

Jornadas de Automática

Optimización del diseño de un robot paralelo colgante para enlucir paredes

Aznar-Ortega, J.F.^{a,*}, Peidró, A.^a, Mollá-Santamaría, P.^a, Prieto-Gonzaga, F.A.^a, Reinoso, Ó.^{a,b}

^a Instituto de Investigación de Ingeniería de Elche (I3E), Universidad Miguel Hernández de Elche, Avda. de la Universidad s/n, 03202 Elche, España.

^b Valgr.AI: Valencian Graduate School and Research Network of Artificial Intelligence, Camí de Vera s/n, Edificio 3Q, 46022 Valencia, España.

To cite this article: Aznar-Ortega, J.F., Peidró, A., Mollá-Santamaría, P., Prieto-Gonzaga, F.A., Reinoso, Ó. 2026. Optimization of the design of a hanging parallel robot for plastering walls. *Jornadas de Automática*, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13866>

Resumen

En el ámbito de la construcción, el enlucido de paredes desempeña un papel fundamental tanto desde el punto de vista estructural como estético. Este proceso permite obtener superficies lisas y uniformes, además de brindar protección frente a la humedad, las condiciones climáticas y otros factores que pueden afectar la durabilidad de las paredes. Tradicionalmente, esta tarea ha sido realizada de forma manual por trabajadores. Sin embargo, cuando las paredes alcanzan grandes alturas, es necesario recurrir a andamios, góndolas o sistemas de cuerdas desde los cuales los operarios ejecutan el enlucido, exponiéndose a riesgos de caída. Para reducir estos riesgos y automatizar el proceso, en los últimos años se han desarrollado diversos robots y máquinas de enlucido. En este trabajo se optimiza el diseño de un robot para enlucir paredes que consiste en una góndola suspendida mediante cables que dispone de un mecanismo paralelo.

Palabras clave: Optimización de diseño, Espacio de trabajo, Robot paralelo, Enlucido de paredes, Robot colgante.

Optimization of the design of a hanging parallel robot for plastering walls

Abstract

In the construction industry, wall plastering plays a fundamental role from both a structural and aesthetic standpoint. This process creates smooth, uniform surfaces and provides protection against moisture, weather conditions, and other factors that can affect the durability of walls. Traditionally, this task has been performed manually by workers. However, when walls reach great heights, it is necessary to use scaffolding, gondolas, or rope systems from which workers perform the plastering, exposing themselves to the risk of falling. To reduce these risks and automate the process, various plastering robots and machines have been developed in recent years. This work optimizes the design of a wall-plastering robot consisting of a cable-suspended gondola equipped with a parallel mechanism.

Keywords: Design optimization, Workspace analysis, Parallel robot, Wall plastering, Hanging robot.

1. Introducción

El sector de la construcción sigue presentando bajos niveles de automatización en comparación con otras industrias. A ello se suma un entorno laboral que no está libre de riesgos para los operarios (Aghimien et al., 2020; Gharbia et al., 2020). Muchas de las tareas que se llevan a cabo en la construcción resultan físicamente exigentes, requieren precisión y destreza y se basan en movimientos repetitivos, lo que incrementa la fatiga y la probabilidad de que se produzcan accidentes o lesiones.

Además, las condiciones de trabajo poco favorables han provocado una reducción progresiva del número de trabajadores interesados en desempeñar labores en este sector. En este contexto, el desarrollo de soluciones robóticas es necesario para disminuir la carga de trabajo humano y contribuir a paliar la escasez de mano de obra en la construcción (Akinlolu et al., 2022; Liu et al., 2024b; Kim et al., 2015).

Una de las tareas habituales dentro del sector es el enlucido de paredes verticales, una actividad que todavía se realiza

mayoritariamente de manera manual. En edificaciones de pequeña altura, este proceso puede llevarse a cabo desde el suelo o desde posiciones relativamente bajas, sin representar un riesgo considerable para los trabajadores. No obstante, en edificios de mayor tamaño con fachadas elevadas, los operarios deben trabajar suspendidos de la estructura o apoyados en grúas y andamios, lo que incrementa significativamente el riesgo de caídas y accidentes laborales.

En la actualidad existen distintos robots de enlucido, aunque la mayoría de las soluciones disponibles están basadas en un carro equipado con un mástil retráctil que se desplaza verticalmente a lo largo de la pared para ejecutar el enlucido (Forsberg et al., 1995; Liu et al., 2024a; Yadav et al., 2020). Este tipo de configuración presenta ciertas limitaciones que restringen su aplicación en determinados escenarios, especialmente cuando la altura de la superficie a tratar supera el alcance del mástil. Asimismo, estos robots requieren una superficie horizontal de apoyo para el carro, lo que dificulta su utilización en situaciones donde la parte inferior de la pared corresponde a otra cubierta adyacente o a una superficie inclinada.

