

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE VISIÓN POR COMPUTADORA PARA LA
CLASIFICACIÓN DE ARÁNDANOS POR TAMAÑO Y CARACTERÍSTICAS
ASOCIADAS AL COLOR**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Roberto Takao Shimabukuro López

ASESOR:

Miguel Angel Cataño Sánchez

CO-ASESOR:

César Ernesto Coasaca Apaza

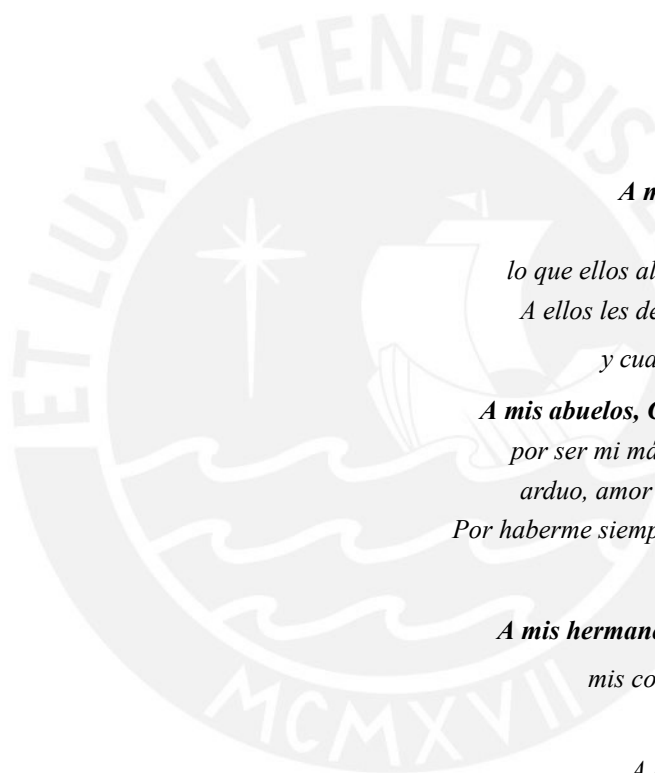
Lima, Julio, 2020

Resumen

Al 2020, y pasados menos de 8 años desde la primera exportación significativa de arándanos frescos, el Perú se ha consolidado como el mayor exportador de este fruto, ofreciéndolo en mercados como EEUU, la Unión Europea y China [4] [14]. La apertura de estos nuevos mercados trae consigo la obligación de cumplir estándares de calidad; en el caso de los arándanos, incluyendo rangos de calibre (diámetro mayor), color e incidencia de defectos superficiales. Si bien existen máquinas que automatizan por completo el proceso de selección de dichos frutos, sus costos son un impedimento para su adquisición en asociaciones de productores pequeños y medianos. En el Perú, este proceso es mayormente manual, complicando el cumplimiento adecuado de los estándares internacionales y suponiendo además riesgos ergonómicos para los operarios. De esta forma, surge la necesidad de una máquina para la clasificación de arándanos costeable por productores peruanos.

En ese sentido, el presente trabajo de tesis detalla el proceso de diseño de un prototipo para la clasificación de arándanos según tamaño y características asociadas al color, mediante visión por computadora; poniéndose especial énfasis en la identificación de criterios de selección efectivos aplicados al análisis de imágenes del fruto.

Bajo el enfoque de la metodología VDI 2221 y los métodos de diseño de la Universidad Tecnológica de Delft, se inicia con una revisión de los métodos más empleados en la industria para la clasificación de fruta, los parámetros de calidad cruciales para arándanos y el estado de la tecnología en clasificación de los mismos. Luego, se delimitan los requerimientos básicos para el diseño y se determinan posibles soluciones para un prototipo, las cuales fueron evaluadas cualitativamente. Seguidamente, se analiza una muestra de 100 arándanos con el fin de determinar características útiles para el diseño, y se realizan experimentos para comprobar el principio de funcionamiento del concepto de solución seleccionado. Posteriormente, se diseña un prototipo para la clasificación de arándanos, que incluye pruebas de visión por computadora para la estimación del calibre del fruto y la determinación de un criterio de selección asociado al color del mismo. Finalmente, se presentan los resultados de las pruebas, conclusiones y recomendaciones para la validación del diseño propuesto. Se busca que el producto de este estudio permita complementar trabajos previos y servir de base para próximas investigaciones, con el objetivo de conseguir implementar una máquina seleccionadora de arándanos que pueda competir en el mercado peruano.



A mis padres, Jenny y Roberto,
por haberme dado todo
lo que ellos alguna vez solo soñaron tener.
A ellos les debo mi persona, mi profesión
y cualquier éxito pasado y futuro.

A mis abuelos, César, Olinda, Rosa y Jorge,
por ser mi más grande ejemplo de trabajo
arduo, amor y compasión por el prójimo.
Por haberme siempre recibido con una sonrisa,
un dulce y una anécdota.

A mis hermanos, Harumi, Suemi y Tomio,
mis compañeros de vida hasta hoy.

A mis amigos.
A los que saludo todos los días
y a los que sé que están ahí
para cuando los necesite.
Por haberme dado consejo, calma y aliento
en los momentos más difíciles.

A mi familia de Inventum:
César, Farit, José Luis, Gianmarco y Piet.
Por haberme ayudado a encontrar mi propósito
y acompañarme en mi lucha por un mundo mejor.

A todos aquellos que de una u otra forma
estuvieron involucrados en el desarrollo de esta tesis:
A mis asesores, a los entrevistados, operarios y demás.

Índice de contenidos

Resumen	I
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	IX
1 Análisis de la problemática	1
1.1 Arándanos en el Perú	1
1.2 La industria del arándano	2
1.3 Criterios de selección de arándanos y buenas prácticas de post-cosecha	3
1.4 Arándanos: Necesidad ante la oportunidad	5
1.5 Definición del problema técnico	6
2 Estado del Arte	7
2.1 Métodos de selección de frutos	7
2.1.1 Clasificación por tamaño	7
2.1.2 Clasificación por peso	9
2.1.3 Clasificación por características superficiales	10
2.1.4 Clasificación por características internas	13
2.2 Tecnologías para la selección de arándanos	15
2.2.1 Patentes	15
2.2.2 Sistemas comerciales	17
3 Alcance, objetivos y restricciones	21
3.1 Alcance de la investigación	21
3.2 Objetivos del proyecto	21
3.2.1 Objetivo general	21
3.2.2 Objetivos específicos	21
3.3 Requerimientos del sistema	22

4	Desarrollo del concepto de solución	26
4.1	Estructura de funciones	26
4.1.1	Black Box	26
4.1.2	Funciones básicas	28
4.1.3	Sensores, energía y actuadores	30
4.1.4	Procesamiento de la información	32
4.1.5	Estructura de funciones unificada	32
4.2	Matriz morfológica	35
4.2.1	Funciones básicas	35
4.2.2	Sensores	37
4.2.3	Interfaz, procesamiento de información y control	37
4.3	Conceptos de solución	39
4.3.1	Conceptos de solución - Sistema Base	39
4.3.2	Conceptos de solución - Sensores	45
4.3.3	Conceptos de solución - Interfaz, procesamiento de información y control	46
4.4	Evaluación de conceptos de solución	47
4.4.1	Evaluación de conceptos de funciones básicas	47
4.4.2	Evaluación de conceptos de sensores	49
4.4.3	Evaluación de conceptos de interfaz, procesamiento de información y control	50
5	Aspectos preliminares de diseño	51
5.1	Caracterización de arándanos	51
5.1.1	Diseño y fabricación de cubierta de iluminación para caracterización	51
5.1.2	Identificación de características visibles	56
5.2	Dimensionamiento preliminar del dominio mecánico	63
5.2.1	Velocidad de la faja	63
5.2.2	Altura máxima de caída	64
5.2.3	Ángulo óptimo para rodadura	64

5.3	Evaluación del concepto de solución	66
5.3.1	Análisis de caída libre	66
5.3.2	Dimensionamiento de la rampa de visión y análisis de rodadura en plano inclinado	68
5.3.3	Comprobación de características de la cámara preseleccionada . .	70
6	Diseño del sistema	71
6.1	Descripción del sistema mecatrónico	71
6.2	Diseño mecánico	74
6.2.1	Rampa de alimentación	74
6.2.2	Fajas transportadoras	74
6.2.3	Rampa de conexión	79
6.2.4	Sistema de visión: Soporte y cubierta	81
6.2.5	Sistema de soplado	84
6.2.6	Estructura soporte	87
6.2.7	Guías de singularización y canalización	87
6.3	Diseño electrónico y de control	89
6.3.1	Diagrama de bloques	89
6.3.2	Selección de sensores	90
6.3.3	Selección de componentes eléctricos y electrónicos	93
6.3.4	Diagramas de flujo y operaciones del sistema	97
6.4	Lista de planos	99
7	Pruebas de visión por computadora y determinación del criterio de selección asociado al color	101
7.1	Desarrollo del programa de prueba	101
7.2	Análisis de superficie total	103
7.3	Análisis de superficie por segmentos	104
7.4	Definición de criterios de selección	108
7.5	Análisis de tiempos de ejecución del algoritmo	110

8 Costos	111
Conclusiones	113
Recomendaciones	114
Referencias	116
Anexos	122



Índice de figuras

1.1	Arándanos	2
1.2	Defectos comunes en arándanos	4
1.3	Proceso de selección de arándanos tradicional	5
2.1	Mecanismo de rodillos divergentes para clasificación de frijoles	8
2.2	Mecanismo de fajas divergentes	8
2.3	Sistema para clasificación por color y tamaño, con fajas calibradoras en serie	9
2.4	Sistema para clasificación de kiwis por peso	10
2.5	Sistema de visión para clasificación de manzanas	11
2.6	Empleo de rodillos giratorios	12
2.7	Métodos de separación por compuertas	12
2.8	Detección térmica de daño interno	13
2.9	Patente con banda de rodillos de separación regulable	15
2.10	Patente UNITEC	16
2.11	Patente para clasificación de berries	17
2.12	Máquina Kato 260	17
2.13	Máquina Unitec Blueberry Vision 2	18
2.14	Máquina Ponis IQ	19
2.15	Máquina Berry Class Elifab	19
4.1	Black Box	27
4.2	Funciones básicas del sistema	29
4.3	Estructura de funciones - Sensores, actuadores y energía	31
4.4	Estructura de funciones - Procesamiento de la información	33
4.5	Estructura de funciones unificada	34
4.6	Concepto de solución 1 - Funciones básicas	40
4.7	Concepto de solución 2 - Funciones básicas	41
4.8	Concepto de solución 3 - Funciones básicas	43
4.9	Concepto de solución 4 - Funciones básicas	44

5.1	Comparación de resolución de cámaras	53
5.2	Cámara industrial FLIR	53
5.3	Dimensiones del prototipo para captura de imágenes	54
5.4	Vistas del diseño propuesto para la cubierta de pruebas	54
5.5	Disposiciones de tiras LED para iluminación	55
5.6	Características superficiales identificadas en arándanos	56
5.7	Clasificación previa de arándanos	56
5.8	Arándanos agrupados por calibre	57
5.9	Corrección de deformación radial de la cámara	58
5.10	Procedimiento para determinación del diámetro	60
5.11	Resultados de medición del calibre	61
5.12	Balanza empleada para medición	62
5.13	Relación entre el peso y el calibre	62
5.14	Histograma de ángulos medidos	65
5.15	Esquema para análisis de caída	66
5.16	Esquema para dimensionamiento de rampa de visión	68
6.1	Vista isométrica del sistema	72
6.2	Ensamble total del sistema	72
6.3	Esquema general del sistema	73
6.4	Rampa de alimentación	74
6.5	Esquema de faja transportadora	75
6.6	Rodillo y eje	77
6.7	Detalle del mecanismo de tensión	78
6.8	Ensamble de la faja	78
6.9	Montaje de motor DC	80
6.10	Rampa de conexión entre fajas	80
6.11	Esquema para determinación de altura de cubierta	81
6.12	Diseño de la cubierta de visión	82
6.13	Cubierta para sistema de visión	82

6.14	Ensamble del sistema de visión	83
6.15	Componentes neumáticos	86
6.16	Diagrama neumático	86
6.17	Estructura de soporte	87
6.18	Ensamble de guías de direccionamiento en fajas	88
6.19	Dimensiones generales de guías	88
6.20	Diagrama de bloques del sistema	89
6.21	Detalle de montaje de cámara	91
6.22	Sensor empleado y montaje	92
6.23	Distribución sugerida para el tablero	94
6.24	Iluminación para visión	94
6.25	Circuitos de acondicionamiento de señales	95
6.26	Driver para motor DC	96
6.27	Diagrama de flujo general del sistema	98
6.28	Diagrama de operaciones general del sistema	99
7.1	Diagrama de programa para procesamiento de imágenes	101
7.2	Pasos principales para procesamiento de imagen a color	102
7.3	Espacio de colores HSV	103
7.4	Comparación de histogramas de arándanos	104
7.5	Comparación de valores de media, mediana y moda en análisis total del fruto	104
7.6	Imágenes divididas en segmentos de 40x40 pixeles	106
7.7	Comparación de resultados en análisis por bloques	107
7.8	Comparación de criterios de selección	108
7.9	Tiempos de ejecución de algoritmo de visión	110
B.1	Características de la cámara	125
C.1	Prototipo para captura de imágenes	126
C.2	Disposición final de la iluminación	126
E.1	Propiedades de faja seleccionada	128
F.1	Características del motor DC	128

G.1	Características del lente	129
H.1	Características de la electroválvula	130
I.1	Características del filtro regulador	131
J.1	Características del optoacoplador	131
K.1	Características del transistor IRL520	132
K.2	Características del transistor IRFZ44	132

Índice de tablas

1.1	Exportaciones no tradicionales con mayor crecimiento promedio	1
2.1	Cuadro comparativo entre máquinas disponibles en el mercado	20
3.1	Lista de exigencias (1/3)	23
3.2	Lista de exigencias (2/3)	24
3.3	Lista de exigencias (3/3)	25
4.1	Matriz morfológica - Funciones básicas	36
4.2	Matriz morfológica - Sensores	37
4.3	Matriz morfológica - Interface, información y control	38
4.4	Evaluación - Funciones básicas	48
4.5	Evaluación - Sensores	49
4.6	Evaluación - Interfaz, procesamiento de la información y control	50
5.1	Características principales de la cámara seleccionada para pruebas	52
5.2	Valores para cálculo de velocidad de la faja	63
5.3	Resultados de medición de ángulo para caída sobre espuma de poliuretano	64
5.4	Resumen de resultados de análisis de caída	67
5.5	Resultados de análisis por rodadura	70
6.1	Propiedades de la faja DEL/FLEX White	76
6.2	Características de la válvula seleccionada	85
6.3	Comparación de sensores	91
6.4	Características del sensor seleccionado	92
6.5	Componentes eléctricos del sistema	93

6.6	Lista de planos eléctricos y electrónicos	100
6.7	Lista de planos mecánicos	100
7.1	Valores límite para criterios de selección	109
7.2	Análisis de efectividad por criterio de selección	109
8.1	Costos del dominio mecánico	111
8.2	Costos del dominio eléctrico/electrónico	112
8.3	Costos de diseño y costo total	112
D.1	Resultados de medición de calibre y peso	127

Lista de Acrónimos

AVSA	Agrícola Viñasol S.A.
CBC	Chilean Blueberry Committee
FDA	Food and Drug Administration (Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos)
HSV	Hue, Saturation , Value (espacio de colores Matiz, Saturación, Valor)
NIR	Near Infrared (espectro cercano al infrarrojo)
PWM	Pulse Width Modulation (modulación por ancho de pulso)
RGB	Red, Green , Blue (espacio de colores Rojo, Verde, Azul)
SSC	Soluble Solids Content (contenido sólido soluble)
USDA	U.S. Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos)

1. Análisis de la problemática

1.1. Arándanos en el Perú

Una vasta variedad de riquezas naturales hace del Perú un país con gran potencial exportador. En el último año, se han exportado productos por un valor de aproximadamente 4000 millones de dólares americanos mensuales [5], teniendo como principales destinos a China y Estados Unidos [30]. La lista de productos tradicionales, entendidos como aquellos que se exportan con frecuencia, generalmente como materias primas de escaso valor agregado, es encabezada por el cobre, zinc y oro, del sector minero; seguidos por hidrocarburos y harina de pescado. En contraste, el sector agropecuario lidera el rubro no tradicional, con productos como palta, espárragos y plátano [5].

Desde el 2011, las exportaciones no tradicionales han experimentado el denominado “boom agroexportador”, con un crecimiento anual promedio del 10,6 %. Al ser productos con valor agregado (envasados, seleccionados o procesados), contribuyen a la diversificación de la producción nacional, generando puestos de trabajo y ganancias menos susceptibles al precio de las materias primas tradicionales [70]. Entre estos, el producto no tradicional con mayor crecimiento anual promedio ha sido el arándano, experimentando un incremento de 796 % en su producción y exportaciones entre 2015 y 2019 [13]. Como se aprecia en la Tabla 1.1, para finales del 2019, las exportaciones de arándanos alcanzaron 825 millones de dólares, 51 % más que el año anterior.

Tabla 1.1: Exportaciones no tradicionales con mayor crecimiento promedio. Fuente: [13]

Exportaciones no tradicionales con mayor crecimiento promedio (2009-2019) (Millones de US\$)				
	2009	2018	2019	Variación 18/19
Arándanos	0	548	825	51%
Uvas Frescas	136	820	875	7%
Paltas frescas	68	723	752	4%
Pota congelada	103	376	603	60%
Espárragos frescos	251	384	400	4%

Al 2020, pasados menos de 8 años desde la primera exportación significativa, Perú se ha consolidado como el mayor exportador de arándanos frescos, ofreciendo el fruto en mercados como EEUU, la Unión Europea y China [4] [14]. La ventaja comparativa peruana frente a otros países productores de arándano, en los que la cosecha se da estacionalmente, es la posibilidad de cosechar el fruto durante todo el año, gracias a la variedad de climas tanto en el sur como en el norte del país [15]. Actualmente, más del 20 % de

arándanos exportables en el Perú es producido por medianas y pequeñas asociaciones de productores, financiadas por el Estado buscando el incremento de su competitividad [15] [3].

1.2. La industria del arándano

El arándano es un fruto originario de Norteamérica y forma parte de la familia de las bayas (*berries*, en inglés). Destacan su color azul-violeta, sabor agrídulce y propiedades antioxidantes, las cuales lo posicionan como un producto altamente cotizado a nivel internacional [15] [55].



Figura 1.1: Arándanos ¹

La industria de arándanos comprende desde la cosecha hasta el empaque para la exportación. La complejidad de estas tareas radica en la delicadeza del fruto y las exigencias del cliente respecto a su presentación final: la baya debe ser cosechada casi totalmente madura, por lo que es muy propensa a pudriciones; además, su cáscara es delgada, lo cual genera sensibilidad al daño externo, ablandamiento y tendencia a la deshidratación [11]. Es por ello que a pesar de las recomendaciones para la etapa de cosecha, es inevitable que frutos dañados o enfermos lleguen a la planta de procesamiento.

De este modo, la etapa de selección es esencial para el cumplimiento de las exigencias de cada mercado objetivo. Un adecuado proceso de clasificación debería considerar parámetros de calibre (diámetro), color y defectos superficiales. Entre estos últimos: presencia de tallos, cicatrices o heridas, ausencia de cera, deshidratación, falta de firmeza, color no uniforme, etc [28]. Además, el prevenir el empaque de arándanos con signos de hongos o pudrición es crucial, ya que el tiempo que toma al producto llegar a los mercados internacionales puede ser de hasta 57 días, lapso suficiente para la proliferación de enfermedades [42].

¹ Imagen obtenida de: Diario Gestión, URL: <https://gestion.pe/economia/arandanos-radiografia-cultivo-cuya-produccion-crece-206-anual-peru-257019-noticia/>

1.3. Criterios de selección de arándanos y buenas prácticas de post-cosecha

Como se mencionó anteriormente, los arándanos exportados deben cumplir estándares de calidad definidos por cada país de destino. Esta tarea supone un reto durante la siembra, cosecha, selección, empaque y almacenamiento del fruto, debido a la naturaleza del mismo.

El arándano se puede clasificar como un fruto climatérico, es decir, que puede continuar con su proceso de maduración después de haber sido cosechado. Sin embargo, a diferencia de otros frutos del mismo tipo, el arándano no mejora su sabor luego de ser separado de la planta. Por ello, la cosecha se realiza en etapas muy cercanas a la madurez de consumo, lo que da origen a la necesidad de procesar el fruto lo más rápido posible para su distribución antes de su degeneración [28]. Buenas prácticas de post-cosecha incluyen la conservación del fruto en ambientes fríos (por debajo de los 8 para procesamiento y 0 para almacenaje) y con niveles controlados de O₂ y CO₂ para prevención de enfermedades [12].

Es importante diferenciar los conceptos de calidad y condición del arándano. Bajo la definición del Chilean Blueberry Committee (CBC), la calidad está referida a aquellas características invariantes en el tiempo: calibre, cicatrices, pedícelos; mientras que la condición sí es dependiente del tiempo: hongos, deshidratación, pudrición, firmeza [11]. Sin embargo, por practicidad, entenderemos como parámetro de calidad a toda característica que determine si un arándano es apto para empacarse y consumirse. Así, la calidad puede ser subdividida en: calidad visible, organoléptica y nutritiva [29].

■ Calidad visible

- Color azul uniforme (100 % de la superficie según [55]). Los arándanos muy inmaduros son verdes, los no suficientemente maduros son rojos.
- Presencia de cera (pruina, bloom) en la superficie de la fruta (90 % de la superficie según [55]). La cera es signo de frescura y da un tono opaco al fruto. Además lo protege contra la deshidratación. Un fruto sin pruina tendrá una superficie brillante. Por ello, los arándanos no pueden ser lavados.
- Ausencia de defectos (pudrición 0 %, aplastamiento 2 %, cicatrizados 4 %, en una jaba de 2 kg según [55])
- Deshidratación
- Presencia del pedicelo

- Calibre mayor a 13 mm (variedad Biloxi)
- Firmeza
- Calidad organoléptica
 - Sabor
 - Aroma
- Calidad nutritiva

De todas estas, en la industria alimentaria, las variables más empleadas para la clasificación de arándanos son color, tamaño, forma, ausencia de defectos, firmeza y sabor [15]. En la Figura 1.2 se muestran los defectos superficiales más comunes.

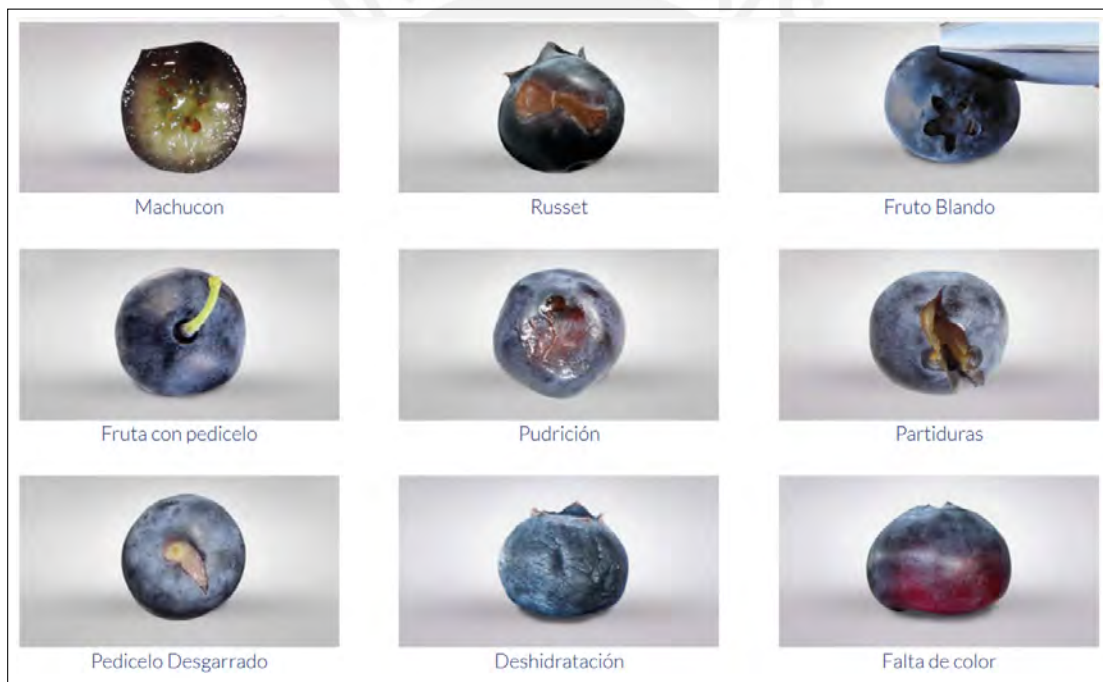


Figura 1.2: Defectos comunes en arándanos ²

²Imagen tomada de: UNITEC, URL: <https://es.unitec-group.com/tecnologias-frutas-hortalizas/maquinas-lineas-proceso-arandanos/>

1.4. Arándanos: Necesidad ante la oportunidad

En una entrevista realizada para la presente investigación, el Gerente General de Giddings Berries Perú, Francisco Vizquerra, menciona que se emplean máquinas de origen extranjero para el proceso de selección bajo modalidades manuales y automáticas (ver Anexo A): las primeras cuestan entre 250,000 y 350,000 USD, mientras que las segundas pueden costar entre 700,000 y 1'800,000 USD. Asimismo, estos precios no pueden ser costeados por productores pequeños, que deben optar por tercerizar los procesos de selección y empaque. Es más, la selección se realiza tradicionalmente de forma manual.

Por otro lado, el 31 de agosto del 2018 se visitó Agrícola Viñasol S.A. (AVSA)³, empresa dedicada a brindar servicios de selección y empaque de arándanos, paltas, espárragos, entre otros (proveedor de Giddings Berries en Cañete, Perú); se pudo identificar los defectos del proceso de selección tradicional. En una máquina con una banda de clasificación manual, se tiene a 6 personas encargadas de la inspección visual y separación de arándanos defectuosos como en la Figura 1.3. Este trabajo se realiza en dos turnos de ocho horas (con una hora de descanso), de pie y con la espalda inclinada hacia la banda; el esfuerzo visual es intenso y toda el área debe mantenerse a una temperatura menor o igual a los 8°C para la adecuada conservación del fruto. Estos factores, según la norma básica de ergonomía, pueden suponer un riesgo disergonómico [43], además de contribuir con el cansancio del operario, lo cual merma la eficacia del proceso.



Figura 1.3: Proceso de selección de arándanos tradicional⁴

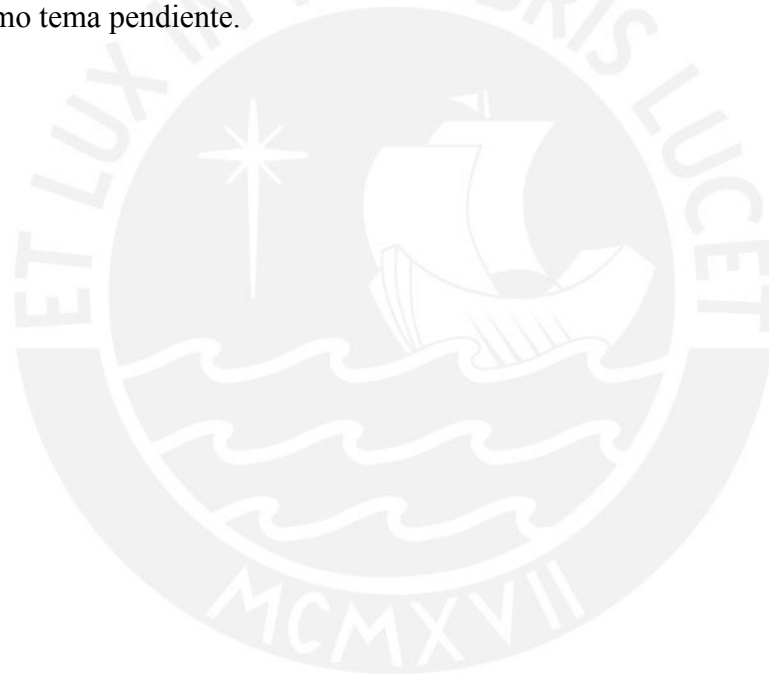
³Registro de imágenes y videos de la visita: <https://bit.ly/2V7AfCj>

⁴Imagen tomada de: Trujillo en Línea, URL: <http://www.trujilloenlinea.pe/noticias/agricultura/05/10/2017/produccion-cite-chavimochic-y-agroexportadoras-impulsan-norma>

1.5. Definición del problema técnico

En conclusión, por lo expuesto anteriormente, surgen dos necesidades: reducir el riesgo disergonómico de los operarios y asegurar la calidad en el proceso de clasificación de arándanos previo al empaque, sobre todo para pequeños y medianos productores, quienes representan más del 20 % de la producción nacional [3]. Ello puede lograrse a través de tecnología que incremente su competitividad y les permita satisfacer las necesidades y exigencias de los mercados internacionales, cuya demanda de estos frutos crece aceleradamente y se perfila como una oportunidad de desarrollo para el país.

Bajo esta premisa, el diseño de un sistema mecatrónico para la clasificación automática de arándanos de origen nacional se perfila como una solución. Ya existe un trabajo previo al respecto [53], pero no desarrolla el algoritmo de selección por defectos superficiales, dejándolo como tema pendiente.



2. Estado del Arte

Evidenciada la problemática, se realiza una revisión bibliográfica con el fin de identificar posibles soluciones y oportunidades de mejora para el diseño de un sistema de selección de arándanos. En esta sección se describen estudios y métodos para la clasificación de frutos bajo diversos criterios, para luego presentar patentes y máquinas comerciales dedicadas a la clasificación de arándanos.

2.1. Métodos de selección de frutos

La creciente demanda de productos en mercados internacionales hace obligatorio el cumplimiento de estándares de calidad cada vez más exigentes, por lo cual los productores se han visto en la necesidad de adquirir máquinas que compensen la falta de mano de obra, ahorren tiempo e incrementen la calidad de los productos finales en comparación con procesos manuales convencionales [38]. Diversos métodos se han desarrollado para la selección de frutos de acuerdo a una igual variedad de criterios, teniendo como base tanto principios mecánicos como electrónicos. Como primer resultado de la investigación, en esta sección se presentan los métodos más relevantes hallados, organizados según la variable de clasificación.

2.1.1. Clasificación por tamaño

Métodos mecánicos:

- Rodillos o fajas divergentes

Dos rodillos giratorios, inclinados respecto a la vertical y separados uno de otro, transportan los frutos en el espacio central. La separación en el extremo superior es menor que en el extremo inferior, obteniéndose un espacio variable entre rodillos. Así, frutos pequeños caerán antes que frutos grandes, dando la posibilidad de clasificarlos en múltiples rangos de tamaño [38]. La Figura 2.1 muestra un sistema de clasificación de frijoles que emplea este principio [46], aunque también se tiene referencias a este método en clasificadoras de tomates [6]. Cabe resaltar que se aplica el mismo reemplazando rodillos por fajas, presentando estas últimas mayor flexibilidad para canales múltiples como se muestra en la patente KR20160034087A [34] (ver Figura 2.2).

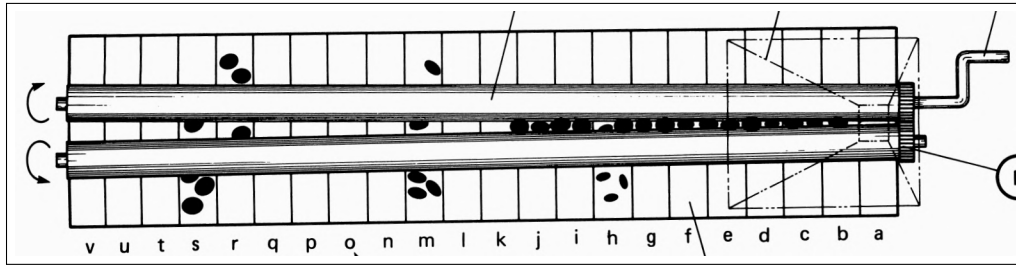


Figura 2.1: Mecanismo de rodillos divergentes para clasificación de frijoles. Fuente: [46]

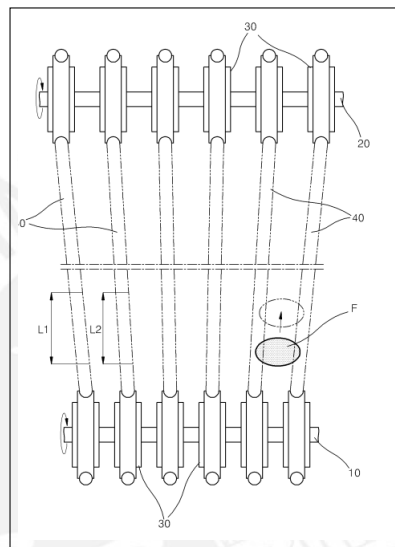


Figura 2.2: Mecanismo de fajas divergentes. Fuente: [34]

- Rodillos de espaciado variable

Múltiples rodillos de giro libre forman una plataforma de transporte para los frutos. Los rodillos están acoplados a una cadena tipo tijera, que genera el movimiento de traslación gracias a un motor. La cadena está contenida en guías cuya separación va disminuyendo, de modo que los eslabones de tijera se compriman en dirección vertical y se expandan horizontalmente, causando la separación progresiva de los rodillos [35]. Así, se posibilita también una clasificación por rangos de tamaño. Este método es más complejo que el anterior, pero es más efectivo para frutas medianas y grandes.

- Cribas, mallas, zarandas

Una placa con agujeros de diámetro variable (criba) o una malla de alambre, permiten separar frutos de tamaño superior e inferior al establecido en la malla o criba. Cribas giratorias u oscilatorias (zarandas) pueden optimizar el proceso de separación [25], mientras que en el caso de las mallas pueden superponerse varias de grados diferentes, siendo las superiores de mayor grado que las inferiores. La patente

CN107457196A [72] (Figura 2.3) cuenta con un principio similar: los frutos, previamente clasificados por color mediante un sistema de visión por computadora, son transportados por 3 fajas consecutivas con agujeros de calibre decreciente para la clasificación por tamaño.

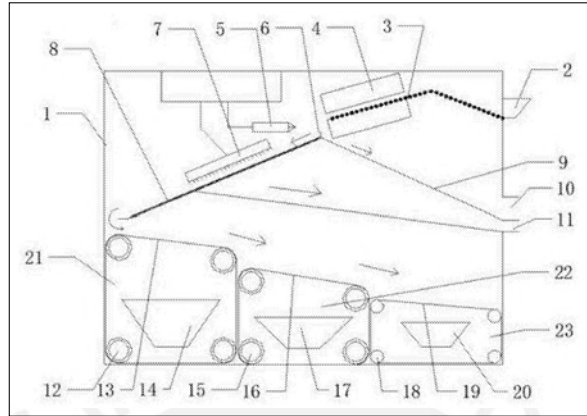


Figura 2.3: Sistema para clasificación por color y tamaño, con fajas calibradoras en serie. Fuente: [72]

Visión por computadora:

A partir de una imagen del fruto capturada en línea, pueden estimarse parámetros asociados al tamaño del mismo, entre los más comunes el diámetro, área proyectada, longitud de ejes longitudinales y transversales, y relación de aspecto [56]. Existen incluso estudios para determinar el volumen de un fruto, ya sea mediante estimaciones con base empírica sobre el área en la imagen o con imágenes tridimensionales [22].

2.1.2. Clasificación por peso

Mecanismo de contrapesos:

El método tradicional para la clasificación de un fruto por peso es la comparación con un contrapeso. Es decir, el fruto pasa por un mecanismo de balanza, que tiene un contrapeso en el extremo. Si el fruto supera tal peso, el mecanismo cede y desvía el fruto hacia el lugar correspondiente. Se aplica de manera similar para el control de peso en el proceso de empaquetado, como se describe en la patente CA745803A para arándanos. [41]

Sensores de peso:

El empleo de sensores de peso o celdas de carga facilita la digitalización y control del proceso de pesado de los frutos. La patente CN106733703A [27] describe un sistema de clasificación de kiwis por peso, en el que se instalan sensores en agujeros a lo largo de una faja transportadora como se muestra en la Figura 2.4. Los sensores están acoplados a pequeñas compuertas, que serán accionadas para dejar caer el fruto en compartimientos correspondientes.

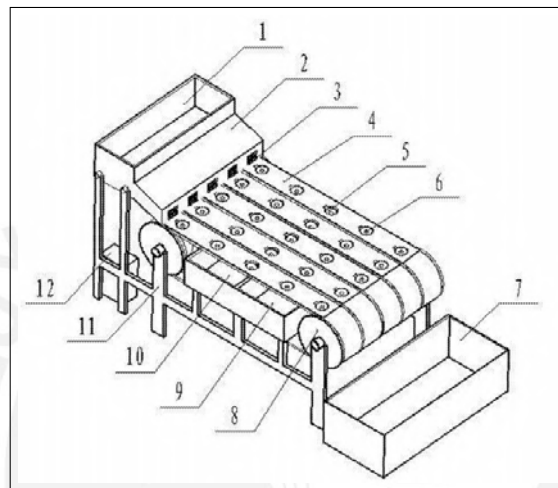


Figura 2.4: Sistema para clasificación de kiwis por peso. Fuente: [27]

2.1.3. Clasificación por características superficiales

Procesamiento de imágenes a color:

El desarrollo de las tecnologías de visión por computadora ha permitido identificar parámetros difíciles o imposibles de analizar por medios mecánicos: tamaño, forma, color, uniformidad de color, textura, presencia de daños, etc. [56]. Estos parámetros facilitan estimar otras variables, tales como la madurez del fruto (a partir del color) o el grado de deshidratación (a partir de la textura).

El estudio presentado en [2], presenta un sistema portátil para la clasificación de naranjas, en el que mediante una cámara web se logra analizar el grado de madurez del fruto que cae por un plano inclinado. Esta variable se estima relacionándola con el color: la predominancia de matices rojos y amarillos indica madurez, mientras que la predominancia de colores verdes indica lo contrario. Similarmente, el estudio en [45], evalúa la madurez de mangos en una faja transportadora. En este caso, se evalúa la distribución de colores desde el ápice hasta la base del fruto, conociendo que el proceso de maduración empieza

en el ápice. Se halló que con el transcurso de los días, los niveles de rojo en el mango se incrementan y se uniformizan. Resalta además el empleo de un controlador de luminosidad que optimice la captura de imágenes.

En cuanto a calidad, un parámetro común es la uniformidad de color. El artículo [20] clasifica manzanas según la uniformidad del rojo en su superficie. Los frutos son transportados individualmente por platos, y un sensor de fibra óptica activa la captura de imagen mediante 3 cámaras dispuestas en un arco de 120° como se muestra en la Figura 2.5. Esta disposición permite analizar la mayor parte de la fruta, pero son inevitables los puntos ciegos en la base.

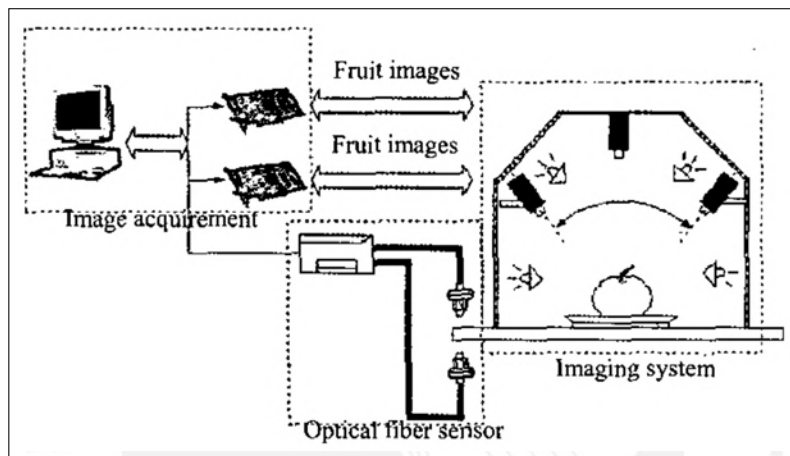


Figura 2.5: Sistema de visión para clasificación de manzanas. Fuente: [20]

Para maximizar la superficie visible para las cámaras, el artículo [10] cambia la faja transportadora por una serie de rodillos giratorios que llevan la fruta en el espacio entre los mismos. Así, se puede capturar una serie de imágenes a medida que el fruto rota, disminuyendo por ende la probabilidad de no detectar algún defecto. Un caso parecido se presenta en la patente US20010032807A1 [50], en la que el fruto es transportado individualmente en recipientes para un primer control de peso. Seguidamente, los recipientes se inclinan (Figura 2.6a) para dejar caer el fruto en rodillos giratorios similares a los de la patente CA3011782A1 [9] (Figura 2.6b) y proceder a la captura de imágenes. Finalmente, el fruto es devuelto a los recipientes respectivos, para ser llevado a contenedores de clasificación.

Debe resaltarse que la mayoría de máquinas diseñadas para la clasificación mediante visión por computadora, halladas para el presente documento, cuentan con métodos mecánicos para la singularización del fruto (es decir, alinear los frutos en filas para su procesamiento individual) previa al procesamiento de imágenes y para la separación final según los resultados del mismo. En la patente US9919345 [39], por ejemplo, un mecanismo de tornillo sin fin, con paso suficiente para albergar una manzana en su interior, singulariza y transporta los frutos hacia una cámara para el análisis por visión. Por otro lado, la clasifi-

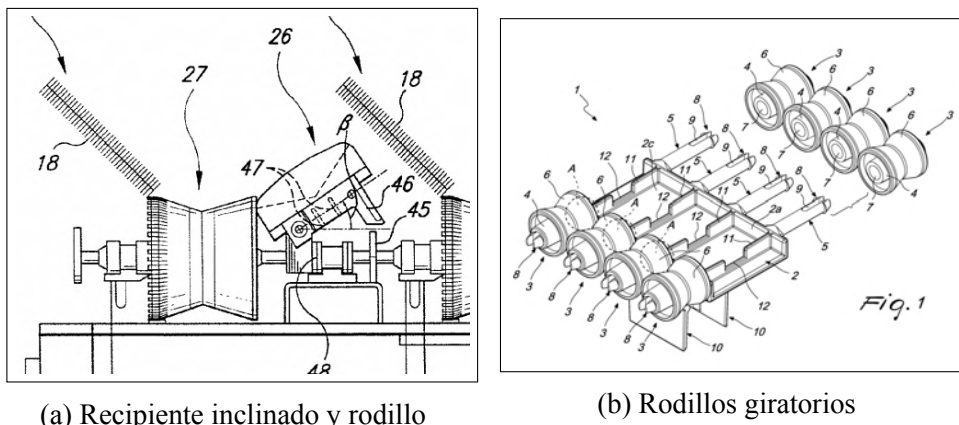


Figura 2.6: Empleo de rodillos giratorios. Fuente: [50] [9]

cación se realiza mediante un tambor clasificador, que se encuentra dentro de un cilindro con compuertas. Las compuertas serán cerradas o abiertas según indique el programa de reconocimiento, enviando las manzanas a 3 contenedores diferentes como se muestra en la Figura 2.7a. En contraste, la patente CN107457196A [72] emplea boquillas de soplado para separar los frutos que no pasen el control, mientras que la código CN105772410A [33] emplea un mecanismo de compuertas y actuadores lineales eléctricos como se muestra en la Figura 2.7a.

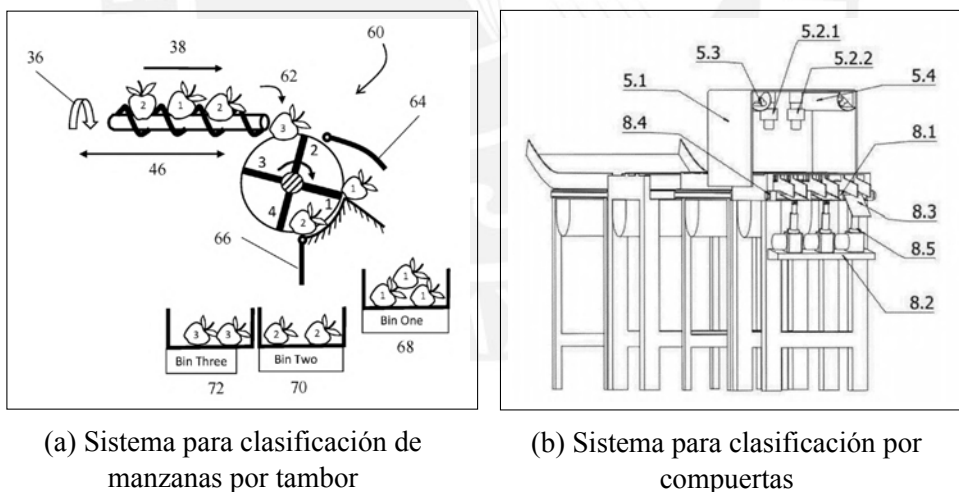


Figura 2.7: Métodos de separación por compuertas. Fuente: [39] [33]

Sensores de color:

En menor medida que el procesamiento de imágenes, se emplean sensores de color para detectar frutos defectuosos. Como en el artículo [19], en el que frutos blancos son analizados con un sensor que discriminará aquellos que estén por debajo de un umbral de

blancura definido.

