

Jornadas de Automática

Simulación de Robot Cámara Paralelo Accionado por Cuatro Cables para Transmisión Deportiva

Mario A. Pérez^a, Francisco R. Rubio^{a,*}

^aDpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, Avda. Camino de los Descubrimientos s/n. 41092, Sevilla, España.

To cite this article: Pérez, M.A., Rubio, F.R. 2026. Four-Wire Driven Parallel Robot Camera Simulation for Sports Broadcasting. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13742>

Resumen

Este artículo presenta el diseño, modelado físico y control autónomo de un Robot Paralelo Accionado por Cables (CDPR) subactuado de cuatro cables para retransmisión deportiva. Se propone una arquitectura de control en cascada ejecutada sobre ROS 2 y evaluada en el motor físico Gazebo. El control de bajo nivel resuelve la cinemática inversa de fuerzas mediante un optimizador de Mínimos Cuadrados No Negativos (NNLS) ponderado asimétricamente, garantizando tensiones positivas continuas y mitigando el pandeo de la catenaria. En el alto nivel, un sistema de percepción híbrido impulsado por la red neuronal YOLOv8 y filtrado HSV realiza el seguimiento dinámico de objetivos. Los resultados validan la estabilidad espacial con seis grados de libertad (6-DOF), demostrando que la integración del Servocontrol Visual con la planificación de trayectorias Pure Pursuit actúa como un filtro inercial eficaz frente a inercias extremas.

Palabras clave: Robótica de Cables, CDPR, Control Óptimo, NNLS, Visión Artificial, ROS 2

Four-Wire Driven Parallel Robot Optimal Control Machine Vision Simulation for Sports Broadcasting

Abstract

This paper presents the design, physical modeling, and autonomous control of an underconstrained four-cable Cable-Driven Parallel Robot (CDPR) for sports broadcasting. A cascaded control architecture is proposed and evaluated within ROS 2 and the Gazebo physics engine. The low-level control solves the inverse dynamics problem using an asymmetrically weighted Non-Negative Least Squares (NNLS) optimizer, ensuring continuous positive tensions and mitigating cable sagging. At the high level, a hybrid perception system powered by the YOLOv8 neural network and HSV filtering tracks dynamic targets. The results validate the 6-DOF spatial stability, demonstrating that integrating Visual Servoing with Pure Pursuit trajectory planning acts as an effective inertial filter against extreme dynamics.

Keywords: Cable-Driven Parallel Robots, CDPR, Optimal Control, NNLS, Computer Vision, ROS 2

1. Introducción

En la última década, los Robots Paralelos Accionados por Cables (CDPR) han emergido como una alternativa altamente eficiente frente a los manipuladores rígidos tradicionales en tareas que requieren grandes espacios de trabajo y altas aceleraciones. Al sustituir los eslabones macizos por cables de alta resistencia (Kevlar o Dyneema), la inercia móvil del sistema

se reduce drásticamente, lo cual los hace idóneos para aplicaciones logísticas, de construcción y videografía (Zhang et al., 2022; Tachia and Maloletov, 2025).

Un Robot Paralelo Accionado por Cables es un sistema mecatrónico cerrado en el que una plataforma móvil, o efector final, está conectada a una base fija a través de múltiples cables flexibles. El movimiento y posicionamiento de la plataforma se controla variando coordinadamente la longitud y

*Autor para correspondencia: rubio@us.es

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla.

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

tensión de estos cables mediante actuadores motorizados, típicamente cabrestantes acoplados a servomotores y sistemas de poleas guía (Job et al., 2022).

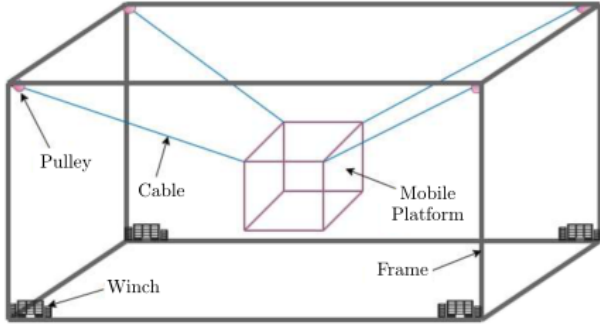


Figura 1: Diseño esquemático típico de un Robot Paralelo Accionado por Cables mostrando el enrutamiento y los actuadores.

