

## Modelado, simulación y control remoto de robot de 2GL en redes 5G

Peñacoba, M.<sup>a</sup>, Sierra-García, J. E.<sup>a</sup>, Santos, M.<sup>b</sup>, Leija, L.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Electromecánica, Universidad de Burgos, Campus Río Vena, Avda. Cantabria, s/n, 09006 Burgos, España.

<sup>b</sup> Instituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

<sup>c</sup> Sección de Bioelectrónica del Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV, IPN, México

**To cite this article:** Peñacoba, M., Sierra-García, J.E., Santos, M., Leija, L. 2023. Modelling, simulation and remote control of robotics in 5G networks. XLVI Jornadas de Automática, 819-824.  
<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.819>

### Resumen

En este artículo se presenta el modelado y control de un robot de dos grados de libertad mediante diferentes metodologías como el regulador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y la linealización por realimentación mediante matemática lagrangiana. El objetivo de este estudio es el análisis del comportamiento del modelo y las diferentes técnicas de regulación ante situaciones realistas de control en tiempo real. Para ello, se han introducido retrasos que simulan el tiempo que pueden tardar las tramas de información en llegar a su destino. Esto ha permitido vislumbrar la robustez de sendas técnicas y comprobar si una predicción de la posición mejora la calidad del control. Para hacer esto, se ha modelado el robot en el entorno de Matlab/Simulink. Con la extensión de Simscape se definieron en primera instancia sus características físicas y dinámicas. Posteriormente, se utilizaron técnicas de sintonización para optimizar el rendimiento de los PIDs en términos de estabilidad y seguimientos de trayectorias. Más tarde, se diseñó el modelo matemático del robot mediante las leyes de Lagrange con el objetivo de construir un controlador multiarticulador. Por último, se expuso el modelo a un entorno realista de control y se construyó un predictor lineal de posición.

*Palabras clave:* Modelado, Control, Comunicaciones, robot, PID, Feedback, 5G

### Modelling, simulation and remote control of 2-DOF robotics in 5g networks

#### Abstract

This article presents the modeling and control of a robot with two degrees of freedom using different methodologies such as the Proportional-Integral-Derivative (PID) regulator and Feedback linearization using Lagrangian equations. The objective of this study is the analysis of the behavior of the model and the different control techniques in real time. To do this, delays have been introduced that simulate the time that information frames take to reach their destination. This has allowed us to check the robustness of the communication paths and see if position prediction improves the quality of the control. The robot has been modeled with Matlab/Simulink. With the Simscape extension, its physical and dynamic characteristics were first defined. Subsequently, tuning techniques were used to optimize the performance of the PIDs in terms of stability and trajectory tracking. Later, the mathematical model of the robot was obtained using Lagrange's laws with the aim of building a multi-joint controller. Finally, the model was exposed to a realistic control environment and a linear position predictor was implemented.

*Keywords:* Modelling, Control, Communications, robot, PID, Feedback, 5G

### 1. Introducción

La evolución de las tecnologías de comunicación ha sido un factor determinante en el avance y aplicación de los sistemas

robóticos en diversos campos. Más concretamente, la reciente aparición de la tecnología 5G ha abierto nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia y el rendimiento de los robots, pues proporciona una comunicación confiable y de baja latencia.

Este abanico de posibilidades ha sido el principal motivo por el cual se ha decidido explorar distintas técnicas de modelado, simulación y control en el ámbito de los robots manipuladores.

Para lograr los objetivos de este estudio, se propone un desarrollo de dos modelos teóricos que representen de manera precisa el comportamiento y la dinámica de un robot manipulador de dos grados de libertad en un entorno de control realista.

En la actualidad, los robots desempeñan un papel cada vez más importante en diversas industrias y sectores, desde la fabricación y la logística, hasta la medicina y la exploración espacial. Sin embargo, todavía existen limitaciones en términos de comunicación y control que pueden afectar la eficiencia, la seguridad y la versatilidad de los robots.

La llegada de las redes 5G promete superar algunas de estas limitaciones. Con su baja latencia, alta velocidad de transmisión de datos y capacidad para soportar múltiples dispositivos y aplicaciones, las redes 5G tienen el potencial de transformar el campo de la robótica (Acemoglu et al, 2020; Aleksy et al, 2019).