2.1.4. Clasificación por características internas

Tanto los métodos mecánicos como los de procesamiento de imágenes en el espectro visible son incapaces de evaluar características internas en frutos, tales como daños por debajo de la cáscara, contenido de azúcares, firmeza, etc. Los métodos presentados a continuación suplen tales necesidades.

Procesamiento de imágenes infrarrojas:

Todo objeto emite radiación infrarroja, estrechamente relacionada a la estructura del material. Cuando un fruto sufre daño interno por un golpe, la estructura interna del área afectada cambia, y por ende sus propiedades térmicas [31]. Así, en el artículo [31] se emplea este principio para clasificar manzanas. Empleando una cámara térmica, puede observarse una clara diferencia en entre la zona afectada y la zona saludable del fruto (Figura 2.8); este contraste puede incrementarse exponiéndolo previamente a una fuente de calor (una lámpara, por ejemplo). Una vez obtenida la imagen esta se procesa con algoritmos de visión por computadora. Análogamente, el estudio [16] analiza imágenes térmicas de papas.

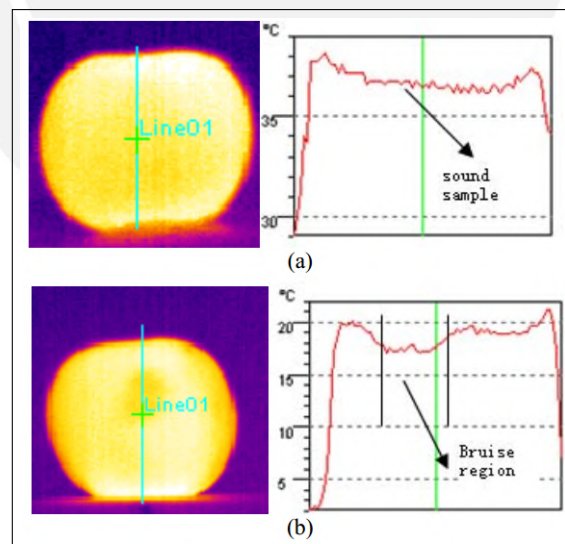


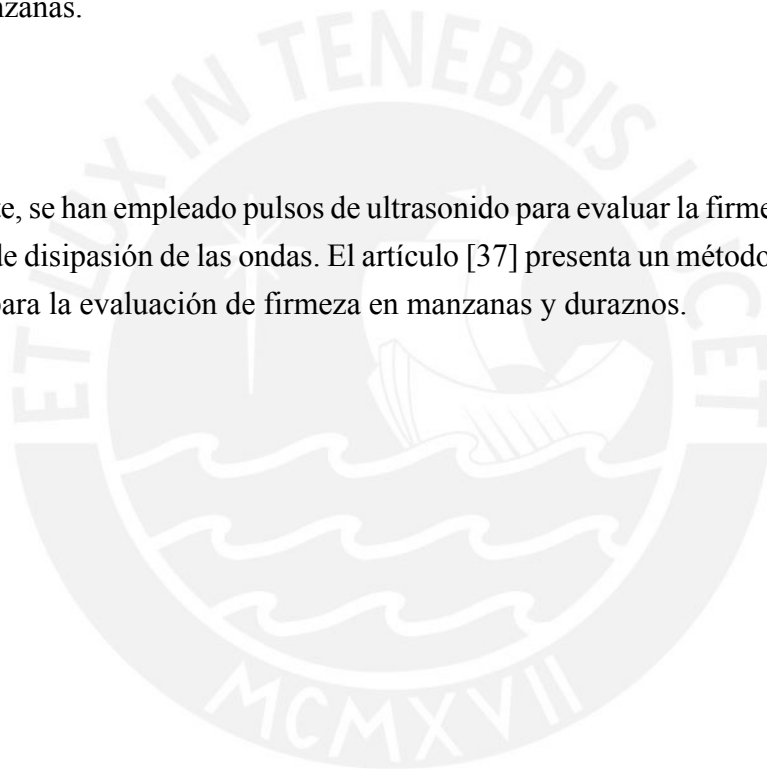
Figura 2.8: Detección térmica de daño interno. Fuente: [31]

Análisis de espectro de imágenes NIR:

Otra variable determinante en la calidad de una fruta es el nivel de azúcares, técnicamente llamado “contenido sólido soluble”(SSC, por sus siglas en inglés). Tradicionalmente, esta solo podía ser medida destructivamente, extrayendo una muestra del fruto. Sin embargo, mediante estudios como [52], se logró correlacionar este contenido con el comportamiento del espectro de reflectancia del fruto (carambola) a frecuencias cercanas a la infrarroja (NIR, *near infrared*, en inglés). Por otro lado, se ha logrado también asociar a los niveles de clorofila en el plátano, que indican su madurez, como se demuestra en [54]. Ya existen patentes como la KR20110081668A [64] que emplean este método para clasificar manzanas.

Ultrasonido:

Finalmente, se han empleado pulsos de ultrasonido para evaluar la firmeza del fruto según el grado de disipación de las ondas. El artículo [37] presenta un método de ultrasonido sin contacto para la evaluación de firmeza en manzanas y duraznos.



2.2. Tecnologías para la selección de arándanos

En esta sección se describen 3 patentes específicamente diseñadas para la clasificación de arándanos, así como los sistemas de marcas comerciales mencionadas por el entrevistado en el Anexo A.

2.2.1. Patentes

US3191772A:

La invención [32] presenta un sistema de transporte, que clasifica arándanos en dos clases según un tamaño predefinido. Esto es posible gracias a una serie de ejes cilíndricos, unidos por un resorte formando una banda transportadora como se muestra en la Figura 2.9. La tensión del resorte es regulable, con lo que se consigue variar la distancia entre ejes y por ende el tamaño de clasificación de los frutos.

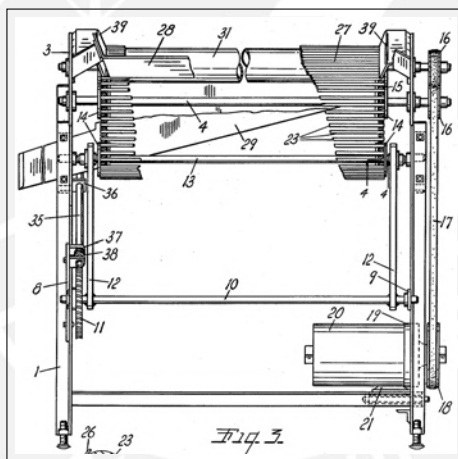


Figura 2.9: Patente con banda de rodillos de separación regulable. Fuente: [32]

WO2017144632A1:

El sistema [8], patente de la empresa UNITEC, consta de 5 subsistemas: Alimentación (2), pre-inspección (3), singularización (4), visión (5), clasificación (6) y recirculación (7) (Figura 2.10). La etapa de alimentación incluye un contenedor y una faja transportadora, para la posterior pre-inspección. Esta pretende dar a operarios la oportunidad de retirar frutos evidentemente dañados y cuerpos extraños; puede incluir además fajas con orificios predefinidos para descartar frutos que no cumplan condiciones básicas de tamaño. La etapa de singularización consiste en fajas dentro de canales en V, cuya separación se reduce progresivamente para obtener una línea de frutos individuales. Esta línea pasa a la etapa de

visión por computadora, que indica a las válvulas neumáticas de la etapa de clasificación a qué contenedor debe ser soplado el fruto. En caso alguna falla evite la clasificación del fruto, una faja de recirculación lo recibe al final de la línea para hacerlo retornar a la etapa de visión.

US2011112684A1:

El sistema [47] incluye una etapa de separación del ramo (en el caso de uvas) y otra de clasificación apta para otros tipos de baya. Como se observa en la Figura 2.11, se reciben los frutos en una mesa vibratoria, con agujeros que descartan cuerpos extraños y frutos por debajo del límite aceptado de calibre. Luego, los frutos aceptados caen a una faja transportadora oblicua que se desplaza en sentido contrario al de la caída. Ello permite disminuir la velocidad de las bayas y además retiene cuerpos extraños ligeros. Después, se realiza una segunda calibración en una plancha con agujeros, para pasar a una tercera etapa de calibración en una banda de fajas paralelas. Esta banda permite además separar las bayas en líneas independientes para la inspección con una cámara. Los frutos que no pase la inspección serán sopladados, evitando que caigan en el contenedor final. Resalta de esta patente un rodillo colocado en el campo de visión de la cámara, por debajo de la trayectoria de los frutos. Este actúa como fondo para incrementar el contraste, y gira para eliminar posible contaminación.

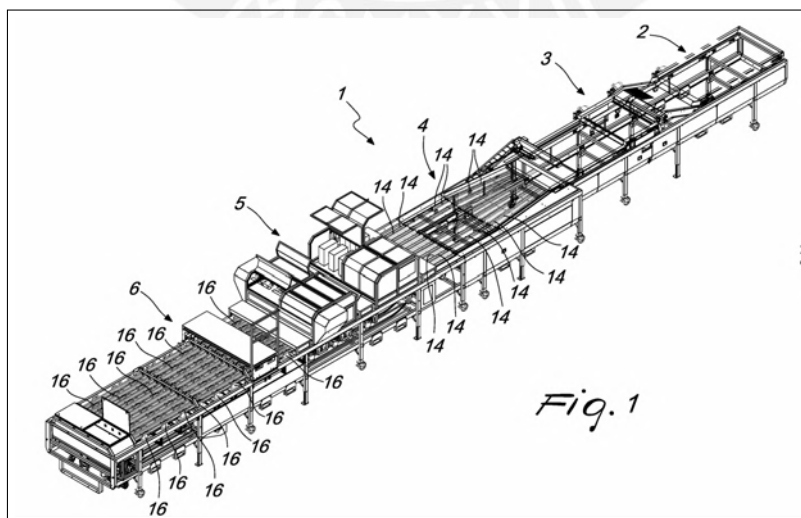


Figura 2.10: Patente UNITEC. Fuente: [8]

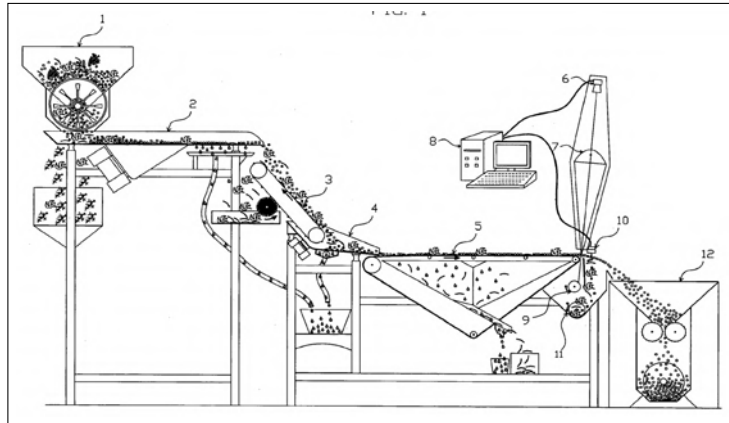


Figura 2.11: Patente para clasificación de berries. Fuente: [47]

2.2.2. Sistemas comerciales

Existen 4 principales empresas dedicadas a la fabricación de máquinas para la clasificación de arándanos:

BBC Technologies (Nueva Zelanda):

La Kato 260 en la Figura 2.12 es una máquina para la clasificación de arándanos por grados de tamaño, color, firmeza, daño por golpes, madurez, deshidratación, presencia de pedicelos y daño en la cáscara [7]. Puede procesar hasta 2000 kg de frutos por hora, reconocer defectos de hasta 0.2 mm y emplea una banda transportadora de rodillos giratorios para lograr analizar la totalidad de la superficie del fruto.



Figura 2.12: Kato 260 ⁵

⁵Imagen tomada de: Fruitnet, URL: <http://www.fruitnet.com/asiafruit/article/170127/bbc-technologies-unveils-new-blueberry-system>

UNITEC (Italia):

La Blueberry Vision 2 (Figura 2.13) es la máquina presentada en la patente [8]. Clasifica arándanos por calibre, color, defectos de piel, defectos de pulpa, excesiva blandura, presencia del pedicelo, maduración excesiva, marchitamiento/deshidratación y presencia de machucón (daño por golpe). Tiene una capacidad estimada de 1750 kg/h con 7 carriles, que pueden expandirse para aumentar la productividad. El video en [26] muestra una planta con 32 carriles.



Figura 2.13: Unitec Blueberry Vision 2 ⁶

PONIS (Argentina):

La calibradora de berries de PONIS (Figura 2.14) clasifica por tamaño y color. Tiene una capacidad de 300kg/h por línea de procesamiento [49].

Elifab (España):

La Berry Class de Elifab (Figura 2.15) tiene una capacidad de hasta 200kg por línea por hora. Determina daño externo, uniformidad de color, presencia de tallo, madurez, deshidratación y firmeza [23] [17].

⁶Imagen tomada de: UNITEC, URL: <https://es.unitec-group.com/tecnologias-frutas-hortalizas/maquinas-lineas-proceso-arandanos/>

⁷Imagen tomada de: Fresh Plaza, URL: <http://www.freshplaza.es/articulo/111277/Esta-nueva-tecnologia-de-clasificacion-mejorara-el-control-de-calidad-del-arandano>

⁸Imagen tomada de: Fresh Plaza, URL: <http://www.freshplaza.es/articulo/112421/Maquinaria-de-seleccion-mas-avanzada-para-el-arandano-y-el-crecimiento-que-se-avecina>



Figura 2.14: Ponis IQ ⁷



Figura 2.15: Berry Class Elifab ⁸

Comparación entre tecnologías presentadas:

La Tabla 2.1 presentada a continuación resume las principales características de las máquinas expuestas anteriormente. El calibre (diámetro mayor), color, firmeza, daño por golpes, madurez, deshidratación, defectos de piel y presencia de pedicelo conforman los principales criterios de clasificación de arándanos.

Tabla 2.1: Cuadro comparativo entre máquinas disponibles en el mercado. Fuente: Elaboración propia

Cuadro comparativo: Máquinas para clasificación de arándanos				
	Marca / Procedencia	Capacidad por línea de procesamiento (kh/h)	Posibilidad de expansión (líneas en paralelo)	Criterios de selección
Kato 260	BBC Technologies / Nueva Zelanda	2000	No	Calibre, color, firmeza, daño por golpes, madurez, deshidratación, defectos de piel, presencia de pedicelo
Blueberry Vision 2	UNITEC / Italia	250	Sí (Hasta más de 32 líneas)	Calibre, color, firmeza, daño por golpes, madurez, deshidratación, defectos de piel, defectos de pulpa, presencia de pedicelo, marchitamiento
Ponis	PONIS / Argentina	300	Sí	Calibre, color
Berry Class	Elifab / España	200	Sí	Calibre, color, firmeza, daño por golpes, madurez, deshidratación, defectos de piel, presencia de pedicelo

3. Alcance, objetivos y restricciones

Como resultado del estudio del estado de la tecnología en clasificación de arándanos, puede establecerse un objetivo general para el presente trabajo de tesis, así como limitar el alcance del mismo para hacer factible su realización en el plazo establecido. Se definen además las restricciones básicas a nivel técnico y económico.

3.1. Alcance de la investigación

El presente trabajo de tesis comprende el diseño del primer prototipo de un sistema basado en visión por computadora para la clasificación de arándanos por calibre y características asociadas al color. Se brinda mayor énfasis a la ejecución de pruebas de procesamiento de imágenes para la identificación de un criterio de selección asociado a las características visibles del fruto.

El prototipo y el método de selección por visión por computadora desarrollados deberán servir de base para el diseño de una máquina para clasificación de arándanos competitiva en el mercado.

3.2. Objetivos del proyecto

3.2.1. Objetivo general

Diseñar un sistema basado en visión por computadora para la clasificación de arándanos por calibre y características asociadas al color, con una capacidad mínima de 1 arándano/segundo (aprox. 20 kg/h)

3.2.2. Objetivos específicos

- Definir los requerimientos del sistema a diseñar mediante el contacto con las partes involucradas y la revisión del estado de la tecnología actual
- Obtener y validar a nivel teórico o experimental el concepto de una solución que satisfaga los requerimientos planteados, siguiendo la metodología VDI 2206 y el enfoque de diseño de la Universidad Tecnológica de Delft
- Diseñar el subsistema mecánico que haga posible recibir, transportar y seleccionar los arándanos, a la velocidad de procesamiento planteada, sin dañar los frutos

- Diseñar los subsistemas eléctrico, electrónico y de control que permitan alcanzar la velocidad de procesamiento planteada
- Diseñar el subsistema de visión por computadora que capture y procese las imágenes de arándanos que ingresan al sistema para su clasificación bajo los criterios planteados, y que permita alcanzar la velocidad de procesamiento requerida
- Validar los algoritmos de visión planteados con imágenes estáticas, con el fin de identificar los criterios más efectivos para la clasificación de arándanos por tamaño y características asociadas al color
- Estimar el costo total de implementación del prototipo, considerando costos de material, componentes, manufactura, mano de obra, integración y pruebas

3.3. Requerimientos del sistema

Sobre la base de los parámetros de calidad identificados en la bibliografía, la entrevista con el productor y la visita a la planta de selección y empaque de arándanos, se elaboró la lista de exigencias mostrada en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3. Esta resume los requerimientos básicos para la construcción del prototipo propuesto.

Tabla 3.1: Lista de exigencias (1/3). Fuente: Elaboración propia

LISTA DE EXIGENCIAS			Hoja	1 de 3
			Edición	5
PROYECTO	PROTOTIPO PARA MÁQUINA CLASIFICADORA DE ARÁNDANOS		Elaborado	20/06/2020
			Revisado	20/06/2020
CLIENTE	PUCP		Autor	T. Shimabukuro (TS)
FUNCIÓN PRINCIPAL	Clasificar arándanos frescos por calibre y características superficiales			
Fecha (última actualización)	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable	
FUNCIONES				
20/06/2020	E	Recibir el arándano fresco y suelto, sin lavar, previamente separado de tallos, hojas, etc.	TS	
	E	Separar los frutos sin color azul uniforme (efectividad del 80%)		
	E	Separar los frutos con calibres inferiores a 12 mm (efectividad del 80%)		
	D	Separar frutos con otros defectos superficiales: heridas, pudrición, deshidratación (efectividad del 80%)		
	D	Separar los frutos en rangos de calibre 13-16 mm, 16-18 mm, 18 a más		
OPERACIÓN				
20/06/2020	D	El prototipo deberá poder procesar como mínimo 20 kg/h (1 fruto/s aprox.)	TS	
INGRESO DE MATERIAL				
20/06/2020	E	El prototipo deberá poder recibir cargas de 400 g de arándanos cada 1 minuto (160 unidades aprox.).	TS	
FUERZA				
20/06/2020	E	El fruto no puede ser sometido a fuerzas que dañen su integridad interna o externa. Esto debe ser validado experimentalmente.	TS	
ALIMENTACIÓN				
20/06/2020	E	Eléctrica, 220V (3F/1F)	TS	
		Neumática @ 7 bar, acondicionada para alimentos		

Tabla 3.2: Lista de exigencias (2/3). Fuente: Elaboración propia

LISTA DE EXIGENCIAS			Hoja	2 de 3
			Edición	5
PROYECTO	PROTOTIPO PARA MÁQUINA CLASIFICADORA DE ARÁNDANOS		Elaborado	20/06/2020
CLIENTE	PUCP		Revisado	20/06/2020
			Autor	T. Shimabukuro (TS)
SOFTWARE				
20/06/2020	E	Empleo de software licenciado o de código abierto para el algoritmo de visión por computadora		TS
	E	El algoritmo de visión debe procesar imágenes del fruto a color		
	E	El algoritmo de visión debe determinar el calibre del fruto y los defectos especificados en la sección de funciones previa		
SEÑALES				
20/06/2020	E	Entrada: Encendido, apagado, inicio de proceso, fin de proceso, criterios de clasificación (tolerancia de calibre y color) Salida: Luz piloto de alimentación, encendido, funcionamiento		TS
INTERFAZ				
20/06/2020	E	Tablero de control con: - Llave de encendido general - Pulsador de inicio y parada de proceso - Parada de emergencia manual - Indicadores luminosos de alimentación, funcionamiento y encendido		TS
	D	Display gráfico con resultados del procesamiento: Número de frutos procesados, frutos descartados, frutos por clase		
CONDICIONES DE OPERACIÓN				
20/06/2020	E	Ambiente de trabajo con humedad relativa máxima de 85%, a 100 msnm (condiciones de la costa peruana, en un laboratorio de pruebas)		TS
	D	Ambiente de trabajo con temperatura menor o igual a 8 °C		
CONTROL				
20/06/2020	E	Alimentación de frutos manual		TS
	E	Separación de frutos automática		
	E	Sensores grado mínimo IP 63 (resistencia al polvo y humedad condensada)		
	D	Regulación de velocidad de procesamiento de frutos		
	D	Parada de emergencia automática en caso de atasco o sobrecarga		

Tabla 3.3: Lista de exigencias (3/3). Fuente: Elaboración propia

LISTA DE EXIGENCIAS			Hoja	3 de 3
			Edición	5
PROYECTO		PROTOTIPO PARA MÁQUINA CLASIFICADORA DE ARÁNDANOS	Elaborado	20/06/2020
			Revisado	20/06/2020
CLIENTE		PUCP	Autor	T. Shimabukuro (TS)
Fecha (última actualización)	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable	
SEGURIDAD				
20/06/2020	E	Cumplimiento de normas de ergonomía y seguridad y salud en el trabajo (DS N° 009-2005-TR)	TS	
	E	Guardas en elementos motrices		
	E	Protección contra polvo y líquido grado IP64 para tablero de control		
CONTROL DE CALIDAD				
20/06/2020	E	La clasificación por tamaño deberá tener una efectividad del 80%	TS	
	E	La clasificación por color deberá tener una efectividad del 80%		
	E	La cámara a emplear deberá poder diferenciar defectos con dimensiones menores a 1 mm ²		
	D	La clasificación por otros defectos superficiales deberá tener una efectividad del 80%		
MONTAJE				
20/06/2020	D	El sistema presenta la posibilidad de acoplar varias líneas en paralelo para incrementar la productividad	TS	
MATERIAL				
20/06/2020	E	Material de grado alimentario o inerte: Acero inoxidable AISI 304, acrílico, fajas sanitarias según FDA/USDA 9001	TS	
FABRICACIÓN				
20/06/2020	E	Componentes disponibles en el mercado local	TS	
		Elementos diseñados para evitar mecanizado complejo		
MANTENIMIENTO				
20/06/2020	E	Los elementos motrices serán accesibles y las superficies fáciles de limpiar.	TS	
DIMENSIONES				
20/06/2020	E	El prototipo no deberá ocupar un volumen mayor a 1 m x 1 m x 2 m para poder ser construido en un laboratorio.	TS	
	E	El prototipo no debe pesar más de 50kg para poder ser movilizado por 2 personas.		
PLAZO				
20/06/2020	E	El plazo máximo es de 3 meses. Debe incluir un informe de diseño, pruebas y resultados.	TS	
COSTO				
20/06/2020	D	Fabricación: 10 000 soles (A nivel de prototipo) Diseño: 24 000 soles	TS	

4. Desarrollo del concepto de solución

Ya identificadas las exigencias básicas del sistema, puede iniciarse el proceso de diseño del mismo planteando posibles soluciones que las satisfagan. Uno de los métodos empleados para este fin es el análisis de funciones, que consiste en describir el producto en términos de funciones y subfunciones, como abstracciones de lo que se espera conseguir con el mismo, sin tomar en cuenta características físicas. Ello permite reducir la influencia de sesgos previos en el planteamiento de la solución, y estimula la identificación de nuevas alternativas [67]. De esta forma, en esta sección se emplea este método para definir las funciones básicas del sistema a diseñar, se identifican opciones para la ejecución de cada una y finalmente se presentan conceptos de solución para el sistema completo.

4.1. Estructura de funciones

4.1.1. Black Box

El sistema a diseñar puede ser representado como una caja negra (*black box*, en inglés) que recibe energía, información y materia (Figura 4.1). Como respuesta a la información (señales) recibida, el sistema ejecutará acciones para transformar el material de entrada empleando la energía suministrada.

El sistema para la clasificación de arándanos por tamaño y características superficiales recibirá arándanos frescos sin clasificar, previamente separados de restos de la planta, siendo inevitable recibir polvo en cantidades mínimas (los arándanos no se lavan, como se menciona en la sección 1.3, pero existen buenas prácticas de cosecha y post-cosecha que reducen la presencia de polvo) y humedad del ambiente. Se asume que el sistema se encontrará dentro de un ambiente controlado a bajas temperaturas, por lo que no existe posibilidad de contacto con insectos u otros agentes. Una interfaz permitirá al usuario alimentar el sistema con energía eléctrica o neumática, iniciar o detener el proceso de clasificación, seleccionar los criterios de selección y accionar una parada en caso de emergencia.

Como resultado del proceso, se obtendrán arándanos separados según los criterios de selección. Además, la interfaz contendrá señales que informen al usuario sobre el estado de la máquina: Si está alimentada, si existe procesamiento en curso y los resultados de la selección (número de frutos procesados, número de frutos descartados). Por otro lado, se liberarán diversas formas de energía de circuitos, actuadores, rozamiento, indicadores luminosos, etc.

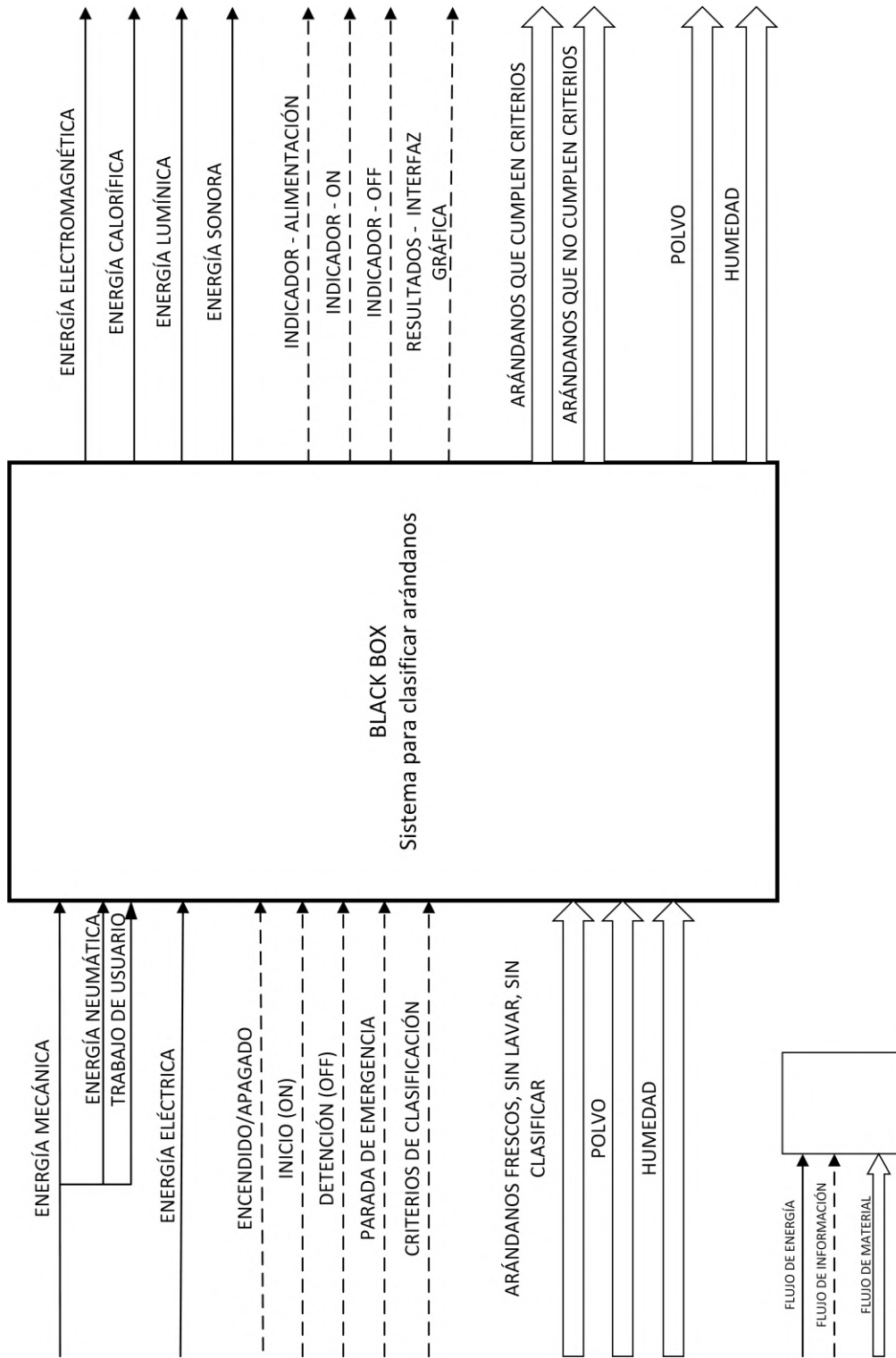


Figura 4.1: Black Box. Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Funciones básicas

Aquellos procesos que interactúan directamente con el material a transformar conforman las funciones básicas del sistema, descritas en la Figura 4.2. Primero, arándanos frescos sin clasificar, previamente separados de tallos, hojas y otras impurezas, son recibidos para iniciar el proceso de selección, ingresados por un operario (se ha establecido que no es necesaria una función de almacenamiento de frutos para este prototipo). Los mismos deben ser transportados y singularizados, esto es, orientados de forma que formen una sola línea de frutos para optimizar el reconocimiento de imágenes en el sistema de visión por computadora. Debe contarse además con algún método que maximice la superficie del fruto que pueda ser visible para la cámara, con el fin de incrementar la efectividad del proceso de separación según los criterios de selección. Finalmente, los frutos clasificados serán transportados a contenedores separados.

La interacción mecánica con los frutos y entre los componentes del sistema liberará energía calorífica y sonora. Además, el sistema estará en todo momento en contacto con polvo y humedad. Todo subsistema eléctrico o electrónico deberá estar protegido contra humedad, y el subsistema de visión por computadora deberá estar particularmente aislado de polvo exterior. Debe notarse que las funciones de transporte reciben energía (representada como EA1, EA2, EA5) proveniente de actuadores. Lo mismo sucede con la separación (recibe EA4), mientras que EA3 representa energía luminosa para mejorar la calidad de imagen durante la captura. Por otro lado, IF1 e IF3 representan información sobre la presencia de un fruto en la línea, e IF2 es información del fruto en forma de imagen.

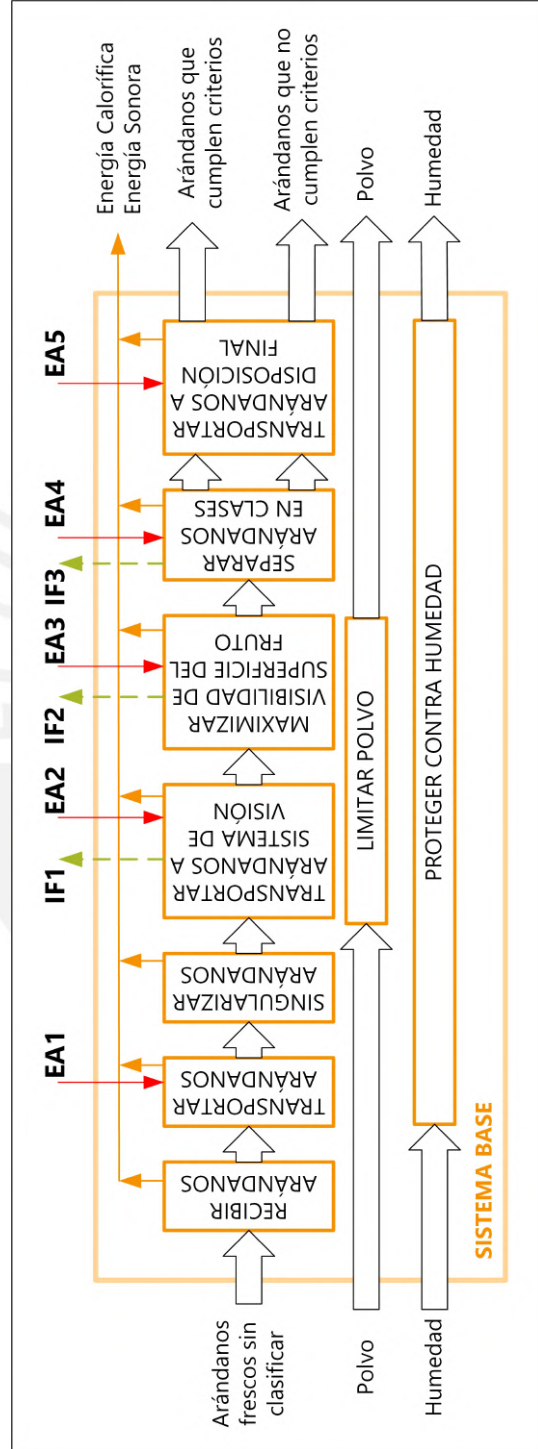


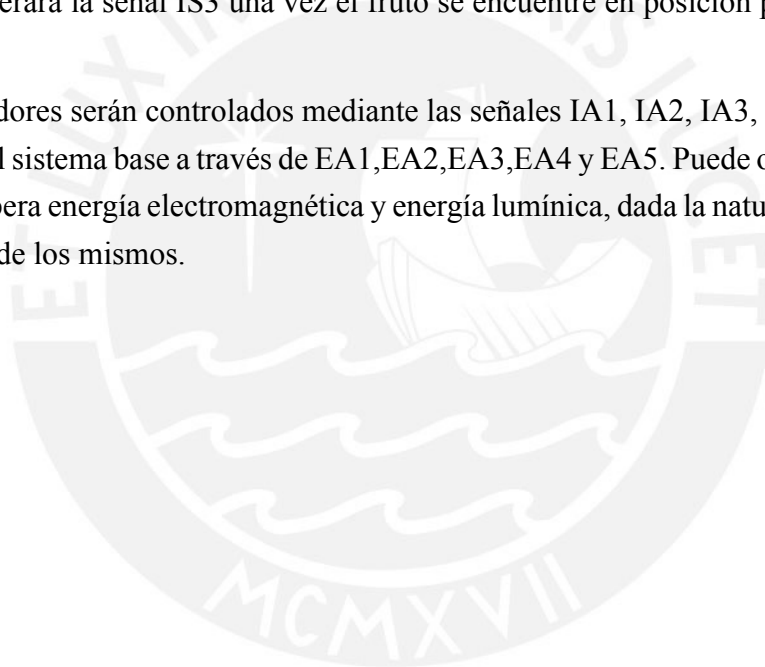
Figura 4.2: Funciones básicas del sistema. Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Sensores, energía y actuadores

El sistema recibirá energía eléctrica y neumática para la alimentación de todos los subsistemas. Esta energía debe ser acondicionada para cada propósito, tomando en cuenta voltaje, corriente y potencia en el caso de la primera; y presión, humedad y lubricación en el caso de la segunda. Se considerará también con dispositivos de seguridad en caso de sobrecarga o fuga. Nótese que el actuador encargado de la alimentación recibe señales directamente del exterior, representando la acción del usuario para energizar el sistema.

Los sensores se encargarán de adquirir la información IF1, IF2 e IF3 proveniente del sistema base. Un sensor de presencia detectará frutos al ingreso del subsistema de visión por computadora y generará la señal IS1 para dar inicio al proceso de captura de imagen. Una cámara se encargará de adquirir la imagen del fruto IS2, mientras que otro sensor de presencia generará la señal IS3 una vez el fruto se encuentre en posición para ser clasificado.

Los actuadores serán controlados mediante las señales IA1, IA2, IA3, IA4 e IA5 para actuar sobre el sistema base a través de EA1,EA2,EA3,EA4 y EA5. Puede observarse también que se libera energía electromagnética y energía lumínica, dada la naturaleza eléctrica y electrónica de los mismos.



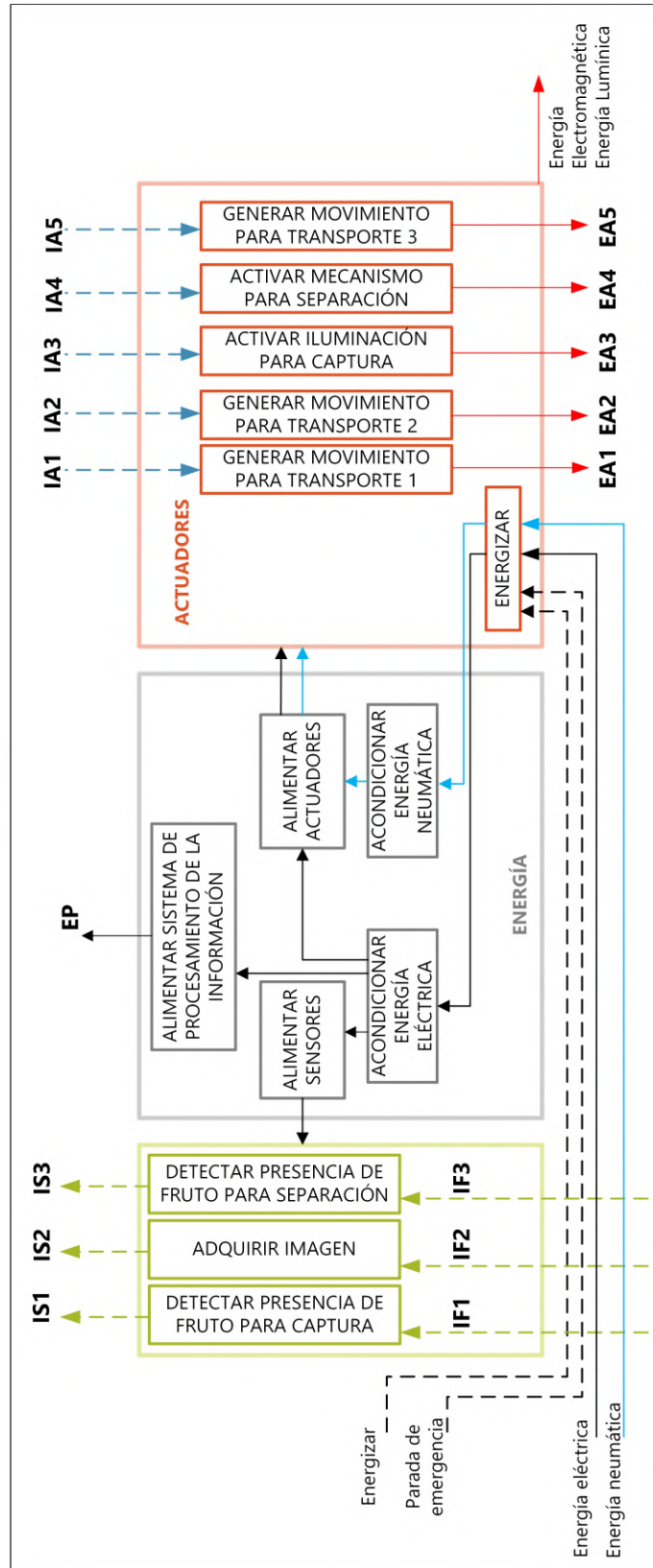


Figura 4.3: Estructura de funciones - Sensores, actuadores y energía. Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Procesamiento de la información

El dominio de procesamiento de la información se encargará de interpretar las señales provenientes de sensores y del exterior, para generar repuestas que modifiquen el comportamiento del sistema base y devolver señales al entorno. Las señales ON, OFF y los criterios de selección provienen del usuario. Las dos primeras, junto a IS1 e IS3 (sensores de presencia) deberán ser identificadas e interpretadas para emitir las señales de control correspondientes al encendido de luminarias y mecanismos de transporte. Los criterios de selección serán recibidos por el computador encargado del procesamiento de imágenes. Este capturará una imagen si se detecta un fruto al ingreso del sistema de visión para procesarla. Si las características del fruto cumplen con los criterios, se generará la señal de activación del mecanismo de separación. Existe además un registro de cantidad de frutos procesados y descartados para ser mostrados en una interfaz gráfica.

4.1.5. Estructura de funciones unificada

Las tres estructuras presentadas anteriormente se interconectan y complementan para originar una estructura de funciones unificada del sistema. Como se aprecia en la Figura 4.5 se han agregado además una interfaz de entrada y de salida. La primera se encarga de recibir energía mecánica del usuario (activación de pulsadores, selectores u otros) y convertirla en señales útiles para ser procesadas. En contraste, la interfaz de salida recibe las señales generadas en la etapa de procesamiento para transformarlas en información útil para el usuario, principalmente en la forma de energía luminosa.

