

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

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

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

4 * **Correspondencia:** Jose Luis Huayanay Villar , villaautomationeirl@gmail.com

5 DOI: <https://doi.org/10.0000/villautomation.art150> Aceptación:02/01/2026 Publicación:05/03/2026

6 **Resumen**

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

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

19 **Abstract**

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

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

Depósito Legal: 2026-03221

1 Introducción

32

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

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

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

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

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

70

71

72

Depósito Legal: 2026-03221

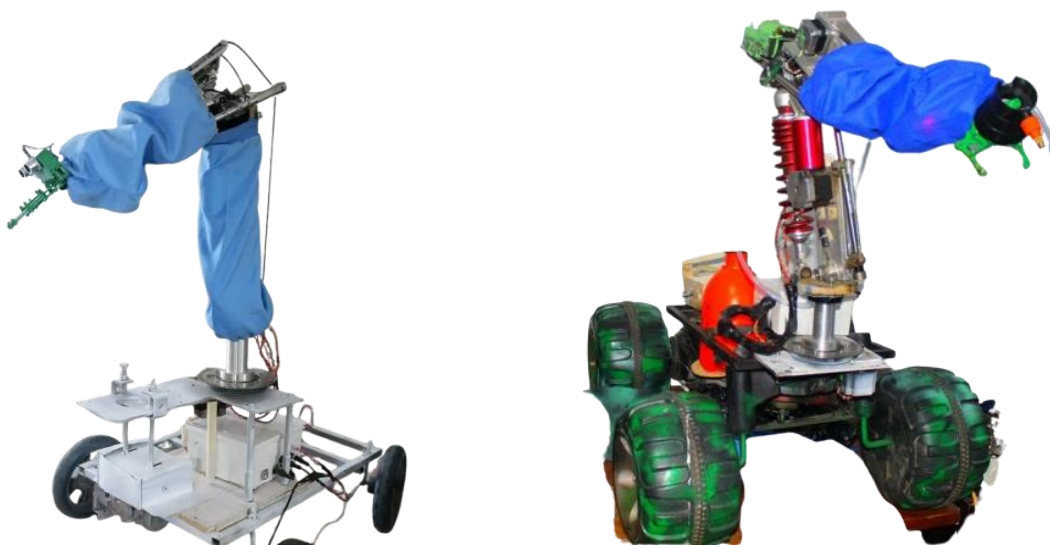
73

2 Materiales y métodos

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

80 **Figura 1**

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



82

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

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

89 Robot RB-VA03 (izquierda)

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

97 Robot RB-VA04 (derecha)

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

104 2.2 Modelamiento matemático de los brazos robot

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

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

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

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

116 Donde

117 $\theta(k)$ es la posición actual (posicionActual)

118 $\theta_{d(k)}$ es la posición objetivo (posicionObjetivo)

119 $e(k)$ es el error

120 $u(k)$ es la señal de control (velocidad del motor)

121 Δt el tiempo de muestreo

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

123 (Zheng, & Hemami, 1985):

$$124 \theta = [\theta_b, \theta_h, \theta_c, \theta_{mv}, \theta_{mh}, \theta_p] \quad (1)$$

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

$$129 e(t) = \theta_d(t) - \theta_a(t). \quad (2)$$

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

$$131 e_{predictivo} = e(t)\alpha^h.$$

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

$$133 u(t) = k_p e(t) + k_i e_{predictivo} \quad (3)$$

134 Este control produce un ángulo de salida:

$$135 \theta_0 = \text{constrain}(u(t), 0, 180)$$

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

$$138 \theta_a = \theta_0 \quad (4)$$

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

140 Asimismo podemos reescribir en función del torque y Angulo:

$$141 \theta_0 = \frac{1}{J} \int (\tau - b\dot{\theta}) dt \quad (5)$$

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

$$143 \quad \tau = J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} \quad (6)$$

144 Donde:

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

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

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

148 θ = Ángulo de la articulación (rad).

