

## Diseño y Construcción de un Robot Humanoide Sentinel XVA, Ayacucho-Perú

## Design and Construction of a Sentinel XVA Humanoid Robot, Ayacucho-Peru

Jose Luis Huayanay Villar<sup>1</sup>; Fernando Beizaga<sup>1</sup>, Cristhian Sotelo<sup>1</sup>, Kevin Ayala<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación LynxSpace - Villa Automation SAC-Ruc: 20610009400, Ayacucho, Perú.  
[villaautomationeirl@gmail.com](mailto:villaautomationeirl@gmail.com), [sheylayas@gmail.com](mailto:sheylayas@gmail.com) / <https://orcid.org/orcid:0000-0001-8389-7922>  
<https://orcid.org/0009-0005-3759-488X>

### \* Correspondencia:

Jose Luis Huayanay Villar  
[villaautomationeirl@gmail.com](mailto:villaautomationeirl@gmail.com)

### Resumen

Este artículo presenta el diseño, modelamiento, construcción e implementación del robot humanoide Sentinel XVA, desarrollado en Ayacucho-Perú por Villa Automation SAC. El sistema implementa el modelo dinámico LIPM (Linear Inverted Pendulum Model) para la estabilización del Centro de Masa (CoM), control óptimo mediante LQR (Linear Quadratic Regulator) y cinemática inversa analítica para las piernas en un esquema bípedo planar. Se describe la formulación dinámica en espacio de estados, el diseño del controlador basado en la ecuación algebraica de Riccati y la implementación de trayectorias de marcha periódica. Los resultados muestran estabilidad asintótica del CoM y viabilidad para futura implementación en hardware físico. Se desarrolla la formulación matemática completa del sistema, incluyendo el modelo dinámico continuo, diseño del controlador óptimo, integración numérica y modelado geométrico 3D del robot. El presente proyecto se desarrolla en los laboratorios de Villa Automation, tanto para la implementación y validación.

**Palabras clave:** Robot humanoide, LIPM, ZMP, Control LQR, Locomoción bípeda.

### Abstract

This article presents the design, modeling, construction, and implementation of the Sentinel XVA humanoid robot, developed in Ayacucho, Peru, by Villa Automation SAC. The system implements the Linear Inverted Pendulum Model (LIPM) for center of mass (CoM) stabilization, optimal control using a Linear Quadratic Regulator (LQR), and analytical inverse kinematics for the legs in a planar bipedal configuration. The dynamic state-space formulation, the controller design based on the Riccati algebraic equation, and the implementation of periodic walking trajectories are described. The results demonstrate asymptotic CoM stability and feasibility for future implementation in physical hardware. The complete mathematical formulation of the system is developed, including the continuous dynamic model, optimal controller design, numerical integration, and 3D geometric modeling of the robot. This project was developed in the Villa Automation laboratories for both implementation and validation.

**Keywords:** Humanoid robot, LIPM, ZMP, LQR control, bipedal locomotion.

34

## 35 1 Introducción

36 El desarrollo de robots humanoides constituye uno de los mayores desafíos en la robótica moderna debido a la  
37 complejidad dinámica, la alta dimensionalidad del sistema y la necesidad de control en tiempo real bajo  
38 restricciones físicas. La locomoción bípeda requiere resolver problemas de estabilidad dinámica, control no  
39 lineal y generación de trayectorias coordinadas.

40 A nivel internacional, uno de los hitos más importantes en robótica humanoide fue el desarrollo del robot  
41 ASIMO por la empresa Honda, que demostró locomoción autónoma estable mediante control basado en el  
42 concepto de ZMP (Zero Moment Point). Posteriormente, el robot Atlas, desarrollado por Boston Dynamics,  
43 introdujo avances significativos en control dinámico bajo perturbaciones y movimientos altamente dinámicos  
44 como saltos y carreras.

45 Desde el punto de vista académico, los trabajos de Shuuji Kajita establecieron formalmente el Modelo Lineal  
46 de Péndulo Invertido (LIPM), ampliamente utilizado para generación de patrones de marcha en robots bípedos.  
47 Asimismo, la teoría de control óptimo desarrollada por Rudolf Kalman y posteriormente extendida al Regulador  
48 Cuadrático Lineal (LQR), ha sido fundamental en la estabilización de sistemas dinámicos multivariables.

