una conexión a tierra común, también conectado al soporte mecánico.

4.5 Conclusiones y comentarios

Se cumplió con el objetivo de describir el algoritmo de detección y clasificación de paltas Hass según sus defectos de calidad, rozamiento, quemadura por sol o frío, manchas negras o lenticelas, y que este a su vez es replicable en la industria con las adaptaciones adecuadas.

Los parámetros establecidos en la configuración de las cámaras se eligieron con el objetivo de encontrar una mayor diferencia entre el fondo y la palta.

Se obtuvo un mejor procesamiento con el modelo de color RGB.

Resultó crucial la implementación del umbral adaptivo debido a la mejora en distinguir la palta buena y defectos de manchas negras, ya que, la iluminación varía según el área de la palta.

Se diseñó una interfaz sencilla y de fácil interacción, con la finalidad de mostrar los resultados del algoritmo, siendo este un modelo funcional.

El algoritmo se propone migrar a una plataforma de uso libre para su posible instalación en una empresa.

5 CAPÍTULO 5: PRUEBAS DE VALIDACIÓN Y RESULTADOS

En este último capítulo, se realiza la descripción de los métodos de validación utilizados para evaluar el proyecto desarrollado. Asimismo, se hace una recopilación de los resultados obtenidos y sus respectivos análisis. Se empieza describiendo los métodos de validación y las etapas del sistema a ser validadas. Para esto se tomó en cuenta las etapas más críticas e importantes del sistema: la captura de toda la palta, la segmentación de la palta hecha por el procesamiento de imágenes, el algoritmo implementado bajo diferentes escenarios y por último se valida el proceso de selección continuo.

Adicionalmente, se detalla la evaluación de satisfacción del personal usuario sobre la implementación del proyecto piloto. Finalmente, se realiza el informe económico del proyecto, el cual detalla los gastos y el costo del producto.

5.1 Métodos de validación

Para corroborar la fidelidad del sistema planteado, es necesario someterlo a una prueba de confiabilidad. En este fin, se usaron principalmente tres medidas de validación: el coeficiente de Kappa de Cohen, porcentaje de concordancia y la evaluación cuantitativa explicadas en el capítulo 2.

Por ser la palta un producto perecible y para poder validar la certeza de los resultados obtenidos con el software, se recopiló una base de datos de más de 1500 imágenes de paltas con los diferentes índices de calidad mencionados anteriormente, capturadas de forma continua a la velocidad propuesta en el capítulo 3.2.1.

En cuanto a la selección del número de pruebas, no se encontró bibliografía que especifique un número mínimo de muestras o ensayos para la validación. No obstante, se tomó la mayor cantidad de fotos a las paltas dispuestas.

5.2 Validación de la adquisición de imágenes

En esta sección se tiene como objetivo medir el desempeño de la adquisición de toda la palta, es decir, validar que el sistema tome las tres caras de una palta. Para ello se tomaron como objetos de prueba 2 paltas artificiales y 6 reales, luego se marcan en tres secciones de 120 grados cada una e ingresan al sistema repetidas veces, como se muestra en el capítulo 4.2.1 en la *Figura 37*. Se realizaron un total de 200 pruebas, donde se utilizó la *ecuación 22* para hallar el porcentaje de error (*ecuación 48*).

$$\varepsilon_v = \frac{|200 - 192|}{192} \times 100\% = 4.17\% \quad (48)$$

De las 200 pruebas realizadas, 192 fueron exitosas en captar las tres caras de la palta correctamente, del cual se obtiene un porcentaje de error de 4.17%, el cual se considera aceptable, teniendo en cuenta el número de pruebas realizadas y las razones por las cuales fueron erróneas.

En la ejecución de esta validación se pudo observar que las pruebas negativas obtenidas se deben a 3 principales razones: (1) la palta ingresó en posición impropia al sistema, (2) desfase en la captura de la palta o (3) estas tienen un diámetro atípico, mayor a 8 cm de ancho.

5.3 Validación de segmentación

Un punto crítico e importante del sistema, y en especial del algoritmo planteado, es la identificación o segmentación de la palta. Para validar este proceso se usa el método de evaluación cuantitativa con una escala de 1 a 5, donde:

- 1: Muy mala segmentación.
- 2: Mala segmentación.
- 3: Regular segmentación.
- 4: Buena segmentación.
- 5: Excelente segmentación.

En este análisis se usó la base de datos comprendida de 1500 muestras aleatorias con diferentes índices de calidad, capturadas de forma individual, en las cuales el analista de la solución propuesta compara la imagen original y la segmentada. Luego le asigna un puntaje entre 1 y 5 según su criterio de calidad de segmentación, este puntaje es guardado y registrado como medio de validación.

