




Design of an Automated Harvesting Machine for the Efficient Collection of Fresh Asparagus using Artificial Vision Technology

José Requena-Rodríguez, B.Sc. in Mechatronics Engineering¹, Ronaldo Rodríguez-Silva, B.Sc. in Mechatronics Engineering¹, Eliseo, Zarate-Perez, Mechatronics Engineer¹

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Peru, n00131652@upn.pe, n00136068@upn.pe, eliseo.zarate@upn.edu.pe

Abstract– Green asparagus is one of the most important agricultural products in the agricultural sector of Peru, positioning the country as the world's second-largest producer of these vegetables. However, the lack of prototypes and innovative technologies to address the needs of the agroindustry has adversely affected asparagus exports. Furthermore, the artisanal work modality and climatic conditions adversely impact the harvesting and quality of asparagus. To mitigate product quality issues, the implementation of an artificial vision-based recognition system is proposed. The objective of this study is to design a harvesting machine for the collection of green asparagus using this technology. The results present the detailed design of the machine, including all its systems and mechanisms. Additionally, it is estimated that the machine would take 7.5 seconds to harvest one asparagus. In the artificial vision tests, a recognition accuracy of 95% was achieved for the categories of asparagus.

Keywords– Asparagus harvesting machine, Fresh asparagus collection, Artificial vision technology, Agricultural innovation, Export quality improvement.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Diseño de una Máquina Cosechadora Automatizada para la Recolección Eficiente de Espárragos Frescos mediante Tecnología de Visión Artificial

José Requena-Rodríguez, B.Sc. in Mechatronics Engineering¹, Ronaldo Rodríguez-Silva, B.Sc. in Mechatronics Engineering¹, Eliseo, Zarate-Perez, Mechatronics Engineer¹

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Peru, n00131652@upn.pe, n00136068@upn.pe, eliseo.zarate@upn.edu.pe

Resumen– El espárrago verde es uno de los productos agrícolas más importantes en el sector agropecuario del Perú, posicionando al país como el segundo productor mundial de estas hortalizas. Sin embargo, la falta de prototipos y tecnologías innovadoras para abordar las necesidades de la agroindustria ha afectado negativamente las exportaciones de espárragos. Además, la modalidad de trabajo artesanal y las condiciones climáticas impactan adversamente en el acopio y la calidad de los espárragos. Con el fin de mitigar los problemas de calidad del producto, se propone la implementación de un sistema de reconocimiento basado en visión artificial. El objetivo de este estudio es diseñar una máquina cosechadora para el acopio de espárragos verdes utilizando esta tecnología. Los resultados presentan el diseño detallado de la máquina, incluyendo todos sus sistemas y mecanismos. Además, se estima que la máquina tardaría 7.5 segundos en recolectar un espárrago. En las pruebas de visión artificial, se logró una precisión del 95% en el reconocimiento de las categorías de los espárragos.

Palabras clave– Máquina cosechadora de espárragos, Acopio de espárragos frescos, Tecnología de visión artificial, Innovación agrícola, Mejora de la calidad de exportación.

I. INTRODUCCIÓN

El espárrago fresco representa uno de los productos agrícolas más destacados en el sector agropecuario del Perú. En 2013, las exportaciones de espárragos frescos generaron 612 millones de dólares, un 14 % más que el año anterior. Con base en ello, el espárrago se mantuvo como el principal producto de exportación no tradicional, contribuyendo con un 1 % al total de las exportaciones peruanas [1]. Además, según estadísticas de la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), Perú ostenta el segundo lugar como productor mundial de espárragos [2]. Estos productos pasan por exhaustivos procesos de inspección de sanidad y calidad antes de ser exportados a países más desarrollados, como Estados Unidos y países europeos [3].

Con el propósito de mejorar las exportaciones de espárragos, el Instituto Peruano del Espárrago y Hortalizas (IPEH) y el gobierno peruano han establecido normas de calidad. Estas normativas clasifican los espárragos en tres categorías: Categoría Extra, Categoría I y Categoría II, considerando su longitud, calibre y tolerancia [4].

De la misma forma, el proceso de cosecha de espárragos se divide en tres grupos: ayuda mecánica, cosechadora no selectiva y cosechadora selectiva. No obstante, se plantea la posibilidad de un cuarto grupo integrado por cosechadoras robóticas basadas en visión artificial. Estas máquinas emplean

detección de objetivos, toma de decisiones y manipuladores con actuadores para reemplazar las operaciones manuales [5]. Dada la variabilidad silvestre en las características agronómicas, biológicas y físicas de los espárragos, es esencial que los robots agrícolas sean flexibles y adaptables a los entornos y productos objetivos [6].

En el Perú, la cosecha de espárragos se lleva a cabo mayormente de manera artesanal, requiriendo un gran número de personas para la recolección manual. Esta práctica conlleva deficiencias como el deterioro del producto, lesiones musculares y tiempos de inactividad. La cosecha manual, que implica frecuentes paradas y agachadas de los recolectores, resulta monótona y agotadora, llevando a muchos trabajadores a abandonar el campo y siendo reemplazados por personas inexpertas. Esto afecta la calidad del acopio, ya que se basa en el criterio de trabajadores que, en muchos casos, son nuevos en la recolección de espárragos, sin considerar los requisitos de calidad establecidos por entidades gubernamentales.

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un sistema de reconocimiento de espárragos basado en inteligencia artificial para clasificar las tres categorías de calidad existentes en los espárragos frescos. Por ello, la implementación de la visión artificial se plantea como una solución óptima para la identificación de las características de calidad del espárrago destinado a la exportación. Esto contribuirá a minimizar errores en la evaluación de características durante extensos periodos de muestreo. La complejidad del terreno de cultivo, incluyendo rocas, maleza, tallos de espárragos caídos y otros desechos, junto con las variadas condiciones de iluminación ambiental, genera errores en las técnicas tradicionales de procesamiento de imágenes. Por ello, es esencial utilizar visión artificial mediante el filtrado y preprocesamiento de flujos de datos entrantes para lograr un rendimiento en tiempo real [7].

Debido a los diferentes requisitos de calidad impuestos a los espárragos de exportación, se propone la integración de un sistema automatizado utilizando una red neuronal artificial. Esto ha demostrado un porcentaje de acierto del 97.5 %, evidenciando la viabilidad de implementar la visión artificial en diversas empresas exportadoras [8]. En resumen, los procesos artesanales para clasificar los espárragos en las plantas exportadoras no son tan eficientes, ya que demandan más tiempo y precisión para observar y clasificar los espárragos según su calidad. Introducir un sistema de visión artificial, al ser una herramienta digital, permite minimizar

errores en extensos periodos de verificación, cumplir con los requisitos de calidad y lograr una mayor velocidad [3]. Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación es desarrollar una máquina cosechadora para el acopio de espárragos frescos, utilizando visión artificial.

