

Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), noviembre-diciembre 2024,
Volumen 8, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6

CONTROL MULTIVARIABLE DE UN ROBOT MOVIL INDUSTRIALIZADO CON CALIDAD DE BAJO COSTO

**MULTIVARIABLE CONTROL OF AN INDUSTRIALIZED
MOBILE ROBOT WITH LOW-COST QUALITY**

Ing. Hernán Vinicio Morales Villegas

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, Ecuador

Milton Ramiro Aimacaña Sanchez

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, Ecuador

Bryan Israel Chango Guanoluisa

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, Ecuador

Katerin Mishel Simba Palomo

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, Ecuador

Emanuel Ricardo Sacta Paidá

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, Ecuador

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15342

Control multivariable de un robot movil industrializado con calidad de bajo costo

Ing. Hernán Vinicio Morales Villegas¹

hvmorales@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8211-1238>

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L
Latacunga, Ecuador

Milton Ramiro Aimacaña Sanchez

mraimacana@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-1629-7504>

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L
Latacunga, Ecuador

Bryan Israel Chango Guanoluisa

bichango@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-5986-6863>

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L
Latacunga, Ecuador

Katerin Mishel Simba Palomo

kmsimba@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-2570-3423>

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L
Latacunga, Ecuador

Emanuel Ricardo Sacta Paida

ersacta@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0008-5753-9513>

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L
Latacunga, Ecuador

RESUMEN

En este trabajo se propone un algoritmo de control discreto basado en axiomas de algebra lineal de un robot unicycle, a fin de analizar la evolución de los estados del sistema de control para diferentes periodos de muestreo y evaluar la estabilidad y robustez del control en tareas de regulación y seguimiento. Se modelaron la cinemática y las restricciones no holonómicas del robot, considerando parámetros como velocidad angular, velocidad lineal y características físicas del prototipo. Por tal motivo, se incluyó simulaciones y experimentos prácticos, implementando controladores multivariados MIMO y PID en motores DC. De esta manera, los resultados evidencian que el sistema es inestable con tiempos de muestreo superiores a 0.5 segundos. Sin embargo, para intervalos menores los controladores propuestos permiten un desempeño eficiente en seguimiento de trayectorias y regulación de posiciones. Además, el diseño basado en álgebra lineal demostró mayor robustez ante perturbaciones en comparación con el PID. Por lo que, se contribuye al desarrollo de estrategias avanzadas de control para robots móviles, destacando la importancia de la discretización y el manejo de restricciones cinemáticas en entornos dinámicos.

Palabras clave: Control discreto, robot unicycle, PID, MIMO, holonómicas

¹ Autor principal.

Correspondencia: hvmorales@espe.edu.ec

Multivariable control of an industrialized mobile robot with low-cost quality

ABSTRACT

This work proposes a discrete control algorithm based on linear algebra axioms for a unicycle robot, in order to analyze the evolution of the control system states for different sampling periods and to evaluate the stability and robustness of the control in regulation and tracking tasks. The kinematics and non-holonomic constraints of the robot were modeled, considering parameters such as angular velocity, linear velocity and physical characteristics of the prototype. For this reason, simulations and practical experiments were included, implementing multivariable MIMO and PID controllers in DC motors. In this way, the results show that the system is unstable with sampling times greater than 0.5 seconds. However, for smaller intervals the proposed controllers allow an efficient performance in trajectory tracking and position regulation. In addition, the design based on linear algebra showed greater robustness to disturbances compared to PID. Thus, it contributes to the development of advanced control strategies for mobile robots, highlighting the importance of discretization and the handling of kinematic constraints in dynamic environments.

Keywords: discrete control, unicycle robot, PID, MIMO, holonomic

Artículo recibido 18 noviembre 2024

Aceptado para publicación: 15 diciembre 2024



INTRODUCCIÓN

Los avances en el uso de la tecnología han permitido el desarrollo de sistemas más autónomos y con mayor eficiencia para realizar diversas tareas en entornos dinámicos. Siendo en estos sistemas, el desarrollo de estrategias de control para robots móviles tipo unicycle de importancia en las últimas décadas debido a su potencial en aplicaciones como exploración autónoma y transporte. Este tipo de robots, caracterizados por sus restricciones no holonómicas, requieren técnicas de control avanzadas que permitan garantizar su estabilidad y robustez en entornos dinámicos. (Rosales, A., Scaglia, G., Mut, V., & Di Sciascio, F., 2007)

Siendo uno de los problemas principales el relacionado con el diseño de controladores que puedan manejar la complejidad cinemática y dinámica inherente a estos sistemas. Investigaciones previas han explorado el uso de modelos dinámicos y controladores de seguimiento para optimizar el desempeño de robots unicycle. Por ejemplo, se ha estudiado cómo las dinámicas del robot afectan la precisión en el seguimiento de trayectorias y se han propuesto soluciones basadas en teoría de control y métodos numéricos.

Por lo que, la relevancia de este tema se extiende al uso de técnicas como el álgebra lineal y los controladores MIMO para mejorar la capacidad de navegación y adaptación en robots móviles, de manera que se pueda abordar las limitaciones no resueltas en investigaciones previas. Estas estrategias han demostrado ser efectivas al minimizar errores en el seguimiento de trayectorias y mejorar la estabilidad del sistema bajo perturbaciones externas. (Rosales, A., Scaglia, G., Mut, V., & Di Sciascio, F., 2009)

Es así que, el enfoque se sustenta en teorías de control discreto y álgebra lineal, y se enmarca en un marco teórico que incluye trabajos de Barrientos et al. (2007) y Ollero (2001), quienes han explorado modelos cinemáticos y controladores PID, aunque con limitaciones frente a sistemas multivariables y no ideales. Por lo tanto, el aporte del presente trabajo se centra en la combinación de técnicas de álgebra lineal con controladores multivariables MIMO para analizar y optimizar la evolución de los estados del sistema. Para lo cual, se espera que esta investigación no solo ayude a superar las limitaciones actuales en el control de robots móviles, sino que también proporcione nuevas perspectivas sobre su uso en tareas autónomas.



METODOLOGÍA

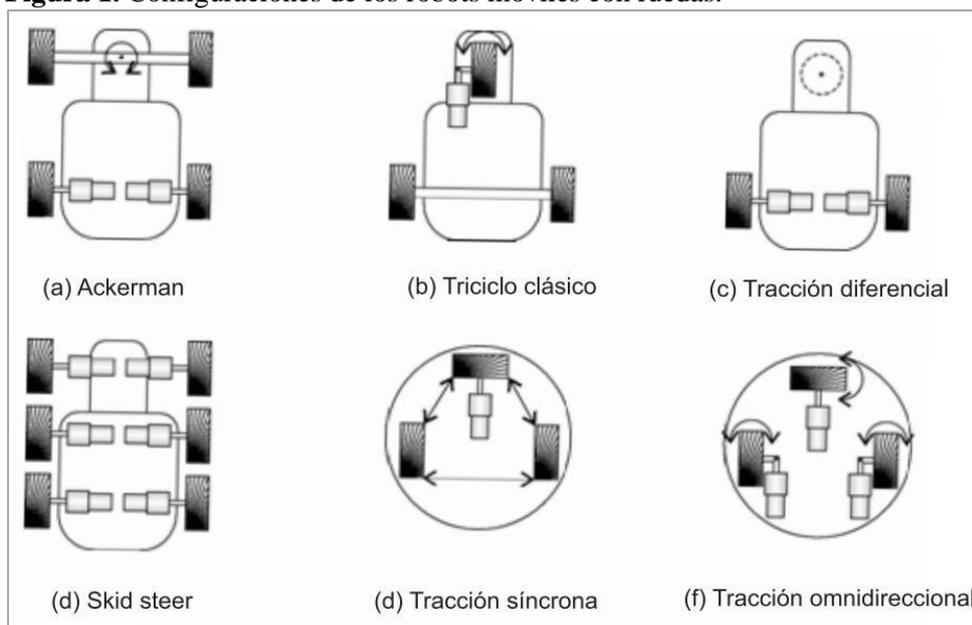
La robótica móvil surge como respuesta a la necesidad de ampliar el alcance de las aplicaciones robóticas, ya que los brazos robóticos iniciales estaban limitados por su fijación en un extremo. Además, busca aumentar la autonomía reduciendo la intervención humana.