49 En América Latina, la investigación en robótica humanoide ha crecido progresivamente, aunque con  
50 limitaciones presupuestales y de infraestructura. En el Perú, los desarrollos se han concentrado principalmente  
51 en robots móviles y manipuladores industriales. Instituciones como la Universidad Nacional de Ingeniería y la  
52 Pontificia Universidad Católica del Perú han desarrollado investigaciones en control automático y robótica  
53 móvil, pero la construcción de un humanoide de escala real sigue siendo limitada.

54 El proyecto Sentinel XVA, desarrollado en Ayacucho por Villa Automation SAC, representa uno de los primeros  
55 esfuerzos regionales orientados a la construcción de una plataforma humanoide de gran escala con enfoque en:

56 Exploración en entornos extremos

57 Automatización industrial

58 Aplicaciones aeroespaciales

59 Investigación científica

60 Este trabajo busca sentar bases científicas sólidas para el desarrollo de robótica humanoide en el sur del Perú,  
61 integrando modelado matemático, simulación y diseño estructural.

62

63

64

## 65 2 Materiales y métodos

66 Se diseñó del robot colaborativos con múltiples grados de libertad, utilizando motores de alta potencia como  
67 paso paso y servomotores para cada articulación y sensores para la detección de objetos y obtención de datos de  
68 parámetros ambientales, controladores robustos y actuadores. Se implementa un control PI y predictivo que

69 anticipa el error futuro y ajusta la posición de cada articulación para mejorar la precisión del movimiento. Se  
70 realizaron pruebas experimentales en entornos agrícolas y sistemas críticos para evaluar el rendimiento del  
71 sistema.

## 72 Figura 1

73 Robot colaborativo RB-VA03 y RB-VA04 para aplicaciones en la Agricultura y Defensa



74

75 *Nota.* En la figura 1, se muestra la arquitectura del robot colaborativo RB-VA03 (izquierda) y RB-  
76 VA04 (derecha), con chasis y móvil de cuatro ruedas, y un brazo de seis grados de libertad metálico  
77 de color negro, una pinza en la parte superior para diferentes aplicaciones y tanques de pulverización.

## 78 2.2 Modelo dinámico general del robot humanoide

79 En este capítulo se desarrolla el modelo dinámico del robot humanoide considerando el método de  
80 Lagrange y modelo cinemático y el péndulo invertido como aproximación simplificada. Para un  
81 cuerpo rígido considérese la siguiente ecuación de la energía cinética:

$$82 \quad T = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}\omega^T I \omega$$

83 Donde  $v$  = velocidad lineal del centro de masa,  $\omega$  = velocidad angular,  $I$  = tensor de inercia. Es un  
84 sistema multicuerpo articulado que posee entre 28 a 32 grados de libertad normalmente, por ello  
85 definimos el vector estado:

$$86 \quad q = [x_b \ y_b \ z_b \ \phi \ \theta \ \varphi \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ \dots \ q_n]$$

87 Donde:

88 Primeros los 6 base flotante (posición + orientación) y las restantes articulaciones  $q_i$ , donde las  
89 velocidades en función del Jacobiano relaciona velocidades articulares con velocidades cartesianas.

$$90 \quad v_i = J_{v_i}(q)\dot{q}$$

$$91 \quad \omega_i = J_{\omega_i}(q)\dot{q}$$

92 Donde  $J_{v_i}$  es el jacobiano lineal y  $J_{\omega_i}$  jacobiano angular y  $q$  = vector de coordenadas articulares. Luego  
93 sustituimos en la energía cinética para un eslabón  $i$ .

$$94 \quad T_i = \frac{1}{2}m_i(J_{v_i})^T(J_{v_i}\dot{q}) + \frac{1}{2}(J_{\omega_i}\dot{q})^T I (J_{\omega_i}\dot{q})$$

95 Luego reordenamos términos

$$96 \quad T_i = \frac{1}{2}\dot{q}^T(m_i J_{v_i}^T J_{v_i} + J_{\omega_i}^T I_i J_{\omega_i})\dot{q}$$

