

# Actuadores De Rigidez Variable En Dispositivos Robóticos De Tipo Exoesqueleto Para Entrenamiento De Extremidad Superior

Jhon Alexander Rodriguez-Torres<sup>1</sup>, Paola Andrea Niño-Suarez<sup>2</sup>, Mauricio Felipe Mauledoux-Monroy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, México. Email: jhonrt06@gmail.com

<sup>2</sup>ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, México. Email: pninos@ipn.mx

<sup>3</sup>DAVINCCI, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Email: mauricio.mauledoux@unimilitar.edu.co

## Resumen

Este documento presenta las propiedades y características esenciales que deben poseer los dispositivos de entrenamiento o rehabilitación, con las características descritas se plantea un sistema de actuación el cual consiste en elementos elásticos que permiten un desacople de impedancias mecánicas, con el fin de mejorar la seguridad intrínseca de los sistemas de actuación. Por otro lado, presenta una configuración de actuadores de rigidez variable, su modelo matemático, un control activo de bajo nivel, la simulación de cada etapa del sistema, la implementación del prototipo de actuación y la implementación del sistema junto al control de posición desarrollado. Todo relacionado a incentivar la investigación en el campo de actuadores de rigidez variable en dispositivos de entrenamiento o rehabilitación motora, ya a parte de mejorar la seguridad del dispositivo, permite realizar diversos tipos de entrenamiento.

**Palabras clave:** Actuadores de rigidez variable; control activo; control pasivo; resortes, entrenamiento.

## Abstract

This paper presents the essential properties and characteristics that training or rehabilitation devices must have, with the described characteristics, an actuation system is proposed which consists of elastic elements that allow a decoupling of mechanical impedances, in order to improve the intrinsic safety of the actuation systems. On the other hand, it presents a configuration of variable stiffness actuators, its mathematical model, a low-level active control, the simulation of each stage of the system, the implementation of the actuation prototype and the implementation of the system together with the developed position control. Everything related to encourage research in the field of variable stiffness actuators in training devices or motor rehabilitation, and besides improving the safety of the device, it allows to perform various types of training.

**Keywords:** Variable stiffness actuator; active control; passive control; springs; training movements.

## 1. Introducción

Los dispositivos robóticos utilizados para rehabilitación o entrenamiento de extremidad superior poseen algunas desventajas como, estructuras complejas, pobre capacidad de retroceso (*No Backdrivable*), pobre adaptabilidad (*No compliance*) y alta impedancia mecánica, [1]. La capacidad de retroceso (*Backdrivable*) y de adaptabilidad (*Compliance*) tiene que ver directamente con los actuadores utilizados. Un actuador no obediente y sin capacidad de retroceso, más conocido como actuador

rígido puede moverse a una posición específica o seguir una trayectoria predefinida, pero una vez que el actuador rígido alcanza una posición, permanecerá en esta, dentro de los límites de fuerza del actuador, independientemente de las fuerzas externas que puedan actuar sobre este, [2]. Un actuador adaptable o (*Compliance*) en inglés, permite desviaciones de su posición de equilibrio, teniendo en cuenta la fuerza externa aplicada. La posición de equilibrio de un actuador adaptable se define como la posición en la cual el actuador genera fuerza o par cero.

Los actuadores rígidos tienen controles activos de fuerza que llevan a cero las fuerzas de interacción y permiten que el dispositivo robótico se mueva con el usuario, [3]. Sin embargo, este enfoque tiene un ancho de banda limitado que evita movimientos dinámicos y puede fallar a la hora de absorber las fuerzas de impacto o perturbaciones externas, como, movimientos involuntarios del paciente, [4], [5]. Por otro lado, los actuadores de rigidez variable poseen un elemento elástico que conecta el motor principal a la carga, esto permite variar la rigidez intrínseca del actuador con el fin de mejorar el rendimiento dinámico. El elemento elástico que poseen los actuadores de rigidez variable permite desacoplar la impedancia mecánica del motor principal con la carga y así mejorar la seguridad a la hora de responder ante fuerzas externas o perturbaciones en las trayectorias de entrenamiento o rehabilitación predefinidas.

