

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA EQUILIBRIO ESTÁTICO DE UN EXOESQUELETO DE MIEMBROS INFERIORES

Resumen

Este trabajo considera un exoesqueleto de miembros inferiores portando un maniquí; se presenta el diseño e implementación de una estrategia de control para equilibrio estático del exoesqueleto-maniquí, consistente en un control distribuido para posicionar las articulaciones y un control centralizado para el equilibrio. Para el control de posicionamiento de las articulaciones actuadas se diseñaron controladores PID, este control permite al exoesqueleto seguir trayectorias de posición preestablecidas por el control centralizado. El control de equilibrio estático manipula las articulaciones para compensar la desviación horizontal del centro de masa del sistema.

Introducción

Para los alcances del proyecto, se diseña e implementa una ley de control para equilibrio estático en el plano sagital para un exoesqueleto de miembros inferiores actuado en cadera y rodilla, con torso y pies de apoyo.



Fig. 1. Exoesqueleto de Miembros Inferiores.

La estrategia de control propuesta es distribuida para el control de posición en cada una de las articulaciones; luego se manipula la posición de las articulaciones bajo un controlador centralizado para lograr el equilibrio estático.

Control de Posición en las Articulaciones

Por identificación se calcula un modelo (1) que define la dinámica equivalente en lazo cerrado del servomotor, controlador de corriente y filtrado de medición; el periodo de muestreo de este control es de 125µs.

$$G_{eqi} = \frac{1}{0.2552(10^{-3})s + 1} \quad (1)$$

Para el diseño del controlador PI de velocidad (2) se usó el criterio de simetría óptima:

$$G_{cv} = 2000 \left(\frac{1 + 0.025s}{s} \right) = 50 + \frac{2000}{s} \quad (2)$$

Experimentalmente y de manera similar al control de velocidad, se obtuvo una constante de tiempo de integración velocidad-posición de $0.6 \frac{rpm-seg}{\%}$. Así el modelo para el lazo abierto de posición es:

$$\frac{\theta}{i_{ref}} = G_{pos} = \frac{10884.9161(s + 40)}{s(s + 3746)(s + 107.8)(s + 64.71)} \quad (3)$$

Para el diseño del controlador de posición, se ajustó la ganancia para obtener un margen de fase de 86.9° , un tiempo de estabilización de 130ms y un error de estado estacionario de 0° . La figura 2 y 3 muestran las respuestas experimentales del control de velocidad y posición.

