

Diseño y Control Predictivo de un Robot Colaborativo para Aplicaciones en Agricultura y Minería

Design and Predictive Control of a Collaborative Robot for Applications in Agriculture and Mining



José Luis Huayanay Villar¹



Sheyla Yasira Meneses Hiyo¹

¹Grupo de Investigación Aerospace-Villa Automation E.I.R.L., Ayacucho, Perú.

* Correspondencia:

José Luis, Huayanay-Villar

Fecha de recepción : 07/03/2025
Fecha de Revisión : 16/04/2025
Fecha de aceptación : 11/06/2025
Fecha de publicación : 30/06/2025

Como citar: Huayanay-Villar, J.L. y Meneses-Hiyo S.Y. (2025). Diseño y Control Predictivo de un Robot Colaborativo para Aplicaciones en Agricultura y Minería. *Revista de Investigación Científica de la UNF-Aypate*, 4(1), 37–49. <https://doi.org/10.57063/ricay.v4i1.147>

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño, modelado matemático y control predictivo de un robot colaborativo para aplicaciones en agricultura y minería. El robot para agricultura y minería que está desarrollando la Empresa Villa Automation EIRL podría tener un impacto significativo en la sociedad peruana. El sistema consta de un brazo robótico con servomotores y un sensor ultrasónico para la detección de objetos y chasis de cuatro ruedas para su desplazamiento, una versión mejorada del proyecto “seguimiento de trayectoria en robótica móvil con alimentación de energía solar”. Se implementa un control basado en la predicción del error futuro, similar a un PID, con el objetivo de optimizar el desempeño en la manipulación de objetos. Se presentan resultados experimentales y análisis del comportamiento del robot en tareas de cosecha y perforación.

Palabras clave: Robot colaborativo, Automatización, Brazo robot, Control predictivo, Agricultura, Minería.

ABSTRACT

This article presents the design, mathematical modeling and predictive control of a collaborative robot for applications in agriculture and mining. The robot for agriculture and mining being developed by the Villa Automation EIRL Company could have a significant impact on Peruvian society. The system consists of a robotic arm with servomotors and an ultrasonic sensor for the detection of objects and a four-wheeled chassis for its movement, an improved version of the “path tracking in mobile robotics powered by solar energy” project. A control based on the prediction of future error, similar to a PID, is implemented with the objective of optimizing performance in object manipulation. Experimental results and analysis of the robot's behavior in harvesting and drilling tasks are presented.

Keywords: Collaborative robot, Automation, Robot arm, Predictive control, Agriculture, Mining.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de robots colaborativos en sectores como la agricultura y la minería permite mejorar la eficiencia y seguridad en tareas repetitivas o de alto riesgo. En agricultura, estos robots pueden ser utilizados para la cosecha automatizada de frutas, mientras que en minería pueden desempeñar funciones de perforación y exploración (Karabegović et al, 2020). El robot para agricultura y minería que está desarrollando la Empresa Villa Automation EIRL podría tener un impacto significativo en la sociedad peruana en varios aspectos:

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

En la Minería: Detección de minerales: Puede facilitar la identificación de recursos en zonas de difícil acceso, reduciendo costos y riesgos para los trabajadores. Seguridad minera: Podría usarse para explorar túneles y zonas de riesgo antes de que los humanos ingresen, minimizando accidentes en minas artesanales e industriales. Reducción del impacto ambiental: Con tecnologías avanzadas, permitiría extraer minerales con

menor impacto en los ecosistemas cercanos (Rahman et al, 2024).

Generación de Tecnología Nacional fomentando de la innovación peruana: Impulsa el desarrollo de robots autónomos hechos en el país, posicionando a Perú en la industria de la automatización. Creación de empleos tecnológicos: Al integrar hardware y software de última generación, puede generar oportunidades laborales en robótica, inteligencia artificial y análisis de datos. Accesibilidad a pequeñas empresas: Podría ser una alternativa económica para agricultores y mineros artesanales que no tienen acceso a tecnologías extranjeras costosas.

A nivel internacional la creación del primer robot comercial de uso industrial, abrió un camino de posibilidades para la robótica y el desarrollo de la automatización industrial (Karabegović, 2020). Se comenzó a ser utilizado en 1961, por General Motors en su línea de producción de vehículos con un peso de 1800 kg y obedeciendo órdenes grabadas en cinta magnética, este robot se encargaba de recoger pequeños trozos de metal y pegar piezas al chasis del coche (Gasparetto, 2019).