Se prevé en un futuro no muy lejano capacidades de automatización y control con latencias lo suficientemente bajas como para hacer posible la ejecución de trayectorias con precisiones milimétricas. Entre otras aplicaciones, podrían llevarse a cabo operaciones médicas a distancia mediante robots manipuladores (Gupta et al, 2009).

Todos estos factores hacen al estudio de la automatización y control un campo prometedor que lleva a investigadores de todo el mundo la ilusión de traernos un pedacito de ciencia ficción al mundo real.

## 2. Construcción de los modelos

Para la evaluación de la propuesta se ha escogido un modelo de robot sencillo de tan solo dos grados de libertad para evitar que la complejidad del modelo eclipse el verdadero objetivo del estudio. Este ha sido un robot manipulador de dos articulaciones rotativas con dos grados de libertad. Dicho robot se ha modelado teóricamente mediante Simscape y la matemática de Lagrange.

### 2.1. Simscape

Como primer método constructivo del modelo se ha utilizado Simscape, una extensión de Simulink que permite modelar y simular sistemas físicos multidominio. Esta herramienta utiliza un enfoque basado en componentes físicos, donde los sistemas se representan mediante bloques y se corresponden con elementos reales como un resorte o un sensor.

La construcción de robots mediante Simscape se basa en la implementación de bloques de transformaciones de coordenadas y bloques que representan objetos físicos. Además, al tratarse de un robot manipulador, se ha tenido que definir el sistema como un mecanismo.

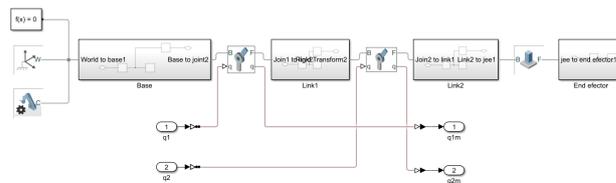


Figura 1. Esquema constructivo del Robot (Simscape.)

El proceso constructivo es el siguiente: en primer lugar, se define el sistema de coordenadas global, el tipo de sistema físico (mecanismo) y el solucionador matemático. Posteriormente, se diseña un elemento (base) y se hace la transformación de coordenadas, se establece la articulación, y se vuelve a repetir el proceso hasta terminar la construcción (Learning Orbis, 2022). El esquema para construir el robot se observa en Fig.1 y el modelo físico del robot en Fig. 2.

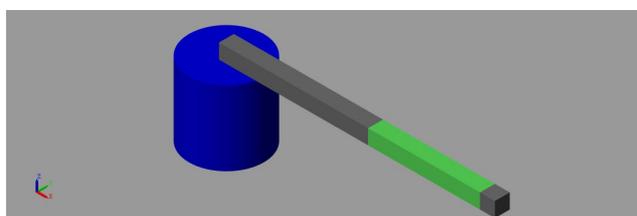


Figura 2. Modelo Físico del Robot (Simscape).

### 2.2. Lagrange

Además de la construcción asistida por la herramienta software Simscape, se ha considerado interesante hacer un estudio matemático del modelo, pues este nos ayudará posteriormente a la construcción de un controlador multiarticular, el cual estará basado en las ecuaciones de Lagrange.

El modelado matemático lagrangiano utiliza un enfoque energético para describir las propiedades cinemáticas y potenciales del robot. A continuación, se muestra un croquis de las distancias, puntos de aplicación de las masas y geometría del modelo (Barrientos et al., 2003).

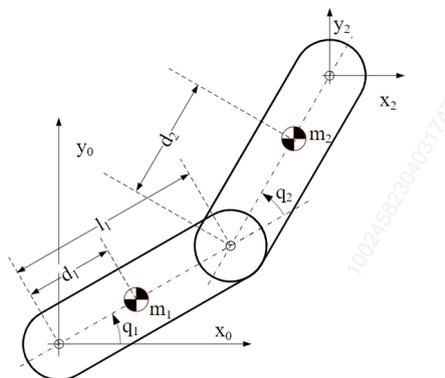


Figura 3. Croquis de distancias, masas y su punto de aplicación.

