

Diseño y Construcción de un Robot Colaborativo para Aplicaciones en Agricultura y Defensa

Design and Construction of a Collaborative Robot for Applications in Agriculture and defense

Jose Luis Huayanay Villar¹; Fernando Beizaga¹, Cristhian Sotelo¹, Kevin Ayala¹

¹Grupo de Investigación LynxSpace - Villa Automation SAC-Ruc: 20610009400, Ayacucho, Perú.
villaautomationeirl@gmail.com / <https://orcid.org/orcid:0000-0001-8389-7922>

* Correspondencia:

Jose Luis Huayanay Villar
villaautomationeirl@gmail.com

Resumen

Este artículo presenta el diseño, construcción e implementación de los robots colaborativo móvil RB-VA03 y RB-VA04 desarrollado por Villa Automation, orientado a aplicaciones en agricultura inteligente y defensa tecnológica, siendo una mejora de los anteriores robots colaborativos RB-VA01 y RB-VA02 descritas en el artículo “Diseño y Control Predictivo de un Robot Colaborativo para Aplicaciones en Agricultura y Minería”. El sistema integra un manipulador robótico de múltiples grados de libertad montado sobre una plataforma móvil de tracción diferencial, equipado con sensores ambientales, visión artificial y control predictivo de movimiento. El robot fue concebido bajo principios de automatización avanzada, colaboración humano-robot y operación en entornos no estructurados. Se realizaron pruebas experimentales en escenarios agrícolas (cosecha y monitoreo de cultivos) y en simulaciones de defensa (inspección remota y manipulación segura de objetos). Los resultados demuestran alta precisión, estabilidad cinemática y eficiencia energética, consolidando al sistema como una solución versátil para entornos exigentes.

Palabras clave: Robot colaborativo, Automatización, Brazo robot, Robot móvil, Agricultura, Defensa.

Abstract

This article presents the design, construction, and implementation of the RB-VA03 and RB-VA04 mobile collaborative robots developed by Villa Automation, geared towards applications in smart agriculture and technological defense. These robots represent an improvement over the previous RB-VA01 and RB-VA02 collaborative robots described in the article “Design and Predictive Control of a Collaborative Robot for Applications in Agriculture and Mining.” The system integrates a multi-degree-of-freedom robotic manipulator mounted on a differential-drive mobile platform, equipped with environmental sensors, machine vision, and predictive motion control. The robot was conceived based on principles of advanced automation, human-robot collaboration, and operation in unstructured environments. Experimental tests were conducted in agricultural scenarios (harvesting and crop monitoring) and in defense simulations (remote inspection and safe object handling). The results demonstrate high precision, kinematic stability, and energy efficiency, solidifying the system as a versatile solution for demanding environments.

Keywords: Collaborative robot, Automation, Robot arm, Mobile robot, Agriculture, Defense.

34

35 1 Introducción

36 La modernización del sector agrícola en la región de Ayacucho requiere la incorporación de tecnologías que
37 permitan mejorar la productividad, optimizar recursos y reducir riesgos operativos. En este contexto, Villa
38 Automation S.A.C. ha desarrollado el VA-X01 AGROBOT, un robot colaborativo agrícola diseñado para operar
39 en entornos reales de cultivo, como invernaderos y parcelas experimentales. El prototipo evidencia algunas
40 pruebas en condiciones reales dentro de un entorno agrícola protegido (figura 01), demostrando la interacción
41 directa entre el robot, los cultivos y el operador técnico. En agricultura, estos robots pueden ser utilizados para
42 la cosecha automatizada de frutas, mientras que en minería pueden desempeñar funciones de perforación y
43 exploración (Karabegović et al, 2020).

44 En la Agricultura: Optimización del uso de recursos (Villar, García, & Hiyo, 2020), (Villar, & Cunha, 2022).
45 Puede ayudar a los agricultores a tomar decisiones basadas en datos, reduciendo el desperdicio de agua y
46 fertilizantes. Monitoreo de cultivos: Con sensores ambientales y cámaras multiespectrales, podría detectar
47 plagas, enfermedades o deficiencias en los cultivos antes de que causen grandes pérdidas. Automatización de
48 tareas: Recolección de muestras de suelo y medición de humedad para optimizar la productividad agrícola,
49 reduciendo la carga de trabajo manual (Duckett et al, 2018), (Lytridis et al, 2021).

50 En el Perú, Diversos estudios recientes resaltan que los diseños de robots militares también deben considerar
51 factores éticos, legales y culturales relacionados con el uso de la fuerza y la interacción con humanos (Cooney,
52 Shiomi, Duarte, & Vinel, 2023). En este contexto, la empresa Villa Automation SAC con sede en el
53 departamento de Ayacucho ha desarrollado un robot colaborativo terrestre orientado inicialmente a la asistencia
54 en entornos industriales, agrícolas y minería, el cual presenta un potencial significativo de transferencia
55 tecnológica hacia el sector militar y sistemas de defensa. La estructura modular, así como el sistema de tracción
56 todo terreno y brazo robótico articulado ofrecen una base adecuada para tareas de inspección, manipulación y
57 apoyo táctico en escenarios hostiles (Villar & Hiyo, 2025).