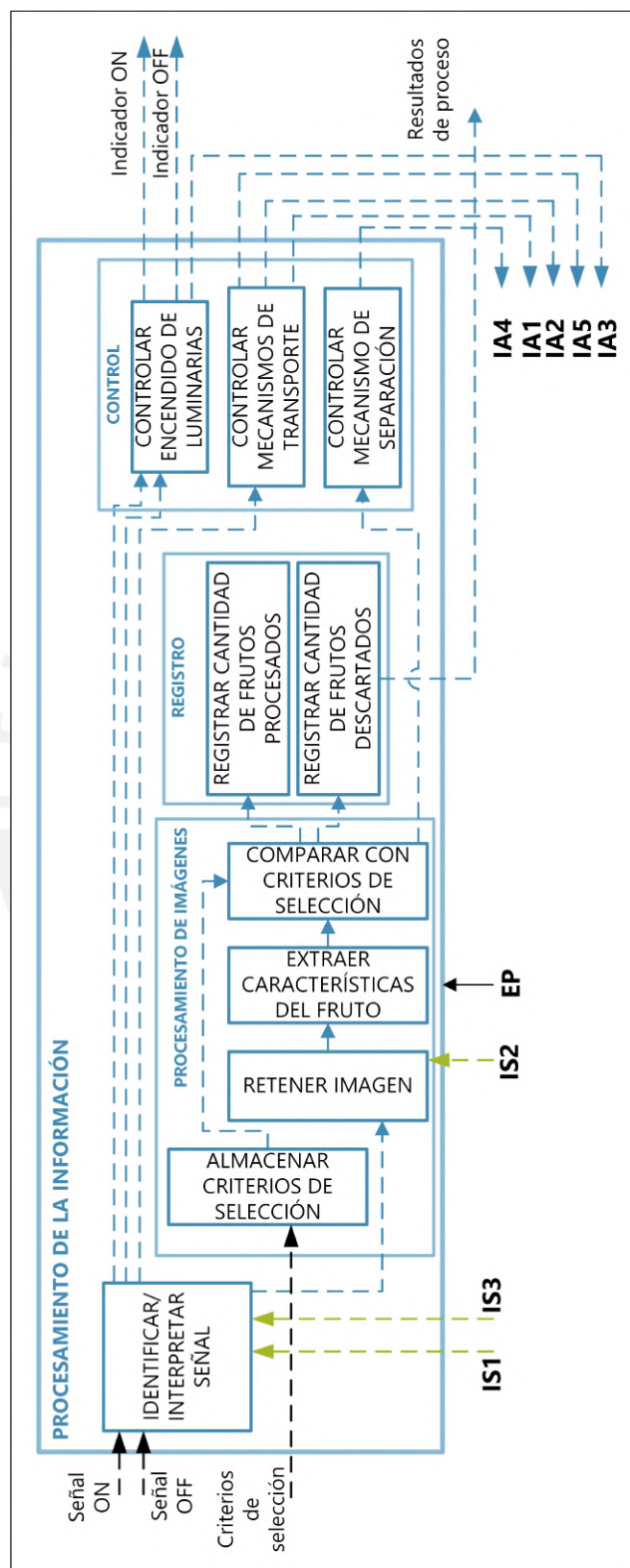


Figura 4.4: Estructura de funciones - Procesamiento de la información. Fuente: Elaboración propia

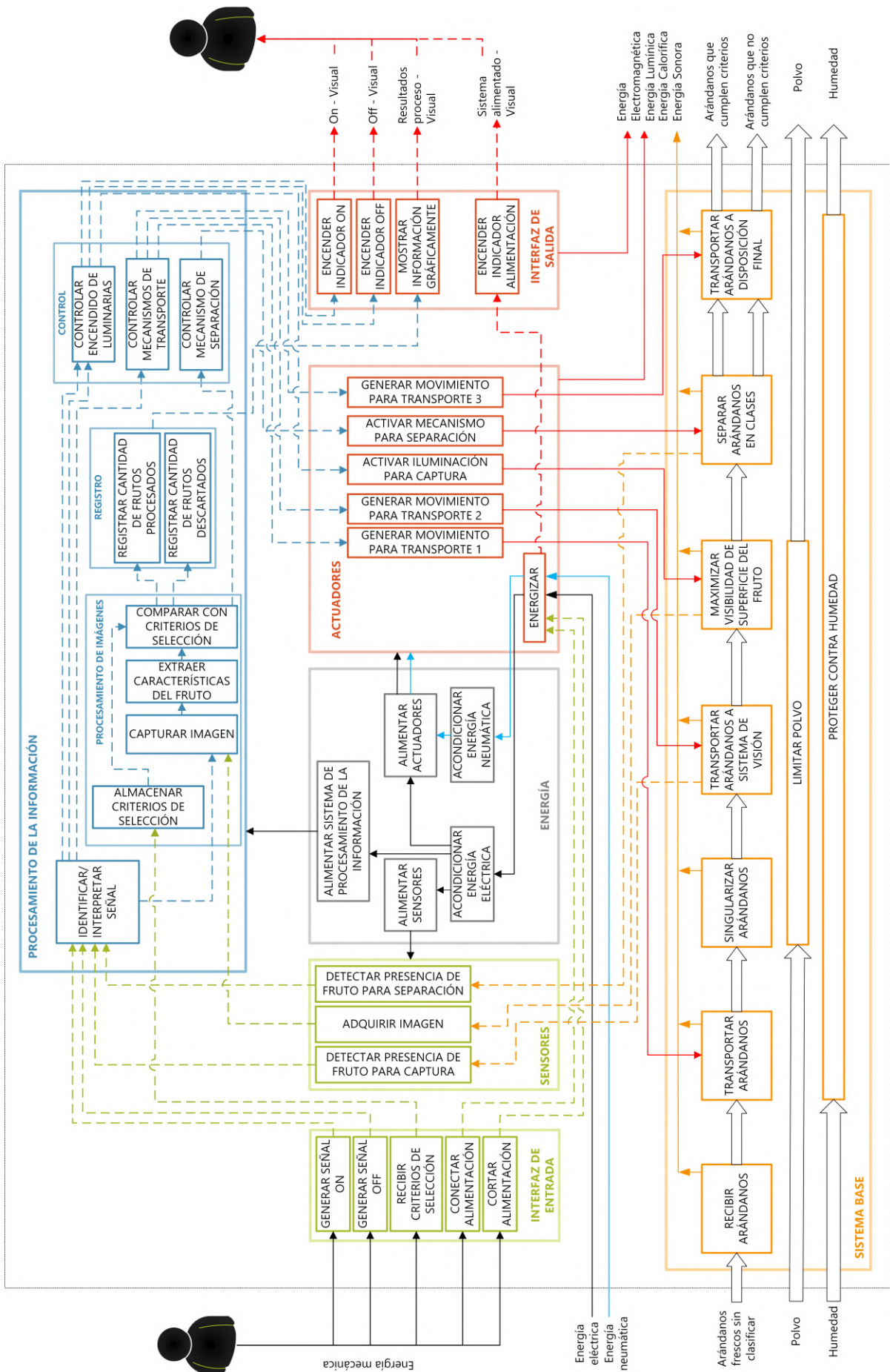


Figura 4.5: Estructura de funciones unificada. Fuente: Elaboración propia

4.2. Matriz morfológica

Tomando como punto de partida el análisis de funciones, puede plantearse posibles soluciones para ejecutar cada función. Uno de los métodos que persiguen este fin es el de la matriz morfológica, que da una estructura base para estimular la divergencia de ideas del equipo de diseño: Las funciones y subfunciones requeridas encabezan las filas de una tabla, en cuyas columnas se plantean múltiples opciones de solución para cada una. Luego, se evalúa y combina aquellas soluciones compatibles para converger en soluciones o conceptos integrales, que cumplan con la función principal del sistema [67].

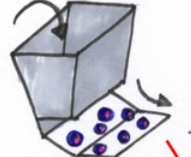
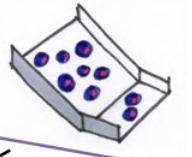
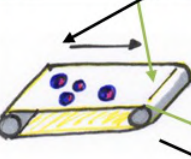
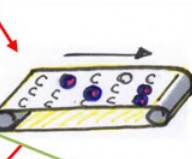
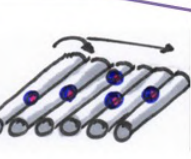
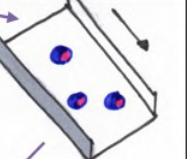
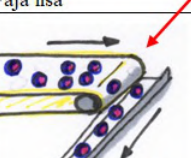
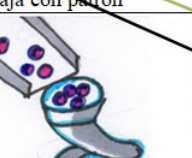
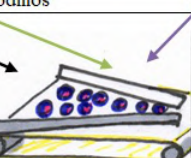
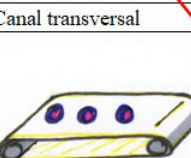

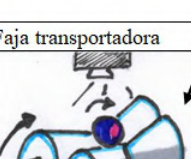

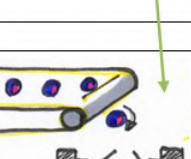
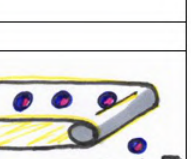
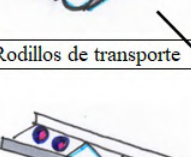
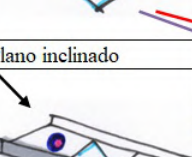

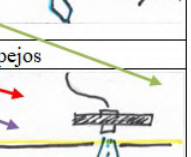
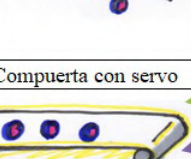
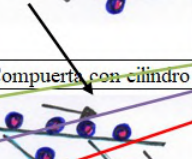
Para el prototipo de clasificación de arándanos en la presente tesis, con el objetivo de optimizar el proceso de conceptualización de soluciones, se ha agrupado las funciones en 3 matrices: Matriz de funciones básicas, matriz de sensores; y matriz de interfaz de usuario, procesamiento de información y control. Se considera que los 3 grupos planteados contienen funciones interdependientes, pero son independientes uno de otro. De esta forma, se elige primero la mejor combinación de funciones dentro de cada grupo, para luego seleccionar la mejor combinación de soluciones grupales.

No se ha considerado una matriz de solución para los actuadores ni para la energía. El papel de los actuadores está estrechamente ligado a las funciones básicas, por lo que se seleccionarán en función de la solución óptima elegida. Similarmente, los componentes encargados de la administración de la energía serán seleccionados acorde a los sensores, actuadores y controladores/computadores elegidos.

4.2.1. Funciones básicas

En esta matriz se plantea solución a las funciones que interactúan directamente con el arándano. Después de evaluar la compatibilidad entre las soluciones planteadas, se obtiene 4 alternativas de solución para el grupo (S1, S2, S3, S4).

Tabla 4.1: Matriz morfológica - Funciones básicas. Fuente: Elaboración propia

FUNCIÓN	OPCIONES DE SOLUCIÓN - SISTEMA BASE			
	OP1	OP2	OP3	OP4
RECIBIR ARÁNDANOS	 Tolva	 Rampa		
TRANSPORTAR ARÁNDANOS	 Faja lisa	 Faja con patrón	 Rodillos	 Plano inclinado
SINGULARIZAR ARÁNDANOS	 Canal transversal	 Espiral de dosificación	 Canal en V y faja	
TRANSPORTAR ARÁNDANOS A SISTEMA DE VISIÓN	 Faja transportadora	 Plano inclinado		
MAXIMIZAR VISIBILIDAD DE SUPERFICIE DEL FRUTO	 Rodillos de transporte	 Plano inclinado	 Caída	 Espejos
SEPARAR ARÁNDANOS EN CLASES	 Compuerta con servo	 Compuerta con cilindro	 Empujar con cilindro	 Pulso de aire
TRANSPORTAR ARÁNDANOS A DISPOSICIÓN FINAL	 Caída	 Rampa		

S1

S2









S3

S4

4.2.2. Sensores

Los sensores del sistema se limitarán a detectar la presencia de los frutos antes de la etapa de captura de imágenes y de separación. Para este grupo, se obtiene 4 combinaciones óptimas (S1, S2, S3, S4).

Tabla 4.2: Matriz morfológica - Sensores. Fuente: Elaboración propia

FUNCIÓN	OPCIONES DE SOLUCIÓN - SENSORES		
	OP1	OP2	OP3
DETECTAR PRESENCIA DE FRUTO PARA CAPTURA	 Sensor Capacitivo	 Sensor fotoeléctrico	 Sensor de Ultrasonido
ADQUIRIR IMAGEN	 Cámara web	 Cámara industrial	
DETECTAR PRESENCIA DE FRUTO PARA SEPARACION	 Sensor Capacitivo	 Sensor fotoeléctrico	 Sensor de Ultrasonido

S1

S2



















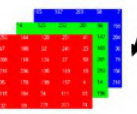
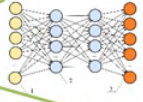



S3

S4

4.2.3. Interfaz, procesamiento de información y control

Se elaboró una matriz unificada para la interfaz de usuario, procesamiento y control. Ello debido a la estrecha relación entre los posibles periféricos de entrada y salida y los dispositivos de procesamiento de la información. Además, se ha optado por no incluir algunas funciones de la estructura, ya que se trata de soluciones de programación que no requieren mayor evaluación. Finalmente, se obtiene 3 combinaciones para el grupo (S1, S2, S3).

Tabla 4.3: Matriz morfológica - Interface, información y control. Fuente: Elaboración propia

	OPCIONES DE SOLUCIÓN - PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN/INTERFAZ		
FUNCIÓN	OP1	OP2	OP3
CONECTAR ALIMENTACIÓN	 Llave termomagnética	 Selector	 Pulsador
PARADA DE EMERGENCIA (CORTAR ALIMENTACIÓN)	 Pulsador		
GENERAR SEÑAL ON/OFF	 Pulsador	 Teclado/mouse PC	 HMI
RECIBIR CRITERIOS DE SELECCIÓN	 HMI	 PC	 Teclado y Raspberry Pi
CONTROLAR LUMINARIAS, TRANSPORTE Y SEPARACIÓN	 Arduino	 Raspberry Pi 3	 PLC
PROCESAR IMÁGENES	 Raspberry Pi 3	 PC	 Controlador dedicado
DESARROLLO DE ALGORITMO DE VISIÓN POR COMPUTADORA	 MatLab	 OpenCV	
EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE IMAGEN	 Análisis clásico	 Deep learning	
MOSTRAR INFORMACIÓN GRÁFICAMENTE	 HMI	 PC	 Pantalla Raspberry Pi

S1

S2

S3

4.3. Conceptos de solución

A continuación, se presentan los conceptos de solución resultantes de la combinación de las propuestas para cada función contenida en las tres matrices morfológicas desarrolladas anteriormente. Se describen cuatro soluciones para el sistema base, cuatro para los sensores y tres para la interfaz, procesamiento de información y control, mencionando ventajas y desventajas de cada una. Dado que los conceptos de solución de uno de los tres grupos de funciones delimitados no influyen en los conceptos hallados para los otros dos grupos, estos se describen de forma separada. Posteriormente, se elegirá la mejor solución de cada grupo, que finalmente se integrarán para formar el concepto del sistema completo.

4.3.1. Conceptos de solución - Sistema Base

Concepto de solución 1

El concepto de solución 1 (Figura 4.6) cuenta con una tolva (1) para el ingreso de arándanos frescos al sistema. Luego, estos se dirigen a la faja (2), soportada por la estructura (3) y accionada por el motor eléctrico (4). La faja cuenta con un canal en V (5), encargado de singularizar los arándanos a medida que avanzan por la faja. Al final de esta, un sensor de presencia (6) detectará el fruto para iniciar la captura de imagen con el par de cámaras (7), aisladas de la iluminación exterior con la cubierta (8). Posteriormente, el arándano analizado cae por la rampa (9) a la faja (10), accionada por el motor eléctrico (11). En esta, otro sensor de presencia (12) indicará al sistema que accione la boquilla de soplado (13) en caso el fruto no cumpla con los criterios de selección, de modo que sea expulsado de la faja. Finalmente, los frutos son recolectados en los contenedores (14). El sistema cuenta además con un tablero eléctrico (15).

La principal limitación de este concepto es el empleo de dos cámaras, lo que incrementa significativamente el costo total del prototipo.

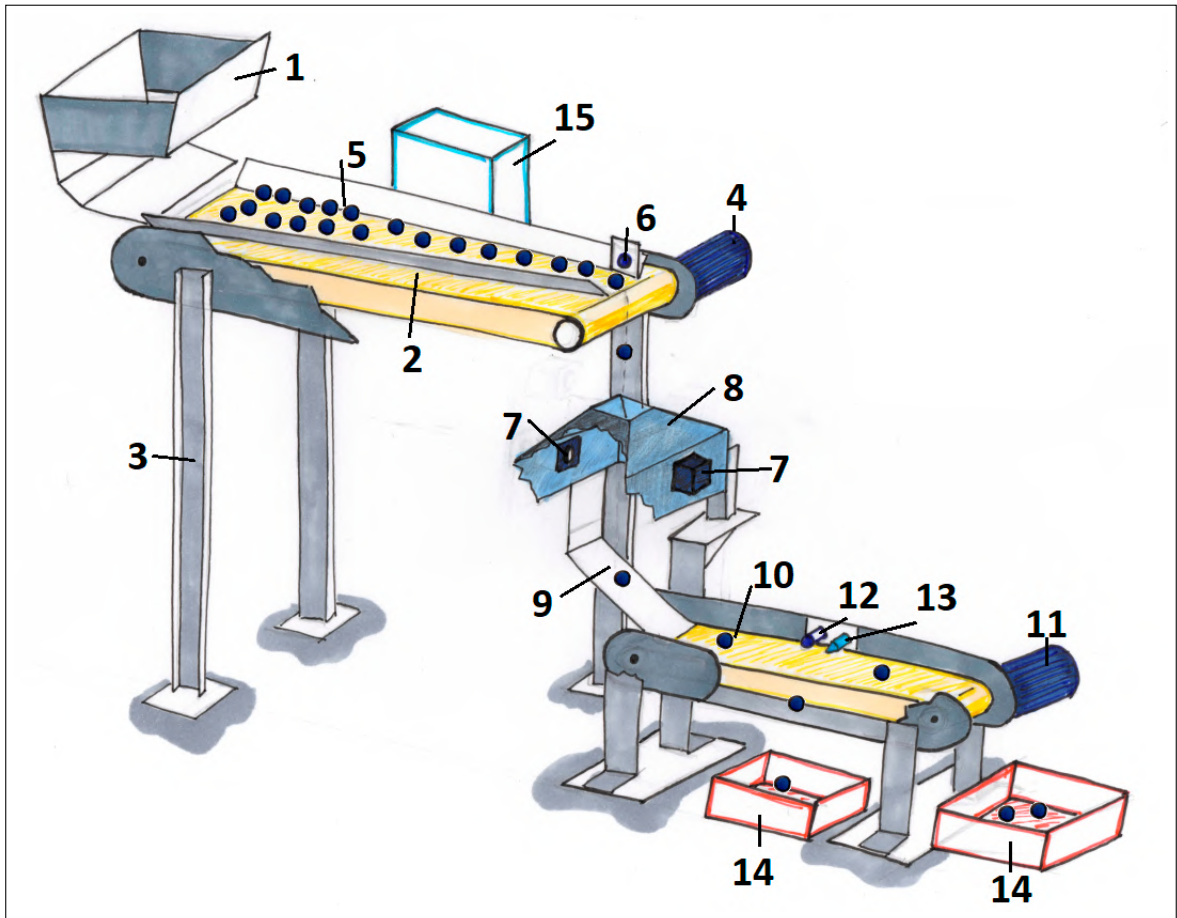


Figura 4.6: Concepto de solución 1 - Funciones básicas. Fuente: Elaboración propia

Concepto de solución 2

El concepto de solución 2 (Figura 4.7) cuenta con una rampa (1) para el ingreso de arándanos frescos al sistema. Luego, estos se dirigen a la faja (2), soportada por la estructura (3) y accionada por el motor eléctrico (4). La faja cuenta con un canal en V (5), encargado de singularizar los arándanos a medida que avanzan por la faja. Al final de esta, bajan por la rampa (6) para iniciar la captura de imagen con la cámara (7), aislada de la iluminación exterior con la cubierta (8). Un par de rodillos (10) harán girar el fruto accionados por un motor eléctrico (11) hasta que se culmine la captura, tras lo cual los cilindros neumáticos (9) separarán los rodillos para dejar caer el fruto hacia la rampa (12). Si el mismo no cumple con los criterios de selección, la compuerta (13) se abrirá por acción del cilindro neumático (14) para evitar que el fruto llegue al final de la rampa. Finalmente, los arándanos clasificados son almacenados en los contenedores (15). El sistema cuenta además con un tablero eléctrico (16).

En este caso, el sistema de giro empleando los rodillos requerirá el paso de un arándano a la vez, generando un retardo y por ende afectando la rapidez total del sistema.

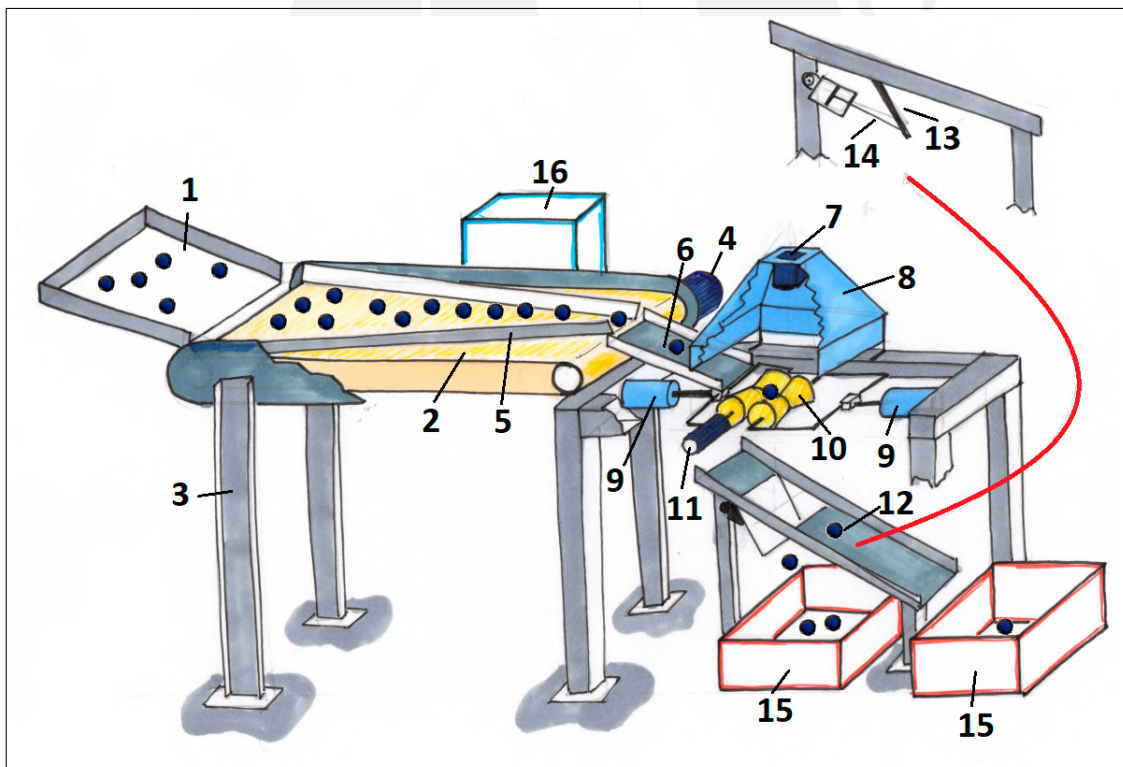


Figura 4.7: Concepto de solución 2 - Funciones básicas. Fuente: Elaboración propia

Concepto de solución 3

El concepto de solución 3 (Figura 4.8) cuenta con una tolva (1) para el ingreso de arándanos frescos al sistema. Luego, estos se dirigen a la faja (2), soportada por la estructura (4) y accionada por el motor eléctrico (3). La faja cuenta con un patrón adaptado para alojar arándanos individuales, y está inclinada de modo que aquellos frutos que no encajen en una cavidad caigan de regreso al inicio. Al final de la faja, una rampa (5), ubicada en sentido transversal, recibirá los arándanos. Estos descenderán, idealmente girando, para ser detectados por el sensor de presencia (6), dando paso a la captura de imagen por la cámara (7). Esta etapa está aislada de la luz exterior por la cubierta (8). Posteriormente, la faja (9) recibe los frutos y los transporta por acción del motor eléctrico (10) para ser separados por el sensor de presencia (11) y la boquilla de aire (12) en caso no cumplan los criterios de selección. Finalmente, los frutos son recolectados por los contenedores (13). El sistema cuenta además con un tablero eléctrico (14).

La principal dificultad involucrada en el diseño de este concepto sería la sincronización entre la caída de arándanos por la faja y por la rampa. Ello requiere pruebas para determinar si todos los arándanos rodarán por el plano inclinado con facilidad. Además, la cámara deberá capturar imágenes de múltiples arándanos a la vez.

Concepto de solución 4

El concepto de solución 4 (Figura 4.9) cuenta con una tolva (1) para el ingreso de arándanos frescos al sistema. Luego, estos se dirigen a la faja (2), soportada por la estructura (3) y accionada por el motor eléctrico (4). La faja cuenta con un canal en V (5), encargado de singularizar los arándanos a medida que avanzan por la faja. Al final de esta, un sensor de presencia (6) detectará el fruto para iniciar la captura de imagen con el par de cámaras (7), aisladas de la iluminación exterior con la cubierta (8). Posteriormente, el arándano analizado cae por la rampa (9) a la faja (10), accionada por el motor eléctrico (11). En esta, otro sensor de presencia (12) indicará al sistema que accione la boquilla de soplado (13) en caso el fruto no cumpla con los criterios de selección, de modo que sea expulsado de la faja. Finalmente, los frutos son recolectados en los contenedores (14). El sistema cuenta además con un tablero eléctrico (15).

Al igual que con el concepto 3, el concepto 4 propone que los arándanos rueden por el plano inclinado (7), lo cual requiere pruebas y no asegura la máxima visibilidad del fruto.

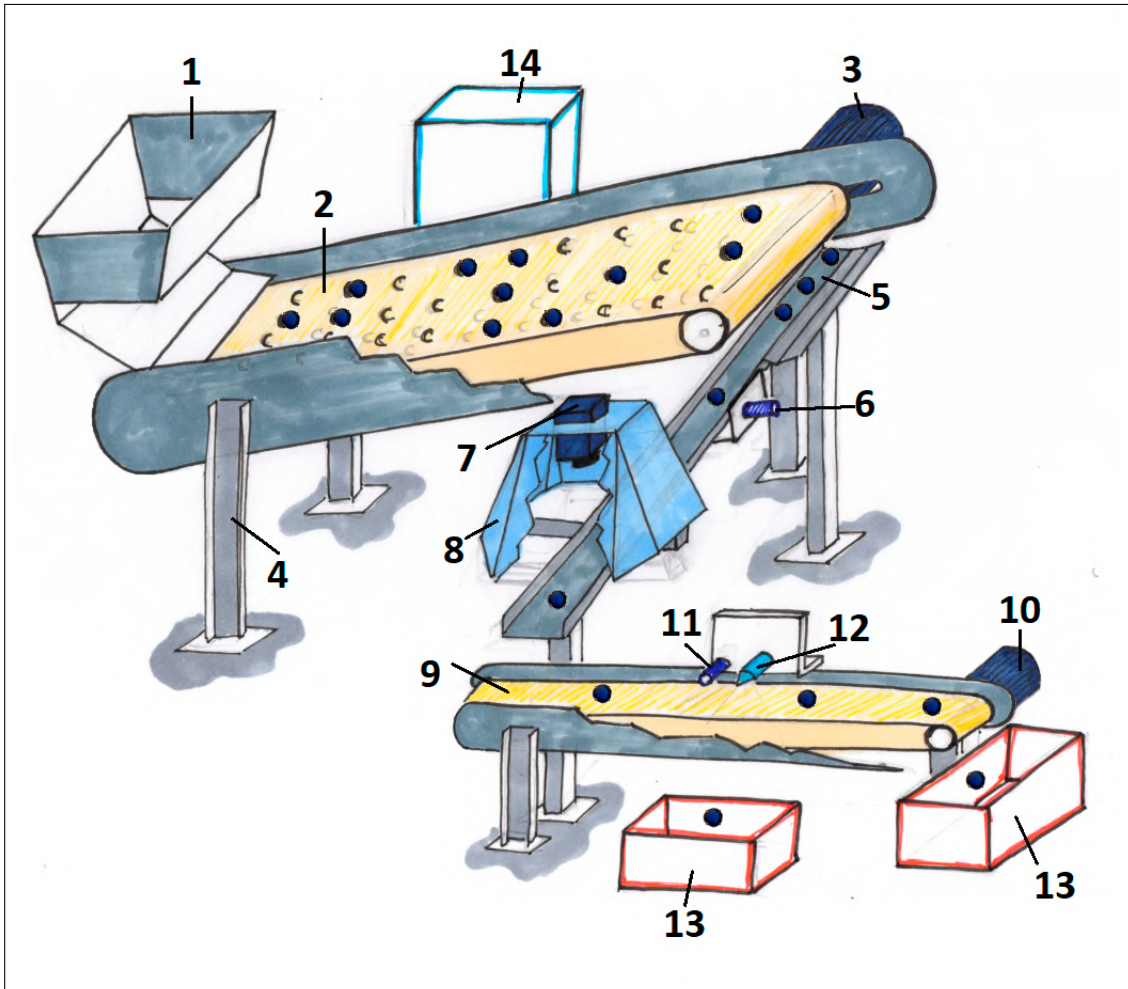


Figura 4.8: Concepto de solución 3 - Funciones básicas. Fuente: Elaboración propia

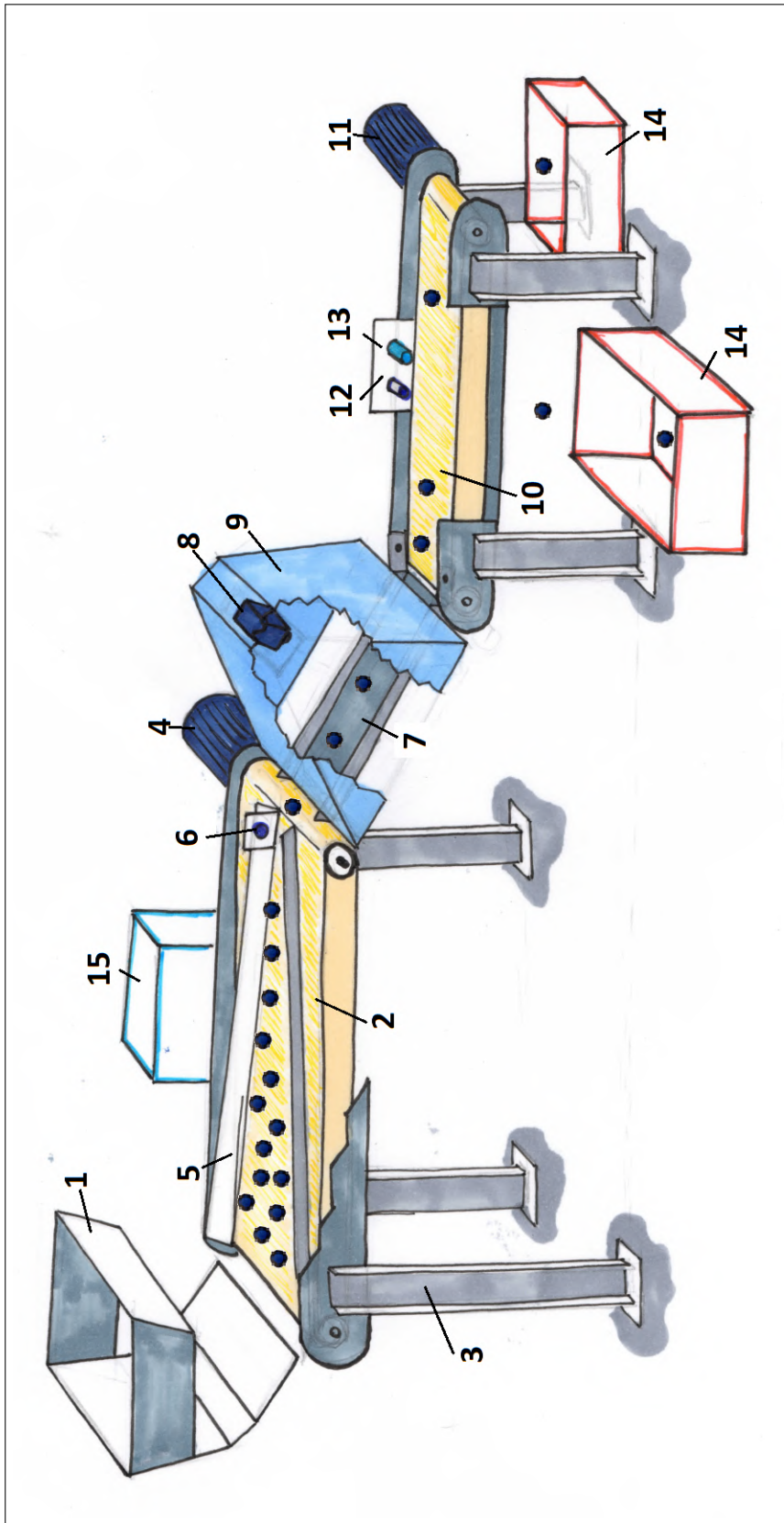


Figura 4.9: Concepto de solución 4 - Funciones básicas. Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Conceptos de solución - Sensores

Los sensores propuestos para el sistema son aquellos que permitan identificar la presencia de frutos en cada etapa del proceso, y la cámara debe poder adquirir una imagen lo suficientemente definida como para identificar características superficiales del arándano con precisión.

Concepto de solución 1

El concepto de solución 1 involucra el uso de sensores de ultrasonido para detectar la presencia de arándanos, tanto en la etapa de inicio de la captura de imagen como en la de separación del fruto. Además, plantea el empleo de una cámara web convencional para la adquisición de imágenes. Un sensor de ultrasonido necesita generalmente una separación mínima respecto del objeto a reconocer para ser efectivo, por lo que no sería útil en aplicaciones de corta distancia en espacios reducidos como la que se requiere. Por otro lado, el grado de detalle para detectar defectos en un arándano, cuyo diámetro no supera los 25 mm, puede no ser satisfecho por una cámara web de baja resolución.

Concepto de solución 2

El concepto de solución 2 también emplea una cámara web, pero propone usar un sensor capacitivo para detectar los frutos en la línea. Este es efectivo para aplicaciones de corta distancia, pero puede no ser adecuado para diferenciar dos o más arándanos con una separación mínima en una faja transportadora.

Concepto de solución 3

El concepto de solución 3 cambia la cámara web del concepto 2 por una cámara industrial, con mayor resolución y velocidad de captura. Ello incrementa la capacidad del sistema para detectar defectos en el fruto, pero a la vez requiere de un procesador más potente. Como consecuencia, se incrementará además el costo del sistema.

Concepto de solución 4

Finalmente, el concepto 4 plantea el uso de una cámara industrial y un sensor óptico para la detección de frutos en la línea. Este tipo de sensores tiene una velocidad de respuesta superior a los anteriores, y permite identificar separaciones mínimas entre objetos.

4.3.3. Conceptos de solución - Interfaz, procesamiento de información y control

Concepto de solución 1

El concepto de solución 1 para el dominio de información propone emplear una llave simple para alimentar el sistema. Por otro lado, un pulsador de parada de emergencia cortará la energía ante cualquier eventualidad. De manera similar, pulsadores se emplearían para dar inicio y fin al proceso de clasificación, mientras que la solicitud de criterios de clasificación y el procesamiento de imágenes se realizaría mediante una microcomputadora Raspberry Pi 3, que a la vez delegará el control de actuadores a un microcontrolador Arduino. Se incluye también una pantalla compatible con Raspberry Pi 3 para mostrar los resultados de procesamiento. Este tipo de microcomputadora y microcontrolador son de bajo costo, pero no son aptos para entornos industriales. Además, será posible la programación con la librería de código abierto para procesamiento de imágenes OpenCV, lo cual reducirá aún más el costo de desarrollo. En contraste, se incrementará la complejidad del mismo, así como la de obtener una interfaz amigable con el usuario. Adicionalmente, se plantea usar técnicas de análisis clásico de imágenes, lo cual podría agilizar el tiempo de desarrollo del algoritmo.

Concepto de solución 2

El concepto de solución 2 reemplaza la llave del concepto 1 por un selector; y la microcomputadora por una laptop convencional. Ello incrementa la velocidad de procesamiento de esta propuesta respecto a la primera. Además, se propone desarrollar el algoritmo de procesamiento de imágenes en Matlab y análisis clásico, lo cual disminuye la complejidad a costas de incrementar el costo. Sin embargo, debe notarse que una vez desarrollado el algoritmo, este puede ser fácilmente implementado en OpenCV para el producto final. Se podrá ingresar información al sistema y mostrar los resultados a través de la misma computadora.

Concepto de solución 3

El concepto de solución 3 plantea encender el sistema con un pulsador y reemplazar toda la interfaz de usuario de los dos primeros conceptos con un HMI de estándar industrial. Por otro lado, el procesamiento de imágenes se haría con un controlador dedicado con algoritmos basados en deep learning, mientras que un PLC se encargaría de controlar los actuadores. El resultado sería un sistema robusto, adecuado para entornos industriales

y apto para altas velocidades de procesamiento. Como consecuencia, se incrementarían los costos significativamente, lo cual no sería conveniente a nivel de prototipo.

4.4. Evaluación de conceptos de solución

Para evaluar cada uno de los conceptos propuestos anteriormente se emplea el método del perfil de Harris, propuesto por la Guía de Diseño de la Universidad Tecnológica de Delft [67]. Se recomienda el uso de este método cuando las alternativas de solución propuestas se encuentran aún en un nivel conceptual, priorizando una comparación cualitativa. Primero, los criterios de evaluación se ordenan verticalmente en orden de importancia. Luego, de una escala de 4 calificaciones (--,-,+,++; siendo -- la más negativa y ++ la más positiva) se marca aquella que represente mejor a la solución. Finalmente, se elegirá la que cuente con más casillas positivas marcadas. En caso de empate, la solución con más casillas positivas en la parte superior se tomará en cuenta.

Como resultado de aplicar el mencionado método, se eligió la solución 1 para ejecutar las funciones básicas, la solución 4 del dominio de sensores y la solución 2 de las propuestas para la interfaz, procesamiento de información y control.

4.4.1. Evaluación de conceptos de funciones básicas

Para este grupo de funciones, se ha considerado como criterios de mayor importancia asegurar la integridad del fruto, maximizar la superficie visible del mismo y la rapidez de procesamiento, como se muestra en la Tabla 6.3. La solución 1 es elegida preliminarmente como óptima, ya que acumula la mayor cantidad de evaluaciones positivas. La solución 3 queda en segundo lugar: si bien cuenta con igual puntaje que la solución 4, es mejor evaluada para los criterios de mayor importancia en la parte superior.

Tabla 4.4: Evaluación - Funciones básicas. Fuente: Elaboración propia

Criterio	SOLUCIÓN 1			SOLUCIÓN 2			SOLUCIÓN 3			SOLUCIÓN 4		
	--	-	++	--	-	++	--	-	++	--	-	++
Probabilidad de daño al fruto												
Superficie visible del fruto												
Rapidez potencial de procesamiento												
Necesidad de realizar pruebas para comprobar principio de funcionamiento												
Facilidad para alimentación de frutos												
Costo de fabricación												
Costo de componentes												
Complejidad de fabricación												
Espacio necesario para implementación												
Posibilidad de acoplar líneas en paralelo												
Facilidad de limpieza												
Disponibilidad en mercado local												
Consumo de energía												
Cuenta	14			5			12			12		

4.4.2. Evaluación de conceptos de sensores

Para este grupo, se ha separado con una línea gruesa horizontal aquellos criterios para evaluar los sensores de presencia (S) y los criterios para la cámara (C). Se puede apreciar en la Tabla 4.5 que la solución 4 es la óptima para este grupo: Permitirá detectar de forma más efectiva cada arándano y reconocer con más detalle defectos en su superficie.

Tabla 4.5: Evaluación - Sensores. Fuente: Elaboración propia

Criterio	SOLUCIÓN 1				SOLUCIÓN 2				SOLUCIÓN 3				SOLUCIÓN 4			
	--	-	+	++	--	-	+	++	--	-	+	++	--	-	+	++
Diferenciación entre frutos pequeños (S)	■	■				■				■					■	■
Alcance (S)				■	■				■					■		
Trabajo en espacio reducido (S)		■					■				■				■	
Tiempo de respuesta (S)		■					■				■				■	
Sensibilidad a polvo/agua (S)			■	■		■				■				■		
Resolución, tamaño mínimo reconocido (C)		■				■					■	■			■	■
Velocidad de captura (C)	■	■			■	■					■	■			■	■
Costo de componentes			■				■			■			■	■		
Disponibilidad en mercado local			■				■			■			■	■		
Cuenta	5				4				6				8			

4.4.3. Evaluación de conceptos de interfaz, procesamiento de información y control

En este grupo de funciones, analizado en la Tabla 4.6 la solución 2 se elige como la más adecuada, ya que permitirá una mayor capacidad de procesamiento, a la vez reduciendo la complejidad de desarrollo para el prototipo.

Tabla 4.6: Evaluación - Interfaz, procesamiento de la información y control. Fuente: Elaboración propia

Criterio	SOLUCIÓN 1				SOLUCIÓN 2				SOLUCIÓN 3			
	--	-	+	++	--	-	+	++	--	-	+	++
Tiempo de procesamiento		■					■				■	■
Complejidad de desarrollo							■	■			■	
Costo de componentes			■	■		■			■			
Costo de software					■	■				■		
Amigable con usuario		■					■				■	
Volumen ocupado			■	■			■	■		■		
Compatibilidad con otros dispositivos			■				■			■		
Adaptabilidad a entorno industrial	■	■					■				■	■
Cuenta	8				8				6			



5. Aspectos preliminares de diseño

Con el objetivo de empezar el diseño del sistema de clasificación de arándanos se realizan pruebas experimentales preliminares. Los resultados de estas pruebas permitirán validar los conceptos seleccionados en la sección anterior, así como recopilar datos requeridos para el dimensionamiento de la máquina y la selección de sus componentes.

5.1. Caracterización de arándanos

Es necesario conocer características principales del fruto para dimensionar el sistema. Así, se tomó una muestra de 10 cajas de 125 g de arándanos, así como 1 kg de muestras a granel. Se sabía de antemano, gracias a la visita a AVSA, que los arándanos que ingresan al mercado local comúnmente no han sido clasificados. Esta muestra permitió identificar los defectos superficiales descritos por la bibliografía, así como registrar datos de calibre (diámetro) y masa.

Se eligió medir el calibre de los arándanos empleando técnicas de visión por computadora, como punto de partida para diseñar el sistema central de captura y análisis de imágenes. Con ese propósito, se construyó una cubierta de iluminación cuyo diseño y fabricación se describe líneas abajo.

Posteriormente, los mismos arándanos fueron pesados en el Laboratorio de Materiales de la PUCP. Los datos de calibre y masa obtenidos se emplean finalmente para dimensionar la máquina.

5.1.1. Diseño y fabricación de cubierta de iluminación para caracterización

Selección de la cámara para pruebas preliminares

Tomando en cuenta el requerimiento de procesamiento fijado al inicio, que plantea que el sistema a diseñar clasifique un fruto por segundo, puede estimarse que la frecuencia de captura de la cámara no juega un papel esencial: Las cámaras comunes trabajan comúnmente a 30 fps (30 imágenes por segundo), lo cual es suficiente para propósitos de este diseño. Por el contrario, características como el tiempo de obturación (o de exposición) y la resolución de la misma sí son esenciales. La primera, limitará la velocidad a la que el fruto debe encontrarse al momento de la captura sin afectar la calidad de la imagen (resultando en una imagen “corrida”); mientras que la segunda es importante dado el nivel de detalle requerido para identificar defectos con dimensiones menores a 1 mm_2 , en un arándano con un diámetro máximo de 25 mm [58].

Con el fin de asegurar el cumplimiento de los requerimientos mencionados se puede estimar una resolución mínima inicial equivalente al de una máquina industrial como la Kato 260 [7], descrita en el estado del arte. Según el fabricante, esta puede reconocer defectos con dimensiones de hasta 0.2 mm. Entonces, considerando que la unidad mínima para el reconocimiento de esta dimensión en una imagen es 1 pixel (px), puede definirse una resolución mínima de 5 px/mm. Finalmente, para asegurar la precisión del sistema desarrollado en el presente estudio, se elegirá trabajar con una resolución mínima inicial de 10 px/mm.

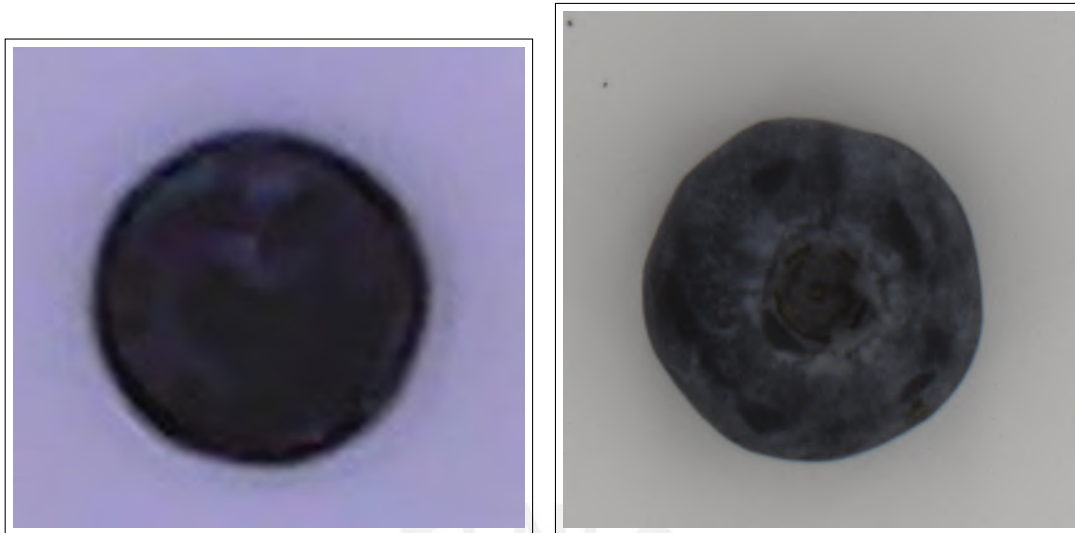
Se realizaron pruebas con dos cámaras que se encontraban disponibles: una cámara web común Logitech C170 (resolución 640x480 pixeles), y una cámara industrial FLIR BFS-U3-51S5C-C (resolución 2448x2048 pixeles). Esta última contaba además con un lente FUJI HF12.5HA-1B. En la Figura 5.1 se compara imágenes capturadas con ambas cámaras, desde una altura de 200 mm.

Para estimar el nivel de detalle que puede ser alcanzarse con cada una se capturó la imagen de un rectángulo de dimensiones conocidas, con lo que se relacionó el número de pixeles en cada lado con su equivalente en milímetros. La diferencia es clara: 3 px/mm con la cámara web, en contraste con los 18 px/mm de la cámara industrial. Así, se seleccionó la cámara industrial, mostrada en la Figura 5.2, y cuyas características principales se muestran en la Tabla 5.1 (ver Anexo B). Cabe resaltar que el empleo de una sola cámara desde el inicio del diseño del sistema es importante, dado que todas las pruebas y cálculos de diseño se harán sobre la base de las características de la misma.

