

## 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.  
[villautomationieirl@gmail.com](mailto:villautomationieirl@gmail.com), [sheylayas@gmail.com](mailto:sheylayas@gmail.com) / <https://orcid.org/orcid:0000-0001-8389-7922>  
[,https://orcid.org/0009-0005-3759-488X](https://orcid.org/0009-0005-3759-488X)

\* **Correspondencia:** Jose Luis Huayanay Villar, **Correo:** [villautomationieirl@gmail.com](mailto:villautomationieirl@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.0000/villautomation.art140> Aceptación:02/01/2026 Publicación:05/03/2026

#### 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.

Depósito Legal: 2026-03221

34

## 1 Introducción

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

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

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

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

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

55 Exploración en entornos extremos

56 Automatización industrial

57 Aplicaciones aeroespaciales

58 Investigación científica

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

61

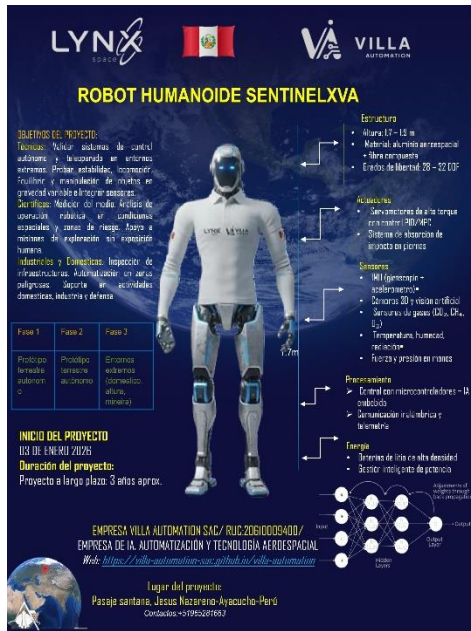
62

## 2 Materiales y métodos

63 Se diseñó del robot colaborativos con múltiples grados de libertad, utilizando motores de alta potencia como  
64 paso paso y servomotores para cada articulación y sensores para la detección de objetos y obtención de datos de  
65 parámetros ambientales, controladores robustos y actuadores. Se implementa un control PI y predictivo que  
66 anticipa el error futuro y ajusta la posición de cada articulación para mejorar la precisión del movimiento. Se  
67 realizaron pruebas experimentales en entornos agrícolas y sistemas críticos para evaluar el rendimiento del  
68 sistema.

69 **Figura 1**

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



71

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

75 **2.2 Modelo dinámico general del robot humanoide**

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

79 
$$T = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}\omega^T I \omega$$

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

83 
$$q = [x_b \ y_b \ z_b \ \phi \ \theta \ \varphi \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ \dots \ q_n]$$

84 Donde:

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

87 
$$v_i = J_{v_i}(q)\dot{q}$$

88 
$$\omega_i = J_{\omega_i}(q)\dot{q}$$

Depósito Legal: 2026-03221

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

$$91 \quad T_i = \frac{1}{2} m_i (J_{v_i})^T (J_{v_i} \dot{q}) + \frac{1}{2} (J_{\omega_i} \dot{q})^T I (J_{\omega_i} \dot{q})$$

92 Luego reordenamos términos

$$93 \quad T_i = \frac{1}{2} \dot{q}^T (m_i J_{v_i}^T J_{v_i} + J_{\omega_i}^T I_i J_{\omega_i}) \dot{q}$$

94 Luego sumando todos los eslabones del robot humanoide

$$95 \quad T_i = \frac{1}{2} \dot{q}^T \left( \sum_i^n m_i J_{v_i}^T J_{v_i} + J_{\omega_i}^T I_i J_{\omega_i} \right) \dot{q}$$

96 Si

$$97 \quad M(q) = \sum_i^n m_i J_{v_i}^T J_{v_i} + J_{\omega_i}^T I_i J_{\omega_i}$$