Para solucionar estas limitaciones, en Aznar-Ortega et al. (2025) se propuso un nuevo robot para enlucido vertical, consistente en una góndola suspendida por dos o más cables, y un robot paralelo plano de 3 grados de libertad montado sobre dicha góndola, que controla la posición y orientación de la pala de enlucido para aplicar el mortero sobre la pared. El diseño preliminar presentado en Aznar-Ortega et al. (2025), no obstante, admite margen de mejora en términos de espacio de trabajo, que puede optimizarse. En el presente trabajo se realiza la optimización de dicho diseño, mediante el algoritmo del ascenso de gradiente.

Este artículo está organizado como sigue. La sección 2 describe el diseño inicial del robot a optimizar y establece las condiciones cineto-estáticas que posibilitan su operación estable. En la sección 3 se explica el criterio utilizado para la optimización, en la sección 4 se exponen los resultados del trabajo y, finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones.

2. Descripción del robot y análisis cineto-estático

El diseño inicial del robot de enlucido que se optimiza en este artículo se muestra en la Figura 1. Dicho robot consiste en una góndola suspendida con cables que se mueve verticalmente a lo largo de las paredes de los edificios. Montado sobre la góndola hay un mecanismo robótico paralelo con tres grados de libertad 3RPR, responsable de ajustar tanto la posición como la orientación de la pala de enlucido. Además, el robot incorpora un mecanismo de adhesión a la pared para garantizar el contacto mientras está en funcionamiento. Este mecanismo es necesario ya que los cables de soporte de la góndola solo controlan el movimiento vertical del robot y no ejercen ninguna fuerza hacia la pared. Sin este mecanismo, la fuerza de reacción generada durante la aplicación del mortero podría despegar al robot de la superficie.

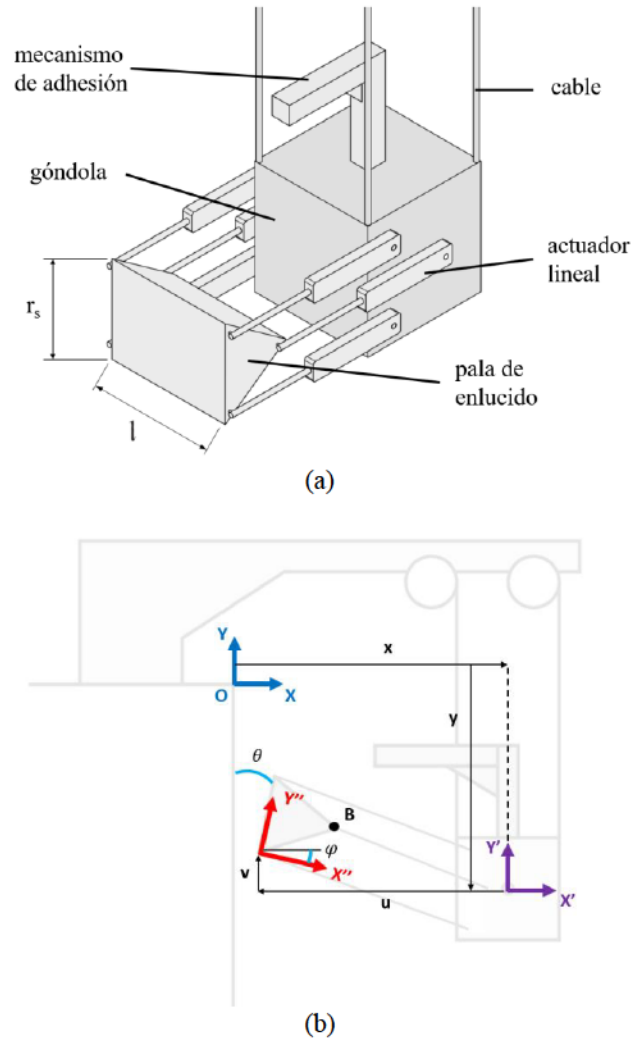


Figura 1: (a) Diseño CAD del robot de enlucido (b) Vista lateral planar con parámetros cinemáticos.