Para modelar el sistema el proceso seguido ha sido el siguiente: primero se definen las coordenadas y velocidades generalizadas que caracterizan el estado del sistema.

Posteriormente, se establece la función lagrangiana, que representa la diferencia entre la energía cinética y potencial del robot (1).

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q) \quad (1)$$

Empleando las ecuaciones del movimiento de la mecánica lagrangiana (Barrientas et al., 2003), obtenemos las siguientes expresiones de par para sendas articulaciones:

$$\begin{aligned} T_1 &= (m_1 d_1^2 \\ &+ m_2 (l_1^2 + d_2^2 \\ &+ 2l_1 d_2 \cos q_2)) \ddot{q}_1 + m_2 d_2 (l_1 \cos q_2 + d_2) \ddot{q}_2 \\ &+ (-m_2 (2l_1 d_2 \sin q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2) - (m_2 l_1 d_2 \sin q_2) \dot{q}_2^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T_2 &= (m_2 d_2^2 (l_1 \cos q_2 + d_2) \ddot{q}_1 \\ &+ (m_2 d_2^2) \ddot{q}_2 - m_2 d_2 (l_1 \sin q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ &+ (m_2 (l_1 d_2 \sin q_2) \dot{q}_1^2) + (m_2 l_1 d_2 \sin q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 \end{aligned} \quad (3)$$

Donde  $\dot{q}_1$  y  $\dot{q}_2$  son las coordenadas articulares [rad],  $m_1$  y  $m_2$  son las masas de los eslabones,  $l_1$ ,  $l_2$  son las longitudes de los eslabones, y  $d_1$ ,  $d_2$  las distancias al centro de gravedad de cada articulación.

Si ordenamos todos los coeficientes correspondientes a aceleraciones, velocidades lineales, angulares y fuerzas obtenemos la siguiente expresión del par (4):

$$\tau = D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + C(q) \quad (4)$$

Por último, una vez obtenidas las funciones de los pares torsores de cada articulación, se distinguen las matrices  $H$  y  $D$  (matriz de inercia y coriolis respectivamente). Cabe destacar que la matriz correspondiente a las fuerzas de gravedad es 0 debido al carácter horizontal del movimiento de los brazos.

$$H = \begin{bmatrix} m_1 d_1^2 + m_2 (l_1^2 + d_2^2 + 2l_1 d_2 \cos q_2) & m_2 d_2 (l_1 \cos q_2 + d_2) \\ m_2 d_2^2 (l_1 \cos q_2 + d_2) & m_2 d_2^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$D = \begin{bmatrix} -m_2 (2l_1 d_2 \sin q_2) \dot{q}_2 & -m_2 l_1 d_2 \sin q_2 \dot{q}_2 \\ m_2 (l_1 d_2 \sin q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$G = 0 \quad (7)$$

Con estas matrices, el proceso constructivo del robot es relativamente sencillo, pues se pueden conocer las aceleraciones que ofrece a partir de los pares de entrada. A mayores, con la primera y segunda derivada de dichas aceleraciones, se pueden conocer las velocidades y posiciones. La implementación del modelo en Simulink se muestra en Fig. 4.

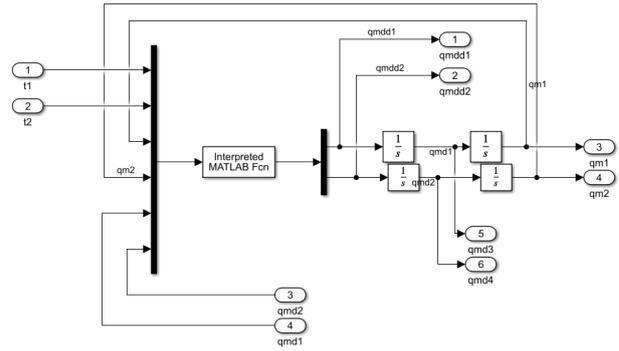


Figura 4. Modelo matemático del robot.

### 3. Estrategias de control

El objetivo principal del controlador es regular y mantener un valor preciso en las coordenadas articulares del robot en tiempo real.