97 Luego sumando todos los eslabones del robot humanoid

$$98 \quad T_i = \frac{1}{2}\dot{q}^T\left(\sum_i^n m_i J_{v_i}^T J_{v_i} + J_{\omega_i}^T I_i J_{\omega_i}\right)\dot{q}$$

99 Si

$$100 \quad M(q) = \sum_i^n m_i J_{v_i}^T J_{v_i} + J_{\omega_i}^T I_i J_{\omega_i}$$

101 Entonces la energía de la cinética total es:

$$102 \quad T = \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q}$$

103 Por otro lado la energía potencial para un eslabón es

$$104 \quad V_i = m_i g h_i(q)$$

105 Entonces a la suma total será:

$$106 \quad V_i = \sum_i^n m_i g h_i(q)$$

107 Entonces el lagrangiano será de la forma:

$$108 \quad L(q, \dot{q}) = T - V$$

109 Luego sustituyendo

$$110 \quad L = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - \sum_i^n m_i g h_i(q)$$

111 Entonces aplicando la ecuación de ecuación de Euler-lagrange

$$112 \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial}{\partial q_i} (L) = \tau_i$$

$$113 \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \left( \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - \sum_i^n m_i g h_i(q) \right) \right) - \frac{\partial}{\partial q_i} \left( \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - \sum_i^n m_i g h_i(q) \right) = \tau_i + \beta \tau_1$$

114 Entonces para la función de salto

$$115 \quad \beta \tau_1$$

116 entonces

$$117 \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \left( \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial q_i} \left( - \sum_i^n m_i g h_i(q) \right) = \tau_i + \beta \tau_1$$

$$118 \quad M(q) \ddot{q} + \sum_i^n m_i g \dot{q}_i = \tau_i + \beta \tau_1$$

$$119 \quad M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \tau_i + \beta \tau_1$$

120

## 121 2.2 Estabilidad y Punto de Momento Cero (ZMP)

122 El criterio del Punto de Momento Cero (ZMP) establece que la estabilidad dinámica se mantiene si la  
123 resultante de momentos respecto al suelo es nula dentro del polígono de soporte. Matemáticamente:  
124

## 125 2.3 Modelo Lineal de Péndulo Invertido (LIPM)

126 Para modelar robots móviles, podemos asumir una simplificación, donde incluso tiene la capacidad de  
127 moverse en un plano x e y, o usar una representación polar,  $(r, \theta)$ . De acuerdo a las ruedas del móvil sus  
128 motores son posibles de ver el circuito eléctrico equivalente de la armadura y los engranajes del motor de DC  
129 (Figura 1), donde  $R_m$  es la resistencia del motor,  $L_m$  la inductancia y  $k_m$  es la constante de fuerza  
130 contraelectromotriz (EMF) (Ogata, 1998).

## 131 2.4. Control Óptimo LQR

132

## 2.5. Cinemática Inversa de Piernas

## 3 Resultados

El desarrollo del robot Sentinel XVA en Ayacucho representa: Transferencia tecnológica descentralizada. Formación de capital humano en control avanzado. Impulso a la industria aeroespacial regional. Integración de IA embebida con robótica humanoide. Esto posiciona al sur del Perú dentro de la investigación aplicada en robótica avanzada.

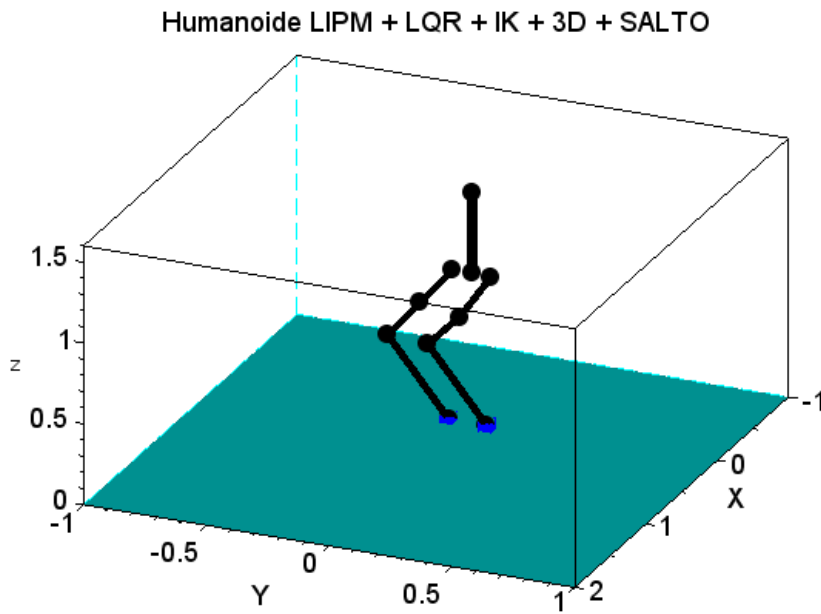
### 3.1. Tabla de Especificaciones Técnicas