El robot propuesto permite solucionar las limitaciones que se han comentado en la introducción sobre otros robots previos para enlucido, ya que, al ser colgante, no requiere que la base del muro a enlucir sea horizontal y tampoco hay limitación en la altura que dicho muro puede tener.

El objetivo principal de este trabajo es optimizar el diseño geométrico de este robot, y ello se realizará de modo que se maximice su espacio de trabajo. Para ello, es necesario formular las restricciones cinético-estáticas que definen dicho espacio de trabajo.

En primer lugar, se plantea el equilibrio estático de la masa de mortero que queda entre la pala y el muro durante el proceso de enlucido, cuyo diagrama de fuerzas queda representado en la Figura 2.

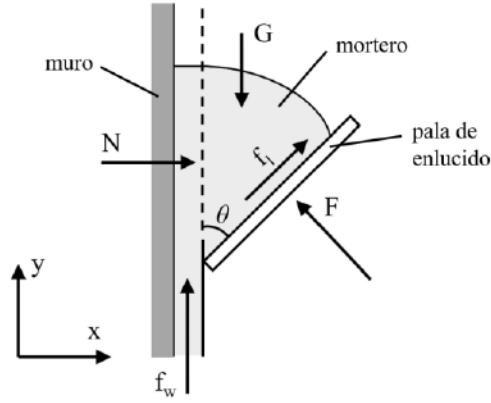


Figura 2. Equilibrio estático del mortero sostenido por la pala del robot propuesto. Adaptada de Wang et al. (2024).

De acuerdo con dicha figura, se tiene el siguiente sistema de ecuaciones del equilibrio estático del mortero:

$$\left. \begin{aligned} F \cdot \cos(\theta) &= N + f_l \cdot \sin(\theta) \\ F \cdot \sin(\theta) + f_w + f_l \cdot \cos(\theta) &= G \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Siendo G la fuerza debida al peso del prisma triangular de mortero sostenido por la pala. Su valor se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$G = \frac{1}{4} \cdot r_s^2 \cdot l \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(2\theta) \quad (2)$$

El resto de los parámetros son la densidad del mortero (ρ), la aceleración de gravedad (g), el coeficiente de fricción entre la pared y el mortero (μ_w), el coeficiente de fricción entre la pala de enlucido y el mortero (μ_l) y el ancho (l) y el lado (r_s) de la pala (Figura 1a). Asimismo, f_w y f_l son las fuerzas de fricción entre el mortero y la pared y la pala, respectivamente. Dado que $f_w = \mu_w \cdot N$ y $f_l = \mu_l \cdot F$, se puede derivar la ecuación de la fuerza N que debe ejercer la pared sobre el mortero:

$$N = \frac{G \cdot (\cos(\theta) - \mu_l \cdot \sin(\theta))}{(1 - \mu_l \cdot \mu_w) \sin(\theta) + (\mu_l + \mu_w) \cos(\theta)} \quad (3)$$

Para garantizar una buena adherencia, su valor debería ser de al menos 100 N (Takahashi et al., 2015). Por último, F es la fuerza que ejerce la pala sobre el mortero (supuesta concentrada en el centro de la pala), y es el principal parámetro de interés para este trabajo, como a continuación se demostrará.

Dado que la fuerza N debe ser igual o mayor de 100 N, imponiendo que el lado derecho de (3) cumpla esa condición, se obtiene un rango de valores para el ángulo θ , que es la inclinación de la pala (θ_{min} , θ_{max}). Para cada uno de esos valores de θ , tendremos un determinado valor de la fuerza F .

Por otro lado, asumiendo que el robot se encuentra a una altura y fija (Figura 1b), que el brazo de adhesión está fijado a la pared y que la pala mantiene una separación u fija respecto a dicha pared mientras aplica el mortero, se buscan los valores de v y θ que garantizan la estabilidad mecánica del sistema, y ello requiere el planteamiento de las siguientes ecuaciones de la estática (Figura 3):

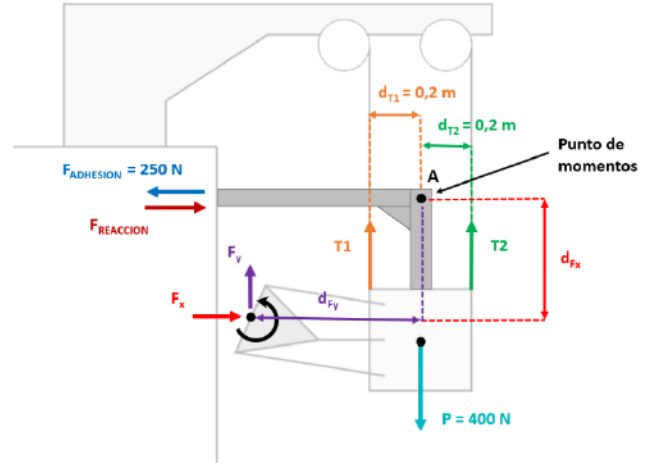


Figura 3. Planteamiento del equilibrio estático del robot.