Para lograrlo, se han estudiado dos metodologías, el control proporcional, integral y derivativo (PID) y la linealización mediante realimentación empleando la matemática de Lagrange. El control PID es un enfoque clásico y ampliamente utilizado que ajusta continuamente la acción de control en función del error entre el valor deseado y el valor real de la variable controlada. Por otra parte, el controlador multiarticular basado en las leyes de Lagrange tiene en cuenta las interacciones entre las dos articulaciones, lo que permite un control más preciso y coordinado. En otras palabras, tiene en cuenta las no linealidades del sistema.

#### 3.1. Control Proporcional Integral Derivativo

Los PID son un método clásico de control que utiliza tres componentes principales: el control proporcional (P), el control integral (I) y el derivativo (D). El primero de ellos se encarga de proporcionar una respuesta proporcional al error entre las posiciones deseada y real. El segundo corrige el error acumulado a lo largo del tiempo y el tercero proporciona una acción de control proporcional a su tasa de cambio.

El primer problema al que se enfrenta este método es el carácter no lineal del sistema. Al ser un robot manipulador de dos grados de libertad con articulaciones rotativas, la linealización es complicada, y el modelo lineal obtenido varía con el estado del sistema. Por este motivo, la optimización de los PID se ha llevado a cabo mediante una herramienta que permite encontrar los mejores parámetros para el seguimiento de las trayectorias mediante cálculo numérico.

En particular, se ha utilizado la función "looptune" de Matlab para encontrar la mejor solución de los PID en conjunto. Esta herramienta implementa un enfoque de ajuste iterativo que modifica los parámetros de los controladores PID para lograr un rendimiento óptimo en términos de seguimiento de referencia y rechazo de perturbaciones.

#### 3.2. Control Multiarticular

El control multiarticular es una estrategia de control utilizada en sistemas robóticos con múltiples articulaciones. En lugar de controlar cada articulación de forma

independiente, el control multiarticular considera las interacciones y dependencias entre las articulaciones para lograr un comportamiento coordinado y eficiente.

Una de sus principales ventajas es la inclusión de las no linealidades del sistema en el control, logrando movimientos finales suaves y naturales. Además, permite coordinar y sincronizar las articulaciones para realizar tareas complejas y mejorar la precisión y estabilidad del sistema. Un ejemplo de este tipo de controlador puede ser el mostrado en la Figura 5.

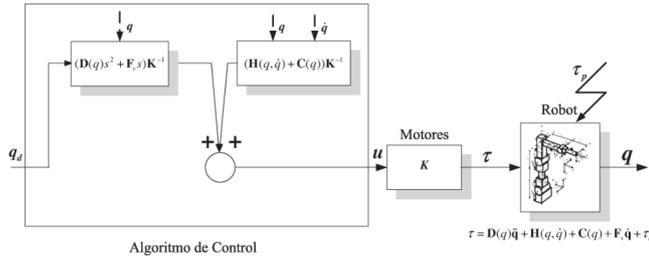


Figura 5. Ejemplo de Controlador Multiarticular.

Si siguiendo el esquema, si despejamos la ecuación del par de Lagrange (Ecuación 4), obtenemos los pares que gobiernan nuestro modelo. En un caso ideal, las trayectorias de posición que se consiguen son idénticas a las deseadas, pues el controlador multiarticular es el sistema inverso del modelo matemático del robot.

#### 4. Ejecución en red

##### 4.1. Influencia del retardo introducido por la comunicación

Con objeto de simular un entorno realista de comunicación, se han programado en el entorno software unos retrasos que representan el intervalo de tiempo que pasa desde que se envía la información hasta que el receptor la recibe.

En la totalidad del modelo simulado, tanto en el controlado por PIDs, como en el de linealización por retroalimentación existen dos periodos de transporte. Estos se corresponden con la comunicación entre el controlador y el modelo, (ida) y con el presente entre el modelo y el controlador (vuelta o “feedback”).

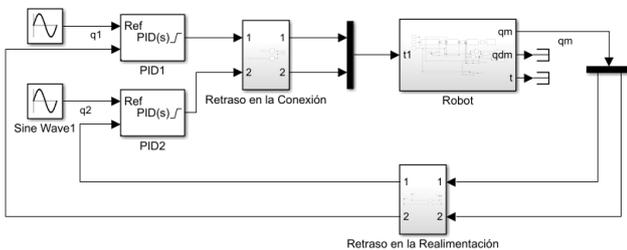


Figura 6. Disposición de los retardos ocasionados por la conexión.