Un ejemplo paradigmático es su uso en retransmisiones deportivas (sistemas tipo Skycam). Estas configuraciones suspendidas subactuadas (S-CDPR) suelen emplear cuatro cables superiores que utilizan la gravedad como actuador virtual pasivo (Job et al., 2022). No obstante, estos sistemas presentan desafíos técnicos críticos: la restricción unilateral de actuación (los cables solo pueden traccionar), la fuerte no linealidad dinámica y el acoplamiento cruzado inercial.

El presente trabajo aborda el diseño, modelado y control autónomo de un S-CDPR de cuatro cables a escala real (60×40 m). Se propone una arquitectura jerárquica en ROS 2 que combina optimización matemática (NNLS) para la distribución de tensiones con Servocontrol Visual Basado en Imagen (IBVS) impulsado por Deep Learning (YOLOv8) para el seguimiento autónomo de objetivos deportivos, evaluado en un entorno de simulación de alta fidelidad (Gazebo).

2. Modelado Físico y Dinámico

2.1. Cinemática Inversa y Jacobiana

La cinemática inversa posicional se obtiene mediante la ecuación de cierre de bucle vectorial (Pott, 2018):

$$\vec{l}_i = \vec{P}_i - \vec{R} - \mathbf{A}\vec{B}_i \quad (1)$$

donde $\vec{P}_i$ es la posición del poste, $\vec{R}$ la pose del centro de masa, $\mathbf{A}$ la matriz de rotación y $\vec{B}_i$ el anclaje en el chasis. La relación entre fuerzas y el esfuerzo espacial en la plataforma viene dictada por la Matriz Jacobiana transpuesta $\mathbf{J}^T \in \mathbb{R}^{6 \times 4}$, que acopla la tracción direccional $\vec{u}_i$ y el momento torsor excéntrico $\vec{r}_{world,i}$:

$$\mathbf{J}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{u}_i \\ \vec{r}_{world,i} \times \vec{u}_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dado que existen $n = 4$ actuadores para $m = 6$ grados de libertad espaciales, el sistema es subactuado. Se definen **4 GDL controlables** activamente (traslaciones cartesianas y guiñada) y **2 GDL residuales** (alabeo y cabeceo). Aunque incontrolables directamente, estos últimos son medibles en tiempo real mediante la instrumentación inercial (IMU) embarcada.

Para estabilizar las oscilaciones de estos GDL residuales evitando exigir tensiones negativas de empuje (físicamente inalcanzables), el centro de gravedad de la plataforma se desplazó 15 cm bajo su centro geométrico. Así, la gravedad ejerce un momento restaurador pasivo continuo $\mathbf{M}_g = \vec{r}_{com} \times (m\vec{g})$, delegando el equilibrio horizontal a la física pendular. Asimismo, desviaciones producidas por elongación elástica o pandeo resultan **no medibles por la odometría** interna, haciendo imperativo el uso de sistemas de visión externos para validar la pose absoluta.

Desglosando la Ec. 1 mediante la matriz de rotación de Euler (con componentes direccionales r_{jk}), las componentes cartesianas explícitas de cada cable son:

$$\begin{cases} l_{ix} = P_{ix} - x - (r_{11}b_{ix} + r_{12}b_{iy} + r_{13}b_{iz}) \\ l_{iy} = P_{iy} - y - (r_{21}b_{ix} + r_{22}b_{iy} + r_{23}b_{iz}) \\ l_{iz} = P_{iz} - z - (r_{31}b_{ix} + r_{32}b_{iy} + r_{33}b_{iz}) \end{cases} \quad (3)$$

La longitud escalar requerida por el actuador es su norma euclídea: $l_i = \sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{iz}^2}$. Este modelo de línea recta, aunque eficiente computacionalmente, resulta insuficiente para aplicaciones dinámicas de escala arquitectónica (Tachia and Maloletov, 2025).

2.2. Efecto Catenaria y Pandeo de Cables

Cabe destacar que el modelo cinemático de línea recta resulta insuficiente para aplicaciones con grandes luces o vanos (hasta 60 metros) (Kozak et al., 2006). En un modelo elastostático real, la masa propia del cable induce un pandeo gravitatorio que introduce un acoplamiento elástico no lineal en el sistema. Según el modelo clásico derivado de las ecuaciones de Irvine (Irvine, 1981), un cable con densidad de masa lineal ρ sometido a una tensión horizontal H describe teóricamente una curva basada en la función del coseno hiperbólico:

$$z(x) = \frac{H}{\rho g} \cosh\left(\frac{\rho g x}{H}\right) - \frac{H}{\rho g} \quad (4)$$

Calcular el perfil exacto de esta curva iterativamente en tiempo real a altas frecuencias excede los límites computacionales del simulador para la resolución del lazo cerrado.