Después de calificar las 1500 muestra se cuantificó los resultados, los cuales se muestran en la *Tabla 6*.

Tabla 6

Resultados de la segmentación evaluada por analista.

Valor Cuantitativo	Valor Cualitativo	Número de Muestras	Porcentaje
1	Muy mala segmentación	24	1.6%
2	Mala segmentación	7	0.5%
3	Regular segmentación	103	6.9%
4	Buena segmentación	582	38.8%
5	Excelente segmentación	784	52.3%

Elaboración propia.

Seguidamente en la ecuación 49, se halla el promedio cuantitativo de los resultados mostrados en la tabla anterior.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{1500} \sum_{i=1}^{1500} x_i = 4.40 \cong 4 \quad (49)$$

Dónde:

- " $\bar{X}$ ": *Media aritmética.*
- " x_i ": *Valor de calificación.*
- " n ": *Número total de datos.*

Del puntaje promedio obtenido de esta evaluación, se infiere que se realiza una identificación de palta aceptable por parte del algoritmo planteado y se observa que gran parte de las segmentaciones calificadas como muy malas se deben a fotos de paltas completamente negras, es decir muy maduras.

5.4 Validación del algoritmo de detección

Validado la segmentación de la palta, en este apartado se presentará las pruebas de validación del algoritmo de detección de defectos, desarrollado en el capítulo anterior. Para esto, se hará uso de la medición estadística de coeficiente de Kappa de Cohen, explicado en el capítulo 2, con el fin de comparar las respuestas del analista y la máquina. Se utilizará la base de datos

detallada anteriormente, obtenida de forma individual, el cual se divide en tres secciones bajo los siguientes escenarios:

Escenario 1: De la base de datos adquirida, se analizan 500 imágenes individuales y diferentes de paltas al azar que en su mayoría son de buena calidad. En este escenario se utiliza el método de validación mencionado para hallar el grado de concordancia entre la máquina y el analista, donde “Sí” significa para ambos evaluadores palta aceptada y “No” es palta rechazada. En la *Tabla 7* se muestran los resultados y el coeficiente Kappa de Cohen se calcula en la *ecuación 54*.

Tabla 7
Índice Kappa para paltas aceptadas

Kappa de Cohen Escenario 1		Máquina		
		Sí	No	Total
Analista	Sí	331	11	342
	No	8	150	158
	Total	339	161	500
Kp_A				91.3%

Elaboración propia.

En la *ecuación 50* se muestra el porcentaje de acuerdo entre el analista y el sistema, necesario para hallar el coeficiente Kappa de Cohen.

$$Pr_A(a) = \frac{331 + 150}{331 + 11 + 8 + 150} = 0.962 \quad (50)$$

La probabilidad de que ambos evaluadores digan “Sí” al azar es:

$$Pr_A(Si) = \frac{331 + 8}{500} \times \frac{331 + 11}{500} = 0.464 \quad (51)$$

La probabilidad de que ambos evaluadores digan “No” al azar es:

$$Pr_A(No) = \frac{8 + 150}{500} \times \frac{11 + 150}{500} = 0.102 \quad (52)$$

La probabilidad global de concordancia aleatoria es:

$$Pr_A(e) = Pr_A(Si) + Pr_A(No) = 0.566 \quad (53)$$

Aplicando la fórmula de Kappa de Cohen se tiene:

$$Kp_A = \frac{Pr_A(a) - Pr_A(e)}{1 - Pr_A(e)} = 0.913 = 91.3\% \quad (54)$$

Según estos resultados, Kp_A , y la *Tabla 3* de valoración del índice Kappa de Cohen, muestran una fuerza de concordancia muy buena, por lo que se puede concluir que para el escenario 1, el algoritmo de detección funciona correctamente al procesar paltas aceptadas.

Escenario 2: En este ensayo se analizan otras 500 imágenes individuales y diferentes de paltas al azar que en su mayoría cuentan con rozamiento o quemaduras por sol. Aplicando el método de coeficiente de Kappa de Cohen se halla el grado de concordancia entre la máquina y el analista, donde “Sí” significa para ambos evaluadores palta aceptada y “No” es palta rechazada por rozamiento o quemaduras por sol. En la *Tabla 8* se muestran los resultados y el coeficiente Kappa de Cohen se calcula en la *ecuación 59*.

Tabla 8
Índice Kappa para paltas con rozamiento o quemaduras por sol

Kappa de Cohen Escenario 2		Máquina		
		Sí	No	Total
Analista	Sí	92	21	113
	No	4	383	387
	Total	96	404	500
Kp_R				84.9%

Elaboración propia.