El mismo principio ha sido aplicado el modelo controlado por matemática lagrangiana.

##### 4.2. Error introducido por el retraso en la comunicación

Sobre el software detallado en el punto 4.1, se ha realizado un estudio acerca del error en función de los retrasos. Es decir, empleando Matlab se ha programado un cálculo iterativo de los errores MAE y RMSE para un rango de latencias (desde 0,1 ms hasta 100 ms).

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |Posición Esperada - Posición Real| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Posición Esperada - Posición Real)^2}{N}} \quad (9)$$

En las Ecuaciones 6 y 7 se estudia el error entre la posición esperada y real. Estas se corresponden con la posición de la trayectoria referencia y la del punto final del brazo manipulador en cada instante de tiempo.

A continuación, se muestra el error MAE y el error RMSE del seguimiento de una trayectoria senoidal de 1 Hz para las articulaciones 1 y 2 para el modelo controlado mediante linealización por retroalimentación.

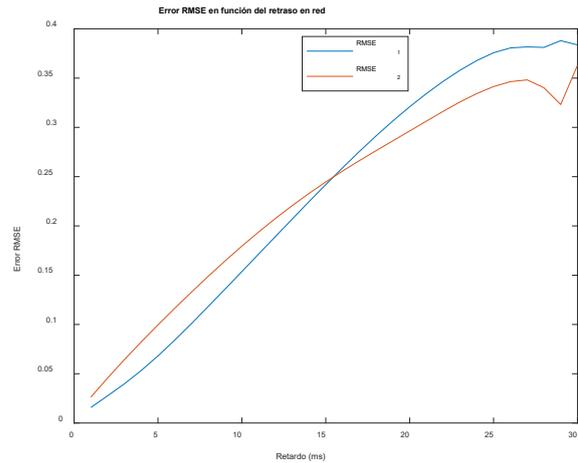


Figura 7. MAE introducido por el retardo en la comunicación en el modelo controlado por linealización por retroalimentación.

Este tipo de control es más robusto, pues tiene en cuenta las no linealidades del sistema. Más concretamente, es capaz de soportar retrasos de hasta 30 ms, mientras que el control proporcional, integral, derivativo pierde la referencia con latencias mucho menores, del orden de 0,5 ms.

Cabe destacar también que en cualquiera de los dos casos la segunda articulación es más propensa a entrar en inestabilidad y, por ello, su error es mayor a menores retardos. En el caso de los PIDs, el error de la segunda articulación comienza a aumentar cuando la primera todavía mantiene un buen seguimiento. Esto se encuentra intrínsecamente relacionado con el hecho de que este tipo de control solamente regula una articulación por controlador, y la otra se comprende como una perturbación. Este hecho no ocurre en el multiarticular, pues comprende a la matemática de control como un todo.

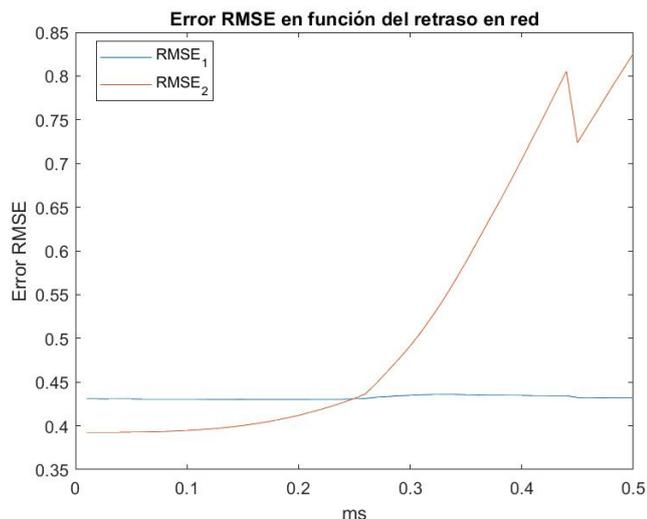


Figura 8. RMSE introducido por el retraso en la comunicación en el modelo controlado por PIDs.

