

Capítulo 6

Resultados Experimentales

Este Capítulo se enfoca a los resultados obtenidos experimentalmente en el sistema masa amortiguador resorte. Se efectuaron dos experimentos diferentes, probando cada uno de los algoritmos vistos durante este trabajo. Los experimentos consisten en lo siguiente:

1. El primer experimento consiste en alcanzar una posición dada como referencia en la primera masa, en presencia de una perturbación estática (segunda masa). Este experimento busca comparar la exactitud de los algoritmos.
2. El segundo experimento consiste en causar oscilaciones de ± 2 [cm] de amplitud en la segunda masa, lo cual implica que la primera masa también oscile. Estando el sistema en movimiento, se activa el control mientras continúan las oscilaciones en la segunda masa, buscando que la primera masa consiga llegar a una referencia dada, a pesar de la perturbación dinámica. La finalidad de este experimento, es comparar la robustez de los algoritmos ante perturbaciones más violentas.

6.1. Primer Experimento

Las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3 muestran el comportamiento de la salida del sistema con los distintos algoritmos de control propuestos.

En la Figura 6.1 se aprecia inmediatamente el **sobrepaso** correspondiente al controlador **PID**, mientras que los demás controladores por modos deslizantes aparentemente siguen la trayectoria deseada.

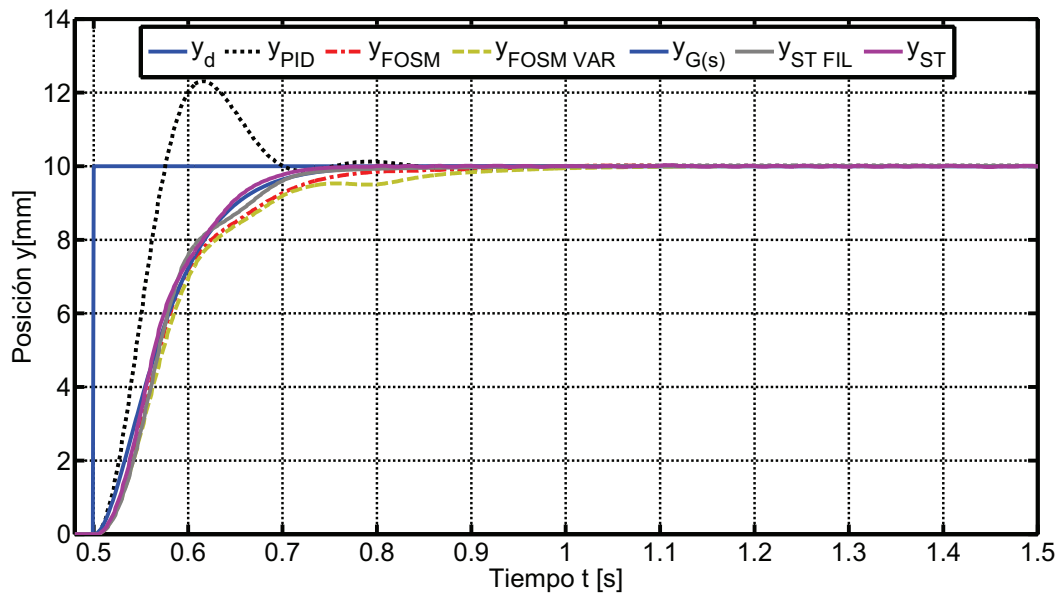


Figura 6.1: Comparación de la posición alcanzada con los distintos algoritmos de control a una referencia dada de 1 [cm]