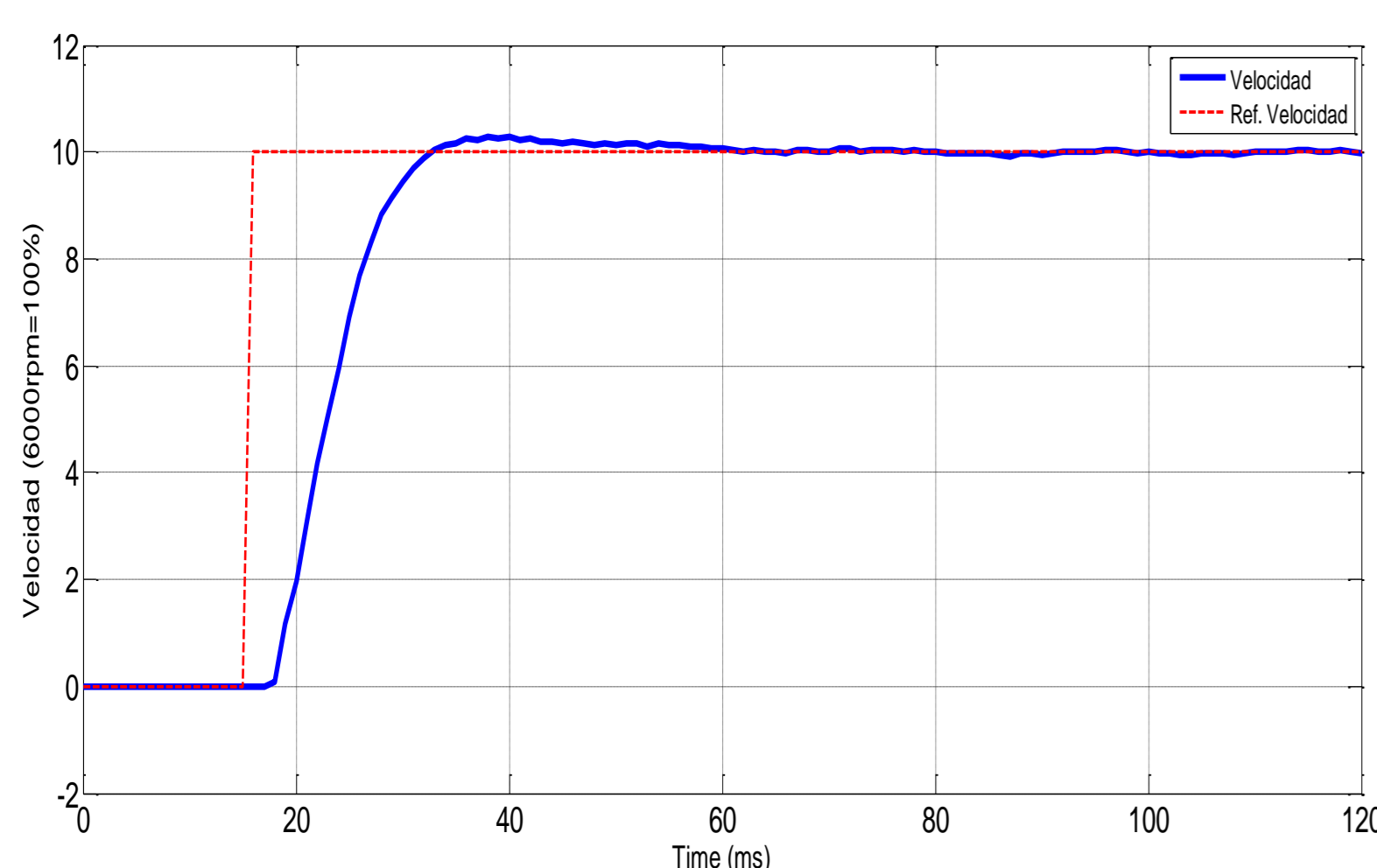


Fig. 2. Implementación del controlador PI de velocidad; respuesta ante un escalón del 10% de la Velocidad máx..(60rpm máx.).