$$F_{reaccion} = F_{adhesion} - F_x \quad (4)$$

$$P = T_1 + T_2 + F_y \quad (5)$$

$$F_x \cdot d_{Fx} + T_2 \cdot d_{T2} = F_y \cdot d_{Fy} + T_1 \cdot d_{T1} \quad (6)$$

Estas 3 ecuaciones forman un sistema con 3 incógnitas. Si se considera una fuerza de adhesión de 250 N, tomando un valor de θ dentro del rango de validez indicado anteriormente, y, por tanto, conociendo también el valor asociado de la fuerza F que el mortero ejerce sobre la pala (siendo F_x y F_y las componentes cartesianas de F), se pueden obtener los valores de las tensiones de los cables (T_1 y T_2), así como la fuerza de reacción ($F_{reaccion}$) de la pared en el punto de la unión del brazo de adhesión. Si estas tres fuerzas son positivas, el sistema se mantendrá en equilibrio. Por el contrario, si alguna de ellas se torna negativa, el equilibrio se perderá ya que los cables no pueden trabajar a compresión, ni la pared puede tirar del brazo de adhesión, solo empujarlo.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el espacio de trabajo que se pretende maximizar mediante la optimización del diseño del robot se calcula como sigue. En primer lugar, se asume que tanto y como u están fijos, así que la pala de enlucido solo puede moverse como consecuencia del movimiento de los 3 actuadores lineales del robot paralelo. Dado que u se mantiene fijo (ya que se calculará el espacio de trabajo consistente en las posiciones verticales que podría alcanzar la pala mientras enlucen hacia arriba una capa de mortero) se variará la altura v y el ángulo θ . Para ello, se discretiza con un paso de 0.01 el rango de valores de v (entre -2 y 2) y θ (entre θ_{min} y θ_{max} , que dependen del diseño del robot). Esta discretización de los ejes v y θ genera un malla bidimensional de puntos. En cada uno de esos puntos (v_k , θ_k), se resuelve la cinemática inversa del robot paralelo 3RPR y, si las longitudes de los 3 actuadores lineales se encuentran entre la longitud mínima (L_{min}) y máxima (L_{max}), la configuración cinemática es válida. Si, además, las 3 fuerzas (T_1 , T_2 y $F_{reaccion}$) que se deducen del equilibrio estático son positivas, entonces, el punto (v_k , θ_k) es almacenado en el espacio de trabajo, siendo descartado en caso contrario.

Finalmente, se contabiliza el número de puntos (v_k , θ_k) que han sido almacenados $N_{válidos}$, y este valor se utiliza como métrica de cara a optimizar el diseño del robot. El objetivo será

ir modificando los parámetros de diseño del robot (ancho de la góndola, largo de la pala, peso del robot, etc.) de modo que el número de puntos válidos del espacio de trabajo aumente, y esto se hará mediante el algoritmo de ascenso del gradiente tal y como se describirá en la siguiente sección.

3. Optimización del diseño

En Aznar-Ortega et al. (2025) se propuso el diseño inicial del robot y se estudió su espacio de trabajo, que comprende todas las posiciones a las que puede llegar la pala de enlucido para una orientación dada, siempre que se ejerza suficiente presión sobre el mortero y se mantengan positivas la fuerza de adhesión a la pared, así como las tensiones de los cables. Ese espacio de trabajo dependerá tanto de parámetros de diseño geométricos como físicos, tales como los coeficientes de fricción, la densidad del mortero, etc. Si bien estos parámetros físicos no pueden modificarse, el diseño geométrico del robot (y su peso) pueden ajustarse con el fin de maximizar el espacio de trabajo. Mientras que en dicho artículo se estudiaban las posiciones (u, v) alcanzables por la pala cuando se mantenía constante su orientación, en el presente artículo se ha adoptado un criterio más práctico, ya que, en condiciones de operación del robot, la coordenada u se va a mantener constante mientras la pala se desplaza verticalmente alisando el mortero, con la posibilidad de variar ligeramente su orientación dentro del rango permitido para otorgar cierta flexibilidad a la operación. Por tanto, el espacio de trabajo que se optimizará en este artículo es el conjunto de (v_k, θ_k) que cumplen con el equilibrio estático, como ya se ha detallado en la sección anterior.