2.3. Dinámica del Sistema (Newton-Euler)

Para trayectorias dinámicas, la ecuación del movimiento del efector final asume la estructura acoplada:

$$\mathbf{M}(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}})\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{G}(\mathbf{X}) = \mathbf{J}^T \mathbf{T} \quad (5)$$

Donde $\mathbf{M}$ es la matriz diagonal de masa (25 kg) e inercia ($I_{xx,yy} = 4, I_{zz} = 6$), $\mathbf{C}$ modela los pares giroscópicos y de Coriolis dependientes de la velocidad angular, y $\mathbf{G}$ concentra el vector de la gravedad. El gran desafío radica en encontrar el vector de tensiones $\mathbf{T}$ que satisfaga la Ecuación 5 garantizando que $T_i \geq T_{min} > 0$.

3. Arquitectura de Control

Para asegurar la viabilidad, se diseñó un control en cascada, dividiendo el problema en resolución espacial (Bajo Nivel) y planificación inteligente (Alto Nivel).

3.1. Bajo Nivel: Lazo de Control y Optimización NNLS

Desde el punto de vista del control clásico, la planta física del CDPR se modela fundamentalmente como un sistema de doble integrador puro. Esta naturaleza exige la implementación de una acción derivativa (K_d) robusta que emule una fricción viscosa artificial para estabilizar el sistema.

Para que las leyes de control derivativo funcionen correctamente en el espacio de la tarea, es imperativo disponer de lecturas de velocidad limpias. Los motores físicos como Gazebo, al resolver colisiones e inercias en pasos de tiempo discretos, inyectan ruido de alta frecuencia en la odometría. Para solventar esto, se implementó un filtro de Media Móvil Exponencial Ponderada (EWMA) sobre las velocidades lineales y angulares:

$$v_{filtered} = \alpha \cdot v_{current} + (1 - \alpha) \cdot v_{filtered-prev} \quad (6)$$

Se ajustaron empíricamente coeficientes asimétricos para aislar la dinámica de la plataforma: $\alpha_{lin} = 0,6$ para la velocidad lineal (permitiendo cierta viveza de respuesta) y $\alpha_{ang} = 0,85$ para la velocidad angular (requiriendo un filtrado más agresivo debido a la sensibilidad del giróscopo simulado frente al ruido inercial).

En lugar de un control PID tradicional, se prescinde deliberadamente de la acción Integral (I) para evitar el riesgo de acumulación de error ante las constantes saturaciones unilaterales de los cables ($T_i \geq T_{min}$), fenómeno que desencadenaría fuerzas transitorias destructivas al recuperar la tensión abruptamente (Khosravi and Taghirad, 2014). Para anular el error de estado estacionario sin comprometer la seguridad elástica, se emplea un esquema PD con acción anticipativa.

El cálculo del esfuerzo global ($\mathbf{W}_{desired}$) se dividió en dos subsistemas de control independientes que se superponen algebraicamente:

- **Control Translacional:** Se mantuvo el lazo PD, complementado con la compensación directa del vector gravedad (calculado para la masa final de diseño de 25.0 kg, resultando en $F_z = 245,25$ N e inyectado en lazo abierto). Se incluyeron saturaciones individuales por eje para evitar exigencias imposibles a los motores durante transitorios largos.
- **Control Rotacional (Amortiguamiento Activo):** Se implementó una ley de control que penaliza cualquier desviación de la plataforma respecto al plano horizontal. Extrayendo el error angular (Roll, Pitch, Yaw) a través del vector de rotación de la matriz de cosenos directores, el controlador demanda pares restauradores proporcionales al error y a la velocidad angular amortiguada. Este subsistema actúa como un giroscopio electrónico que disipa activamente la energía rotacional inducida por el arrastre de los cables.

Debido al acoplamiento dinámico y a la asimetría geométrica del chasis ($I_{xx} \neq I_{zz}$), la sintonización de las ganancias (K_p , K_d) se realiza de forma anisotrópica. Se imponen factores de amortiguamiento $\zeta \geq 1$ y frecuencias naturales ω_n específicas para cada grado de libertad, asegurando respuestas críticamente amortiguadas o sobreamortiguadas que previenen cualquier sobreoscilación visual.