Por otro lado, los experimentos siguientes permitirán modelar el comportamiento del fruto para estimar la velocidad del mismo al momento de la captura, de modo que se pueda comprobar que el tiempo de exposición requerido para cumplir las exigencias del sistema se encuentra dentro del rango de la cámara seleccionada.

Tabla 5.1: Características principales de la cámara seleccionada. Fuente: [21]

Características de la cámara FLIR BFS-U3-51S5C-C	
Resolución	2448x2048
FPS	75
Sensor	CMOS
Modo de captura	Global
Rango de exposición	6 μ s - 30 s
Interfaz	USB 3.1



(a) Imagen con cámara web Logitech C170 (b) Imagen con cámara industrial FLIR BFS-U3-51S5C-C

Figura 5.1: Comparación de resolución de cámaras. Fuente: Elaboración propia



Figura 5.2: Cámara industrial FLIR. Fuente: Elaboración propia

Diseño de cubierta de iluminación y soporte de cámara

La cubierta necesaria para las pruebas debía: primero, asegurar una iluminación direccionada hacia el centro de la imagen; segundo, sostener la cámara en posición central y permitir su fácil acople; finalmente, facilitar el posicionamiento de frutos en su interior. De este modo, se conceptualizó el diseño mostrado en las figuras 5.3 y 5.4, dimensionado para fabricarse mediante corte láser en acrílico.

Enumeradas se encuentran: 1. La cubierta, 2. cámara, 3. soporte de la cámara, 4. y 5. topes inferior y superior. La finalidad de estos últimos fue sostener una pieza de cartón cortada a la medida, de modo que se consiga una superficie inclinada desde los 4 lados de la cámara para la iluminación, simulando una pirámide trunca. Ello se hizo dada la complejidad para la fabricación de esta geometría en acrílico. La Figura C.1 del Anexo C muestra el prototipo fabricado. Su interior se recubrió con cartulina negra, para evitar

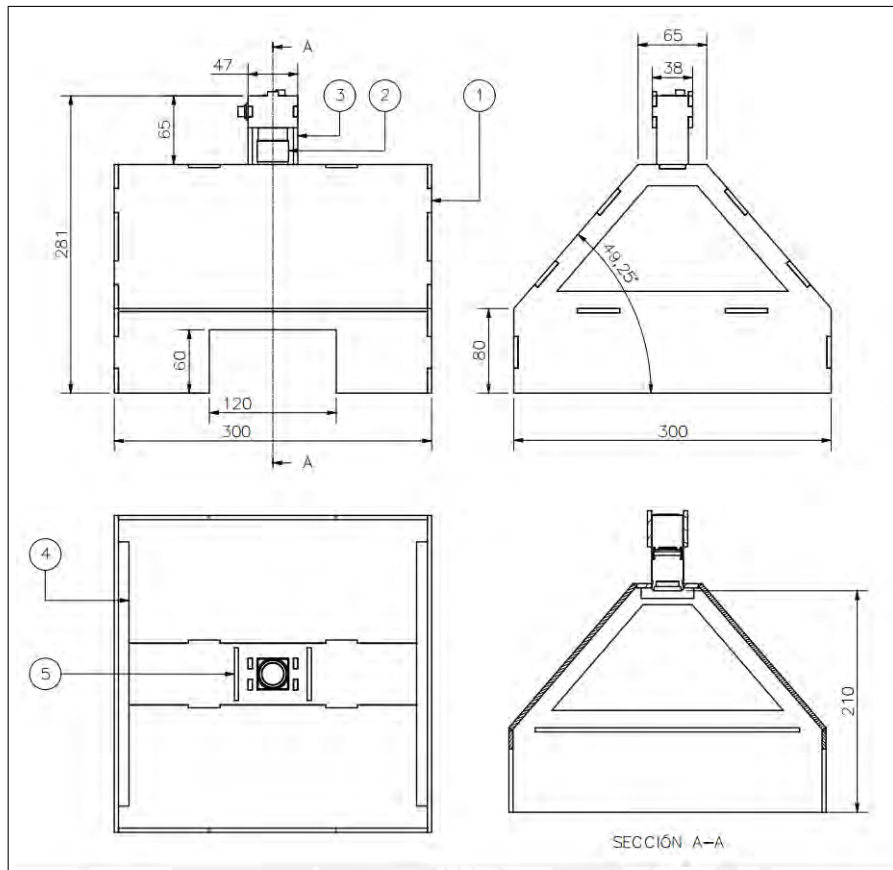
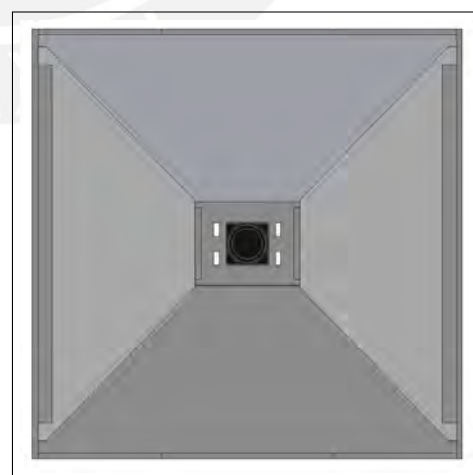


Figura 5.3: Dimensiones del prototipo para captura de imágenes. Fuente: Elaboración propia

interferencia de iluminación exterior. Se puede apreciar además una fuente de 12 VDC para las tiras LED de luz blanca que iluminan el interior de la cubierta.



(a) Vista isométrica del diseño



(b) Vista del interior de la cubierta, una vez colocadas las piezas de cartón

Figura 5.4: Vistas del diseño propuesto. Fuente: Elaboración propia

Iluminación

Se eligió luz blanca difusa (proveniente de tiras LED), como una opción adecuada para la iluminación de los arándanos en las pruebas preliminares. La disposición de las mismas debía minimizar cualquier sombra generada por el fruto, ya que ello afecta la precisión de las mediciones empleando visión por computadora. Con este propósito, se realizaron pruebas con 3 distribuciones diferentes, mostradas en la Figura 5.5, en la cual cada rectángulo rojo representa una tira LED. Dada la geometría casi esférica del arándano, la disposición de la luminaria debe asemejarse a un círculo, que ilumine los 360 grados del fruto. De este modo, la disposición con la que se obtuvieron mejores resultados fue la disposición 3.

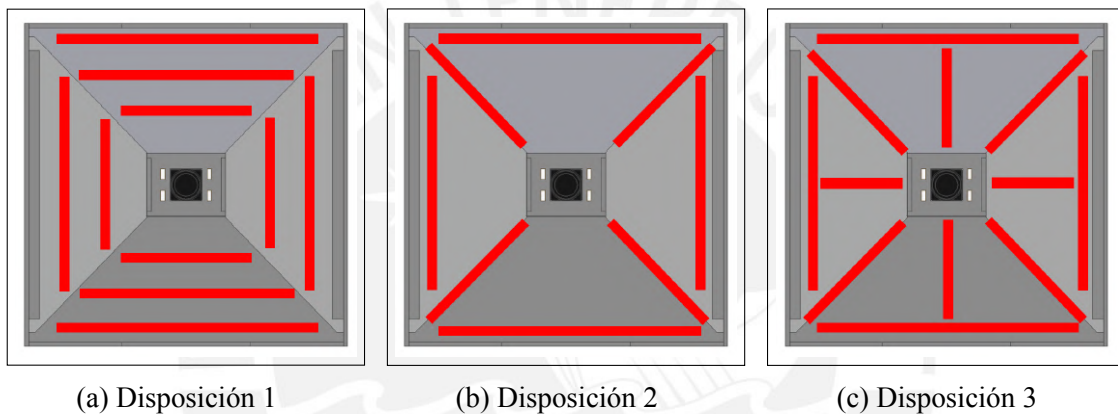


Figura 5.5: Disposiciones de tiras LED para iluminación. Fuente: Elaboración propia

La Figura C.2 del Anexo C muestra la iluminación implementada, recubierta con papel traslúcido para difuminar la luz blanca y distribuirla en todo el interior de la cubierta, contribuyendo a la reducción de sombras bajo el fruto.

5.1.2. Identificación de características visibles

Los arándanos frescos adquiridos fueron clasificados según los siguientes criterios: Arándano bueno, sin bloom, blando, aplastado, rojo, con tallo, con resto floral, con hongo. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 5.6.



Figura 5.6: Características superficiales identificadas en arándanos. Fuente: Elaboración propia



(a) Cajas con arándanos

(b) Arándanos separados por defectos

Figura 5.7: Clasificación previa de arándanos. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se clasificó por inspección visual los arándanos buenos en rangos de calibre (Figura 5.8), de modo que se obtenga una muestra variada para la medición de calibre mediante visión por computadora y el registro de peso. Finalmente, se seleccionaron 100 arándanos calificados como “buenos” para el proceso de caracterización. Los mismos fueron numerados, para asociar las medidas de calibre y peso de cada uno.

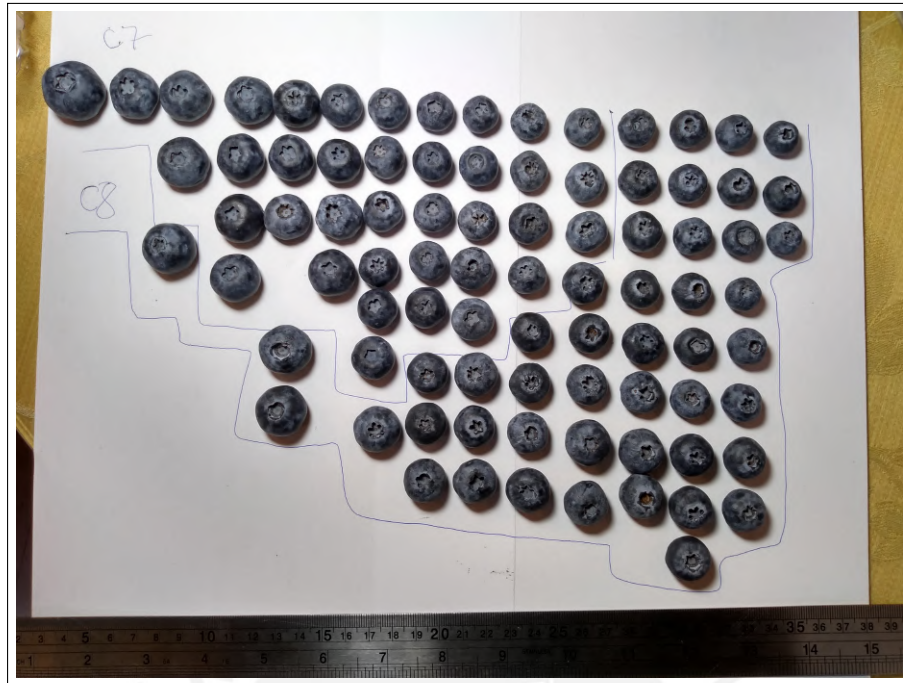


Figura 5.8: Arándanos agrupados por calibre. Fuente: Elaboración propia

Corrección de deformación de una imagen por características intrínsecas de la cámara

Toda cámara genera deformaciones en la imagen dada la naturaleza curva de los lentes. Una de las deformaciones más llamativas es la radial, cuyos efectos pueden evitar que las mediciones obtenidas mediante procesamiento de imágenes representen efectivamente la realidad. Resulta de utilidad tomar como referencia la imagen de una cuadrícula de dimensiones conocidas, capturada con la cámara seleccionada, para apreciar esta deformación como se puede notar en la (Figura 5.9a).

Entonces, es necesario efectuar una modificación en la distribución de los píxeles de la imagen, aplicando un factor de corrección al radio de cada píxel respecto al centro. Con esta finalidad, puede definirse el siguiente procedimiento:

Siendo X_0 e Y_0 las coordenadas, en píxeles, del centro de la imagen, se puede calcular el radio R_0 de cada píxel X e Y respecto al centro. Dado que la cámara empleada tiene una resolución de 2448x2048: $X_0 = 1224$ e $Y_0 = 1024$ y

$$R_0 = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}.$$

Luego, se calcula el radio corregido R_f , definiendo δ como el factor de correc-

ción. El valor del mismo se determinó experimentalmente, comparando cómo su variación afectaba la imagen resultante. Así, se empleó $\delta = -0.0028$:

$$R_f = R_0 + (\delta * R_0)^3.$$

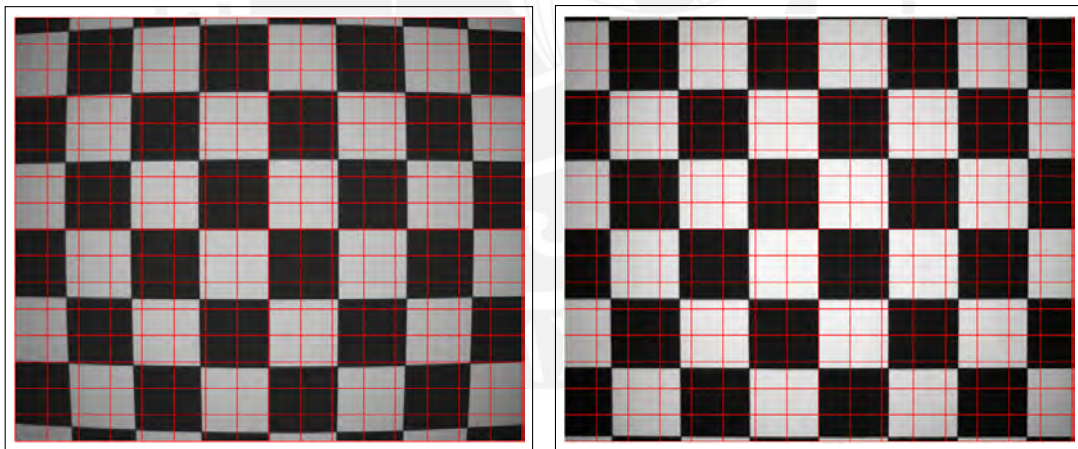
Posteriormente, se calculan los nuevos valores posición de cada pixel X_f e Y_f descomponiendo el nuevo radio:

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{Y - Y_0}{X - X_0}\right),$$

$$X_f = X_0 + R_f * \cos(\theta),$$

$$Y_f = Y_0 + R_f * \text{sen}(\theta).$$

Finalmente, el valor de cada pixel X e Y se reemplaza en las nuevas posiciones X_f e Y_f , quedando corregida la imagen, como se muestra en la Figura 5.9b.



(a) Imagen sin corrección

(b) Imagen con corrección

Figura 5.9: Calibración de la cámara. Fuente: Elaboración propia

Medición del calibre

La medición del calibre del fruto se realizó mediante procesamiento de imágenes clásico. Primero se ingresó el arándano bajo la cubierta de iluminación, con un fondo blanco, para colocarlo aproximadamente al centro de la imagen. La imagen fue capturada y guardada en formato .bmp, para luego procesarla con un algoritmo implementado en Matlab R2014a (ver Anexo L). El algoritmo sigue los siguientes pasos, descritos gráficamente en la Figura 5.10:

1. *Lectura del archivo de imagen*
2. *Delimitación de la región de interés*
3. *Conversión a escala de grises*
4. *Aplicación de filtro mediano*: Este permite suavizar componentes de ruido que pueden afectar la segmentación de la imagen.
5. *Segmentación de la imagen*: Se empleó el método de detección de bordes de Canny, ampliamente aceptado en los campos de automatización y clasificación en industria alimentaria [44], con un umbral de 0.1 para identificar los límites de la imagen. Luego, la región del arándano fue rellenada, erosionada y dilatada para eliminar píxeles aislados.
6. *Obtención de las propiedades de la región*: Con herramientas del paquete incluido para procesamiento de imágenes de Matlab, se obtuvo el área de la región que delimita el arándano (comando “*regionprops*”). Finalmente, aproximando esta región a un círculo, puede estimarse el diámetro del mismo en píxeles.

Con este mismo procedimiento, se procesó la imagen de un rectángulo negro de dimensiones 20 x 40 mm. En píxeles, se obtuvo que el lado de 20 mm medía 341 px, mientras que el otro medía 679 px. Ejecutando una división, se puede estimar una resolución de 17.05 px/mm y 16.98 px/mm respectivamente. Con ello, es posible aproximar una relación de 17 px/mm; y al dividir los diámetros obtenidos en píxeles para cada arándano entre este valor, se obtienen los valores estimados de calibre para cada uno.

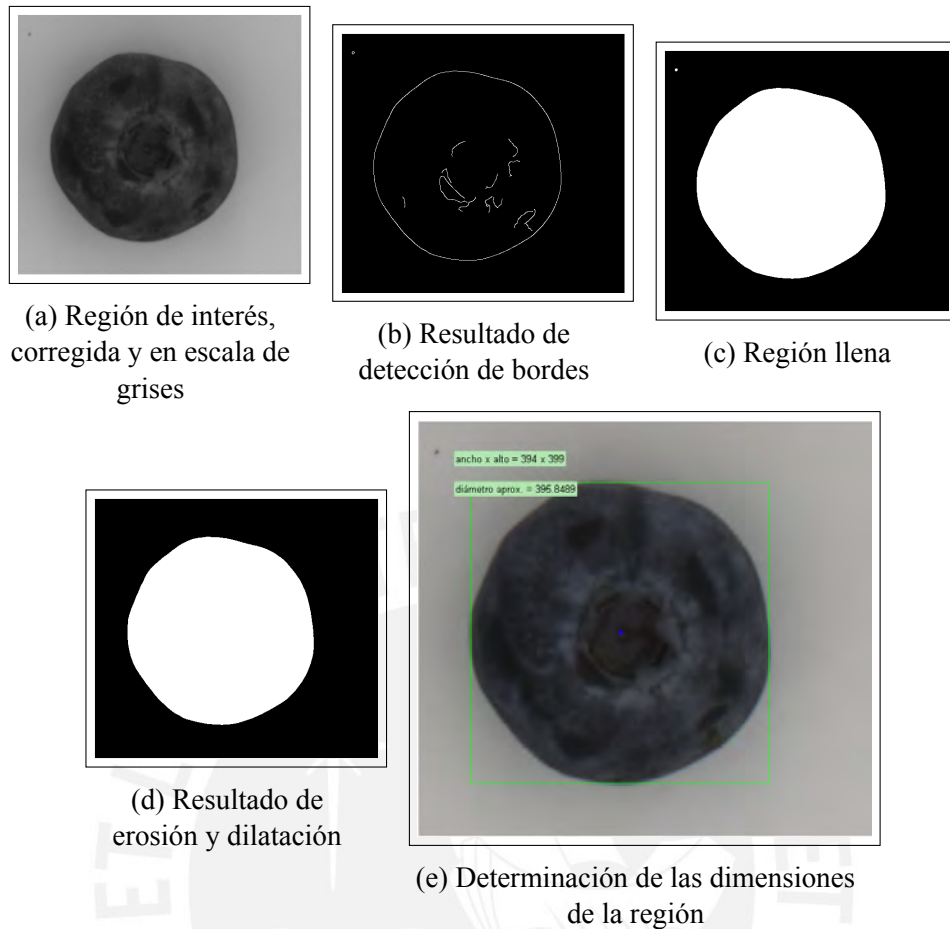
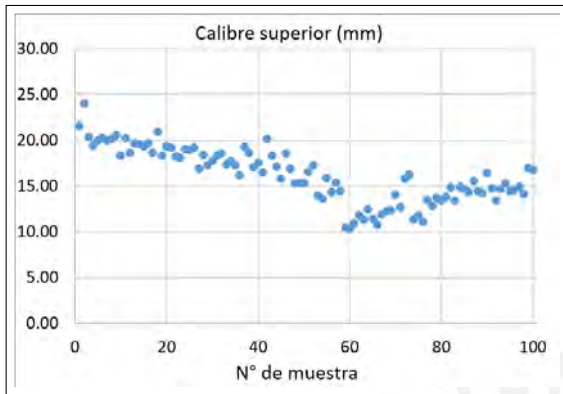


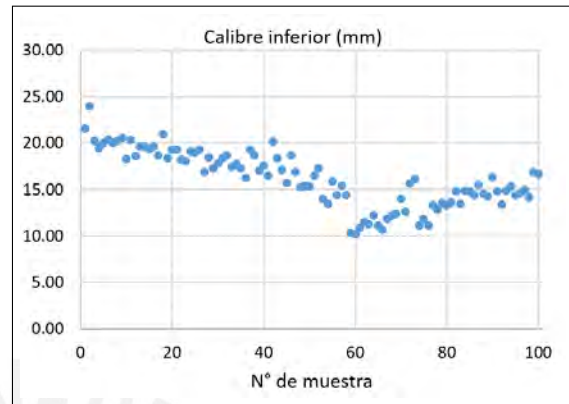
Figura 5.10: Procedimiento para determinación del diámetro. Fuente: Elaboración propia

Los gráficos en la Figura 5.11 muestran los calibres obtenidos para la muestra de 100 arándanos. Se ha analizado 2 imágenes por cada uno, correspondientes a una toma de la parte superior (Figura 5.11a) y otra de la parte inferior (Figura 5.11b), respectivamente. Esto se realiza con el propósito de validar si el diámetro mayor del fruto puede ser determinado independientemente del plano desde el cual se capture la imagen.

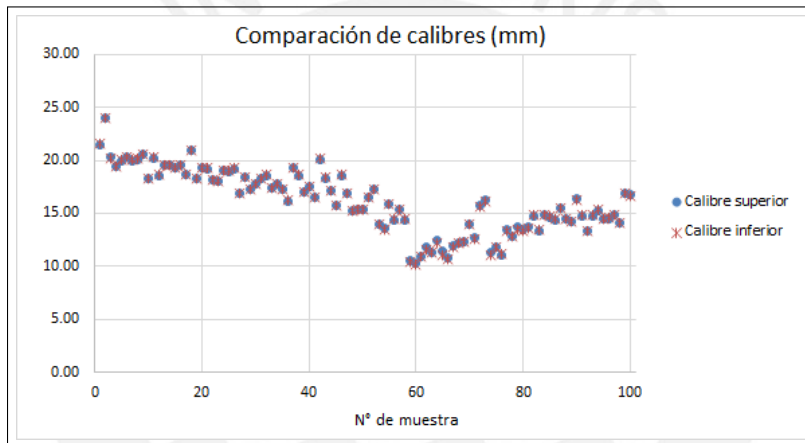
Puede apreciarse en la Figura 5.11c que no existe una variación significativa entre ambas medidas, con una diferencia promedio del 0.2 % para cada arándano, lo cual permite validar la posibilidad de determinar el diámetro mayor del fruto analizándolo por cualquiera de los dos lados. Adicionalmente, se han obtenido datos útiles para el dimensionamiento del sistema de clasificación: en ambos casos el calibre promedio es de 16.18 mm. Para la medición por la cara superior, el valor máximo fue de 23.97 mm y el mínimo de 10.28 mm. En el caso de la cara inferior, estos valores fueron de 23.98 mm y 10.17 mm respectivamente. Finalmente, se muestra en la Figura 5.11d que la mayoría de arándanos se concentra en el rango de calibres comprendido entre 12 mm y 21 mm. Todos los resultados pueden encontrarse en la tabla del Anexo D.



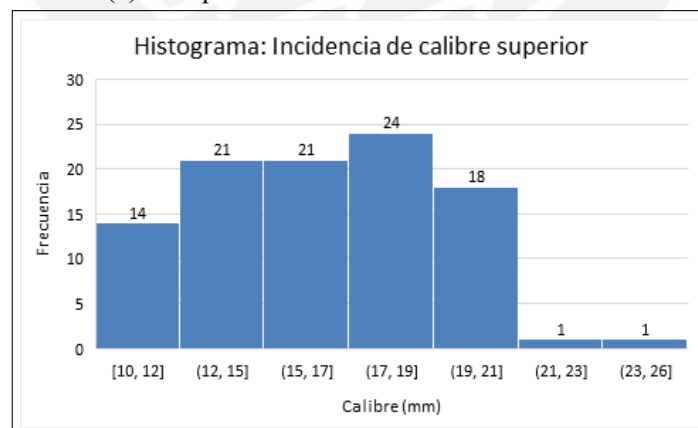
(a) Medida del calibre por la parte superior



(b) Medida del calibre por la parte inferior



(c) Comparación de mediciones de calibre



(d) Histograma de incidencia de calibres obtenidos

Figura 5.11: Resultados de medición del calibre. Fuente: Elaboración propia

Medición de la masa

Los mismos arándanos que fueron sometidos al proceso de medición del calibre fueron pesados en una balanza Mettler Toledo con precisión de 0.0001 g (ver Figura 5.12). Para mejor entendimiento, se grafica la masa de cada arándano contra el calibre estimado anteriormente en la Figura 5.13. Habiéndose determinado que el diámetro mayor puede ser determinado con tomas por ambos lados del fruto, se elige trabajar con los calibres medidos desde una vista superior.

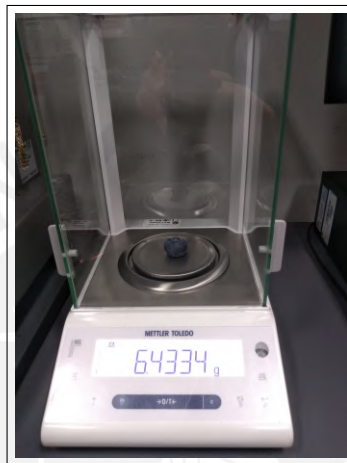


Figura 5.12: Balanza empleada para medición. Fuente: Elaboración propia

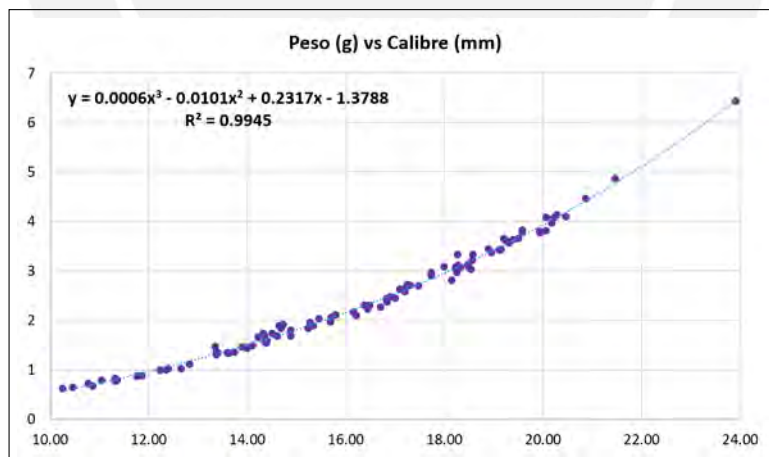


Figura 5.13: Relación entre el peso y el calibre. Fuente: Elaboración propia

Puede confirmarse la relación cúbica entre el peso y el calibre, con un error promedio del 3.8 %. La masa máxima medida fue de 6.43 g; y la mínima, de 0.62 g. Estas mediciones nos permitirán dimensionar el sistema, además de presentar la posibilidad de estimar el peso de cada arándano a partir del diámetro medido por procesamiento de imágenes.

5.2. Dimensionamiento preliminar del dominio mecánico

5.2.1. Velocidad de la faja

Conociendo los valores máximo, mínimo y promedio de un arándano, y sus respectivas masas, puede calcularse la velocidad requerida para las fajas transportadoras, de modo que se cumplan los requerimientos. Estos planteaban el procesamiento de 1 arándano/s o 20 kg/h. Se planteó además el tamaño mínimo de un arándano como 12 mm, dado que se estableció también que los arándanos provendrían de una etapa de pre-calibrado.

Entonces, empleando la relación entre el diámetro y el peso hallada en la etapa de caracterización, puede estimarse la masa de cada arándano. Luego, para obtener 1 arándano/s:

$$\text{Velocidad de la faja} = \frac{\text{Diámetro}}{\text{Velocidad requerida}}$$

Sin embargo, al multiplicar esta velocidad por la masa de cada arándano, se observa en la Tabla 5.2 que el flujo en kg/h no satisface el requerimiento de 20 kg/h. Así, se calcula una nueva velocidad como:

$$\text{Nueva velocidad de la faja} = \frac{20}{\text{Flujo}} * \text{Velocidad de la faja}$$

Para los posteriores cálculos se tomará como velocidad 70 mm/s, dado que es la máxima velocidad a la que la faja debería ser capaz de desplazarse para cumplir con los requerimientos. Debe notarse que con esta velocidad, se estarían procesando hasta 6 frutos/s en el caso de arándanos pequeños, 4 frutos/s para los de calibre promedio y 3 frutos/s para los grandes.

Tabla 5.2: Valores para cálculo de velocidad de la faja. Fuente: Elaboración propia

Determinación de la velocidad de la faja						
	Calibre (mm)	Masa (g)	Velocidad requerida (frutos/s)	Velocidad faja (mm/s)	Flujo (kg/h)	Nueva velocidad (mm/s)
Arándano grande	24	6.64	1	24	23.9	24
Arándano pequeño	12	0.98	1	12	3.51	68.28
Arándano promedio	16	2.19	1	16	7.88	40.59

5.2.2. Altura máxima de caída

No se ha encontrado estudios previos que identifiquen una fuerza máxima que pueda ejercerse sobre un arándano. Sin embargo, existe bibliografía que estudia la incidencia de daño interno (“*bruise*” en inglés) en los arándanos según la altura de caída en máquinas cosechadoras. Yu [73], probó dejar caer arándanos desde alturas de 60 cm y 120 cm, determinando que la máxima altura que produce daños tolerables es la primera. Sin embargo, resalta que el colocar una espuma de poliuretano reduce los daños considerablemente, siendo posible dejar caer los arándanos desde 120 cm sin mayor daño que desde 60 cm. Realizó además pruebas sobre un plano inclinado a 20°, argumentando que la mayoría de máquinas cosechadoras emplean rampas con esta inclinación.

Por otro lado, Takeda [65] concluye que los arándanos deberían caer de altura máxima de 15 pulgadas (38.1 cm) para no sufrir daños significativos, mientras que Zhou [74] rescata la reducción de daño interno en cerezas al ser recibidas sobre un plano inclinado 60°. Ambos resaltan también la importancia de emplear espumas de protección en las superficies en contacto con el fruto. Entonces, se puede definir una altura máxima de caída de los arándanos de 40 cm para el diseño del sistema.

5.2.3. Ángulo óptimo para rodadura

Con el fin de determinar el ángulo óptimo para las rampas de alimentación u otras necesarias para el sistema, se realizó una prueba empleando un bloque de espuma de poliuretano. Arándanos se colocaron sobre el bloque y este fue inclinado progresivamente hasta que el arándano empezara a caer. Los ángulos fueron medidos con una aplicación para teléfono móvil, para una muestra de 50 arándanos de tamaños varios. Los resultados se presentan la Tabla 5.3:

Tabla 5.3: Resultados de medición de ángulo para caída sobre espuma de poliuretano.
Fuente: Elaboración propia

Ángulos medidos (°)									
23	23	25	32	18	16	23	21	22	28
22	21	23	23	30	28	32	34	30	23
23	18	28	22	36	17	24	24	26	26
15	30	31	22	20	25	36	23	24	29
24	26	26	20	21	35	25	29	31	22

El ángulo promedio es de 25°, y se aprecia una moda clara para ángulos menores, por lo que se usará este para el diseño posterior de las rampas del sistema. Cabe resaltar que 48 de los 50 arándanos giraron durante la caída por el plano inclinado, dando indicios de que

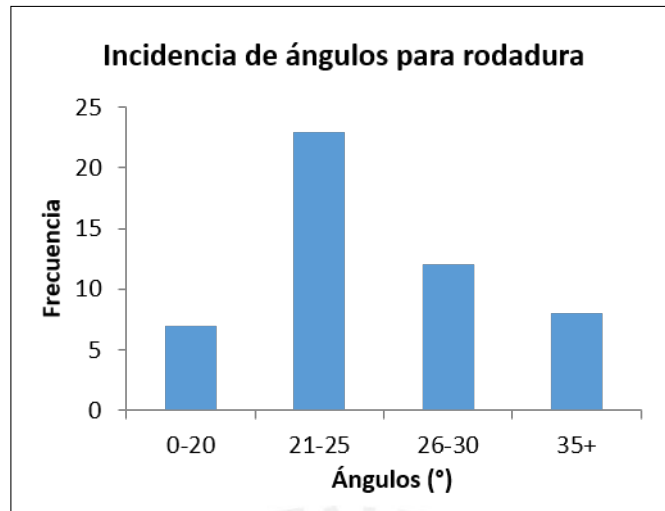


Figura 5.14: Histograma de ángulos medidos. Fuente: Elaboración propia

el concepto de solución 4 (para el sistema base) también podría cumplir con maximizar la superficie visible del arándano si se capturan múltiples imágenes durante la rodadura. Como parte de la siguiente sección, en la que se evalúa algunos aspectos básicos para la efectividad del concepto de solución previamente seleccionado, se halla el coeficiente de fricción mínimo que asegure el giro de los frutos.

5.3. Evaluación del concepto de solución

Esta sección se dedica a comprobar si el concepto de solución seleccionado para el sistema base (solución 1) asegurará la efectividad del sistema, además de analizar la complejidad de diseño del mismo, sobretodo en el subsistema de visión por computadora. Primero, se planteó que los arándanos sean direccionados por una rampa a la salida de la faja transportadora, con un ángulo de inclinación de 25° . Bajo esta premisa, se analiza el movimiento parabólico de los arándanos al caer de la rampa, para determinar si la diferencia de trayectorias podría afectar la precisión de la cámara. Por otro lado, se analiza el comportamiento de rodadura, dado que las pruebas anteriores mostraron que los arándanos sí giran al caer por una superficie de poliuretano.

5.3.1. Análisis de caída libre

Asumiendo una longitud de rampa $L = 150$ mm, una altura de caída $h = 400$ mm y un ángulo $\theta = 25^\circ$ se analiza cuánto se aleja un arándano de la posición de salida de la rampa (modelo en la Figura 5.15).

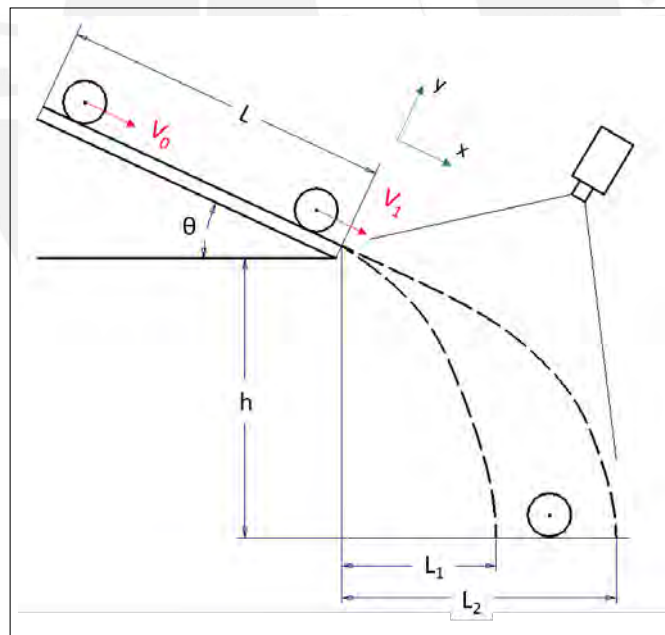


Figura 5.15: Esquema para análisis de caída. Fuente: Elaboración propia

Análisis sin fricción

Primero, asumiendo que no existe fricción entre el fruto y la rampa: definimos V_0 como la velocidad de ingreso a la rampa y V_1 como la velocidad de salida de la rampa.

Asumiendo que la velocidad de ingreso es despreciable ($V_0 = 0$), es posible definir la aceleración de un arándano de masa m en la dirección del plano inclinado (eje x) como:

$$\sum F_{uerzas_{eje\ x}} = m * a,$$

$$m * g * \text{sen}(\theta) = m * a,$$

$$a = g * \text{sen}(\theta),$$

y la velocidad de salida de la rampa como:

$$V_1 = \sqrt{2 * a * L},$$

además, el tiempo de permanencia en la rampa:

$$t_{rampa} = \sqrt{\frac{2 * L}{a}},$$

luego, la distancia horizontal L_2 recorrida por el fruto se halla con el tiempo de caída, resultado de:

$$h = V_1 * \text{sen}(\theta) * t + 0.5 * g * t^2.$$

Hallado el tiempo t , se calcula L_2 como:

$$L_2 = V_1 * \text{cos}(\theta) * t.$$

Análisis con fricción

Por otro lado, para hallar la distancia mínima L_1 que podría recorrer el fruto, se asumirá un coeficiente de fricción máximo $\mu = 0.3$, tomado de un estudio de coeficientes de fricción de manzanas con una superficie plástica [51]. La aceleración del arándano se redefine como:

$$\sum F_{uerzas_{eje\ x}} = m * a,$$

$$m * g * \text{sen}(\theta) - \mu * m * g * \text{cos}(\theta) = m * a,$$

$$a = g * \text{sen}(\theta) - \mu * g * \text{cos}(\theta).$$

V_1 y L_1 se hallarán de forma similar que en el procedimiento anterior. La Tabla 5.4 resume los resultados.

Tabla 5.4: Resumen de resultados de análisis de caída. Fuente: Elaboración propia

Resultados de caída sin fricción					
a (mm/s ²)	4145.89	t (s)	0.242	L_2	244.13
V_1 (mm/s)	1115.24	t_{rampa} (s)	0.269		
Resultados de caída con fricción					
a (mm/s ²)	1478.62	t (s)	0.258	L_1	155.92
V_1 (mm/s)	666.02	t_{rampa} (s)	0.45		

Puede apreciarse que la diferencia entre L_1 y L_2 es de 88.21 mm, y que el tiempo de caída es inferior a los 0.26 s en ambos casos. Ello indica que el concepto de solución elegido para el sistema base (concepto de solución 1), que emplea caída libre para la captura de imágenes, no es el más adecuado: la posible separación de los frutos de acuerdo a su interacción con la rampa, tamaño, masa, etc., sin tomar en cuenta el posible movimiento errático dada su geometría no uniforme, puede afectar el enfoque de la cámara y dificultar el desarrollo de un algoritmo de corrección de deformación radial. Además, el tiempo de captura es reducido, no siendo conveniente incrementar la altura de caída por posible daño al fruto.

5.3.2. Dimensionamiento de la rampa de visión y análisis de rodadura en plano inclinado

Por lo explicado anteriormente, la captura de imágenes sobre la rampa mientras el arándano gira se perfila como una solución, como se planteó en el concepto de solución 4 para el sistema base. Primero se determinará la longitud de la rampa:

planteando que el arándano deberá girar como mínimo 6 veces en el rango de visión de la cámara, es posible calcular la longitud de la rampa mediante el esquema mostrado en la Figura 5.16. Con el arándano más grande, idealizado como una esfera de diámetro 24 mm, puede estimarse que la longitud L requerida para la rampa es de 265 mm, tomando en cuenta distancias de entrada y salida de medio giro.

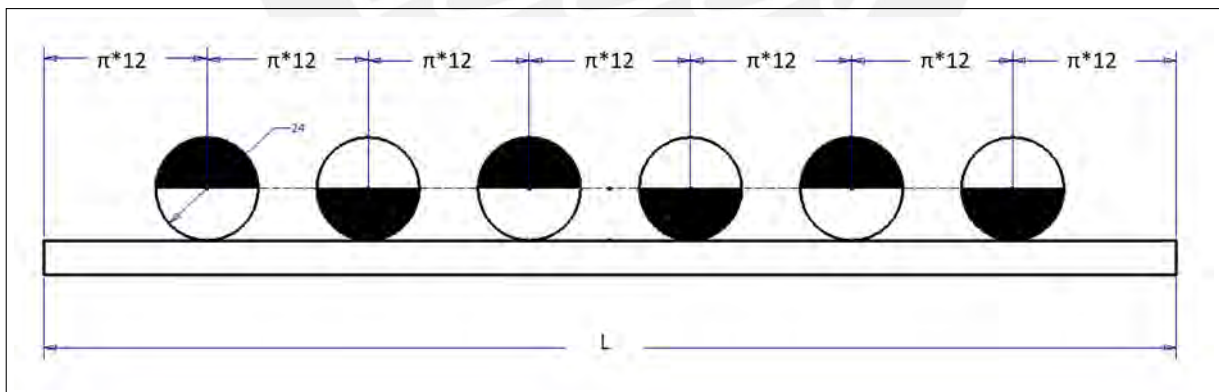


Figura 5.16: Esquema para dimensionamiento de rampa de visión. Fuente: Elaboración propia

Definida esta dimensión, se procede a realizar el análisis de rodadura, para una esfera de radio R , velocidad angular ω y aceleración angular α , sobre un plano inclinado de ángulo $\theta = 25^\circ$.

Sea F_r la fuerza de fricción estática que se opone al deslizamiento de la esfera de masa

m y momento de inercia I , se plantean las siguientes ecuaciones:

$$m * g * \text{sen}(\theta) - Fr = m * a, \quad (1)$$

$$Fr * R = I * \alpha, \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{a}{R}. \quad (3)$$

Conociendo que:

$$I = \frac{2 * m * R^2}{5}, \quad (4)$$

podemos reemplazar las ecuaciones 3 y 4 en 2, obteniéndose:

$$Fr = \frac{2 * m * a}{5}. \quad (5)$$

Luego, sustituyendo 5 en 1 se deduce:

$$m * g * \text{sen}(\theta) - \frac{2 * m * a}{5} = m * a, \quad (6)$$

para finalmente obtener

$$a = \frac{5 * g * \text{sen}(\theta)}{7},$$

valor con el cual puede estimarse el tiempo que toma al arándano llegar al final de la rampa, empleando las ecuaciones de MRUV de la sección anterior.

Por otro lado, conociendo la aceleración, puede hallarse la fuerza de fricción necesaria para la rodadura de un arándano grande de 6.64 g empleando la ecuación 1, y por último, el coeficiente de fricción necesario para que el arándano ruede:

$$\mu = \frac{Fr}{m * g * \text{cos}(\theta)}.$$

Los resultados se muestran en la Tabla 5.5.

El valor de coeficiente de fricción obtenido es menor al estimado en el primer análisis, lo cual confirma lo observado en el experimento en el plano inclinado: sobre una superficie

Tabla 5.5: Resultados de análisis por rodadura. Fuente: Elaboración propia

Resultados de rodadura					
L (mm)	265	t_{rampa} (s)	0.423	μ mín.	0.133
a (mm/s ²)	2961.3	Fr (N)	0.00079	V_1 (mm/s)	1252.8 mm/s

plástica, los arándanos tenderán a girar. Además, el tiempo de permanencia en la rampa es casi el doble que el de caída libre, incrementando la cantidad de imágenes posibles de capturar.

5.3.3. Comprobación de características de la cámara preseleccionada

Puede además calcularse el tiempo máximo de obturación o exposición de la cámara, conociendo la velocidad máxima del fruto. Se asumirá que esta velocidad se da a la salida de la rampa (V_1 en la Tabla 5.5). Sabiendo que el tiempo de obturación debe ser como máximo el tiempo que demora a un pixel para cambiar de posición, se puede plantear:

$$\frac{X_{px}}{t_{obt}} = V_1,$$

con X_{px} siendo la medida de un pixel, que por las pruebas anteriores puede fijarse en 1/18 mm; y de la Tabla, $V_1 = 1252.8$ mm/s. Entonces,

$$\frac{1}{18 * 1252.8} = t_{obt} = 44.35 \mu s,$$

obteniéndose un tiempo contenido en el rango de exposición de la cámara seleccionada (ver Tabla 5.1), comprobando que cuenta con características adecuadas para el diseño.

Entonces, se concluye que el concepto de solución 4 (del grupo de conceptos para el sistema base) cumplirá mejor los requerimientos del sistema, además de reducir la complejidad de diseño. La rampa para el subsistema de visión deberá medir como mínimo 265 mm con una inclinación de 25°, estando recubierta en poliuretano u otra espuma rugosa que asegure la fricción del fruto y su protección contra impactos.

6. Diseño del sistema

6.1. Descripción del sistema mecatrónico

El sistema completo se presenta en las Figuras 6.1 y 6.2, y sus dimensiones generales se señalan en la Figura 6.3. Sus componentes principales son: 1. Rampa de alimentación, 2. Faja de singularización, 3. Estructura soporte, 4. Rampa de conexión, 5. Faja para transporte a visión, 6. Rampa de visión, 7. Cubierta de iluminación, 8. Rampa de separación, 9. Tablero de control. El sistema ha sido diseñado como prototipo, buscando reducir la complejidad y tiempo de fabricación, empleando, sin embargo, materiales de grado alimenticio que permitan realizar demostraciones a potenciales clientes.