Por otro lado, utilizar actuadores de rigidez variable en dispositivos robóticos de entrenamiento para extremidad superior, permite realizar diferentes tipos de entrenamiento como, asistido, correctivo y resistivo con un solo dispositivo al variar la rigidez del sistema, y en cualquier entrenamiento el elemento elástico desacopla la impedancia mecánica del motor principal con la carga de ser necesario, mejorando la seguridad de interacción del dispositivo con el usuario, [6].

## 2. Métodos

En esta sección se describe el modelo matemático de un actuador de rigidez variable en serie, con las fuerzas y geometrías que lo componen. También se presentan los procedimientos para obtener un control de bajo nivel en tiempo discreto con el fin de implementar las ecuaciones en diferencia que representa este control en una tarjeta de adquisición de datos. Lo anterior con el fin de validar el funcionamiento del control pasivo y activo que actúa sobre este sistema

### 2.1. Modelo y control matemático de un actuador de rigidez variable en serie.

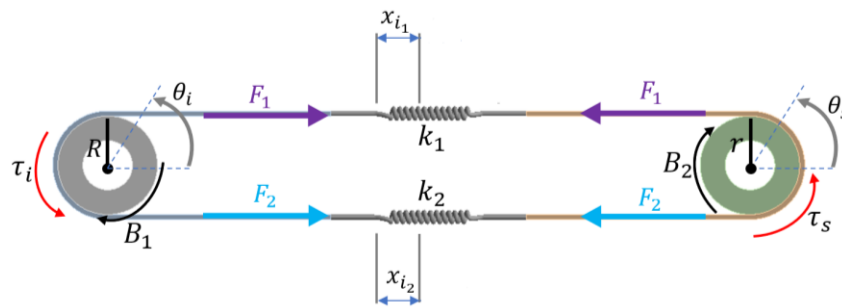
Una de las configuraciones comunes de los actuadores de rigidez variable se observa en la **Figura 1** y está conformada por un elemento elástico en serie con un actuador principal rígido. Esta configuración ha sido seleccionada para obtener su modelo matemático y verificarlo con un prototipo de laboratorio. Debido a que los elementos elásticos solo intervendrán cuando el sistema se someta a una fuerza externa, el actuador de rigidez variable en esta configuración se puede analizar como un sistema de transmisión (polea-correa). Tal que, la posición angular, la velocidad angular y el torque de salida estarán relacionados con las variables de entrada posición angular, velocidad angular y torque por medio de un radio de transmisión  $n$ , el cual se calcula con los radios de la polea de entrada y polea de salida, ecuación (1).

$$n = \frac{R}{r} = \frac{\theta_i}{\theta_s} \quad (1)$$

Entonces el torque de salida del actuador de rigidez variable en serie depende de la relación de transmisión de las poleas  $n$ , ecuación (1). Para este trabajo se utilizaron dos poleas con el mismo radio,  $R = r$ , por lo tanto  $n = 1$ . Por lo anterior, se puede afirmar que el torque de entrada es igual al torque de salida, ecuación (2)..

$$n\tau_i = \tau_s \quad (2)$$

Para obtener un modelo que permita relacionar el torque de entrada con el comportamiento dinámico en la polea de salida, se debe obtener la expresión del torque de entrada y el torque de salida, ecuación (3). Las fuerzas generadas por el resorte 1 y 2 se describen en las ecuaciones (4) y (5)



**Figura 1.** Actuador de rigidez variable con parámetros torque de entrada  $\tau_i$ , radio polea de entrada  $R$ , ángulo de entrada  $\theta_i$ , fuerza de los elementos elásticos  $F_i$ , constantes de rigidez  $k_1$  y  $k_2$ , deformación de los elementos elásticos  $x_{i1}$  y  $x_{i2}$ , radio de polea de salida  $r$ , ángulo de salida  $\theta_s$ , torque de salida  $\tau_s$ , viscosidad de la polea con el eje de rotación  $B_i$ . Fuente: elaboración propia.