Este esfuerzo deseado ($\mathbf{W}_{desired}$) se inyecta en el optimizador matemático. El uso de una pseudoinversa geométrica pura resulta ineficaz en escenarios dinámicos agresivos, ya que puede comandar tensiones negativas. Por el contrario, se implementó un solucionador de optimización convexa por Mínimos Cuadrados No Negativos de Lawson-Hanson, que obliga innegociablemente a que $T_i \geq 0$:

$$\min_{\mathbf{T}} \frac{1}{2} \|\mathbf{\Omega} \mathbf{J}^T \mathbf{T} - \mathbf{\Omega} \mathbf{W}_{desired}\|_2^2 \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{T} \geq \mathbf{T}_{min_dynamic} \quad (7)$$

Se introducen tres técnicas críticas en el optimizador:

1. **Ponderación Espacial (WLS):** Se pre-multiplica el sistema por una matriz de pesos $\mathbf{\Omega} = \text{diag}(1, 1, 1, 5, 5, 10)$. Al penalizar con factor 10 el error en Yaw, el NNLS prioriza el equilibrio rotacional frente al deficiente brazo de palanca tórser de la cámara.
2. **Restricción de Catenaria Dinámica:** Para grandes vientos, los cables sufren pandeo. Dado que resolver analíticamente la ecuación hiperbólica (Eq. 4) es computacionalmente inviable en cada iteración del control, se implementó una aproximación parabólica dinámica eficiente. Proyectando la longitud geométrica horizontal de cada cable (L_{xy}) y definiendo una deformación máxima admisible ($S_{max} = 1,5$ m) para cuerdas con densidad de $\rho = 0,05$ kg/m, la tensión mínima requerida para mantener la rectitud aparente anti-pandeo se aproxima como:

$$T_{sag} = \frac{\rho \cdot g \cdot L_{xy}^2}{8 \cdot S_{max}} \quad (8)$$

El límite inferior del NNLS se actualiza iterativamente a $\mathbf{T}_{min_dynamic} = \text{máx}(10, T_{sag})$. Al relajar la exigencia de pandeo a 1.5 m se mitiga el problema de la levitación por sobre-restricción matemática (donde la tracción obligatoria de los cuatro cables sumaba una fuerza superior a la gravedad), logrando una suspensión estable que no satura el optimizador ni invade el espacio de la pista de juego.

3. **Método de Conjuntos Activo/Pasivo (Active-Set):** La resolución iterativa del NNLS clasifica dinámicamente los cables en un conjunto pasivo (bloqueados en su tensión mínima $\mathbf{T}_{min_dynamic}$) y un conjunto activo (libres para traccionar). Durante maniobras balísticas, como una frenada brusca, el sistema detecta qué cables entrarían en compresión, los relega instantáneamente al conjunto pasivo, y transfiere toda la carga de frenado a los cables activos frontales. Este mecanismo previene matemáticamente la aparición de holguras en los cables y sus consiguientes latigazos inerciales.

3.2. Alto Nivel: IA y Servocontrol Visual (IBVS)

El seguimiento del objetivo se confía a la red neuronal convolucional YOLOv8 (Jocher et al., 2023), respaldada por un filtro morfológico HSV de redundancia. Las detecciones alimentan un Servocontrol Visual Basado en Imagen (Zake et al., 2019), que mapea el error radial de los píxeles a comandos espaciales de velocidad.

Para asegurar encuadres cinematográficos fluidos, se integró un *anillo de guardia* virtual compensado por la odometría de orientación. Situar la cámara directamente en la vertical del objetivo (plano cenital puro) resulta perjudicial, ya

que elimina la perspectiva tridimensional del juego y dificulta la evaluación de la profundidad. Para solventar esto, el sistema busca mantener al objetivo orbitando sobre un anillo de guardia de radio constante en el plano de la imagen. Conocida la altura nominal de vuelo de la plataforma ($Z_{height} = 8,0$ m) y la constante focal empírica de la cámara virtual ($FOV_{px} = 650,0$ px), se proyecta una distancia física de seguridad reducida de $d_{min} = 2,2$ m mediante trigonometría de triángulos semejantes, calculando el radio del anillo como:

$$R_{guardia-px} = \frac{FOV_{px} \cdot d_{min}}{Z_{height}} \quad (9)$$

Dado que la plataforma carece de sistemas *pan-tilt* mecanizados, esta distancia optimiza el compromiso de mantener enfocado el objetivo justo debajo sin que este abandone el encuadre por un margen focal excesivo. Con esta transformación, el error de control bidimensional se reescribe como un error radial ($e_{radial} = e_{dist} - R_{guardia-px}$). Si el objetivo se encuentra fuera de esta frontera, el robot avanza frontalmente; sin embargo, si penetra en el interior del anillo ($e_{radial} < 0$), el sistema invierte automáticamente el vector de velocidad para retroceder, manteniendo invariable la distancia de seguridad.