Los arándanos ingresarán al sistema por la rampa 1, para ser singularizados por las guías oblicuas en la banda 2. Los frutos pasarán de uno en uno por la rampa 4 hacia la banda 5, que se mueve al doble de velocidad que la banda 2 para separar aquellos arándanos que no hayan sido singularizados en la etapa previa. Posteriormente, los frutos caen por la rampa 6, recubierta con una espuma de poliuretano que contribuye con el giro de los mismos, para que hasta 6 imágenes se capturen por la cámara sobre la cubierta de iluminación 7. Estas imágenes serán procesadas en una laptop para que, finalmente, aquellos arándanos cuyas características extraídas de las imágenes no cumplan con los criterios de selección, sean separados por una boquilla de soplado en la faja 8.

Las fajas serán accionadas por motores DC de 12 VDC, y la señal de inicio para la captura de imágenes y separación será dada por sensores fotoeléctricos de fibra óptica. Todos los actuadores y sensores están conectados a un microcontrolador Arduino UNO, que se comunica con la laptop por interfaz USB. Por otro lado, la cámara empleada es de grado industrial y el sistema cumple con el requerimiento de procesar 1 fruto por segundo, siendo además fabricado en su totalidad en acero inoxidable y bandas de grado alimentario. Las secciones siguientes describen el proceso de diseño del sistema, en los dominios mecánico, electrónico y de procesamiento de la información.

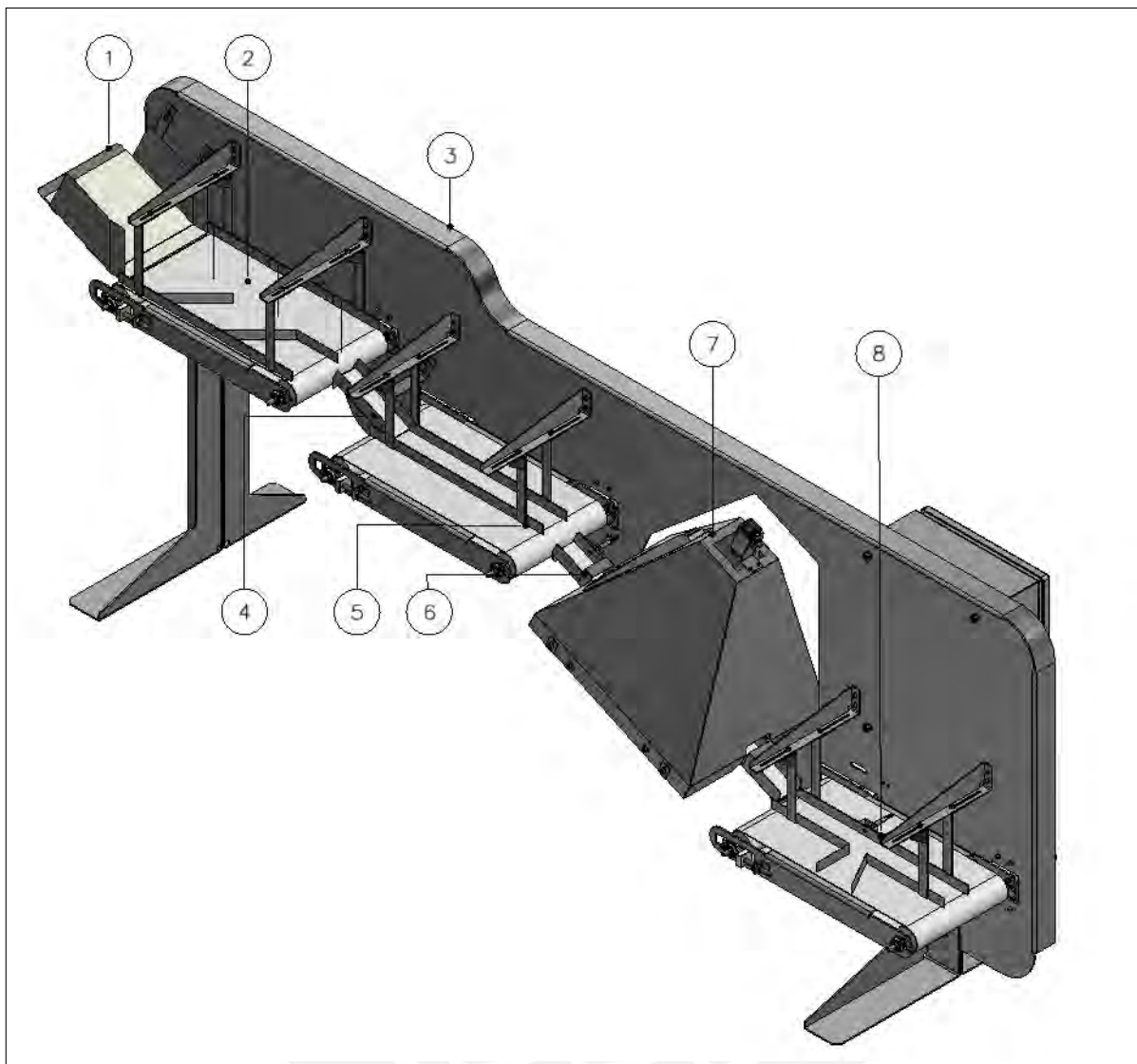
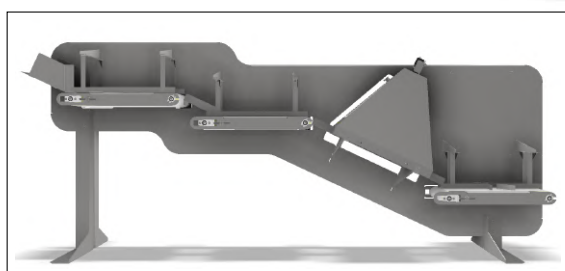


Figura 6.1: Vista isométrica del sistema. Fuente: Elaboración propia



(a) Vista frontal del sistema



(b) Detalle de parte trasera

Figura 6.2: Ensamble total del sistema. Fuente: Elaboración propia

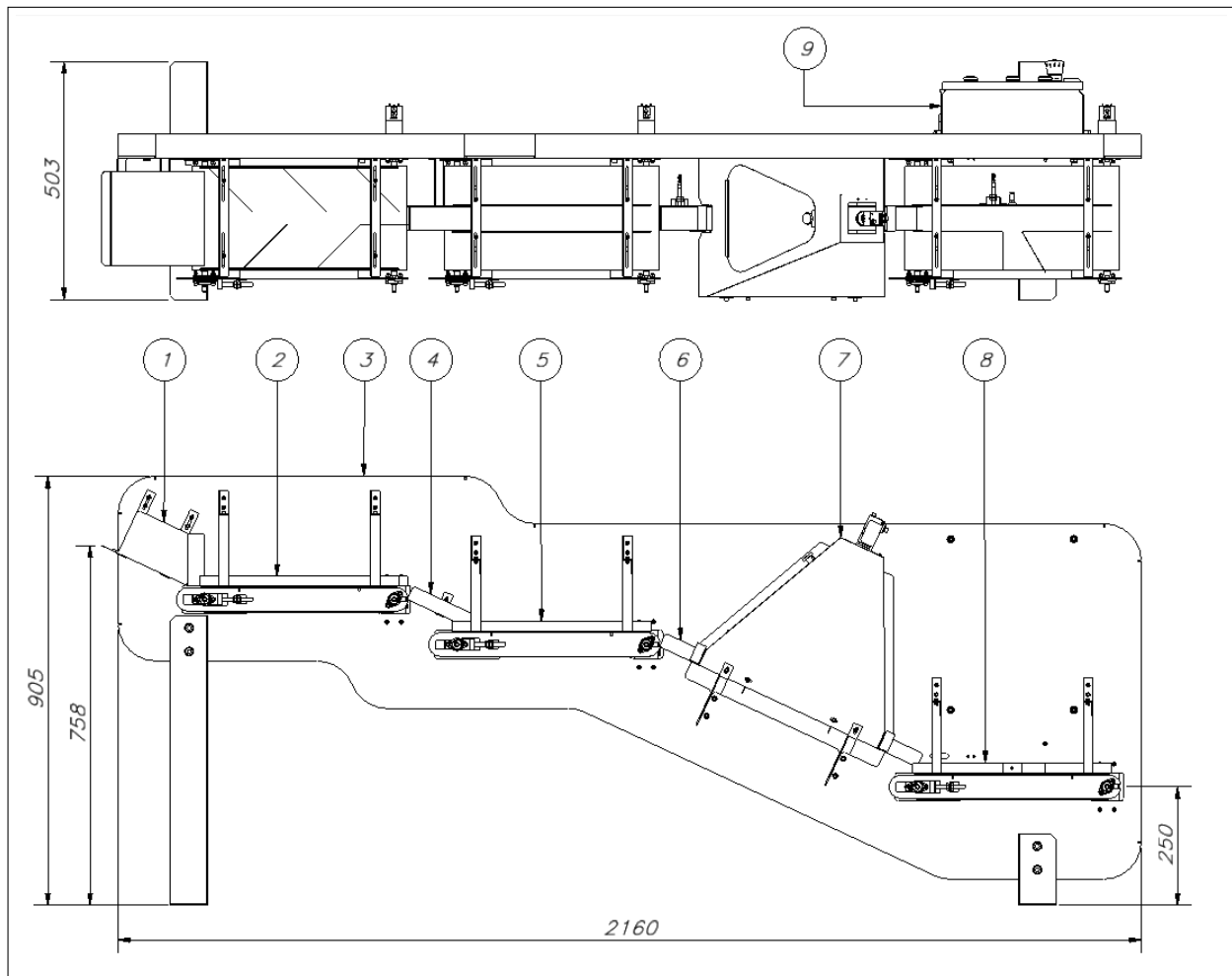


Figura 6.3: Esquema general del sistema. Fuente: Elaboración propia

6.2. Diseño mecánico

6.2.1. Rampa de alimentación

Según los requerimientos, el prototipo debe ser capaz de recibir 400 g de arándanos, sin almacenarlos, para iniciar el proceso de clasificación. Por practicidad, se elige dimensionar el sistema para recibir el contenido de un paquete (o *clamshell*) de 500 g a través de una rampa. No se optó por una tolva ya que podría generar aplastamiento entre los frutos. Entonces, conociendo que un *clamshell* comercial de la capacidad mencionada tiene: largo 186 mm, ancho 122 mm y alto 55 mm [66]; se fija el ancho de la rampa a 200 mm para alojar la máxima dimensión. En la Figura 6.4 se muestra la rampa diseñada, a ser fabricada en chapa de acero inoxidable de espesor 0.5 mm, y se recubre su interior con una lámina de silicona esponjosa de 3.2 mm para evitar daños a los frutos.

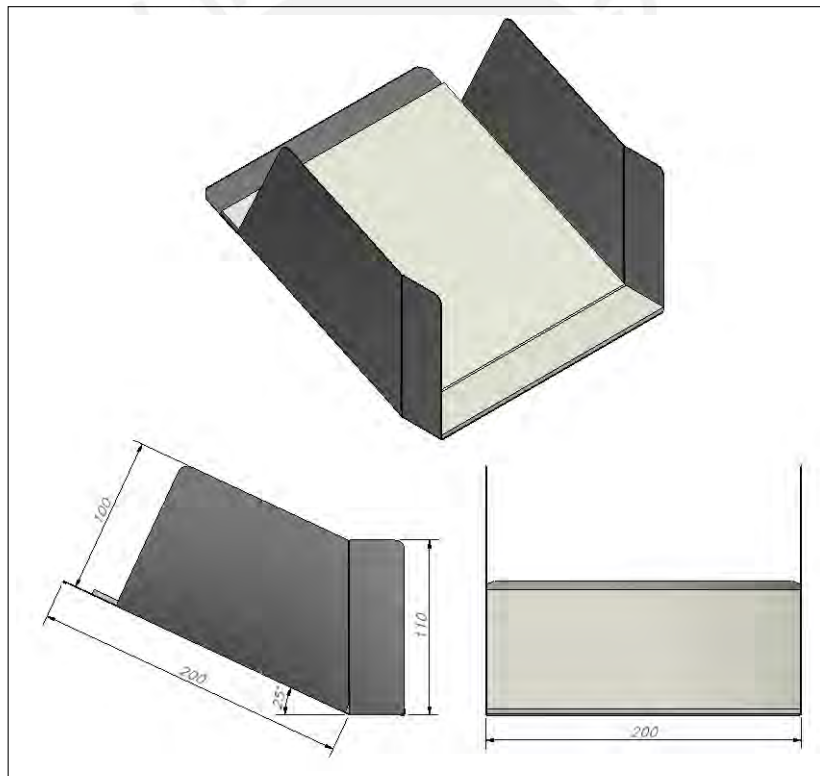


Figura 6.4: Rampa de alimentación. Fuente: Elaboración propia

6.2.2. Fajas transportadoras

Por practicidad, se diseña una sola faja modular, que será replicada para todas las etapas de clasificación.

Dimensionamiento de la faja

Conociéndose que el ancho de la rampa de alimentación es de 200 mm, la faja deberá tener un ancho mínimo del mismo valor. Como se muestra en el esquema de la Figura 6.5.

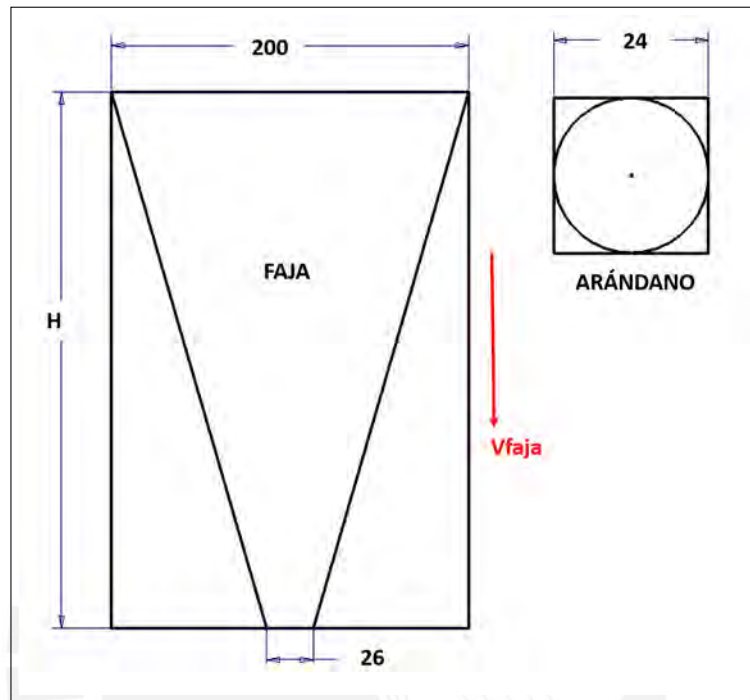


Figura 6.5: Esquema de faja transportadora. Fuente: Elaboración propia

La rampa deberá contar con guías para direccionar los arándanos y singularizarlos. Definiendo una abertura de 26 mm a la salida (el arándano más grande es de 24 mm), puede determinarse el largo mínimo (altura del trapezoides H) de la faja para albergar 500 g de arándanos grandes. Aproximando el peso de un arándano grande a 6 g, 500 g equivaldrían a 84 unidades, cada uno ocupando un área cuadrada de 576 mm^2 . Así, considerando que la faja debe ser capaz de albergar a todos los frutos, el área del trapezoides se define como:

$$\frac{200 + 26}{2} * H = 576 * 84,$$

y se halla H :

$$H = 428.18 \text{ mm.}$$

Entonces, se puede aproximar la longitud requerida para la faja a 400 mm, y el ancho de la misma a 220 mm para que no exista interferencia con la rampa de alimentación.

Selección de la faja

Tomando como referencia la guía de diseño de fajas transportadoras de la marca Mafdel [40] (ver Anexo E), se procede a pre-seleccionar una faja de grado alimentario DEL/FLEX White. Esta faja de poliuretano tiene las propiedades indicadas en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Propiedades de la faja DEL/FLEX White. Fuente: [40]

Características de la faja transportadora			
Material	Poliuretano	Tensión de operación	2 a 4 %
Color	Blanco	Temperatura	-20 - 70 °C
Dureza	93 ShA	Coef. fricción	HDPE 0.25 Acero 0.5 Inox. 0.6
Índice de tracción	10 daN/cm ² 1 % tensión		

Primero, se calcula Ft , la fuerza de tracción para transportar una carga M al 1 % de tensión. Dado que la carga es reducida, los rodillos se fabricarán en Nylon, por lo que se puede considerar un coeficiente de fricción $Cf = 0.25$. El largo de los rodillos será igual al ancho de la faja 220 mm, y el espesor elegido es de 1.5 mm. Con ello se halla la sección transversal de la faja y se calcula:

$$Ft = 10 * \frac{daN}{cm^2} * 1.5 * \frac{cm}{10} * 220 * \frac{cm}{10} = 33 \text{ daN},$$

obteniéndose la carga máxima como:

$$M_{max} = \frac{Ft}{Cf} = \frac{33}{0.25} = 132 \text{ kg}.$$

Entonces, se comprueba la capacidad de una faja similar a la Mafdel DEL/FLEX White de poliuretano, espesor 1.5 mm y peso 1.8 kg/m² para transportar 500 g de arándanos, empleando rodillos de nylon.

Rodillos

Los rodillos de nylon estarán sometidos a cargas despreciables, por lo que su diseño se basará en criterios geométricos. El diámetro mínimo de rodillo recomendado para la faja seleccionada anteriormente es de 20 mm. Con ayuda de software CAD, se diseñó los

rodillos en conjunto con el soporte de la faja, obteniéndose un diámetro de 50 mm y largo 220 mm. Adicionalmente, el fabricante recomienda un rebaje cónico de 0.5 mm al radio del rodillo, con el fin de mantener la faja centrada.

Por otro lado, los ejes fueron dimensionados para una fabricación simple, en acero inoxidable, y acoplarse a rodamientos de bajo costo. Entonces, se eligió un diámetro principal de 12 mm, con extremos de 8 mm para apoyarse en rodamientos KFL08, comunes en las máquinas CNC pequeñas. La transmisión de potencia se hará mediante zunchado, eligiendo una tolerancia de apriete recomendada por la bibliografía [36]. Además, se realiza un moleteado al eje para mejorar el factor de rozamiento con el interior del rodillo y se añade 2 anillos de seguridad para facilitar el ensamble.

Se muestra en la Figura 6.6 el detalle de un rodillo y eje:

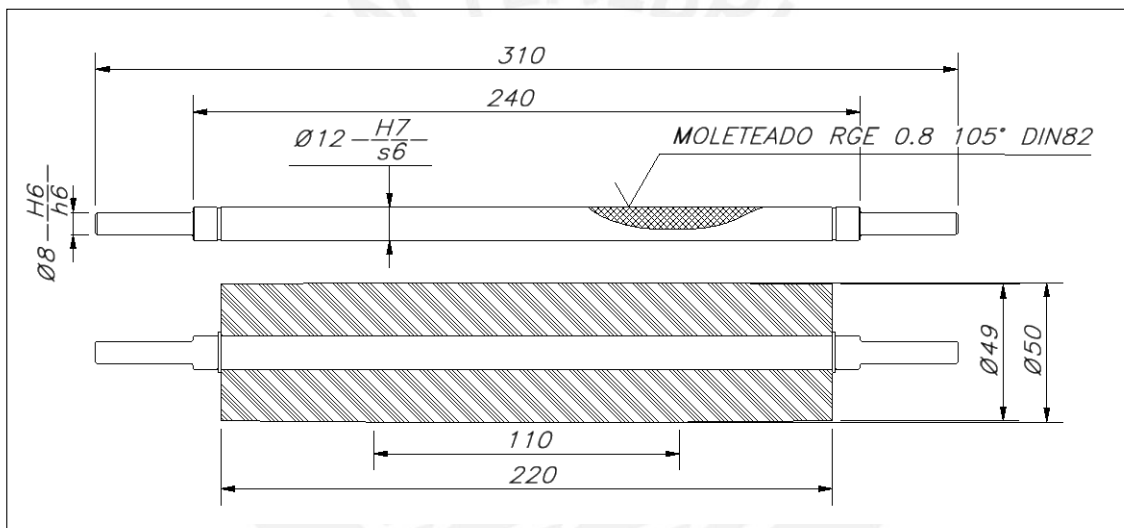


Figura 6.6: Rodillo y eje. Fuente: Elaboración propia

Soporte de la faja y mecanismo de tensión

El soporte de la faja se diseñó en chapa de acero inoxidable de 3 mm, para fabricación por corte láser y plegado. En el mismo soporte se incluyó un agujero para el deslizamiento del mecanismo de tensión, que aloja el rodamiento y se desplaza gracias a un espárrago de 8 mm y un juego de tuerca y contratuerca, como se muestra en la imagen Figura 6.7.

Finalmente, se presenta el diseño de la faja completamente ensamblada en la Figura 6.8.

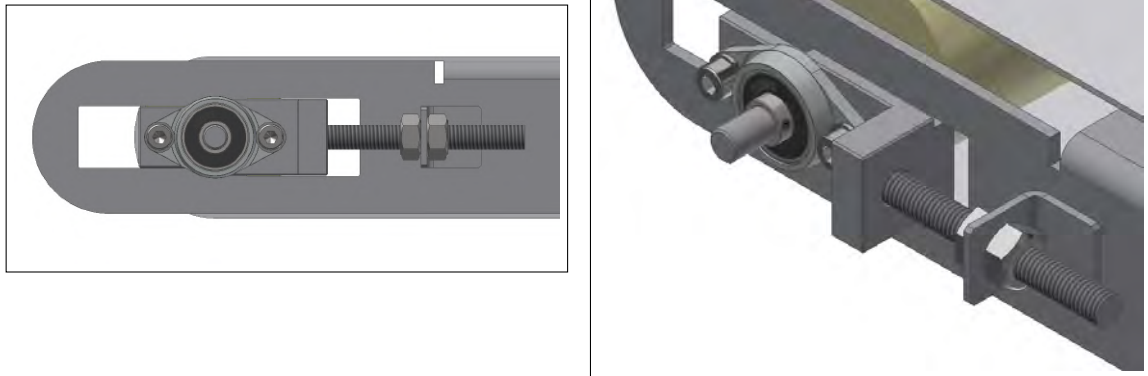


Figura 6.7: Detalle del mecanismo de tensión. Fuente: Elaboración propia

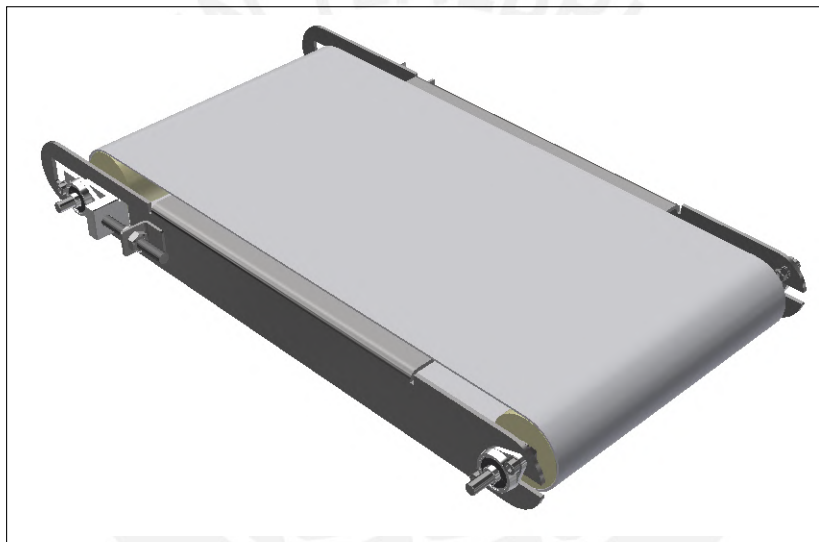


Figura 6.8: Ensamble de la faja. Fuente: Elaboración propia

Selección del motor

El motor deberá proporcionar el torque requerido por la faja. Además, deberá poder regularse su velocidad para alcanzar la velocidad deseada V de 70 mm/s. De esta manera, teniendo en cuenta el diámetro del rodillo $D_r = 50\text{mm}$, la velocidad del motor deberá ser de 26.7 rpm.

Se calcula el torque requerido para mover la faja como sigue:

$$M_T = \text{Masa de la carga} + \text{Masa de la faja},$$

$$\text{Masa de la carga} = 0.5 \text{ kg},$$

$$\text{Masa de la faja} = 1.8 * 0.4 * 0.22 * 2 = 0.3168 \text{ kg},$$

$$M_T = 0.8168 \text{ kg},$$

$$\text{Fricción entre faja y soporte} = \mu_f = 0.5,$$

$$\text{Diámetro de los rodillos} = D_r = 50 * 10^{-3} \text{ m},$$

$$\text{Longitud de los rodillos} = L_r = 220 * 10^{-3} \text{ m},$$

$$\text{Densidad de los rodillos} = \rho = 1100 \text{ kg/m}^3,$$

$$\text{Número de rodillos} = n = 2,$$

$$\text{Eficiencia de transmisión} = \eta_f = 80 \%,$$

$$\text{Velocidad requerida} = V = 70 \text{ mm/s},$$

$$\text{Tiempo de aceleración} = t_f = 2 \text{ s},$$

$$\text{Factor de seguridad} = FS = 2,$$

$$\text{Inercia de la carga} = J_m = M_T * \left(\frac{D_r}{2}\right)^2 = 5.105 * 10^{-4} \text{ kgm}^2,$$

$$\text{Inercia de los rodillos} = J_p = \frac{\pi}{32} * \rho * L_r * D_r^4 * n = 2.9698 * 10^{-4} \text{ kgm}^2,$$

$$\text{Inercia total} = J = J_m + J_p = 8.0748 * 10^{-4} \text{ kgm}^2,$$

$$\text{Torque de aceleración} = T_a = J * \frac{V}{9.55 * t_f} = 1.1304 * 10^{-3} \text{ Nm},$$

$$\text{Fuerza de fricción} = F = M_T * g * \mu_f = 4.002 \text{ N},$$

$$\text{Torque de carga} = T_L = \frac{F * D_r}{2 * \eta_f} = 0.1251 \text{ Nm},$$

$$\text{Torque requerido} = T = \frac{T_a + T_L}{FS} = 0.2524 \text{ Nm}.$$

Entonces, dado el torque reducido que se requiere (0.2524 Nm), y la necesidad de variar la velocidad de giro para las pruebas del prototipo, se elige un motor DC Pololu 131:1 37Dx57L de 12 VDC, 5A, 1.8 Nm y 80 rpm (ver especificaciones en Anexo F). El motor se montará a la estructura (ver plano E1) y se acoplará al eje motriz de la faja mediante un acople flexible, como se muestra en la Figura 6.9.

6.2.3. Rampa de conexión

Se plantea el empleo de dos fajas transportadoras en serie para la dosificación, teniendo la segunda el doble de velocidad que la primera. Así, dado que la geometría de las mismas no permite acercarlas lo suficiente para prevenir una caída que pueda comprometer la integridad del arándano, se diseñó una rampa corta (Figura 6.10) que conecte ambas fajas, manteniendo un ángulo de 25°. Se recubre también su interior con silicona esponjosa de 3.2 mm para proteger los frutos contra impactos.

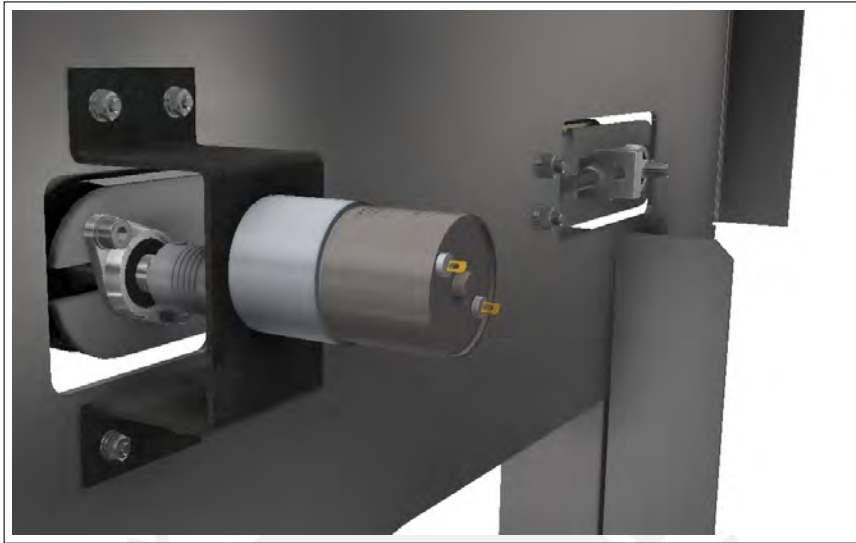


Figura 6.9: Montaje de motor DC. Fuente: Elaboración propia

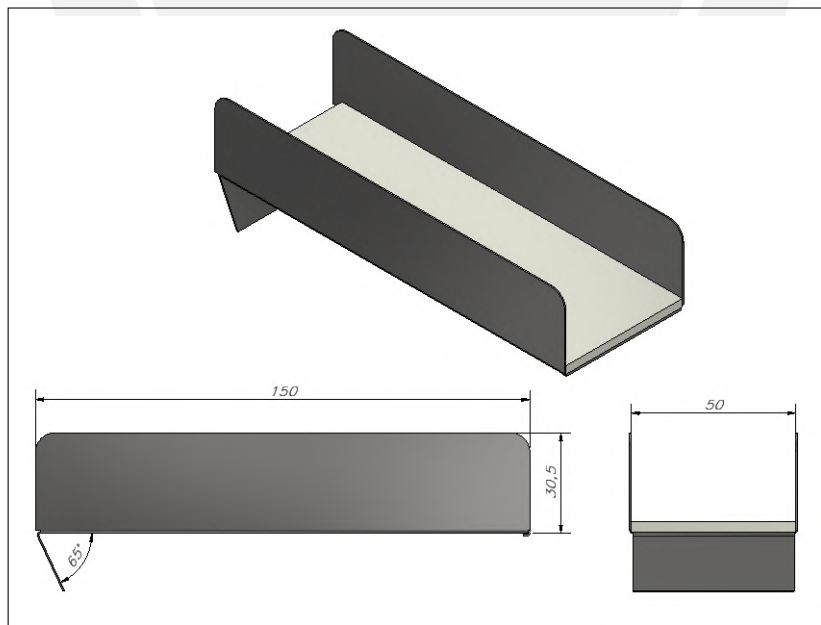


Figura 6.10: Rampa de conexión entre fajas. Fuente: Elaboración propia

6.2.4. Sistema de visión: Soporte y cubierta

Para el diseño de la cubierta de visión se han tomado en cuenta dos factores: El ángulo de visión de la cámara seleccionada (ver sección 6.3.2) y el direccionamiento de la iluminación. El esquema en la Figura 6.11 se empleó para determinar a qué altura R debía estar la cámara para poder capturar la longitud de $L = 265$ mm determinada para la rampa de visión. Sabiendo por datos del fabricante [24] (ver Anexo G) que el mayor ángulo de visión del lente es $38^\circ 47'$, la altura necesaria R se puede hallar como:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{L}{2 * R},$$

$$R = 370\text{mm}.$$

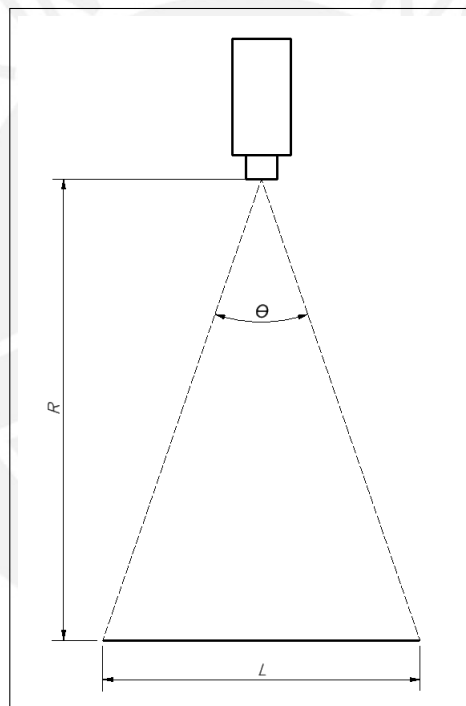


Figura 6.11: Esquema para determinación de altura de cubierta. Fuente: Elaboración propia

Conociendo esta altura, se plantea el diseño de la cubierta mostrado en el esquema de la Figura 6.12. La base superior es de 100 mm, de modo que pueda dar soporte a la cámara y permitir el ajuste manual del enfoque. Por otro lado, para hallar la longitud S que permita una adecuada iluminación del área visible por la cámara, se construyen los triángulos ABC y ACD, asumiendo que en el peor de los casos la luz estará limitada a un ángulo de 90° respecto a las caras de la cubierta. Entonces, se observa que ambos triángulos son congruentes. Sabiendo que $AB = 370$ y $BC = CD = 82.5$, puede hallarse el

ángulo $ACB = ACD = 77.43^\circ$, y por suplemento $DCE = 25.14^\circ$. Así, se halla $CE = 74.69$ mm y $DE = 35$ mm. Entonces, $S = 265 + 2 \cdot 74.685 = 414.37$ mm. El mismo procedimiento se sigue para hallar T , asumiendo que el ancho de la rampa será de máximo 100 mm.

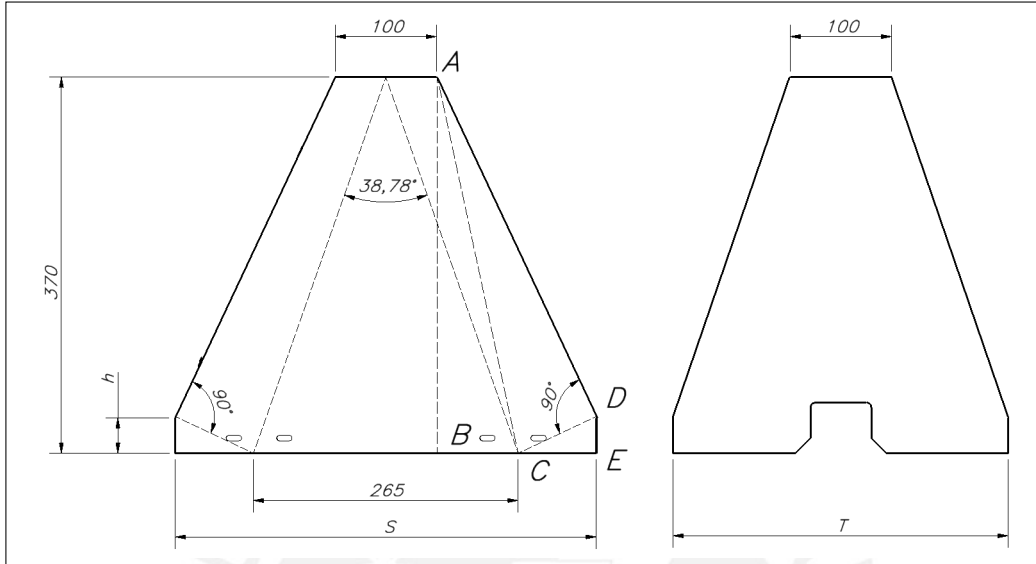


Figura 6.12: Diseño de la cubierta de visión. Fuente: Elaboración propia

El diseño de la cubierta queda definido como en la Figura 6.13, a ser fabricada en chapa de acero inoxidable de 0.5 mm, como dos partes soldadas. Se ha incluido además una puerta, de modo que se facilite el acceso a la luminaria interior.

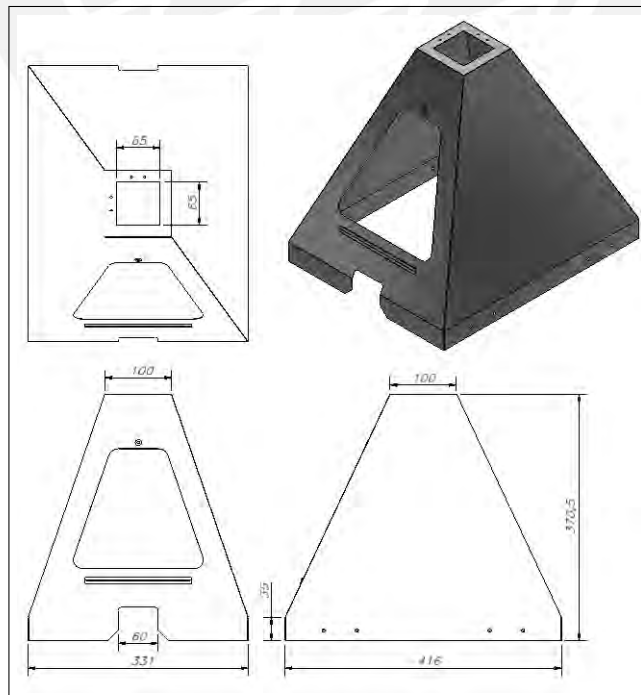
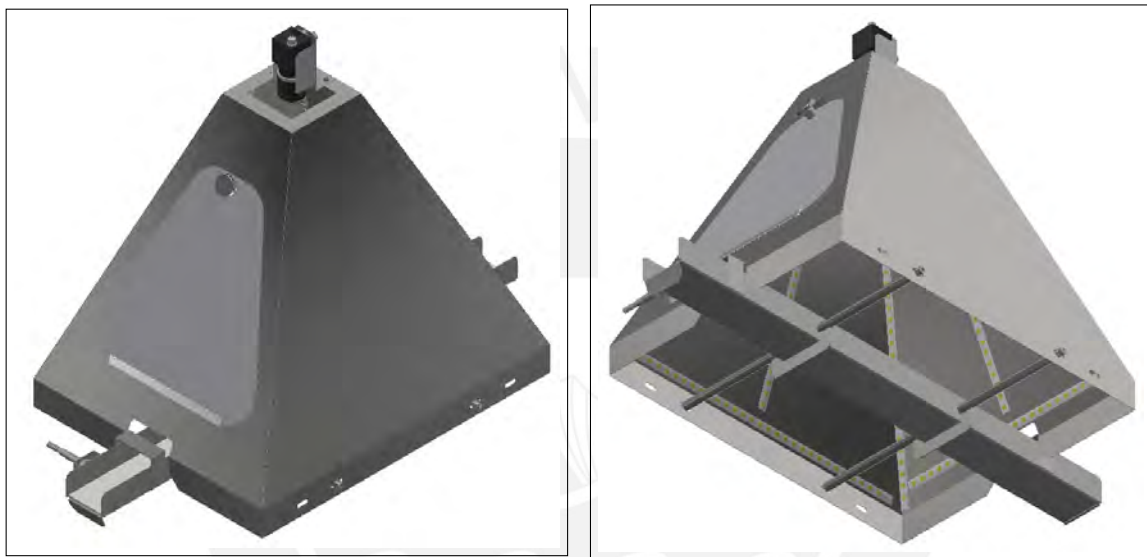


Figura 6.13: Cubierta para sistema de visión. Fuente: Elaboración propia

La rampa de visión tendrá un ancho de 50 mm y una longitud de 600 mm, acoplada además a un soporte para el sensor que indicará al sistema que la imagen de un arándano debe ser capturada. El ensamble completo del sistema de visión se muestra en la figura Figura 6.14: Nótese que la rampa se soldará a separadores con un agujero roscado al extremo opuesto, para ser sujetado a la cubierta de iluminación. Además, se recubre el interior de la rampa con una cubierta de silicona esponjosa blanca, de grado alimentario, espesor 3.2 mm y disponible en el mercado local, para evitar daño a los arándanos. Ello además incrementará la probabilidad de giro de los frutos para la captura de imágenes como se halló en las pruebas preliminares.



(a) Vista isométrica del ensamble de la cubierta

(b) Vista isométrica inferior del ensamble de la cubierta

Figura 6.14: Ensamble del sistema de visión. Fuente: Elaboración propia

6.2.5. Sistema de soplado

Fuerza requerida para expulsar un arándano

Es posible modelar el fruto como una esfera, que deberá ser empujada por un pulso de aire de velocidad V_a . Esta velocidad puede hallarse considerando que la fuerza que ejerce el aire sobre la esfera es la fuerza de arrastre F_{ar} definida como:

$$F_{ar} = 0.5 * C_D * \rho_a * A * V_a^2, \quad (7)$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre, ρ_a es la densidad del aire (1.225 kg/m^3), y A es el área proyectada de la esfera. Puede apreciarse que la fuerza de arrastre, requerida para vencer la fricción entre el arándano y la faja, es directamente proporcional al área del fruto. Es decir, se ejercerá menos fuerza sobre un fruto pequeño dada su superficie reducida. En contraste, la fricción será proporcional a la masa, siendo máxima para un arándano grande. Entonces, asumiendo el caso crítico ideal de un arándano pequeño ($D_a = 12 \text{ mm}$) con la masa de un arándano grande (7 g), $A = 1.131 * 10^{-4} \text{ m}^2$. Por otro lado, C_D se define como:

$$C_D = \left(\left(\frac{24}{Re} \right)^{0.52} + 0.32^{0.52} \right)^{\frac{1}{0.52}}, \quad (8)$$

donde Re es el número de Reynolds, descrito mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho_a * D_a}{\eta},$$

siendo $\eta = 1.8 * 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ la viscosidad del aire. Entonces, $Re = 816.7$, confirmando el régimen laminar del fluido. Reemplazando este valor en la ecuación 8 se obtiene $C_D = 0.521$. Finalmente, de la ecuación 7:

$$F_{ar} = 3.61 * 10^{-5} * V_a^2.$$

Considerando además que la fuerza mínima para mover el fruto debe ser igual a la fricción entre el mismo y la faja, asumiendo $\mu = 0.3$ como en el diseño preliminar:

$$F_{ar} = 7 * 10^{-3} * 9.81 * 0.3 = 0.021 \text{ N}.$$

Finalmente, la velocidad $V_a = 24.12 \text{ m/s}$. Este valor servirá para determinar el caudal

consumido por el sistema para la expulsión de los arándanos. Asumiendo un diámetro nominal de 2 mm para el racor de soplado, el caudal se hallaría como:

$$Q = 0.25 * V_a * \pi * 2^2 = 75.775 \text{ cm}^3/\text{s}.$$

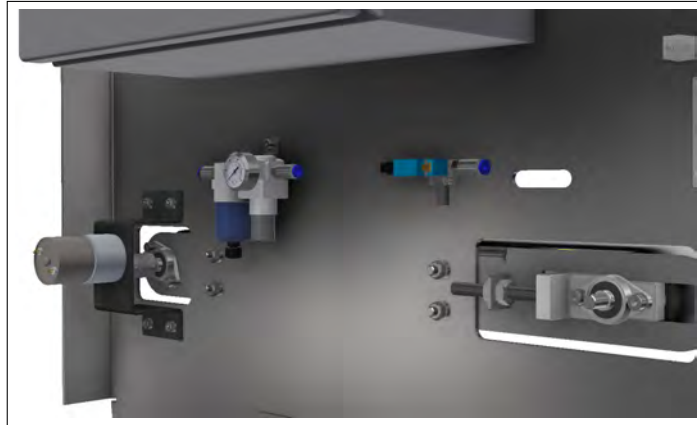
Selección de componentes neumáticos

Con el caudal estimado anteriormente, se selecciona una válvula 3/2 compacta de marca SMC modelo V 114T-5MNZ-M5 [62] (ver Anexo H) cuyas características se presentan en la Tabla 6.2.

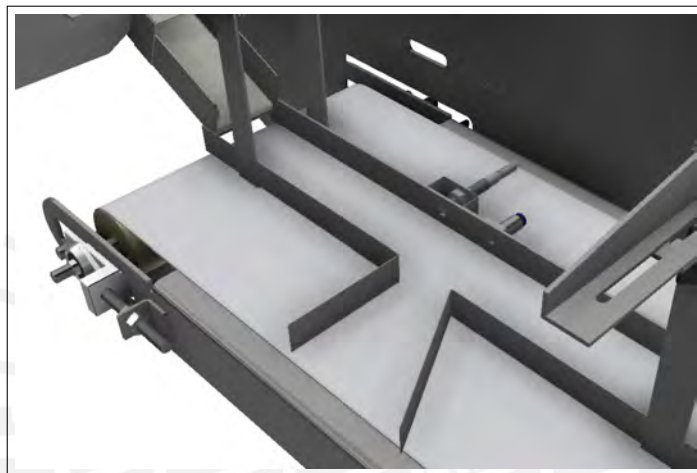
Tabla 6.2: Características de la válvula seleccionada. Fuente: [62]

Características de la electroválvula			
Tipo	Solenoides	Tiempo de accionamiento	ton <5 ms toff <4ms
Accionamiento	Directo	Frecuencia de conmutación	20 Hz
Caudal	8.4 l/min	Aceite	No
Presión de trabajo	0-7 bar	Tensión de operación	24 VDC
Conexiones	M5	Cuerpo	Inox

En conjunto con la válvula, se seleccionan los rácores sin aceite de acero inoxidable KPGH04-M5 [61] y escapes AN120-M5 [60]. El rácor seleccionado también se empleará para el soplado, por lo que se vuelve a calcular el caudal con el área indicada en el catálogo $A = 2 \text{ mm}^2$, determinándose $Q = 3 \text{ L/min}$. Finalmente, se selecciona un filtro-regulador (no se empleará lubricación) AC10B-M5G-A [59] (ver Anexo I). Todos los componentes tienen conexión de rosca M5, y conexión instantánea a tubo de 4 mm, trabajando a presión nominal de 7 bar. La Figura 6.15a muestra el filtro-regulador y la electroválvula montados en la parte posterior de la placa soporte, mientras la Figura 6.15b detalla el montaje del rácor de soplado en la faja de selección, junto al sensor de presencia cuya selección se describe en la sección . Finalmente, el diagrama neumático se aprecia en la Figura 6.16.



