

Jornadas de Automática

Identificación en línea de robots diferenciales mediante técnicas de relé

Mañas-Álvarez, Francisco José^{a,*}, Guinaldo, María^a, Dormido, Raquel^a, Dormido, Sebastián^a

^aDepartamento de Informática y Automática, E.T.S.I. Informática, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED),
C/ Juan del Rosal, nº 16, 28040, Madrid, España.

To cite this article: Mañas-Álvarez, F.J., Guinaldo, M., Dormido, R., Dormido, S. 2025. Online identification of differential robots using relay techniques. *Jornadas de Automática*, 46.

<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12189>

Resumen

Este trabajo presenta la estrategia de identificación en línea y autosintonía basada en realimentación por relé simétrico con histéresis para la estimación del modelo dinámico de velocidad en robots móviles. Este método permite una estimación precisa del modelo del sistema frente a cambios de carga, reduciendo tanto la perturbación al sistema como la necesidad de conocimiento previo de su dinámica. La implementación se ha llevado a cabo en el robot Khepera IV, validándose experimentalmente en tres casos distintos: suspendido, en su configuración nominal, y con carga adicional. Los resultados demuestran que, en menos de 0,3 s segundos, es posible obtener parámetros para modelos dinámicos precisos de primer y segundo orden con retardo. Sobre estos modelos se aplican reglas de sintonía SIMC (Simple Internal Model Control) para ajustar automáticamente los controladores PID. Los resultados en bucle cerrado demuestran una mejora significativa en la respuesta del controlador, con una constante de tiempo estable a pesar de variaciones en la carga.

Palabras clave: Robots móviles, Identificación para el control, Control adaptativo

Online Identification of Differential Robots Using Relay Techniques

Abstract

This work presents an online identification and auto-tuning strategy based on symmetric relay feedback with hysteresis for estimating the dynamic velocity model of mobile robots. This method enables accurate system model estimation in the presence of load variations, while reducing both the disturbance to the system and the need for prior knowledge of its dynamics. The implementation was carried out on the Khepera IV robot and experimentally validated in three different cases: suspended, in its nominal configuration, and with additional load. The results show that, in less than 0,3 s, it is possible to obtain parameters for accurate first- and second-order dynamic models with delay. SIMC (Simple Internal Model Control) tuning rules are applied to these models for automatic PID controller adjustment. The closed-loop results demonstrate a significant improvement in the controller's response, with a stable time constant despite load variations.

Keywords: Mobile robots, Identification for control, Adaptive control

1. Introducción

Los robots móviles autónomos están revolucionando la logística en centros de almacenamiento, donde la eficiencia en el transporte y almacenaje de mercancías se ha convertido en un factor crítico. En estos entornos dinámicos, su capacidad de adaptación es clave para garantizar su estabilidad y mantener la precisión operativa. Sin embargo, uno de los mayores

desafíos en estos sistemas es la variación de peso en el transporte de cargas heterogéneas (Draganjac et al., 2016). Cambios significativos en la carga pueden alterar sustancialmente la dinámica, comprometiendo el desempeño de controladores sintonizados para condiciones nominales específicas. Esta problemática se agrava en entornos con incertidumbre, donde cargas desconocidas o variaciones en las superficies de trabajo

* Autor para correspondencia: fjmanas@dia.uned.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

vuelven insuficientes los métodos de sintonía convencionales basados en primeros principios, requiriendo la identificación del nuevo modelo cuando se detectan cambios significativos.

Para abordar este problema, se han desarrollado diversos métodos de identificación, cada uno con ventajas y limitaciones particulares (Tzafestas, 2018). Los enfoques en el dominio de la frecuencia, como el análisis espectral o el ajuste de respuesta en frecuencia, ofrecen una buena precisión, pero requieren equipos especializados y experimentos controlados (Montonen et al., 2017). Por otro lado, los métodos en el dominio temporal, como la respuesta a escalón o los mínimos cuadrados, son computacionalmente eficientes, pero presentan limitaciones: sensibilidad al ruido en el primer caso y elevada demanda computacional en el segundo. Además, ambos enfoques requieren de desplazamientos prolongados del robot para alcanzar condiciones estacionarias, lo que no siempre es práctico en espacios reducidos. Alternativas más recientes basadas en redes neuronales y aprendizaje automático ofrecen mayor flexibilidad, pero su implementación se ve limitada por la necesidad de grandes volúmenes de datos y su inherente falta de interpretabilidad (Ayyad et al., 2020).