Es en este punto donde la región de tolerancia o banda muerta evoluciona algorítmicamente: la tolerancia inicial de una esfera de 5 píxeles en el centro de la imagen se redefine como un margen de error radial de ± 5 px aplicado directamente sobre la circunferencia del anillo.

Las ganancias del PD visual se ajustaron con fuerte sobreamortiguamiento derivativo ($K_d > K_p$) para absorber las latencias inherentes a la inferencia de la red neuronal y a las masas inerciales del CDPR. El resultado se integra mediante el algoritmo de *Pure Pursuit* (Coulter, 1992), proyectando una distancia *lookahead* proporcional a la aceleración, logrando un filtrado pasabajo de la trayectoria.

Para gestionar el ciclo de vida del vuelo y evitar discontinuidades posicionales abruptas que harían colapsar al optimizador NNLS, el comportamiento global se orquesta mediante una Máquina de Estados Finitos (MFS)

Dado el carácter errático de los objetivos deportivos, se implementó adicionalmente un filtro de inercia direccional (*anti-amagos*). Este módulo evalúa el diferencial del ángulo de seguimiento visual; ante cambios de dirección drásticos ($> 0,78$ rad), atenúa severamente las ganancias del controlador (reduciendo el factor de inercia a 0.15) para proteger los cabrestantes de sobrecargas, restaurando la agresividad solo al estabilizarse la trayectoria.

Finalmente, la viabilidad reactiva exige determinismo temporal. Para evitar que la plataforma procese fotogramas obsoletos, la suscripción a la cámara en el entorno ROS 2 se configuró bajo un perfil de Calidad de Servicio (QoS) estricto de cero latencia (*Reliability=BEST_EFFORT*, *History=KEEP_LAST*, *Depth=1*). Asimismo, ante oclusiones totales del objetivo, un sistema de memoria visual preserva las componentes de inercia durante un máximo de 60 fotogramas.

4. Simulación y Resultados

Las pruebas empíricas se desarrollaron en Gazebo (ROS 2), simulando un campo de fútbol de 60×40 m, mástiles de 30 m y un chasis de 25 kg.

4.1. Espacio de Trabajo Factible (WFW)

En primer lugar, se evaluó el Espacio de Trabajo de Fuerzas Factibles (WFW) (Bosscher et al., 2006). Como se observa en la Figura 3, la cota operativa adquiere una morfología piramidal invertida dictada por los umbrales operativos de tensión ($T_{max} = 800$ N y la restricción dinámica de pandeo T_{sag}).

Geoméricamente, los límites de este espacio factible alcanzan su máxima amplitud horizontal (60×40 m) en las cotas superiores, próximas al plano de los anclajes ($Z = 30$ m). A medida que la plataforma desciende, la componente vertical de los tensores se reduce significativamente, lo que exige un aumento drástico de la tracción geométrica para sostener el peso del chasis sin rebasar el límite de pandeo permitido. Este fenómeno restringe progresivamente la movilidad lateral, haciendo converger las paredes del espacio de trabajo hacia el centro del campo ($X = 0, Y = 0$). Como resultado, el CDPR es capaz de descender hasta el nivel del suelo ($Z \approx 0$ m), pero este vértice inferior es puntiforme y estrictamente central; cualquier incursión lateral a bajas cotas resultaría en la violación de los límites de rotura. La MFS restringe la maniobrabilidad del planificador estrictamente a este volumen geométrico seguro.

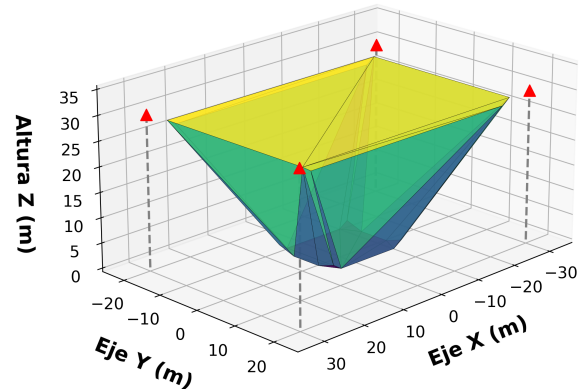


Figura 3: Visualización en 3D del Espacio de Trabajo de Fuerzas Factibles (WFW). Se aprecian los límites operativos espaciales, limitados inferiormente por la saturación de tensión y el pandeo.