(a) Detalle de montaje de componentes neumáticos



(b) Detalle de montaje de rácor de soplado

Figura 6.15: Componentes neumáticos. Fuente: Elaboración propia

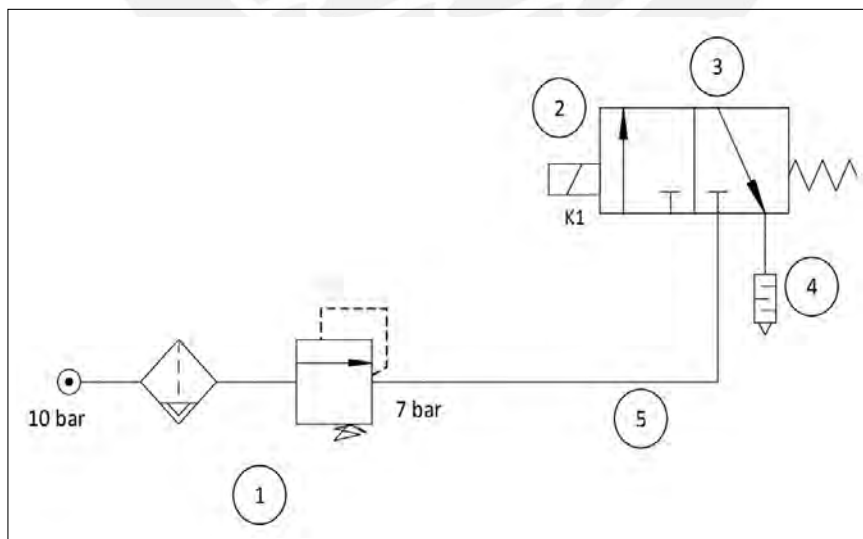


Figura 6.16: Diagrama neumático. Fuente: Elaboración propia

6.2.6. Estructura soporte

La estructura soporte ha sido diseñada para ser apoyada en el suelo o elevarse sobre una mesa (con una capacidad para 60 kg), y ser fabricada por corte láser y plegado, en una plancha de acero inoxidable de 3 mm. Este método de fabricación se eligió dada la rapidez que implica, al ser el diseño aún un prototipo; sin embargo, se optó por emplear acero inoxidable para realizar demostraciones a potenciales clientes. Las dimensiones generales de la estructura se muestran en la Figura 6.17.

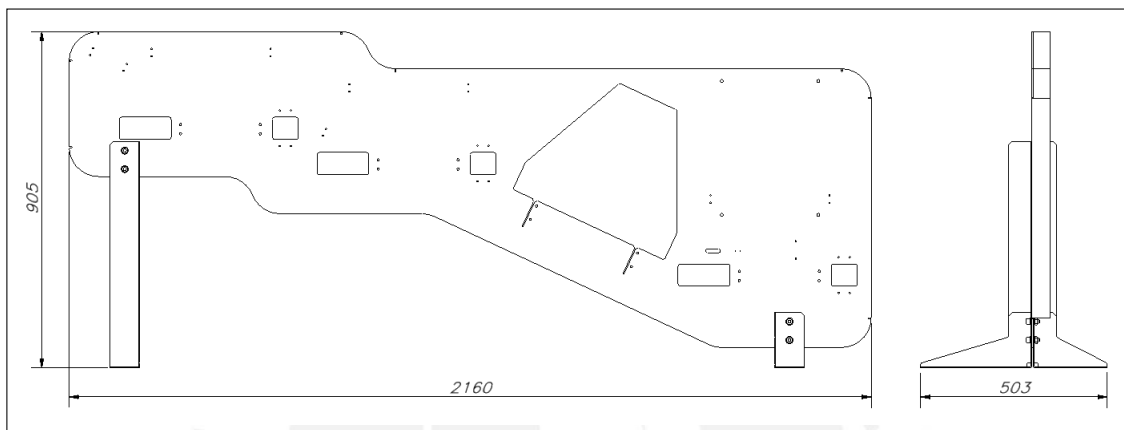
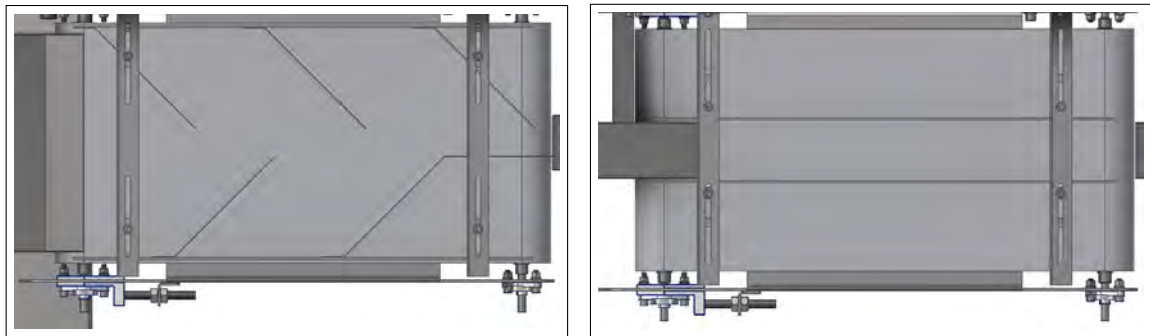


Figura 6.17: Estructura de soporte. Fuente: Elaboración propia

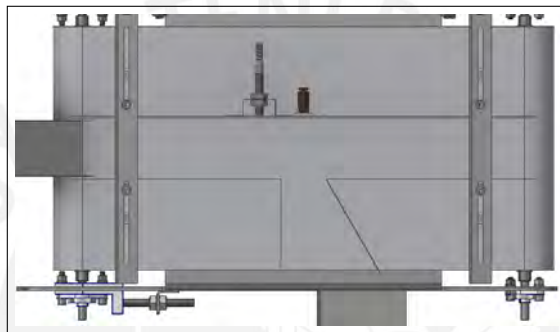
6.2.7. Guías de singularización y canalización

Cada faja cuenta con guías para direccionar los arándanos a lo largo del sistema. La primera faja (Figura 6.18a) cuenta con ángulos intercalados de 45° , buscando formar una sola fila de arándanos que pase por la abertura de 26 mm a la salida. Las guías de la segunda faja (Figura 6.18b) cuentan con un canal de 55 mm, que conduce los arándanos a la etapa de visión. Finalmente, la tercera faja (Figura 6.18c) cuenta con una guía incompleta, que permite al mecanismo de soplado expulsar el arándano fuera de la faja. Cabe resaltar que todas estas guías se encuentran soldadas a los colgadores que las sujetan a la estructura, de modo que ningún perno interfiera con la trayectoria de los arándanos. Además, se cuenta con agujeros chinos, que permiten modificar el ángulo de las guías en caso sea necesario.



(a) Guías de singularización

(b) Guías en faja 2



(c) Guías en faja 3

Figura 6.18: Ensamble de guías de direccionamiento en fajas. Fuente: Elaboración propia

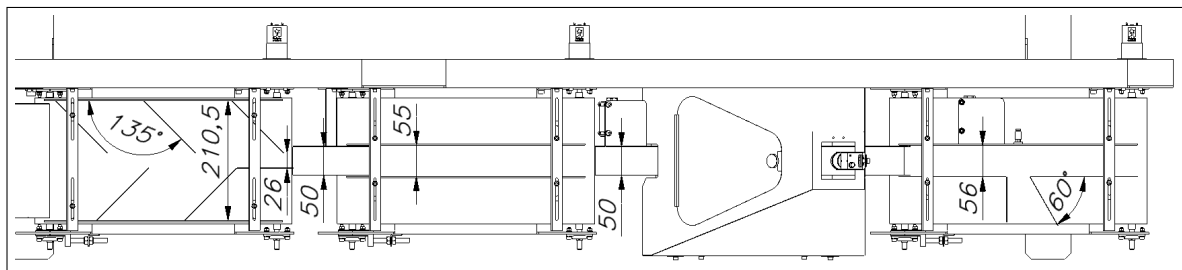


Figura 6.19: Dimensiones generales de guías. Fuente: Elaboración propia

6.3. Diseño electrónico y de control

6.3.1. Diagrama de bloques

La Figura 6.20 muestra el diagrama de bloques del sistema.

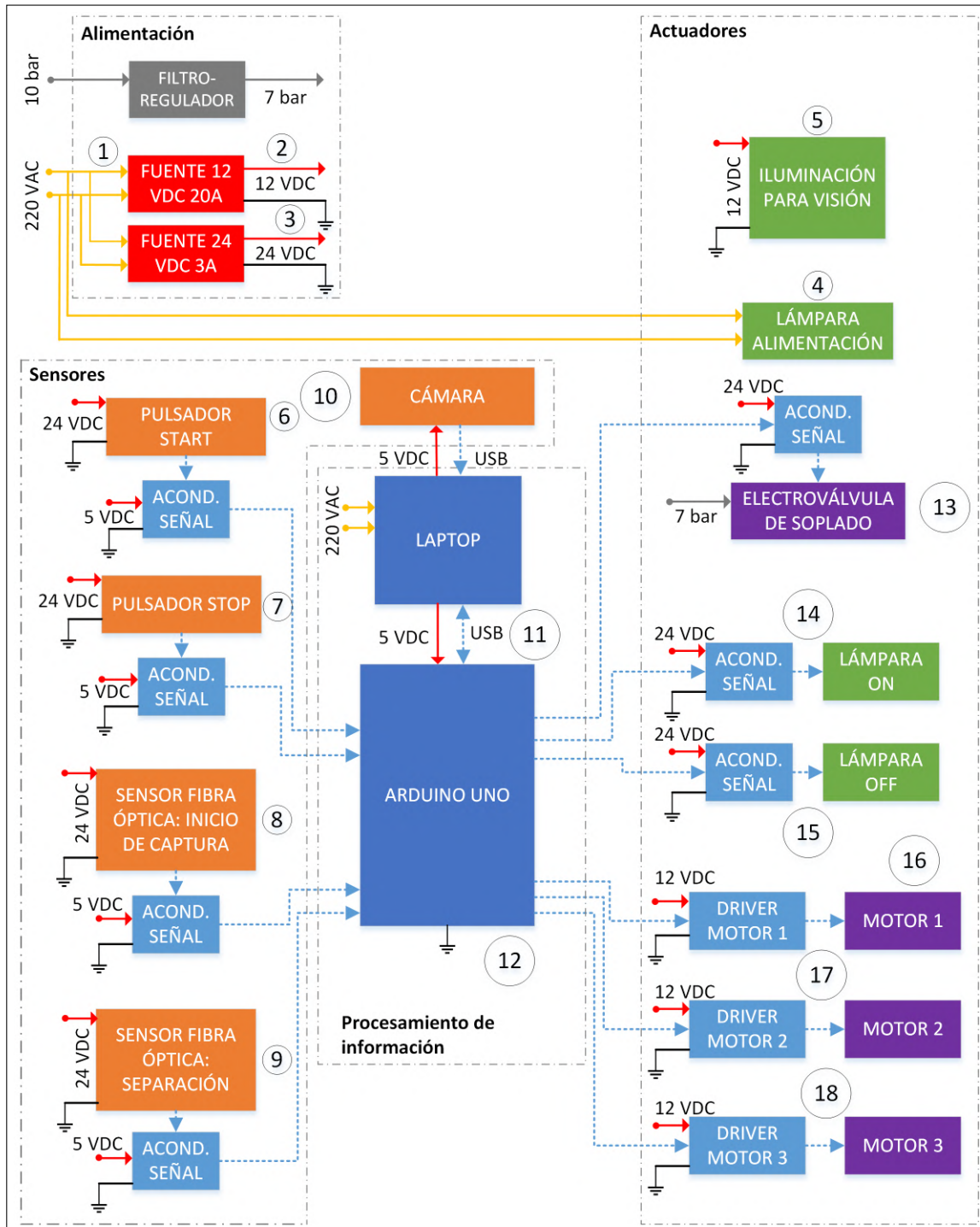


Figura 6.20: Diagrama de bloques del sistema. Fuente: Elaboración propia

Una llave termomagnética (no incluida en el diagrama, ver plano DE2), alimentará al sistema con corriente alterna de 220 VAC 60 Hz (1). Se contará además con una parada de emergencia en serie con la alimentación principal, y una lámpara que indique que el sistema está alimentado (4). Una fuente switching de 12 VDC 20 A (2) se encargará de alimentar a los motores de las fajas (16,17,18) y la luminaria para el sistema de visión por computadora (5). Por otro lado, una fuente de 24 VDC 3A alimentará los pulsadores (6,7), sensores (8,9), electroválvula (13) y lámparas de estado (14,15).

Todos los sensores y actuadores serán controlados por un Arduino UNO (12), conectado a través de una interfaz USB a una laptop (11) encargada de la captura de imágenes con la cámara (10) y el procesamiento de las mismas. Tanto la cámara como el Arduino obtienen alimentación 5VDC de la laptop, y todas las señales de voltaje mayor a 5 VDC deberán contar con circuitos de acondicionamiento para trabajar con el Arduino.

Dada la carga reducida que transportarán las fajas, siendo el sistema un prototipo, no se ejecutará ningún lazo de control para la velocidad de los motores. Estos serán controlados en lazo abierto mediante señal PWM a través de sus respectivos drivers.

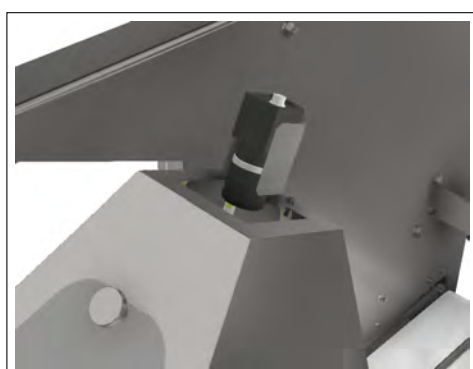
6.3.2. Selección de sensores

Selección de cámara

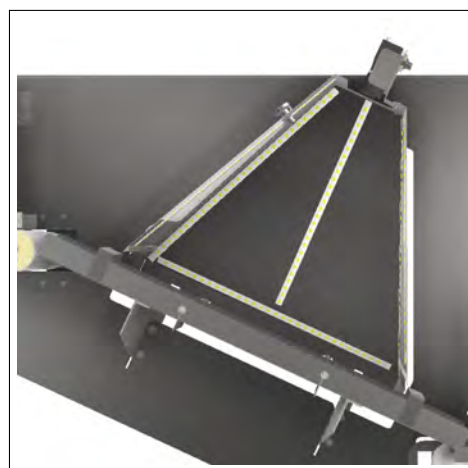
La cámara será la misma seleccionada en el diseño preliminar: una cámara industrial modelo FLIR BFS-U3-51S5C-C con un lente FUJI HF12.5HA-1B, ya que se comprobó que cumple con los requerimientos establecidos: contar una resolución mínima de 10 px/mm (ver sección 5.1.1) y un tiempo de obturación menor a $44.35 \mu s$ (ver sección 5.3.3). El lente tiene ajuste de enfoque manual, por lo que el soporte diseñado cuenta con un agujero lo suficientemente grande para permitir un ajuste cómodo. La Figura 6.21 muestra la cámara montada sobre la cubierta de visión.

Selección de sensores fotoeléctricos

Se necesita un sensor de presencia capaz de diferenciar dos arándanos consecutivos. Dado el pequeño calibre de los frutos, el espacio reducido de trabajo tanto en la rampa de ingreso a la etapa de visión como en la faja de selección, y asumiendo que el sensor se montará en dirección perpendicular al paso de los arándanos; puede establecerse que este debe cumplir con tener un alcance menor a 50 mm (ver ancho la rampa en la Figura 6.19) para evitar falsos positivos con la pared de la misma, así como un alcance mínimo de 38 mm para detectar un arándano pequeño (12 mm de calibre) en el extremo opuesto a



(a) Montaje de la cámara en cubierta de visión



(b) Orientación de la cámara

Figura 6.21: Detalle de montaje de cámara. Fuente: Elaboración propia

la ubicación del sensor.

Además, el sensor no debe ser de naturaleza difusa (para diferenciar dos arándanos consecutivos), contar con capacidad de ajuste del rango de detección y con un tiempo de respuesta inferior a 171 ms, el cual corresponde al tiempo que le tomaría a un arándano pequeño recorrer una distancia equivalente a su diámetro a 70 mm/s (velocidad de las fajas).

Los sensores fotoeléctricos que cumplen estos requerimientos son los de fibra óptica. Se ha encontrado opciones en 3 marcas presentes en Perú: Schneider (francesa), Pepperl+Fuchs (alemana) y Sick (americana). En la Tabla 6.3 se compara 3 modelos, uno de cada marca, con características similares.

Tabla 6.3: Comparación de sensores. Fuente: Elaboración propia

Modelo de sensor	MLV41-LL-IR-IO	XUDA2PSMM8	WLL260-E240
Marca	Pepperl+Fuchs	Schneider	Sick
Tipo de sensor	Fotoeléctrico / Fibra óptica	Fotoeléctrico / Fibra óptica	Fotoeléctrico / Fibra óptica
Rango de detección	0-160 mm	0-70 mm	0-65 mm
Tiempo de respuesta	0,5 ms	0,1 ms	0,7 ms
Frecuencia de conmutación	1000 Hz	1000 Hz	700 Hz
Rango de precio	2550 soles	1480 soles	700 soles

Dado que los requerimientos del prototipo se cumplirían con los 3 sensores propuestos,

se selecciona por su menor costo el sensor SICK WLL260-E240, disponible además en el mercado local. Se detallan en la Tabla 6.4 sus principales características.

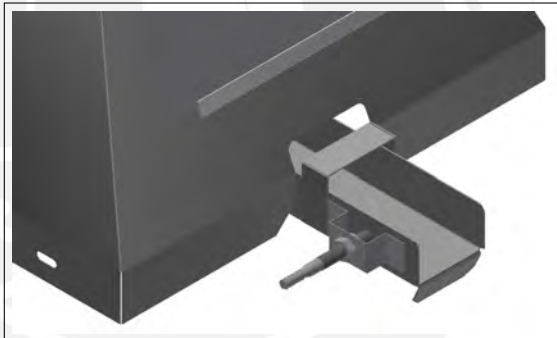
Tabla 6.4: Características del sensor seleccionado. Fuente: [57]

Características del sensor fotoeléctrico			
Tipo	Fotoeléctrico de fibra óptica	Tipo de salida	NPN
Rango de detección	0 - 50 mm	Modo de salida	Seleccionable (Light/Dark)
Fuente de luz	LED roja visible	Tiempo de respuesta	≤ 0.7 ms
Ajuste	Potenciómetro, 270°	Frecuencia de conmutación	700 Hz
Voltaje de operación	10 VDC - 30 VDC	Protección	IP66

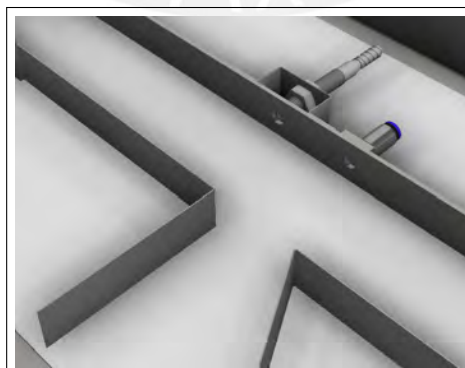
El transmisor del sensor WLL260-E240 se encontrará dentro del tablero de control, y contará con un cabezal de fibra óptica LBST32900 (sugerido por el proveedor), que irá montado al ingreso de la etapa de visión y en la de la banda de clasificación como se muestra en la Figura 6.22.



(a) Sensor SICK WLL260-E240



(b) Cabezal de fibra óptica montado a la entrada de la etapa de visión



(c) Cabezal de fibra óptica montado en la faja de selección

Figura 6.22: Sensor empleado y montaje. Fuente: [57]

6.3.3. Selección de componentes eléctricos y electrónicos

Alimentación, pulsadores y lámparas

Dado que el sistema es un prototipo, se seleccionarán componentes de la marca Steck [63], disponibles en el mercado local a precios reducidos. La Tabla 6.5 resume las características de los componentes seleccionados.

Tabla 6.5: Componentes eléctricos del sistema. Fuente: Elaboración propia

Componentes eléctricos seleccionados		
Componente	Código de fabricante	Características
Llave termomagnética	SDA62C32	2 polos 230 VAC, 32 A, 10 kA
Parada de emergencia	S-LMFN1R4+S-LPL41	NC, Tipo Hongo, Rojo
Lámpara de alimentación	SLDS2202	220 VAC, LED Verde
Pulsador ON	S-LMRN2+S-LPL42	230 VAC, 1 NA, Verde
Pulsador OFF	S-LMRN1+S-LPL41	230 VAC, 1 NC, Rojo
Lámpara ON	SLDS242	24 VDC, Verde
Lámpara OFF	SLDS241	24 VDC, Rojo

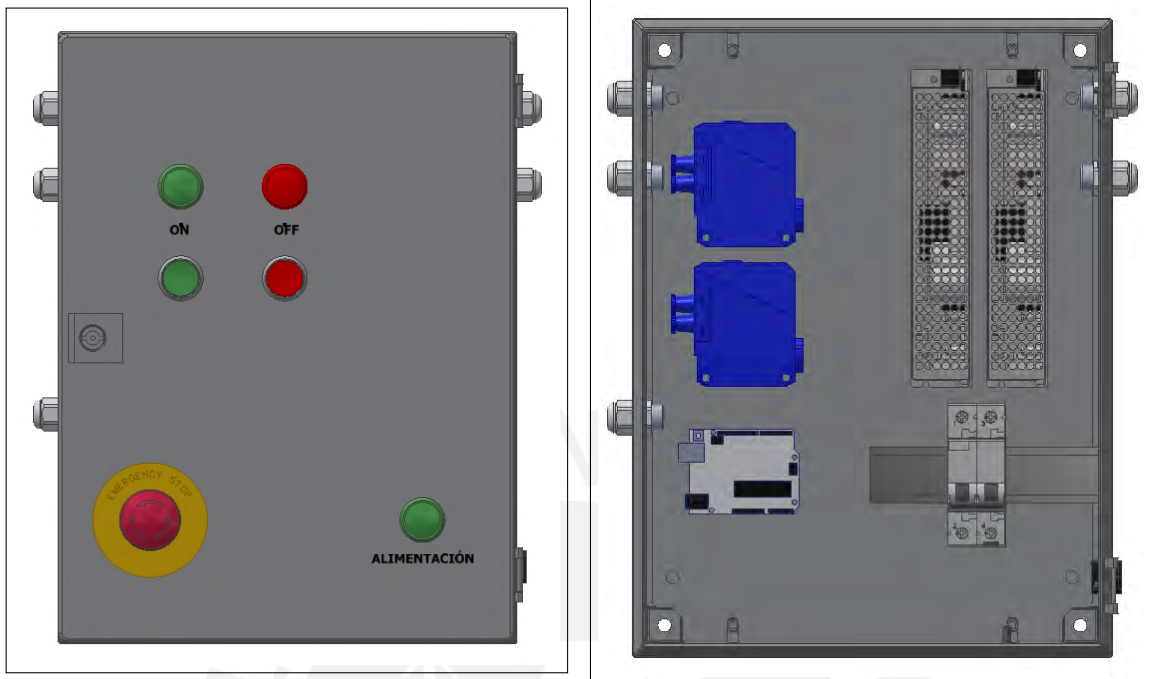
Por otro lado, tomando en cuenta que cada sensor fotoeléctrico no consume más de 35 mA [57], y que el consumo de la electroválvula de soplado se encuentra por debajo de 15 mA [62], se selecciona una fuente switching genérica de 24 VDC y 5 A. En contraste, la fuente de 12 VDC que alimenta los motores y la iluminación del sistema de visión, deberá ser de 20 A, considerando que la corriente máxima de cada motor es de 5 A (trabajando, sin embargo, por debajo del torque nominal) y que las tiras LED blancas consumen 1.2 A por metro [1].

La Figura 6.23 muestra una distribución sugerida para los principales componentes del sistema eléctrico/electrónico, incluyendo la interfaz de usuario, fuentes de alimentación, sensores y controladores; dentro de un tablero comercial de 300x400x155 mm.

Iluminación del sistema de visión

De acuerdo a las pruebas de diseño preliminar, las tiras LED blancas deben estar dispuestas como se muestra en la Figura 6.24. Para mejor distribución de la luz, es recomendable cubrir las tiras con dos capas de papel traslúcido (papel mantequilla).

La longitud total de las tiras a emplear es de 4.2 m. Con un consumo máximo de 1.2 A por metro, se obtiene un consumo estimado de 5 A, confirmando la elección de la fuente de 12 VDC y 20 A para la iluminación y los motores.



(a) Interfaz de usuario

(b) Distribución sugerida de componentes

Figura 6.23: Distribución sugerida para el tablero. Fuente: Elaboración propia

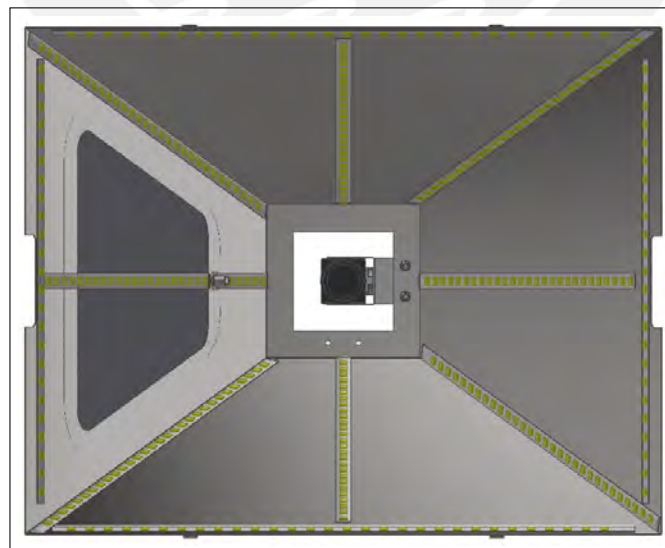


Figura 6.24: Iluminación para visión. Fuente: Elaboración propia

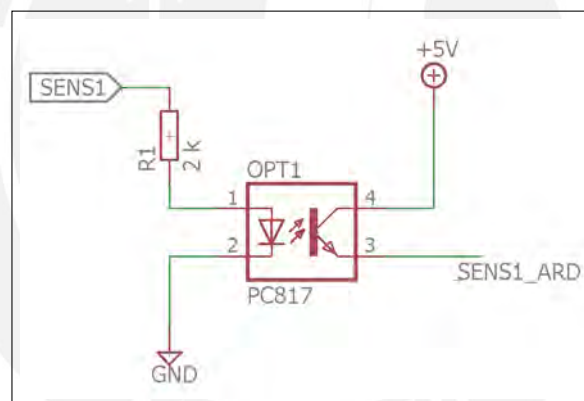
Circuitos de acondicionamiento de señales

Los sensores, pulsadores, lámparas y electroválvula seleccionados trabajan a 24 VDC. Sin embargo, el Arduino UNO trabaja con señales de nivel lógico a 5 VDC. Por ello, es necesario acondicionar estas señales para evitar daños al microcontrolador.

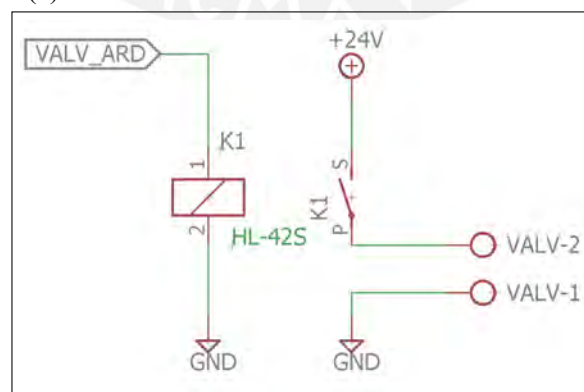
Para los sensores, se selecciona un optoacoplador de propósito general PC817. Según el fabricante, opera a valores típicos de 1.2V y 20 mA [18] (ver Anexo J), por lo que es necesario colocar una resistencia en serie con el ánodo si se emplea una señal de 24 VDC a la entrada. Con estos valores, la resistencia se halla como:

$$R = \frac{24 - 1.2}{0.02} = 1.14 \text{ k}\Omega.$$

Se elige entonces una resistencia de 2 k Ω . Por otro lado, las lámparas y electroválvula se activarán a través de un módulo de relés HL-54S, que se activa a nivel lógico. El esquemático de ambos circuitos se muestra en la Figura 6.25.



(a) Acondicionamiento de señales de sensores



(b) Acondicionamiento de señales de válvula y lámparas

Figura 6.25: Circuitos de acondicionamiento de señales. Fuente: Elaboración propia

Circuitos para control de motores

Los motores de 12 VDC y 5 A seleccionados deberán girar en un solo sentido y su velocidad deberá poder ser variada para el funcionamiento del prototipo. Existen controladores comerciales para este fin, pero para motores de corriente reducida. En este caso, se opta por diseñar el circuito mostrado en la Figura 6.26: La señal PWM activa un transistor IRLZ44 [69] (o IRL520 [68], ver Anexo K) que opera a nivel lógico (5V) y puede soportar corrientes drenador-surtidor de hasta 30 A (6 A en el caso del IRL520) a 60 VDC. Se agrega una resistencia de 1 k Ω en la compuerta para limitar la corriente entregada por el Arduino, y una resistencia pull-down de 10 k Ω .

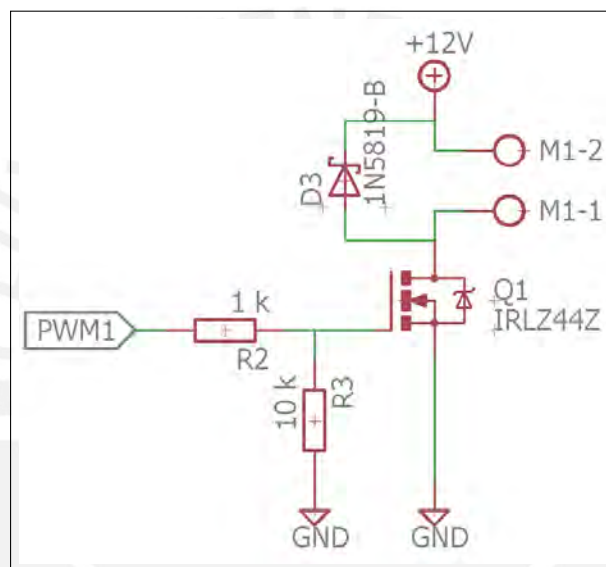


Figura 6.26: Driver para motor DC. Fuente: Elaboración propia

6.3.4. Diagramas de flujo y operaciones del sistema

La operación general del sistema se describe en la Figuras 6.27 y 6.28. La primera detalla la lógica propuesta para el programa de funcionamiento del prototipo, mientras que la segunda presenta un diagrama de operación para el usuario. La laptop se encarga de la captura y procesamiento de las imágenes, mientras el microcontrolador Arduino UNO genera las señales de activación de motores, lámparas y la electroválvula de soplado. Puede describirse el proceso como sigue:

1. Al alimentarse el sistema, la laptop y el arduino iniciarán una prueba de comunicación por la interfaz serial. La lámpara que indica que el sistema está apagado se encuentra encendida.
2. Si se presiona el pulsador de encendido, se apaga la lámpara OFF y se activa la lámpara ON, para luego generar la señal PWM que regula la velocidad de los motores de las fajas.
3. El usuario debe ingresar los arándanos por la rampa de alimentación. Cuando el primer arándano ingrese a la rampa de visión, el sensor 1 en la rampa indicará a la laptop que debe iniciar la captura de imágenes.
4. La imagen capturada será procesada, calificando al fruto como bueno o malo según el criterio de selección.
5. Este resultado será enviado por la interfaz serial y almacenado en un registro del Arduino. Así, cada posición en el registro corresponderá al arándano que acaba de ser procesado en la etapa de visión.
6. Si se detecta un arándano en la faja de separación con el sensor 2, el registro será leído. Si el fruto ha sido calificado como malo, o si se ha detectado un error en el registro, la válvula de soplado se activa. En caso contrario, no se ejecuta acción alguna y se repite el proceso.
7. Si se activa el pulsador de apagado, el sistema se detendrá.

El criterio de selección mencionado dependerá de dos factores: El calibre del fruto y los defectos asociados al color. El algoritmo para la determinación del calibre del fruto ya fue determinado en la etapa de diseño preliminar. Aquellos arándanos con un calibre menor al establecido por el usuario (12 mm, por defecto) deberán ser descartados. Por otro lado, debe definirse un criterio de selección con base en el color, para lo cual se desarrollaron las pruebas de la sección 7.

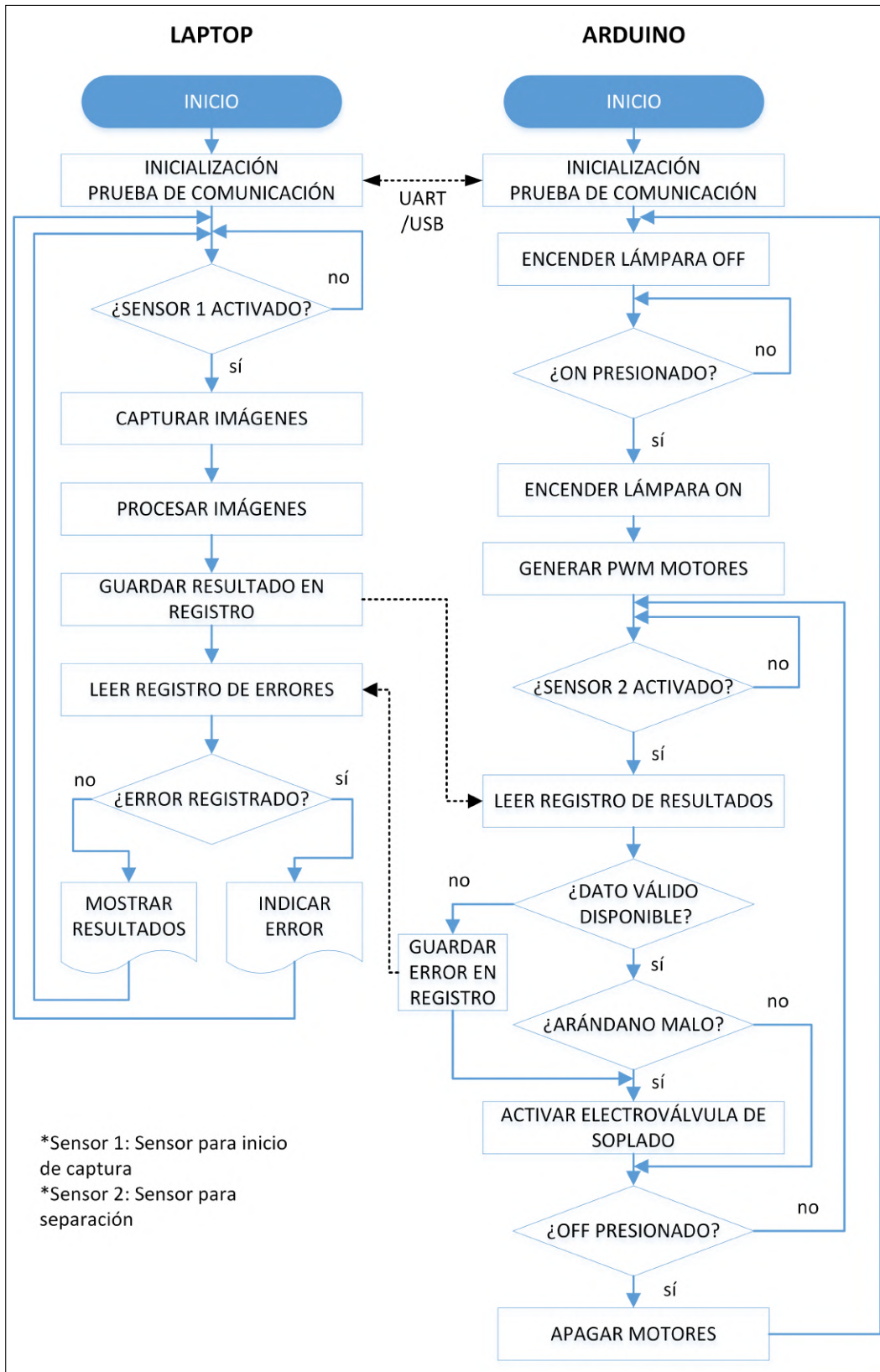


Figura 6.27: Diagrama de flujo general del sistema. Fuente: Elaboración propia

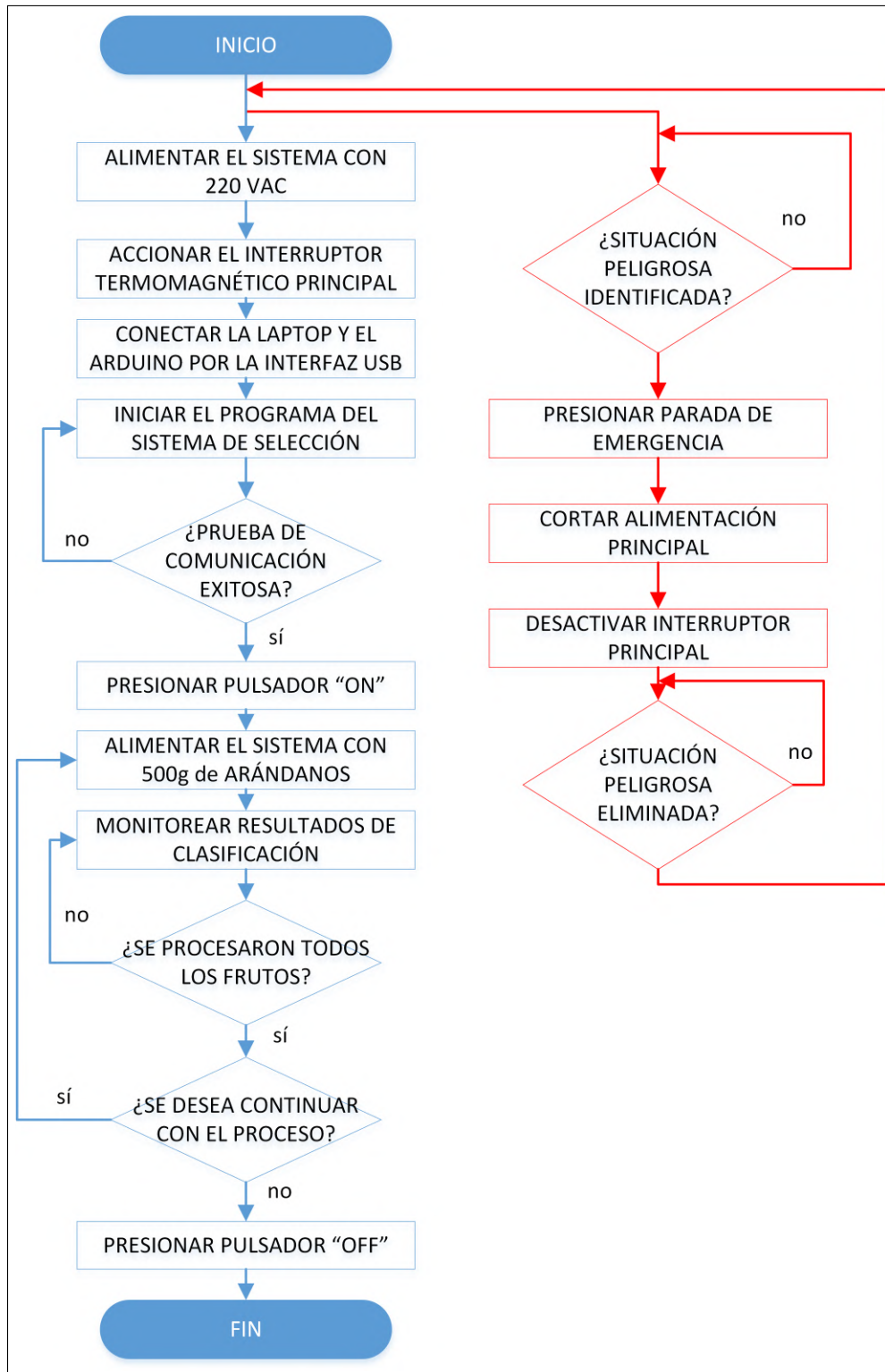


Figura 6.28: Diagrama de operaciones general del sistema. Fuente: Elaboración propia

6.4. Lista de planos

El detalle de diseño mecánico, eléctrico y electrónico del sistema puede encontrarse en los planos anexados a este documento.

Tabla 6.6: Planos eléctricos y electrónicos. Fuente: Elaboración propia

Planos eléctricos/ electrónicos			
Documento	Código	Número	Tamaño
Diagrama electrónico	DE	1	A3
Diagrama eléctrico	DE	2	A3
Distribución de tablero	DE	3	A3

Tabla 6.7: Planos mecánicos. Fuente: Elaboración propia

Planos mecánicos			
Documento	Código	Número	Tamaño
Ensamble total	E	1	A0
Faja transportadora	SE	1	A1
Cubierta de visión	SE	2	A1
Sistema de soplado	SE	3	A3
Placa soporte	P	1	A0
Rampa de alimentación	P	2	A2
Rampa de conexión	P	3	A3
Guía de singularización izquierda	P	4	A3
Guía de singularización derecha	P	5	A3
Colgador para guías	P	6	A3
Guía recta	P	7	A3
Guía de soplado	P	8	A3
Guía de separado recta	P	9	A3
Guía de separado angular	P	10	A3
Soporte de cubierta de visión	P	11	A4
Soporte de motor	P	12	A3
Pata delantera 1	P	13	A3
Pata trasera 1	P	14	A3
Pata delantera 2	P	15	A3
Pata trasera 2	P	16	A3
Soporte de faja	P	17	A2
Soporte tensador	P	18	A4
Esparrago	P	19	A4
Rodillo	P	20	A3
Eje de rodillo	P	21	A3
Carcasa soporte	P	22	A2
Rampa de visión	P	23	A2
Tapa de carcasa	P	24	A3
Sujeción de cámara	P	25	A3
Separador para cámara	P	26	A4
Diagrama neumático	DN	1	A3

7. Pruebas de visión por computadora y determinación del criterio de selección asociado al color

7.1. Desarrollo del programa de prueba

Con la cubierta prototipo diseñada en la etapa preliminar, se capturó la imagen de los 100 arándanos seleccionados y calificados como buenos, con el objetivo de identificar características comunes entre los mismos que sirvan para establecer un criterio de selección asociado al color. Se hizo lo mismo con muestras más pequeñas de arándanos sin bloom, rojos, con hongos, con tallo y con russet.

Para el procesamiento de las imágenes, se desarrolló un algoritmo en Matlab cuyo diagrama de flujo general se muestra en la Figura 7.1 (ver Anexo M). Primero, se debe segmentar la región correspondiente al arándano para reducir el tiempo de procesamiento, (la imagen completa es de 2448x2048 pixeles). Para ello, se emplea la misma secuencia de segmentación que en las pruebas preliminares; sin embargo, esta vez es necesario trabajar con la imagen completa al interior de la región delimitada, por lo que se usa esta como máscara para separar el arándano a color del fondo (ver Figura 7.2). Conociendo las dimensiones de la región, se procede a recortar la imagen hasta una distancia de 20 pixeles de los bordes de la misma para, finalmente, convertir el contenido de esta región de interés originalmente en formato RGB al espacio de colores HSV.