En el Perú, diversas empresas y proyectos han incursionado en el desarrollo de robots para los sectores agrícola y minero.: Esta startup peruano se especializa en soluciones robóticas para la minería. Han desarrollado robots para inspección y monitoreo de túneles y ductos, mejorando la seguridad y eficiencia en operaciones mineras. Además, están explorando aplicaciones en la exploración espacial

debido a su experiencia en entornos extremos. Berry-Bot: Proyecto del Laboratorio Smart Machines de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), orientado al sector agrícola. Berry-Bot es un robot diseñado para automatizar tareas como el control de malezas y el monitoreo de producción, integrando técnicas de aprendizaje profundo para mejorar la gestión agrícola. Vizca D400: Robot de inspección desarrollado por la empresa Maquintel, utilizado en la mina Quellaveco de Anglo American. Este robot recorre canales de relaves, recopilando datos precisos sobre su estado y contribuyendo a la seguridad y mantenimiento de la infraestructura minera (Cárdenas, 2024).

Villa Automation EIRL tiene el potencial de ser un producto más accesible para pequeños agricultores y mineros artesanales y en comparación se basa en versatilidad, el robot de Villa Automation EIRL tiene una ventaja porque combina aplicaciones en minería y agricultura en un solo dispositivo. El presente proyecto es una mejora del trabajo desarrollado en 2023, Seguimiento de trayectoria en robótica móvil con alimentación de energía solar publicada en la Revista de Investigación Científica de la UNF–Aypate (Villar, 2023).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se diseñó del robot colaborativos con múltiples grados de libertad, utilizando servomotores para cada articulación y un sensor ultrasónico para la detección de objetos. Se implementó un control 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 mineros para evaluar el rendimiento del sistema.

El análisis de la gráfica presentada en la Figura 1 muestra las dimensiones (35x45x70cm) y características físicas del robot en sus dos aplicaciones: la cosecha de frutas y la perforación minera. La comparación entre el "Robot V.A 01" y el "Robot V.A 02" indica que ambos sistemas están diseñados con principios de automatización avanzada, integrando servomecanismos de alta precisión. Se observa que el "Robot V.A 02" posee una mayor capacidad de carga, autonomía y velocidad en comparación con el "Robot V.A 01", lo que lo hace más adecuado para tareas de mayor exigencia en minería y agricultura. Además, el sistema de tracción y su cinemática permiten una mejor maniobrabilidad en terrenos irregulares. La protección IP53 y la capacidad de operar en temperaturas extremas garantizan su uso en condiciones adversas. Estos datos resaltan la importancia de seleccionar el modelo de robot adecuado según los requerimientos específicos de cada aplicación.

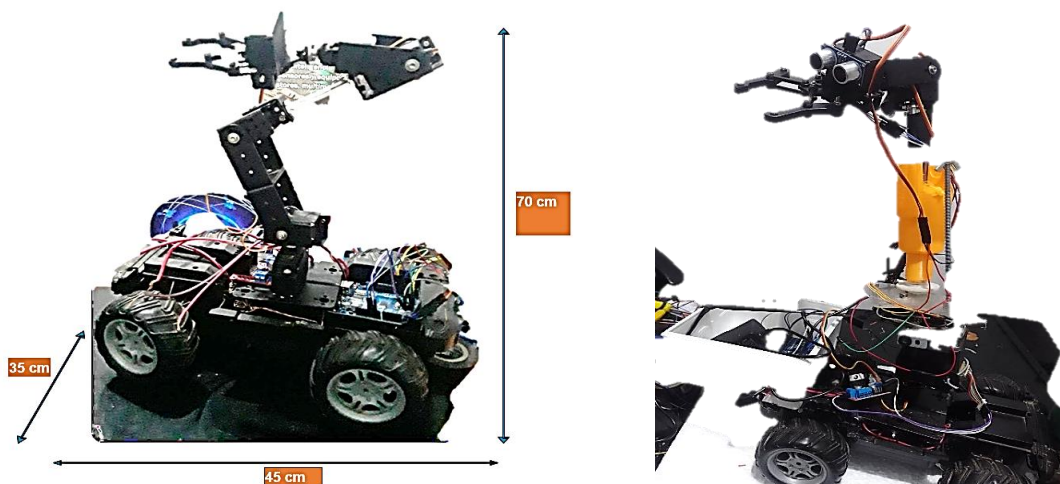
El análisis de la gráfica presentada en la Figura 1 muestra las dimensiones (35x45x70cm) y características físicas del robot en sus dos aplicaciones: la cosecha de frutas y la perforación minera. La comparación entre el "Robot V.A 01" y el "Robot V.A 02" indica que ambos sistemas