| Parámetro                | Especificación                                                             |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Nombre del Sistema       | VA-X01 AGROBOT                                                             |
| Desarrollador            | Villa Automation S.A.C.                                                    |
| Tipo de Robot            | Robot móvil terrestre colaborativo agrícola                                |
| Sistema de Movilidad     | Tracción diferencial con 2 ruedas motrices                                 |
| Motores de Tracción      | Motores DC / Stepper (según configuración)                                 |
| Controladores de Motor   | Drivers tipo puente H / Controladores Stepper 12V                          |
| Plataforma de Control    | Microcontrolador / Arduino UNO                                             |
| Brazo Robótico           | Manipulador articulado de múltiples grados de libertad / pinzas de cosecha |
| Grados de Libertad (DOF) | 4-6 DOF (configurable)                                                     |
| Sistema de Alimentación  | Fuente DC 12V / Batería recargable 30 W                                    |
| Sistema de pulverización | Tanque con Bomba eléctrica 9V-12V                                          |
| Sensores Integrables     | Ultrasónico, humedad de suelo, temperatura, visión artificial              |
| Comunicación             | Serial / WiFi (expandible)                                                 |
| Modo de Operación        | Autónomo y/o Teleoperado                                                   |
| Entorno de Operación     | Campo abierto e invernadero                                                |
| Aplicaciones             | Monitoreo, fertilización localizada, investigación agronómica              |
| Arquitectura de Control  | Control distribuido con modelamiento dinámico                              |

146

147 **Figura 3.3**

148 *Simulación del robot*



149

150 *Nota.* El brazo robot inicialmente se encuentra en una posición determinada, luego un objeto **f** se  
151 encuentre en el extremo, próximo a una caja C.