Figura 7.1: Diagrama de programa para procesamiento de imágenes. Fuente: Elaboración propia

Se empleó el espacio de colores HSV, dada su amplia aceptación para procesamiento de imágenes a color y representación intuitiva. Esta identifica a un color según valores independientes en 3 capas: Matiz (Hue, H), Saturación (Saturation, S) y Valor (Value, V). El matiz define el tono del color, con un valor angular de 0° a 360° , o 0 a 1 en escala normalizada como se muestra en la Figura 7.3. Adicionalmente, la saturación define la pureza del color (cuán mezclado con blanco se encuentra); y el valor, define si el color es oscuro o claro.

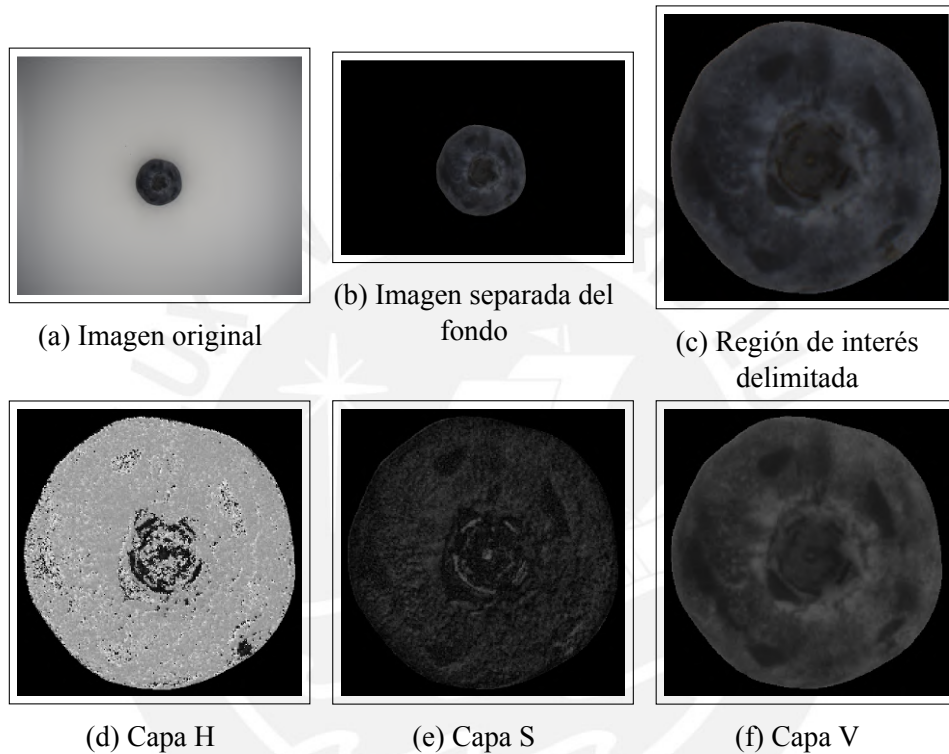


Figura 7.2: Pasos principales para procesamiento de imagen a color. Fuente: Elaboración propia

En cada una de estas capas, cada pixel tiene un valor asignado. Se analizó estos valores para cada arándano seleccionado, extrayendo la media, moda y desviación estándar, con el fin de comparar los resultados y definir un posible criterio de selección. Ello se hizo en dos etapas: Primero, tomando las variables estadísticas del conjunto total de pixeles del arándano (“análisis de superficie total”), con el fin de identificar qué capa o combinación de estas contiene información relevante para diferenciar un arándano bueno de uno defectuoso; y comprobar si las medidas estadísticas elegidas son efectivas para el mismo propósito.

Luego, se analizó los valores de cada capa para segmentos de 40×40 pixeles (“análisis de superficie por segmentos”), de modo que pueda apreciarse la influencia de defectos más pequeños cuyo efecto en la medida total hallada en la primera prueba podría haberse

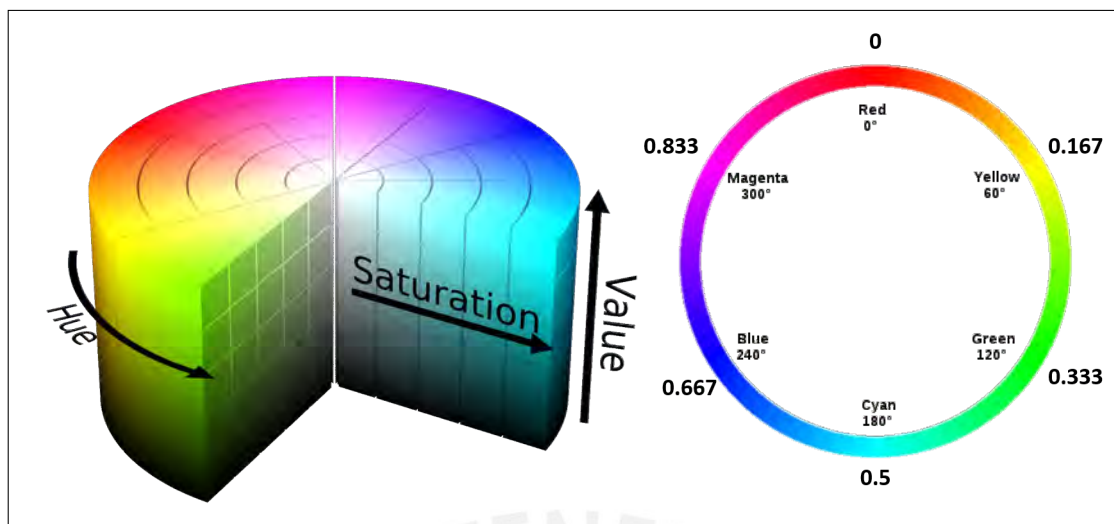


Figura 7.3: Espacio de colores HSV. Fuente: [71]

diluido. Se eligió una dimensión de 40x40 píxeles ya que, dada la resolución de 18 px/mm hallada para la cámara, equivale a una sección del fruto de aproximadamente 2 mm², en cuyo análisis un defecto de 1 mm² podría tener gran influencia.

7.2. Análisis de superficie total

En la Figura 7.4 se grafican los histogramas (incidencia de píxeles para un determinado valor) para cada capa de un arándano bueno, un arándano sin bloom y un arándano con Russet (capa H en rojo, capa S en verde, capa V en azul). Puede apreciarse que las mayores diferencias se encuentran en la capa H: Un arándano bueno tiene una moda definida en el rango azul (0.6-0.7), mientras que uno sin bloom presenta una frecuencia muy alta de píxeles de valor 0. Por otro lado, un arándano con russet presenta una moda también en 0, pero con valores acumulados en el rango rojo-naranja. Adicionalmente, las capas S y V podrían indicar diferencias con los valores de dispersión y frecuencia máxima.

Por lo expuesto anteriormente, se elige analizar sólo la capa H, ya que contiene información suficiente para diferenciar arándanos defectuosos. Entonces, se halla la media, moda y desviación estándar de la capa H de 100 arándanos buenos (por la parte superior), y se los compara con los valores obtenidos para frutos con defectos. En la Figura 7.5 se aprecia que la moda en arándanos buenos tiende a mantenerse en un valor constante de 0.667, salvo algunas excepciones. La media se encuentra en un valor cercano a 0.6 y la desviación estándar en 0.2. En contraste, en los arándanos sin bloom predomina la moda 0, y la diferencia entre la media y la desviación estándar se reduce significativamente, ambas alrededor de 0.4. Así, se puede confirmar la utilidad de estas variables para definir un probable criterio de selección. Otros tipos de defectos (rojo y russet) también fueron

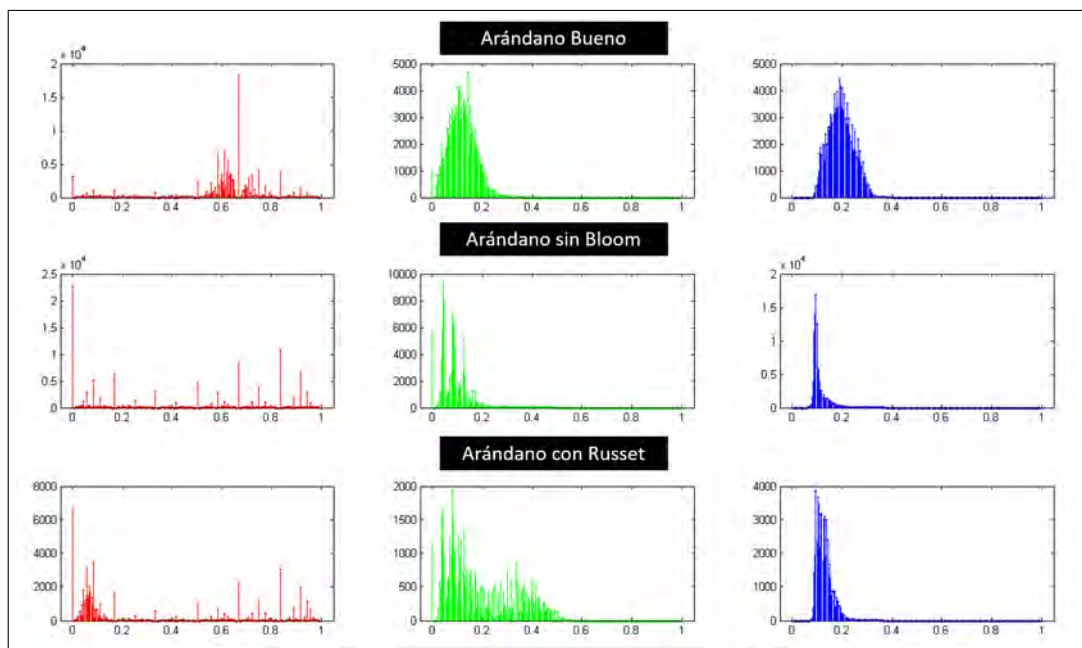


Figura 7.4: Comparación de histogramas de arándanos. Fuente: Elaboración propia

analizados y diferenciados, pero no se muestran dada la reducida cantidad de muestras con las que se contaba.

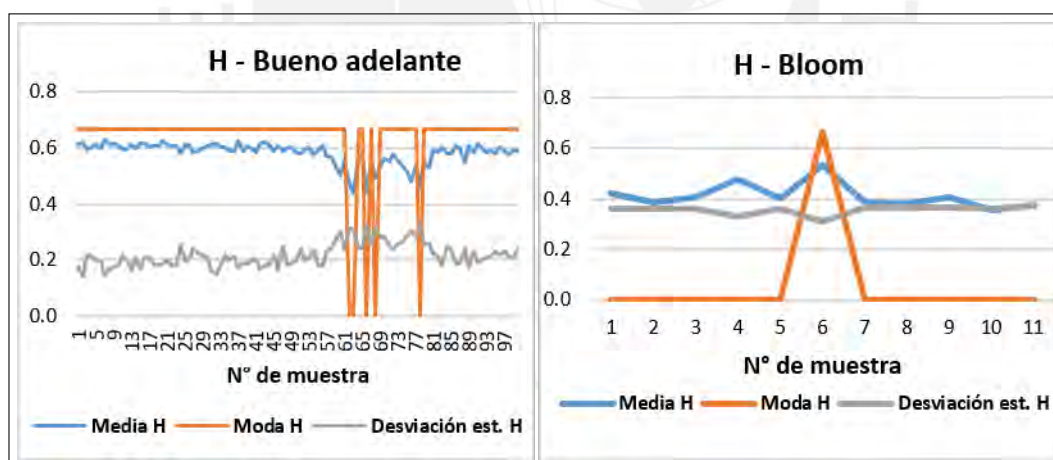


Figura 7.5: Comparación de valores de media, mediana y moda en análisis total del fruto. Fuente: Elaboración propia

7.3. Análisis de superficie por segmentos

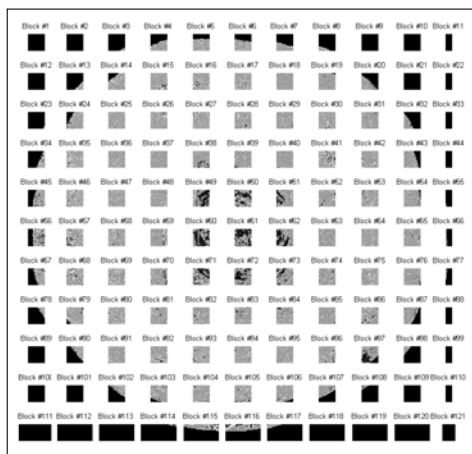
Hallar la media, moda y desviación de la totalidad de píxeles en la capa H de un arándano puede evitar que se diferencien defectos localizados en una región pequeña del fruto. Por ello, se decidió dividir al mismo en bloques cuadrados de 40 píxeles por lado. Posteriormente, se halla la media, moda y desviación estándar de la capa H para cada bloque.

Se analizó 10 arándanos buenos, 2 arándanos sin bloom, 2 rojos, 2 con russet, 2 con tallo y 2 con hongos. Las imágenes divididas en segmentos correspondientes a un arándano de cada clase se muestran en la Figura 7.6 y los resultados asociados a cada uno se presentan en la Figura 7.7, en la que el eje horizontal de los gráficos representa cada bloque de píxeles, numerados por filas, empezando de la esquina superior izquierda. El número de bloques depende del tamaño del arándano, por lo que cada fruto puede tener dominios diferentes sin afectar la posibilidad de compararlos por sus características de color.

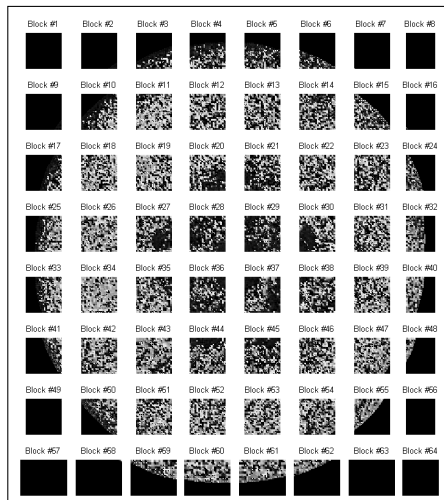
Se observa que se mantiene la tendencia de la moda en los arándanos buenos, lo que permite diferenciarlos claramente de los arándanos sin bloom o con russet. Por otro lado, los arándanos rojos, con tallo o con hongo presentan comportamientos oscilantes de la moda, por lo que el promedio de valores de la moda podría usarse como criterio para diferenciarlos de los frutos aceptables. Otra diferencia notable es la diferencia entre la media y la desviación estándar, que es máxima para los arándanos buenos, se reduce para los arándanos rojos o con tallo y se hace mínima para los arándanos sin bloom o con russet.

Además, analizando el comportamiento individual de cada bloque, se observa que los valores de la media y la moda podrían indicar la ubicación y la dimensión de un defecto en particular. El arándano bueno presenta una anomalía evidente en los bloques 60 y 61, que coinciden con la ubicación del centro oscuro (moda 0) del fruto. Por otro lado, el arándano con tallo presenta una moda y media en el rango verde (0.2-0.4) para el bloque 43, que contiene la mayor porción del tallo en la imagen; mientras algunos bloques en los arándanos rojo y con russet presentan resultados definidos en el rango rojo y naranja, respectivamente.

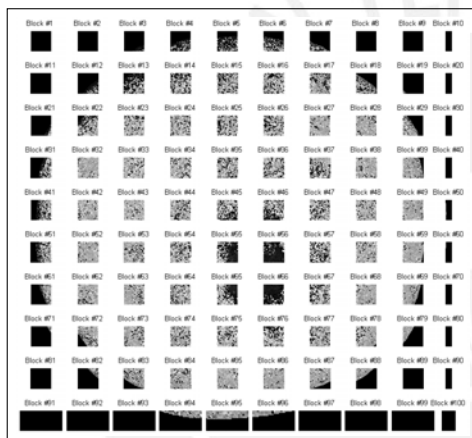
Para el caso de los arándanos con hongos, se puede apreciar una moda definida en 0 y una media por debajo de 0.2 para los bloques 56 y 66, que concentran la mayor parte del hongo. Ello podría confundirse con centro oscuro del arándano, como se observó para el arándano bueno, pero las ubicaciones de estos bloques son distintas a la central.



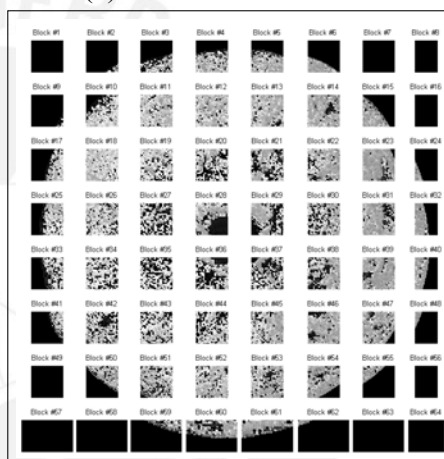
(a) Arándano bueno



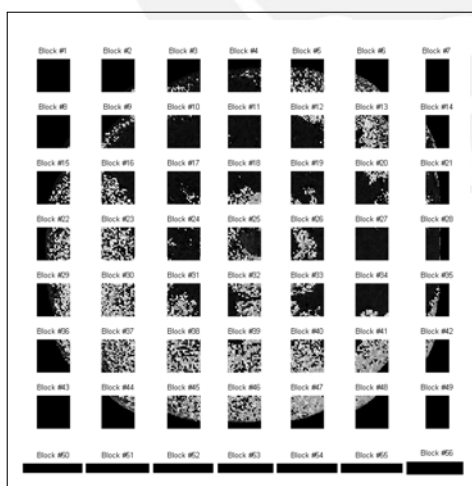
(b) Arándano sin bloom



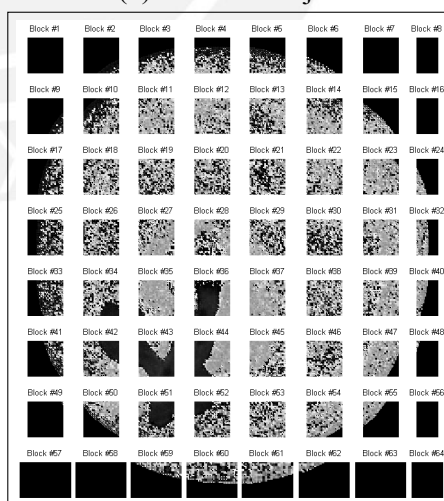
(c) Arándano con hongo



(d) Arándano rojo



(e) Arándano con russet



(f) Arándano con tallo

Figura 7.6: Imágenes divididas en segmentos de 40x40 píxeles. Fuente: Elaboración propia

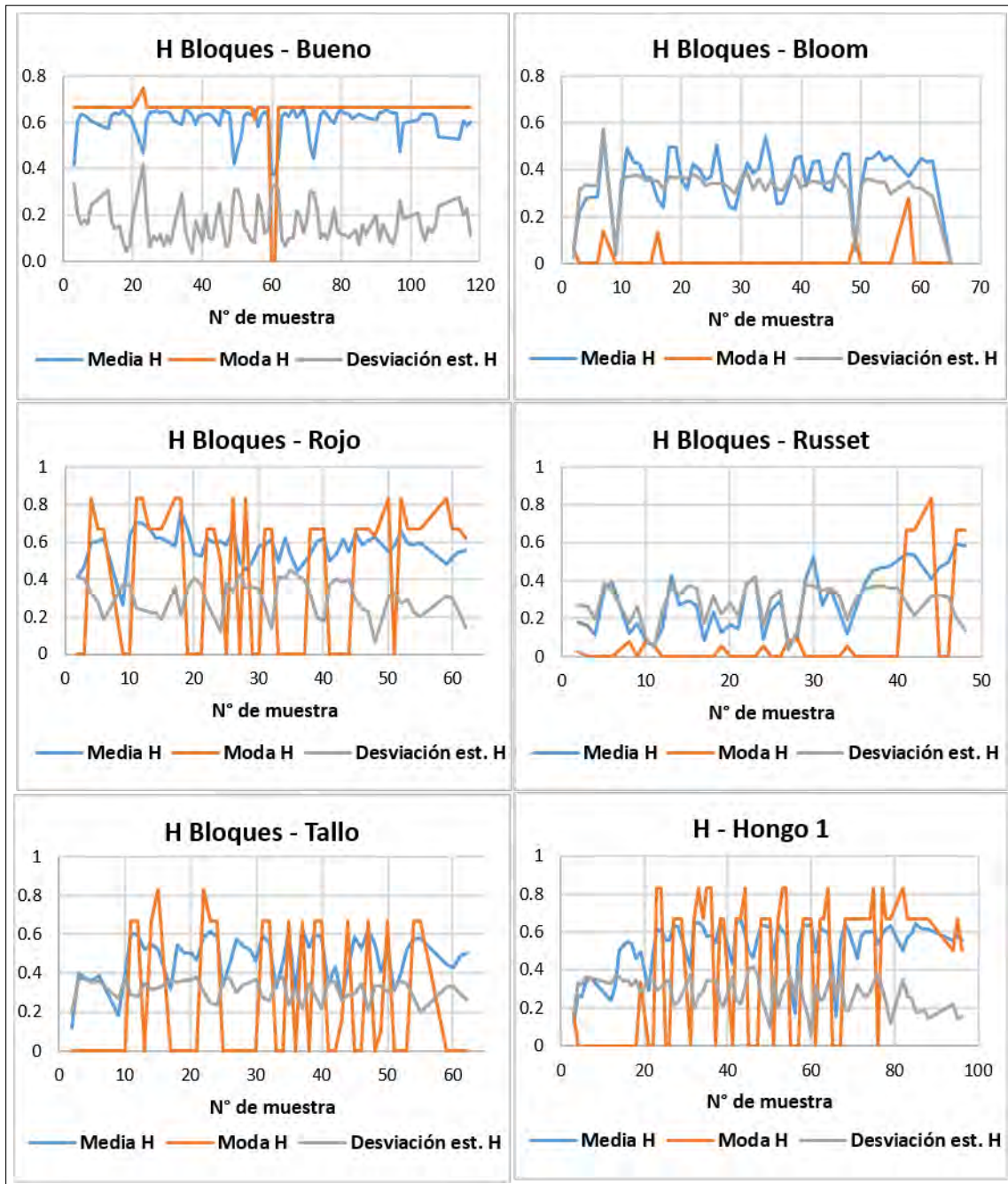


Figura 7.7: Comparación de resultados en análisis por bloques. Fuente: Elaboración propia

7.4. Definición de criterios de selección

Habiendo validado preliminarmente la efectividad del análisis por bloques, se plantearon 4 posibles criterios de selección: Valor promedio de la moda (promedio de las modas de cada bloque), valor promedio de la media, promedio de la desviación estándar y promedio de la diferencia entre la media y desviación estándar. Así, se graficó estos valores para los 100 arándanos buenos y todos los arándanos defectuosos que fue posible encontrar, como se aprecia en la Figura 7.8.

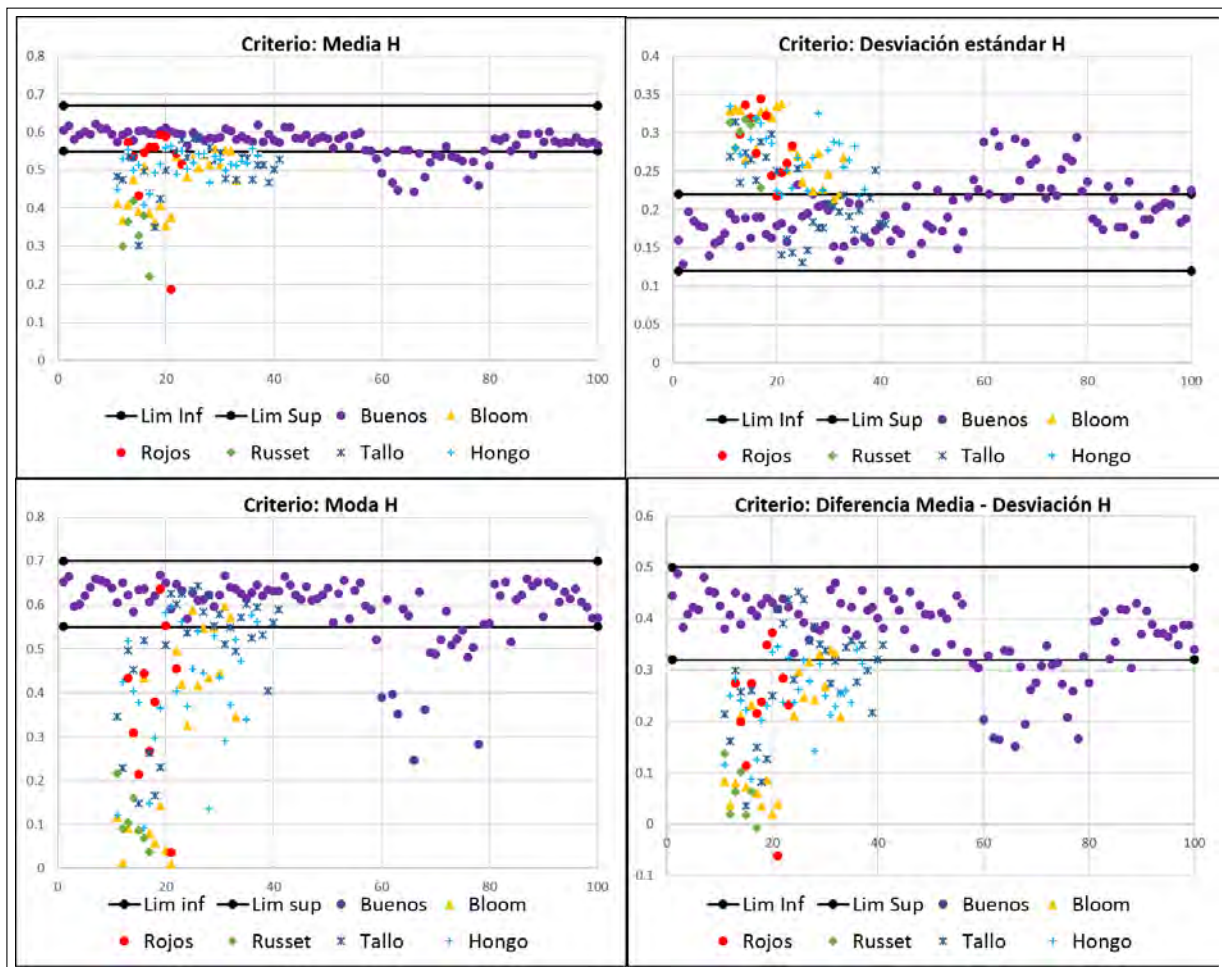


Figura 7.8: Comparación de criterios de selección. Fuente: Elaboración propia

Por observación, se establecieron valores umbrales para cada criterio, resumidos en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Valores límite para criterios de selección. Fuente:Elaboración propia

Criterio	Límite Inferior	Límite Superior
Media	0.55	0.67
Moda	0.55	0.7
Desv. est.	0.12	0.22
Dif. Media - Desv	0.32	0.5

Se puede observar que la mayoría de los arándanos buenos se encuentran dentro del rango de los valores umbrales. Aquellos que no cumplen esta condición pueden haber sido arándanos defectuosos que fueron seleccionados como buenos, debido al error involucrado en la selección por inspección visual. En el criterio de la media, los arándanos defectuosos se acumulan por debajo del límite inferior, salvo los arándanos rojos, que se confunden con los aceptables. Empleando los otros tres criterios, la discriminación entre clases también es evidente, excepto para los arándanos con tallo, cuya mayoría se encuentra dentro de los límites. Si se cuantifica cuántos arándanos buenos fueron calificados como tal, y cuántos arándanos defectuosos fueron identificados como no aceptables para cada criterio, se obtienen las cifras indicadas en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Análisis de efectividad por criterio de selección. Fuente: Elaboración propia

Categoría	Tamaño de muestra	Efectividad según criterio			
		Media	Moda	Desv. Est.	Dif. Media - Desv.
Bueno	100	80 %	84 %	73 %	81 %
Falta bloom	23	87 %	87 %	91 %	87 %
Con russet	7	100 %	100 %	100 %	100 %
Rojo	11	55 %	82 %	91 %	82 %
Con hongo	27	81 %	81 %	93 %	85 %
Con tallo	31	81 %	55 %	39 %	58 %

La región en verde resalta los criterios para los cuales se obtuvo efectividades mayores al 80 % y que presentan comportamiento similar para la mayoría de clases de arándanos. Por otro lado, se resaltan en rojo las efectividades mínimas. Se evidencia que la moda, desviación estándar y diferencia media-desviación presentan probabilidad de ser criterios efectivos para la selección, salvo en el caso de arándanos con tallo. En comparación, la media ha sido efectiva en todos los casos, salvo en el de los frutos rojizos. Es probable que esta baja efectividad se deba al método empleado para hallar las variables analiza-

das: Se promediaron los valores de todos los bloques, lo que disminuye la posibilidad de identificar defectos localizados como regiones rojizas oscuras o tallos pequeños.

7.5. Análisis de tiempos de ejecución del algoritmo

El gráfico en la Figura 7.9 muestra el tiempo de ejecución del algoritmo de extracción de características del arándano implementado para las pruebas anteriores, medido para una muestra de 94 arándanos de tamaños varios, en una laptop ASUS G551VW Intel-Core i7 2.60 GHz. Se emplearon las funciones de registro de tiempo de Matlab, obteniéndose un tiempo promedio de 0.55 s por arándano. De este tiempo, también en promedio, 0.06 s se consumieron para la lectura del archivo de imagen, 0.44 s para la segmentación del fruto, y 0.05 s para la obtención del calibre y el procesamiento a color en bloques.

Tomando en cuenta que el tiempo de ejecución en Arduino y el tiempo de conmutación de los sensores y válvula son despreciables (indicados en las tablas de características en la etapa de selección), el tiempo total de procesamiento de arándanos quedará limitado por el algoritmo de visión y la velocidad de las fajas. Si se limita la cantidad de imágenes a analizar a 3 tomas por fruto, se podría procesar 1 arándano cada 1.5 segundos. En caso se quisiera incrementar la eficiencia del sistema, debería analizarse una mayor cantidad de tomas, con lo cual el tiempo total de procesamiento aumentaría proporcionalmente.

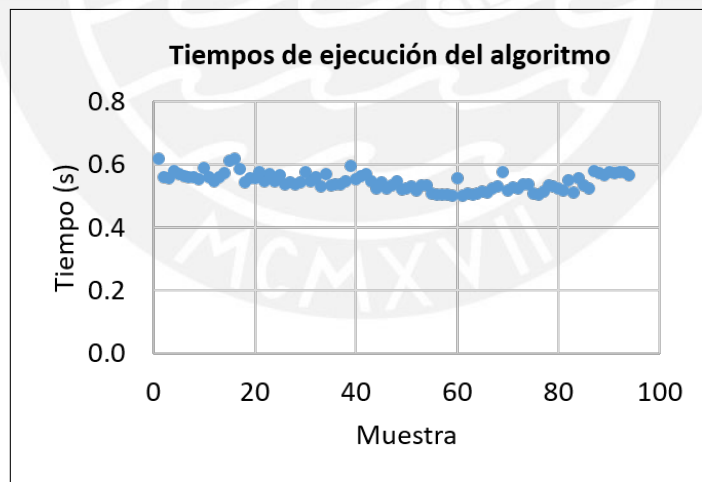


Figura 7.9: Tiempos de ejecución de algoritmo de visión. Fuente: Elaboración propia

8. Costos

Los costos estimados del sistema se presentan en las Tablas 8.1, 8.2 y 8.3, considerando aquellos generados por el diseño, compra de componentes, fabricación e implementación de la máquina. El costo total asciende a S/ 38,514.50, equivalentes a un aproximado de 11,000.00 USD.

Tabla 8.1: Costos del dominio mecánico. Fuente: Elaboración propia

Material y componentes mecánicos				
Material/componente	Descripción	Costo unitario	Cantidad	Subtotal
Plancha INOX 304	3mmx1220mmx2440mm	S/ 800.00	2	S/ 1,600.00
Plancha INOX 304	2mmx1220mmx2440mm	S/ 500.00	1	S/ 500.00
Plancha INOX 304	0.5mmx1220mmx2440mm	S/ 200.00	1	S/ 200.00
Servicio de corte láser y plegado	-	S/ 2,000.00	1	S/ 2,000.00
Servicio de soldadura	-	S/ 1,000.00	1	S/ 1,000.00
Servicios de mecanizado	-	S/ 1,500.00	1	S/ 1,500.00
Motores DC	Pololu 131:1 37Dx68L	S/ 250.00	3	S/ 750.00
Acoples flexibles para motor DC	6.35 mm - 8 mm	S/ 14.00	3	S/ 42.00
Rodamientos con chumacera	KFL08	S/ 12.00	12	S/ 144.00
Tornillería	Pernos, arandelas y tuercas	S/ 1,500.00	1	S/ 1,500.00
Rodillos de faja	Nylon 6, D 50 mm	S/ 50.00	6	S/ 300.00
Faja grado alimenticio	Poliuretano espesor 1.5 mm	S/ 170.00	3	S/ 510.00
Electroválvula	3/2 V 114T-5MNZ-M5 SMC	S/ 350.00	1	S/ 350.00
Rácores	KPGH04-M5	S/ 85.00	2	S/ 170.00
Escapes	AN120-M5	S/ 11.00	1	S/ 11.00
Filtro regulador	AC10B-M5G-A	S/ 175.00	1	S/ 175.00
Mangueras	TU0425BU-20 SMC, 4 mm, rollo 20 m	S/ 150.00	1	S/ 150.00
Total				S/10,902.00

Tabla 8.2: Costos del dominio eléctrico/electrónico. Fuente: Elaboración propia

Material y componentes eléctricos/electrónicos				
Material/componente	Descripción	Costo unitario	Cantidad	Subtotal
Cámara USB	FLIR BFS-U3-51S5C-C	S/ 3,500.00	1	S/ 3,500.00
Lente	FUJI HF12.5HA-1B	S/ 380.00	1	S/ 380.00
Sensor fotoeléctrico	SICK WLL260-E240	S/ 720.00	2	S/ 1,440.00
Laptop	(precio referencial)	S/ 1,800.00	1	S/ 1,800.00
Arduino UNO	-	S/ 80.00	1	S/ 80.00
Fuente 12 VDC 20 A	-	S/ 65.00	1	S/ 65.00
Fuente 24 VDC 5 A	-	S/ 35.00	1	S/ 35.00
Llave termomagnetica	SDA62C32	S/ 32.00	1	S/ 32.00
Parada de emergencia	S-LMFN1R4+S-LPL41	S/ 12.00	1	S/ 12.00
Selector de alimentación	S-LMMB8D0+S-LPL42	S/ 10.00	1	S/ 10.00
Lampara de alimentación	SLDS2202	S/ 6.00	1	S/ 6.00
Pulsador ON	S-LMRN2+S-LPL42	S/ 12.00	1	S/ 12.00
Pulsador OFF	S-LMRN1+S-LPL41	S/ 12.00	1	S/ 12.00
Lampara ON	SLDS242	S/ 6.00	1	S/ 6.00
Lampara OFF	SLDS241	S/ 6.00	1	S/ 6.00
Caja de paso	PVC 300x300x100 mm	S/ 35.00	1	S/ 35.00
Prensaestopas	PG11	S/ 3.50	4	S/ 14.00
Cables	Rollo 100 m AWG 18, AWG	S/ 60.00	2	S/ 120.00
Mosfet IRL 520	-	S/ 14.50	3	S/ 43.50
Diodo schotcky	1N5819	S/ 2.00	3	S/ 6.00
Resistencias	10 k, 2 k, 1 k	S/ 1.00	3	S/ 3.00
Optoacoplador	PC817	S/ 5.00	4	S/ 20.00
Módulo relay	HL-54S	S/ 15.00	1	S/ 15.00
Impresión de tarjeta	-	S/ 60.00	1	S/ 60.00
Total				S/ 7,712.50

Tabla 8.3: Costos de diseño y costo total. Fuente: Elaboración propia

Diseño e implementación				
Concepto	Horas	Costo/hora	Subtotal	
Diseño del sistema	500	S/ 35.00	S/17,500.00	
Ensamble del sistema	40	S/ 25.00	S/ 1,000.00	
Pruebas del sistema	40	S/ 35.00	S/ 1,400.00	
Total				S/19,900.00
Costo total	S/ 38,514.50			

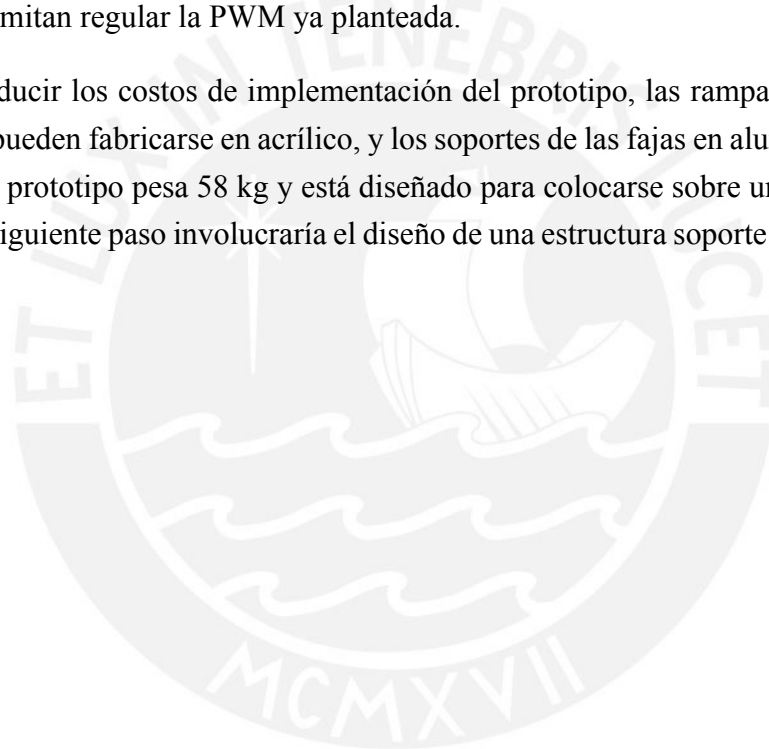
Conclusiones

- Se ha logrado diseñar un sistema basado en visión por computadora para la clasificación de arándanos por calibre y características asociadas al color. El sistema cumple con recibir, transportar, singularizar y seleccionar arándanos; y ha sido dimensionado para procesar hasta 6 frutos/s en el caso de arándanos pequeños, 4 frutos/s para los de calibre promedio y 3 frutos/s para los grandes. No obstante, el algoritmo de visión para la extracción de características puede tomar 1.5 segundos por arándano.
- Se logró además relacionar el calibre medido por procesamiento de imágenes con la masa del fruto, con un error estimado de 3.8 %. Es decir, el algoritmo de visión propuesto puede estimar tanto calibre como masa.
- El concepto óptimo base para el diseño del sistema, obtenido siguiendo la metodología VDI 2206 y el enfoque de diseño de la Universidad de Delft, ha sido validado a nivel teórico y experimental poniendo especial énfasis en el sistema de visión por computadora, lo cual asegura la efectividad del sistema una vez sea implementado.
- Como parte del proceso de diseño del subsistema de visión por computadora, se halló que los valores promedio de moda, desviación estándar y diferencia media-desviación, resultado del análisis por segmentos de píxeles en la capa H de la imagen de un fruto, pueden asegurar una efectividad de reconocimiento superior al 80 % para defectos como falta de bloom, russet y presencia de hongos, cumpliendo con las exigencias planteadas al inicio. Este hallazgo es nuevo en comparación con lo encontrado en la bibliografía para clasificación de frutos.
- Se han cumplido además los requerimientos del sistema asociados al espacio ocupado, interfaz de usuario, seguridad, control y el empleo de materiales de grado alimenticio.
- Se ha obtenido un costo estimado para diseño, fabricación y pruebas del prototipo de 11,000.0 USD, superándose en 1,000.0 USD el costo límite establecido en los requerimientos.

Recomendaciones

- Con fines de simplicidad, este trabajo de tesis planteó clasificar arándanos por tamaño y características asociadas al color empleando solo visión por computadora. No se exploraron métodos mecánicos para la clasificación por tamaño, que se estima podrían reducir la posibilidad de error para este fin. Lo más conveniente sería separar las etapas de clasificación por tamaño y color, de modo que se reduzca el tiempo de procesamiento.
- Se requiere realizar pruebas para determinar si el método de singularización planteado es efectivo. Pueden presentarse problemas de acumulación y compresión de los frutos, lo cual justificaría el uso de otros métodos de dosificación como cangilones, bandas divergentes, etc.
- La confiabilidad de los resultados presentados en la etapa de desarrollo del algoritmo de visión puede incrementarse si se contacta a alguna persona con experiencia en selección de arándanos. Esta persona debería clasificar los arándanos según sus características y ayudar a establecer los valores umbrales del criterio de selección.
- Debe experimentarse con otras fuentes de luz diferentes a la luz led blanca. Es posible incrementar el contraste de los frutos empleando luz azul o roja. Existen además dispositivos especiales para iluminación tipo corona, que permitirían eliminar todo tipo de sombra generada por el fruto.
- Debe validarse la posibilidad de alcanzar el tiempo de obturación requerido para la cámara con experimentación en laboratorio. Si bien el tiempo establecido ($44.35 \mu s$) se encuentra dentro del rango de exposición de la cámara, no necesariamente será óptimo bajo las condiciones de iluminación del sistema. Para tiempos de obturación reducidos se necesitan intensidades de luz cada vez mayores.
- Debe mejorarse el tiempo de procesamiento de las imágenes. Esto podría lograrse una vez se implemente y optimice el algoritmo con un lenguaje como C o Python. También podría considerarse reducir la resolución de la cámara o usar controladores dedicados de visión.
- Queda pendiente calcular la precisión del algoritmo de medición del calibre. Ello requiere encontrar o diseñar un patrón de calibre o volumen para un arándano, con el que aún no se cuenta. Un patrón de masa podría también perfilarse como una solución, dado que el estudio ha encontrado también una relación entre el diámetro del fruto y su masa.

- El presente estudio no trabajó en la identificación de defectos superficiales asociados a la forma del fruto como deformaciones, compresión o heridas en la cáscara. Se recomienda aplicar métodos de procesamiento como la detección de bordes para este fin, después de determinar defectos asociados al color. Cabe resaltar que este estudio halló indicios de que es posible determinar la ubicación de un defecto (variaciones de color en una región determinada) a partir de un análisis de color, mas no profundizó en este análisis.
- La implementación de un lazo para el control de velocidad de los motores será conveniente una vez se incremente la capacidad de la máquina y por consiguiente la carga soportada por los mismos. Pueden agregarse encoders como elemento sensor, que permitan regular la PWM ya planteada.
- Para reducir los costos de implementación del prototipo, las rampas y cubierta de visión pueden fabricarse en acrílico, y los soportes de las fajas en aluminio. Por otro lado, el prototipo pesa 58 kg y está diseñado para colocarse sobre una mesa, por lo que el siguiente paso involucraría el diseño de una estructura soporte independiente.



Referencias

- [1] Adafruit, “Rgb led strips,” 2018. [Online]. Disponible: <https://learn.adafruit.com/rgb-led-strips/current-draw>
- [2] Afrisal H., Faris M., et al, “Portable smart sorting and grading machine for fruits using computer vision,” pp. 71–75, 2013.
- [3] Agencia Agraria de Noticias, “Pequeños productores contribuyen con más del 20% de las exportaciones de arándanos de Perú,” 2020. [Online]. Disponible: <https://agraria.pe/noticias/pequenos-productores-contribuyen-con-mas-del-20-de-las-expor-20846>
- [4] América Economía, “Perú supera a Chile y por primera vez lidera la exportación de arándanos,” 2020. [Online]. Disponible: <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/peru-supera-chile-y-por-primera-vez-lidera-la-exportacion-de-arandanos>
- [5] Banco Central de Reserva del Perú, “Exportaciones por grupo de productos,” 2020. [Online]. Disponible: <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Estadisticas/Cuadros-Estadisticos/cuadro-067.xlsx>
- [6] Bandara D., Rathnayake H. y Fernando M., “Development of a small/medium scale grading system,” *ENGINEER, The Institution of Engineers, Sri Lanka*, vol. 43, no. 2, pp. 82–87, 2010.
- [7] BBC Technologies, “Kato 260,” 2016. [Online]. Disponible: <http://bbctechnologies.com/kato-260/>
- [8] Benedetti, L., “Apparatus for treating horticultural products, such as blueberries and the like,” Patent WO2017144632A1, 2017. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/WO2017144632A1/en?q=WO2017144632A1>
- [9] —, “Discrete conveyance unit, for blueberries and similar fruit or vegetable products,” Patent CA3011782A1, 2017. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/CA3011782A1/en?q=CA3011782A1>
- [10] Calpe J., Pla F., et al, “Robust low-cost vision system for fruit grading,” pp. 1710–1713, 1996.
- [11] Chilean Blueberry Committee, “Buenas prácticas de cosecha y poscosecha,” Chile, s/f.