98 Entonces la energía de la cinética total es:

$$99 \quad T = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q}$$

100 Por otro lado la energía potencial para un eslabón es

$$101 \quad V_i = m_i g h_i(q)$$

102 Entonces a la suma total será:

$$103 \quad V_i = \sum_i^n m_i g h_i(q)$$

104 Entonces el lagrangiano será de la forma:

$$105 \quad L(q, \dot{q}) = T - V$$

106 Luego sustituyendo

$$107 \quad L = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - \sum_i^n m_i g h_i(q)$$

108 Entonces aplicando la ecuación de ecuación de Euler-lagrange

$$109 \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial}{\partial q_i} (L) = \tau_i$$

$$110 \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \left( \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - \sum_i^n m_i g h_i(q) \right) \right) - \frac{\partial}{\partial q_i} \left( \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - \sum_i^n m_i g h_i(q) \right) = \tau_i + \beta \tau_1$$

111 Entonces para la función de salto

$$112 \quad \beta \tau_1$$

113 entonces

$$114 \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \left( \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial q_i} \left( - \sum_i^n m_i g h_i(q) \right) = \tau_i + \beta \tau_1$$

$$115 \quad M(q) \ddot{q} + \sum_i^n m_i g \dot{q}_i = \tau_i + \beta \tau_1$$

$$116 \quad M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q}_i + G(q) = \tau_i + \beta \tau_1$$

117

## 118 2.2 Estabilidad y Punto de Momento Cero (ZMP)

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

121

## 122 2.3 Modelo Lineal de Péndulo Invertido (LIPM)

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

## 128 2.4. Control Óptimo LQR

129

130 **3 Resultados**

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

135

136 **3.1.Tabla de Especificaciones Técnicas**

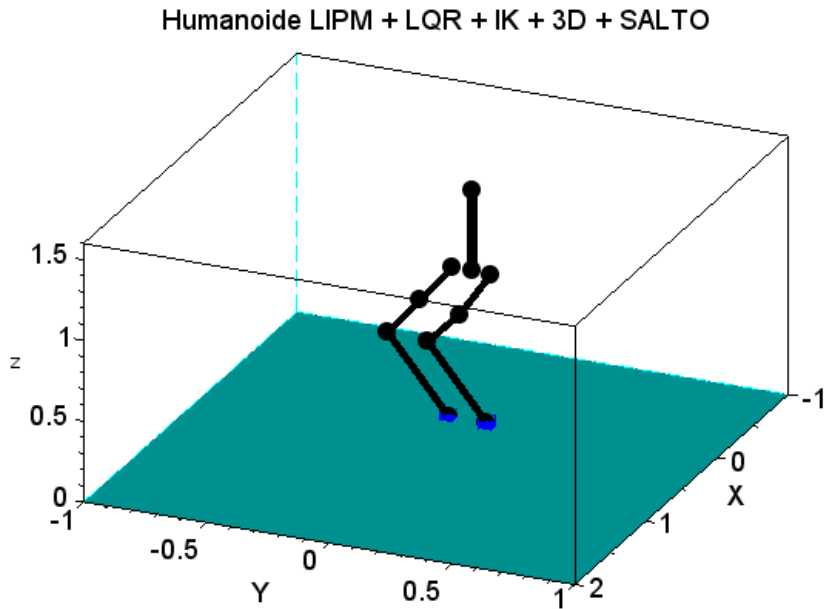
Parámetro	Especificación
Nombre del Sistema	VA-X01 AGROBOT
Desarrollador	Villa Automation S.A.C.
Tipo de Robot	Robot móvil terrestre colaborativo agrícola
Sistema de Movilidad	Tracción diferencial con 2 ruedas motrices
Motores de Tracción	Motores DC / Stepper (según configuración)
Controladores de Motor	Drivers tipo puente H / Controladores Stepper 12V
Plataforma de Control	Microcontroaldor /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