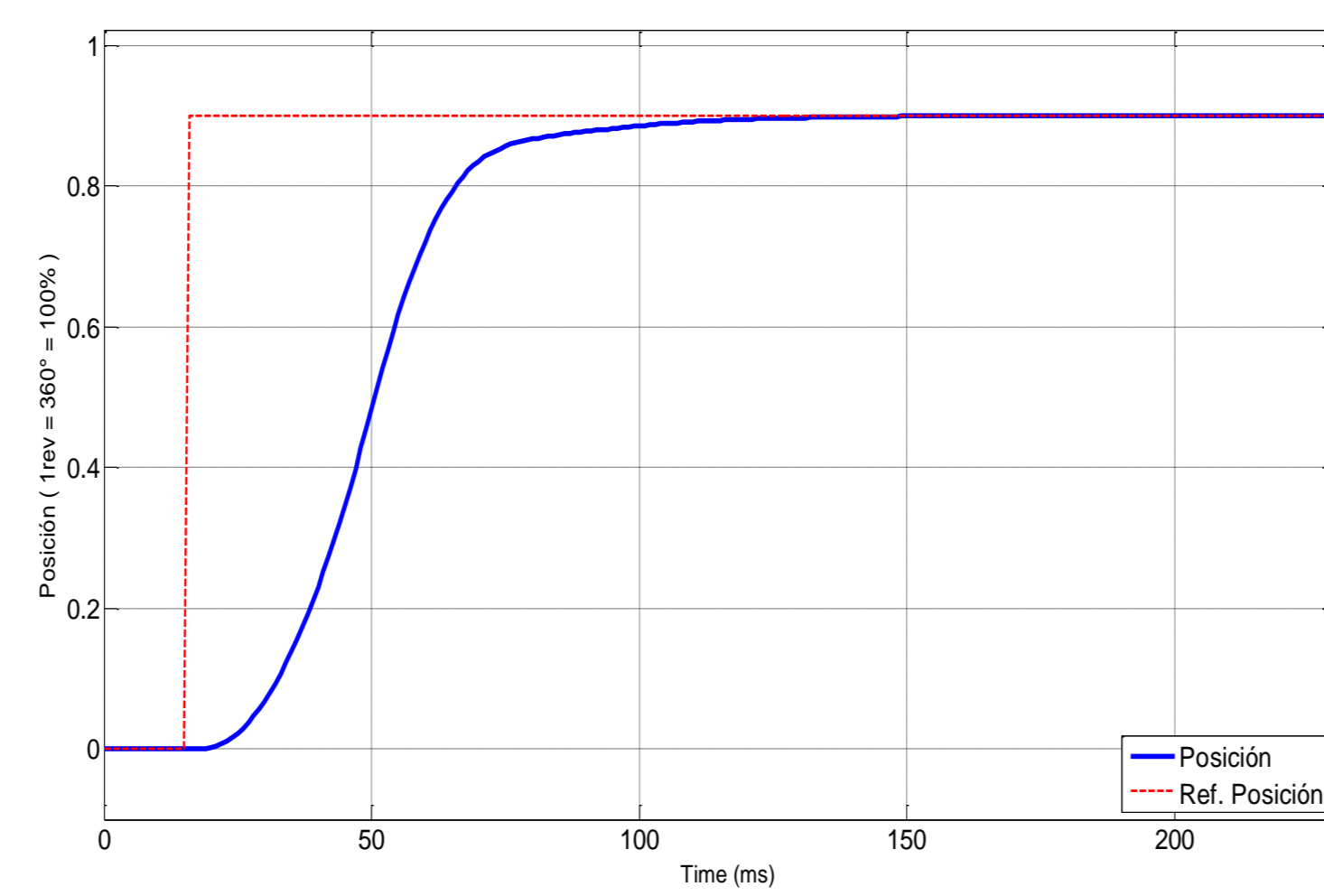


Fig. 3. Implementación del Controlador P de posición; respuesta ante un escalón del 10% (100%=360°=1rev).

Problema de Control de Equilibrio

Para que el sistema exoesqueleto-maniquí consiga estar en bípedo estáticamente en el plano sagital, se necesita lograr que el COM se encuentre siempre proyectado verticalmente sobre el polígono de soporte; para ello se actúa en cadera y se usan las medidas de posición angular de los tobillos y cadera para el diseño de la ley de control de equilibrio estático, siendo la referencia la condición de equilibrio natural, la cual puede ser totalmente en bípedo ó inclinado.

Implementación del Sistema de Control

Se utiliza el modelo del péndulo invertido para realizar el cálculo de la desviación del Centro de Masa del sistema total:

$$X = [RP \sin(\alpha)] + [T_{cm} \sin(\beta + \alpha)] \quad (4)$$

Para la implementación se debe parametrizar la ley de control obtenida con las longitudes de (4) y los límites físicos o mecánicos de la estructura y los motores.