En el ámbito del control de robots móviles terrestres, existe el desafío de las restricciones no holonómicas, que limitan el movimiento del robot y dificultan la ejecución de tareas específicas.

Aunque se investiga en robots con patas y orugas, la movilidad con ruedas está más desarrollada. En la figura 1 se muestra los diferentes tipos de rueda según la tarea, como ruedas fijas, de centro orientable, orientables no centradas (ruedas locas) y omnidireccionales (suecas). Dependiendo de la rueda, el robot tendrá distintos modos de desplazamiento, como omnidireccional, unicyclo, triciclo y cuatriciclo.

(Ollero, 2001.)

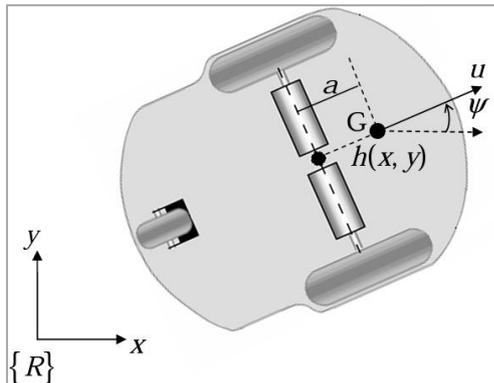
Figura 1. Configuraciones de los robots móviles con ruedas.



Restricciones y características del robot móvil tipo unicyclo

Describir las restricciones y las características de movimiento de un robot móvil de configuración tipo unicyclo, según se muestra en la Figura 2

Figura 2. Robot móvil.



Los robots móviles con configuración tipo monociclo cuentan con dos ruedas fijas alineadas y direccionables de forma independiente y un tercer volante descentrado que proporciona estabilidad a toda la estructura. Esta configuración provoca algunas restricciones de movimiento debido a las ruedas. Al ajustar la velocidad de las dos ruedas fijas de manera diferente, el robot de una rueda puede moverse hacia adelante o hacia atrás. Al cambiar las velocidades relativas de estas ruedas, el robot puede girar alrededor de su punto central, lo que le permite cambiar de dirección sin la necesidad de una dirección tradicional. Sin embargo, debido a esta configuración, los movimientos laterales o de traslación son más limitados en comparación con otro tipo de robots móviles. La estructura del robot de una rueda proporciona una cinemática relativamente simple, lo que lo hace útil para experimentar con nuevas estrategias de control y locomoción en diferentes entornos.

Cinemática del robot móvil tipo unicycle

Implementar en el software de MatLab (Script) la cinemática del robot móvil tipo unicycle. Considere el siguiente modelo matemático multivariable donde, a representa longitud desde el centro del eje del motor hasta la cara más distante de la rueda, es decir el radio de la llanta, $u(t)$ y $\omega(t)$ representa las velocidades de maniobrabilidad del robot móvil, $\psi(t)$ representa la orientación del robot móvil, $\dot{x}(t)$ y $\dot{y}(t)$ representan las velocidades lineales respecto al sistema de referencia $\{R\}$, y $\dot{\psi}(t)$ es la razón de cambio de la orientación respecto al eje z .

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -a \sin(\psi) \\ \sin(\psi) & a \cos(\psi) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(t) \\ \omega(t) \end{pmatrix}$$

Para poder implementar un controlador al modelo matemático multivariable del robot, se necesita de otro controlador que permita ajustar las entradas del modelo del robot, en este caso $u(t)$ y $\omega(t)$, las cuales son las velocidades angulares de los respectivos motores, mismas que son controladas por una entrada de voltaje representada como $v_u(t)$ y $v_\omega(t)$. El proceso descrito anteriormente se modela matemáticamente por las siguientes ecuaciones.

$$v_u(t) = \left(\frac{L_1 J_1}{K_{m_1}}\right) \ddot{u}(t) + \left(\frac{L_1 B_1 + R_1 J_1}{K_{m_1}}\right) \dot{u}(t) + \left(\frac{R_1 B_1}{K_{m_1}} + K_{b_1}\right) u(t)$$

$$v_\omega(t) = \left(\frac{L_2 J_2}{K_{m_2}}\right) \ddot{\omega}(t) + \left(\frac{L_2 B_2 + R_2 J_2}{K_{m_2}}\right) \dot{\omega}(t) + \left(\frac{R_2 B_2}{K_{m_2}} + K_{b_1}\right) \omega(t)$$

En donde, $v_u(t)$ y $v_\omega(t)$ representan el voltaje de entrada del primer y segundo motor respectivamente, L_1 y L_2 representan la inductancia de armadura del primer y segundo motor respectivamente, J_1 y J_2 representan el momento de inercia total del rotor y de la carga con relación al eje del del primer y segundo motor respectivamente, K_{m_1} y K_{m_2} representan la constante de torque del primer y segundo motor respectivamente, B_1 y B_2 representan el coeficiente de fricción del primer y segundo motor respectivamente, R_1 y R_2 representan la resistencia de armadura del primer y segundo motor respectivamente, K_{b_1} y K_{b_2} representan la constante contraelectromotriz del primer y segundo motor respectivamente, $\omega(t)$ y $u(t)$ representan las velocidades angulares del primer y segundo motor respectivamente, $\dot{\omega}(t)$ y $\dot{u}(t)$ representan las aceleraciones angulares del primer y segundo motor respectivamente, $\ddot{\omega}(t)$ y $\ddot{u}(t)$ representan el jerk del primer y segundo motor respectivamente. (Enríquez, 2008)

Cabe aclarar que, según J.E. García-Farieta, A. Hurtado Márquez, Mateo Mancera, Daniel Hernández, en su trabajo investigativo “El jerk, su explicación más allá de la derivada de la aceleración sustentada en una práctica de laboratorio”, conciben el jerk como “la tasa de cambio de la aceleración con respecto al tiempo”, en el ya mencionado documento se aclara que, “las ecuaciones cinemáticas deben completarse incluyendo un término adicional debido al cambio de la aceleración en el tiempo”. (García-Farieta et al., 2019)

Continuando, con la explicación el modelo anterior lo podemos reescribir de tal manera que tengamos únicamente 3 constantes, como se observa a continuación.