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

$$150 \quad \tau = k_p e(t) + k_i \sum e_{\text{predictivo}} + k_d \frac{de}{dt}$$

$$151 \quad J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = k_p e(t) + k_i \sum e_{\text{predictivo}} + k_d \frac{de}{dt} \quad (7)$$

152

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

155 2.2 Modelamiento matemático móvil

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

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

$$164 \quad e_b(t) = k_m k_g \omega_m(t) \quad (8)$$

165 Aplicando la ley de Kirchoff tenemos:

$$166 \quad V_m(t) - R_m I_m(t) - L_m \frac{dI_m(t)}{dt} - k_m k_g \omega_l(t) = 0 \quad (9)$$

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

$$169 \quad V_m(t) - R_m I_m(t) - k_m k_g \omega_l(t) = 0$$

$$170 \quad V_m(t) = I_m R_m + k_m k_g \omega_l \quad (10)$$

171 Aislando $I_m(t)$, tenemos:

$$172 \quad I_m(t) = \frac{V_m(t) - k_m k_g \omega_l(t)}{R_m} \quad (11)$$

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

177 $T_o = k_g T_m$

178 $T_o = k_g \left(J_m \omega_m + J \frac{\dot{\omega}_l}{k_g} \right)$ (12)

179 $T_o = \dot{\omega}_l (J_m k_g^2 + J_l)$

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

183 $T_m = k_m I_m$

184 $I_m = \frac{T_m}{k_m} = \frac{T_o}{k_m k_g} = \frac{k_g^2 J_m + J_l}{k_m k_g}$ (13)

185 $I_m = \dot{\omega} \frac{J_{\{eq\}}}{k_m k_g}$

186 Donde

187 $J_{\{eq\}} = k_g^2 J_m + J_l$ (14)

188 **3 Resultados**

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

198 **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

Depósito Legal: 2026-03221

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

199

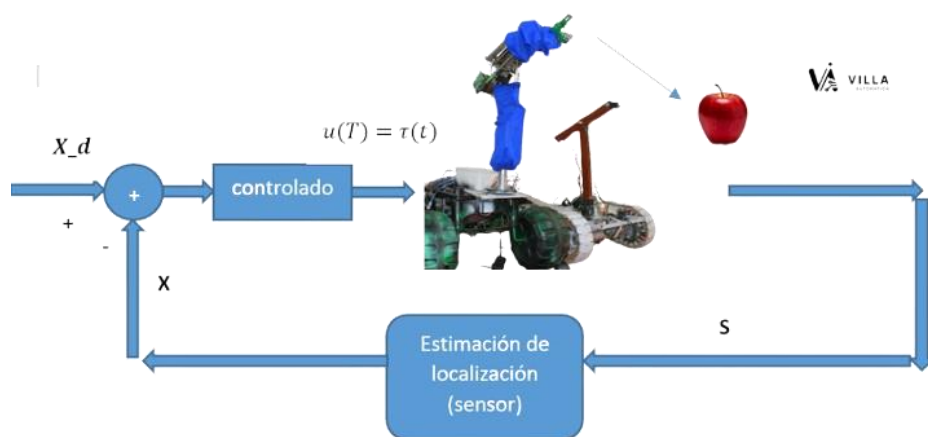
200 **Tabla 1.**

201 *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 engranaies	k_g	14	-
Momento de inercia del disco	J_l	0,00003	kgm^2
Inercia da armadura	J_m	3,87	kgm^2