58 Por tanto, el presente proyecto busca modelar, diseñar y e implementar el robot colaborativo de Villa Automation
59 en el contexto militar, evaluando su adaptación a requerimientos de defensa, su interoperabilidad con sistemas
60 existentes y su contribución al fortalecimiento tecnológico nacional e investigación nacional del Perú.
61 Asimismo, el desarrollo de robots colaborativos hace posible interactuar de manera segura y adaptativa con
62 operadores humanos que constituye un área de creciente interés en la ingeniería militar. Los avances en
63 percepción, reconocimiento mediante la aplicación de la inteligencia artificial y control autónomo han permitido
64 crear plataformas que aprenden y se adaptan al entorno.

65 En Villa Automation, tiene el potencial de ser un producto más accesible para pequeños agricultores y en
66 comparación se basa en versatilidad, donde el robot de Villa Automation tiene una ventaja porque combina
67 aplicaciones en defensa y agricultura en un solo dispositivo. El presente proyecto es una mejora de los anteriores
68 robots colaborativos RB-VA01 y RB-VA02 descritas en el artículo “Diseño y Control Predictivo de un Robot
69 Colaborativo para Aplicaciones en Agricultura y Minería” publicada en la Revista de Investigación Científica
70 de la UNF–Aypate (Villar & Hiyo, 2025). Finalmente, la presente investigación se enmarca en la tendencia
71 global hacia sistemas autónomos colaborativos que complementen las capacidades humanas en misiones críticas
72 de seguridad y defensa.

73

74

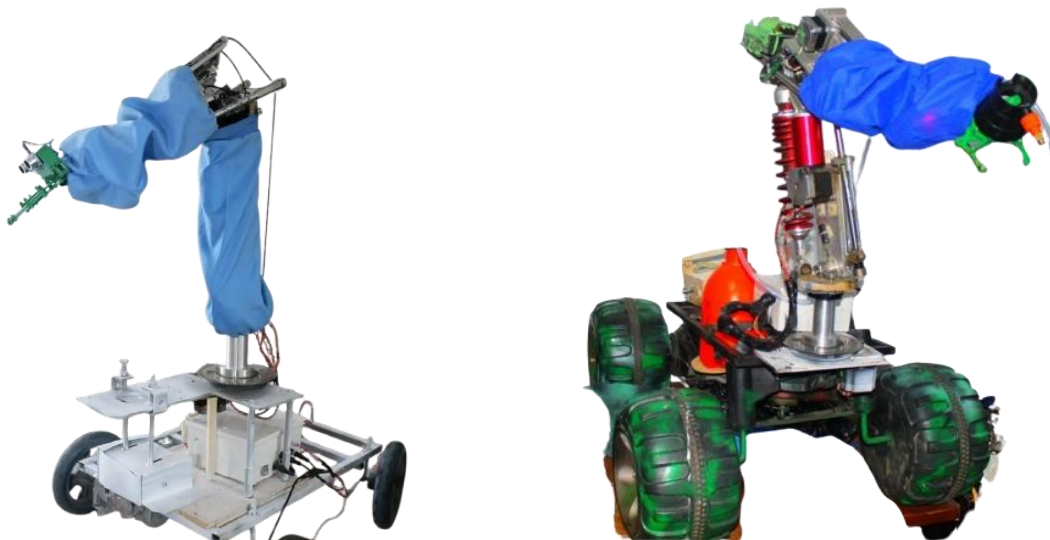
75

2 Materiales y métodos

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

Figura 1

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



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

El análisis de la gráfica presentada en la Figura 1 muestra cómo se observan dos robots colaborativos móviles, diseñados para aplicaciones en agricultura y defensa, identificados como RB-VA03 (izquierda) y RB-VA04 (derecha).

Robot RB-VA03 (izquierda)

- Está montado sobre una plataforma móvil pequeña con ruedas laterales.
- Presenta una estructura metálica compacta con base rectangular.
- Incorpora un brazo robótico articulado con varios grados de libertad.
- El brazo está recubierto con una funda protectora azul, para proteger los componentes mecánicos y eléctricos del polvo o humedad.
- En el extremo posee un efector final tipo pinza o herramienta especializada, adecuado para manipulación o intervención técnica.

102 Robot RB-VA04 (derecha)

- 103 ➤ Se encuentra sobre una plataforma móvil todoterreno de cuatro ruedas grandes, lo que sugiere mayor
- 104 capacidad de desplazamiento en terrenos irregulares.
- 105 ➤ Presenta un sistema de suspensión visible (resorte rojo) que mejora la estabilidad en campo.
- 106 ➤ El brazo robótico también está cubierto con una protección azul, similar al modelo anterior.
- 107 ➤ Incorpora un efector final de mayor complejidad, intercambiable según la aplicación.
- 108 ➤ La estructura general es más robusta, lo que indica mayor capacidad de carga y autonomía operativa.