En la *ecuación 55* se muestra el porcentaje de acuerdo entre el analista y el sistema, necesario para hallar el coeficiente Kappa de Cohen.

$$Pr_R(a) = \frac{92 + 383}{92 + 4 + 21 + 383} = 0.950 \quad (55)$$

La probabilidad de que ambos evaluadores digan “Sí” al azar es:

$$Pr_R(Si) = \frac{92 + 4}{500} \times \frac{92 + 21}{500} = 0.043 \quad (56)$$

La probabilidad de que ambos evaluadores digan “No” al azar es:

$$Pr_R(No) = \frac{4 + 383}{500} \times \frac{21 + 383}{500} = 0.625 \quad (57)$$

La probabilidad global de concordancia aleatoria es:

$$Pr_R(e) = Pr_R(Si) + Pr_R(No) = 0.669 \quad (58)$$

Aplicando la fórmula de Kappa de Cohen se tiene:

$$Kp_R = \frac{Pr_R(a) - Pr_R(e)}{1 - Pr_R(e)} = 0.849 = 84.9\% \quad (59)$$

Según el resultado de Kp_R y la *Tabla 3* de valoración del índice Kappa de Cohen, muestran una fuerza de concordancia muy buena, por lo que se puede concluir que para el escenario 2, el algoritmo de detección funciona correctamente al procesar paltas con rozamiento o quemaduras por sol.

Escenario 3: En este ensayo se analizan otras 500 imágenes individuales y diferentes de paltas al azar que en su mayoría cuentan con manchas negras, lenticelas o quemaduras por frío. Aplicando el método de coeficiente de Kappa de Cohen se halla el grado de concordancia entre la máquina y el analista, donde “Sí” significa para ambos evaluadores palta aceptada y “No” es palta rechazada por manchas negras o quemaduras por frío. En la *Tabla 9* se muestran los resultados y el coeficiente Kappa de Cohen se calcula en la *ecuación 64*.

Tabla 9
Índice Kappa para paltas con manchas negras

Kappa de Cohen Escenario 3		Máquina		
		Sí	No	Total
Analista	Sí	106	22	128
	No	13	359	372
	Total	119	381	500
Kp_N				81.2%

Elaboración propia.

En la *ecuación 60* se muestra el porcentaje de acuerdo entre el analista y el sistema, necesario para hallar el coeficiente Kappa de Cohen.

$$Pr_N(a) = \frac{106 + 359}{106 + 13 + 22 + 359} = 0.930 \quad (60)$$

La probabilidad de que ambos evaluadores digan “Sí” al azar es:

$$Pr_N(Si) = \frac{106 + 13}{500} \times \frac{106 + 22}{500} = 0.061 \quad (61)$$

La probabilidad de que ambos evaluadores digan “No” al azar es:

$$Pr_N(No) = \frac{13 + 359}{500} \times \frac{22 + 359}{500} = 0.567 \quad (62)$$

La probabilidad global de concordancia aleatoria es:

$$Pr_N(e) = Pr_N(Si) + Pr_N(No) = 0.628 \quad (63)$$

Aplicando la fórmula de Kappa de Cohen se tiene:

$$Kp_N = \frac{Pr_N(a) - Pr_N(e)}{1 - Pr_N(e)} = 0.812 = 81.2\% \quad (64)$$

Según el resultado de Kp_N y la *Tabla 3* de valoración del índice Kappa, se obtiene una fuerza de concordancia muy buena, por lo que se puede concluir que para el escenario 3, el algoritmo funciona correctamente al procesar paltas con manchas negras, quemaduras por frío o lenticelas.

Escenario 4: En este ensayo se tomaron en cuenta todas las fotos de las paltas adquiridas, las cuales suman un total de 1500 muestras. Aplicando el método de validación de Kappa de Cohen se halla el grado de concordancia entre la máquina y el analista, donde “Sí” significa para ambos evaluadores palta aceptada y “No” es palta rechazada. En la *Tabla 10*, se muestran los resultados y el coeficiente Kappa de Cohen se calcula en la *ecuación 69*.

Tabla 10
Índice Kappa para paltas

Kappa de Cohen Escenario 4		Máquina		
		Sí	No	Total
Analista	Sí	529	54	583
	No	25	892	917
	Total	554	946	1500
Kp_T				88.8%

Elaboración propia.