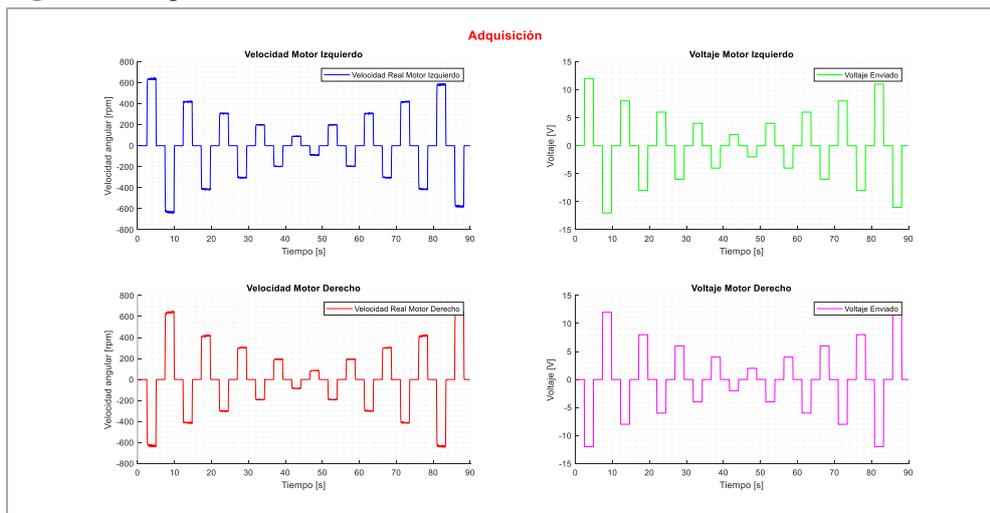
$$v_u(t) = (C1_1)\ddot{u}(t) + (C2_1)\dot{u}(t) + (C3_1)u(t)$$

$$v_\omega(t) = (C1_2)\ddot{\omega}(t) + (C2_2)\dot{\omega}(t) + (C3_2)\omega(t)$$

Estas constantes se pueden calcular, únicamente, si se tiene todas las consideraciones anteriores que modelan el comportamiento electromecánico de un motor, lo cual a nivel comercial es poco probable, por ello se propone estimar estas constantes basado en datos de entrada y datos salida, correspondientes a los voltajes que se envían y la velocidades angulares que se reciben, lo cual se logra con el uso de un algoritmo, en este caso se propone un algoritmo de identificación de parámetros basado en mínimos cuadrados. Parámetros, los cuales se deberán validar por medio de diferentes datos entradas, que exciten la dinámica del modelo, para comparar los datos de salida reales, con los modelados.

Como se observa en la **Figura 3**. Adquisición de datos. Figura 3, se realizó la obtención de datos en base a una señal de voltaje enviada.

Figura 3. Adquisición de datos.



Para realizar el algoritmo de identificación de parámetros dinámicos basado en mínimos cuadrados, como se observa en la Figura 4, se necesita dejar el modelamiento en función del voltaje como entrada y la velocidad angular del motor como salida, por simplicidad se generalizará los modelos anteriores.

$$v(t) = \left(\frac{LJ}{k_m}\right)\ddot{\omega}(t) + \left(\frac{LB + RJ}{k_m}\right)\dot{\omega}(t) + \left(\frac{RB}{k_m} + k_b\right)\omega(t)$$

$$[v(t)] = [\ddot{\omega}(t) \quad \dot{\omega}(t) \quad \omega(t)] \begin{bmatrix} \frac{LJ}{k_m} \\ L B + R J \\ \frac{k_m}{\frac{R B}{k_m} + k_b} \end{bmatrix}$$

$$\Psi(v) = [v(t)]$$

$$\Omega(\omega) = [\ddot{\omega}(t) \quad \dot{\omega}(t) \quad \omega(t)]$$

$$\zeta = \begin{bmatrix} \frac{LJ}{k_m} \\ L B + R J \\ \frac{k_m}{\frac{R B}{k_m} + k_b} \end{bmatrix}$$

Donde $\Psi(v)$ representa el vector de salida del modelo de regresión, $\Omega(\omega)$ es la matriz de regresión que se encuentra conformada por funciones conocidas y ζ son los parámetros dinámicos del motor.

$$\Psi(v) = \Omega(\omega)\zeta$$

En este caso el esquema de identificación de los parámetros dinámicos del motor, necesita filtrar cada uno de los términos de a través de un apropiado filtro estable que no genere pérdidas; para lo cual se implementa un filtro de primer orden cuya función de transferencia está dado por:

$$f(s) = \frac{\lambda}{s + \lambda} \rightarrow \lambda > 0$$

Sin embargo, en el modelado surge la necesidad de un filtro de segundo orden, por lo cual la matemática indica que se puede crear un filtro de segundo orden al poner un filtro de primer orden luego de otro, siendo así que se obtiene:

$$\Omega_F(\omega) = \left[\frac{\lambda}{s + \lambda} s \left(\frac{\lambda}{s + \lambda} s \omega(t) \right) \quad \frac{\lambda}{s + \lambda} s \omega(t) \quad \frac{\lambda}{s + \lambda} \omega(t) \right]$$

$$\Omega_F(\omega) = \left[\frac{\lambda^2}{(s + \lambda)^2} s^2 \omega(t) \quad \frac{\lambda}{s + \lambda} s \omega(t) \quad \frac{\lambda}{s + \lambda} \omega(t) \right]$$

$$\Omega_F(\omega) = \left[\frac{\lambda^2 s^2}{s^2 + 2\lambda s + \lambda^2} \omega(t) \quad \frac{\lambda s}{s + \lambda} \omega(t) \quad \frac{\lambda}{s + \lambda} \omega(t) \right]$$

$$\Psi_F(v) = \left[\frac{\lambda}{s + \lambda} v(t) \right]$$



Después únicamente se reordenan los datos obtenidos.

$$\Psi_{FP}(v) = \begin{bmatrix} \Psi_F(0) \\ \vdots \\ \Psi_F(n) \end{bmatrix}$$

$$\Omega_{FP}(\omega) = \begin{bmatrix} \Omega_F(0) \\ \vdots \\ \Omega_F(n) \end{bmatrix}$$

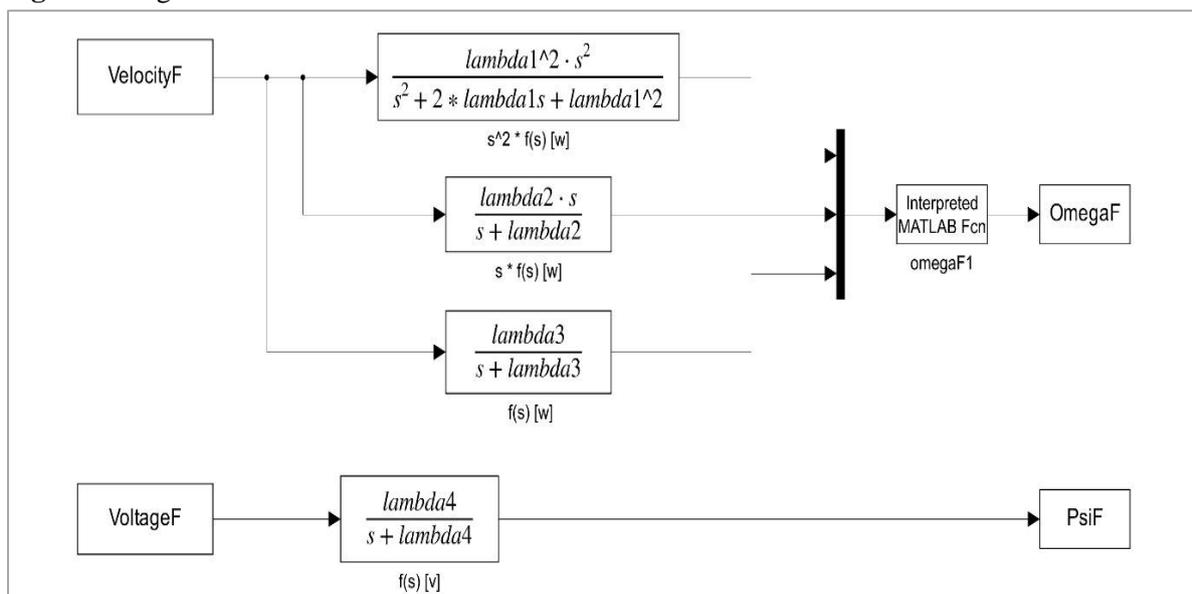
Para al final solucionar el sistema.