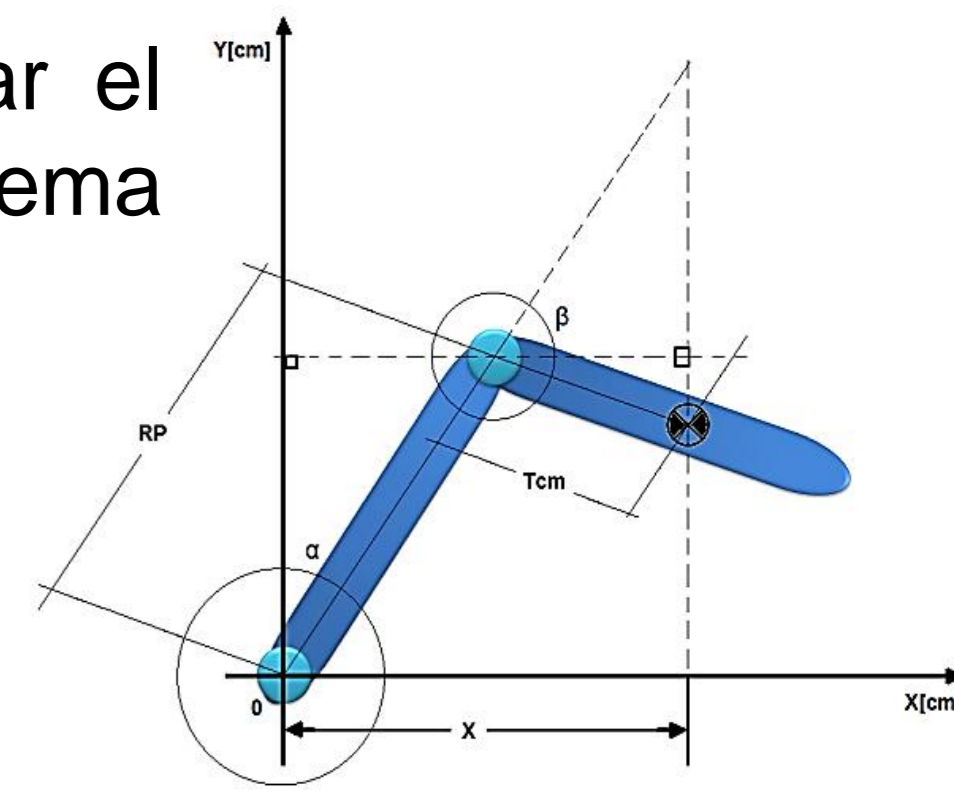


Fig. 4. Modelo de la desviación del centro de masa del sistema.