Los métodos de identificación basados en relés superan muchas de las limitaciones de las técnicas convencionales (Yu, 2006). Estos métodos inyectan señales de relé para inducir oscilaciones de ciclo límite controladas, cuyo análisis espectral (frecuencia/amplitud) permite determinar los parámetros del controlador PID óptimos. Sus ventajas incluyen la operación en bucle cerrado robusta a perturbaciones e incertidumbres. Además, permite la identificación en tiempo real sin necesidad de un amplio conocimiento previo de la dinámica del sistema. En particular, para robots móviles destaca por su precisión, permitiendo la identificación con desplazamientos mínimos (del orden de centímetros).

Este trabajo implementa el método de identificación basado en relé para la autosintonía del control de velocidad en robots móviles diferenciales. Se ha trabajado con los robots de interior Khepera IV. La identificación se lleva a cabo en tres condiciones operativas: (i) robot suspendido (sin contacto con superficie), (ii) configuración nominal (sin carga adicional), y (iii) con carga adicional de 1 Kg. Esta aproximación sistemática permite caracterizar completamente la dinámica del robot en su rango operativo completo. A partir de los modelos identificados, se diseña una estrategia de control basada en modelo que garantiza un comportamiento homogéneo en todo el rango de operación. La implementación de esta técnica en los dos actuadores del robot produce mejoras que repercuten directamente a los dos lazos de control superiores, optimizando tanto el movimiento lineal y como el angular del sistema.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: En la sección 2 se describe el robot Khepera IV. La sección 3 presenta los fundamentos del método de identificación basado en relés y su integración en la arquitectura del robot diferencial. En la sección 4 se detallan los experimentos realizados, los modelos analizados y las reglas de sintonía implementadas. La sección 5 presenta los resultados. Finalmente, en la sección 6, se recogen las conclusiones y posibles líneas de actuación futuras.

2. Robot Móvil Khepera IV

El robot Khepera IV (Figura 1), desarrollado por K-Team (Soares et al., 2016), es una plataforma móvil diferencial compacta ($\varnothing : 140\text{ mm}$, altura: 58 mm , peso: 540 g) diseñada para entornos interiores con superficies planas. Integra un conjunto sensorial que incluye una cámara monocular a color, doce sensores de proximidad por infrarrojos y cinco sensores ultrasónicos (rango: $0,25\text{ m}$ a 5 m). Computacionalmente, ejecuta Linux Yocto 1.8 en su CPU embebida, requiriendo protocolos cliente-servidor para su integración en sistemas multi-agente. Aunque es una plataforma comercial, ofrece la librería *libkhepera* para acceder a lecturas sensoriales, para enviar consignas a los actuadores y ajustar sus controladores PID internos. Su principal limitación es una frecuencia máxima de ejecución de 50 Hz , factor considerado en el diseño experimental.



Figura 1: Robot Khepera IV (Soares et al., 2016).

2.1. Modelo teórico

El modelado de robots diferenciales como el Khepera ha sido ampliamente estudiado en la literatura por su versatilidad y accesibilidad (Velázquez and Lay-Ekuakille, 2011). Como se muestra en la Figura 2, el modelo completo consta de tres niveles: (i) el modelo de actuadores, (ii) el modelo dinámico y (iii) el modelo cinemático. En aplicaciones convencionales suele asumirse que el modelo de los actuadores es lo suficientemente rápido como para aproximarlos a una ganancia estática y que el dinámico opera en regímenes donde puede considerarse estacionario. En este trabajo rechazamos estas hipótesis para investigar explícitamente el comportamiento del sistema en los regímenes extremos de operación, donde estas simplificaciones no son válidas.

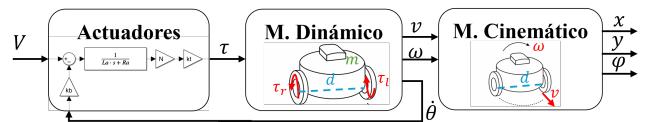


Figura 2: Modelo completo de un robot diferencial.