Para la optimización, se partirá de varios diseños iniciales y, mediante el algoritmo de ascenso del gradiente, se estimará numéricamente el gradiente de $N_{\text{válidos}}$ con respecto a todos los parámetros de diseño variables y, a continuación, dichos parámetros serán actualizados según una pequeña cantidad en la dirección de dicho gradiente. Este proceso se repite un número fijo de iteraciones, fijándose un máximo de 50, ya que valores superiores hacían que la góndola fuera demasiado ancha. Los parámetros a optimizar son: el ancho, el largo y el

peso de la góndola, la fuerza aplicada por el mecanismo de adhesión, los límites mínimos y máximos de los actuadores lineales, el ancho y el lado de la pala de enlucido y, por último, las coordenadas locales del punto B ($x^B_{\text{local}}, y^B_{\text{local}}$) en el sistema de referencia de la pala de enlucido (Figura 1b).

4. Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras la optimización de dos diseños iniciales, para diferentes separaciones u entre la pala y la pared, donde el primer diseño tiene los actuadores lineales del robot paralelo más separados en la góndola que el segundo diseño. En las Figuras 4 - 9 se presentan los diseños iniciales y finales, así como sus espacios de trabajo. Sobre los puntos del espacio de trabajo se ha dibujado el rango de orientaciones posibles que podría adoptar la pala en cada uno de ellos, y estas orientaciones se representan como un abanico (vista ampliada en Figura 4 centro). Durante cada iteración, la mayor parte de los parámetros sufren modificaciones en sus valores de acuerdo con la dirección del gradiente, lo que provoca que muchos parámetros tengan valores diferentes a los iniciales. Uno de los cambios más significativos se aprecia en la geometría de la góndola, que inicialmente era cuadrada y ha cambiado a un rectángulo más ancho que alto.

Respecto al espacio de trabajo (Figura 4 derecha), en el eje de abscisas se representa la orientación de la pala entre los valores admisibles $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$ y en el eje de ordenadas el valor de la altura absoluta $(v + v)$ de la pala. Así pues, para cada altura de la pala se puede observar la libertad de orientaciones que podría adoptar ésta. Mayormente, el rango máximo de orientaciones se encuentra en la mitad del rango vertical de movimiento de la pala.

En las Figuras 4 - 9 se puede observar que, cuanto más grande es la separación entre la pala y la pared, mayor es el número de puntos válidos del espacio de trabajo. Además, tener una mayor separación entre los actuadores de la góndola, como en el primer diseño, también contribuye a obtener más puntos en el espacio de trabajo.

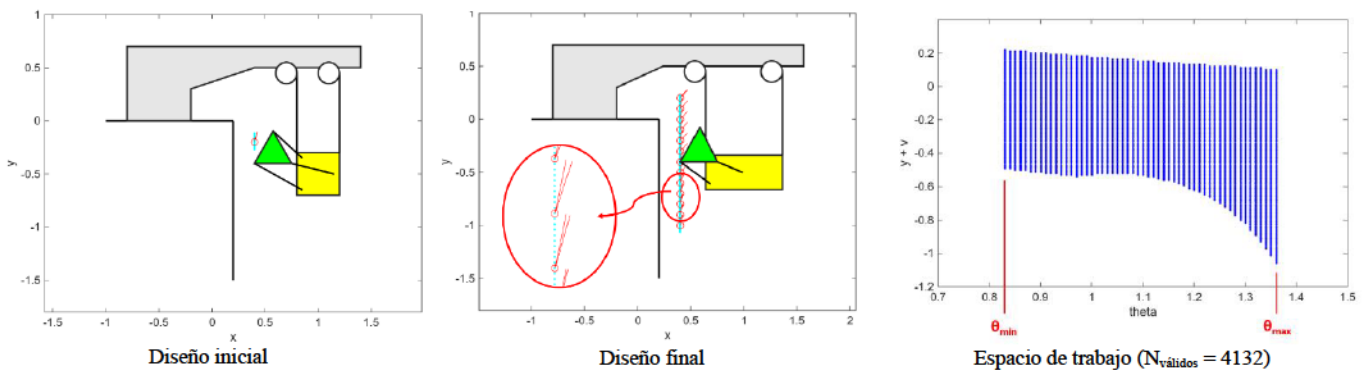


Figura 4: Resultados del primer diseño para una distancia fija entre la pala y la pared de 0.2 metros.