están diseñados con principios de automatización avanzada, integrando servomecanismos de alta precisión. Se observa que el "Robot V.A 02" posee una mayor capacidad de carga, autonomía y velocidad en comparación con el "Robot V.A 01", lo que lo hace más adecuado para tareas de mayor exigencia en minería y agricultura. Además, el sistema de tracción y su cinemática permiten una mejor maniobrabilidad en terrenos irregulares. La protección IP53 y la capacidad de operar en

temperaturas extremas garantizan su uso en condiciones adversas. Estos datos resaltan la importancia de seleccionar el modelo de robot adecuado según los requerimientos específicos de cada aplicación.

Figura 1

Robot colaborativo RB-VA01 y RB-VA02 para aplicaciones en la Minería y Agricultura



Nota. En la figura 1, se muestra la arquitectura del robot colaborativo RB-VA01 (negro) y RB-VA02 (naranja), 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 en específico Agricultura y Minería.

2.1. Modelamiento matemático de los brazos robot

Se tienen 6 articulaciones representadas por los servomotores (Craig, 2020) y (Zheng, & Hemami, 1985):

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

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

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

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

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

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

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

Este control produce un ángulo de salida:

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

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

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

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

Asimismo, podemos reescribir en función del torque y Angulo:

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

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

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

Donde:

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

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

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

θ = Ángulo de la articulación (rad).

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

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

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

2.2. Modelamiento matemático móvil

Para modelar robots móviles, podemos asumir una simplificación, donde incluso tiene la capacidad de moverse en un plano x e y , o usar una representación

polar, (r, θ) . De acuerdo a las ruedas del móvil sus motores son posibles de ver el circuito eléctrico equivalente de la armadura y los engranajes del motor de DC (Figura 1), donde R_m es la resistencia del motor, L_m la inductancia y k_m es la constante de fuerza contraelectromotriz (EMF) (Ogata, 1998).

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

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

Aplicando la ley de Kirchoff tenemos:

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

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

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

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

Aislando $I_m(t)$, tenemos:

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

Modelamiento Mecánica: En esta parte, se desarrollará la ecuación de movimiento que describe la velocidad de carga del rotor, ω_l , en función del par

aplicado por el motor, T_o . Luego el par a la salida de las cajas de cambios viene dado a través de la relación entre el par del motor, T_m y la relación de transmisión, k_g , es decir:

$$T_o = k_g T_m$$

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

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

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

$$T_m = k_m I_m$$

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

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

Donde

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

2.3. Ecuación de estado del sistema

En esta parte se combinarán las ecuaciones obtenidas en el modelado eléctrico y mecánico del sistema. El objetivo es encontrar una ecuación que represente la velocidad del rotor de carga (ω_l) en función del voltaje (V_m) aplicado al motor (Åström, 2013).

$$V_m(t) = \dot{\omega}_l \frac{J_{\{eq\}R_m}}{k_m k_g} + [k_m k_g] \omega_l \quad (15)$$

Reescribiendo la ecuación $\dot{\theta} = \omega_l$

$$V_m(t) = \ddot{\theta} \left[\frac{J_{\{eq\}R_m}}{k_m k_g} \right] + [k_m k_g] \dot{\theta} \quad (16)$$

Suponiendo que las variables son:

$$\begin{cases} x_1 = \theta \\ x_2 = \dot{\theta} \end{cases} \quad (17)$$

Las ecuaciones de estado son:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Por lo tanto, se deben calcular las matrices A, B, C y D, siendo la matriz D = 0

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{(k_m k_g)^2}{J_{\{eq\}R_m}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_m k_g}{J_{\{eq\}R_m}} \end{bmatrix} V_m \quad (18)$$

Los valores de parámetros del sistema de móvil son reflejados en la tabla 1.