$$\tau_{P_i} = RF_1 - RF_2 - B_1\dot{\theta}_i + \tau_i \quad (3)$$

$$F_1 = K_1R\theta_i \quad (4)$$

$$F_2 = K_2R\theta_i \quad (5)$$

Reemplazando la ecuación (4) y (5) en la ecuación (3), se obtiene la expresión para torque de la polea de entrada  $P_i$ , ecuación (6).

$$\tau_{P_i} = R^2\theta_i(K_1 - K_2) - B_1\dot{\theta}_i + \tau_i \quad (6)$$

Se realiza el procedimiento anterior para obtener la expresión del torque de la polea de salida  $P_s$ , ecuación (7), con las fuerzas dadas en las ecuaciones (8) y (9).

$$\tau_{P_s} = -RF_1 + RF_2 - B_2\dot{\theta}_s \quad (7)$$

$$F_1 = K_1R\theta_s \quad (8)$$

$$F_2 = K_2R\theta_s \quad (9)$$

Reemplazando la ecuación (7) y (8) en la ecuación (9), se obtiene la expresión para torque de la polea de salida.

$$\tau_{P_s} = R^2\theta_s(K_2 - K_1) - B_2\dot{\theta}_s \quad (10)$$

Con la expresión para el torque de entrada y el torque de salida del actuador de rigidez variable analizado se igualan las ecuaciones (6) y (10), y como la relación de transmisión es  $n = 1$ , se establece que  $\theta_i = \theta_s$ .

$$\begin{aligned} R^2\theta_s(K_2 - K_1) - B_2\dot{\theta}_s = \\ R^2\theta_i(K_1 - K_2) - B_1\dot{\theta}_i + T_i \end{aligned} \quad (11)$$

Despejando  $\tau_i$  de la ecuación (11) se obtiene la ecuación (12), la cual determina el comportamiento dinámico del actuador teniendo en cuenta el torque de entrada  $T_i$ , la rigidez de los elementos elásticos  $K_1, K_2$  y las fricciones viscosas en los ejes del actuador de rigidez variable,  $B_1, B_2$ .

$$T_i(t) = 2R^2\theta_s(K_2 - K_1) + \dot{\theta}_s(B_2 - B_1) \quad (12)$$

Si los elementos elásticos del actuador de rigidez variable se encuentran en equilibrio o tienen la misma rigidez significa que el sistema no está sometido de perturbaciones o fuerzas externas ajenas al movimiento del sistema. Lo anterior permite determinar que el torque de salida del actuador debe ser igual al torque

deseado, más la dinámica ejercida por la diferencia de viscosidades del actuador de rigidez variable.

Tabla 1. Parámetros físicos del actuador de rigidez variable.

Parametros del actuador de rigidez variable	
$K_1$	6.55 N.m
$K_2$	6.55 N.m
$B_1$	0.5 mN.m/(rad/s)
$B_2$	30 mN.m/(rad/s)

## 2.2. Control de posición para el actuador de rigidez variable en serie

Con el fin de validar la dinámica del actuador de rigidez variable se plantea un control de posición. A partir de la ecuación (12) se realiza el cambio de tiempo ( $t$ ) a dominio complejo ( $s$ ) utilizando la transformada de Laplace, dando como resultado la función de transferencia presentada en la ecuación (13). Reemplazando los valores de los parametros dados en la Tabla 1, se obtiene la función de transferencia de primer orden de la ecuación (14),

$$\frac{\theta_s(s)}{T_i(s)} = \frac{1}{s(B_2 - B_1) - 2R^2(K_2 - K_1)} \quad (13)$$