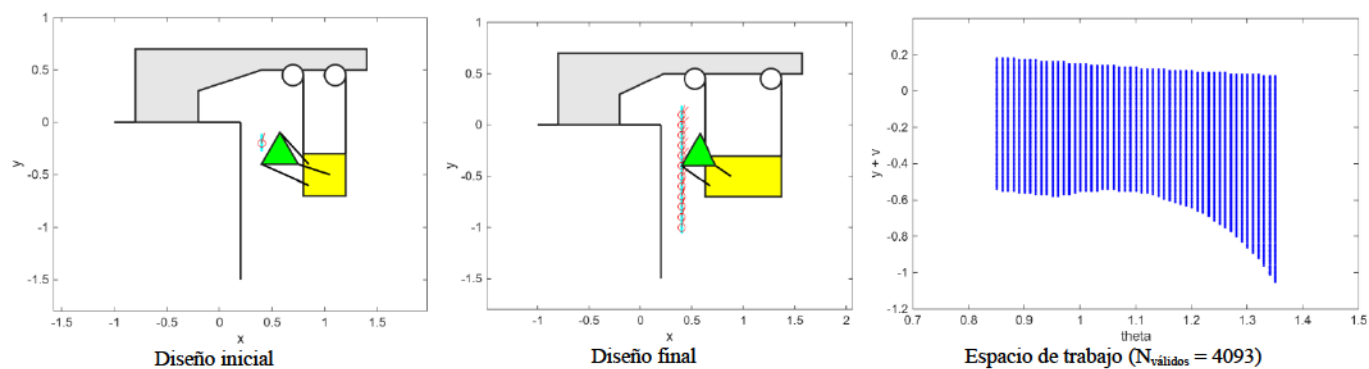


Figura 5: Resultados del segundo diseño para una distancia fija entre la pala y la pared de 0.2 metros.

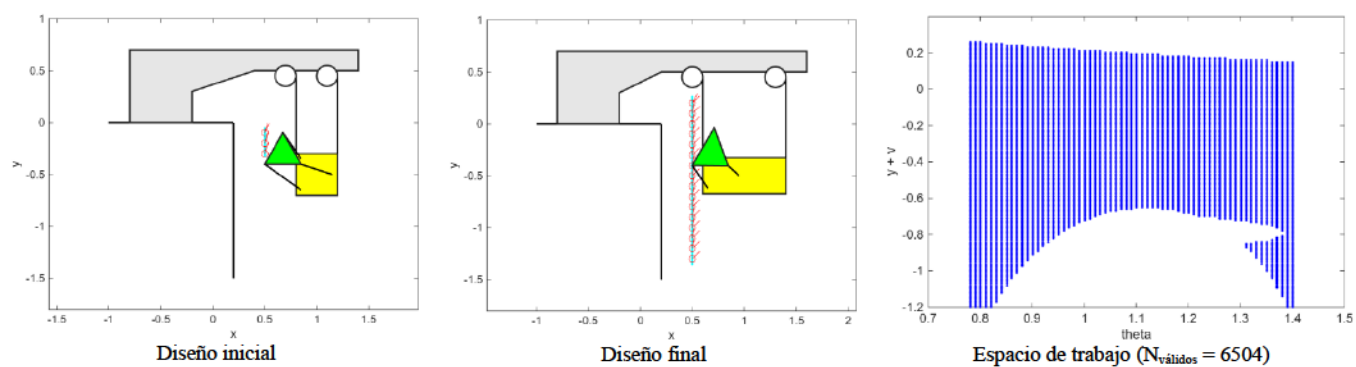


Figura 6: Resultados del primer diseño para una distancia fija entre la pala y la pared de 0.3 metros.