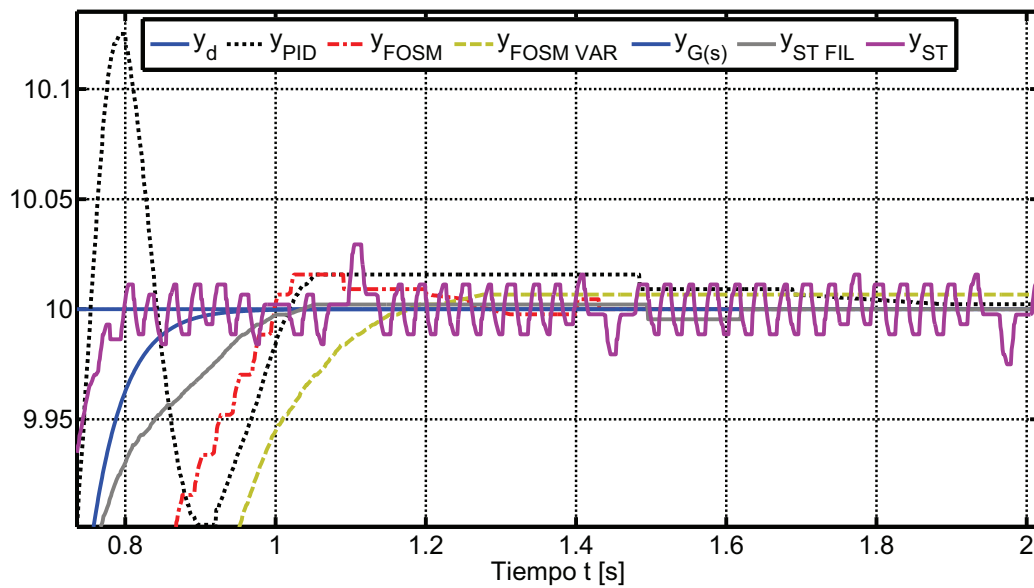


Figura 6.2: Zoom de la posición en la respuesta transitoria

La Figura 6.2 muestra un acercamiento de las respuestas de todas las señales de control. Se puede observar que el controlador **PID oscila** antes de intentar llegar a la referencia final y además presenta un **error** constante en estado permanente. Los demás controladores por modos deslizantes presentan sobrepasos muy pequeños en comparación con el controlador PID, además logran convergencia en tiempo finito (error cero en estado permanente). Solamente el algoritmo Super Twisting sin filtro presenta oscilaciones permanentes, por lo que nunca logra convergencia al valor deseado.

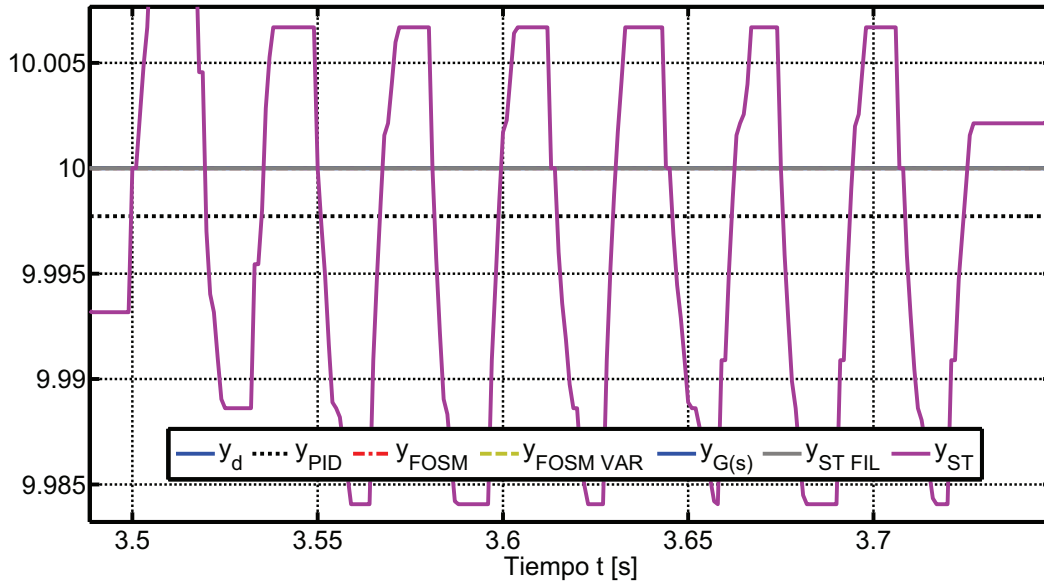


Figura 6.3: Zoom de la posición en el estado permanente

La Figura 6.3 hace un acercamiento en el estado permanente de las respuestas de los controladores. Se puede observar que solamente el controlador **PID** y el **Super Twisting sin filtro** no logran convergencia al valor deseado, sin embargo los controladores restantes por modos deslizantes sí lo consiguen.