202 **Figura 3.1**

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

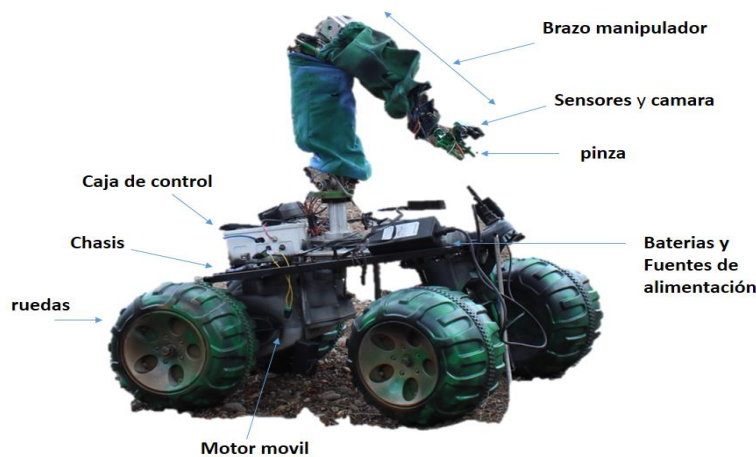


204

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

209 **Figura 3.2**

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



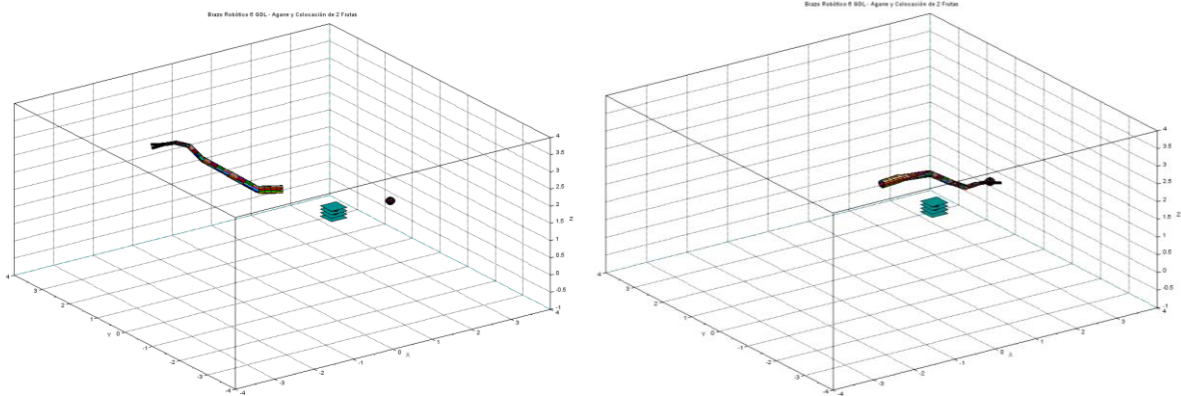
211

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

215 **Figura 3.3**

216 *Simulación del manipulador*

Depósito Legal: 2026-03221



217

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

220

221

222 **Figura 3.4**



223

Depósito Legal: 2026-03221

224



225



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

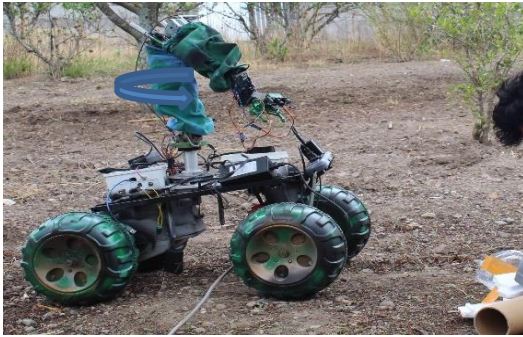
232 **Figura 3.5**

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

234



235



236



237



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

240 Se observa el desplazamiento del sistema móvil sobre terreno irregular evidenciando una adecuada
241 estabilidad y tracción, asimismo el manipulador ejecuta tareas de interacción con el entorno
242 demostrando capacidad de posicionamiento y aproximación controlada. Durante la operación del brazo
243 robótico el sistema mantiene estabilidad sin comprometer el equilibrio del robot, luego las pruebas
244 incluyen condiciones exigentes como la presencia de fuego lo cual permite evaluar su desempeño en
245 entornos extremos. Durante las pruebas del robot demuestra resistencia mecánica y funcional frente a
246 condiciones adversas del entorno. Se evidencia la interacción humano robot mediante monitoreo y
247 control a través de una computadora portátil. Esto sugiere la implementación de estrategias de control