El *modelo cinemático* del robot diferencial relaciona las velocidades angulares de las ruedas ($\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l$) con la velocidad lineal (v_Q) y angular ($\dot{\phi}$) del robot mediante:

$$\begin{pmatrix} v_Q \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r}{2} & -\frac{r}{2} \\ \frac{r}{d} & -\frac{r}{d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{pmatrix}, \quad (1)$$

donde r es el radio de las ruedas y d la distancia entre ellas. Este modelo es fundamental para la navegación precisa, ya que

permite transformar consignas de velocidad en señales ejecutables por los motores.

El *modelo dinámico* incorpora las fuerzas y pares aplicados, considerando los efectos inerciales y de masa según:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m \cdot d} & \frac{1}{m \cdot d} \\ -\frac{1}{I_r} & -\frac{1}{I_r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{pmatrix}, \quad (2)$$

siendo m la masa, I la inercia, y $\tau_{r,l}$ los pares de los motores. Esta representación es crítica para controlar el robot bajo cargas variables.

Finalmente, el *modelo de los actuadores* (motores DC) considera la relación entre la tensión de control (v) y el torque generado (τ), descrita por:

$$R i + L \dot{i} = V - k_b \dot{\theta}, \quad \tau = N k_t i \quad (3)$$

donde k_t y k_b son constantes del motor, y N la relación de transmisión. Estas ecuaciones son esenciales para la identificación basada en relé, ya que capturan la dinámica electromecánica que afecta la respuesta en velocidad.

2.2. Arquitectura de control

La simplicidad estructural de los robots diferenciales ha motivado el desarrollo de diversas estrategias de control en la literatura, desde PID clásicos hasta técnicas avanzadas como redes neuronales, algoritmos genéticos y controladores híbridos (Yousfi Allagui et al., 2021). Independientemente del enfoque, estas implementaciones adoptan generalmente una arquitectura jerárquica en tres capas (ver Figura 3).



Figura 3: Arquitectura típica de control.

La primera capa convierte las coordenadas globales (posición $[x, y]$ y orientación φ) al marco de referencia local del robot. La segunda gestiona la navegación mediante dos lazos acoplados: uno para el seguimiento de posición, que genera la velocidad lineal de referencia, y otro para el control de orientación, que determina la velocidad angular requerida. Finalmente, la tercera capa, la de actuación, controla directamente los motores, regulando su velocidad en lazo cerrado para compensar las dinámicas del sistema. Nuestro trabajo se centra en este último lazo, donde las perturbaciones dinámicas y las no linealidades de los actuadores resultan más críticas.

3. Método de ajuste basado en relés

La autosintonía por relé, propuesto por Hang et al. (2002), ha surgido como un enfoque esencial para identificar y ajustar automáticamente PID en sistemas con modelado preciso complejo. Su capacidad para estimar parámetros clave mediante oscilaciones controladas, sin requerir conocimiento previo de la dinámica del sistema, la hace particularmente adecuada para la sintonización del controlador en aplicaciones robóticas.

La aplicación de este método al robot Khepera IV ofrece ventajas frente a otras técnicas de identificación: (1) Su *enfoque sin modelo* elimina la necesidad de una representación matemática precisa de la dinámica del robot; (2) Optimiza automáticamente las ganancias del controlador, reduciendo la intervención humana; (3) *Mayor robustez* al adaptarse a variaciones como cambios en la carga, condiciones de la superficie de operación o no linealidades en los actuadores; (4) *Convergencia rápida*; (5) *Computacionalmente simple*; (6) *Espacio necesario reducido* al ser suficiente con una perturbación acotada respecto del punto de operación. Su simplicidad y versatilidad han generado numerosas variaciones del método original para mejorar su precisión y adaptabilidad a sistemas con retardos significativos, dinámicas poco amortiguadas o comportamientos altamente no lineales Ghorai et al. (2018).

En este trabajo, se utiliza un control realimentado por relé con histéresis, véase la Figura 4, para reducir la sensibilidad del sistema al ruido de medida Sánchez Moreno et al. (2021). En la figura, d y δ representan la amplitud y la histéresis del relé respectivamente, mientras que los ejes son el control de la señal (u) y el error de la señal (e).

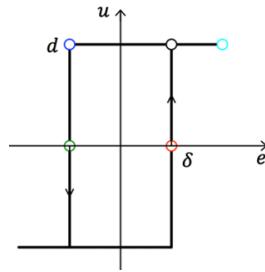


Figura 4: Esquema de relé con histéresis.