$$\zeta^* = [\Omega_{FP}^T \quad \Omega_{FP}]^{-1} \Omega_{FP}^T \Psi_{FP}$$

$$\zeta^* = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}$$

Obteniendo así ζ^* que corresponde a los parámetros dinámicos estimados del motor.

Figura 4. Algoritmo de identificación basado en mínimos cuadrados.



Después de pasar los datos adquiridos por la identificación de parámetros se obtiene las constantes del modelo, como se observa en la Figura 6, que me permitirán comparar lo obtenido en un proceso real y en un proceso simulado, lo que se observa en la Figura 6

Figura 5. Parámetros dinámicos obtenidos.

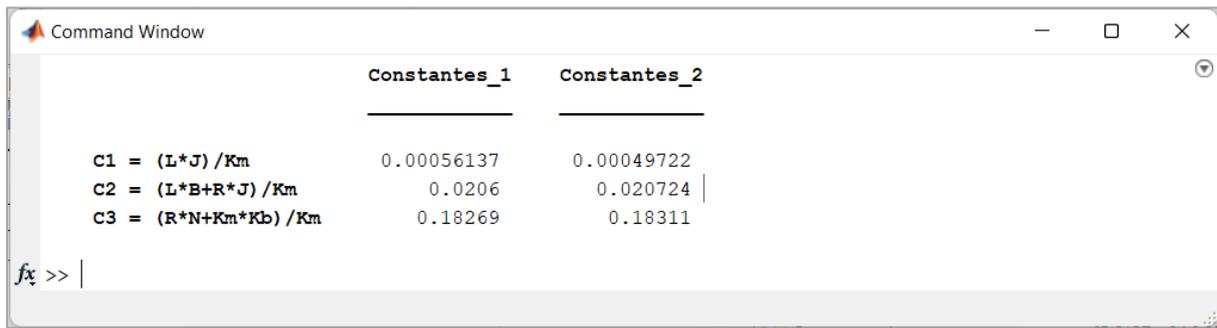
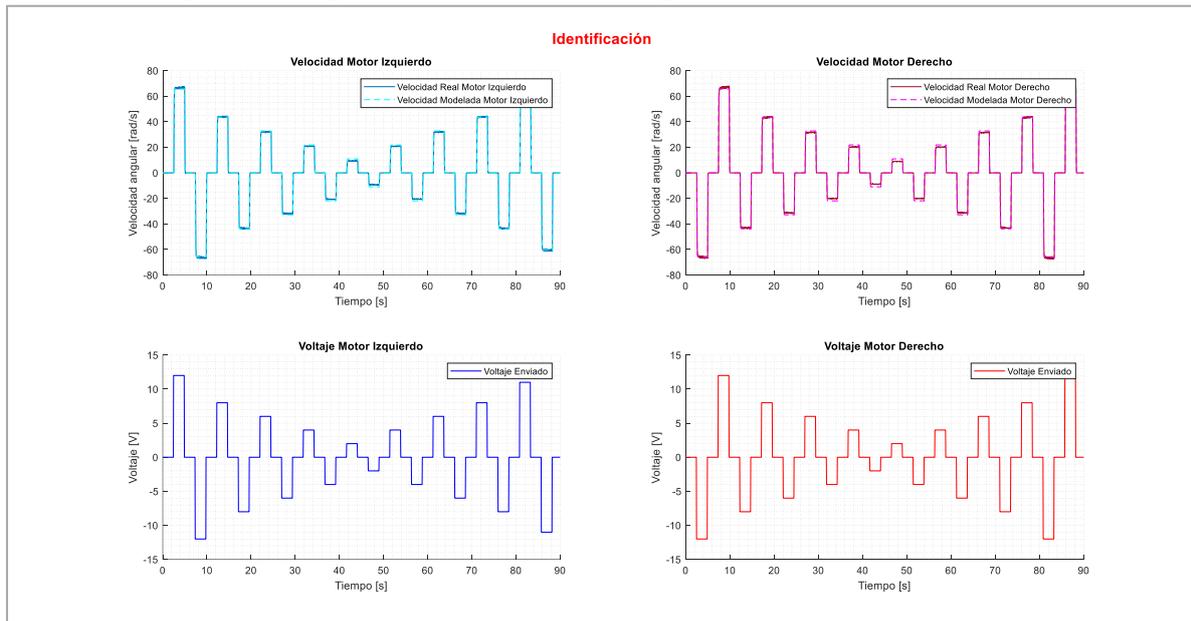
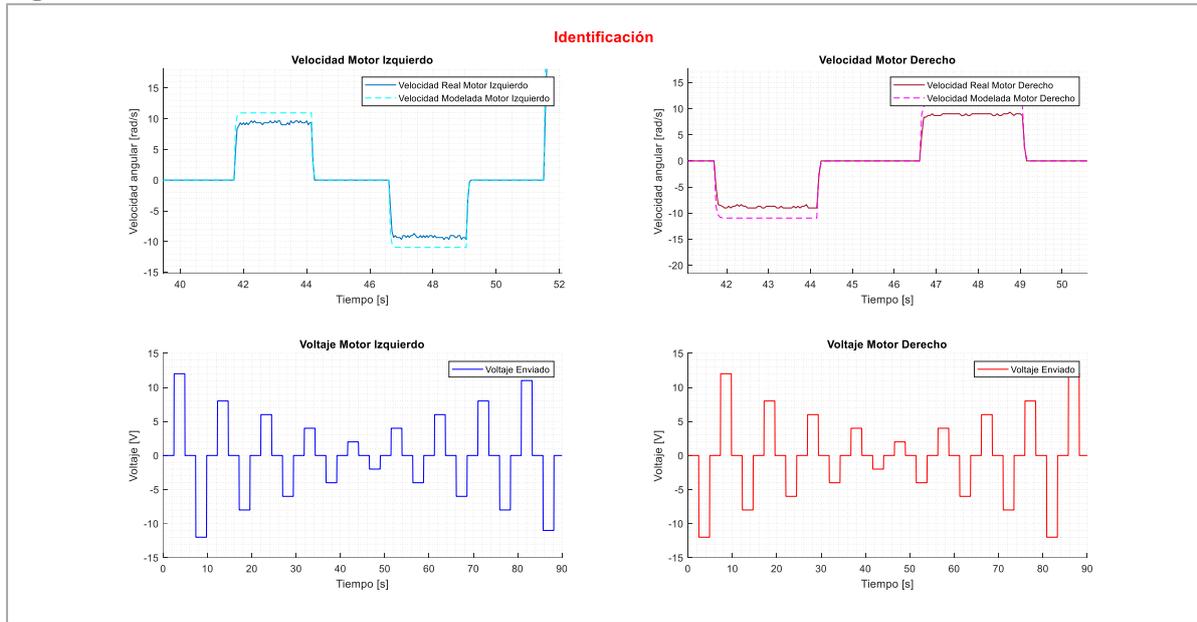


Figura 6. Comparación después de la identificación de parámetros.