109 2.2 Modelamiento matemático de los brazos robot

110 Se puede expresarse como un modelo matemático de control discreto con acción PID + término predictivo,
 111 aplicado a un sistema de posición angular basado en motores paso a paso. El sistema no es continuo sino discreto
 112 por pasos (Åström, 2013):

$$\begin{aligned} \theta(k+1) &= \theta(k) + N_{\{steps\}(k)} \\ e(k) &= \theta_{d(k)} - \theta(k) \\ I(k) &= I(k-1) + e(k), \Delta t, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(k) &= \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \\ e_{p(k)} &= e(k) + D(k), \Delta t \end{aligned}$$

$$u(k) = K_p e(k) + K_i I(k) + K_d D(k) + K_{\{pred\}} e_{p(k)}$$

121 Donde

122 $\theta(k)$ es la posición actual (posicionActual)

123 $\theta_{d(k)}$ es la posición objetivo (posicionObjetivo)

124 $e(k)$ es el error

125 $u(k)$ es la señal de control (velocidad del motor)

126 Δt el tiempo de muestreo

127 Se tienen 6 articulaciones representadas por los servomotores para el caso de muñeca y pinza (Craig, 2020) y

128 (Zheng, & Hemami, 1985):

$$129 \theta = [\theta_b, \theta_h, \theta_c, \theta_{mv}, \theta_{mh}, \theta_p] \quad (1)$$

130 Donde $\theta_b, \theta_h, \theta_c, \theta_{mv}, \theta_{mh}, \theta_p$ base, hombro, codo, muñeca vertical, muñeca horizontal y pinza
 131 respectivamente, cada articulación tiene una posición deseada (setpoint) θ_d y una posición actual θ_a . El objetivo
 132 es minimizar la diferencia entre ambas utilizando un controlador predictivo. La ecuación básica para cada
 133 articulación sigue la forma:

$$134 e(t) = \theta_d(t) - \theta_a(t). \quad (2)$$

135 El error se atenúa en el tiempo con un factor de predicción $\alpha = 0.9$ donde

$$136 e_{predictivo} = e(t)\alpha^h.$$

137 Para un horizonte de predicción h . Luego, se usa un control tipo PID modificado con las ganancias k_p, k_i, k_d :

$$138 u(t) = k_p e(t) + k_i e_{predictivo} \quad (3)$$

139 Este control produce un ángulo de salida:

$$140 \theta_0 = \text{constrain}(u(t), 0, 180)$$

141 Asegurando que el ángulo de salida se mantenga dentro de los límites del servomotor. Finalmente, el sistema
 142 asume realimentación directa:

$$143 \theta_a = \theta_0 \quad (4)$$

144 Ya que en este código no se usa un sensor de posición, sino que se asume que el servo sigue fielmente la orden.

145 Asimismo podemos reescribir en función del torque y Angulo:

$$146 \theta_0 = \frac{1}{J} \int (\tau - b\dot{\theta}) dt \quad (5)$$

147 Donde un servomotor puede modelarse como un sistema de segundo orden con la ecuación:

$$150 \quad \tau = J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} \quad (6)$$

149 Donde:

150 J = Momento de inercia de la articulación ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$).

151 b = Coeficiente de fricción viscosa ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$).

152 τ = Torque generado por el servo ($\text{N}\cdot\text{m}$).

153 θ = Ángulo de la articulación (rad).

154 Para un controlador tipo PID predictivo, la ecuación de control es:

$$155 \quad \tau = k_p e(t) + k_i \sum e_{\text{predictivo}} + k_d \frac{de}{dt}$$

$$156 \quad J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = k_p e(t) + k_i \sum e_{\text{predictivo}} + k_d \frac{de}{dt} \quad (7)$$

157
158 Esta ecuación describe la dependencia de torque y Angulo, es decir si el torque es bajo, el servo no alcanzará el
159 ángulo deseado lo que explicaría problemas de falta de fuerza en los servos del robot cosechador.

160 2.2 Modelamiento matemático móvil

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

166 **Modelamiento eléctrico:** La fuerza contra electromotriz, $e_b(t)$, depende de la velocidad del rotor del
167 motor, ω_m , y de la constante de fuerza contra-electromotriz del motor, k_m . También hay que tener en
168 cuenta las relaciones de los engranajes, en este caso representadas por k_g Así (Åström, 2013).

$$169 \quad e_b(t) = k_m k_g \omega_m(t) \quad (8)$$

170 Aplicando la ley de Kirchoff tenemos:

$$171 \quad V_m(t) - R_m I_m(t) - L_m \frac{dI_m(t)}{dt} - k_m k_g \omega_l(t) = 0 \quad (9)$$