II. METODOLOGÍA

El desarrollo de la máquina cosechadora para el acopio de espárragos verdes consta de 3 etapas: Diseño de la máquina cosechadora, Visión artificial para la detección de espárragos verdes y Control de la cosechadora. En la etapa de diseño de la máquina cosechadora, se definieron los mecanismos y sistemas necesarios para el acopio de los espárragos. Estos incluyen: mecanismo de movilización, sistema radar, sistema de visión artificial, mecanismo de extracción, mecanismo de elevación y mecanismo de almacenamiento de espárragos. También se realizaron cálculos mecánicos de la etapa de potencia para la selección de los actuadores que componen la máquina. Luego, se llevó a cabo el estudio del terreno de 2 hectáreas para obtener las dimensiones de la máquina y modelarla en el software Autodesk Inventor. Posteriormente, se realizó una animación 3D simulando el proceso completo del acopio de espárragos verdes mediante el software 3DS Max.

En la etapa de Visión artificial para la detección de espárragos verdes, se llevó a cabo un estudio de los tipos de categorías en las que son clasificados dichos espárragos. Luego, se desarrolló el algoritmo correspondiente de acuerdo con su clasificación, que son: categoría extra, categoría I y categoría II. El algoritmo se desarrolló en el software Python, el cual fue compilado y cargado en la Raspberry Pi utilizando su sistema operativo como interfaz para efectuar las pruebas de reconocimiento de los espárragos.

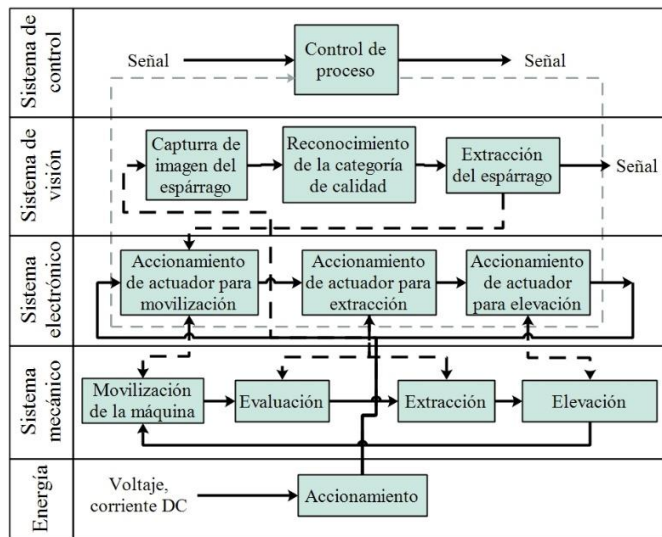


Fig. 1 Estructura de funciones.

Finalmente, en la etapa de control y navegación de la cosechadora, se determinaron los subsistemas encargados del funcionamiento para elaborar el diagrama de flujo del sistema de control. La integración de mecanismos innovadores de movilización, extracción, elevación y almacenamiento, junto con el sistema de radar y visión artificial, permite un acopio de

espárragos de manera más eficiente y una mayor calidad del producto. Esto se debe a que se realiza de manera autónoma, controlado por el hardware electrónico, que ejecuta toda la lógica programable según las señales digitales adquiridas. Asimismo, los componentes mecánicos incorporados están diseñados para funcionar de manera sutil, evitando daños y pérdidas durante el proceso.

La Fig. 1 muestra la estructura de funciones por la cual está compuesta la máquina cosechadora de espárragos, describiendo el control del proceso desde su accionamiento hasta su almacenamiento. Mientras que la Tabla 1 presenta las especificaciones técnicas iniciales de la máquina cosechadora.

TABLA I
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Especificaciones	
General	Tener un tamaño no mayor a 200x45x45
	Tener un peso no mayor a 150Kg
Mecánico	Las dimensiones están basadas al terreno.
	Debe acoplarse a la altura del espárrago de 25cm.
	Debe contar con mecanismos de movilización, sistema de radar, extracción, elevación y almacenamiento.
Electrónico	Señales eléctricas de 5V, 12V y 24V de
	Debe contar con circuito de potencia, circuito de control y Hardware.
Sistema de Control	Debe contar con un sistema de visión artificial
	Debe extraer los espárragos según las categorías de calidad de acuerdo con la NTP 011.109:2018

El requerimiento de energía está distribuido entre diversos componentes, como la Raspberry Pi, la cámara V2 Sony, los motores DC 1 y DC 2, y los servomotores. En el desarrollo de la investigación, se emplearon herramientas clave, como Autodesk Inventor para el diseño mecánico, Autodesk 3DS Max para la simulación 3D, Python para la programación de visión artificial, Raspberry Pi como plataforma de ejecución, y una cámara web para capturar imágenes de diferentes categorías de espárragos [9] [10] [11] [12] [13]. Estas herramientas desempeñaron un papel fundamental desde el diseño estructural hasta la implementación de la visión artificial, facilitando así la simulación completa del proceso de cosecha de la máquina.

A. Diseño de la máquina cosechadora

Para llevar a cabo el diseño de la máquina cosechadora, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los métodos de cosecha de espárragos, que incluyó análisis de la ayuda mecánica, cosechadoras no selectivas, cosechadoras selectivas y cosechadoras robóticas. Posteriormente, se procedió a identificar los mecanismos y sistemas esenciales que debe incorporar una cosechadora de espárragos.

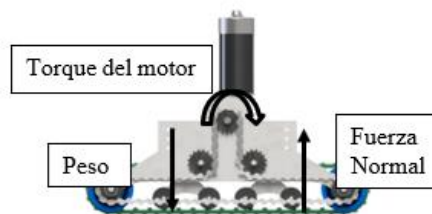


Fig. 2 Diagrama de cuerpo libre.

De esta manera, se logró identificar los siguientes componentes que formarán parte de la máquina: mecanismo de movilización, sistema radar, sistema de visión artificial, mecanismo de extracción, mecanismo de elevación y mecanismo de almacenamiento. Posteriormente, en el proceso de diseño mecánico, se tuvieron en cuenta las especificaciones técnicas obtenidas a través del estudio del terreno. Para determinar el torque y la velocidad del motor DC del mecanismo de movilización, se utilizaron los datos de la Fig. 2 y se aplicó la primera Ley de Newton mediante la ecuación 1.

$$\sum_{k=0}^n F_y = 0 \quad (1)$$

La determinación de la Fuerza normal se realiza mediante la aplicación la Ecuación 2:

$$F_N = m * g \quad (2)$$

donde:

F_N representa la fuerza normal, m es la masa del objeto, y g es la aceleración debido a la gravedad.