En la Figura 8 se aprecia como para el modelo controlado por PIDs, la segunda articulación tiene una curva de error con pendiente ascendente a retardos menores que la primera. Esto es debido a que, para este tipo de control, el movimiento de cada una es una perturbación en la otra. Así pues, la segunda articulación, al estar construida sobre la primera, es mucho menos robusta.

A mayores, si comparamos las figuras 7 y 8, podemos ver que el modelo controlado por linealización por retroalimentación no tiene este problema, además de fallar a retardos mucho mayores.

### 5. Estimador de posición

Un estimador de la posición es un sistema electrónico que utiliza un algoritmo para estimar la posición de un objeto o sistema. En este estudio, se ha implementado un estimador lineal con objeto de evitar la perturbación ocasionada por el retardo de la comunicación.

El funcionamiento de este bloque es el siguiente: con la división de la diferencia entre la posición actual y la anterior (guardada en memoria), y el paso de tiempo de la simulación, se obtiene la pendiente de la posición. O lo que es lo mismo, la derivada de la posición. Esta derivada representa la tendencia que tiene la trayectoria en todo momento. Al producto de esta tendencia y el tiempo de retraso de la conexión, se puede sumar a la posición actual, resultando una estimación de la posición en la que debería estar.

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos tras implementar el bloque estimador. Es interesante ver como la posición estimada es más parecida a la referencia, mientras que la que está sin estimar está retardada. También se exponen dos comparativas de posiciones que ejecuta el modelo con y sin el bloque estimador (Fig 10 y Fig 11).

Existe una diferencia fundamental entre las segundas articulaciones de los dos casos. Mientras que la primera, aunque distorsionada, todavía intenta seguir un patrón

senoidal, la segunda, sobre todo en el caso sin estimación, ha perdido por completo la referencia.

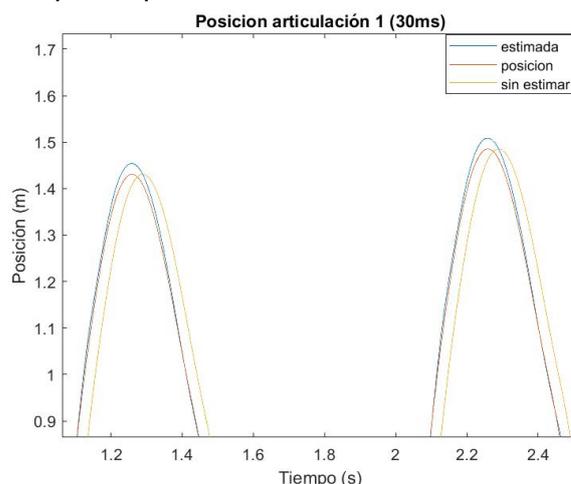


Figura 9. Posición estimada, referencia y sin estimar ante un retraso de 30 ms en el modelo con controlador multiarticulador.

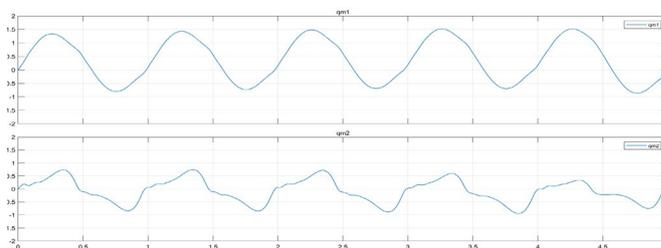


Figura 10. Posiciones de las dos articulaciones del modelo controlado por matemática lagrangiana ante un retardo de 30 ms con estimador de la posición.

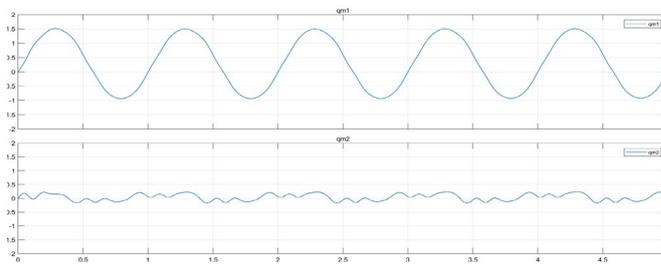


Figura 11. Posiciones de las dos articulaciones del modelo controlado por matemática lagrangiana ante un retardo de 30 ms sin estimador de la posición.