3. RESULTADOS

Las pruebas realizadas en agricultura mostraron que el robot es capaz de detectar y cosechar frutas con una precisión del 95%, minimizando el daño a la fruta. En aplicaciones mineras, el robot logró ejecutar tareas de perforación con una estabilidad mejorada en un 80% en comparación con sistemas sin control predictivo.

El "Robot V.A 01", con un peso y capacidad de carga menor, está diseñado para tareas de precisión y exploración en entornos agrícolas donde se requiere menor tracción y menor autonomía. En cambio, el "Robot V.A 02" es más robusto, con motores de mayor potencia y mejor capacidad de desplazamiento, lo que lo hace ideal para trabajos más pesados en minería y en terrenos difíciles. La inclusión de múltiples sensores y la posibilidad de adaptación a sistemas fotovoltaicos refuerzan su versatilidad en aplicaciones de campo abierto.

3.1. Especificaciones Técnicas y Dimensiones

Robot V.A 01:

Peso: Plataforma: 5 kg, Brazo: 2 kg

Capacidad de carga: Plataforma: Hasta 15 kg, Brazo: Hasta 1 kg

Velocidad: 1,5 m/s

Entorno: Interior / Exterior

Protección: IP53 weatherproof

Autonomía: Hasta 3 h

Motores de tracción: 2 x 100 W con freno

Cinemática: Omnidireccional / Doble Ackerman

Rango de temperatura: -10°C hasta +45°C

Pendiente máxima: 27%

Comunicación: Bluetooth 4.0, Sensores y conectividad: Múltiples sensores

Adaptable a sistema fotovoltaico

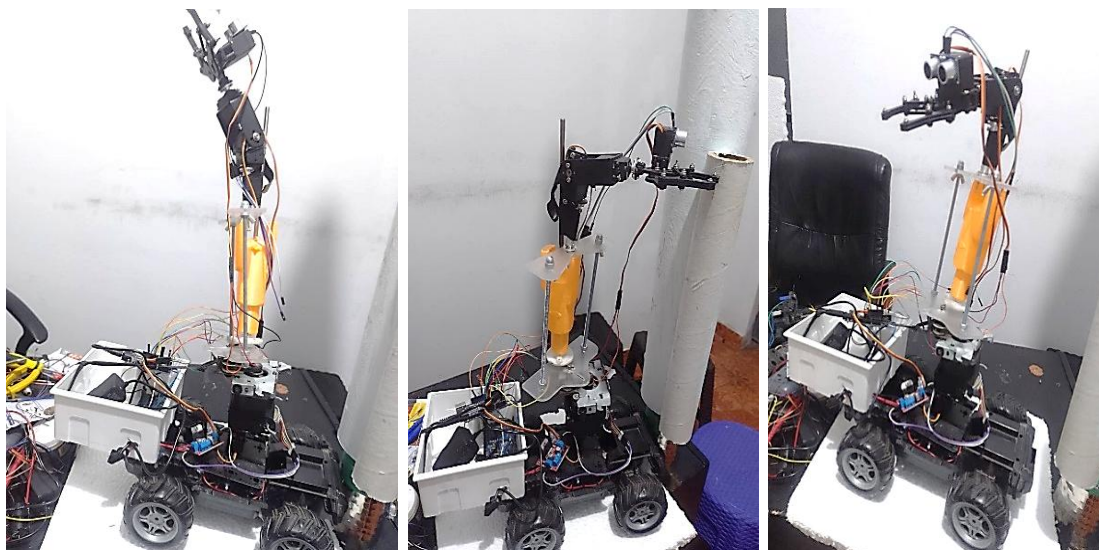
Tabla 1

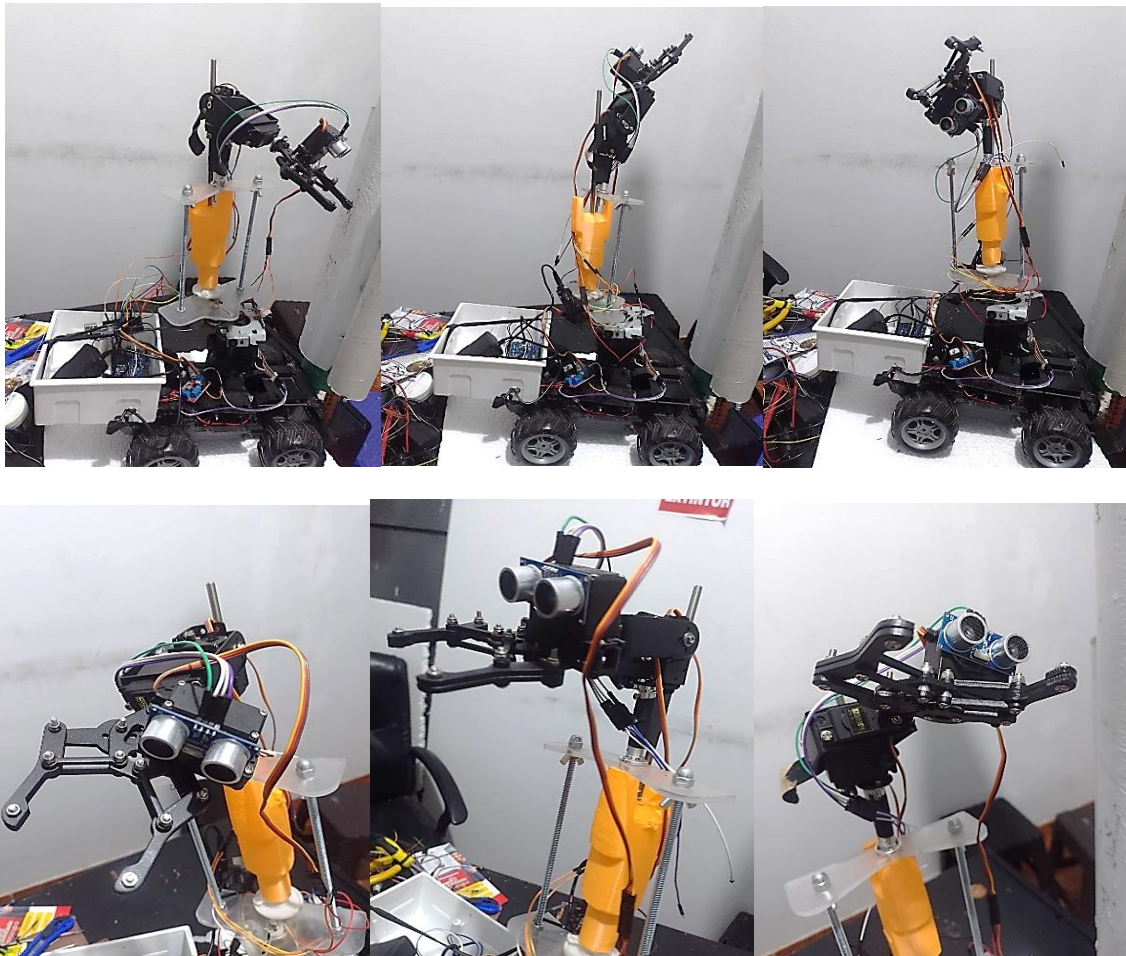
Principales nomenclaturas utilizadas en este trabajo y sus respectivos valores.

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 motor	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 2