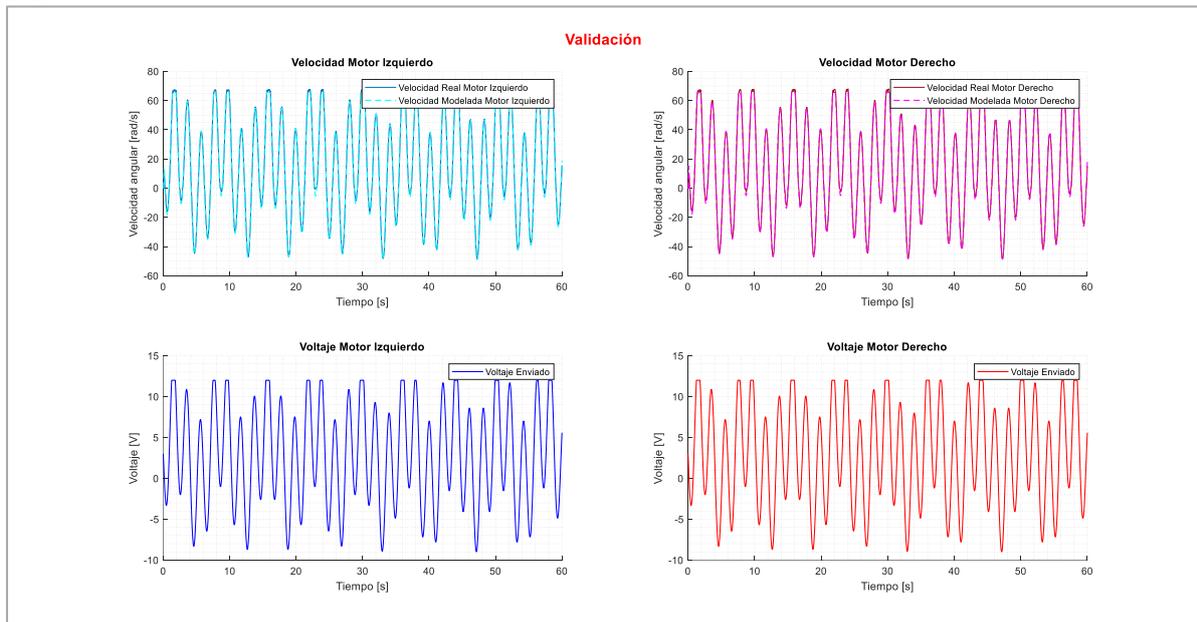
Al ser una estimación de las constantes del modelo electromecánico del motor, va a existir un error en comparación a lo que se ha obtenido realmente y a lo que se ha obtenido simulado, esto se lo denomina error de modelado, y se puede observar en la Figura 7

Figura 7. Error de modelado.



Para finalizar se valida el modelo como se lo había mencionado anteriormente, lo que se observa en la Figura 8

Figura 8. Validación del modelado.



Con los parámetros anteriormente obtenidos, se puede realizar un controlador que necesite del proceso que realizan los motores, en base a ello se puede controlar las entradas del modelo del robot, $u(t)$ y $\omega(t)$, además que me permitirá realizar una simulación del comportamiento del robot.

Adicionalmente se necesita del parámetro a , visto en el modelo del robot, por ello se propone de un modelo 3D que se puede observar en la Figura 9, con el fin de obtener el radio visto en la figura 10, el cual es de 32.5 mm.

Figura 9. Modelo 3D del robot uniclo.