En la ecuación 65 se muestra el porcentaje de acuerdo entre el analista y el sistema, necesario para hallar el coeficiente Kappa de Cohen.

$$Pr_T(a) = \frac{529 + 54}{529 + 25 + 54 + 892} = 0.947 \quad (65)$$

La probabilidad de que ambos evaluadores digan “Sí” al azar es:

$$Pr_T(Si) = \frac{529 + 25}{1500} \times \frac{529 + 54}{1500} = 0.144 \quad (66)$$

La probabilidad de que ambos evaluadores digan “No” al azar es:

$$Pr_T(No) = \frac{25 + 892}{1500} \times \frac{54 + 892}{1500} = 0.386 \quad (67)$$

La probabilidad global de concordancia aleatoria es:

$$Pr_T(e) = Pr_T(Si) + Pr_T(No) = 0.529 \quad (68)$$

Aplicando la fórmula de Kappa de Cohen se tiene:

$$Kp_T = \frac{Pr_T(a) - Pr_T(e)}{1 - Pr_T(e)} = 0.888 = 88.8\% \quad (69)$$

Según la Tabla 3 de valoración del índice Kappa y el coeficiente Kappa para paltas hallado en la Tabla 10, Kp_T , se obtiene una fuerza de concordancia muy buena, por lo que se puede concluir que el algoritmo funciona correctamente al procesar las paltas.

5.5 Validación de la selección continua

Por último, se presenta la validación del sistema integral de forma continua, que incluye las evaluaciones del hardware, para lo cual se hará uso del coeficiente de concordancia, detallado en el capítulo 2. A diferencia de la validación anterior no se requiere comparar las respuestas o resultados del analista y la máquina, al contrario, se evalúa los resultados arrojados por la máquina y su error.

Dado que el error máximo establecido con la empresa es de 5%, con el fin de analizar la confiabilidad del algoritmo de forma continua, se proponen tres escenarios. Esta validación integral incluye la validación de todo el sistema:

Escenario 1: Se introdujeron 5 paltas aleatorias con diferentes índices de calidad continuas al sistema, realizando 30 veces esta prueba. Con un total de 150 muestras se obtuvo los resultados de concordancia de la *ecuación 70*, plasmados en la *Tabla 11*.

$$Pr_1(a) = \frac{75 + 72}{150} = 0.980 = 98.0\% \quad (70)$$

Tabla 11
Índice de concordancia para el escenario 1

Concordancia Escenario 1		Máquina		
		Sí	No	Total
Analista	Sí	75	3	78
	No	0	72	72
	Total	75	75	150
Pr_1(a)				98.0%

Elaboración propia.

De la *Tabla 11*, se observa que, al ingresar 5 paltas continuas 30 veces seguidas, se tiene un índice de concordancia de 98.0%, que representa un error de 2%, el cual está dentro de la tolerancia establecida, lo cual significa que el analista está de acuerdo con los resultados arrojados por la máquina y que esta tiene un error de 2%.

Escenario 2: Se introdujeron 10 paltas con diferentes índices de calidad continuas al sistema, realizando esta prueba 15 veces. Con un total de 150 muestras se obtuvo los siguientes resultados de concordancia (*ecuación 71*) plasmados en la *Tabla 12*.

$$Pr_2(a) = \frac{70 + 75}{150} = 0.967 = 96.7\% \quad (71)$$

Tabla 12
Índice de concordancia para el escenario 2

Concordancia Escenario 2		Máquina		
		Sí	No	Total
Analista	Sí	70	4	74
	No	1	75	76
	Total	71	79	150
Pr_2(a)				96.7%

Elaboración propia.

De la *Tabla 12*, se observa que, al ingresar 10 paltas continuas 15 veces seguidas, se tiene un índice de concordancia de 96.7%, que representa un error de 3.3%, el cual está dentro de la tolerancia establecida.

Escenario 3: Se introdujeron 15 paltas reales continuas al sistema, realizando 10 veces esta prueba. Con un total de 150 muestras se obtuvo los siguientes resultados de concordancia (*ecuación 72*) plasmados en la *Tabla 13*.

$$Pr_3(a) = \frac{80 + 66}{150} = 0.973 = 97.3\% \quad (72)$$

Tabla 13
Índice de concordancia para el escenario 3

Concordancia Escenario 3		Máquina		
		Sí	No	Total
Analista	Sí	80	2	82
	No	2	66	68
	Total	82	68	150
Pr_3(a)				97.3%

Elaboración propia.

De la tabla anterior, se observa que, al ingresar 15 paltas continuas 10 veces seguidas, se tiene un índice de concordancia de 97.3%, que representa un error de 2.7%, el cual está dentro de la tolerancia establecida.

De estas pruebas realizadas se observa que el error al introducir paltas continuas ya sea de 5 en 5 o de 15 en 15, tiende a ser el mismo. Por lo cual se puede deducir que no influye la cantidad de paltas que pasen por la banda transportadora puesto que todas serán procesadas. Además, se valida que el error máximo de la máquina es 3.3%.

5.6 Informe financiero

A continuación, se presenta en la *Tabla 14* los costos de los equipos a utilizar en el desarrollo del prototipo del proyecto, para el cual el precio del dólar se consideró de S/3.4.