En estas imágenes se vislumbra también que la determinación del fallo en el seguimiento tiene carácter subjetivo, pues no existe un momento preciso en el que se pueda determinar. Para paliar esta imprecisión, se ha tomado como fallo el momento en el que no se distinguen los distintos periodos de la función seno.

### 6. Comparativa entre las diferentes estrategias de control

Con objeto de profundizar en el estudio del control, se han recopilado y dispuesto en las gráficas de las Figuras 12 y 13 el MAE de seguimiento de la trayectoria por ambas articulaciones para diferentes situaciones de comunicación. Se han supuesto tres retrasos idénticos para subida y bajada: 0,1 ms, 1 ms y 10 ms. Ante estos, se han estudiado los modelos controlados mediante PID y linealización por realimentación

con y sin estimador de posición. Esta comparativa permite vislumbrar el método de control más robusto.

Más concretamente, en las figuras previamente mencionadas se aprecia que el controlador de linealización por realimentación ofrece errores menores (del orden de diez veces) y, por tanto, sigue mejor la trayectoria. Además, su rango de mejora con el predictor de la posición es mucho más amplio.

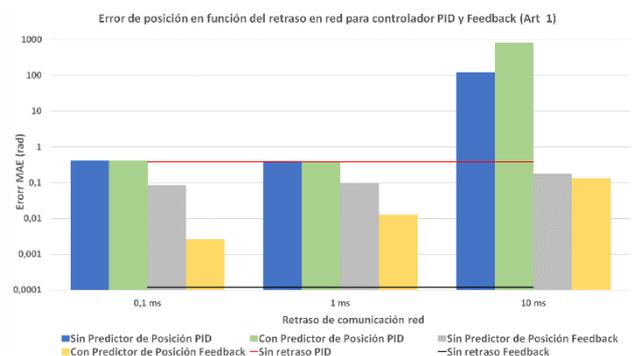


Figura 12. MAE de seguimiento de trayectoria ante retrasos de 0,1 y 1 ms para modelo controlado por PID y linealización por realimentación para art 1.

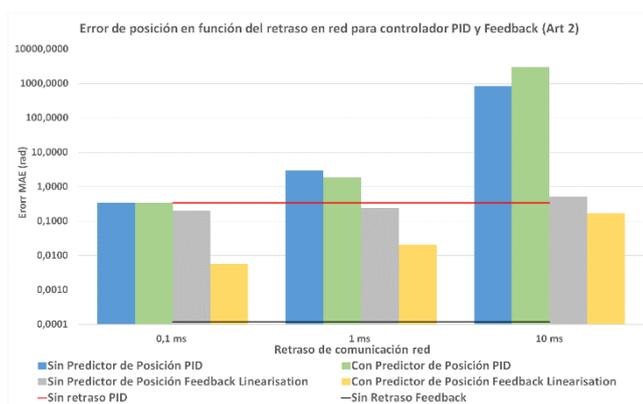


Figura 13. MAE de seguimiento de trayectoria ante retrasos de 0,1 y 1 ms para modelo controlado por PID y linealización por realimentación para art 2.

En la Tabla 1 se muestran el MAE y RMSE para el “End Effector” ante los diferentes casos de control mediante linealización por realimentación.

ERRORES MAE EN FUNCIÓN DEL RETRASO	0 ms (art 1 y 2)	0,1 ms (art 2)	1 ms (art 2)	10 ms (art 2)
Sin retraso (art 1 y 2)	0,0001	-	-	-
Error MAE sin Predictor de Posición	-	0,2013	0,2463	0,5145
Error RMSE sin Predictor de Posición	-	0,2403	0,2855	0,5553
Error MAE con Predictor de Posición	-	0,0057	0,0207	0,1674
Error RMSE con Predictor de Posición	-	0,0066	0,0263	0,1795

Tabla 1. Errores MAE y RMSE del seguimiento de la trayectoria del modelo controlado por linealización por realimentación con retrasos de 0,1, 1 y 10 ms.