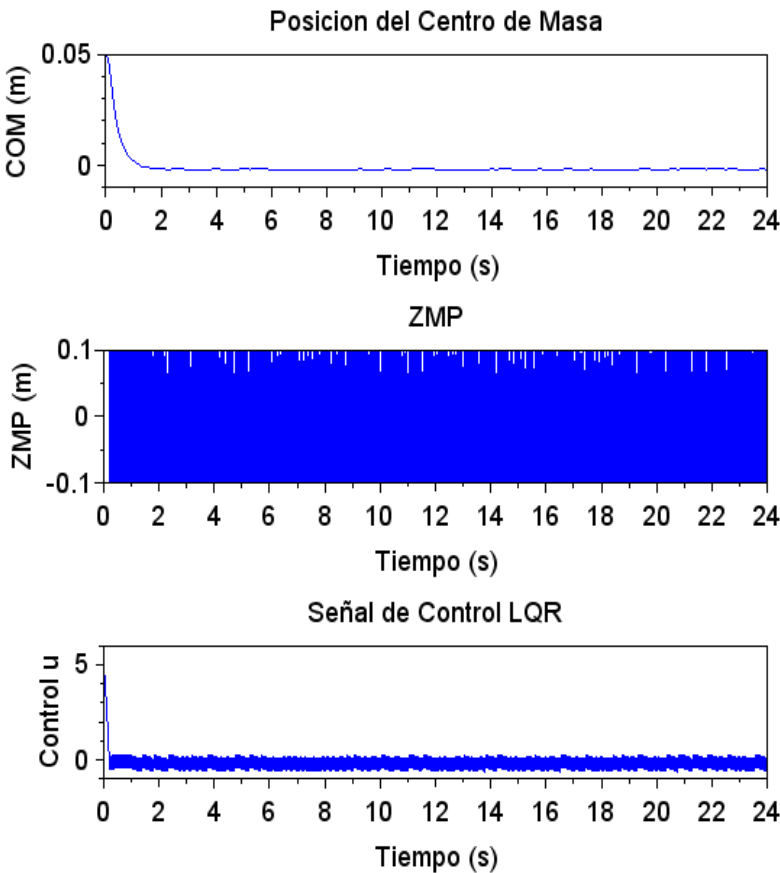
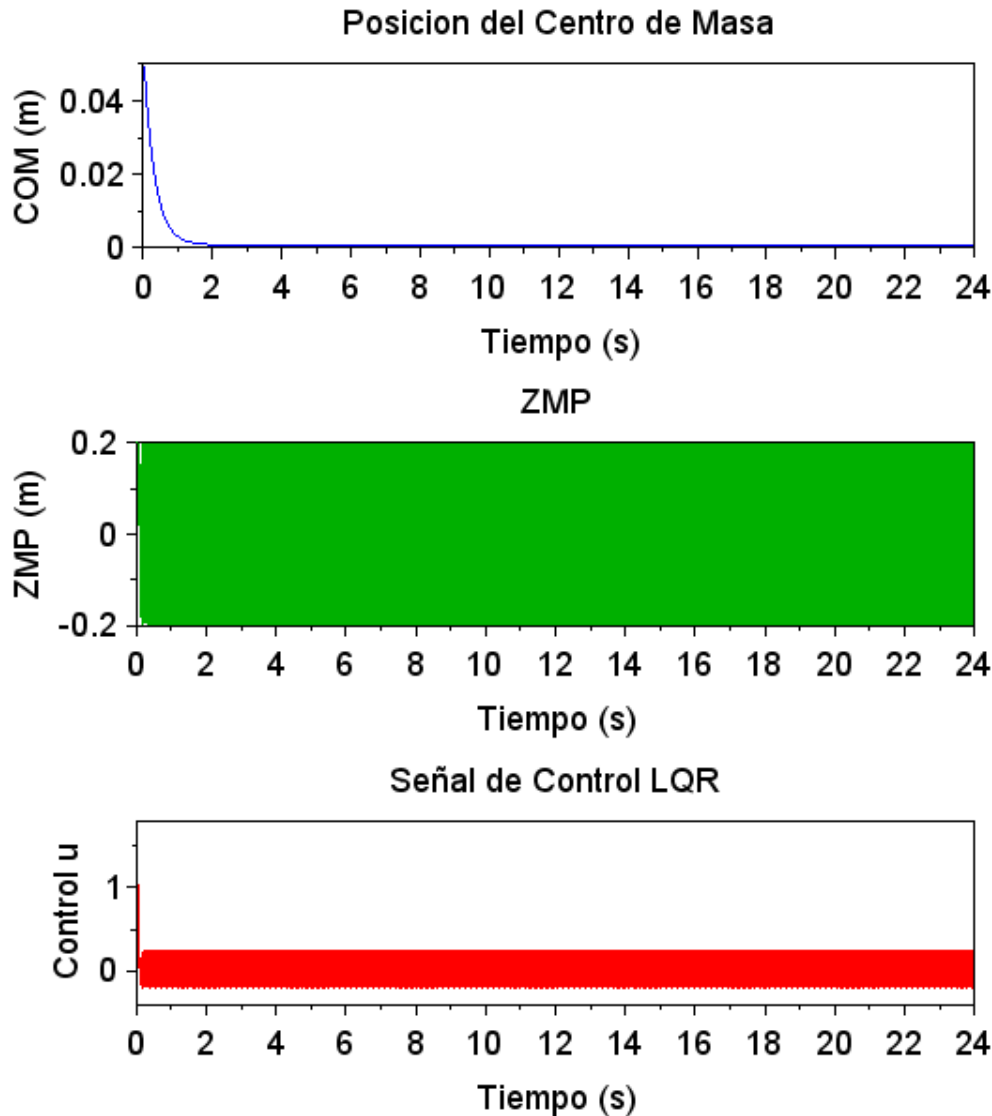