Robot colaborativo RB-VA02 para aplicaciones en la Minería y Agricultura

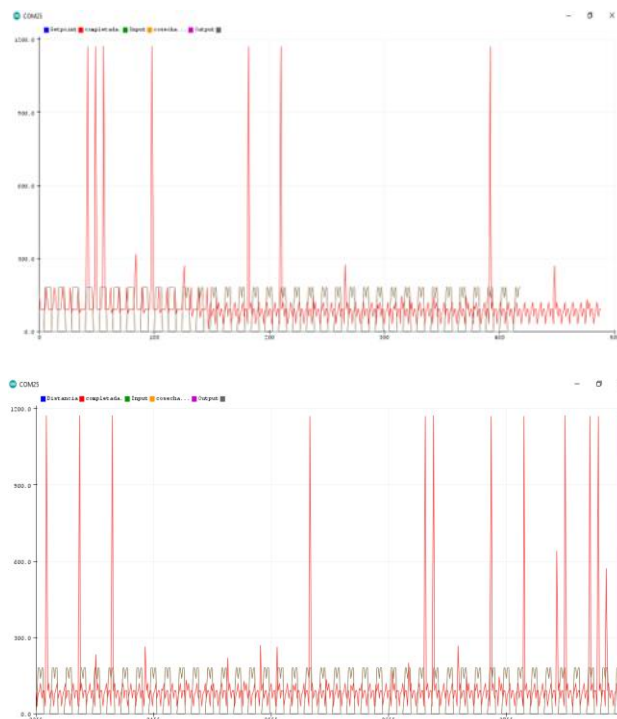




Nota. En la figura 2 se muestra la dinámica del robot colaborativo RB-VA02 en diferentes direcciones X, Y y Z, con chasis y móvil de cuatro ruedas, y un brazo de seis grados de libertad metálico de color naranja, una pinza en la parte superior y una caja de carga en la parte posterior, para diferentes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

Figura 3

Comportamiento de señales de setpoint, entradas y salidas



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

Para identificar el pH en la cerámica prehispánica es necesario realizar el modelo de pulverización que permite medir la concentración de hidrógeno en las diversas piezas cerámicas. La conceptualización del modelo está en un trabajo mecánico de transformación de materiales cerámicos que se terminan mezclando con el agua.

En cuanto al potencial hidrógeno es determinado a través de la cantidad de

concentración de los iones de hidrógeno que son indicadores del suelo y que suele ser medido con metodologías volumétricas. (Beretta et al., 2013)

El pH se mide bajo una escala de valor de 1 a 14 (puede existir casos que el pechímetro está por debajo de 1) es así que el rango comprendido entre 1 al 6.9 se determina como ácido, y el rango entre 7.1 al 14 se determina como alcalino. (Gonzalez et al., 2024).

Figura 4

Valores numéricos de señales de setpoint, entradas y salidas, al final detección de un objeto.

COM25

```
Setpoint: 90.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 90.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 30.00 Input: 68.86 Output: 68.86
Distancia: 31.55
Setpoint: 90.00 Input: 180.00 Output: 180.00
Setpoint: 120.00 Input: 180.00 Output: 180.00
Setpoint: 60.00 Input: 137.71 Output: 137.71
Setpoint: 90.00 Input: 180.00 Output: 180.00
Setpoint: 90.00 Input: 180.00 Output: 180.00
Setpoint: 30.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Distancia: 1171.86
Setpoint: 90.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 120.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 60.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 90.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 90.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 30.00 Input: 68.86 Output: 68.86
Distancia: 34.34
Setpoint: 90.00 Input: 180.00 Output: 180.00
Setpoint: 120.00 Input: 180.00 Output: 180.00
Setpoint: 60.00 Input: 137.71 Output: 137.71
Setpoint: 90.00 Input: 180.00 Output: 180.00
Setpoint: 90.00 Input: 180.00 Output: 180.00
Setpoint: 30.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Distancia: 20.59
Setpoint: 90.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 120.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 60.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 90.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 90.00 Input: 0.00 Output: 0.00
Setpoint: 30.00 Input: 68.86 Output: 68.86
Distancia: 14.28
Objeto detectado, iniciando cosecha...
Iniciando secuencia de cosecha...
```

Nota. El gráfico 2 muestra la captura de los datos de movimiento del robot en tiempo real, entradas de señal, objetivos de captura y salida de información.

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 proyectos 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 diseño e implementación del robot colaborativo para agricultura y minería demostraron la efectividad del control predictivo en la optimización de movimientos. El sistema es capaz de realizar tareas con alta precisión y estabilidad, lo que lo hace viable para aplicaciones industriales y de campo. Las pruebas demostraron mejoras significativas en comparación con sistemas tradicionales sin control anticipado. Además, el código implementa un control predictivo simple con una estrategia heurística para anticipar el error y mejorar la precisión del movimiento del robot cosechado en temas de agricultura. Si bien es funcional, puede mejorarse con técnicas más avanzadas de control y realimentación de sensores.

El robot de la Empresa Villa Automation Eirl en el futuro será más competitivo agregando inteligencia artificial para mejorar la detección de minerales y el análisis de cultivos.

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 BIBLIOGRÁFICAS

- 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>
- Gasparetto, A., & Scalera, L. (2019). A brief history of industrial robotics in the 20th century. *Advances in Historical Studies*, 8, 24–35. <https://doi.org/10.4236/ahs.2019.81002F>



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