La obtención del Torque del motor se logra mediante la aplicación de la Ecuación 3:

$$\tau = F * d \quad (3)$$

donde:

τ representa el torque, F es la fuerza aplicada, y d es la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el eje de rotación.

La determinación de la velocidad del motor se lleva a cabo mediante la aplicación de la Ecuación 4.

$$i = \frac{N_1}{N_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (4)$$

donde:

i representa la relación de transmisión, N_1 y N_2 son las velocidades motriz y conducida, y Z_1 y Z_2 son el número de dientes motriz y conducida.

La velocidad del mecanismo de movilización se determina mediante la aplicación de la Ecuación 5.

$$V_t = W * r \quad (5)$$

donde:

V_t representa la velocidad del mecanismo, W es la velocidad angular, y r es el radio de rotación o la distancia desde el eje central hasta el punto de interés en el mecanismo.

La fuerza de fricción se determina mediante la aplicación de la Ecuación 6.

$$f = \mu * N \quad (6)$$

donde:

f es la fuerza de fricción, μ es el coeficiente de fricción, y N es la fuerza normal que actúa sobre el objeto en contacto.

La fuerza ejercida por un resorte se determina mediante la aplicación de la Ley de Hooke, expresada por la Ecuación 7.

$$F = k * \Delta x \quad (7)$$

Donde:

F es la fuerza del resorte, k es la constante del resorte (rigidez del resorte), y Δx es la deformación o cambio de la longitud del resorte desde su posición de equilibrio.

La determinación del esfuerzo cortante se realiza mediante la aplicación de la Ecuación 8.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Donde:

τ representa el esfuerzo cortante, F es la fuerza aplicada, y A es el área sobre el cual actúa la fuerza.

La determinación de la potencia mecánica se realiza mediante la aplicación de la Ecuación 9.

$$P = \tau * \omega \quad (9)$$

Donde:

P es la potencia mecánica, τ es el torque del motor, y ω es la velocidad angular del motor.

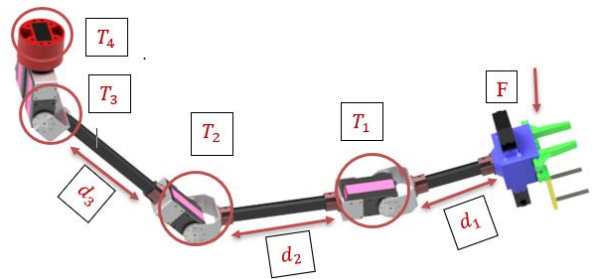


Fig. 3 Diagrama de fuerzas del manipulador esférico.

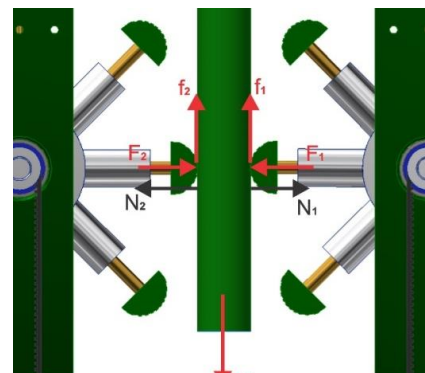


Fig. 4 Diagrama de cuerpo libre del mecanismo de elevación.

Posteriormente, se desarrolló el diagrama de fuerzas para los servomotores y robots servos correspondientes a cada grado de libertad en el mecanismo de extracción. De esta manera, utilizando los datos de la Fig. 3 y la Ecuación 3, se puede determinar los torques (T_1 , T_2 , T_3 y T_4) que constituyen el mecanismo de extracción. Posteriormente, se generó el diagrama de fuerzas en el mecanismo de elevación con el objetivo de realizar los cálculos correspondientes al resorte del rodillo.

De este modo, empleando los datos proporcionados en la Fig. 4 y las ecuaciones 6 y 7, se logró determinar la fuerza del resorte junto con su constante elástica. Finalmente, se efectuó el diagrama de fuerzas en la pinza del mecanismo de extracción. Utilizando los datos proporcionados en la Fig. 5 y aplicando las ecuaciones 3 y 8, se puede determinar el valor del esfuerzo cortante presente en las cuchillas de la pinza.

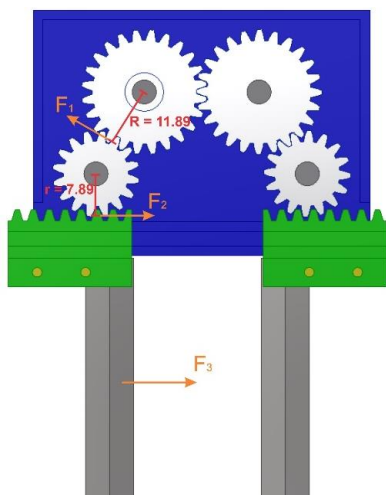


Fig. 5 Diagrama de fuerzas de la pinza

El diseño mecánico de la máquina cosechadora de espárragos en Autodesk Inventor se compone de varios sistemas interconectados. El mecanismo de movilización, equipado con ruedas tipo orugas y motores DC, permite el desplazamiento en terrenos complejos. El sistema de radar y visión artificial identifica y localiza los espárragos, mientras que el mecanismo de extracción, elevación y almacenamiento los recolecta y almacena de manera eficiente.

El funcionamiento general inicia con la movilización de la máquina, seguida por el reconocimiento y ubicación de los espárragos a través de la cámara y el sistema de radar. Una vez identificados, los manipuladores esféricos extraen los espárragos, los elevan hacia la parte superior y los depositan en el mecanismo de almacenamiento. La máquina se detiene automáticamente después de cada reconocimiento.

La Fig. 6 presenta el ensamblaje de los mecanismos, y se procedió a crear una animación 3D en 3DS Max para simular el proceso de recolección. La simulación reveló que la máquina cosechadora tarda 15 segundos en recolectar un espárrago. Este diseño y simulación integral demuestran la eficacia y funcionalidad de la máquina cosechadora de espárragos verdes.