La función descriptiva inversa negativa de este relé viene dada por:

$$-\frac{1}{N_A} = -\frac{\pi}{4d} \left(\sqrt{a^2 - d^2} + j\delta \right), \quad (4)$$

donde a es la amplitud del ciclo límite. La Figura 5 muestra dicha función para un relé con histéresis, resaltando tanto la frecuencia (ω_0) como la amplitud (a_0) del ciclo límite.

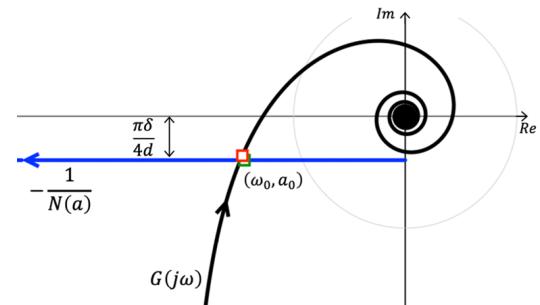


Figura 5: Función descriptiva inversa negativa de un relé con histéresis en el plano de Nyquist.

La sintonización mediante relés es un procedimiento atractivo y rápido para determinar el punto crítico de un proceso, lo que permite obtener un modelo simplificado sin comprometer la estabilidad del sistema. Esta característica lo hace especialmente útil en aplicaciones donde una identificación

incorrecta podría dar lugar a respuestas incontroladas. Su impacto ha sido significativo en robótica, donde la adaptabilidad de los sistemas de control es esencial. En manipuladores y robots móviles, el autotuning basado en relés ha permitido la calibración automática de controladores sin necesidad de intervención manual, facilitando la implementación de estrategias de control avanzadas (Nguyen et al., 2014).

Los parámetros fundamentales de ajuste del método empleando un relé simétrico son:

- *Amplitud (d)*. Su ajuste determina la amplitud de la respuesta en velocidad del robot, (*a*).
- *Histeresis (δ)*. Reduce el impacto del ruido en la conmutación de los relés.

Ambos parámetros influyen proporcionalmente en el desplazamiento realizado por el robot durante la experiencia. Los parámetros medidos en la señal de respuesta utilizados para estimar el modelo correspondiente son:

- Ganancia crítica. Su valor se deduce de (4).

$$K_u = \frac{4d}{\pi \sqrt{a^2 - \delta^2}} \quad (5)$$

- Período de oscilación (T_u).

En este trabajo, se aplica el método del relé simétrico con histeresis para la identificación del modelo dinámico del robot y la autosintonía del controlador de sus dos actuadores. Durante el proceso de sintonía, el controlador PID original se reemplaza por un relé. Una vez alcanzados dos ciclos estables, se extraen los parámetros característicos para la identificación del modelo del sistema. Finalmente, se aplica una regla de sintonía adecuada que permite restablecer el PID con sus parámetros correctamente ajustados.

4. Diseño experimental

El procedimiento experimental para la identificación del modelo comienza con la inicialización del sistema en el estado de equilibrio del robot, correspondiente a una velocidad de 0 m/s. Dado que el robot opera en entornos de interior, este punto de equilibrio no se desplaza. No obstante, se considera relevante evaluar la respuesta del sistema a lo largo de todo el rango de la señal de control. Al tratarse de motores de corriente continua (DC), la señal de entrada corresponde a un PWM en el rango 0 – 100 %, y el escalonado se realiza en incrementos del 5 %. Este procedimiento está específicamente diseñado para analizar si el comportamiento del sistema se ajusta a una dinámica lineal o no lineal. Para cada señal de control, son suficientes dos ciclos de relé para alcanzar el régimen permanente y obtener estimaciones fiables de los parámetros del modelo. Cabe destacar que el umbral la histéresis se ha ajustado individualmente en cada experimento, situándose en torno al 60 % de la velocidad máxima esperable. Esta adaptación es necesaria, ya que un umbral constante diseñado para funcionar correctamente a bajas amplitudes del relé produciría conmutaciones demasiado frecuentes a altas velocidades (superiores al 50 %) lo que impediría la observación de posibles variaciones en el modelo. En el caso contrario, un umbral adecuado para

velocidades medias-altas impediría la conmutación del relé a velocidades bajas.