Tabla 14
Costos del prototipo

Nombre	Descripción	Uso	Cant.	Costo unitario	Costo total	Comentarios
Lenovo Y50-70	RAM: 12 GB Memoria: 1 TB Procesador: i7	Plataforma de Procesamiento	1	S/. 4416.60	S/. 0.00	Recurso propio
Matlab	Lenguaje de alto nivel Extensa biblioteca de funciones	Programación del algoritmo	1	S/. 7990.00	S/. 0.00	Recurso UPC
Logitech Webcam C170	Cámara HD	Captura de imagen	3	S/. 156.23	S/. 468.69	Deltron
Acero Inoxidable	Tipo 316 Plancha 2x1 m	Recinto de procesamiento	1	S/. 200.00	S/. 200.00	-
Melamina	15mm de espesor	Recinto de prueba	1	S/. 70.00	S/. 70.00	Maestro
Doble y cortes acero	Doble y cortes para recinto	Recinto de procesamiento	1	S/. 100.00	S/. 100.00	-
Caucho	Color negro	Recinto de procesamiento	2	S/. 10.00	S/. 20.00	C.C. Eden
Paltas Artificiales	Tamaño de 8x12cm	Pruebas del recinto	20	S/. 3.00	S/. 60.00	Mercado Central
Visita a planta	Recolección de información de paltas	Incluye pasajes	1	S/. 200.00	S/. 200.00	Verdeflor
Vidrio Pavonado	Tamaño de 5x60cm	Iluminación del recinto	2	S/. 30.00	S/. 60.00	Vidriería Gonzales

Iluminación Leds	Rollo de 5m	Iluminación del recinto	4	S/. 35.00	S/. 140.00	Paruro
Estructura Mecánica	Fierro negro	Soporte	1	S/. 100.00	S/. 100.00	-
Sistema de transmisión	Banda transportadora	Desplazar rodillos	1	S/. 2000.00	S/. 2000.00	-
Motor reductor	1800 rpm, ½ Hp, reducción 40 a 1	Movimiento de las cadenas	1	S/.180.00	S/. 180.00	-
Mano de obra	Torno, doblez, cortes, soldadura	Ajustes de la mecánica	1	S/. 500.00	S/. 500.00	-
Mecánica selección	Fierro negro Plancha acero	Etapas de selección	1	S/. 350.00	S/. 350.00	Mecánica Valdivia
Selección ajustable	Acero	Etapas de selección	1	S/. 150.00	S/. 150.00	Mecánica Valdivia
Tablero eléctrico	40*30*20 cm	Tablero para selección	1	S/. 360.00	S/. 360.00	Tel Sat
Guardamotor	ABB – MS116	Protección de motor	1	S/. 400.00	S/. 400.00	Tel Sat
Interruptor Termomagnético	ABB – S262M	Protección del sistema	1	S/. 350.00	S/. 350.00	Tel Sat
Variador de Velocidad	SIEMENS – SINAMICS G110	Variar velocidad de etapas de transporte	1	S/. 350.00	S/. 350.00	DinAutomation
Fuente de Alimentación	HURRICANE – LLA-1000NA	Fuente para iluminación	1	S/. 50.00	S/. 50.00	Tel Sat
Fuente de Alimentación	ACRO – AD1048-24F	Fuente para sensores	1	S/. 150.00	S/. 140.00	CSR Import
Borneras	ABB	Conexión a salida de tablero	15	S/. 5.00	S/. 75.00	Tel Sat
Pulsadores	ABB		4	S/. 25.00	S/. 100.00	Tel Sat
Luces Pilotos	ABB	Señalización	3	S/. 35.00	S/. 105.00	Tel Sat
PLC S7-1200	Controlador lógico programable Lenguaje: STEP 7	Unidad de Control	1	S/. 1000.00	S/. 1000.00	DinAutomation

Sensor Fotoeléctrico R3JK	Alcance: 2 m	Detección de la palta en etapa de selección	1	S/. 200.00	S/. 200.00	CSR Import
Sensor Capacitivo	Diámetro: 18 cm Alcance: 2 mm	Detección de la palta de prueba	3	S/. 119.00	S/. 357.00	Autonics
Sensor Fotoeléctrico PMF-R2NP1	Alcance: 2 m Pequeños	Detección de la palta en faja transportadora	3	S/. 432.20	S/. 432.20	CSR Import
Pistón Neumático – MAL20x150	Alcance: 200 mm Aire comprimido	Posicionamiento de la palta	2	S/. 120.00	S/. 240.00	Neumática Industrial
Electroválvula	KLPD – 4V21-08	Controlar paso de aire	2	S/. 60.00	S/. 120.00	Neumática Industrial
Compresor	Galeazy – 50 litros	Generador y almacenador de aire	1	S/. 400.00	S/. 400.00	J y B Nuñez S.A.C.
Paltas Hass	Paltas para validar (donadas)	Producto a analizar de prueba	70	S/. 4.00	S/. 0.00	Verdeflor S.A.C.
Paltas Hass	Paltas para validar (compradas)	Producto a analizar	30	S/. 4.00	S/. 120.00	Plaza Vea
Paltas Fuerte	Paltas para pruebas	Producto a analizar	30	S/. 3.30	S/. 99.00	Vivanda
TOTA SOLUCIÓN PROTOTIPO:				S/. 9496.89		

Elaboración propia.