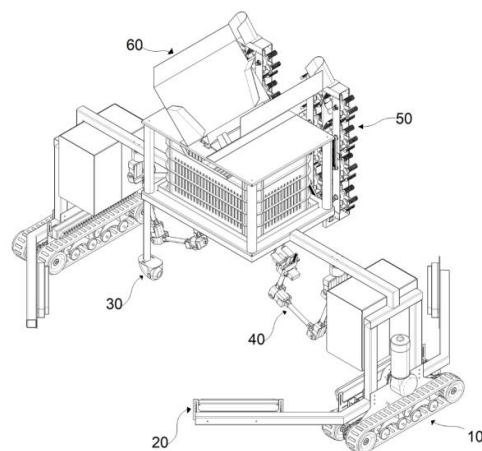


Fig. 6 Ensamblaje de la máquina cosechadora de espárragos verdes.

B. Visión artificial para la detección de espárragos verdes

La implementación de visión artificial para la detección de espárragos verdes se realiza en tres etapas distintas. En primer lugar, se elabora un diagrama de flujo que guía la evaluación de los espárragos según su calidad. Posteriormente, se lleva a cabo la programación del código en Python, dividiéndolo en tres fases: construcción de la base de datos, procesamiento de imágenes y entrenamiento de la data como se presenta en la Fig. 7.

En la fase de base de datos, se clasifican los espárragos en tres categorías de calidad (Extra, I, II), estableciendo criterios específicos para cada una. La fase de procesamiento de imágenes utiliza filtros y máscaras, como el filtro de reconocimiento y la determinación de rangos, aplicados a través de librerías como OpenCV y numpy. Esta etapa incluye la eliminación de ruido, detección de contornos y obtención de parámetros clave como área, altura y perímetro.

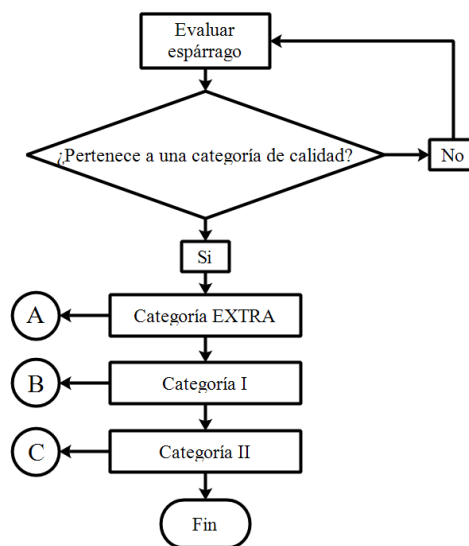


Fig. 7 Diagrama de flujo de la evaluación del espárrago.

El filtro de reconocimiento se basa en la escala HSV, identificando tonos, saturación y brillo, y se utiliza para discriminar el fondo del objetivo. La determinación de rangos establece los límites de color verde para la detección. Se

aplican filtros de ruido para limpiar la imagen y se detectan los contornos de los espárragos, los cuales son dibujados en la imagen real (Fig. 8). Finalmente, se obtienen parámetros importantes del contorno, como área y altura. Este enfoque integral de visión artificial permite evaluar y clasificar eficientemente los espárragos verdes según su calidad, contribuyendo a un proceso de cosecha más preciso y eficaz.



Fig. 8 Filtro de reconocimiento.

En el entrenamiento de la data se llevó a cabo la preparación de la base de datos y el procesamiento de imágenes utilizando la información previamente mencionada. De esta manera, se procedió al acondicionamiento para realizar el entrenamiento de la data de los espárragos mediante el uso de la cámara web, la Raspberry Pi y una laptop, como se aprecia en la Fig. 9. El método de comunicación se realizó de forma inalámbrica mediante la IP del dispositivo electrónico, lo que permitió el acceso a la interfaz de su sistema operativo a través de la laptop.

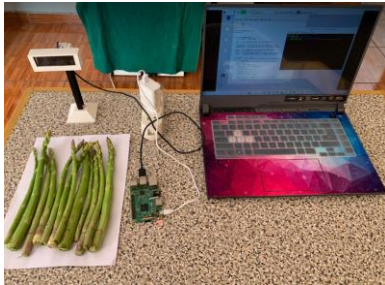


Fig. 9 Acondicionamiento de la cámara web y la Raspberry Pi.

B. Control y navegación de la máquina cosechadora

En esta sección, se ha desarrollado la estructura operativa de la máquina cosechadora de espárragos, detallando los sistemas y dispositivos electrónicos involucrados en su funcionamiento. La Fig. 10 ilustra la configuración de la estructura de control, simulando el proceso de recolección de espárragos. Además, se identificaron los subsistemas responsables de las operaciones para elaborar el diagrama de flujo del sistema de control, que incluyen: Encendido del sistema, movilización, evaluación de espárragos, categorización de calidad, extracción y almacenamiento. La Fig. 11 presenta el diagrama de flujo del sistema de control del funcionamiento de la máquina, destacando los subsistemas vinculados a los mecanismos respectivos.

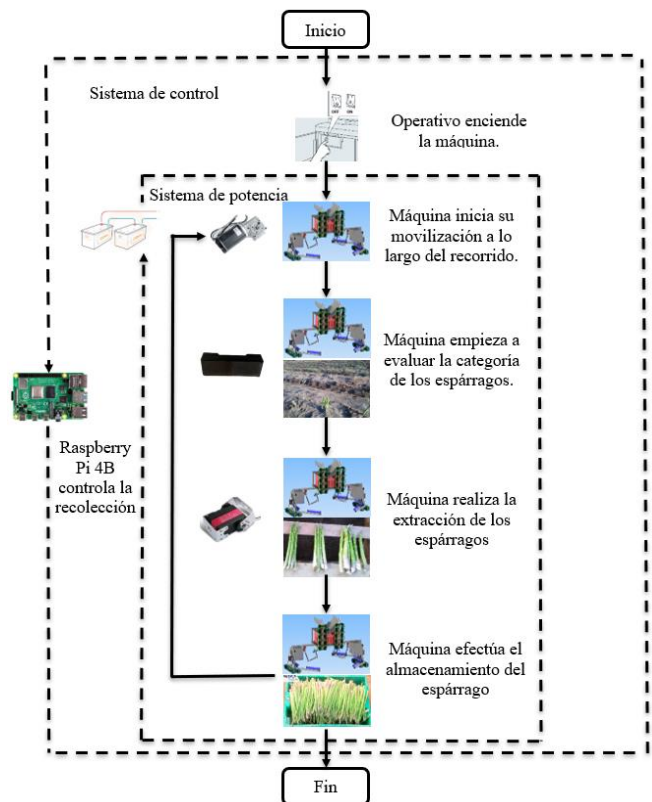


Fig. 10 Estructura de funcionamiento de la máquina cosechadora.