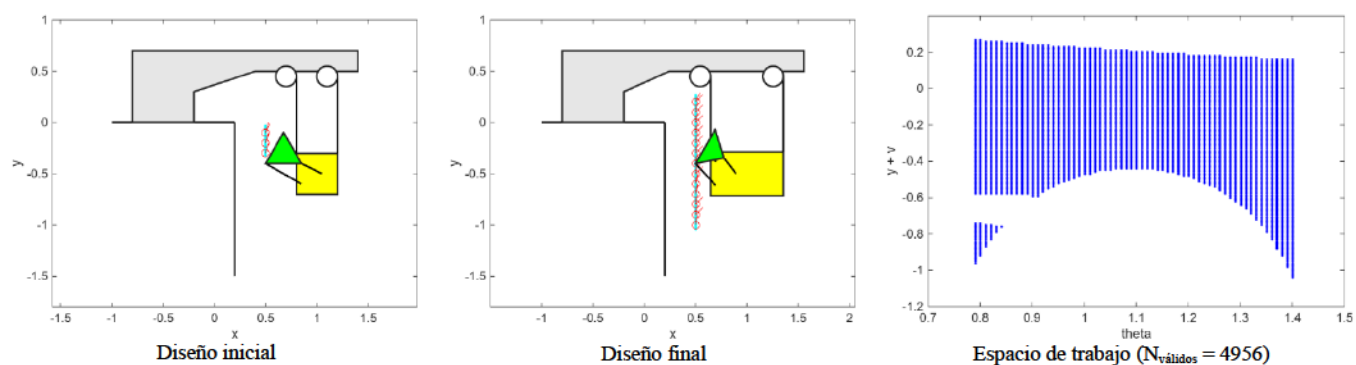


Figura 7: Resultados del segundo diseño para una distancia fija entre la pala y la pared de 0.3 metros.

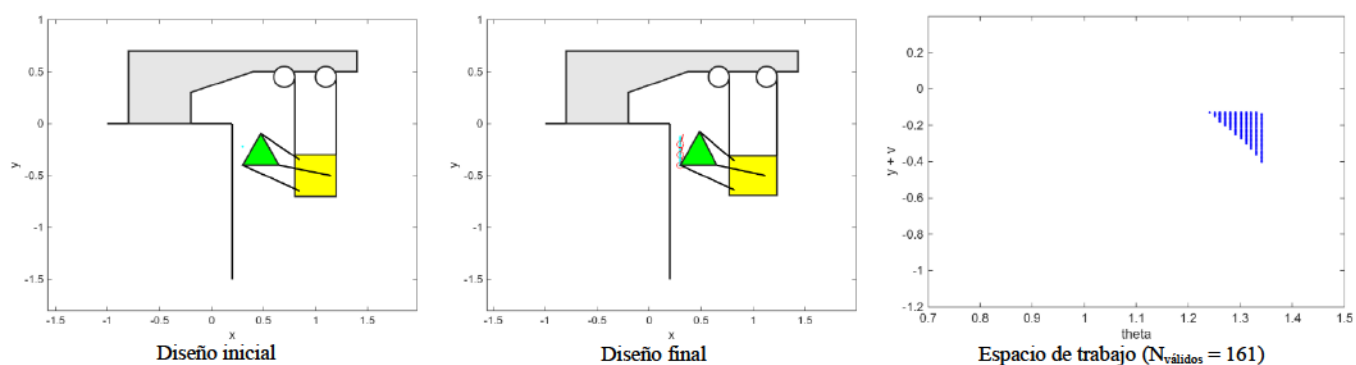


Figura 8: Resultados del primer diseño para una distancia fija entre la pala y la pared de 0.1 metros.