- [12] Defilippi, B., “Manejo de cosecha y postcosecha de arándanos,” Chile, 2018. [Online]. Disponible: <https://blueberriesconsulting.com/manejo-de-cosecha-y-postcosecha-de-arandanos/>
- [13] Diario El Comercio, “Producción de arándanos en Perú crece 796 hace cuatro años pero su precio en chacra cae,” 2019. [Online]. Disponible: <https://gestion.pe/economia/arandanos-produccion-minagri-produccion-de-arandanos-en-peru-crece-796-mas-que-hace-cuatro-años-?ref=gesr>
- [14] Diario Gestión, “Perú se convirtió en primer exportador mundial de arándanos, al desplazar a Chile,” 2020. [Online]. Disponible: <https://gestion.pe/economia/minagri-peru-se-convierte-en-primer-exportador-mundial-de-arandanos-al-desplazar-a-chile-noticia>
- [15] Dirección general de políticas agrarias, “El arándano en el Perú y el mundo: Producción, comercio y perspectivas,” Lima, Perú, 2016.
- [16] Divin A., Churikov A., et al, “Thermal control of potatoes quality,” pp. 716–719, 2017.
- [17] Elifab, “Berry class: Calibrador electrónico exclusivo para arándanos,” 2017. [Online]. Disponible: <https://elifab.com/productos/calibrador-arandanos-berry-class/>
- [18] Farnell, “Pc817x series,” 2003. [Online]. Disponible: <https://www.farnell.com/datasheets/73758.pdf>
- [19] Fauzi A., Awang D., et al, “Automated machine for sorting sarawak pepper berries,” 2015.
- [20] Feng G. y Qixin C., “Study on color image processing based intelligent fruit sorting system,” pp. 4802–4805, 2004.
- [21] FLIR Machine Vision, “Blackfly s color 5.0 mp usb3 vision (sony imx264),” 2018. [Online]. Disponible: <https://www.ptgrey.com/blackfly-s-color-50-mp-usb3-vision-sony-imx264>
- [22] Forbes K. y Tattersfield G., “Estimating fruit volume from digital images,” pp. 107–112, 1999.
- [23] Fresh Plaza, “Maquinaria de selección más avanzada para el arándano y el crecimiento que se avecina,” 2017. [Online]. Disponible: <http://www.freshplaza.es/article/112421/Maquinaria-de-seleccion-mas-avanzada-para-el-arandano-y-el-crecimiento-que-se-avecina>

- [24] FUJIFILM, “Hf12.5ha-1b,” 2018. [Online]. Disponible: <https://www.fujifilmusa.com/products/opticaldevices/machine-vision/2-3-15/hf125ha-1b/specifications>
- [25] Gayathri G., Harshanjali K., et al, “Design, development and evaluation of a manually operated onion grader for rose onion,” *International Journal of Agricultural Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 121–129, 2016.
- [26] Grower Direct Marketing, “O g packing and unitec 2,” 2014. [Online]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=6vaB9h76Qo0&t=3s>
- [27] Gu, X. et al, “Perforated conveyor belt type automatic kiwi fruit quality sorting equipment,” Patent CN106 733 703A, 2017. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/CN106733703A/en?q=CN106733703A>
- [28] Instituto de investigaciones agropecuarias, “Manual del arándano,” Chile, 2013.
- [29] ———, “Manual de manejo agronómico del arándano,” Chile, 2017.
- [30] Instituto Nacional de Estadística e Informática, “Evolución de las exportaciones e importaciones - informe técnico diciembre 2019,” 2020.
- [31] Jianmin Z., Qixian Z., et al, “Design of on-line detection system for apple early bruise based on thermal properties analysis,” pp. 47–50, 2010.
- [32] Jones, P. et al, “Machine for sizing articles including blueberries,” Patent US3 191 772A, 1963. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/US3191772A/en?q=US3191772A>
- [33] Juntao, X., “Intelligent illumination control and sorting system for fruit and vegetable quality detection,” Patent CN105 772 410A, 2016. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/CN105772410A/en?q=CN105772410A>
- [34] Lak Kyung, C., “Fruit sorting machine,” Patent KR20 160 034 087A, 2014. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/KR20160034087A/en?q=KR20160034087A>
- [35] Langley R., “Fruit & vegetable packhouse equipment,” *Landwards e-Xtra, Harper Adams University College*, vol. 66, no. 3, 2011.
- [36] e. a. Lavayen D., *Dibujo Técnico en Ingeniería Mecánica*. PUCP, 2019.
- [37] Lee S. y Cho B., “Evaluation of the firmness measurement of fruit by using a non-contact ultrasonic technique,” pp. 1331–1336, 2013.

- [38] Londhe D., Nalawade S., et al, “Grader: A review of different methods of grading for fruits and vegetables,” *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*, vol. 12, 2013.
- [39] Lu, R. et al, “System for sorting fruit,” Patent US9 919 345, 2018. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/US9919345B1/en?q=US9919345>
- [40] Mafdel, “Thermoweldable conveyor belts,” 2018. [Online]. Disponible: <http://www.mafdel-belts.com/file/2015/07/mafdel-conveyor-belts-advice.pdf>
- [41] Mckibben, H. y Jones P., “Machine for packaging loose articles such as blueberries,” Patent CA745 803A, 1966.
- [42] Mendoza H., “Factores nutricionales en la calidad y condición de los berries,” 2015, diapositivas, consultado 25/08/2018. [Online]. Disponible: https://www.blueberrieschile.cl/subidas/2015/07/pdf_000021.pdf
- [43] Ministerio de trabajo y promoción del empleo, “Aprueban la norma básica de ergonomía y de procedimiento de evaluación de riesgo disergonómico,” Lima, Perú, 2007. [Online]. Disponible: <https://www.mtc.gob.pe/nosotros/seguridadysalud/documentos/RM-375-2008-TR-Norma-Basica-de-Ergonomia.pdf>
- [44] Monir K., Chowdhury B. y Kim J., “A modified canny edge detection algorithm for fruit detection & classification,” *10th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, pp. 237–240, 2018.
- [45] Nandi C., Tudu B. y Koley C., “An automated machine vision based system for fruit sorting and grading,” pp. 195–200, 2012.
- [46] Nicholls C. y Glassman S., “A portable bean size grader,” *Canadian Agricultural Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 55–57, 1985.
- [47] Pellenc, R., “Selective-sorting harvesting machine and sorting chain including one such machine,” Patent US2 011 112 684A1, 2011. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/US20110112684A1/en?q=US2011112684A1>
- [48] Pololu, “131:1 metal gearmotor 37dx57l mm,” 2018. [Online]. Disponible: <https://www.pololu.com/product/1107>
- [49] PONIS, “Calibradora de cerezas,” 2015. [Online]. Disponible: http://www.ponis.com.ar/?us_portfolio=calibradora-de-cerezas

- [50] Powell, H., “Fruit handling with color sorting,” Patent US20 010 032 807A1, 2001. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/US20010032807A1/en?q=US20010032807A1>
- [51] Puchalsky C. y Bruswitz G., “Fruit ripeness and temperature affect friction coefficient of mclemore and gala apples,” *International Afrophysics*, vol. 15, 2001.
- [52] Rangkuti M., Saputro A. y Imawan C., “Prediction system for soluble solid content in averrhoa carambola based on vis-nir image,” pp. 114–118, 2017.
- [53] Rudas C., “Diseño de un sistema mecatrónico para la selección de arándanos,” Master’s thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2015.
- [54] Saputro A., Juansyah S. y Handayani W., “Banana (musa sp.) maturity prediction system based on chlorophyll content using visible-nir imaging,” pp. 64–68, 2018.
- [55] Secretaría de agregado de valor, “Protocolo de calidad para arándanos frescos,” Argentina, 2015.
- [56] Seema, A. Kumar y Gill G., “Automatic fruit grading and classification system using computer vision: A review,” pp. 598–603, 2015.
- [57] SICK Sensor Intelligence, “Wll260,” 2018. [Online]. Disponible: <https://www.sick.com/ag/en/wll260/wll260-e240/p/p241581>
- [58] Sierra Exportadora, “Arándano,” Lima, Perú, 2016.
- [59] SMC, “Smc ac10b-m5g-a f/r,” 2018. [Online]. Disponible: <https://www.smc-pneumatics.com/americansmc/FRL/ACA.pdf>
- [60] —, “Smc an120-m5 muffler,” 2018. [Online]. Disponible: <https://www.smc-pneumatics.com/pdfs/AN.pdf>
- [61] —, “Smc kpgh04-m5 fitting,” 2018. [Online]. Disponible: <https://www.smc-pneumatics.com/pdfs/kp.pdf>
- [62] —, “Smc v114t-5mnz-m5 valve,” 2018. [Online]. Disponible: <https://www.smc-pneumatics.com/pdfs/V100.pdf>
- [63] Steck, “Productos,” 2018. [Online]. Disponible: <https://www.steck.com.br/es/productos>
- [64] Suk Won, K., “Nondestructive sorting apparatus for fruit,” Patent KR20 110 081 668A, 2010. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/KR20110081668A/en?q=KR20110081668A>

- [65] Takeda F., Krewer G., et al, “Techniques for increasing machine harvest efficiency in highbush blueberry,” *HortTechnology*, vol. 23, 2013.
- [66] Typack, “Clamshells arandanos,” 2018. [Online]. Disponible: <http://www.typack.cl/clamshells-arandanos/>
- [67] Van Boeijen, Annemiek et al., *Delft Design Guide*, 3rd ed. Amsterdam, Países Bajos: BIS Publishers, 2016.
- [68] Vishay, “Power mosfet irl520,” 2011. [Online]. Disponible: <https://www.vishay.com/docs/91298/91298.pdf>
- [69] —, “Power mosfet irlz44,” 2011. [Online]. Disponible: <https://www.vishay.com/docs/91328/91328.pdf>
- [70] Vásquez, C., Morales, R. y Puch, M., “Exportaciones no tradicionales en los últimos 5 años: El boom agroexportador,” *Moneda-BCRP*, no. 172, pp. 40–44, 2017.
- [71] Wikipedia, “Hsl and hsv,” 2018. [Online]. Disponible: <https://en.wikipedia.org/wiki/HSLandHSV>
- [72] Xiaogang, L. et al, “Fresh fruit sorting device,” Patent CN107457196A, 2017. [Online]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/CN107457196A/en?q=CN107457196A>
- [73] Yu P., Li C., et al, “Visual bruise assessment and analysis of mechanical impact measurement in southern highbush blueberries,” *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 30, 2014.
- [74] Zhou J., et al, “Effects of catching surface and tilt angle on bruise damage of sweet cherry due to mechanical impact,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 121, 2016.

Anexos

Índice de Anexos

A	Transcripción de entrevista a productor de arándanos	123
B	Características de la cámara	125
C	Imágenes de la cubierta para pruebas de visión	126
D	Resultados de medición de calibre y peso	127
E	Características de la faja seleccionada	128
F	Características del motor	128
G	Características del lente	129
H	Características de la electroválvula	130
I	Características del filtro-regulador	131
J	Características del optoacoplador	131
K	Características del transistor	132
L	Código para estimación del calibre	133
M	Código para procesamiento a color	136

A. Transcripción de entrevista a productor de arándanos

El día 13 de agosto del 2018, se presentó la oportunidad de conversar con Francisco Vizquerra Fletcher, Gerente General de Giddings Berries Perú SAC. Esta compañía, miembro del grupo Giddings Fruit, se dedica a la producción de arándanos frescos para la exportación, teniendo pares en Chile y México. Se presentan a continuación los fragmentos más importantes de la reunión, adaptando los párrafos obtenidos de una grabación de audio para mejor comprensión.

1. ¿Se emplean máquinas de selección de arándanos empleando visión por computadora en Perú?

Contamos con 3 máquinas que emplean esta tecnología en Chile, pero aún no en Perú, donde aún empleamos selección manual. Empresas como Hortifrut y Camposol sí cuentan con máquinas basadas en selección óptica. La máquina UNITEC italiana puede ser considerada la mejor, seguida por la BBC (neozelandesa). La PONIS proveniente de argentina no es tan valorada como las anteriores.

2. ¿Qué valor tendría poder diseñar y fabricar una máquina seleccionadora de arándanos en el Perú?

Si puedes comprobar la efectividad de la máquina, sería una gran oportunidad. Son pocos los que han logrado hacer máquinas que funcionen bien, por la complejidad involucrada.

3. ¿Qué criterios se emplean para la clasificación de los frutos? ¿Cuál es el principio de funcionamiento de las máquinas de este tipo?

En principio, lo que hace la máquina es singularizar los arándanos y hacerlos rodar por canales. En el transcurso del movimiento una cámara toma hasta 60 fotos, tanto imágenes a color de alta resolución como imágenes infrarrojas. Estas imágenes se contrastan con patrones y se determina si el arándano es apto. Por ejemplo, el programa debe ser capaz de determinar que el arándano puede tener la corona, pero si el área de la inserción pedicelar (donde estaba el pedicelo) es muy grande comparada con el área total, el arándano debe ser descartado. La información de las imágenes sirve además para determinar el calibre del fruto. Entonces, las imágenes convencionales permiten determinar color, calibre, heridas externas y otros defectos superficiales; y las infrarrojas, identificar daño interno.

Las máquinas más grandes de selección de arándanos tienen hasta 6 salidas. Podrían incluir por ejemplo 3 rangos de calibres de frutos saludables, frutos con defectos de

color y frutos dañados para descarte. Qué clase de fruto se envía a cada mercado depende de las exigencias del mismo.

4. ¿Qué capacidad debería tener la tolva de recepción de frutos?

La máquina recibe los frutos en jabas de 2 kg.

5. ¿Qué requisitos debería cumplir la máquina?

El mayor requerimiento es no maltratar el fruto. Por otro lado, el rozamiento debería ser el mínimo para no calentarlo: El fruto se somete a procesos de pre y post-enfriamiento para evitar descomposición. Cabe resaltar que existen dispositivos que evalúan el esfuerzo mecánico en el fruto a lo largo de la línea de selección y envasado.

6. ¿Qué variedades de arándanos se producen en Perú? ¿Qué tamaños existen?

La más difundida es la Biloxi, con calibres entre 10 y 26 mm. Lo deseable es tener arándanos con calibre por encima de los 13 mm, manteniendo la capacidad de obtener los de calibres menores. Podrían establecerse los siguientes rangos de selección: 14-16mm, 16-18mm, mayores que 18. Sin embargo, variedades australianas mucho más grandes nunca bajan de 18 mm. La segunda variedad más cultivada es la Ventura, seguida por la Emerald, Misty, etc.

7. ¿Tiene referencias sobre los precios de las máquinas comerciales?

Una máquina de marca A&B completa, con selección manual, puede costar entre 250,000 y 350,000 USD. Una máquina BBC con selección óptica cuesta aproximadamente 700,000 USD y una UNITEC bordea 1,800,000 USD.

8. ¿Qué capacidad de procesamiento debería tener la máquina?

Si se trabaja con clamshells pequeños de 125g puede procesarse aproximadamente 700 kg/h. Con clamshells de 500g podría estimarse 1500 kg/h.

B. Características de la cámara

	BFS-U3-51S5M-C	BFS-U3-51S5C-C
Resolution	2448 x 2048	
Frame Rate*	75 FPS	
Megapixels	5.0 MP	
Chroma	Mono	Color
Sensor	Sony IMX250, CMOS, 2/3"	
Readout Method	Global shutter	
Pixel Size	3.45 µm	
Lens Mount	C-mount	
ADC	10-bit / 12-bit	
Minimum Frame Rate**	1 FPS	
Gain Range**	0 to 47 dB	
Exposure Range**	6 µs to 30 s	
Acquisition Modes	Continuous, Single Frame, Multi Frame	
Partial Image Modes	Pixel binning, decimation, ROI	
Image Processing	Gamma, lookup table, and sharpness	Color correction matrix, gamma, lookup table, hue, saturation, and sharpness
Sequencer	Up to 8 sets using 2 features, exposure and gain	
Image Buffer	240 MB	
User Sets	2 user configuration sets for custom camera settings	
Flash Memory	1 MB non-volatile memory	
Opto-isolated I/O	1 input, 1 output	
Non-isolated I/O	1 bi-directional	
Auxiliary Output	3.3 V, 150 mA maximum	
Interface	USB 3.1 Gen 1	
Power Requirements	5 - 24 V via GPIO or 5 V via USB3 interface	
Power Consumption	3 W maximum	
Dimensions/Mass	29 mm x 29 mm x 30 mm / 36 g	
Machine Vision Standard	USB3 Vision v1.0	
Compliance	CE, FCC, KCC, RoHS, REACH. The ECCN for this product is: EAR099.	
MTBF***	4,706,000 hours @20°C, GB environment 1,177,000 hours @20°C, GM environment	
Temperature	Operating: 0°C to 50°C Storage: -30°C to 60°C	
Humidity	Operating: 20% to 80% (no condensation) Storage: 30% to 95% (no condensation)	
Warranty	3 years	

Figura B.1: Características de la cámara. Fuente: [21]

C. Imágenes de la cubierta para pruebas de visión



Figura C.1: Prototipo para captura de imágenes. Fuente: Elaboración propia

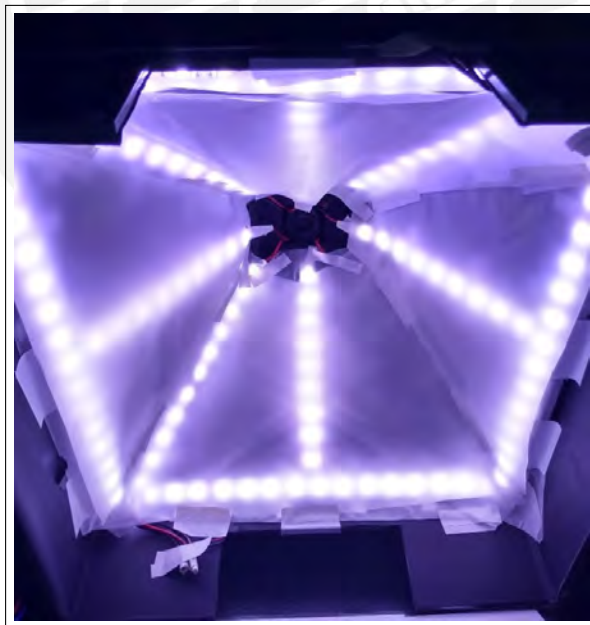


Figura C.2: Disposición final de la iluminación. Fuente: Elaboración propia

D. Resultados de medición de calibre y peso

Arándano	Calibre adelante (mm)	Calibre atrás (mm)	Peso (g)	Arándano	Calibre adelante (mm)	Calibre atrás (mm)	Peso (g)
1	21.47	21.51	4.8618	51	16.48	16.49	2.3092
2	23.90	23.91	6.4333	52	17.25	17.24	2.7181
3	20.28	20.17	4.1352	53	13.89	13.95	1.464
4	19.38	19.37	3.6275	54	13.59	13.45	1.3428
5	19.95	19.99	3.7673	55	15.79	15.80	2.1126
6	20.21	20.32	4.0731	56	14.34	14.40	1.7135
7	19.93	19.98	3.798	57	15.30	15.39	1.902
8	20.05	20.16	3.8053	58	14.34	14.40	1.5695
9	20.46	20.48	4.1002	59	10.46	10.36	0.6429
10	18.25	18.21	2.9653	60	10.25	10.15	0.6196
11	20.18	20.25	3.9614	61	10.86	10.85	0.6647
12	18.56	18.57	3.2095	62	11.77	11.48	0.8743
13	19.57	19.55	3.8241	63	11.32	11.29	0.7758
14	19.50	19.53	3.655	64	12.40	12.19	1.0163
15	19.25	19.31	3.602	65	11.36	11.06	0.7877
16	19.57	19.54	3.7666	66	10.77	10.63	0.7214
17	18.57	18.64	3.3253	67	11.86	11.84	0.8812
18	20.87	20.86	4.4528	68	12.23	12.20	0.9886
19	18.27	18.30	3.1092	69	12.34	12.32	0.998
20	19.30	19.25	3.5697	70	13.99	13.99	1.4348
21	19.11	19.23	3.4267	71	12.65	12.54	1.021
22	18.15	18.17	2.8094	72	15.69	15.63	1.9643
23	17.99	18.05	3.0883	73	16.21	16.10	2.1033
24	18.96	19.00	3.3716	74	11.32	11.08	0.8277
25	18.89	18.95	3.4409	75	11.76	11.77	0.8683
26	19.15	19.22	3.4292	76	11.05	11.11	0.7843
27	16.83	16.84	2.3717	77	13.40	13.29	1.3399
28	18.33	18.38	3.075	78	12.83	12.78	1.1041
29	17.20	17.26	2.6599	79	13.62	13.47	1.3305
30	17.73	17.76	2.9624	80	13.37	13.28	1.3076
31	18.23	18.28	3.0676	81	13.73	13.60	1.36
32	18.49	18.61	3.0715	82	14.73	14.76	1.92
33	17.30	17.39	2.7075	83	13.37	13.41	1.366
34	17.73	17.71	2.8991	84	14.89	14.86	1.6857
35	17.19	17.28	2.5817	85	14.61	14.72	1.6848
36	16.15	16.23	2.161	86	14.33	14.39	1.7386
37	19.20	19.25	3.6594	87	15.45	15.49	2.0358
38	18.54	18.61	3.0303	88	14.41	14.50	1.5948
39	17.00	17.01	2.4539	89	14.22	14.24	1.6573
40	17.47	17.51	2.6918	90	16.38	16.28	2.3056
41	16.45	16.48	2.2302	91	14.69	14.78	1.8365
42	20.06	20.12	4.0852	92	13.34	13.33	1.4719
43	18.27	18.31	3.3301	93	14.64	14.81	1.8902
44	17.09	17.09	2.6337	94	15.27	15.32	1.9485
45	15.70	15.71	2.0561	95	14.39	14.38	1.5395
46	18.47	18.60	3.1201	96	14.51	14.51	1.7388
47	16.81	16.82	2.4364	97	14.89	14.89	1.7974
48	15.23	15.19	1.833	98	14.10	14.12	1.4837
49	15.34	15.38	1.8865	99	16.90	16.82	2.4743
50	15.29	15.28	1.8871	100	16.70	16.62	2.2691

Tabla D.1: Resultados de medición de calibre y peso. Fuente: Elaboración propia

E. Características de la faja seleccionada

DEL/FLEX white	
Material	polyurethane
Colour	white
Bottom side	smooth
Top side	smooth
Hardness	93 ShA
Traction rating	
at 1% of tension	10 daN/cm ² of section
at 2% of tension	15 daN/cm ² of section
at 3% of tension	20 daN/cm ² of section
Installation tension	2 to 4% dependent upon conditions
Extreme temperatures	-20°C/+70°C
Friction coefficient on	
HDPE	0.25
Steel	0.5
Stainless steel	0.6

Reference					
Flat belt width < 100mm	Conveyor belt width ≥ 100mm	Belt thickness (mm)	Maximum width (mm)	Minimum drum ø (mm)	Weight (kg / m ²)
DFPW1.5	DFBW1.5	1.5	1850	20	1.8
DFPW2	DFBW2	2	1850	30	2.5
DFPW3	DFBW3	3	1850	70	3.75
DFPW4	DFBW4	4	1850	100	5

Figura E.1: Propiedades de faja seleccionada. Fuente: [40]

F. Características del motor


Gear Ratio	No-Load Speed @ 12 V	Stall Torque @ 12 V	Stall Current @ 12 V	Without Encoder
1:1	11,000 RPM	5 oz-in	5 A	
19:1	500 RPM	84 oz-in	5 A	37Dx52L mm
30:1	350 RPM	110 oz-in	5 A	37Dx52L mm
50:1	200 RPM	170 oz-in	5 A	37Dx54L mm
70:1	150 RPM	200 oz-in	5 A	37Dx54L mm
100:1	100 RPM	220 oz-in	5 A	37Dx57L mm
131:1	80 RPM	250 oz-in	5 A	37Dx57L mm

Figura F.1: Características del motor DC. Fuente: [48]

G. Características del lente

HF12.5HA-1B		FIXED	1.5 Mega	MANUAL	C-mt	METAL	F1.4	i
Unit : mm								
HF12.5HA-1B								
Focal Length (mm)		12.5						
Iris Range		F1.4~F16						
Operation	Focus	Manual						
	Iris	Manual						
Angle Of View (HxV)	2/3"	38°47' × 29°35'						
	1/2"	28°43' × 21°44'						
	1/3"	21°44' × 16°23'						
Focusing Range (From Front Of The Lens) (m)		∞ ~ 0.1						
Object Dimensions at M.O.D. (HxV) (mm)	2/3"	78 × 58						
	1/2"	57 × 42						
	1/3"	42 × 32						
Back Focal Distance (in air) (mm)		15.09						
Exit Pupil Position (From Image Plane) (mm)		-31						
Filter Thread (mm)		M25.5 × 0.5						
Mount		C						
Mass (g)		45						
Remarks		With Metal Mount						

Figura G.1: Características del lente. Fuente: [24]

H. Características de la electroválvula

Características									
Fluido	Aire								
Temperatura ambiente y de fluido (°C)	-10 a 50 (sin congelación. Véase la pág. 10.)								
Tiempo de respuesta (ms) ^{Nota 1)}	ON: 5 o menos OFF: 4 o menos								
Frecuencia máx. de trabajo (Hz)	20								
Accionamiento manual	Modelo de pulsador sin enclavamiento, modelo con enclavamiento ranurado								
Lubricación	No necesaria								
Posición de montaje	Cualquiera								
Resistencia a impactos/vibraciones (m/s ²) ^{Nota 2)}	150/30								
Protección	Resistente al polvo, equivalente a IP40								

Características de los solenoides									
Serie	V114/V124			V114A/V124A					
Entrada eléctrica	Salida directa a cable (G)/(H), conector enchufable L(L) Conector enchufable M (M)								
Tensión nominal de la bobina (V)	DC			24, 12, 6, 5, 3					
Fluctuación de voltaje admisible	-10 a 10%								
Consumo de potencia (W)	DC			Estándar: 0.35 (con luz: 0.4) Con circuito de ahorro de energía 0.1			1 W (con luz: 1.1)		
Supresor de picos de tensión	Véase la pág. 14.								
Indicador	LED								

Modelo de válvula	Tipo de accionamiento	Modelo	Rango de presión de trabajo (MPa)	Características de vacío (MPa)		Tamaño de conexión		Peso (g) ^{Nota 2)}	
				Conexión 1	Conexión 3	Conexiones 1,3	Conexión 2	Salida directa a cable	Conector enchufable L Conector enchufable M
V114	N.C.	Estándar	0 a 0.7	-100 kPa a 0.6	-100 kPa a 0	M5	M5		Boquilla macho
V114A	N.C.	Gran capacidad de caudal	0 a 0.7	-100 kPa a 0.6	-100 kPa a 0	M5	M5	V1□4:13(27)	V1□4:12(26)
V124 ^{Nota 1)}	N.A.	Estándar	0 a 0.7	-100 kPa a 0	-100 kPa a 0.6	M5	M5	V1□4A:16(30)	V1□4A:15(29)
V124A ^{Nota 1)}	N.A.	Gran capacidad de caudal	0 a 0.7	-100 kPa a 0	-100 kPa a 0.6	M5	M5		

Modelo de válvula	Curvas de caudal							
	1→2				2→3			
	C[dm ³ /(s·bar)]	b	Q[ℓ/min]	Cv	C[dm ³ /(s·bar)]	b	Q[ℓ/min]	Cv
V114	0.037	0.11	8.4	0.0080	0.054	0.35	14.2	0.015
V114A	0.076	0.070	17	0.016	0.099	0.23	24.1	0.024
V124 ^{Nota 1)}	0.054	0.35	14.2	0.015	0.037	0.11	8.4	0.0080
V124A ^{Nota 1)}	0.099	0.23	24.1	0.024	0.076	0.070	17	0.016

Figura H.1: Características de la electroválvula. Fuente: [62]

I. Características del filtro-regulador

Características técnicas estándar		
Componento	Filtro de aire [AF]	AF10-A
	Regulador [AR]	AR10-A
Tamaño de conexión	M5 x 0.8	
Conexión del manómetro [AR]	1/16	
Fluido	Aire	
Temperatura ambiente y de fluido	-5 a 60 °C (sin congelación)	
Presión de prueba	1.5 MPa	
Presión máx. de trabajo	1.0 MPa	
Rango de presión de regulación [AR]	0.05 a 0.7 MPa	
Grado de filtración nominal [AF]	5 μ m	
Material del vaso [AF]	Policarbonato	
Construcción [AR]	Modelo con alivio	
Peso [kg]	0.16	

Figura I.1: Características del filtro regulador. Fuente: [59]

J. Características del optoacoplador

■ Electro-optical Characteristics							(T _a =25°C)	
Parameter		Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit	
Input	Forward voltage	V _F	I _F =20mA	-	1.2	1.4	V	
	Peak forward voltage	V _{FM}	I _{FM} =0.5A	-	-	3.0	V	
	Reverse current	I _R	V _R =4V	-	-	10	μ A	
	Terminal capacitance	C _t	V=0, f=1kHz	-	30	250	pF	
Output	Collector dark current	I _{CEO}	V _{CE} =50V, I _F =0	-	-	100	nA	
	Collector-emitter breakdown voltage	BV _{CEO}	I _C =0.1mA, I _F =0	*5 80	-	-	V	
	Emitter-collector breakdown voltage	BV _{ECO}	I _E =10 μ A, I _F =0	6	-	-	V	
Transfer characteristics	Collector current	I _C	I _F =5mA, V _{CE} =5V	2.5	-	30.0	mA	
	Collector-emitter saturation voltage	V _{CE(sat)}	I _F =20mA, I _C =1mA	-	0.1	0.2	V	
	Isolation resistance	R _{ISO}	DC500V, 40 to 60%RH	5 \times 10 ¹⁰	1 \times 10 ¹¹	-	Ω	
	Floating capacitance	C _f	V=0, f=1MHz	-	0.6	1.0	pF	
	Cut-off frequency	f _c	V _{CE} =5V, I _C =2mA, R _L =100 Ω , -3dB	-	80	-	kHz	
	Response time	Rise time	t _r	V _{CE} =2V, I _C =2mA, R _L =100 Ω	-	4	18	μ s
		Fall time	t _f		-	3	18	μ s

*5 From the production Date code "J5" (May 1997) to "P7" (July 2002), however the products were screened by BV_{CEO}≥70V.

Figura J.1: Características del optoacoplador. Fuente: [18]

K. Características del transistor

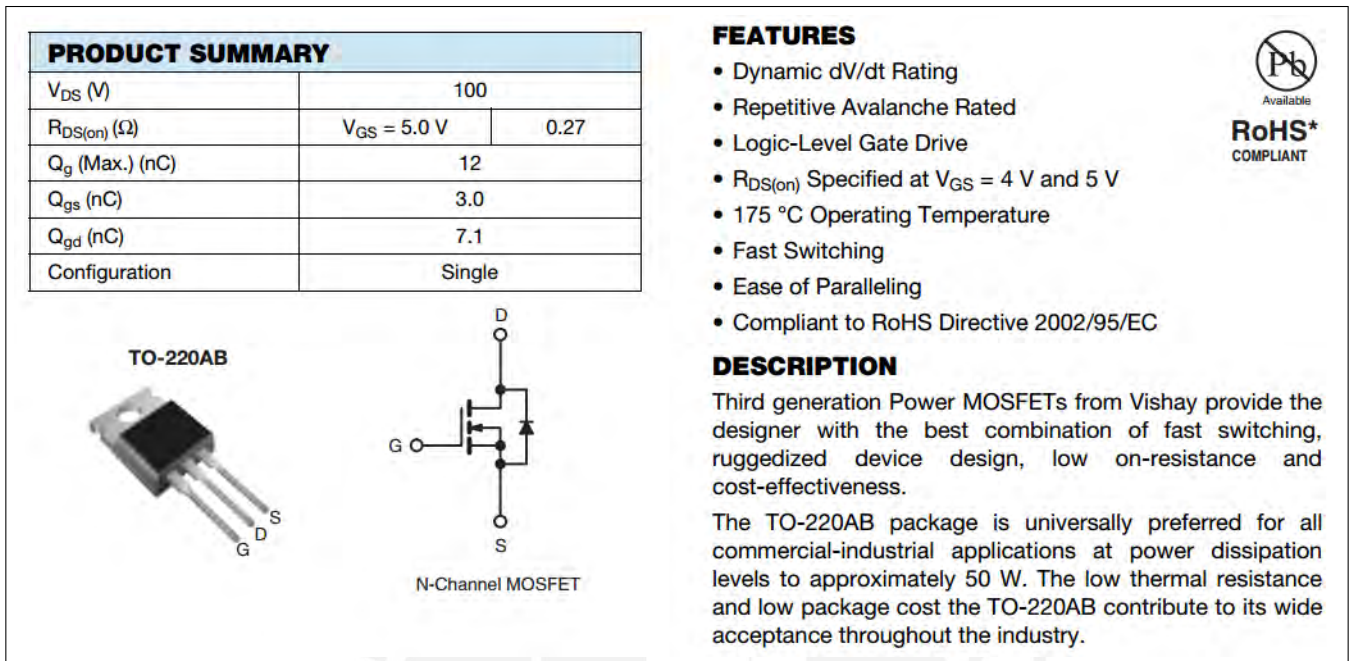


Figura K.1: Características del transistor IRL520. Fuente: [68]

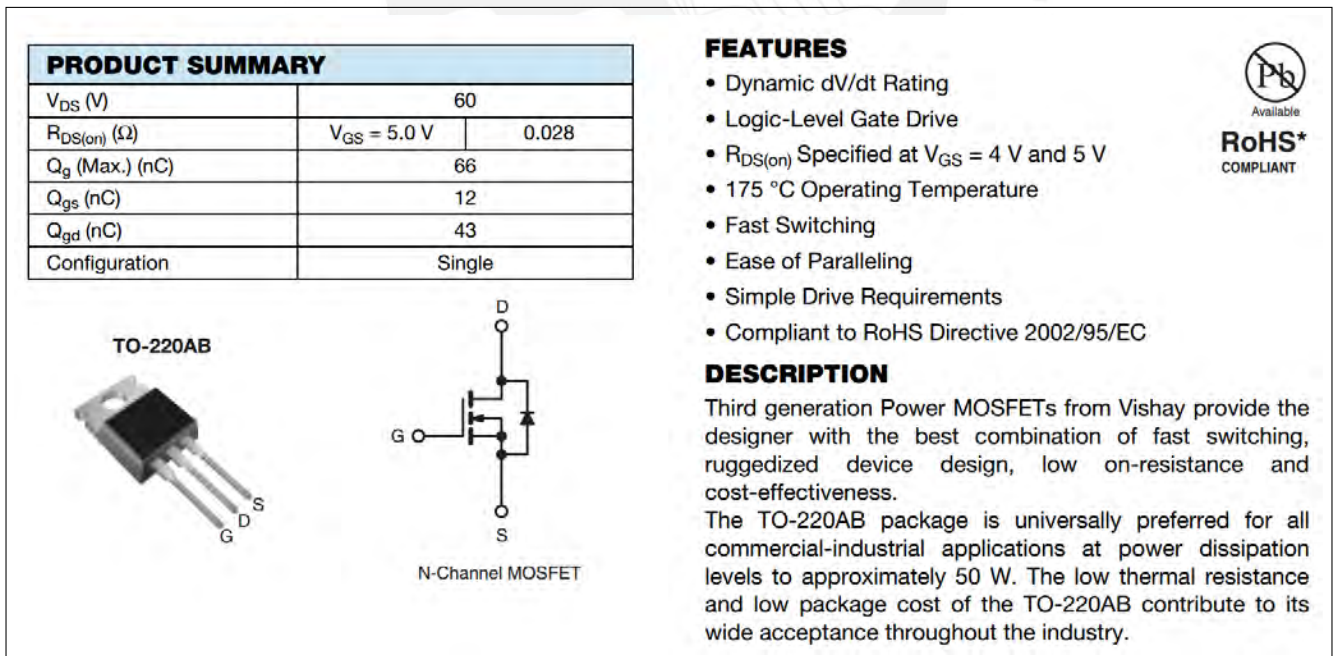


Figura K.2: Características del transistor IRFZ44. Fuente: [69]

L. Código para estimación del calibre

```
% Vectores para almacenamiento de datos
anchos = zeros(150,1);
altos = zeros(150,1);
diametros = zeros(150,1);

%**** Obtencion del archivo de imagen ****

n = 1; % numero de arandano
nombre = [num2str(n) '.bmp']; % nombre de la imagen
im1 = imread(nombre); % lectura del archivo de imagen

imgray = rgb2gray(im1); % conversion a escala de grises

%**** Proceso de correccion de deformacion radial ****

delta = -0.0028; % factor de correccion radial

% matriz de coordenadas de pixeles
[X,Y] = meshgrid([1:2448],[1:2048]);

X0 = 1224; Y0 = 1024; % centro de la imagen
% matriz de radios para cada pixel
Ro2 = sqrt((X0-X).^2+(Y0-Y).^2);
% matriz de radios corregidos
Rf2 = Ro2 + (delta*Ro2).^3;
% direccion de vector posicion del pixel
theta2 = atan2((Y-Y0),(X-X0));
xf2 = X0 + Rf2.*cos(theta2); % nueva coordenada x
yf2 = Y0 + Rf2.*sin(theta2); % nueva coordenada y

% imagen gris corregida
I3 = interp2(X,Y,double(imgray),xf2,yf2,'linear');
% correccion capa R
R3 = interp2(X,Y,double(im1(:,:,1)),xf2,yf2,'linear');
```

```

% correccion capa G
G3 = interp2(X,Y,double(im1(:, :, 2)),xf2,yf2,'linear');
% correccion capa B
B3 = interp2(X,Y,double(im1(:, :, 3)),xf2,yf2,'linear');
IM3 = cat(3, R3, G3, B3); %imagen a color corregida

[xroi, yroi]=size(I3); %dimensiones de la imagen

% Delimitacion de Region de Interes
ROI1 = IM3(800:xroi-700,950:yroi-900,:); %ROI a colores
ROI = I3(800:xroi-700,950:yroi-900); %ROI en gris

%**** Proceso de segmentacion ****

immed = medfilt2(ROI); % Filtro mediano

% Deteccion de bordes
imedge1 = edge(uint8(immed), 'canny', 0.1);

imllena = imfill(imedge1, 'holes'); % Llenado de la region

% Erosion
se = strel('diamond', 3); % Kernel para erosion
imllenaer = imerode(imllena, se); % Erosion

% Dilatacion
se = [0 1 0; 1 1 1; 0 1 0]; % Kernel para dilatacion
imllenaer = imdilate(imllenaer, se); % Dilatacion

% Extraccion de propiedades de la region
% Identificacion de regiones
[L, num] = bwlabel(imllenaer);
% Ubicacion del centroide
centroide = regionprops(L, 'centroid');

% Rectangulo circunscrito a la region
bb = regionprops(L, 'BoundingBox');

```

```
%Diametro equivalente de la region  
diam1 = regionprops(L, 'EquivDiameter');
```

```
%Registro de ancho de rectangulo
```

```
anchos(n) = bb.BoundingBox(3);
```

```
%Registro de alto de rectangulo
```

```
altos(n) = bb.BoundingBox(4);
```

```
%Registro de diametro de region
```

```
diametros(n) = diam1.EquivDiameter(1);
```



M. Código para procesamiento a color

```
% Vectores para almacenamiento de datos

vecmediasH = zeros(500,1);
vecmodasH = zeros(500,1);
vecdesvsH = zeros(500,1);
vecDIFH = zeros(500,1);

vecmediasS = zeros(500,1);
vecmodasS = zeros(500,1);
vecdesvsS = zeros(500,1);

vecmediasV = zeros(500,1);
vecmodasV = zeros(500,1);
vecdesvsV = zeros(500,1);

n = 1; % numero de arandano

**** Obtencion del archivo de imagen ****

n = 1; % numero de arandano
nombre = [num2str(n) '.bmp']; % nombre de la imagen
im1 = imread(nombre); % lectura del archivo de imagen

imgray = rgb2gray(im1); % conversion a escala de grises
[xroi, yroi]=size(imgray); % dimensiones de la imagen

**** Obtencion de mascara para segmentacion ****

% region de interes a color
ROI1 = im1(600:xroi-600,600:yroi-600,:);

% region de interes gris
ROI = imgray(600:xroi-600,600:yroi-600);
```

```

immed = medfilt2(ROI); % Filtro mediano

% Deteccion de bordes
imedge1 = edge(uint8(immed), 'canny', 0.1);
imllena = imfill(imedge1, 'holes'); % Llenado de la region

% Erosion
se = strel('diamond', 3); % Kernel para erosion
imllenaer = imerode(imllena, se); % Erosion

% Dilatacion
se = [0 1 0; 1 1 1; 0 1 0]; % Kernel para dilatacion
imllenaadil = imdilate(imllenaer, se); % Dilatacion

% Aplicacion de mascara
im2 = ROI1.*uint8(repmat(imllenaadil, [1, 1, 3]));

%**** Nueva region de interes ****

% etiquetado de region de mascara
[L, num] = bwlabel(imllenaadil);

% rectangulo circunscrito
bb = regionprops(L, 'BoundingBox');

% coordenadas de rectangulo para recorte
xr = bb.BoundingBox(1) - 10;
yr = bb.BoundingBox(2) - 10;
wr = bb.BoundingBox(3) + 20;
hr = bb.BoundingBox(4) + 20;

% recorte de region de interes
ROInew = imcrop(im2, [xr yr wr hr]);

%**** Procesamiento en espacio HSV ****

imhsv = rgb2hsv(ROInew); % conversion a HSV

```

```

H = imhsv(:, :, 1); % capa H
S = imhsv(:, :, 2); % capa S
V = imhsv(:, :, 3); % capa V

V(V == 0) = NaN; %eliminacion de valores V = 0 (fondo negro)

mask = 1-isnan(V); %mascara para eliminar fondo
mask(mask == 0) = NaN;

H = H.*mask; %eliminacion de fondo capa H
S = S.*mask; %eliminacion de fondo capa S

%**** Division en bloques de cada capa ****

% dimensiones de capa
[filas , columnas , numerocapascolor] = size(H);

FilasBloque = 40; %Filas por bloque
ColumnasBloque = 40; %Columnas por bloque

%numero de bloques completos (filas)
BloquesCompFilas = floor(filas / FilasBloque);
VectorBloqueFilas = [FilasBloque * ones(1, BloquesCompFilas),
rem(filas , FilasBloque)];

%numero de bloques completos (columnas)
BloquesCompColumnas = floor(columnas / ColumnasBloque);
VectorBloqueColumnas =
[ColumnasBloque * ones(1, BloquesCompColumnas),
rem(columnas , ColumnasBloque)];

% Division en bloques de cada matriz
caH = mat2cell(H, VectorBloqueFilas , VectorBloqueColumnas);
caS = mat2cell(S, VectorBloqueFilas , VectorBloqueColumnas);
caV = mat2cell(V, VectorBloqueFilas , VectorBloqueColumnas);
posvec = 1;
numBloquesFilas = size(caH, 1);

```

```

numBloquesColumnas = size(caH, 2);

% Extraccion de variables para cada bloque
for r = 1 : numBloquesFilas
for c = 1 : numBloquesColumnas

bloqueH = caH{r,c}; % valores del bloque
bloqueS = caS{r,c};
bloqueV = caV{r,c};

vH = bloqueH(~isnan(bloqueH)); % eliminacion de fondo
vS = bloqueS(~isnan(bloqueS));
vV = bloqueV(~isnan(bloqueV));

mediaH = mean(vH); % media
vecmediasH(posvec) = mediaH;
modaH = mode(vH); % moda
vecmodasH(posvec) = modaH;
stdesvH = std(vH); % desviacion estandar
vecdesvsH(posvec) = stdesvH;

% diferencia media-desv
vecDIFH(posvec) = mediaH - stdesvH;

vecmediasS(posvec) = mean(vS);
vecmodasS(posvec) = mode(vS);
vecdesvsS(posvec) = std(vS);

vecmediasV(posvec) = mean(vV);
vecmodasV(posvec) = mode(vV);
vecdesvsV(posvec) = std(vV);

posvec = posvec + 1;

end
end

```