5.7 Comentarios y conclusiones

La validación del software implementado muestra una fuerza de concordancia muy buena, según la tabla del índice Kappa de Cohen, de lo cual se infiere, que el algoritmo desarrollado cumple con los objetivos planteados.

Se observa que, a mayor cantidad de pruebas realizadas, mayor es la concordancia entre el analista y la máquina, ya que la probabilidad de concordancia es mucho mayor.

La discrepancia entre usuario y máquina, se da cuando se procesan paltas críticas; es decir, la tolerancia del área rechazada se encuentra en el límite permisible, de lo cual se percibe que la probabilidad de error humano es mayor.

Es importante contar con un sistema neumático confiable para evitar errores con el suministro de aire a la etapa de selección.

6 CONCLUSIONES

- Se desarrolló el prototipo de un sistema automático de selección de paltas Hass por sus índices de calidad de rozamiento, quemaduras por sol o frío y manchas negras o lenticelas.
- Se diseñó y construyó un recinto con un sistema de iluminación que permite la captura de imágenes sin perturbaciones exteriores.
- Se implementó un sistema de adquisición de imágenes sincronizado con los sensores de proximidad ópticos.
- Se implementó un sistema mecatrónico capaz de realizar la selección de las paltas según sus índices de calidad.
- Se desarrollo un prototipo mecánico que permite transportar las paltas desde el inicio del proceso hasta su clasificación.
- Se desarrolló un modelo de software de procesamiento de imágenes capaz de identificar los índices de calidad de las paltas Hass e indicar los frutos hábiles para la exportación.
- Se diseñó un algoritmo capaz de cuantificar los datos obtenidos de los factores de calidad para exportación.
- Se realizaron las pruebas de validación del algoritmo de detección y del sistema integral, con el apoyo de la empresa Agroindustrias Verdeflor SAC, obteniendo resultados favorables de confiabilidad.
- Se demostró que la solución propuesta es factible para un desarrollo macro industrial.
- Se reduce la probabilidad de error humano de 5-8% a 3.3%, menos del 5% establecido con la empresa.
- El sistema es un prototipo innovador para el mercado local, por lo que ya está registrado en Indecopi como modelo de utilidad.

7 RECOMENDACIONES

- Cambiar el material de los rodillos transportadores e implementar la segunda línea de procesamiento para reducir los tiempos de mantenimiento y procesar mayor número de paltas.
- Calcular solo el porcentaje de área buena de las paltas en la identificación de esta, con el fin de ahorrar tiempo de procesamiento.
- Cambiar la compuerta de la etapa de selección por una de mayor longitud y seguridad.
- Migrar el modelo de algoritmo propuesto a una plataforma de uso libre para su posible instalación en una empresa.
- Implementar una línea de separación de mayor longitud, que permita la estabilización de las paltas en la banda transportadora.
- Instalar los sensores ópticos en la parte superior del recinto al aumentar las líneas de procesamiento.

8 REFERENCIAS

- Alta Tecnología de Vanguardia (Altec). (2017). ¿Qué son las Electroválvulas? Recuperado de <https://www.altecdust.com/soporte-tecnico/que-son-las-electrovalvulas> [Consulta: 10 de marzo de 2017].
- Araya, L. (2011). Respuestas sobre variadores de frecuencia (VFD). Recuperado de <http://arayaingenieria.blogspot.com/2011/02/respuestas-sobre-variadores-de.html> [Consulta: 10 de marzo de 2017].
- Armando, C. (2019). *La situación del mercado internacional de la palta*. Lima: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Arzate, I., Chanona, J., Perea, M., Calderón, G., Moreno, M., Calvo, H., ... Gutiérrez, G. (2011). Image Processing Applied to Classification of Avocado Variety Hass (Persea americana Mill.) During the Ripening Process. *Food and Bioprocess Technology*, 4(7), 1307-1313. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0595-6>.
- Asea Brown Boveri (ABB). (2013). Distribución de Potencia y Protección Eléctrica. Recuperado de [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/5a60ac7d24dadfa285257a360079ec7b/\\$file/Distribución+de+Potencia+y+Protección+Eléctrica.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/5a60ac7d24dadfa285257a360079ec7b/$file/Distribución+de+Potencia+y+Protección+Eléctrica.pdf) [Consulta: 10 de marzo de 2017].
- Carletta, J. (1996). Assessing Agreement on Classification Tasks: The Kappa Statistic. *Computational Linguistics*, 22(2), 249-254.
- Centro de Tecnología e Innovación (CTIN). (2013). ¿Qué es un PLC? Recuperado de <http://www.ctinmx.com/que-es-un-plc/> [Consulta: 10 de marzo de 2017].
- Compac Sorting Equipment. (2019). Spectrim. Recuperado de <https://www.compacsort.com/en/spectrim/> [Consulta: 1 de junio de 2016].
- Control Valves. (2018). Unidad de mantenimiento. Recuperado de <https://www.controlvalvesperu.com/unidad-mantenimiento.html> [Consulta: 2 de diciembre de 2018].
- Corel Corporation. (2012). Explicación de los modelos de color. Recuperado de <http://product.corel.com/help/CorelDRAW/540240626/Main/ES/Doc/wwwhelp/wwhim>