$$\frac{\theta_s(s)}{T_i(s)} = \frac{1}{s(0.05)} \quad (14)$$

Cuando el sistema no presenta fuerzas externas el actuador de rigidez variable tiene un error de posición finito debido a las viscosidades. Aunque posee un integrador puro, se diseña un controlador activo de tipo PI discreto, el cual reduce el error de posición a cero. Este controlador responde ante perturbaciones externas, inicialmente para reducir el tiempo y el error producido por la perturbación misma. Los criterios de diseño iniciales para el control de sistema son los siguientes: Se establece un tiempo de establecimiento de 1 segundo, con el fin de poder observar el comportamiento del actuador en todo el proceso de movimiento y un comportamiento amortiguado de 0.9 el cual esta muy cerca de la frontera del circulo unitario en control discreto. La ecuación (15) presenta la función de transferencia del actuador de rigidez variable en dominio discreto ( $z$ ).

$$\frac{\theta_s(k)}{T_i(k)} = \frac{0.6667}{z - 1} \quad (15)$$

La ecuación (15) puede ser escrita en 2 partes con el fin de obtener mediante simulación el comportamiento de la velocidad y la posición. La ecuación (16) presenta en discreto el comportamiento de la velocidad del sistema ante una entrada  $U(k)$  que es la representación del torque de entrada. Por otro, lado la ecuación (17)

permite evaluar el comportamiento de la posición angular de salida dependiendo de la velocidad angular del sistema.

$$\frac{w(k)}{U(k)} = -0.556z^{-1} \quad (16)$$

$$\frac{\theta(k)}{w(k)} = \frac{1}{1 - z^{-1}} \quad (17)$$

A partir de los criterios de diseño del controlador y la función de transferencia en dominio se obtiene la expresión en discreto para el controlador PI, ecuación (18).

$$\frac{U(k)}{e(k)} = \frac{-0.3800 + 0.3511z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (18)$$

Al despejar la señal de control de la ecuación (18), se obtiene la ecuación (19) que representa la ley de control en tiempo discreto.

$$U(k) = -0.3800 e(k) + 0.3511e(k - 1) + U(k - 1) \quad (19)$$

### 2.2.1. Simulación del controlador del actuador de rigidez variable

Se diseñó un experimento para lograr que partir de la expresión de la velocidad y la posición angular del sistema, se obtenga el comportamiento de cada una de las variables del sistema. En la Figura 2, en el bloque de color negro se programó la ley de control discreto dada en la ecuación (19), esta ecuación en diferencias posee un error actual  $e(k)$  el cual sale del comparador y entra directamente al bloque de control, también posee un error anterior  $e(k-1)$  el cual se obtiene al multiplicar el error actual con un retraso  $z^{-1}$  y la señal resultante ingresa al bloque de control, y

finalmente la ecuación en diferencias del control posee un estado anterior de la señal de control  $U(k-1)$  el cual se obtiene al multiplicar la señal de control actual  $U(k)$  con una señal de atraso  $z^{-1}$ .

La ecuación (16) representa el comportamiento de la velocidad angular del sistema de actuación de rigidez variable respecto a la señal de control. Al multiplicar en ambos lados de la ecuación (16) por la entrada  $U(k)$ , se tiene como resultado la ecuación en diferencias (20). En la Figura 2, en el bloque de color azul se programó la ecuación (20), la cual representa la expresión de la velocidad angular del sistema