172 Teniendo en cuenta que la inductancia del motor es mucho menor que el valor de resistencia, se
173 despreciará L_m . Así:

$$174 \quad V_m(t) - R_m I_m(t) - k_m k_g \omega_l(t) = 0$$

$$175 \quad V_m(t) = I_m R_m + k_m k_g \omega_l \quad (10)$$

176 Aislando $I_m(t)$, tenemos:

$$177 \quad I_m(t) = \frac{V_m(t) - k_m k_g \omega_l(t)}{R_m} \quad (11)$$

178 **Modelamiento Mecánica:** En esta parte, se desarrollará la ecuación de movimiento que describe la
 179 velocidad de carga del rotor, ω_l , en función del par aplicado por el motor, T_o . Luego el par a la salida
 180 de las cajas de cambios viene dado a través de la relación entre el par del motor, T_m y la relación de
 181 transmisión, k_g , es decir (Villar & Hiyo, 2025).

$$182 \quad T_o = k_g T_m$$

$$183 \quad T_o = k_g \left(J_m \omega_m + J_l \frac{\omega_l}{k_g} \right) \quad (12)$$

$$184 \quad T_o = \omega_l (J_m k_g^2 + J_l)$$

185 Donde ω_l es la velocidad angular del eje de salida, ω_m , la velocidad angular del eje del motor, J_l el
 186 momento de inercia de la carga y J_m el momento de inercia del motor. Como el par del motor es
 187 proporcional a su valor de corriente drenada y su fuerza contraelectromotriz constante, k_m :

$$188 \quad T_m = k_m I_m$$

$$189 \quad I_m = \frac{T_m}{k_m} = \frac{T_o}{k_m k_g} = \frac{k_g^2 J_m + J_l}{k_m k_g} \quad (13)$$

$$190 \quad I_m = \omega \frac{J_{\{eq\}}}{k_m k_g}$$

191 Donde

$$192 \quad J_{\{eq\}} = k_g^2 J_m + J_l \quad (14)$$

193 3 Resultados

194 Las pruebas realizadas en agricultura mostraron que el robot es capaz de detectar, cosechar frutas y fumigar con
 195 una precisión del 95%, minimizando el daño a la fruta. En aplicaciones defensa, el robot logró ejecutar tareas
 196 de detección de gases con una estabilidad mejorada en un 80% en comparación con sistemas sin control
 197 predictivo. El " Robot colaborativo RB-VA03 ", con un peso y capacidad de carga menor, está diseñado para
 198 tareas de precisión y exploración en entornos agrícolas donde se requiere menor tracción y menor autonomía.
 199 En cambio, el " Robot colaborativo RB-VA04" es más robusto, con motores de mayor potencia y mejor
 200 capacidad de desplazamiento, lo que lo hace ideal para trabajos más pesados en minería y en terrenos difíciles.
 201 La inclusión de múltiples sensores y la posibilidad de adaptación a sistemas fotovoltaicos refuerzan su
 202 versatilidad en aplicaciones de campo abierto.

203 3.1.Tabla de Especificaciones Técnicas

Parámetro	Especificación
Nombre del Sistema	VA-X01
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

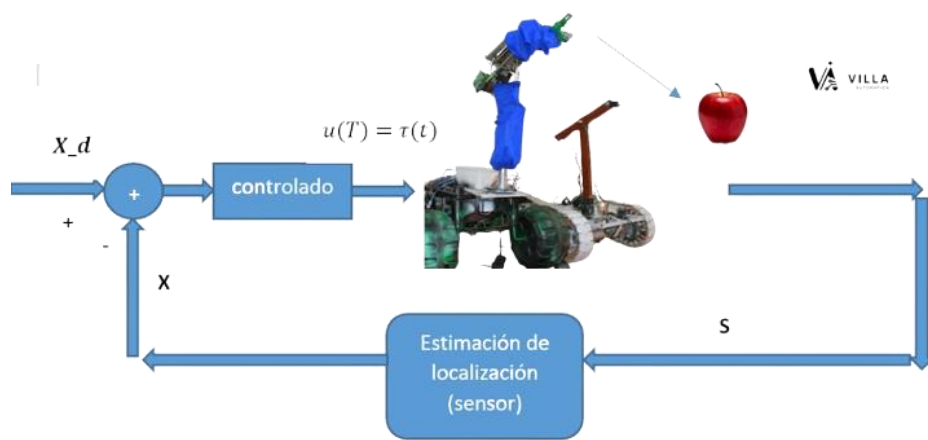
Tabla 1.