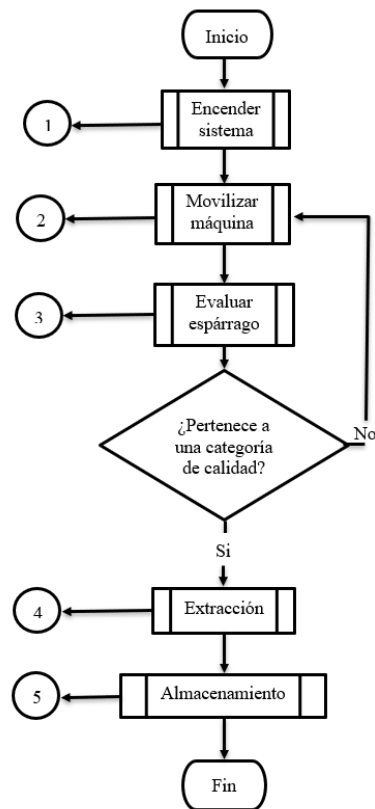


Fig. 11 Diagrama de flujo del sistema de control.

III. RESULTADOS

A continuación, se presenta el proceso de entrenamiento de la data para las distintas categorías de calidad, considerando los parámetros (PR) de Área (A), altura (H) y perímetro (P) en diversas posiciones con un ángulo de variación de 45°. La Tabla II, III y IV muestran los resultados del entrenamiento en unidades de píxeles por tipo de muestra (M 1, 2, 3, n). De esta manera, para el parámetro de Área se toma en cuenta la cantidad de píxeles que ocupa un espárrago, para el parámetro de altura se toma en cuenta la cantidad de píxeles desde la base del espárrago hasta la parte superior del mismo, para el parámetro de Perímetro se toma en cuenta la cantidad de píxeles que rodean al espárrago. De esta forma, se pueden determinar los valores máximos y mínimos de área, altura y perímetro de cada categoría de calidad de espárragos.

TABLA II
ENTRENAMIENTO CATEGORÍA EXTRA

	PR	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
M 1	A:	4244	4269	4276	4200	4271	4259	4320	4350
	H:	250	250	250	247	249	250	251	250
	P:	525	528	527	520	528	525	526	530
M 2	A:	3920	3900	3880	3850	3890	3910	3910	3920
	H:	244	244	244	240	245	245	245	246
	P:	526	526	527	522	527	526	526	527
M 3	A:	4400	4450	4455	4380	4460	4465	4466	4470
	H:	268	268	266	262	266	268	268	268
	P:	565	570	566	550	572	572	572	572

TABLA III
ENTRENAMIENTO CATEGORÍA I

	PR	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
M 1	A:	2680	2686	2695	2620	2690	2684	2689	2678
	H:	225	225	225	222	225	226	225	225
	P:	525	528	527	520	528	525	526	530
M 2	A:	2940	2952	2946	2935	2945	2950	2954	2949
	H:	222	222	222	220	222	222	223	222
	P:	462	467	459	453	465	461	469	464
M 3	A:	2730	2745	2737	2724	2738	2742	2736	2748
	H:	230	229	229	226	229	229	229	229
	P:	478	486	481	475	483	487	479	480

TABLA IV
ENTRENAMIENTO CATEGORÍA II

	PR	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
M 1	A:	2175	2181	2186	2172	2177	2182	2184	2176
	H:	205	205	205	200	205	205	205	205
	P:	438	434	439	430	436	441	437	440
M 2	A:	2226	2232	2229	2221	2231	2227	2230	2234
	H:	210	210	210	208	210	211	210	210
	P:	446	441	447	438	444	439	443	448
M 3	A:	2059	2057	2062	2050	2061	2056	2064	2060
	H:	197	197	197	195	197	197	197	197
	P:	413	408	415	405	410	414	409	412

A. Sistema mecánico

Mediante los valores emitidos por el programa Autodesk Inventor como: peso, diámetro y radios de las piezas elaboradas, se obtuvo como resultado el torque de cada actuador correspondiente al mecanismo de movilización, mecanismo de extracción y mecanismo de elevación. Además, se determinó la velocidad tangencial del mecanismo de movilización con el cual se trasladará la máquina cosechadora durante su recorrido.

TABLA V
ANÁLISIS DE TORQUES, VELOCIDAD TANGENCIAL, ESFUERZO CORTANTE Y CONSTANTE DE RESORTE

PARAMETROS	VALOR TEORICO	VALOR REAL
------------	---------------	------------

Torque Motor DC 1	41.21 N.m	50 N.m
Torque Motor DC 2	1.46 N.m	5 N.m
Torque RobotServo 1	9.79 Kg.cm	15 Kg.cm
Torque RobotServo 2	28.25 Kg.cm	35 Kg.cm
Torque RobotServo 3	60.57 Kg.cm	70 Kg.cm
Torque RobotServo 4	1.366 Kg.cm	11 Kg.cm
Velocidad Tangencial	0.26 m/s	0.30 m/s
Esfuerzo cortante	54643.19 N/m ²	54643.19 N/m ²
Constante de resorte	50 N/m	50 N/m

La Figura 12 muestra una vista isométrica en 3D donde se aprecia la máquina cosechadora y sus diferentes mecanismos: mecanismo de movilización, el cual consta de dos ruedas oruga impulsada cada uno por un motor DC; mecanismo de extracción, que contiene dos manipuladores esféricos y un sistema de cuchillas cada uno para la extracción del espárrago; mecanismo de elevación, el cual contiene una serie de rodillos ordenados simétricamente e impulsados por un motor para elevar cada espárrago hacia la parte superior de la máquina. En la Fig. 13 se muestra la animación 3D del funcionamiento del mecanismo de movilización, del sistema de visión artificial y del sistema radar.

La máquina cosechadora empieza su trayecto hasta que la cámara detecta un espárrago donde el sistema de visión artificial efectúa el reconocimiento de la categoría de calidad del espárrago para luego determinar las coordenadas del espárrago mediante el sistema de radar. En la Fig. 14 se muestra el funcionamiento del mecanismo de extracción, el mecanismo de elevación y el mecanismo de almacenamiento. Luego de obtener las coordenadas del espárrago, el manipulador comienza a extraer el espárrago para luego llevarlo hasta el mecanismo de elevación, donde este lo desplaza hasta la parte superior de la máquina para ser depositado en una jaba cosechadora.