pl/common/html/wwhelp.htm?context=CorelDRAW_Help&file=CorelDRAW-Understanding-color-models.html [Consulta: 11 de junio de 2019].

De la Cruz, L., & Lopez, R. (2013). Evaluacion cualitativa y cuantitativa. Recuperado de <https://www.slideshare.net/lilidelacruz92/evaluacion-cualitativa-y-cuantitativa-18971517> [Consulta: 30 de abril de 2017].

De Vandelvira, A. (2011). Motores de corriente alterna. Recuperado de http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motores_ca.pdf [Consulta: 10 de marzo de 2017].

Escalera, M., & Rodríguez, A. (2015). Actuadores Neumáticos. Recuperado de <http://www.uhu.es/rafael.sanchez/ingenieriamaquinas/carpetaapuntes.htm/Trabajos IM 2009-10/Manuel Jesus Esacalera-Antonio Rodriguez-Actuadores Neumaticos.pdf> [Consulta: 10 de marzo de 2017].

Fisher, R., Perkins, S., Walker, A., & Wolfart, E. (2000). Morfología. Recuperado de <http://alojamientos.us.es/gtocom/pid/tema5-1.pdf> [Consulta: 10 de marzo de 2017].

Fulton, W. (2017). Field of view calculator (FoV) of a camera and lens. Recuperado de <https://www.scantips.com/lights/fieldofview.html> [Consulta: 10 de marzo de 2017].

Gestión. (2019). *Estas son las 10 principales empresas exportadoras de palta del país*. Recuperado de <https://gestion.pe/economia/son-10-principales-empresas-exportadoras-palta-pais-269179-noticia/> [Consulta: 11 de junio de 2019].

Gonzalez, R., & Woods, R. (2017). *Digital Image Processing, 4th Edition*. Pearson.

Greefa. (2019). Combisort. Recuperado de <https://www.greefa.com/product/combisort/> [Consulta: 2 de junio de 2016].

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI). (2002). *Norma Técnica Peruana (NTP) 370.304: Instalaciones eléctricas en edificios. Verificación inicial previa a la puesta en servicio*. Recuperado de <https://studylib.es/doc/8210687/norma-técnica-ntp-370.304-peruana-2002-instalaciones> [Consulta: 20 de mayo de 2017].

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI). (2014). *Proyecto de Norma Técnica Peruana (PNTNTP)*

011.018: Paltas. Requisitos. Lima.

International Electrotechnical Commission (IEC). (2012). *Graphical symbols for diagrams*. Recuperado de <https://webstore.iec.ch/publication/2723> [Consulta: 20 de mayo de 2017].

International Organization of Standardization (ISO). (2003). *ISO 128-1:2003. Technical Drawings: General principles of presentation*. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/32462.html> [Consulta: 11 de junio de 2019].

International Organization of Standardization (ISO). (2018). *ISO 129-1:2018. Technical product documentation: Presentation of dimensions and tolerances*. Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:129:-1:ed-2:v1:en> [Consulta: 11 de junio de 2019].

International Society of Automation (ISA). (1991). *ISA 5.4 - Instrument Loop Diagrams*. International Society of Automation.

International Society of Automation (ISA). (2009). *ANSI/ISA S5.1 - Instrumentation Symbols and Identification*.

Jones, M. (2016). Compac unveils Spectrim platform. *Asiafruit*. Recuperado de <http://www.fruitnet.com/asiafruit/article/167633/compac-unveils-spectrim-platform#magazines> [Consulta: 1 de junio de 2016].

Kassim, A., Workneht, T., & Bezuidenhout, C. (2013). A review on postharvest handling of avocado fruit. *African Journal of Agricultural Research*, 8(21), 2385-2402. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.1248>.

Kuphaldt, T. (2007). *Lessons In Electric Circuits, Volume IV*. Recuperado de <https://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/Digital/DIGI.pdf> [Consulta: 2 de diciembre de 2018].