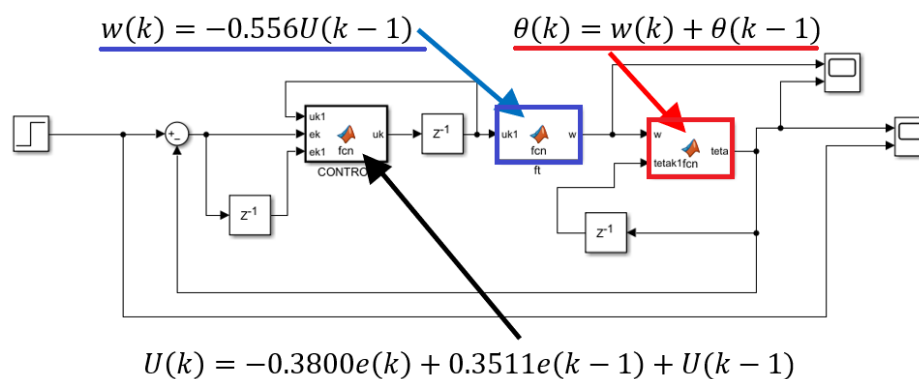
$$w(k) = -0.556 U(k - 1) \quad (20)$$

En el bloque de color rojo se programó la ecuación (21), que expresa el comportamiento de la posición angular actual en función del comportamiento de la velocidad actual y la velocidad anterior. En este caso a la salida del bloque se tiene  $\theta(k)$  la cual se multiplica por un atraso  $z^{-1}$  para obtener la señal de posición angular anterior.

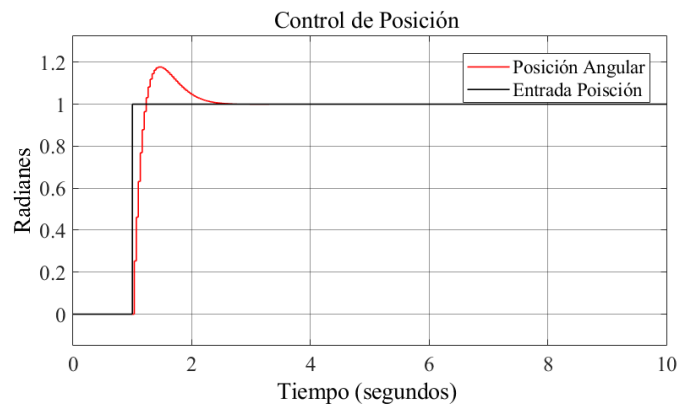
$$\theta(k) = w(k) + \theta(k - 1) \quad (21)$$

Finalmente se realimenta la posición angular al comparador de entrada para calcular el error  $e(k) = \theta_d(k) - \theta_a(k)$ , donde  $\theta_d$  es la posición actual del dispositivo y  $\theta_a(k)$  es la posición en la cual se desea que el sistema se encuentre.

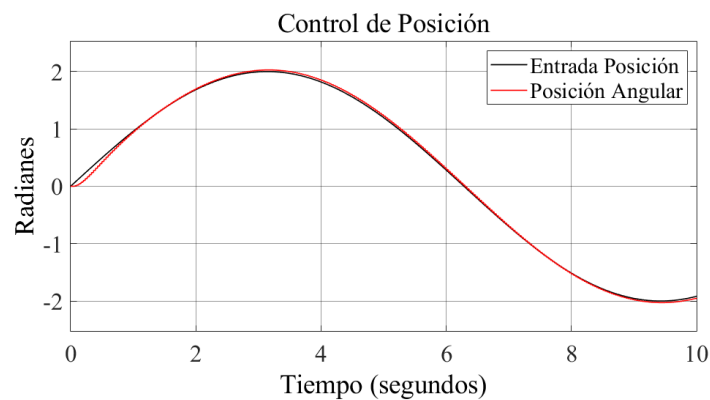
En la Figura 3, se observa el comportamiento de la posición angular “señal roja”, la cual se estabiliza después de 1 segundo con un porcentaje de error menor al 5% según el criterio de diseño. Este sobre amortiguamiento permitirá identificar si el



**Figura 2.** Diagrama en bloques de la simulación del control y función de transferencia del sistema de actuación con rigidez variable. El bloque azul representa la expresión de la velocidad angular, el bloque rojo representa la expresión de la posición angular y el bloque negro representa la expresión del control en ecuaciones en diferencia. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.** Comportamiento de la simulación del control de posición para el actuador de rigidez variable, ante una entrada escalón. La señal de entrada tipo escalón está representada de color negro y la señal de posición angular del sistema está representada de color rojo. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.** Comportamiento de la simulación del control de posición para el actuador de rigidez variable, ante una entrada de tipo  $2 \sin(0.5t)$ . La señal de entrada tipo  $2 \sin(0.5t)$  esta representada de color negro y la señal de salida de posición angular del sistema está representada de color rojo. Fuente: Elaboración propia.