Depósito Legal: 2026-03221

248 supervisado o teleoperado. Asimismo, el sistema responde de manera consistente ante variaciones del
249 entorno operativo. Luego se observa adaptabilidad en escenarios agrícolas reales con superficies no
250 uniformes. Asimismo, se proyecta su aplicación en contextos mineros donde las condiciones son
251 similares o más exigentes durante la secuencia experimental confirma la integración eficiente de los
252 subsistemas mecánicos electrónicos y de control. En este contexto, el sistema responde de manera
253 consistente ante variaciones del entorno operativo, mostrando adaptabilidad en escenarios agrícolas
254 reales con superficies no uniformes y proyectando su aplicación en contextos mineros. De igual forma,
255 la secuencia experimental confirma la integración eficiente de los subsistemas mecánicos, electrónicos
256 y de control, validando el desempeño del sistema en condiciones no estructuradas y dinámicas, donde
257 el robot mantiene su operatividad sin pérdida significativa de estabilidad o precisión. En consecuencia,
258 los resultados muestran coherencia entre el diseño teórico y la implementación práctica, evidenciando
259 un comportamiento robusto frente a perturbaciones externas y una arquitectura que permite operación
260 flexible en diferentes escenarios. Por lo tanto, se confirma la viabilidad técnica del sistema propuesto
261 y su capacidad para operar en ambientes hostiles, demostrando en conjunto eficiencia, estabilidad y
262 aplicabilidad en condiciones reales.

263 **Figura 3.6**

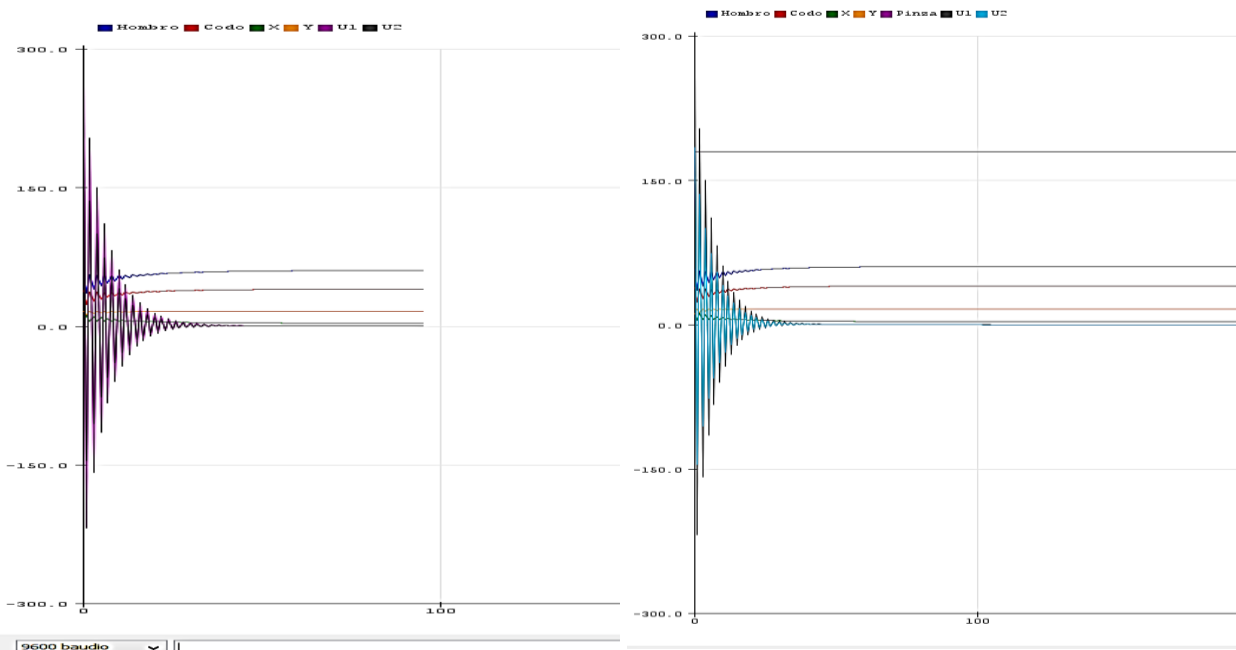
264 *Interacción del robot con personas y pruebas en entorno real.*