4.2. Evolución Dinámica de Tensiones

La Figura 6 corrobora el desempeño del optimizador de bajo nivel ante transiciones balísticas a alta velocidad (5 m/s). El algoritmo NNLS maneja fluidamente el Conjunto Activo (*Active-Set*), saturando la tracción en el límite matemático T_{sag} (para evitar holguras destructivas) sin alcanzar el límite máximo de rotura estructural (800 N), certificando la seguridad del CDPR.

4.3. Filtrado Cinemático y Rendimiento 3D

La evaluación espacial (Figura 5) demuestra el éxito de la estrategia de encuadre. Para someter a estrés la arquitectura de control, no se simuló un recorrido lineal por toda la extensión del espacio de trabajo (60×40 m), sino que se optó por una trayectoria altamente dinámica y compacta (lemniscata de

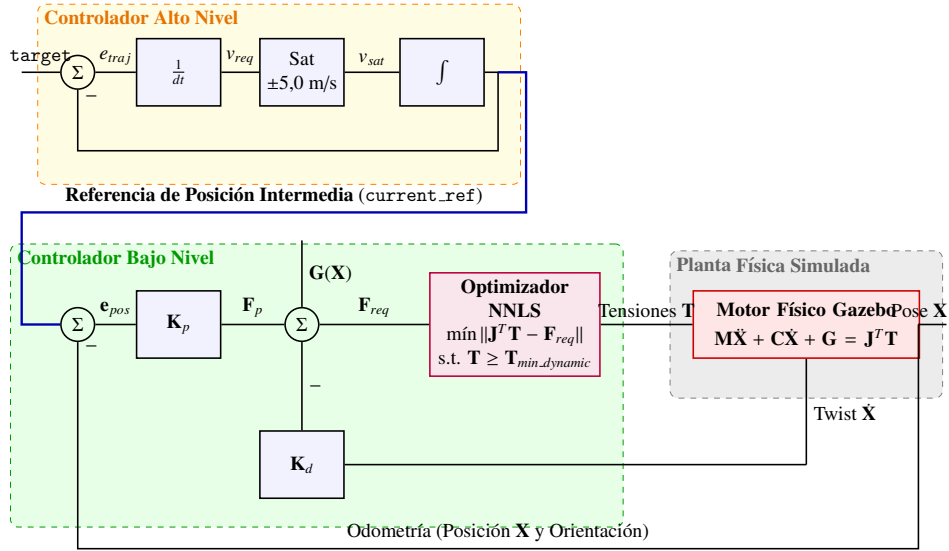


Figura 2: Diagrama de bloques de la arquitectura de control completa para simulación dinámica con optimización de tensiones en Gazebo.

8×4 m). Este trazado cerrado y de alta curvatura se diseñó específicamente para forzar aceleraciones transversales continuas, permitiendo validar de forma empírica la fórmula del *lookahead*, la adaptación del control dinámico de velocidad ante los cambios de curvatura y la robustez de los parámetros para transicionar de estado en la MFS.

Error Cuadrático Medio (RMSE) global de 0,585 m, lo que confirma un acoplamiento parasitario controlado en la cota vertical a pesar de las agresivas maniobras en el plano horizontal.

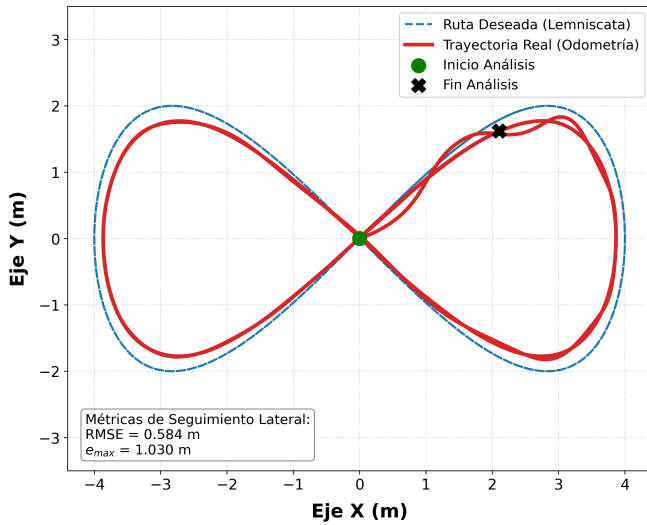


Figura 4: Proyección ortogonal (vista cenital) del seguimiento de la lemniscata. Se incluye la cuantificación del error de seguimiento lateral provocado por el suavizado dinámico en curvas.