comportamiento del sistema de actuación de rigidez variable real es como el esperado. En la Figura 4, se presenta el comportamiento del sistema de actuación de rigidez variable ante una entrada de posición de tipo sinusoidal  $2 \sin(0.5t)$ . Se observa que la señal de posición angular del actuador de rigidez variable “señal roja” sigue la referencia de posición con un error de posición cero debido al lazo de control implementado.

### 2.2.2. Metodo de implementación del controlador diseñado.

Para implementar el control de posición diseñado se utilizo el software NI LabVIEW para programar la ecuacion (19), y el sistema fisico se conecta a la computadora utilizando una tarjeta DAQ USB Device NI USB-6002 de National Instruments, el cual es un dispositivo USB de E/S multifunción, con 8 entradas analogas a (16 Bits, 50 kS/s), 2 salidas analogas a (5 kS/s/canal), 13 entradas y salidas digitales.

El equipo de computo utilizado posee las siguientes características: 32 GB de RAM, procesador Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU @ 2.40Hz, tarjeta grafica NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti de 4 GB.

El prototipo presentado en la figura 5, consta de un motor principal DYNAMIXEL AX-12A, el cual posee una resolución de  $0.29^\circ$ , Torque nominal de 1.5 [N.m] (a 12 [V], 1.5 [A]) y permite realimentar posición, carga y velocidad, consta de 2 resorte lineales con constantes de elasticidad  $K=6.55$  y  $5$  [cm] de largo, consta de 2 poleas de igual radio manufacturadas en PLA por medio de impresión 3D y un sensor resistivo rotativo RV24YN 209 B502

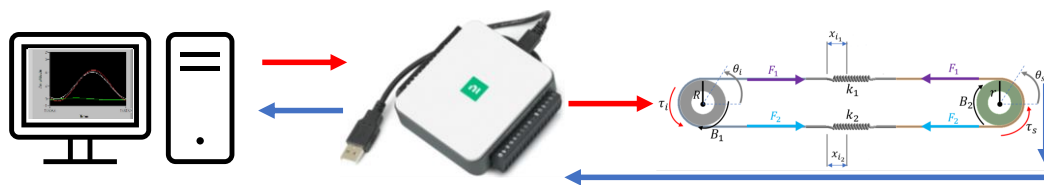
La arquitectura de hardware y software es presentada en la figura 6, donde el equipo de cómputo envía la señal de control y recibe la señal de posición actual de la polea de salida mediante la tarjeta de adquisición de



**Figura 5.** Prototipo del actuador de rigidez variable. Fuente: Elaboración propia

datos, esta tarjeta de adquisición de datos recibe y transforma la información para enviarla al motor DYNAMIXEL el cual transforma la señal de control en un torque de entrada al sistema.

si los elementos elásticos del sistema fallan, ya sea que se deformen o se fracturen, la señal de posición seguirá enviando la misma señal debido al sensor, pero gracias a la configuración del sistema las impedancias



**Figura 6.** Arquitectura de hardware y software. La flecha roja representa la señal de control y la flecha azul representa la señal de posición actual. Fuente: Elaboración propia

### 3. Resultados

Utilizando LabVIEW se diseñó una interfaz que permite observar el comportamiento de la posición y velocidad angular del sistema de actuación, que se presenta en la figura 7. Está compuesta por varias graficas en tiempo real que permiten seguir el comportamiento del sistema controlado.