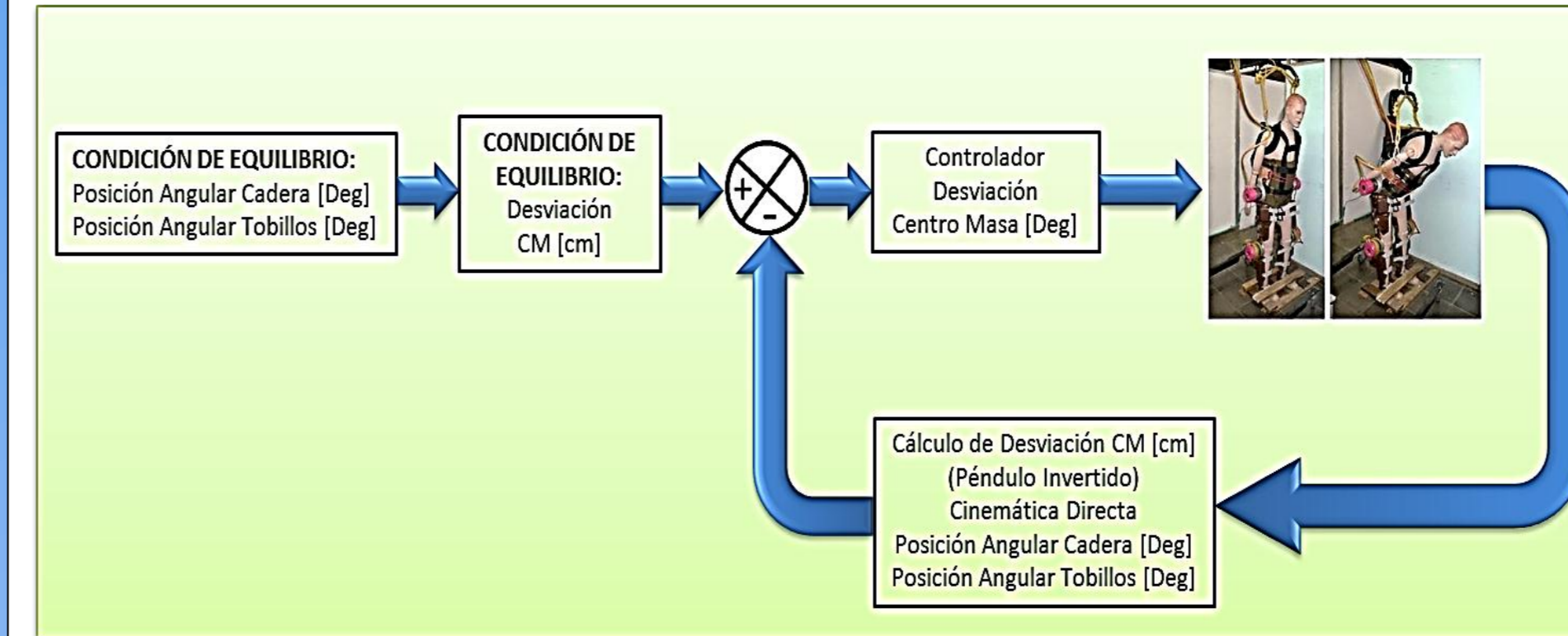


Fig. 5. Estrategia de control para equilibrio estático.

Como el control es digital, se define experimentalmente un tiempo de muestreo de 7ms. El sistema se debe inicializar de acuerdo a la referencia del equilibrio natural.

Desempeño del Sistema de Controlado

Evolución libre del sistema: En este estado la señal controlada, manipulada y medida están en el punto de operación deseado como se observa en los primeros segundos de las figuras 6, 7 y 8; el sistema no se sometió intencionalmente a ningún nivel de disturbio en la dirección del plano sagital y el control mantuvo erguido al exoesqueleto con el maniquí.