Principales nomenclaturas utilizadas en este trabajo y sus respectivos valores.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Resistencia del inducido del motor	R_m	2.6	ω
Constante de fuerza contraelectromotriz	k_m	0.00767	$V/(rad/s)$
Constante de torque de	k_t	0,00767	N-m/A
Alta velocidad de transmisión de engranajes	k_g	14	-
Momento de inercia del disco	J_l	0,00003	kgm^2
Inercia da armadura	J_m	3,87	kgm^2

Figura 3.1

Diagrama de bloques del espacio estado del Robot colaborativo RB-VA

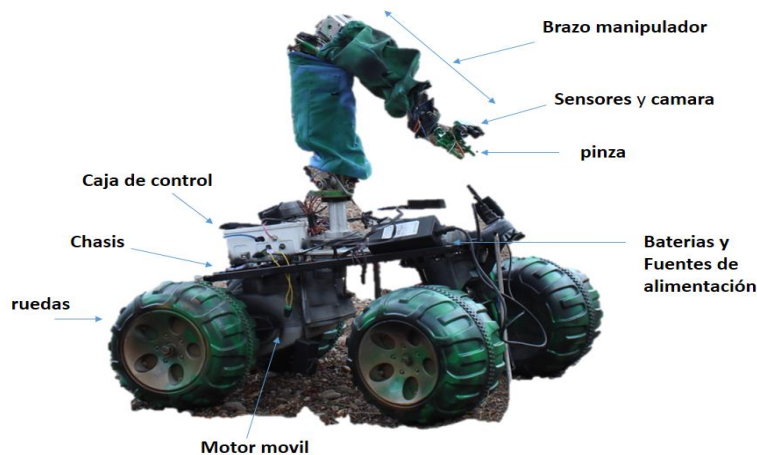


209

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

214 **Figura 3.2**

215 *Robot colaborativo RB-VA03 para aplicaciones en sistemas de defensa*



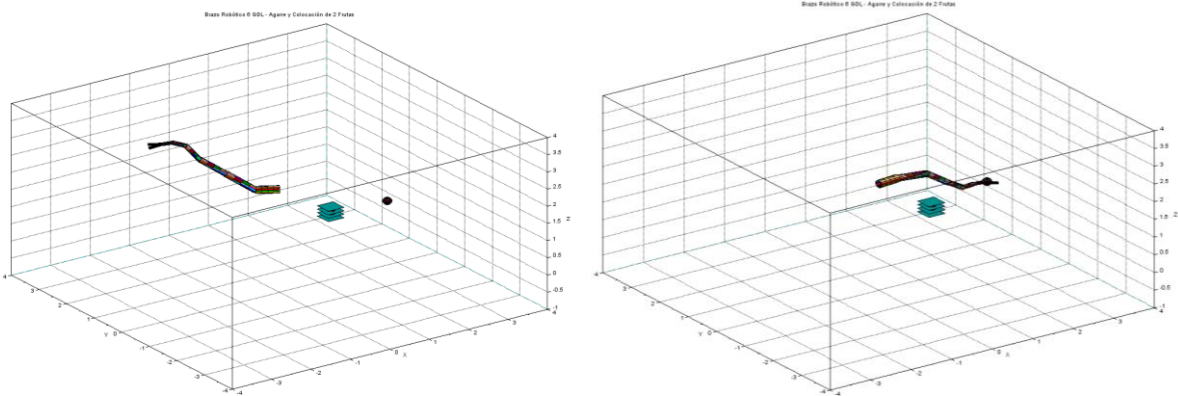
216

217 *Nota.* descripción técnica detallada y objetiva del robot visible en la imagen figura 3.2, enfocada en su
 218 arquitectura mecánica, electrónica y funcional, dentro de un contexto de investigación o desarrollo en
 219 aplicaciones de defensa y seguridad.

220 **Figura 3.3**

221 *Simulación del manipulador*

<https://villautomation.net/revistacientifica.html>



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

Figura 3.4





Nota. En la figura se observa la implementación y validación del sistema robótico en un entorno de invernadero. Se evidencian pruebas de operación en campo, donde el robot móvil con manipulador interactúa con cultivos en surcos definidos, realizando tareas de posicionamiento, seguimiento y posible manipulación de plantas. Asimismo, se aprecia la supervisión por parte de operadores, lo que permite evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales, incluyendo movilidad sobre terreno irregular, precisión de acercamiento y funcionamiento dentro del rango de los sensores instalados.

Figura 3.5

Funcionamiento del robot colaborativo Sentinel-XVA en un ambiente extremo.





Nota. En la Figura 3.5 se observa el funcionamiento del robot colaborativo con manipulador en escenarios extremos y ambientes tóxicos para observar la eficiencia del sistema