En el cuadro de color rojo de la figura 7 se observa el comportamiento de la posición angular del dispositivo con respecto a la señal de referencia, la cual tiene un comportamiento similar al evaluado en las simulaciones ya presentadas. La velocidad angular se observa en el cuadro amarillo. La señal del cuadro verde pertenece al comportamiento de la señal de control, la cual está dada en Nm, se observa que tiene un impulso inicial cuando se hace el cambio de referencia de posición, pero esta va disminuyendo a medida que el error en posición tiende a cero. El error de posición se presenta en el cuadro de color azul, donde su comportamiento se puede comparar con las señales de posición angular y la referencia de posición del cuadro rojo, el error tiende a cero a medida que la señal de posición se va estableciendo en su referencia.

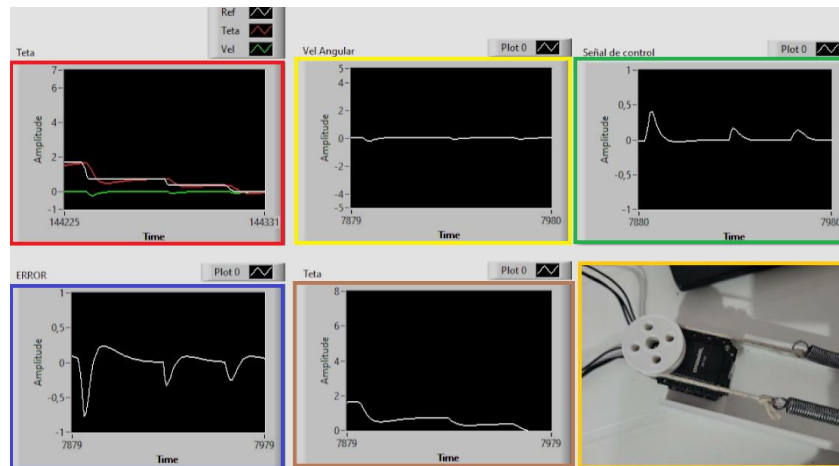
Si los elementos elásticos están en equilibrio, significa que no han tenido ninguna perturbación externa y no se han deformado, con lo cual la señal de posición angular de salida muestra el comportamiento deseado, siguiendo una trayectoria preestablecida. Por otro lado,

mecánicas se desacoplan, esto permite pausar o reiniciar el sistema.

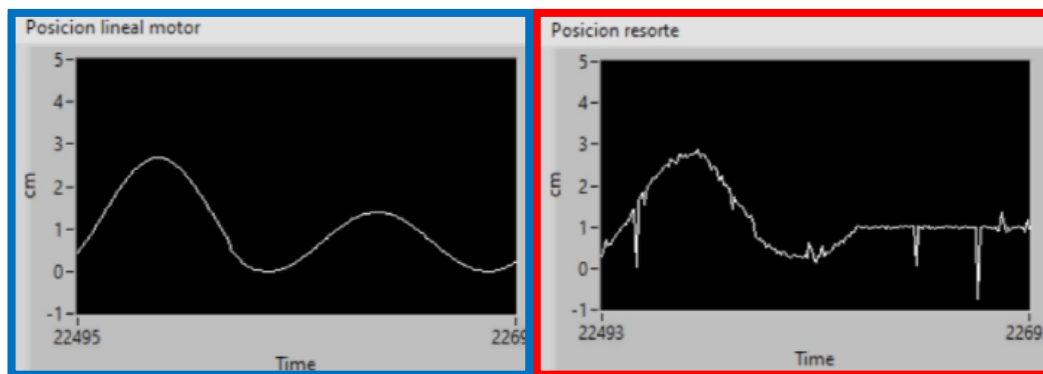
Finalmente se puede observar en la figura 8, el desacople de impedancias de la polea de salida (cuadro rojo) y la polea de entrada en posición lineal (cuadro azul). La señal de entrada perteneciente al motor (cuadro azul) se mide en cm debido a que se pasa de posición angular a posición lineal con el fin de comparar el movimiento deseado de el resorte. La referencia de posición es una señal seno y al cabo de un momento se perturba el eslabón de salida con el fin de que este no se mueva para observar el comportamiento del motor. El motor sigue la referencia de posición mientras que la polea de salida permanece en la posición perturbada, es un ejemplo de como se comporta el mecanismo al desacoplar las impedancias con el fin de no perjudicar el eslabón de salida o el motor que genera el movimiento inicial del sistema.