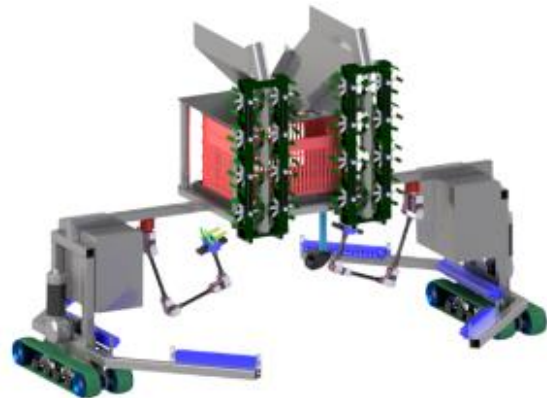


Fig. 12 Diseño mecánico de la máquina cosechadora de espárragos.

Asimismo, mediante la simulación se pudo obtener el tiempo de cosecha de un espárrago. De esta manera, se comparó con el tiempo de cosecha de un robot recolector de espárragos coordinado con un sensor de visión 3D [6] y con un robot recolector de espárragos [14]. En la Fig. 15 se muestra la comparación del tiempo de cosecha de las tres máquinas. Se observa que el robot recolector tarda 7.4 segundos en cosechar un espárrago, mientras que el robot con sensor de visión 3D tarda 11.9 segundos.

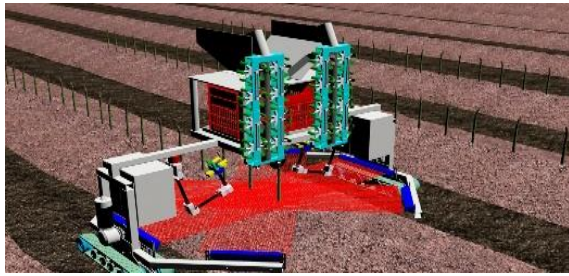


Fig. 13 Animación 3D de la máquina cosechadora de espárragos.

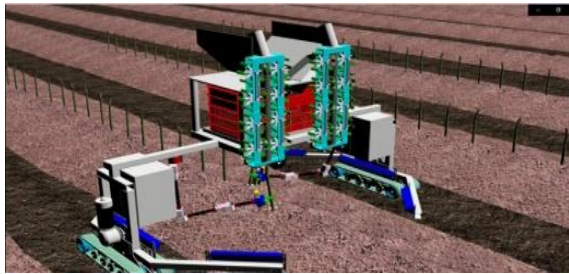


Fig. 14 Animación 3D de la máquina cosechadora de espárragos.

Además, nuestra máquina recolectora, según la simulación en un entorno virtual, tardaría 15 segundos en cosechar un espárrago con un solo brazo. Sin embargo, al contar nuestra máquina recolectora con dos brazos, esta tardaría 7.5 segundos en recolectar dos espárragos. De esta manera, se puede concluir que el tiempo de cosecha de un espárrago utilizando ambos brazos sería de 7.5 segundos.

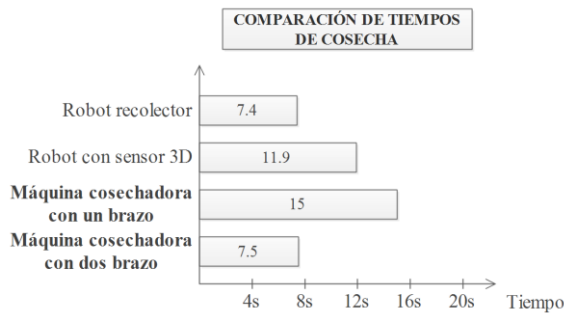


Fig. 15 Comparación de los tiempos de cosecha.

De tal forma, el mecanismo de movilización está conformado por ruedas tipo oruga que permiten desplazarse por terrenos complejos. La cadena está acoplada a un juego de piñones que tiene una relación de transmisión 16/10, obteniendo una velocidad conducida del motor de 50 rpm, y requiere un torque de 41.21 N.m y una velocidad tangencial de 0.26 m/s. A su vez, debe soportar una carga máxima de 125 kg.

De tal manera, el mecanismo de extracción está compuesto por manipuladores esféricos que permiten la extracción y el traslado de los espárragos. El primer grado de libertad está acoplado a un soporte circular que, mediante un servomotor, permite obtener un giro de 180°, y requiere un torque de 1.366 kg/cm. El segundo grado de libertad está acoplado a un eslabón unido a unos soportes que, mediante dos robots-servos, permite obtener un giro de 180°, con un

torque de 60.57 kg/cm. El tercer grado de libertad está acoplado a un eslabón unido a unos soportes que, mediante un robot-servo, permite obtener un giro de 90°, con un torque de 28.25 kg/cm.

El cuarto grado de libertad está acoplado a un eslabón unido a unos soportes que, mediante un robot-servo, permite obtener un giro de 180°, con un torque de 9.79 kg/cm. Asimismo, está compuesto por una pinza cortadora que permite el agarre, desagarre y corte del espárrago. Los servomotores están acoplados a unas cuchillas y un mecanismo de engranajes con relación de transmisión 3/2, teniendo un giro de 90°, requiriendo una fuerza de 12.36 N y un esfuerzo cortante de 54643.19 N/m², permitiendo la apertura, sujeción y cierre de la pinza.

Por otro lado, el mecanismo de elevación está compuesto por grupos de rodillos de goma que giran a una velocidad de 6.28 rad/s, lo que permite la elevación de los espárragos hacia la parte superior de manera sutil. El rodillo de goma está acoplado a una carcasa circular que contiene varillas y resortes con una constante de compresión de 50 N/m, obteniendo un torque de 0.183 N.m y una velocidad de elevación de 0.075 m/s. Dichos rodillos de goma están unidos entre sí mediante una correa dentada de transmisión, obteniendo una fuerza de transmisión de 119.88 N y finalmente están conectados mediante fajas de transmisión al motor DC 2, obteniendo un torque de 1.46 N.m.