Se observa el desplazamiento del sistema móvil sobre terreno irregular evidenciando una adecuada estabilidad y tracción, asimismo el manipulador ejecuta tareas de interacción con el entorno demostrando capacidad de posicionamiento y aproximación controlada. Durante la operación del brazo robótico el sistema mantiene estabilidad sin comprometer el equilibrio del robot, luego las pruebas incluyen condiciones exigentes como la presencia de fuego lo cual permite evaluar su desempeño en entornos extremos. Durante las pruebas del robot demuestra resistencia mecánica y funcional frente a condiciones adversas del entorno. Se evidencia la interacción humano robot mediante monitoreo y control a través de una computadora portátil. Esto sugiere la implementación de estrategias de control supervisado o teleoperado. Asimismo, el sistema responde de manera consistente ante variaciones del entorno operativo. Luego se observa adaptabilidad en escenarios agrícolas reales con superficies no uniformes. Asimismo, se proyecta su aplicación en contextos mineros donde las condiciones son similares o más exigentes durante la secuencia experimental confirma la integración eficiente de los subsistemas mecánicos electrónicos y de control. En este contexto, el sistema responde de manera consistente ante variaciones del entorno operativo, mostrando adaptabilidad en escenarios agrícolas reales con superficies no uniformes y proyectando su aplicación en contextos mineros. De igual forma, la secuencia experimental confirma la integración eficiente de los subsistemas mecánicos, electrónicos

y de control, validando el desempeño del sistema en condiciones no estructuradas y dinámicas, donde el robot mantiene su operatividad sin pérdida significativa de estabilidad o precisión. En consecuencia, los resultados muestran coherencia entre el diseño teórico y la implementación práctica, evidenciando un comportamiento robusto frente a perturbaciones externas y una arquitectura que permite operación flexible en diferentes escenarios. Por lo tanto, se confirma la viabilidad técnica del sistema propuesto y su capacidad para operar en ambientes hostiles, demostrando en conjunto eficiencia, estabilidad y aplicabilidad en condiciones reales.

Figura 3.6

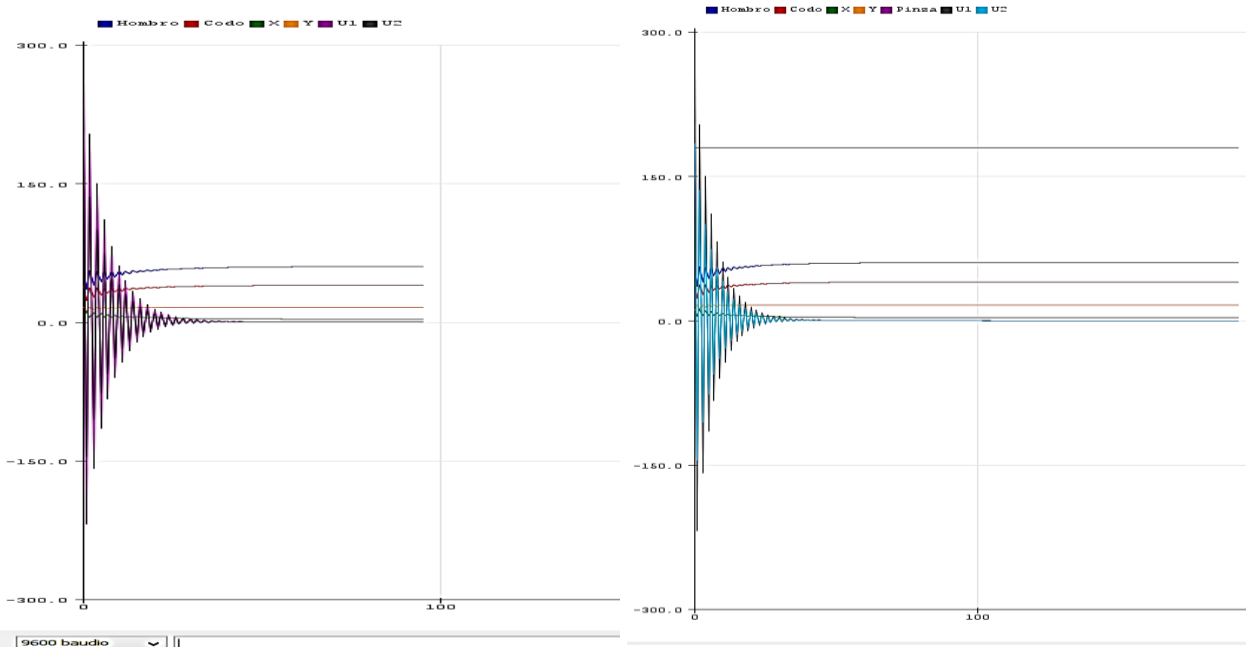
Interacción del robot con personas y pruebas en entorno real.



Nota. En la Figura 3.6 se observa el funcionamiento del robot colaborativo con manipulador en diferentes escenarios de prueba. Se evidencian tareas de interacción con usuarios, especialmente en entornos educativos, donde el sistema realiza seguimiento y manipulación de objetos. Asimismo, se aprecia la validación del desempeño del robot en condiciones reales, destacando su movilidad, estabilidad y capacidad de operación dentro del rango permitido por sus sensores.

Figura 3.7

Señales obtenidas del brazo robótico en operación en tiempo real



Nota. En la Figura 3.7 se presentan las señales obtenidas del brazo robótico en operación en tiempo real. Se observan las respuestas dinámicas de las articulaciones ante entradas de control, evidenciando un comportamiento transitorio con oscilaciones amortiguadas hasta alcanzar el estado estable. Estos resultados permiten validar el desempeño del sistema de control implementado, destacando su estabilidad, precisión y capacidad de seguimiento en condiciones reales de operación.