López, I., & Pita, S. (1999). Medidas de concordancia: el índice de Kappa. *Cad Aten Primaria*, 6, 169-171. Recuperado de <https://www.fisterra.com/mbe/investiga/kappa/kappa2.pdf> [Consulta: 20 de mayo de 2017].

Marques, O. (2011). *Practical Image and Video Processing Using MATLAB*.

<https://doi.org/10.1002/9781118093467>.

- Mathworks. (2018). Área. Recuperado de https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/area.html?searchHighlight=area&s_tid=doc_srchtile [Consulta: 11 de junio de 2019].
- Mathworks. (2018). Descripción del producto MATLAB. Recuperado de https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html [Consulta: 11 de junio de 2019].
- Molinero, G. (2010). Espacios de color. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11875/fichero/Proyecto+Fin+de+Carrera%252F3.Espacios+de+color.pdf> [Consulta: 11 de junio de 2019].
- Moreno, A., Ballesteros, D., & Sánchez, G. (2013). Image analysis for automatic feature estimation of the Mangifera indica fruit. *Ingeniería y Desarrollo*, 31(1), 84-104.
- Niebla, E., Pazmiño, E., León, L., Jalka, V., Idrovo, J., Byron, C., ... Palacios, A. (2010). Filtro Óptico. Recuperado de <https://es.slideshare.net/canva1/02-filtro-ptico> [Consulta: 2 de junio de 2016].
- Norton, R. (2011). *Diseño de Máquinas: Un enfoque integrado, 4ta edición*. Pearson Educación.
- PlatinumGMAT. (2015). Arithmetic mean (average) - GMAT math study guide. Recuperado de http://www.platinumgmat.com/gmat_study_guide/statistics_mean [Consulta: 11 de junio de 2019].
- Posadas, A. (2017). Determinación de errores y tratamiento de datos. Recuperado de <https://w3.ual.es/~aposadas/TeoriaErrores.pdf> [Consulta: 24 de abril de 2017].
- Riko. (2017). R3JK- Retroreflective. Recuperado de <http://www.riko.com/product/photo-sensor/long-sensing-range-photo-sensor/r3jk/r3jk--retroreflective> [Consulta: 10 de marzo de 2017].
- Roa, E., & Meneses, G. (2014). Automated System for Classifying Hass Avocados Based on Image Processing Techniques. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ColComCon.2014.6860414>.
- Samet, H., & Tamminen, M. (1988). Efficient component labeling of images of arbitrary

- dimension represented by linear bintrees. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(4), 579-586. <https://doi.org/10.1109/34.3918>.
- Santamaria, P. (2012). ¿Qué es la iluminación LED? Especial: Iluminación LED. Recuperado de <https://www.xatakahome.com/iluminacion-y-energia/que-es-la-iluminacion-led-especial-iluminacion-led> [Consulta: 10 de marzo de 2017].
- Science Buddies. (2017). Variance & Standard Deviation. Recuperado de <https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/science-fair/variance-and-standard-deviation> [Consulta: 11 de junio de 2019].
- Siemens. (2012). *S7-1200 Programmable controller: System Manual*. Recuperado de https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att_106119/v1/s71200_system_manual_en-US_en-US.pdf [Consulta: 10 de marzo de 2017].
- Sistema Integrado de Información de Comercio Exterior (SIICEX). (2018). Comercio Perú: Principales empresas exportadoras. Recuperado de http://www.siicex.gob.pe/siicex/porta15ES.asp?_page_=172.17100&_portletid_=sfichaproductoinit&scriptdo=cc_fp_init&pproducto=145&pnomproducto=Palta [Consulta: 11 de junio de 2019].
- Solomon, C., & Breckon, T. (2011). *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*. John Wiley & Sons, Inc.
- Starline. (2017). ¿Qué es un compresor? Recuperado de http://www.starline.com.mx/?page_id=161 [Consulta: 11 de junio de 2019].
- Tecnología & Informática. (2018). La Cámara web. Como comprar una webcam. Aplicaciones. Recuperado de <https://tecnologia-informatica.com/camara-web-comprar-webcam/> [Consulta: 2 de diciembre de 2018].
- Torres, F., & Jara, C. (2011). Sensores y detectores. Recuperado de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/18433/1/Tema_2_Sensores_y_Detectores.pdf [Consulta: 10 de marzo de 2017].
- Verdeflor. (2019). Agroindustrias verdeflor. Recuperado de <http://www.verdeflorperu.com.pe> [Consulta: 25 de abril de 2016].

Anexo A: Planos Mecánicos

Anexo B: Planos Eléctricos

Anexo C: Diagramas P&ID, Neumáticos y Programación Ladder

Anexo D: Hojas de datos