137

138

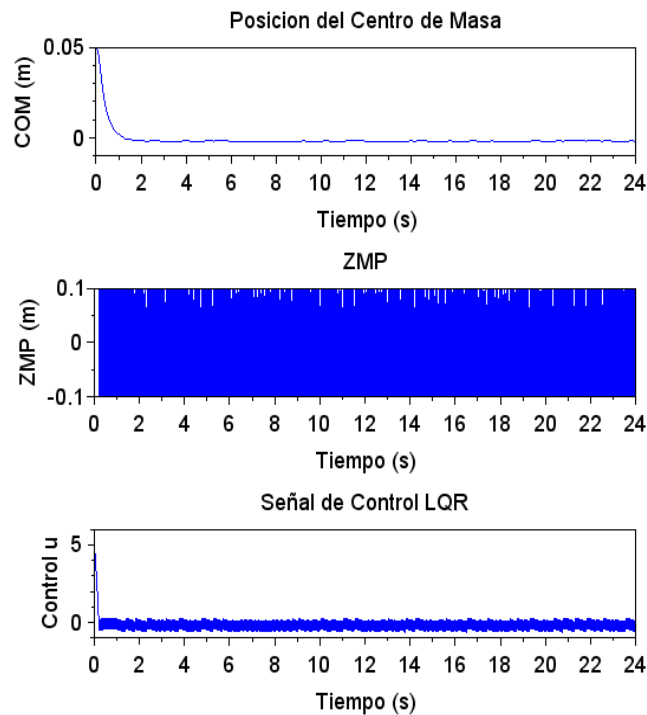
139 **Figura 3.3**

140 *Simulación del robot*



141

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



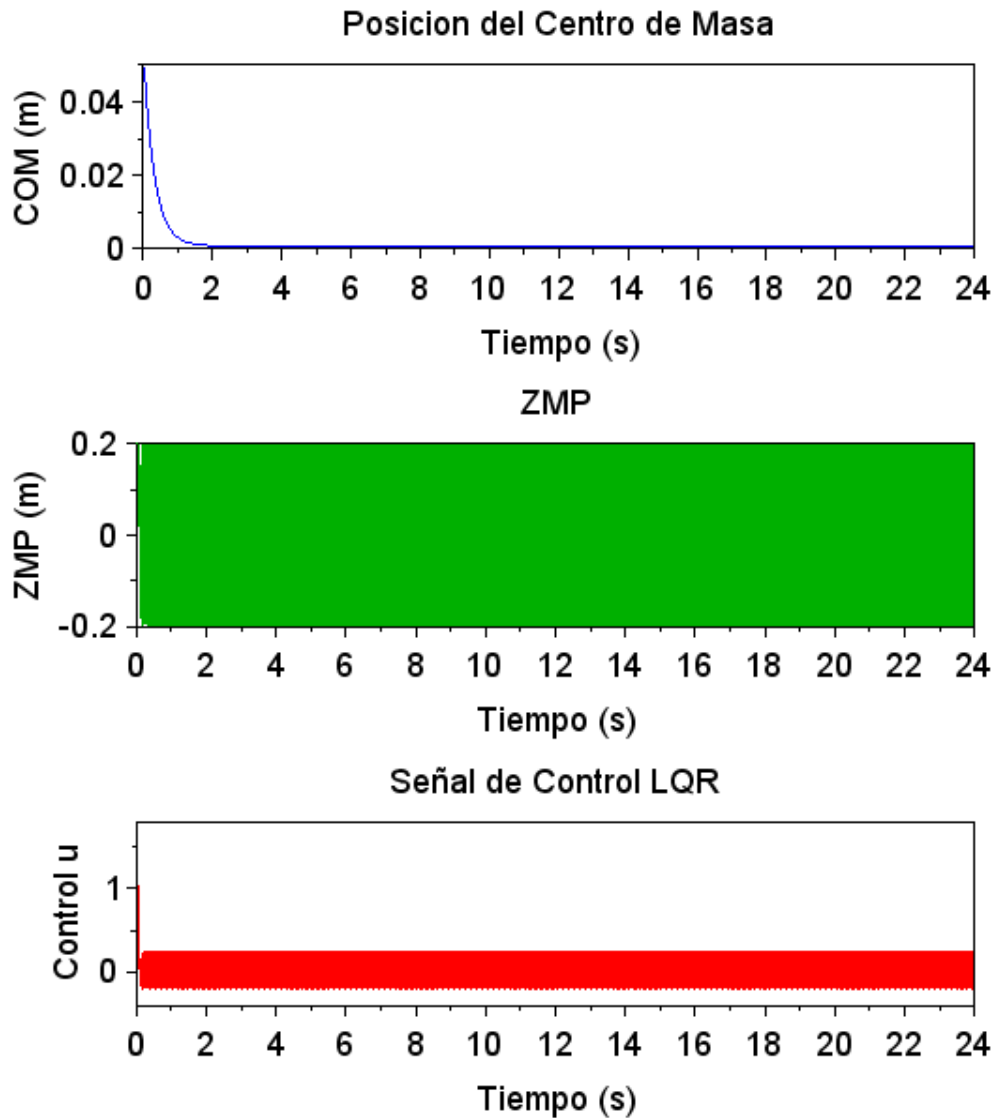
144

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

146

147 **Figura 3**

148 *Comportamiento de señales de setpoint, entradas y salidas*



149

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

154

155

156

157 **Figura 3.1**

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



159



160

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

165

166

#### 4 Discusión

167 Los resultados obtenidos indican que el control predictivo mejora significativamente la precisión y estabilidad  
168 del robot colaborativo en entornos agrícolas y mineros. Sin embargo, se identificaron ciertos desafíos, como la  
169 necesidad de mejorar la adaptabilidad del algoritmo de control ante variaciones inesperadas en el entorno.

170 Además, se observó que la eficiencia del sistema depende en gran medida de la calibración precisa de los  
171 servomotores y la calidad de los sensores utilizados. El presente proyecto solo se encuentra en proceso de  
172 desarrollo, construcción y validación en un invernadero de la empresa Hidropónicos S.A.C.  
173

174 A diferencia del proyecto de seguimiento de trayectoria en robótica móvil con alimentación de energía solar,  
175 desarrollado en 2023 (Villar, 2023). Consistía en la implementación el seguimiento de trayectoria en robótica  
176 móvil, el cual era suficiente para la mejora del presente proyecto agregando un brazo robot en la parte superior,  
177 para aplicaciones en la agricultura y minería.  
178

179 Este proyecto es una versión más simple en la región a diferencia de otros proyecto internacionales como  