Este procedimiento se repite para tres casos de estudio: (i) robot suspendido (sin contacto con superficie), (ii) configuración nominal (sin carga adicional), y (iii) con carga adicional de 1 Kg. De esta forma, se pretende evaluar la variación de los parámetros del modelo en función de la carga que soporta el robot, incluyendo su propio peso.

4.1. Estimación del modelo y reglas de sintonía

Este trabajo emplea un modelado en el dominio de la frecuencia basado en la respuesta del relé. Para la estimación de los parámetros, se consideran tres modelos: integrador puero, un sistema de primer orden con retardo y un segundo orden con . Los resultados permitirán determinar qué modelo se ajusta mejor a la dinámica real del sistema. El modelo de integrador con retardo está descrito por

$$G(s) = \frac{k_p}{s} e^{-Ds} \rightarrow \begin{cases} k_p = \frac{\omega_u}{K_u} = \frac{2\pi}{K_u T_u}, \\ D = \frac{\pi}{2\omega_u} = \frac{T_u}{4}, \end{cases} \quad (6)$$

donde ω_u es la frecuencia última. Análogamente, el modelo de primer orden con retardo viene dado por

$$G(s) = \frac{k_p}{\tau s + 1} e^{-Ds} \rightarrow \begin{cases} \tau = \frac{\tan(\pi - D\omega_u)}{\omega_u} = \frac{\sqrt{(k_p K_u)^2 - 1}}{\omega_u}, \\ k_p = \frac{\sqrt{(\tau\omega_u)^2 + 1}}{K_u}, \\ D = \frac{\arctan \frac{\tau\omega_u}{\omega_u}}{\omega_u}, \end{cases}, \quad (7)$$

donde τ es la constante de tiempo. El modelo de segundo orden con retardo con sus dos polos iguales viene dado por

$$G(s) = \frac{k_p}{(\tau s + 1)^2} e^{-Ds} \rightarrow \begin{cases} \tau = \frac{\tan(\pi - D\omega_u)/2}{\omega_u} = \frac{\sqrt{(k_p K_u)^2 - 1}}{\omega_u}, \\ k_p = \frac{(\tau\omega_u)^2 + 1}{K_u}, \\ D = \frac{\arctan \frac{\tau\omega_u}{\omega_u}}{\omega_u}. \end{cases}. \quad (8)$$

En estos dos últimos casos, es necesario estimar uno de los tres parámetros del modelo previamente para ajustar los grados de libertad a las variables medibles del relé.

Una vez establecidos los modelos de proceso, el siguiente paso consiste en seleccionar la regla de sintonización para determinar los parámetros de los controladores PID. Existen gran variedad de reglas heurísticas que se enfocan en diferentes aspectos, como la regulación o el seguimiento. Entre los más populares destacan el método AMIGO (Hägglund and Åström, 2004) y el método SIMC (Skogestad and Grimholt, 2012) tanto para controladores PI como PID. Ambas reglas de sintonía son particularmente adecuadas para problemas de seguimiento, como es el caso de la velocidad en robots móviles. En este caso, se trabaja con el método SIMC cuyas reglas se reflejan en la Tabla 1, donde K_p , T_I y T_D se corresponden con la ganancia proporcional, el tiempo integrador y el tiempo derivativo respectivamente, y τ_c con la constante de tiempo deseada en bucle cerrado.

Tabla 1: Regla de sintonía SIMC.

Modelo	K_p	T_I	T_D
Integrador	$\frac{1}{k_p(\tau_c + D)}$	$4(\tau_c + D)$	-
Primer Orden	$\frac{\tau}{k_p(\tau_c + D)}$	$\min\{\tau, 4(\tau_c + D)\}$	-
Segundo Orden	$\frac{\tau}{k_p(\tau_c + D)}$	$\min\{\tau, 4(\tau_c + D)\}$	τ

5. Resultados

La Figura 6 muestra una de las experiencias de identificación realizadas, donde el robot se encuentra suspendido y se aplica una señal de relé con una amplitud del 10 %. Se observa una respuesta oscilatoria estable en el tiempo, alcanzando el régimen estacionario en un solo ciclo. Esto implica que este método permite una identificación rápida, logrando estimar los parámetros en 0,3 s.