ERRORES MAE EN FUNCIÓN DEL RETRASO	0 (art 2)	0,1 ms (art 2)	1 ms (art 2)	10 ms (2)
Sin retraso MAE	0,3438	-	-	-
Sin retraso RMSE	0,383	-	-	-
Error MAE sin Predictor de Posición	-	0,3481	2,92	833,8407
Error RMSE sin Predictor de Posición	-	0,3888	3,0985	947,6023
Error MAE con Predictor de Posición	-	0,3489	1,8385	3004,5
Error RMSE con Predictor de Posición	-	0,3895	2,2024	3512,6

Tabla 2. Errores MAE y RMSE del seguimiento de la trayectoria del modelo controlado por PID con retrasos de 0,1, 1 y 10 ms.

## 7. Conclusiones y trabajos futuros

El control proporcional, integral derivativo responde peor que el controlador basado en linealización por realimentación. Esto es debido a que este último comprende las dos articulaciones como un conjunto, es decir, tiene en cuenta las no linealidades del robot. Sin embargo, el PID solo comprende el control de una única rama, y las ajenas a él son perturbaciones en el sistema.

Un estimador lineal de posición mejora las prestaciones del seguimiento de trayectorias, sobretodo en el tipo LR. Además, como es lógico, en el caso más próximo a la realidad (retraso aleatorio) se obtienen peores seguimientos que en el caso real (retraso fijo y conocido).

En resumen, el control LR modelado por matemática Lagrangiana con posición estimada es el que mejores resultados ofrece ante entornos de comunicación simples y complejos.

En cuanto a los trabajos futuros, se pretende estudiar otros despliegues como la ubicación del controlador en el robot y la generación de trayectorias realizada de forma remota. Además, se tiene previsto probar el esquema de control con un robot real y aplicarlo en robots de más grados de libertad.

## Referencias

- Acemoglu, A., Krieglstein, J., Caldwell, D. G., Mora, F., Guastini, L., Trimarchi, M., ... & Mattos, L. S. (2020). 5G robotic telesurgery: Remote transoral laser microsurgeries on a cadaver. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2(4), 511-518.
- Aleksy, M., Dai, F., Enayati, N., Rost, P., & Pocovi, G. (2019, August). Utilizing 5G in industrial robotic applications. In *2019 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)* (pp. 278-284). IEEE.
- Barrientos, A., Balaguer, C., Aracil, R., & Ballesta, M. (2003). *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill Interamericana.
- Gupta, G. S., Mukhopadhyay, S. C., & Finnie, M. (2009, May). WiFi-based control of a robotic arm with remote vision. In *2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference* (pp. 557-562). IEEE.
- Learning Orbis. (2022, febrero 10). How to design Robots using MATLAB 2021 | SimScape Toolbox | Robotics System Toolbox [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=8YCe3pJDPI&list=PLWF9TXck7O\\_ymYWT8Q33omPb5K-A5v4Ae](https://www.youtube.com/watch?v=8YCe3pJDPI&list=PLWF9TXck7O_ymYWT8Q33omPb5K-A5v4Ae)
- Learning Orbis. (2022, febrero 10). PID Controller for a Robot Manipulator in MATLAB 2021 | RST | SimScape [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=qku7HLpwFLM&list=PLWF9TXck7O\\_ymYWT8Q33omPb5K-A5v4Ae&index=7](https://www.youtube.com/watch?v=qku7HLpwFLM&list=PLWF9TXck7O_ymYWT8Q33omPb5K-A5v4Ae&index=7)
- Vajnberger, V., Terzimehić, T., Silajdžić, S., & Osmić, N. (2011, May). Remote control of robot arm with five DOF. In *2011 Proceedings of the 34th International Convention MIPRO* (pp. 1707-1711). IEEE.
- Voigtländer, F., Ramadan, A., Eichinger, J., Lenz, C., Pensky, D., & Knoll, A. (2017, October). 5G for robotics: Ultra-low latency control of distributed robotic systems. In *2017 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC)* (pp. 69-72). IEEE.
- Yusoff, M. A. K., Samin, R. E., & Ibrahim, B. S. K. (2012). Wireless mobile robotic arm. *Procedia Engineering*, 4