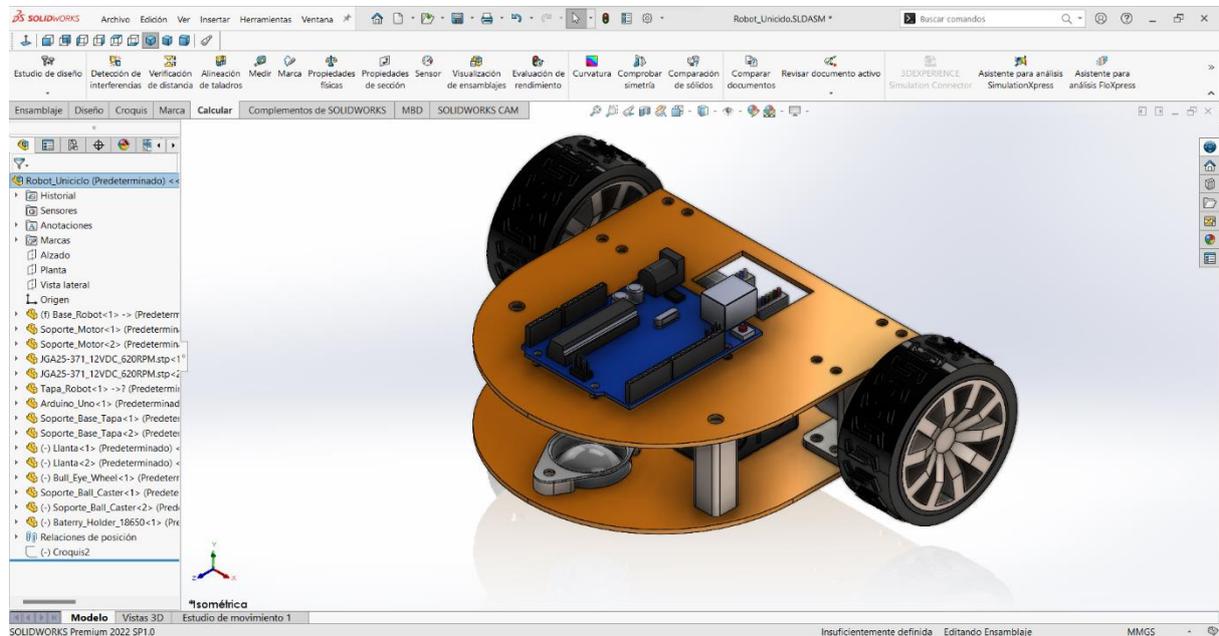
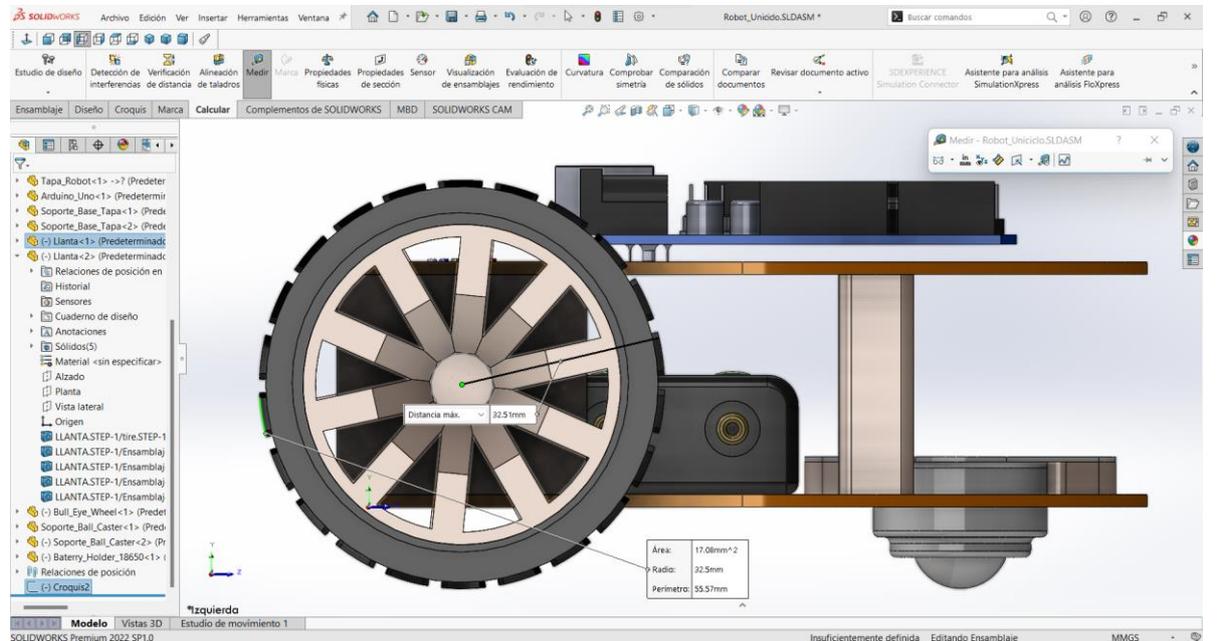
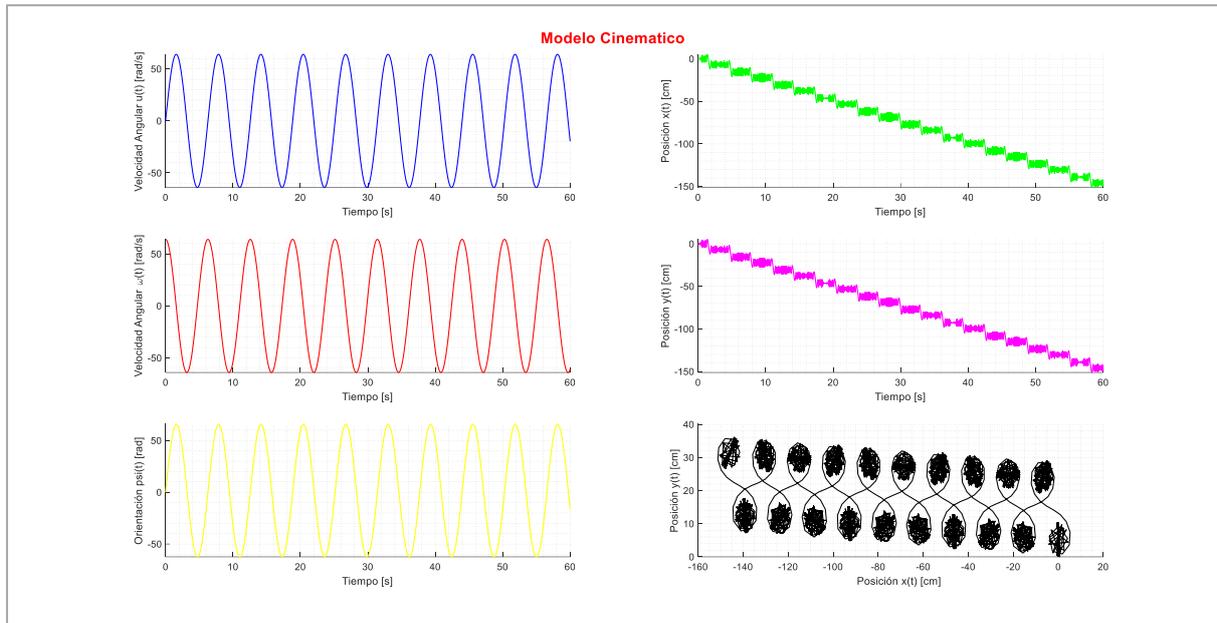


Figura 10. Radio de la rueda.



Una vez obtenido todo lo anterior, se procede a implementar el modelo en lazo abierto del robot uniclo, teniendo como entradas y salidas lo que se logra observar en la Figura 11.

Figura 11. Modelo en lazo abierto del robot unicycle.



Controlador PID discreto en el dominio del tiempo

Implementar experimentalmente dos controladores PID discreto en el dominio del tiempo para el control discreto de dos motores DC.

Para evaluar el PID:

- Se deberá considerar diferentes valores de Set Point.
- Se deberá presentar las figuras de los resultados obtenidos (Entradas – Salidas; Errores de control; Acciones de control; Periodo de muestreo - Tiempo de cómputo).

Para la implementación se del PID en tiempo discreto se utilizará el algoritmo de posición comúnmente usado, el cual consta de un término proporcional, termino integral y un término derivativo.

El termino proporcional se da por la siguiente ecuación:

$$K_p e(t) = K_p e(n)$$

El termino integral se da por la siguiente ecuación:

$$K_i \int e(t) = K_i T \sum_i e_i$$

En caso de un muestreo suficientemente pequeño el termino derivativo se puede aproximar por:

$$K_d \frac{e(t)}{dt} = K_d \frac{e(n) - e(n - 1)}{T}$$

Si se conoce $e(n + 1)$ se puede obtener una mejor aproximación de la derivada de la siguiente manera:

$$K_d \frac{e(t)}{dt} = K_d \frac{e(n+1) - e(n)}{T}$$

Al unir todos los pasos anteriores se obtiene un controlador PID como se muestra a continuación:

$$u(n) = K_p e(n) + K_i T \sum_i e_i + \frac{K_d [e(n) - e(n-1)]}{T}$$

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de implementar el controlador PID para controlar el proceso de cada motor en tareas de regulación.

Figura 12. Entradas, Salidas y Errores de Control para $T_o = 0.05$ segundos.