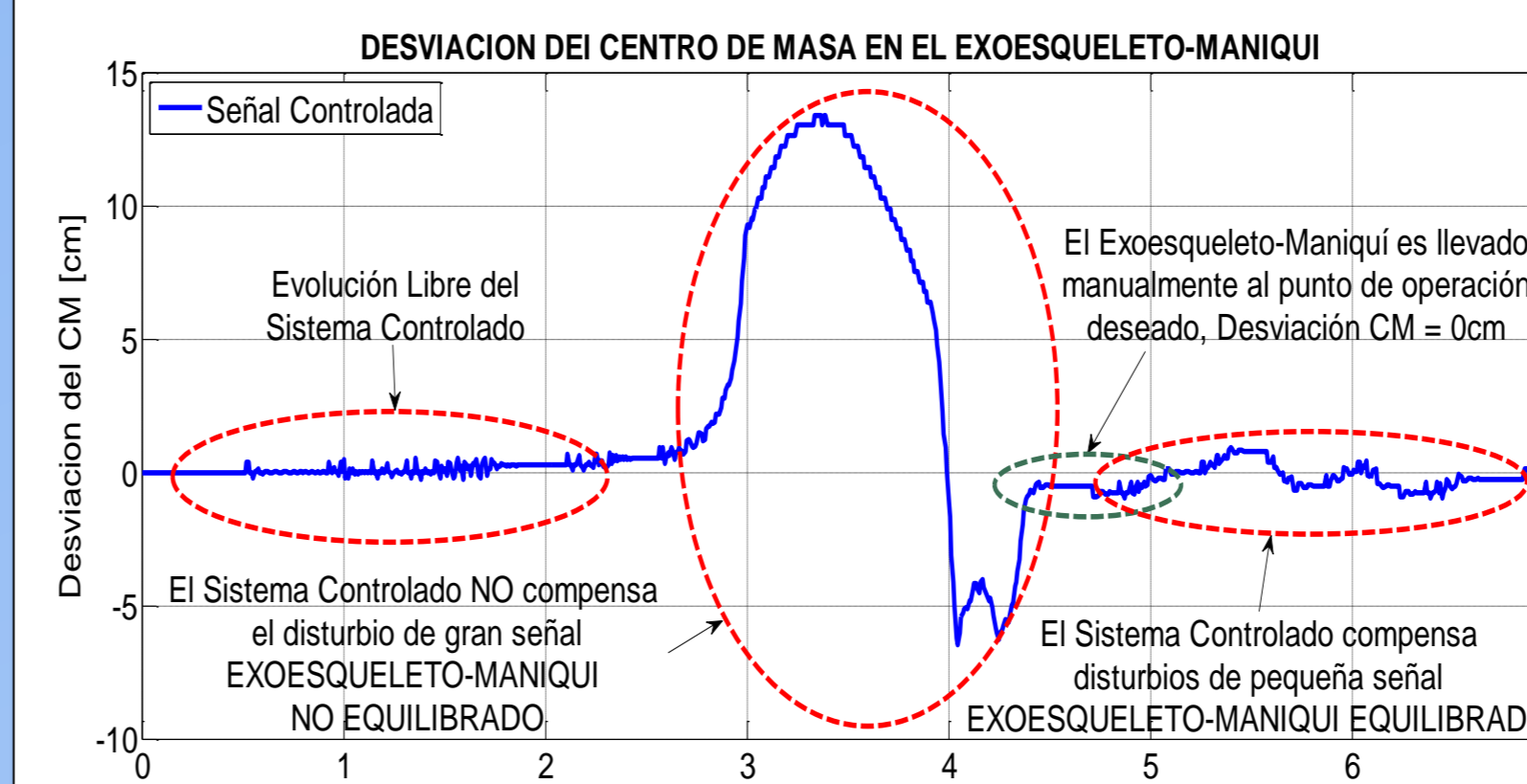


Fig. 6. Señal controlada - desviación del COM global.