Figura 01: Pruebas realizadas del robot primera versión en el invernadero San Juan Bautista-Ayacucho

**Figura 3**

*Comportamiento de señales de setpoint, entradas y salidas*



157

158 *Nota.* En la figura 3 se observa el comportamiento de señales en función del tiempo algunos pulsos  
 159 mayores de distancia excesivos se debe al alcance fuera del límite previsible por el sensor de  
 160 distancia para capturar los objetos. Aunque el rango de seguimiento al objetivo deseado se encuentra  
 161 dentro del rango permisible.

162

163

164

165 **Figura 3.1**

166 *Robot colaborativo RB-VA03 para aplicaciones en la Agricultura*



*Nota.* En la figura 2 se muestra la dinámica del robot colaborativo RB-VA02 en diferentes direcciones X, Y y Z, con chasis y móvil de cuatro ruedas, y un brazo de seis grados de libertad metálico de color naranja, una pinza en la parte superior y una caja de carga en la parte posterior, para diferentes aplicaciones y en específico Agricultura y Minería.

#### 4 Discusión

Los resultados obtenidos indican que el control predictivo mejora significativamente la precisión y estabilidad del robot colaborativo en entornos agrícolas y mineros. Sin embargo, se identificaron ciertos desafíos, como la necesidad de mejorar la adaptabilidad del algoritmo de control ante variaciones inesperadas en el entorno. Además, se observó que la eficiencia del sistema depende en gran medida de la calibración precisa de los servomotores y la calidad de los sensores utilizados. El presente proyecto solo se encuentra en proceso de desarrollo, construcción y validación en un invernadero de la empresa Hidropónicos S.A.C.

A diferencia del proyecto de seguimiento de trayectoria en robótica móvil con alimentación de energía solar, desarrollado en 2023 (Villar, 2023). Consistía en la implementación el seguimiento de trayectoria en robótica

móvil, el cual era suficiente para la mejora del presente proyecto agregando un brazo robot en la parte superior, para aplicaciones en la agricultura y minería.

Este proyecto es una versión más simple en la región a diferencia de otros proyecto internacionales como “cosecha automatizada mediante un robot recolector de fruta de doble brazo” (Yoshida, et al, 2022). En este proyecto, se propone un método para automatizar la cosecha de fruta con un robot recolector de fruta equipado con dos brazos robóticos. Esto implica seguir mejorando el presente proyecto para una mayor eficiencia y productividad en la agricultura.

En futuras investigaciones, se podría explorar la integración de técnicas de aprendizaje automático para optimizar aún más la capacidad de predicción del sistema y mejorar su desempeño en escenarios dinámicos (Font, et al, 2014). Asimismo en futuro será necesario la inclusión de estudios de mayor cantidad parámetros, así como la identificación de hojas enfermas, frutos enfermas o contaminadas, plagas y enfermedades mediante las aplicaciones inteligencia artificial o procesamiento de imágenes. (Nazim, et al, 2023) y (Alaudeen et al, 2024).

## 5 Conclusiones

El proyecto Sentinel XVA:

Integra modelado matemático sólido

Emplea control óptimo robusto

Permite escalabilidad hacia modelos 3D completos

Contribuye al desarrollo científico nacional.

## 6 Agradecimientos

Agradecimiento a la Empresa Villa Automation Eirl por ser el impulsor en el desarrollo de tecnologías a nivel nacional. Al equipo de trabajo que contribuyó en el desarrollo de este importante proyecto en beneficio de la sociedad Ayacuchana y del Perú.

## 7 Referencias

Aguilar, Åström, K. J., & Wittenmark, B. (2013). Computer-controlled systems: theory and design. Courier Corporation. (libro)

Alaudeen, K. M., Selvarajan, S., Manoharan, H., & Jhaveri, R. H. (2024). Intelligent robotics harvesting system process for fruits grasping prediction. Scientific Reports, 14(1), 2820. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52743-8>

Cárdenas Rondán, R. D. (2024). Diseño de un sistema teleoperado para recolección de residuos sólidos flotantes en humedales.