4 Discusión

Los resultados obtenidos, en concordancia con las pruebas experimentales mostradas en la figura, evidencian que el control predictivo implementado mejora de manera significativa la precisión, estabilidad y capacidad de seguimiento del robot colaborativo en entornos reales de operación, particularmente en condiciones de invernadero. Se observa que el sistema es capaz de desplazarse sobre surcos definidos, interactuar con cultivos y ejecutar tareas de posicionamiento del manipulador, lo cual valida su aplicabilidad en escenarios agrícolas semi-estructurados. No obstante, durante las pruebas en campo se identificaron desafíos importantes asociados a la variabilidad del entorno, tales como irregularidades del terreno, presencia de humedad, variaciones en la iluminación y obstáculos no previstos. Estas condiciones afectan directamente el desempeño del algoritmo de control, evidenciando la necesidad de mejorar su adaptabilidad y robustez frente a perturbaciones externas. Asimismo, se comprobó que la eficiencia global del sistema depende en gran medida de una adecuada calibración de los servomotores y de la calidad, resolución y confiabilidad de los sensores empleados.

En comparación con trabajos previos, como el sistema de seguimiento de trayectoria en robótica móvil con alimentación de energía solar desarrollado en 2023 (Villar, 2023), el presente proyecto representa una evolución significativa al integrar un manipulador robótico sobre una plataforma móvil, ampliando sus capacidades hacia tareas de interacción directa con el entorno, como la manipulación de cultivos, con potencial aplicación tanto en agricultura como en minería.

Por otro lado, en relación con desarrollos internacionales más avanzados, como el sistema de cosecha automatizada con robot de doble brazo (Yoshida et al., 2022), la presente propuesta constituye una solución más accesible y de menor complejidad, adaptada al contexto regional. Sin embargo, esto también pone en evidencia la necesidad de continuar mejorando el sistema, especialmente en términos de automatización, coordinación de múltiples grados de libertad y aumento de la productividad.

Finalmente, como línea de trabajo futuro, se propone la integración de técnicas de aprendizaje automático y visión artificial para optimizar la capacidad predictiva del sistema y mejorar su desempeño en entornos dinámicos. Asimismo, se plantea la incorporación de módulos de detección de enfermedades, plagas y estado de los cultivos mediante procesamiento de imágenes, lo cual permitiría ampliar significativamente el alcance del robot hacia aplicaciones de agricultura inteligente (Font et al., 2014; Nazim et al., 2023; Alaaudeen et al., 2024).

5 Conclusiones

El diseño, construcción e implementación del robot colaborativo orientado a aplicaciones agrícolas y defensa, evidenciado en las pruebas experimentales mostradas en las figuras, demuestran la viabilidad del sistema en entornos reales de operación, particularmente en invernaderos con surcos definidos. El robot móvil, equipado con un manipulador, logra desplazarse de manera estable sobre terrenos semi-estructurados, interactuando con cultivos mediante tareas de posicionamiento, seguimiento y aproximación, lo cual valida su funcionalidad en escenarios prácticos. El uso de un control predictivo permitió optimizar el comportamiento dinámico del sistema, reduciendo el error de seguimiento y mejorando la estabilidad durante el movimiento del manipulador y la plataforma móvil. En las pruebas realizadas, se observó una respuesta más suave y precisa frente a cambios de referencia, especialmente en tareas de aproximación a plantas, lo que resulta clave para aplicaciones como fumigación dirigida o manipulación selectiva. Asimismo, se evidencia que el sistema implementado, basado en una estrategia heurística de predicción del error, constituye una solución funcional y de bajo costo computacional. Sin embargo, las condiciones observadas en campo como irregularidades del terreno, interacción directa con plantas y presencia de operadores resaltan la necesidad de evolucionar hacia esquemas de control más robustos, integrando realimentación multisensorial y técnicas avanzadas de control adaptativo o predictivo basado en modelos más complejos. En comparación con sistemas tradicionales sin control anticipativo, el robot desarrollado presenta mejoras en precisión de movimiento, estabilidad y capacidad de operación en entornos reales. Además, su arquitectura modular (plataforma móvil, brazo manipulador, sensores y sistema de control) facilita su escalabilidad hacia diferentes aplicaciones, tanto en agricultura como en minería.

Finalmente, se proyecta como línea de desarrollo futuro la integración de técnicas de inteligencia artificial y visión por computadora, que permitan al robot identificar cultivos, detectar enfermedades, reconocer objetos o minerales, y tomar decisiones autónomas en tiempo real. Esto permitirá incrementar significativamente la competitividad tecnológica del sistema desarrollado por la empresa Villa Automation S.A.C., orientándolo hacia soluciones de agricultura inteligente y minería automatizada de mayor nivel.