180 “cosecha automatizada mediante un robot recolector de fruta de doble brazo” (Yoshida, et al, 2022). En este  
181 proyecto, se propone un método para automatizar la cosecha de fruta con un robot recolector de fruta equipado  
182 con dos brazos robóticos. Esto implica seguir mejorando el presente proyecto para una mayor eficiencia y  
183 productividad en la agricultura.  
184

185 En futuras investigaciones, se podría explorar la integración de técnicas de aprendizaje automático para  
186 optimizar aún más la capacidad de predicción del sistema y mejorar su desempeño en escenarios dinámicos  
187 (Font, et al, 2014). Asimismo en futuro será necesario la inclusión de estudios de mayor cantidad parámetros,  
188 así como la identificación de hojas enfermas, frutos enfermas o contaminadas, plagas y enfermedades mediante  
189 las aplicaciones inteligencia artificial o procesamiento de imágenes. (Nazim, et al, 2023) y (Alaudeen et al,  
190 2024).

## 191 **5 Conclusiones**

192 El proyecto Sentinel XVA:

193 Integra modelado matemático sólido

194 Emplea control óptimo robusto

195 Permite escalabilidad hacia modelos 3D completos

196 Contribuye al desarrollo científico nacional.  
197

## 198 **6 Agradecimientos**

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

## 202 **7 Referencias**

203 Aguilar, Åström, K. J., & Wittenmark, B. (2013). Computer-controlled systems: theory and design. Courier  
204 Corporation. (libro)  
205 Alaudeen, K. M., Selvarajan, S., Manoharan, H., & Jhaveri, R. H. (2024). Intelligent robotics harvesting system  
206 process for fruits grasping prediction. Scientific Reports, 14(1), 2820. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52743-8>  
207