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

276 **Figura 3.7**

277 *Señales obtenidas del brazo robótico en operación en tiempo real*



278

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

284

4 Discusión

285 Los resultados obtenidos, en concordancia con las pruebas experimentales mostradas en la figura, evidencian
 286 que el control predictivo implementado mejora de manera significativa la precisión, estabilidad y capacidad de
 287 seguimiento del robot colaborativo en entornos reales de operación, particularmente en condiciones de
 288 invernadero. Se observa que el sistema es capaz de desplazarse sobre surcos definidos, interactuar con cultivos
 289 y ejecutar tareas de posicionamiento del manipulador, lo cual valida su aplicabilidad en escenarios agrícolas
 290 semi-estructurados. No obstante, durante las pruebas en campo se identificaron desafíos importantes asociados
 291 a la variabilidad del entorno, tales como irregularidades del terreno, presencia de humedad, variaciones en la
 292 iluminación y obstáculos no previstos. Estas condiciones afectan directamente el desempeño del algoritmo de
 293 control, evidenciando la necesidad de mejorar su adaptabilidad y robustez frente a perturbaciones externas.
 294 Asimismo, se comprobó que la eficiencia global del sistema depende en gran medida de una adecuada
 295 calibración de los servomotores y de la calidad, resolución y confiabilidad de los sensores empleados.
 296

297 En comparación con trabajos previos, como el sistema de seguimiento de trayectoria en robótica móvil con
 298 alimentación de energía solar desarrollado en 2023 (Villar, 2023), el presente proyecto representa una evolución
 299 significativa al integrar un manipulador robótico sobre una plataforma móvil, ampliando sus capacidades hacia
 300 tareas de interacción directa con el entorno, como la manipulación de cultivos, con potencial aplicación tanto en
 301 agricultura como en minería.
 302

303 Por otro lado, en relación con desarrollos internacionales más avanzados, como el sistema de cosecha
 304 automatizada con robot de doble brazo (Yoshida et al., 2022), la presente propuesta constituye una solución más
 305 accesible y de menor complejidad, adaptada al contexto regional. Sin embargo, esto también pone en evidencia

Depósito Legal: 2026-03221

306 la necesidad de continuar mejorando el sistema, especialmente en términos de automatización, coordinación de
307 múltiples grados de libertad y aumento de la productividad.

308
309 Finalmente, como línea de trabajo futuro, se propone la integración de técnicas de aprendizaje automático y
310 visión artificial para optimizar la capacidad predictiva del sistema y mejorar su desempeño en entornos
311 dinámicos. Asimismo, se plantea la incorporación de módulos de detección de enfermedades, plagas y estado
312 de los cultivos mediante procesamiento de imágenes, lo cual permitiría ampliar significativamente el alcance
313 del robot hacia aplicaciones de agricultura inteligente (Font et al., 2014; Nazim et al., 2023; Alaaudeen et al.,
314 2024).

315 **5 Conclusiones**

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

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

339 **6 Agradecimientos**

340 Agradecimiento a Dios al equipo de Empresa Villa Automation SAC por ser el impulsor en el desarrollo de
341 tecnologías a nivel nacional. Al equipo de trabajo que contribuyó en el desarrollo de este importante proyecto
342 en beneficio de la sociedad Ayacuchana y del Perú. Finalmente, a la Revista JICAAT por esta gran oportunidad.

343 **7 Referencias**

344 Aguilar, Åström, K. J., & Wittenmark, B. (2013). Computer-controlled systems: theory and design. Courier
345 Corporation. (libro)
346 Alaaudeen, K. M., Selvarajan, S., Manoharan, H., & Jhaveri, R. H. (2024). Intelligent robotics harvesting system
347 process for fruits grasping prediction. Scientific Reports, 14(1), 2820. [https://doi.org/10.1038/s41598-024-
348 52743-8](https://doi.org/10.1038/s41598-024-52743-8)