Craig, J. J. (2020). "Introduction to Robotics: Mechanics and Control". Pearson. <https://repositorio.unitec.edu/server/api/core/bitstreams/fbbeb3da-65dd-4384-a778-a0e22cb104e2/content>

Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., Grieve, B., Chen, W. H., Cielniak, G., ... & Yang, G. Z. (2018). Agricultural robotics: the future of robotic agriculture. arXiv preprint arXiv:1806.06762. <https://arxiv.org/pdf/1806.06762>

- 223 Gasparetto, A., & Scalera, L. (2019). A brief history of industrial robotics in the 20th century. *Advances in*  
224 *Historical Studies*, 8, 24-35 <https://doi.org/10.4236/ahs.2019.81002F>
- 225 Font, D., Pallejà, T., Tresanchez, M., Runcan, D., Moreno, J., Martínez, D., ... & Palacín, J. (2014). A proposal  
226 for automatic fruit harvesting by combining a low cost stereovision camera and a robotic arm. *Sensors*, 14(7),  
227 11557-11579. <https://doi.org/10.3390/s140711557>
- 228 Karabegović, I., Karabegović, E., Mahmić, M., & Husak, E. (2020). Implementation of industry 4.0 and  
229 industrial robots in the manufacturing processes. In *New Technologies, Development and Application II* 5 (pp.  
230 3-14). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-18072-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-18072-0_1)
- 231 Katsuhiko, O. (2011). *Engenharia de controle moderno*. KATSUHIKO Ogata, 5th Ed. 801p. (libro)
- 232 Nise, N. S. (2012). *Engenharia de sistemas de controle*, 6ªed. LTC, São Paulo. (libro)
- 233 Nazim, Z., Tariq, M., Tariq, F., Kiran, A., & Rai, T. (2023). Harvesting Intelligence: Advancements in Fruit  
234 Picking Through Artificial Intelligence. *Journal of Computing & Biomedical Informatics*, 6(01), 351-374.  
235 <https://doi.org/10.56979/601/2023>
- 236 Lytridis, C., Kaburlasos, V. G., Pachidis, T., Manios, M., Vrochidou, E., Kalampokas, T., & Chatzistamatis, S.  
237 (2021). An overview of cooperative robotics in agriculture. *Agronomy*, 11(9), 1818.
- 238 Ogata, K., & Severo, B. (1998). *Engenharia de controle moderno*. Prentice Hall do Brasil.
- 239 Paul, R. P. (1981). *Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot*  
240 *manipulators*. Richard Paul.(libro)
- 241 Rahman, M. M., Khatun, F., Jahan, I., Devnath, R., & Bhuiyan, M. A. A. (2024). Cobotics: The Evolving Roles  
242 and Prospects of Next- Generation Collaborative Robots in Industry 5.0. *Journal of Robotics*, 2024(1), 2918089.  
243 <https://doi.org/10.1155/2024/2918089>
- 244 Sarmiento Gamboa, K. S., Vásquez Lagos, J. E., & Laguna Suárez, Ó. L. (2016). Desarrollo de planeación y  
245 seguimiento de trayectorias para un vehículo autónomo (Bachelor's thesis, Universidad Piloto de Colombia).
- 246 Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). "Springer Handbook of Robotics". Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_1)  
247 [319-32552-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_1)
- 248 Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). "Reinforcement Learning: An Introduction". MIT Press.  
249 <https://doi.org/10.1017/S0263574799271172>
- 250 Villar, J. L. H. (2023). Seguimiento de trayectoria en robótica móvil con alimentación de energía solar. *Revista*  
251 *de Investigación Científica de la UNF–Aypate*, 2(4), 8-19. <https://doi.org/10.57063/ricay.v2i4.64>
- 252 Yoshida, T., Onishi, Y., Kawahara, T., & Fukao, T. (2022). Automated harvesting by a dual-arm fruit harvesting  
253 robot. *ROBOMECH journal*, 9(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40648-022-00233-9>
- 254 Zheng, Y. F., & Hemami, H. (1985). Mathematical modeling of a robot collision with its environment. *Journal*  
255 *of Robotic Systems*, 2(3), 289-307. <https://doi.org/10.1002/rob.4620020307>
- 256