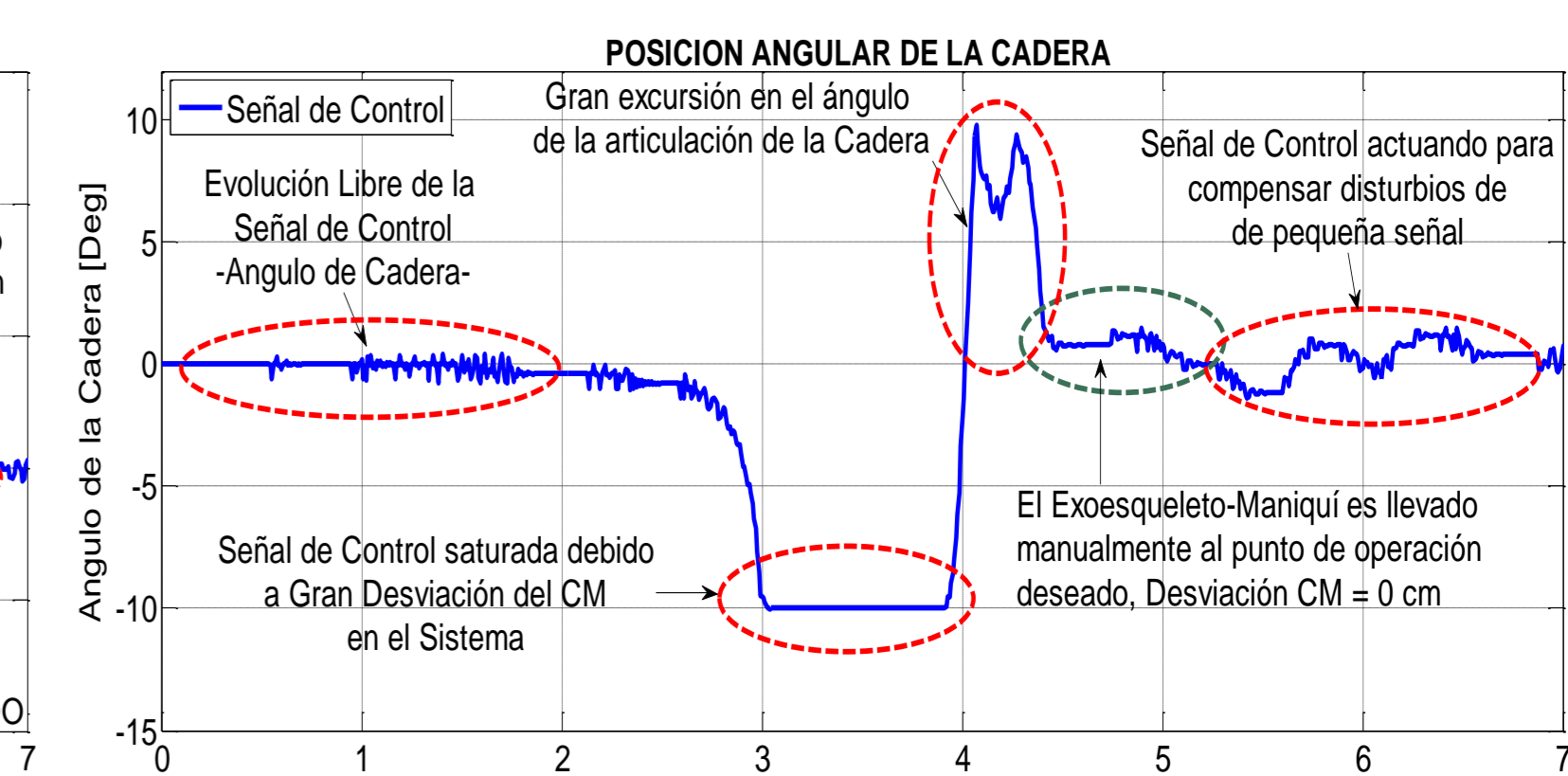


Fig. 7. Señal de control - posición angular de la cadera.