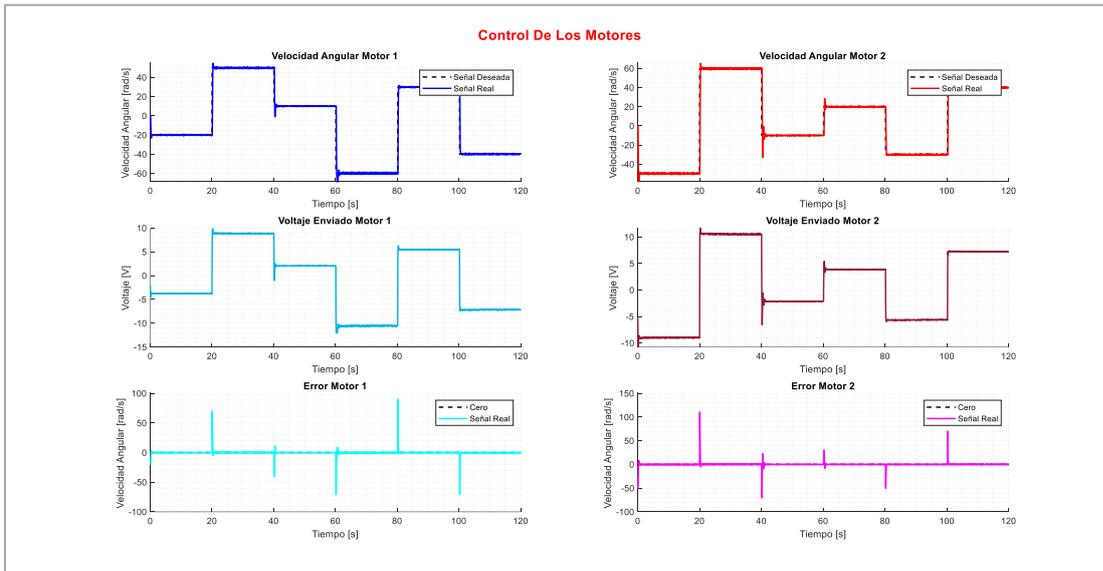


Figura 13. Tiempo De Computo para $T_o = 0.05$ segundos.

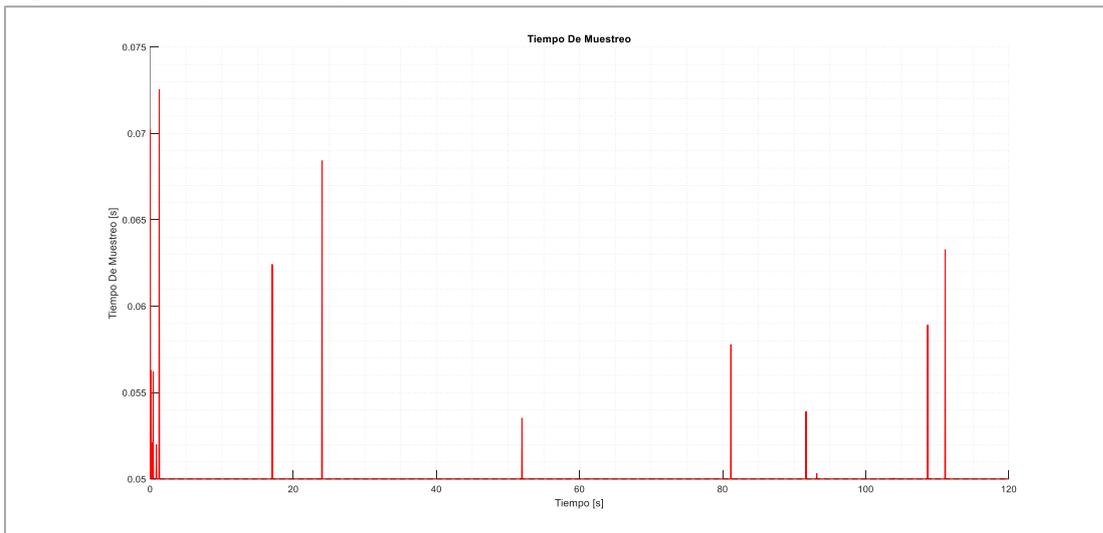


Figura 14. Entradas, Salidas y Errores de Control para $T_o = 0.1$ segundos.

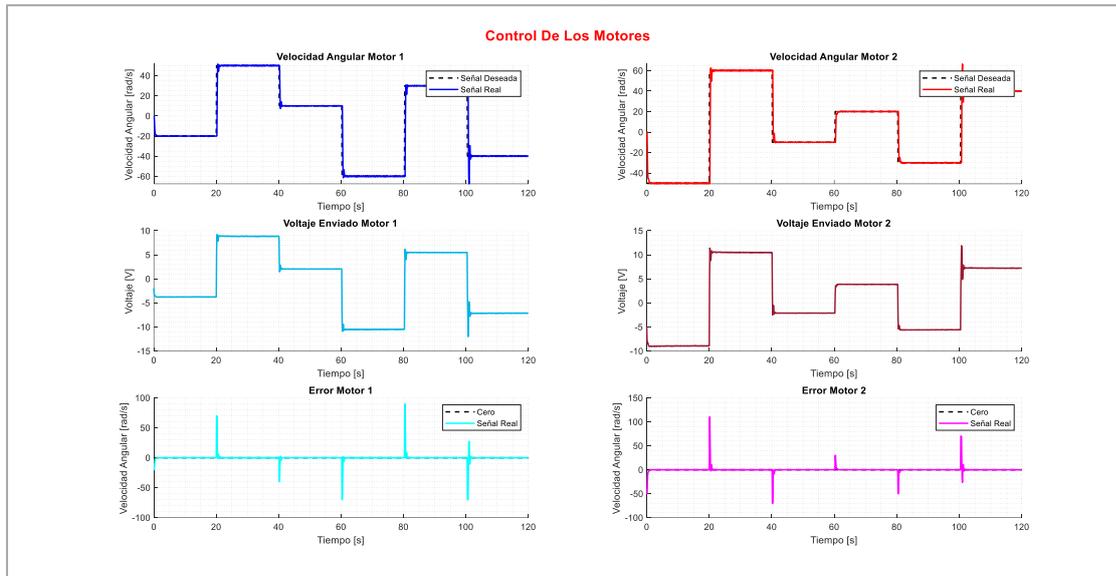
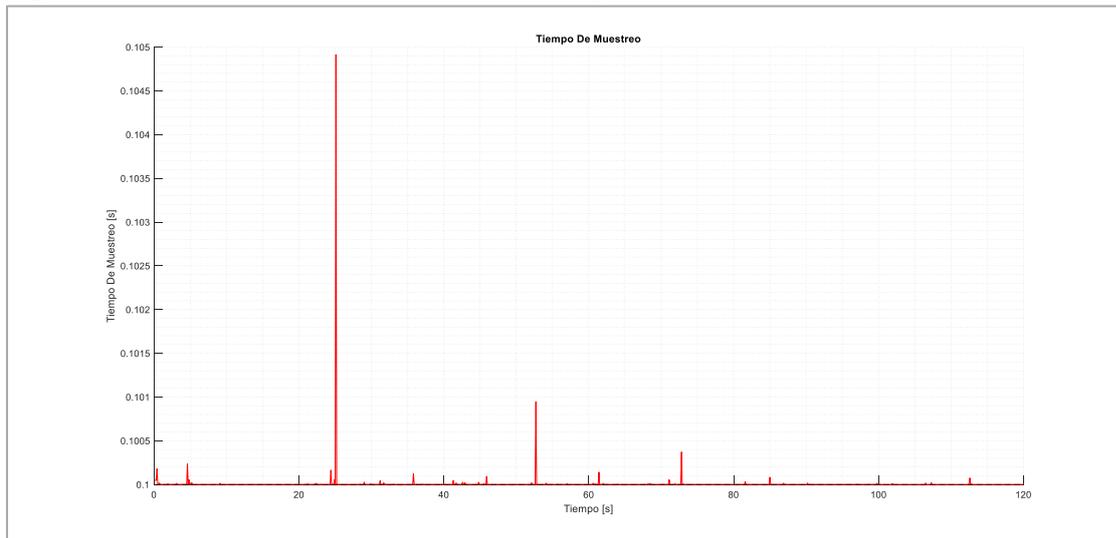


Figura 15. Tiempo De Computo para $T_o = 0.1$ segundos.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La identificación de parámetros dinámicos del modelo electromecánico de los motores se realizó utilizando el método de mínimos cuadrados, obteniendo las constantes necesarias para el modelado. En la Figura 5, se presentan los parámetros obtenidos, que posteriormente fueron validados comparando datos reales y simulados, como se observa en la Figura 6. Este análisis evidenció la existencia de un error de modelado, mostrado en la Figura 7, debido a las aproximaciones realizadas durante el proceso de identificación.