La trayectoria deseada por la IA (azul) exhibe altas frecuencias de oscilación propias del objetivo. Sin embargo, la trayectoria física del robot (roja) sigue un perfil sumamente suavizado. Este comportamiento de seguimiento retardado absorbe la cinemática brusca. Fundamentalmente, operando a una altura nominal validada de $Z = 8$ m (plenamente integrada dentro del volumen del WFW), el CDPR retiene una estabilidad vertical excelente con oscilaciones en el eje Z restringidas estrictamente a $\leq \pm 0,04$ m. Para evaluar la fidelidad tridimensional del seguimiento, el análisis de la odometría arroja un

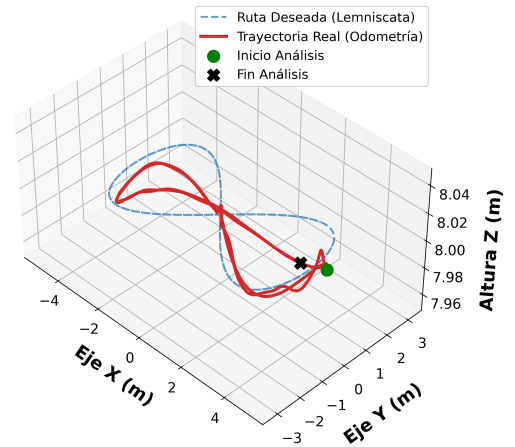


Figura 5: Ruta virtual objetivo vs. Trayectoria Real ejecutada por el robot en el espacio 3D. Se evidencia la supresión inercial y la estabilidad en la cota de vuelo.

Adicionalmente, el análisis de la proyección ortogonal en el plano X-Y (Figura 4) permite evaluar con precisión el rendimiento transversal de la plataforma frente a cambios de dirección abruptos. Cuantitativamente, el error de seguimiento lateral arroja un RMSE bidimensional de 0,584 m. En los extremos de la lemniscata, donde el radio de curvatura es mínimo y la inercia del chasis es máxima, se registra un error local máximo (e_{max}) controlado de 1,030 m. La trayectoria real persigue a la ruta deseada recortando intencionadamente estos vértices de trayectoria. Este suavizado geométrico de aproximadamente un metro no representa un fallo estático del bucle de control, sino el resultado directo de aplicar la fórmula de la curvatura acoplada al control dinámico de velocidad en el planificador asimétrico. Esta lógica limita matemáticamente la aceleración en los giros cerrados, asegurando que la plata-

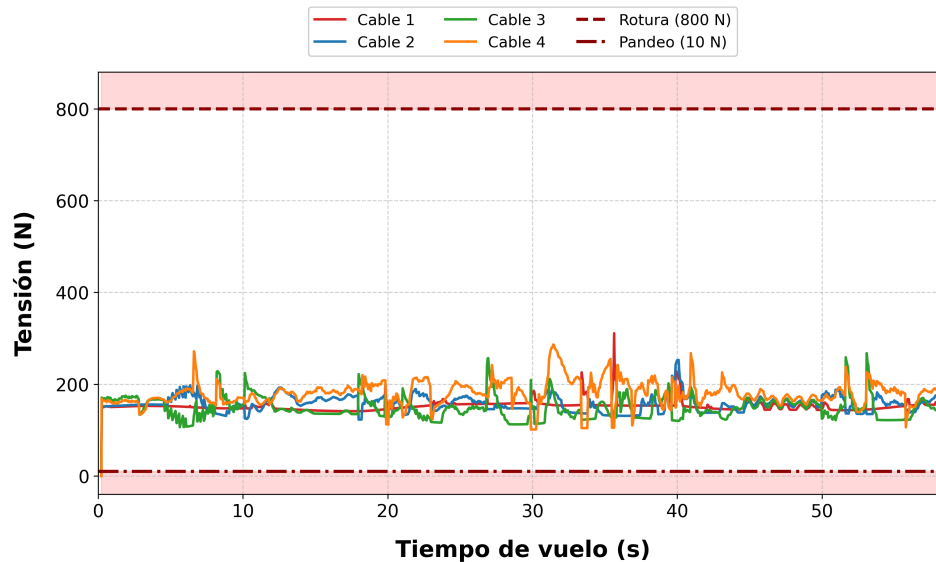


Figura 6: Registro temporal de tensiones comandadas por el NNLS. Se observa la limitación dinámica inferior (T_{sag}) y la evasión de sobretensiones.