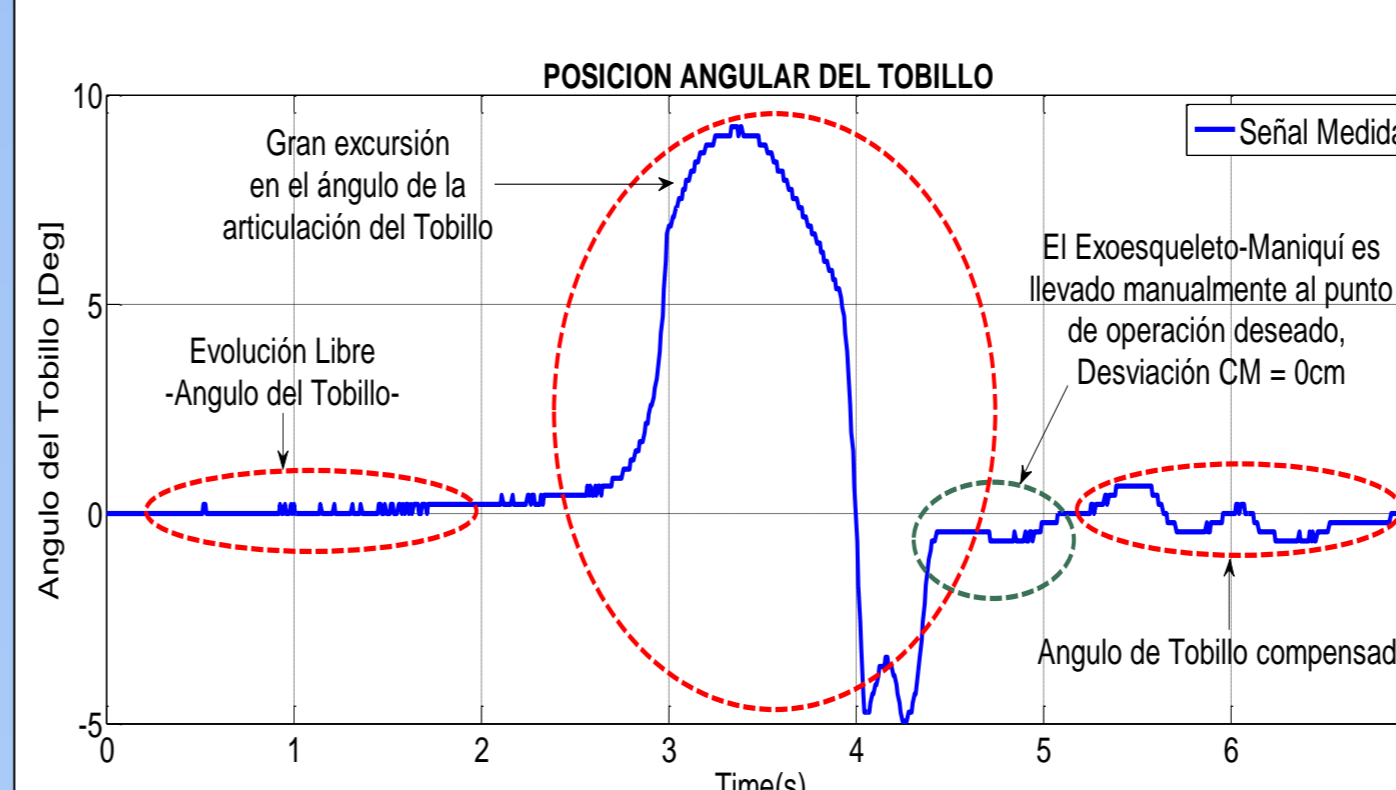


Fig. 8. Señal medida - posición angular del tobillo.

Disturbios de gran desviación: El sistema exoesqueleto-maniquí se sometió a un gran disturbio en la dirección positiva del plano sagital ($t = 2.5\text{seg}$). Hay una gran desviación del COM y del ángulo del tobillo como se observa figura 6 y 8; el control genera una fuerte acción sobre la cadera hasta la saturación como se muestra en la figura 7 y se generó la caída del exoesqueleto-maniquí.

Disturbios de pequeña señal: Luego de caer, el exoesqueleto-maniquí fue llevado manualmente cerca del equilibrio, y el sistema de control vuelve a mantener el equilibrio ($t = 5\text{seg}$).

Conclusiones y Trabajos Futuros

Se observó que el controlador no lineal cinemático para equilibrio estático genera una región de atracción pequeña de $\pm 2^\circ$ alrededor del punto de operación deseado. Si bien logra estabilizar la planta inestable, el comportamiento en red cerrada en esta región es sub-amortiguado. Lo anterior muestra la necesidad de considerar modelos dinámicos que permitan inyectar amortiguación al sistema controlado, con ello se espera aumentar la región de atracción del sistema controlado.

Trabajos Futuros: Mejora del acondicionamiento de señal para la medida de ángulo del tobillo, actualización del sistema embebido para la implementación de la estrategia de control, diseño de una ley de control donde se actúe en las rodillas, generación de trayectorias de pasos para la compensación de disturbios de gran desviación y el cálculo del centro de masa global con base en la medida de los centros de presión en los pies del exoesqueleto.