En la Figura 8. se muestra la validación final del modelo, que demuestra la coherencia entre el comportamiento simulado y el experimental, permitiendo así emplearlo en el diseño de controladores.

El método de mínimos cuadrados permitió obtener un modelo funcional del sistema electromecánico de los motores, pero el error de modelado observado refleja la necesidad de considerar factores adicionales o ajustar los filtros utilizados durante el proceso. A pesar de ello, el modelo validado proporciona una base sólida para el diseño y análisis de controladores.

El controlador PID discreto fue implementado para el control de los motores DC del robot unicycle. Los resultados experimentales con diferentes valores de punto de referencia (set points) están representados en las Figuras 12 y 13. En estas gráficas se puede observar:

- La respuesta del sistema en términos de las entradas y salidas.
- Los errores de control generados.
- El tiempo de cómputo requerido para el periodo de muestreo seleccionado ($T_0 = 0.05$ segundos).

Un controlador basado en axiomas del álgebra lineal fue diseñado para la regulación y seguimiento del robot unicycle, considerando las saturaciones matemáticas de los errores de control y la estabilidad del sistema. Además, se evaluaron las perturbaciones provenientes de los valores obtenidos por los encoders, mostrando que el esquema propuesto es robusto frente a dichas perturbaciones

Los resultados obtenidos destacan la aplicabilidad de los controladores propuestos para el manejo del robot unicycle en tareas de regulación y seguimiento. No obstante, futuras mejoras en la identificación de parámetros y en la implementación de controladores más sofisticados, como esquemas adaptativos o predictivos, podrían optimizar el desempeño global del sistema.

CONCLUSIONES

El uso del método de mínimos cuadrados permitió obtener un modelo matemático adecuado del sistema electromecánico de los motores. Aunque se observó un error de modelado debido a las simplificaciones realizadas, el modelo validado fue suficiente para diseñar y probar controladores efectivos.

La implementación de los controladores PID en el dominio del tiempo discreto demostró ser eficiente para tareas de regulación en los motores del robot unicycle. La respuesta del sistema ante diferentes set points fue precisa, con un tiempo de cómputo compatible con aplicaciones en tiempo real.

El controlador diseñado con axiomas del álgebra lineal mostró robustez frente a perturbaciones en los valores de los encoders y estabilidad en su desempeño. Esto respalda su uso en sistemas con restricciones dinámicas, como el robot unicycle, aunque se recomienda continuar evaluando su

desempeño en escenarios más complejos.

Los resultados obtenidos indican que el robot unicycle puede ser controlado con precisión en tareas de regulación y seguimiento, pero las limitaciones del modelo y los efectos de saturaciones matemáticas podrían influir en su desempeño en condiciones extremas. Se sugiere explorar técnicas avanzadas de control, como esquemas predictivos o adaptativos, para mejorar la respuesta del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Barrientos, A., Peñin, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). Fundamentos de robotica (2.a Edición).

McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.

https://web.instipp.edu.ec/Libreria/libro/fundamentos_de_robotica%20Segunda%20Edicion.pdf

García-Farieta, J. E., Márquez, A. H., & Mancera, M. (2019). El jerk, su explicación más allá de la derivada de la aceleración sustentada en una práctica de laboratorio. 2.

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7325392.pdf>

Ollero Baturone, Aníbal. 2001. Robótica, manipuladores y robots móviles.pdf. (s. f.). Recuperado 3 de marzo de 2024, de

<https://el.uy/doc/robotica/Ollero%20Baturone,%20An%C3%ADbal.%202001.%20Rob%C3%B3tica,%20manipuladores%20y%20robots%20m%C3%B3viles.pdf>

Martins, F., Carelli, R., Sarcinelli-Filho, M., & Bastos, T. (2008). Modelo Dinámico y Controlador de Seguimiento para Robots Móviles Tipo Unicycle. Universidad Nacional del Sur.

https://www.researchgate.net/publication/228415969_Modelo_Dinamico_y_Controlador_de_Seguimiento_para_Robots_Moviles_Tipo_Unicycle

Mora Carrión, S. (2018). "Diseño y desarrollo de controles de robots mediante métodos numéricos basados en teoría de álgebra lineal. Aplicación a robots móviles [Proyecto/Trabajo fin de carrera/grado, Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/106808>

Reyes, F. (2011). Robótica Control De Robots Manipuladores (1ra Edición). ALFAOMEGA.

<https://www.alpha-editorial.com/Papel/9789586829618/Robótica+Control+De+Robots+Manipuladores>

Rosales, A., Scaglia, G., Mut, V., & Di Sciascio, F. (2007). Control dinámico mediante métodos



numéricos para robots móviles tipo unicycle. Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9922>

Rosales, A., Scaglia, G., Mut, V., & Di Sciascio, F. (2009, Abril). Navegación de Robots Móviles en Entornos no Estructurados utilizando Álgebra Lineal. 6, 79-88.

<https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/8336/8479>

Solano, F. A. P. (s. f.). DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ESQUEMAS DE CONTROL TIPO PID Y ESPACIO NULO PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA Y EVASIÓN DE OBSTÁCULOS APLICADOS A UNA FORMACIÓN HETEROGÉNEA DE DOS ROBOTS MÓVILES Y UN ROBOT CUADRICÓPTERO.

TEMA6.pdf. (s. f.). Recuperado 5 de marzo de 2024, de

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/6123/TEMA6.pdf>

Prieto, J. (2011). DISEÑO DE UN GENE DIGITAL EN FPGA Y MATLAB CON APLICACIONES EN ROBÓTICA MÓVIL. Recuperado el 18 de 11 de 2024, de

https://www.researchgate.net/profile/Alberto_Delgado2/publication/228756142_Diseño_de_un_gene_digital_en_FPGA_y_MATLAB_con_aplicaciones_en_robotica_movil/links/542a8db50cf29bbc1267ac76.pdf

Ojeda, M. (2022). Aplicación con el robot Cozmo para el seguimiento de trayectorias como un sistema embebido. Recuperado el 18 de 11 de 2024, de

<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/8873>

Beneyto, A. (2023). Control de un robot Niryo desde Matlab y Simulink. Recuperado el 18 de 11 de

<https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/33751>

De Jesús, M. (2009). Uso de Matlab y Simulink para el control de robots y la observación de sensores de luz y ultrasónico. Recuperado el 18 de 11 de

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/36260/1/T-83670%20MALAVE-NEVAREZ-VALLEJO.pdf>

Rodríguez, E. (2017). MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN ROBOT SERIAL DE DOS ESLABONES CON MATLAB / SIMULINK. Recuperado el 18 de 11 de

<https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1093/910>