- 349 Cárdenas Rondán, R. D. (2024). Diseño de un sistema teleoperado para recolección de residuos sólidos flotantes
350 en humedales.
- 351 Craig, J. J. (2020). "Introduction to Robotics: Mechanics and Control". Pearson.
352 <https://repositorio.unitec.edu/server/api/core/bitstreams/fbbeb3da-65dd-4384-a778-a0e22cb104e2/content>
- 353 Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., Grieve, B., Chen, W. H., Cielniak, G., ... & Yang, G. Z. (2018).
354 Agricultural robotics: the future of robotic agriculture. arXiv preprint arXiv:1806.06762.
355 <https://arxiv.org/pdf/1806.06762>
- 356 Gasparetto, A., & Scalera, L. (2019). A brief history of industrial robotics in the 20th century. Advances in
357 Historical Studies, 8, 24-35 <https://doi.org/10.4236/ahs.2019.81002F>
- 358 Font, D., Pallejà, T., Tresanchez, M., Runcan, D., Moreno, J., Martínez, D., ... & Palacín, J. (2014). A proposal
359 for automatic fruit harvesting by combining a low cost stereovision camera and a robotic arm. Sensors, 14(7),
360 11557-11579. <https://doi.org/10.3390/s140711557>
- 361 Karabegović, I., Karabegović, E., Mahmić, M., & Husak, E. (2020). Implementation of industry 4.0 and
362 industrial robots in the manufacturing processes. In New Technologies, Development and Application II 5 (pp.
363 3-14). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18072-0_1
- 364 Katsuhiko, O. (2011). Engenharia de controle moderno. KATSUHIKO Ogata, 5th Ed. 801p. (libro)
- 365 Nise, N. S. (2012). Engenharia de sistemas de controle, 6ªed. LTC, São Paulo. (libro)
- 366 Nazim, Z., Tariq, M., Tariq, F., Kiran, A., & Rai, T. (2023). Harvesting Intelligence: Advancements in Fruit
367 Picking Through Artificial Intelligence. Journal of Computing & Biomedical Informatics, 6(01), 351-374.
368 <https://doi.org/10.56979/601/2023>
- 369 Lytridis, C., Kaburlasos, V. G., Pachidis, T., Manios, M., Vrochidou, E., Kalampokas, T., & Chatzistamatis, S.
370 (2021). An overview of cooperative robotics in agriculture. Agronomy, 11(9), 1818.
- 371 Ogata, K., & Severo, B. (1998). Engenharia de controle moderno. Prentice Hall do Brasil.
- 372 Paul, R. P. (1981). Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot
373 manipulators. Richard Paul.(libro)
- 374 Rahman, M. M., Khatun, F., Jahan, I., Devnath, R., & Bhuiyan, M. A. A. (2024). Cobotics: The Evolving Roles
375 and Prospects of Next- Generation Collaborative Robots in Industry 5.0. Journal of Robotics, 2024(1), 2918089.
376 <https://doi.org/10.1155/2024/2918089>
- 377 Sarmiento Gamboa, K. S., Vásquez Lagos, J. E., & Laguna Suárez, Ó. L. (2016). Desarrollo de planeación y
378 seguimiento de trayectorias para un vehículo autónomo (Bachelor's thesis, Universidad Piloto de Colombia).
- 379 Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). "Springer Handbook of Robotics". Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_1
- 380
- 381 Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). "Reinforcement Learning: An Introduction". MIT Press.
382 <https://doi.org/10.1017/S0263574799271172>
- 383 Villar, J. L. H., García, J. O., & Hiyo, S. Y. M. (2020). Diseño y construcción de un sistema automatizado de
384 control de bombas de agua en un cultivo hidropónico en el entorno Arduino, UNSCH–Ayacucho.
385 <https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2020.0010/>
- 386 Villar, J. L. H., & Cunha, J. P. V. (2022, September). Sliding-Mode Controllers for Soil Moisture Modeled by
387 Nonlinear Parabolic Partial Differential Equations. In 2022 16th International Workshop on Variable Structure
388 Systems (VSS) (pp. 237-242). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VSS57184.2022.9902067>
- 389 Villar, J. L. H. (2023). Seguimiento de trayectoria en robótica móvil con alimentación de energía solar. Revista
390 de Investigación Científica de la UNF–Aypate, 2(4), 8-19. <https://doi.org/10.57063/ricay.v2i4.64>
- 391 Villar, J. L. H., & Hiyo, S. Y. M. (2025). Diseño y Control Predictivo de un Robot Colaborativo para
392 Aplicaciones en Agricultura y Minería. Revista de Investigación Científica de la UNF–Aypate, 4(1), 37-49.
393 <https://doi.org/10.57063/ricay.v4i1.147>
- 394 Yoshida, T., Onishi, Y., Kawahara, T., & Fukao, T. (2022). Automated harvesting by a dual-arm fruit harvesting
395 robot. ROBOMECH journal, 9(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40648-022-00233-9>
- 396 Zheng, Y. F., & Hemami, H. (1985). Mathematical modeling of a robot collision with its environment. Journal
397 of Robotic Systems, 2(3), 289-307. <https://doi.org/10.1002/rob.4620020307>
- 398