B. Sistema mecánico

a) Accionamiento de movilización: El funcionamiento electrónico consiste en que el controlador Raspberry Pi envía una señal eléctrica a través de su pin GPIO al módulo de potencia del motor DC 1, compuesto por transistores, diodos y relés, permitiendo el funcionamiento de las ruedas oruga y la movilización de la máquina. La estrategia de control está basada en un diagrama de flujo que indica que cuando el sistema de visión artificial detecte espárragos, se detenga para poder efectuar la extracción y, al finalizar, continúe con su recorrido respectivo. En caso contrario, si los sensores de proximidad IR detectan algún movimiento en la parte posterior o anterior de la máquina, enviarán una señal eléctrica al controlador para detener el funcionamiento.

b) Accionamiento de extracción: El control electrónico consiste en un sistema radar que, mediante grupos de bloques de sensores láser y LDR, permite la ubicación del espárrago mediante coordenadas cartesianas. De esta manera, cada vez que la señal del láser sea obstruida por el espárrago, el controlador Raspberry Pi enviará una señal eléctrica al módulo PCA 9685, que controla los robot-servos y servomotores, permitiendo el accionamiento de los manipuladores esféricos para posicionarse cerca del espárrago. La pinza cortadora permitirá su agarre, corte y desagarre para luego trasladarlo hacia el mecanismo de elevación.

c) Accionamiento de elevación: El funcionamiento electrónico se activa cuando el interruptor límite de la pinza cortadora se activa, enviando una señal eléctrica al módulo de potencia del motor DC 2 mediante el controlador Raspberry Pi. Esto permite el accionamiento de los grupos de rodillos circulares impulsados por el motor DC 2 de 12 V y 2.2 A, elevando los espárragos a través de un tubo con cortes semicirculares. Dichos tubos cuentan con un sensor IR en la

parte superior, lo que permite apagar el sistema de elevación cuando el espárrago ha llegado a la parte superior del tubo.

B. Sistema de visión

Finalizado el entrenamiento de la data de los espárragos y obtenidos los parámetros requeridos, como se muestra en la Tabla II, Tabla III y Tabla IV, se procedió a analizar los valores para determinar un rango predeterminado para cada categoría de calidad. Luego se procedió a llevar a cabo las pruebas de detección de los espárragos según su categoría de calidad. En consecuencia, las Fig. 16, 17 y 18 muestran el reconocimiento de la categoría EXTRA, categoría I y categoría II, respectivamente.

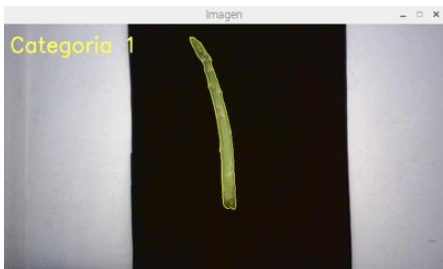


Fig. 16 Reconocimiento en la categoría EXTRA

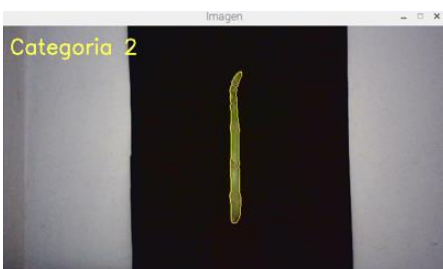


Fig. 17 Reconocimiento en la categoría I.

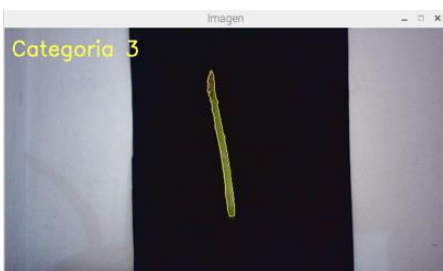


Fig. 18 Reconocimiento en la categoría II.

Asimismo, se incorporó un contador y pilotos de luz para la clasificación de las categorías de calidad al código de programación, teniendo como funcionalidad incrementar en una unidad cada vez que reconoce una categoría de calidad, como se muestra en la Fig. 19. Finalmente, se llevó a cabo el análisis de las pruebas de reconocimiento. De esta manera, mediante las cantidades detectadas y no detectadas, se pudo determinar la precisión en el reconocimiento de los espárragos verdes. La Tabla VI señala que, para la categoría Extra, categoría I y categoría II, se utilizaron 100 muestras de espárragos, de las cuales 95 fueron detectadas para la categoría Extra, 90 para la categoría I y 85 para la categoría II.

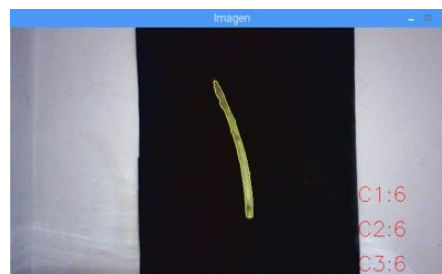


Fig. 19 Contador de categorías.

TABLA VI
ANÁLISIS DE PRUEBAS DE RECONOCIMIENTO DE ESPÁRRAGOS.

Categorías	Muestras	Detección	No detección	% Precisión
Categoría Extra	100	95	5	95
Categoría I	100	90	10	90
Categoría II	100	85	15	85

Mediante el análisis del reconocimiento, se confirmó la efectividad de la aplicación de la visión artificial en función de la categoría de calidad correspondiente. Los resultados arrojaron una precisión del 95 % para la categoría EXTRA, un 90 % para la categoría I y un 85 % para la categoría II. Estos valores coinciden con la investigación [3], donde se aplicó visión artificial para clasificar espárragos frescos según su color y la punta bastón, obteniendo una precisión del 95 %. Esto respalda la eficacia de la visión artificial en el reconocimiento de espárragos verdes.

Se demuestra que una ventaja del diseño propuesto es la integración del sistema de visión artificial, que logra resultados satisfactorios en la clasificación de espárragos según su calidad. Además, la incorporación de dos manipuladores esféricos acelera el proceso de cosecha en comparación con trabajos anteriores. No obstante, una desventaja del diseño es la falta de iluminación en el sistema de visión artificial, lo cual se identifica como un área de mejora crucial, dado que la iluminación es esencial para el correcto funcionamiento de la visión artificial.

El entorno virtual difiere significativamente del entorno real y las condiciones de campo, donde terrenos accidentados y variaciones climáticas juegan un papel clave [5] Por ello, se planifican futuras investigaciones para evaluar la eficiencia de la máquina recolectora en entornos reales y condiciones de campo. Además, se contempla mejorar el diseño mediante la incorporación de iluminación en la estructura del sistema de visión artificial para optimizar el filtrado de las imágenes.

La captura de imágenes involucra la detección en tiempo real de los espárragos mediante la cámara, que realiza el reconocimiento basándose en las categorías de calidad. La cámara envía las capturas al puerto de comunicación de la Raspberry Pi, donde el algoritmo ejecuta una serie de acciones, como el Filtro de reconocimiento, la determinación de rangos, el filtro de ruido, el filtro de detección de contornos, la digitalización de contornos y la obtención de parámetros de los espárragos.