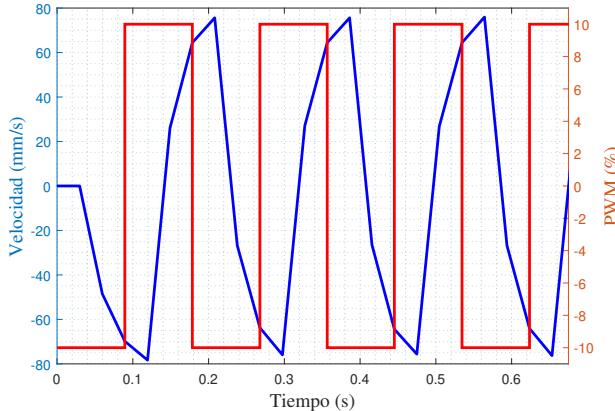


Figura 6: Experiencia del relé en vacío.

Para estimar el modelo de primer orden del sistema, primero es necesario determinar uno de sus tres grados de libertad. Dado que el retardo observable en las experiencias, medido como el tiempo entre la conmutación del relé y el siguiente pico de la señal de respuesta, es de 0,02 s (un valor igual al tiempo de muestreo), se considera más adecuado medir el valor de la ganancia estática para obtener una mayor precisión. Para ello, el sistema se excita con señales escalón en lazo abierto, evaluando su comportamiento en todo el rango de señales PWM con incrementos del 5 %. En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos, incluyendo el caso de la carga límite (2 kg).

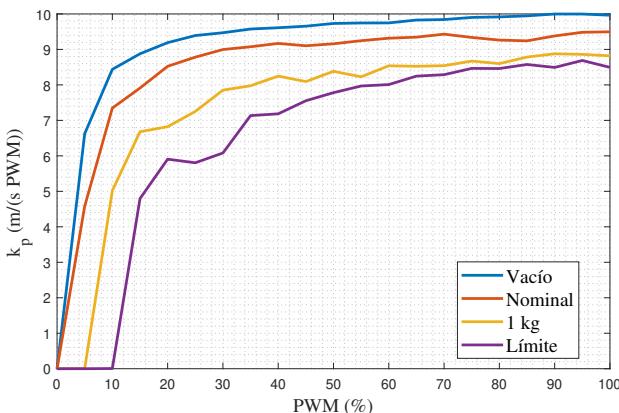


Figura 7: Ganancias estáticas.

En la figura se observa claramente el comportamiento no lineal del parámetro, con un valor en régimen estacionario por encima del 30 % de la señal de control. Además, se aprecia una zona muerta del 5 % para la carga nominal (1 Kg) y del 10 % en el caso límite. Como era de esperar según (2), un mayor

peso del robot, reduce la ganancia del sistema, observándose una disminución del 5 % entre el caso en vacío y el nominal. Al añadir una carga adicional de 1 kg (equivalente al doble del peso del robot), la ganancia disminuye de forma proporcional, reduciéndose hasta un 15 %. En el caso límite, esta reducción llega a aproximadamente un 25 %. Sin embargo, a diferencia de los demás casos, cuando la señal de control supera el 30 %, el sistema no alcanza un régimen estacionario.

Tras las experiencias realizadas para estimar las ganancias, y la identificación mediante relé, mediante identificación por relé, se ha determinado que el modelo de integrador con retardo (6) no resulta adecuado. Esto se debe a que las ganancias estimadas fueron hasta estimación arroja ganancias 20 veces mayores que los valores medidos experimentalmente, como puede verificarse superiores a las medidas. Esto se puede corroborar con el modelo presentado en la sección 2. La Figura 8 muestra los resultados de la estimación para las constantes de tiempo (trazo continuo) y los retardos (trazo discontinuo) en cada caso analizado. Estos resultados confirman la elevada no linealidad del sistema. Cabe destacar que, para el robot en vacío, la relación entre el retardo y la constante de tiempo ($D/\tau \approx 0,5$) corresponde a un sistema balanceado, mientras que en los demás casos la constante de tiempo adquiere mayor dominancia de forma proporcional al peso aplicado.