- 208 Cárdenas Rondán, R. D. (2024). Diseño de un sistema teleoperado para recolección de residuos sólidos flotantes  
209 en humedales.
- 210 Craig, J. J. (2020). "Introduction to Robotics: Mechanics and Control". Pearson.  
211 <https://repositorio.unitec.edu/server/api/core/bitstreams/fbbeb3da-65dd-4384-a778-a0e22cb104e2/content>
- 212 Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., Grieve, B., Chen, W. H., Cielniak, G., ... & Yang, G. Z. (2018).  
213 Agricultural robotics: the future of robotic agriculture. arXiv preprint arXiv:1806.06762.  
214 <https://arxiv.org/pdf/1806.06762>
- 215 Gasparetto, A., & Scalera, L. (2019). A brief history of industrial robotics in the 20th century. Advances in  
216 Historical Studies, 8, 24-35 <https://doi.org/10.4236/ahs.2019.81002F>
- 217 Font, D., Pallejà, T., Tresanchez, M., Runcan, D., Moreno, J., Martínez, D., ... & Palacín, J. (2014). A proposal  
218 for automatic fruit harvesting by combining a low cost stereovision camera and a robotic arm. Sensors, 14(7),  
219 11557-11579. <https://doi.org/10.3390/s140711557>
- 220 Karabegović, I., Karabegović, E., Mahmić, M., & Husak, E. (2020). Implementation of industry 4.0 and  
221 industrial robots in the manufacturing processes. In New Technologies, Development and Application II 5 (pp.  
222 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)
- 223 Katsuhiko, O. (2011). Engenharia de controle moderno. KATSUHIKO Ogata, 5th Ed. 801p. (libro)
- 224 Nise, N. S. (2012). Engenharia de sistemas de controle, 6ªed. LTC, São Paulo. (libro)
- 225 Nazim, Z., Tariq, M., Tariq, F., Kiran, A., & Rai, T. (2023). Harvesting Intelligence: Advancements in Fruit  
226 Picking Through Artificial Intelligence. Journal of Computing & Biomedical Informatics, 6(01), 351-374.  
227 <https://doi.org/10.56979/601/2023>
- 228 Lytridis, C., Kaburlasos, V. G., Pachidis, T., Manios, M., Vrochidou, E., Kalampokas, T., & Chatzistamatis, S.  
229 (2021). An overview of cooperative robotics in agriculture. Agronomy, 11(9), 1818.
- 230 Ogata, K., & Severo, B. (1998). Engenharia de controle moderno. Prentice Hall do Brasil.
- 231 Paul, R. P. (1981). Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot  
232 manipulators. Richard Paul.(libro)
- 233 Rahman, M. M., Khatun, F., Jahan, I., Devnath, R., & Bhuiyan, M. A. A. (2024). Cobotics: The Evolving Roles  
234 and Prospects of Next- Generation Collaborative Robots in Industry 5.0. Journal of Robotics, 2024(1), 2918089.  
235 <https://doi.org/10.1155/2024/2918089>
- 236 Sarmiento Gamboa, K. S., Vásquez Lagos, J. E., & Laguna Suárez, Ó. L. (2016). Desarrollo de planeación y  
237 seguimiento de trayectorias para un vehículo autónomo (Bachelor's thesis, Universidad Piloto de Colombia).
- 238 Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). "Springer Handbook of Robotics". Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_1)
- 240 Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). "Reinforcement Learning: An Introduction". MIT Press.  
241 <https://doi.org/10.1017/S0263574799271172>
- 242 Villar, J. L. H. (2023). Seguimiento de trayectoria en robótica móvil con alimentación de energía solar. Revista  
243 de Investigación Científica de la UNF–Aypate, 2(4), 8-19. <https://doi.org/10.57063/ricay.v2i4.64>
- 244 Yoshida, T., Onishi, Y., Kawahara, T., & Fukao, T. (2022). Automated harvesting by a dual-arm fruit harvesting  
245 robot. ROBOMECH journal, 9(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40648-022-00233-9>
- 246 Zheng, Y. F., & Hemami, H. (1985). Mathematical modeling of a robot collision with its environment. Journal  
247 of Robotic Systems, 2(3), 289-307. <https://doi.org/10.1002/rob.4620020307>
- 248