6 Agradecimientos

Agradecimiento a Dios al equipo de Empresa Villa Automation SAC 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. Finalmente, a la Revista JICAAT por esta gran oportunidad.

7 Referencias

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

- 358 Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., Grieve, B., Chen, W. H., Cielniak, G., ... & Yang, G. Z. (2018).
359 Agricultural robotics: the future of robotic agriculture. arXiv preprint arXiv:1806.06762.
360 <https://arxiv.org/pdf/1806.06762>
- 361 Gasparetto, A., & Scalera, L. (2019). A brief history of industrial robotics in the 20th century. Advances in
362 Historical Studies, 8, 24-35 <https://doi.org/10.4236/ahs.2019.81002F>
- 363 Font, D., Pallejà, T., Tresanchez, M., Runcan, D., Moreno, J., Martínez, D., ... & Palacín, J. (2014). A proposal
364 for automatic fruit harvesting by combining a low cost stereovision camera and a robotic arm. Sensors, 14(7),
365 11557-11579. <https://doi.org/10.3390/s140711557>
- 366 Karabegović, I., Karabegović, E., Mahmić, M., & Husak, E. (2020). Implementation of industry 4.0 and
367 industrial robots in the manufacturing processes. In New Technologies, Development and Application II 5 (pp.
368 3-14). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18072-0_1
- 369 Katsuhiko, O. (2011). Engenharia de controle moderno. KATSUHIKO Ogata, 5th Ed. 801p. (libro)
- 370 Nise, N. S. (2012). Engenharia de sistemas de controle, 6ªed. LTC, São Paulo. (libro)
- 371 Nazim, Z., Tariq, M., Tariq, F., Kiran, A., & Rai, T. (2023). Harvesting Intelligence: Advancements in Fruit
372 Picking Through Artificial Intelligence. Journal of Computing & Biomedical Informatics, 6(01), 351-374.
373 <https://doi.org/10.56979/601/2023>
- 374 Lytridis, C., Kaburlasos, V. G., Pachidis, T., Manios, M., Vrochidou, E., Kalampokas, T., & Chatzistamatis, S.
375 (2021). An overview of cooperative robotics in agriculture. Agronomy, 11(9), 1818.
- 376 Ogata, K., & Severo, B. (1998). Engenharia de controle moderno. Prentice Hall do Brasil.
- 377 Paul, R. P. (1981). Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot
378 manipulators. Richard Paul.(libro)
- 379 Rahman, M. M., Khatun, F., Jahan, I., Devnath, R., & Bhuiyan, M. A. A. (2024). Cobotics: The Evolving Roles
380 and Prospects of Next- Generation Collaborative Robots in Industry 5.0. Journal of Robotics, 2024(1), 2918089.
381 <https://doi.org/10.1155/2024/2918089>
- 382 Sarmiento Gamboa, K. S., Vásquez Lagos, J. E., & Laguna Suárez, Ó. L. (2016). Desarrollo de planeación y
383 seguimiento de trayectorias para un vehículo autónomo (Bachelor's thesis, Universidad Piloto de Colombia).
- 384 Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). "Springer Handbook of Robotics". Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_1
- 385
- 386 Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). "Reinforcement Learning: An Introduction". MIT Press.
387 <https://doi.org/10.1017/S0263574799271172>
- 388 Villar, J. L. H., García, J. O., & Hiyo, S. Y. M. (2020). Diseño y construcción de un sistema automatizado de
389 control de bombas de agua en un cultivo hidropónico en el entorno Arduino, UNSCH–Ayacucho.
390 <https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2020.0010/>
- 391 Villar, J. L. H., & Cunha, J. P. V. (2022, September). Sliding-Mode Controllers for Soil Moisture Modeled by
392 Nonlinear Parabolic Partial Differential Equations. In 2022 16th International Workshop on Variable Structure
393 Systems (VSS) (pp. 237-242). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VSS57184.2022.9902067>
- 394 Villar, J. L. H. (2023). Seguimiento de trayectoria en robótica móvil con alimentación de energía solar. Revista
395 de Investigación Científica de la UNF–Aypate, 2(4), 8-19. <https://doi.org/10.57063/ricay.v2i4.64>
- 396 Villar, J. L. H., & Hiyo, S. Y. M. (2025). Diseño y Control Predictivo de un Robot Colaborativo para
397 Aplicaciones en Agricultura y Minería. Revista de Investigación Científica de la UNF–Aypate, 4(1), 37-49.
398 <https://doi.org/10.57063/ricay.v4i1.147>
- 399 Yoshida, T., Onishi, Y., Kawahara, T., & Fukao, T. (2022). Automated harvesting by a dual-arm fruit harvesting
400 robot. ROBOMECH journal, 9(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40648-022-00233-9>
- 401 Zheng, Y. F., & Hemami, H. (1985). Mathematical modeling of a robot collision with its environment. Journal
402 of Robotic Systems, 2(3), 289-307. <https://doi.org/10.1002/rob.4620020307>
- 403