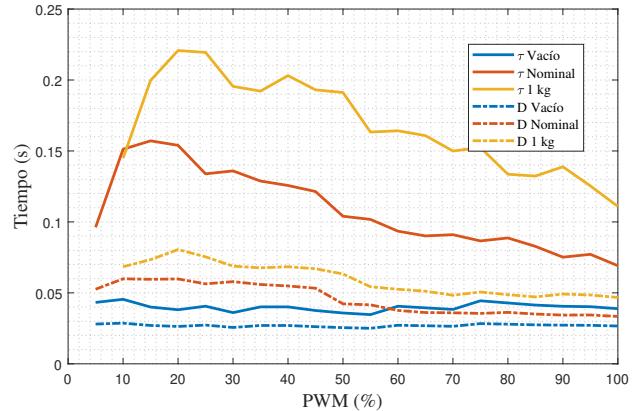


Figura 8: Estimación de parámetros del modelo de primer orden.

La Figura 9 muestra los resultados obtenidos de estimación para la constante de tiempo y el retardo correspondientes al modelo de segundo orden (8). Los datos obtenidos muestran una tendencia consistente con los resultados del modelo de primer orden dentro del rango de operación. Particularmente, el sistema presenta su comportamiento más lento cuando las señales de control se encuentran en el rango del 10 % al 40 %. Una vez verificado el comportamiento no lineal del sistema, se procede a realizar la experiencia de autosintonía en línea con variación de carga. La experiencia se compone de cinco etapas: 1) Escalón en la consigna con el peso nominal y controlador de serie, 2) Autosintonía, 3) Escalón en la consigna con controlador sintonizado, 4) Modificación de la carga y autosintonía, y 5) Escalón en la consigna con carga adicional y controlador de resintonizado. Los resultados de los pasos 1), 3) y 5) se muestran en la Figura 10. Se ha añadido la experiencia del controlador de serie con la carga adicional de forma ilustrativa para demostrar la variación de la respuesta del controlador si no se ajusta al modelo correspondiente.

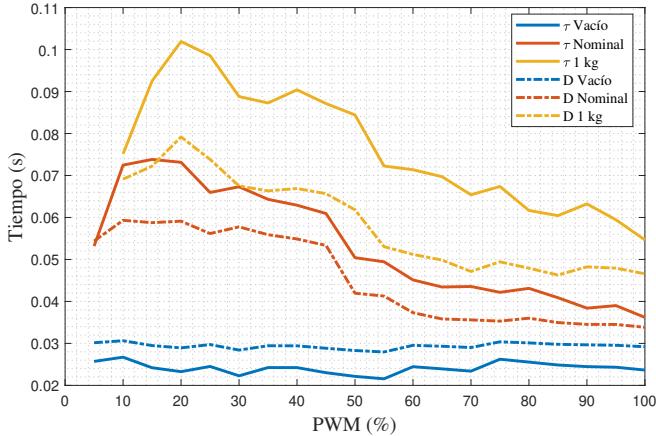


Figura 9: Estimación de parámetros del modelo de segundo orden.

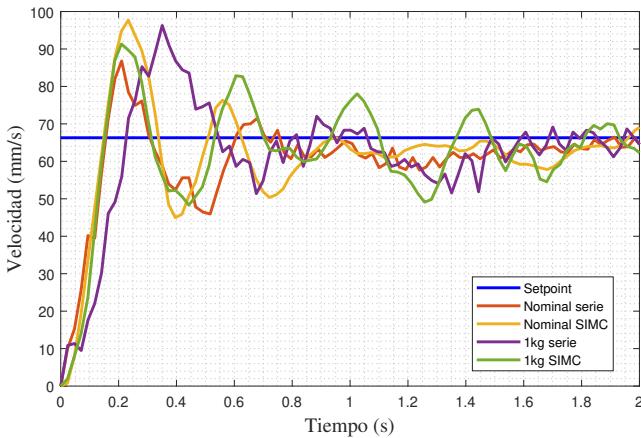


Figura 10: Desempeño del controlador de velocidad del robot Khepera IV.