El algoritmo de reconocimiento adquiere las imágenes y transforma los aspectos negativos de los espárragos mediante

programación y librerías de procesamiento de imágenes. La transformación incluye la conversión de RGB a escala HSV, establecimiento de rangos de color verde, eliminación de ruido y creación de matrices, detección de contornos para obtener características como espesor, posición y color, digitalización de contornos y obtención de parámetros mediante funciones de OpenCV y NumPy. Tras el procesamiento, el algoritmo determina la categoría del espárrago (EXTRA, I y II) para la extracción posterior.

La extracción se inicia tras el reconocimiento del espárrago, donde la Raspberry Pi envía una señal eléctrica al mecanismo de extracción. Los manipuladores esféricos y la pinza cortadora realizan la extracción según los parámetros obtenidos en el algoritmo. En caso de no cumplir con los parámetros, la máquina continúa su recorrido en busca de espárragos que cumplan con las categorías de calidad.

El sistema de control comienza la movilización y, mediante la cámara, reconoce los espárragos según su categoría, enviando una señal para detener la movilización. Después del reconocimiento, se envía una señal al sistema de radar, que determina la ubicación del espárrago y emite las coordenadas cartesianas. Luego, se activan los manipuladores esféricos para extraer los espárragos, trasladándolos al mecanismo de elevación, donde ascienden mediante un tubo hacia la parte superior y entran al mecanismo de almacenamiento. El depósito en la jaba cosechadora se realiza mediante la pirámide invertida y el rodillo de aspas.

En términos de eficiencia energética, se espera que el motor de movilización alcance una eficiencia del 90 %, y el consumo total de energía durante un ciclo de recolección se estima en 280.93 vatios-hora.

IV. CONCLUSIONES

En este informe se detalla el diseño de una máquina cosechadora para la recolección de espárragos verdes mediante el uso de visión artificial. Se presenta la configuración mecánica de la máquina, junto con sus mecanismos y sistemas asociados. Además, a través de simulaciones virtuales, se determinó que el tiempo de cosecha por espárrago es de 7.5 segundos.

La eficacia de la visión artificial para reconocer las diferentes categorías de calidad de los espárragos se demostró con una precisión del 95 % para la categoría EXTRA, un 90 % para la categoría I y un 85 % para la categoría II. Se concluye que, a medida que aumenta la calidad del espárrago fresco, la precisión del reconocimiento también mejora.

El proceso de cultivo de los espárragos frescos, desde la siembra hasta la comercialización, requiere una atención meticulosa. Por lo tanto, el desarrollo de una máquina cosechadora con visión artificial para el reconocimiento y clasificación de los espárragos según su calidad puede impulsar una mejora en la exportación de estos productos, gracias a una elevación en su calidad.

Se espera que en el futuro se pueda implementar de manera efectiva, en condiciones reales de campo, máquinas o robots recolectores de espárragos verdes equipados con visión artificial. Esto, a su vez, contribuirá a mejorar la calidad de los productos destinados a la exportación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Privada del Norte (UPN) por el soporte en parte del presente trabajo de titulación.

REFERENCIAS

- [1] "ANUARIO ESTADÍSTICO 2013." Accessed: Jul. 23, 2023. [Online]. Available: <http://www.aduanet.gob.pe/aduanas/informae/anuario13.html>
- [2] C. Pretell-Vásquez et al., "Effect of ozone and storage time on the physicochemical characteristics of minimally processed green asparagus (*Asparagus officinalis* L.)," *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol. 21, no. 3, 2020, doi: 10.21930/RCTA.VOL21_NUM3_ART:1506.
- [3] R. A. León León, N. D. Castillo Alva, and X. A. Soto Lozada, "Sistema de Visualización Artificial de Clasificación de Espárragos en una Empresa Procesadora y Exportadora de Espárragos Frescos," in *Memorias de la Décima Tercera Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informática y Cibernética: CICIC 2023*, International Institute of Informatics and Cybernetics, Mar. 2023, pp. 192–197. doi: 10.54808/cicic2023.01.192.
- [4] "IPEH ++ Instituto Peruano del Espárrago y Hortalizas ++." Accessed: Jul. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.ipeh.org.pe/normatividad/>
- [5] D. Chen, Q. Zhang, S. Wang, and D. L. Lawrence, "Current status and technical challenges of asparagus mechanical harvesting Written for presentation at the 2010 ASABE Annual International Meeting Sponsored by ASABE."
- [6] N. Irie, N. Taguchi, T. Horie, and T. Ishimatsu, "Asparagus Harvesting Robot Coordinated with 3-D Vision Sensor."
- [7] M. Peebles, S. H. Lim, M. Duke, and B. McGuinness, "Investigation of Optimal Network Architecture for Asparagus Spear Detection in Robotic Harvesting," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 2019, pp. 283–287. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.535.
- [8] "Metadatos: Diseño de un sistema robótico para la clasificación automatizada de espárragos empleando visión artificial por imágenes." Accessed: Jul. 23, 2023. [Online]. Available: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UTPD_189b0b7860716f5f186c0e7762764213/Details
- [9] G. ARRÁZOLA, F. VILLADIEGO, A. ALVIS, G. ARRÁZOLA, F. VILLADIEGO, and A. ALVIS, "Mechanical properties and simulation of finite element firmness in Carica papaya L. Tainung F1 cultivated on the high Sinu (Cordoba-Colombia)," *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 15, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.17584/RCCCH.2021V15I1.10809.
- [10] "Autodesk 3ds Max Software | Get Prices & Buy Official 2024." Accessed: Jul. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=3DSMAX>
- [11] I. Challenger-Pérez, Y. Díaz-Ricardo, and R. A. Becerra-García, "El lenguaje de programación Python," *Ciencias Holguín*, vol. XX, no. 2, pp. 1–13, 2014, Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181531232001>
- [12] M. M. Miranda-Ramos, J. O. Hallon, J. D. Suriaga, M. M. Miranda-Ramos, J. O. Hallon, and J. D. Suriaga, "Sistema de cámaras para la detección de mascarillas con Python y Raspberry PI con comunicación inalámbrica a través del sistema global de comunicación móvil (GSM)," *Información tecnológica*, vol. 33, no. 3, pp. 23–30, Jun. 2022, doi: 10.4067/S0718-07642022000300023.
- [13] D. Delgado León, "Diseño de un sistema de adquisición de imágenes basado en cámaras web USB y hardware reconfigurable," *Revista Científica de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, ISSN-e 0258-5944, Vol. 38, No. 2, 2017, págs. 1-11, vol. 38, no. 2, pp. 1–11, 2017, Accessed: Jul. 29, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6063852&info=resumen&idioma=ENG>
- [14] N. Irie and N. Taguchi, "Asparagus Harvesting Robot."