forma absorba los cambios bruscos de momento cinético sin exigir picos de tensión inasumibles a los actuadores ni desestabilizar la plataforma.

5. Conclusiones y Trabajos Futuros

Se ha demostrado la viabilidad operativa de una arquitectura híbrida de control para S-CDPRs deportivos. Este sistema subactuado (4 actuadores unilaterales para 6 grados de libertad) presenta una elevada complejidad debido al fuerte acoplamiento dinámico y a la inestabilidad pendular, desafíos resueltos acoplando un solucionador NNLS ponderado en bajo nivel con un planificador por Servocontrol Visual.

Asimismo, la simulación en Gazebo enfrentó severas limitaciones de hardware por la alta carga computacional concurrente (físicas, optimización e inferencia), operando con un *Real-Time Factor* ≈ 0.5 . Garantizar la estabilidad de la planta, el determinismo y la convergencia del NNLS bajo este ralentizamiento demuestra empíricamente la robustez de la arquitectura, confirmando en alta fidelidad el mantenimiento estricto de tensiones positivas, estabilidad rotacional y un encuadre fluido.

Destaca también la eficiencia energética del sistema frente a manipuladores rígidos tradicionales; al prescindir de eslabones macizos, la potencia se destina exclusivamente a acelerar la masa útil de la cámara (25 kg), eliminando el lastre estructural. Además, el algoritmo NNLS evita el antagonismo redundante entre cabrestantes, minimizando la norma global de fuerzas y reduciendo drásticamente el par demandado y el consumo eléctrico.

Como trabajo futuro, se plantea el despliegue físico (*Sim-to-Real*) en hardware embebido como placas NVIDIA Jetson acopladas a controladores industriales, enfrentando los algoritmos al ruido de sensado y latencias de red reales. Adicionalmente, el modelo dinámico se expandirá con perturbaciones aerodinámicas y fricción en poleas, mientras que la capa de IA dotará de libertad a la cota vertical (Z) para permitir

maniobras tridimensionales complejas como vuelos rasantes y picados.

Agradecimientos

Agradecer a mis amigos y mi familia por estar siempre cuando los he necesitado y en especial a mi Tutor del TFG, Francisco Rodríguez Rubio por darme la oportunidad de asistir a las Jornadas de Automática.

Referencias

- Bosscher, P., Rieffel, A. T., Valner, P. R., & Ebert-Uphoff, I. (2006). Cable-suspended robotic contour crafting system. *Automation in Construction*, 17(1), 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.02.011>
- Coulter, R. C. (1992). *Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm*. Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA.
- Irvine, H. M. (1981). *Cable structures*. MIT press.
- Job, J., et al. (2022). Workspace analysis of an underconstrained cable-driven parallel robot with four cables. *Construction Robotics*, 6, 109-119. <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00076-1>
- Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). *YOLO by Ultralytics*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3908559>
- Khosravi, M. A., & Taghirad, H. D. (2014). Dynamic analysis and control of cable-driven robots with elastic cables. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 38(4), 547-559.
- Kozak, K., et al. (2006). Static analysis of cable-driven manipulators with non-negligible cable mass. *IEEE Transactions on Robotics*. <https://doi.org/10.1109/TRO.2006.870659>
- Pott, A. (2018). *Cable-driven parallel robots: theory and application*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76138-1>
- Tachia, M. J., & Maloletov, A. V. (2025). Applications of dynamic models for cable-driven parallel robots: A comprehensive review. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. <https://doi.org/10.20537/nd251101>
- Zake, Z., Chaumette, F., Pedemonte, N., & Caro, S. (2019). Vision-based control and stability analysis of a cable-driven parallel robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), 1029-1036. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2893611>
- Zhang, Z., Shao, Z., You, Z., Tang, X., Zi, B., Yang, G., ... & Caro, S. (2022). State-of-the-art on theories and applications of cable-driven parallel robots. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 17(3), 37. <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0693-3>