Los resultados demuestran que la implementación realizada consigue un comportamiento homogéneo con una constante de tiempo en bucle cerrado de $\tau_{BC} = 0,1$ s independientemente de la carga aplicada. Este comportamiento contrasta con la implementación basada en el controlador de serie. La mejora se debe a la capacidad de resintonización automática del controlador PID cuando se modifica la carga del robot.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha implementado un método de identificación en línea basado en relé simétrico con histéresis para estimar el modelo dinámico de velocidad del robot diferencial Khepera IV. El estudio evalúa el comportamiento del sistema en diferentes regímenes de operación variando el peso soportado por los actuadores. Los resultados demuestran que esta técnica permite obtener modelos precisos en breves intervalos de tiempo (0,3 s), incluso bajo cambios en las condiciones de operación. Estos modelos, combinados con reglas de sintonía heurísticas como SIMC logran una respuesta homogénea en bucle cerrado, manteniendo una constante de tiempo estable en todo el rango de trabajo.

Como trabajo futuro, se plantean varias líneas que permitirán aprovechar el potencial de esta técnica, tanto en el control de agentes individuales como en sistemas multi-agente. Entre ellas destacan: (1) la extensión de esta técnica a tareas colaborativas entre múltiples agentes donde la dinámica individual puede variar debido a cargas no uniformes (ej: transporte cooperativo de objetos), o (2) la integración de aprendizaje automático para ajustar dinámicamente los parámetros del relé en función de las condiciones operativas del robot, mejorando la adaptabilidad en entornos dinámicos. Estas mejoras podrían facilitar la aplicación del método en escenarios más complejos, como en enjambres de robots o en entornos con perturbaciones no modeladas.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado en parte por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través de los proyectos PID2020-112658RB-I00/AEI/10.13039/501100011033 y PID2022-139187OB-I00.

Referencias

- Ayyad, A., Chehadeh, M., Awad, M. I., Zweiri, Y., 2020. Real-time system identification using deep learning for linear processes with application to unmanned aerial vehicles. *IEEE Access* 8, 122539–122553.
- Draganjac, I., Miklić, D., Kovačić, Z., Vasiljević, G., Bogdan, S., 2016. Decentralized control of multi-agv systems in autonomous warehousing applications. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 13 (4), 1433–1447.
- Ghorai, P., Majhi, S., Kasi, V. R., Pandey, S., 2018. Parameter identification of delayed under-damped systems using on-line relay autotuning. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* 66 (7), 1197–1201.
- Hägglund, T., Åström, K. J., 2004. Revisiting the ziegler-nichols tuning rules for pi control—part ii the frequency response method. *Asian Journal of Control* 6 (4), 469–482.
- Hang, C., Astrom, K., Wang, Q., 2002. Relay feedback auto-tuning of process controllers—a tutorial review. *Journal of process control* 12 (1), 143–162.
- Montonen, J.-H., Nevaranta, N., Lindh, T., Alho, J., Immonen, P., Pyrhönen, O., 2017. Experimental identification and parameter estimation of the mechanical driveline of a hybrid bus. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65 (7), 5921–5930.
- Nguyen, G. H., Shin, J.-H., Kim, W.-H., 2014. Autotuning controller for motion control system based on intelligent neural network and relay feedback approach. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 20 (3), 1138–1148.
- Sánchez Moreno, J., Dormido Bencomo, S., Díaz Martínez, J. M., 2021. Fitting of generic process models by an asymmetric short relay feedback experiment—the n-shifting method. *Applied Sciences* 11 (4), 1651.
- Skogestad, S., Grimholt, C., 2012. The simc method for smooth pid controller tuning. *PID control in the third millennium: Lessons learned and new approaches*, 147–175.
- Soares, J. M., Navarro, I., Martinoli, A., 2016. The khepera iv mobile robot: performance evaluation, sensory data and software toolbox. In: Reis, L. P., Moreira, A. P., Lima, P. U., Montano, L., Muñoz-Martínez, V. (Eds.), *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference: Advances in Robotics, Volume 1*. Springer International Publishing, pp. 767–781.
- Tzafestas, S. G., 2018. Mobile robot control and navigation: A global overview. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 91, 35–58.
- Velázquez, R., Lay-Ekuakille, A., 2011. A review of models and structures for wheeled mobile robots: Four case studies. In: 2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). IEEE, Tallinn, Estonia, pp. 524–529.
- Yousfi Allagui, N., Salem, F. A., Aljuaid, A. M., 2021. Artificial fuzzy-pid gain scheduling algorithm design for motion control in differential drive mobile robotic platforms. *Computational Intelligence and Neuroscience* 2021 (1), 5542888.
- Yu, C.-C., 2006. Autotuning of PID controllers: A relay feedback approach. Springer Science & Business Media.