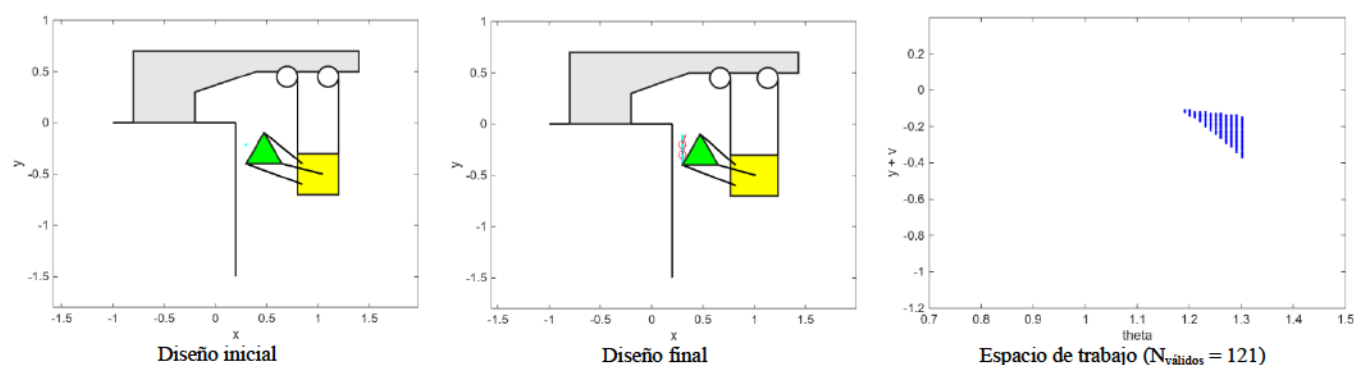


Figura 9: Resultados del segundo diseño para una distancia fija entre la pala y la pared de 0.1 metros.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos de la optimización del diseño del robot evidencian que la variación de parámetros geométricos, como la longitud de carrera de los actuadores o las dimensiones de la pala, contribuye a ampliar el espacio de trabajo viable del robot. En particular, aumentar el ancho de la góndola y, en consecuencia, la distancia entre las poleas de la grúa es una de las principales contribuciones al incremento del tamaño del espacio de trabajo. Esto genera góndolas más anchas que en el diseño propuesto en Aznar-Ortega et al. (2025), por lo que no resulta fácil comparar directamente el desempeño de ambos diseños, ya que en dicho trabajo se estudió el espacio de trabajo para una orientación constante, mientras que en el presente se ha considerado una condición más adecuada para la aplicación prevista del robot, manteniendo constante la separación de la pala con respecto a la pared.

Asimismo, la separación entre la pala y la pared también influye de forma significativa en el espacio de trabajo. Concretamente, el mayor número de configuraciones válidas se obtiene con el primer diseño para una distancia de 0.3 m, alcanzando $N_{\text{válidos}} = 6504$.

En trabajos futuros se estudiará la viabilidad física de construir un robot con las dimensiones obtenidas en las pruebas de este artículo. Además, se impondrán límites inferiores y superiores a los parámetros geométricos para que, una vez alcanzados, estos permanezcan constantes durante el proceso de optimización mientras el resto de los parámetros continúe variando.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto PID2024 - 159765OA - I00 financiado por MICIU / AEI / 10.13039 / 501100011033 y FEDER, UE.

Referencias

- Aghmieni, D. O., Aigbavboa, C. O., Oke, A. E., Thwala, W. D., 2020. Mapping out research focus for robotics and automation research in construction-related studies: A bibliometric approach. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 18(5), 1063–1079. DOI: 10.1108/JEDT-09-2019-0237
- Akinlolu, M., Haupt, T. C., Edwards, D. J., Simpeh, F., 2022. A bibliometric review of the status and emerging research trends in construction safety management technologies. *International Journal of Construction Management*, 22(14), 2699–2711. DOI: 10.1080/15623599.2020.1819584
- Aznar-Ortega, J. F., Peidro, A., Payá, L., Reinoso, O., 2025. Design of a Hanging Parallel Robot for Plastering Brick Walls in Construction, *Proceedings of the 36th DAAAM International Symposium*, pp.0201-0209, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International. ISBN 978-3-902734-47-1, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/36th.daaam.proceedings.027
- Forsberg, J., Graff, D., Wernersson, Å., 1995. An Autonomous Plastering Robot for Walls and Ceilings. *IFAC Proceedings Volumes*, 28(11), 301–306. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)46989-8
- Gharbia, M., Chang-Richards, A., Lu, Y., Zhong, R. Y., Li, H., 2020. Robotic technologies for on-site building construction: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 32, 101584. DOI: 10.1016/j.job.2020.101584
- Kim, M. J., Chi, H. L., Wang, X., Ding, L., 2015. Automation and Robotics in Construction and Civil Engineering. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 79(3-4), 347. DOI: 10.1007/s10846-015-0252-9
- Liu, G., Li, Z., Zhang, J., Bao, H., 2024a. A mortar scraping robot for a whole wall in construction. *2024 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 1688–1693.
- Liu, Y., A.H., A., Haron, N. A., N.A., B., Wang, H., 2024b. Robotics in the Construction Sector: Trends, Advances, and Challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110(2), 72. DOI: 10.1007/s10846-024-02104-4
- Takahashi, H., Yokoi, T., Kajiura, S., Yokoyama, Y., Kudo, R., 2015. Fundamental study about force applied on the wall and myo-electric potential during plastering with mortar. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 80, 1629–1636. DOI: 10.3130/aajs.80.1629
- Wang, Y., Xie, L., Chen, J., Chen, M., Hu, T., Liao, H., Sun, S., Chen, J., 2024. Mortar spraying and plastering integrated robot for wall construction. *Automation in Construction*, 165, 105533.
- Yadav, B., Mandal, N., Thakur, A., Jaiswal, B., Yadav, S., Pandit, S., Yadav, R., Shrestha, A., Risal, S., 2020. International Journal of Advanced Engineering Modelling and Fabrication of Automatic Wall Plastering Machine.