### 4. Conclusiones

Una de las ventajas observadas en los actuadores de rigidez variable es su rápida respuesta ante perturbaciones externas. Aunque es un sistema que posee un control pasivo y un control activo, los dos sistemas trabajan en conjunto mejorando la seguridad intrínseca de los actuadores, lo que se valida al observar que el sistema elástico permite seguir una trayectoria deseada con una rigidez establecida y desacoplar las impedancias mecánicas en caso de fallo.



**Figura 7.** Interfaz gráfica de la implementación del control de posición para el actuador de rigidez variable. Recuadro rojo: Se presenta el comportamiento de la referencia de posición “señal blanca” posición angular “señal roja”. Recuadro amarillo: Se presenta el comportamiento de la señal de velocidad angular en radianes/segundo. Recuadro verde: Se presenta la señal de control con amplitud en Nm. Recuadro azul: Se presenta la señal de error con amplitud en radianes. Recuadro café: Representa el comportamiento de la posición angular con amplitud en radianes. Recuadro naranja: Presenta el comportamiento del actuador de rigidez variable en tiempo real con el fin de comparar respecto a las señales visualizadas. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8.** Desacople de impedancia mecánica ante una perturbación externa.

De tal manera que un sistema de actuación de este tipo brindaría mayor seguridad en dispositivos de entrenamiento o rehabilitación motora que en su mayoría utilizan actuadores rígidos. Ya que se puede establecer la rigidez del sistema, de manera tal que, si el usuario supera esta rigidez, pueda moverse con libertad sin verse obligado a seguir una trayectoria que pueda afectar su desempeño motor, gracias a las características de (*Backdrivable* y *Compliance*) de este tipo de actuadores.

Adicionalmente, una ventaja de utilizar actuadores de rigidez variable en dispositivos de entrenamiento o rehabilitación es la capacidad de variar el tipo de entrenamiento que se requiere realizar, ya sea asistido,

correctivo o resistivo, logrando todo el proceso de rehabilitación utilizando un solo dispositivo.

## 5. Referencias

- [1] X. Chen, S. Zhang, K. Cao, C. Wei, W. Zhao, and J. Yao, “Development of a Wearable Upper Limb Rehabilitation Robot Based on Reinforced Soft Pneumatic Actuators,” *Chinese J. Mech. Eng.*, vol. 35, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s10033-022-00749-6.
- [2] R. Ham, T. Sugar, B. Vanderborght, K. Hollander, and D. Lefeber, “Compliant actuator designs,” *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 16, no. 3, pp. 81–94, 2009, doi:

- 10.1109/mra.2009.933629.
- [3] J. Ghan, R. Steger, and H. Kazerooni, “Control and system identification for the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX),” *Adv. Robot.*, vol. 20, no. 9, pp. 989–1014, 2006, doi: 10.1163/156855306778394012.
- [4] S. Seok *et al.*, “Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT Cheetah robot,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 1117–1129, 2015, doi: 10.1109/TMECH.2014.2339013.
- [5] H. W. Park, P. M. Wensing, and S. Kim, “High-speed bounding with the MIT Cheetah 2: Control design and experiments,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 36, no. 2, pp. 167–192, 2017, doi: 10.1177/0278364917694244.
- [6] T. Proietti, V. Crocher, A. Roby-Brami, and N. Jarrasse, “Upper-limb robotic exoskeletons for neurorehabilitation: A review on control strategies,” *IEEE Rev. Biomed. Eng.*, vol. 9, no. c, pp. 4–14, 2016, doi: 10.1109/RBME.2016.2552201.