El comportamiento del error $e = y_d - d$ se muestra en las Figuras 6.4 y 6.5. Nuevamente se puede apreciar que el controlador PID y el Super Twisting sin filtro, no consiguen llegar a error **cero** en estado permanente.

La estimación de las velocidades del sistema con los distintos algoritmos de control se observa en la Figura 6.6. Todas las velocidades logran acentarse en cero cuando el sistema ha llegado a la posición final, sin embargo, el Super Twisting sin filtro no logra quedarse “quieto”, esto es por su naturaleza de responder súbitamente a cualquier perturbación. Se puede decir que está en alerta todo el tiempo.

La Figura 6.7 presenta un acercamiento cuando ya se ha logrado llegar a la posición final (velocidad = 0). Sin embargo, el Super Twisting sin filtro presenta oscilaciones que se heredan a la señal de control u , evitando que el sistema converja a la posición final.

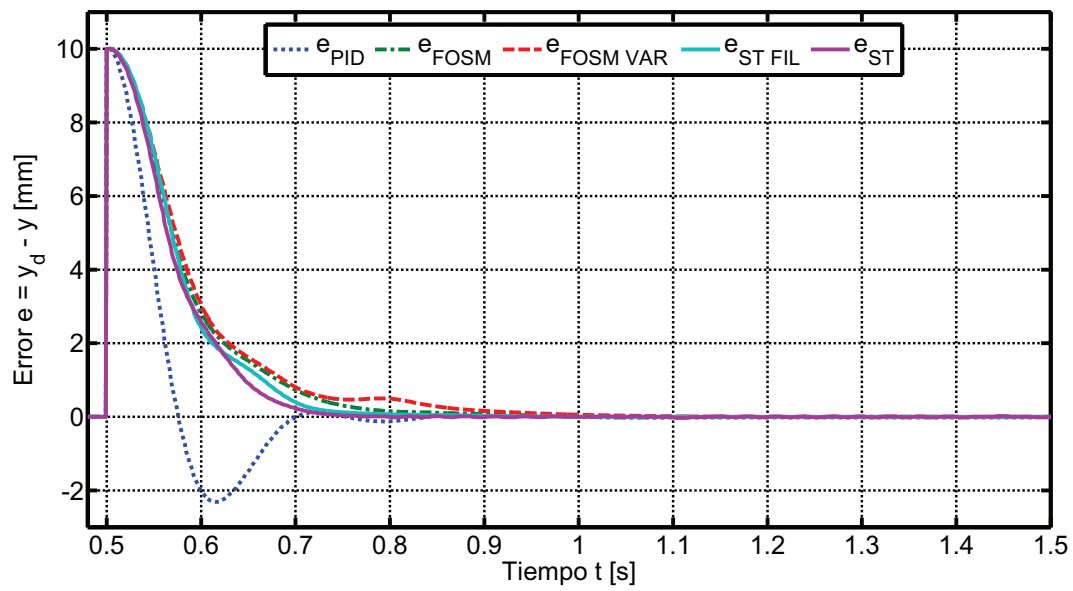


Figura 6.4: Error e

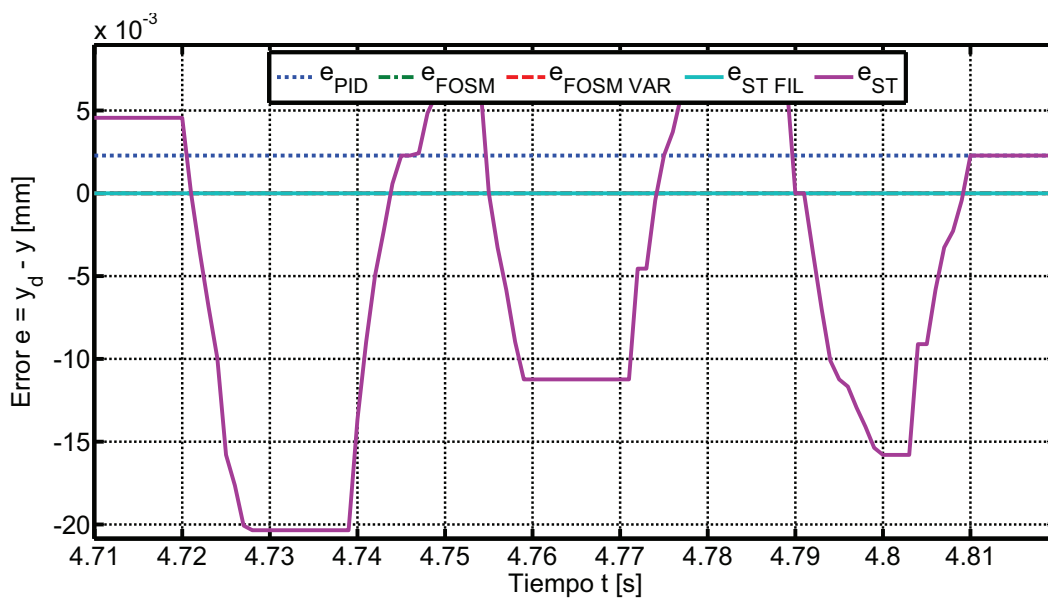


Figura 6.5: Zoom Error e

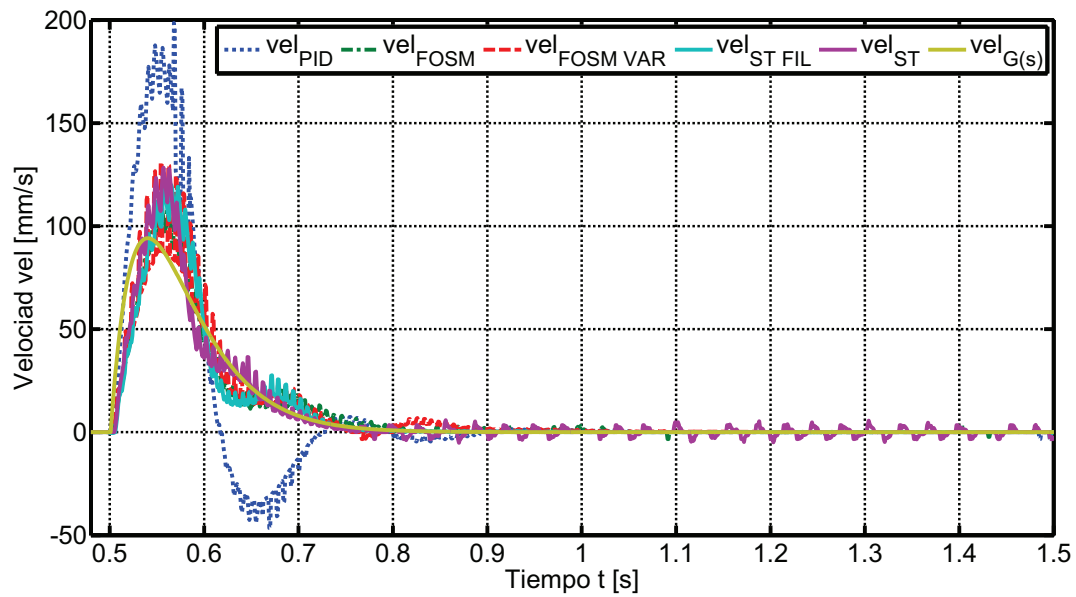


Figura 6.6: Velocidades del sistema

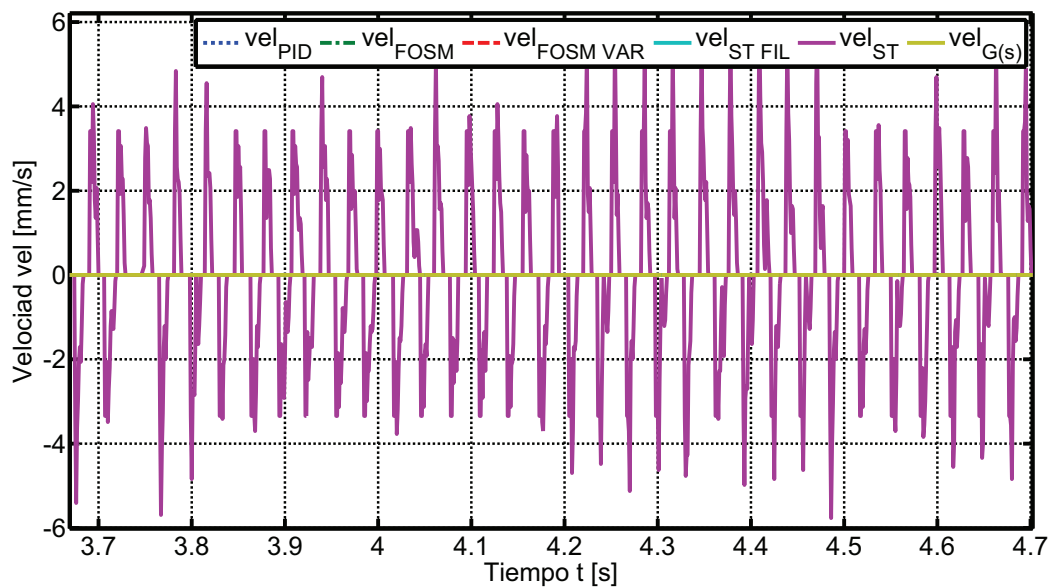


Figura 6.7: Zoom de las velocidades del sistema

Las señales del control v se muestran en las Figuras 6.8 y 6.9.

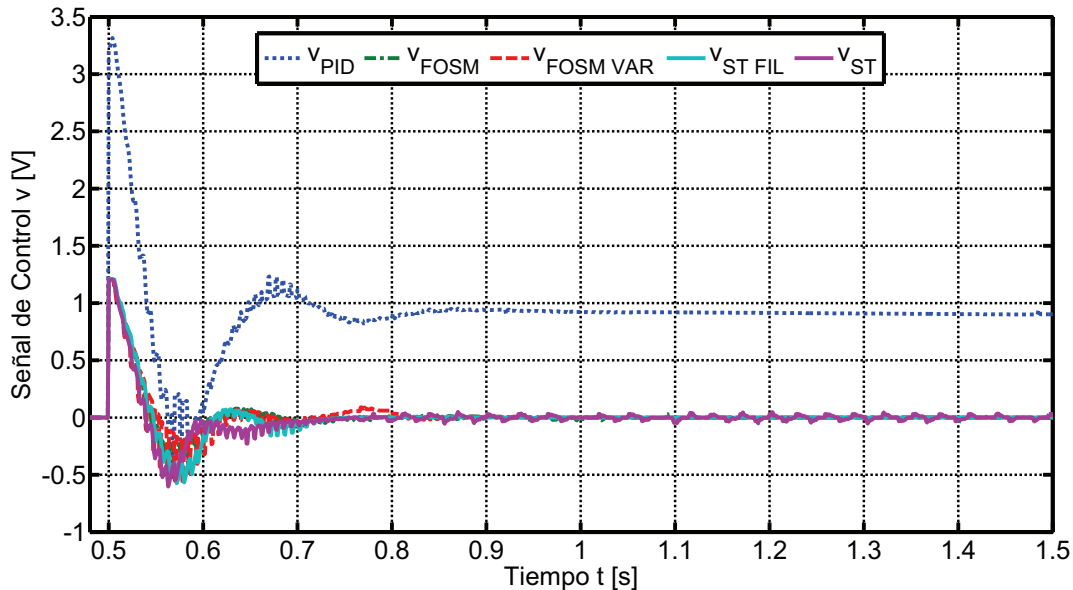


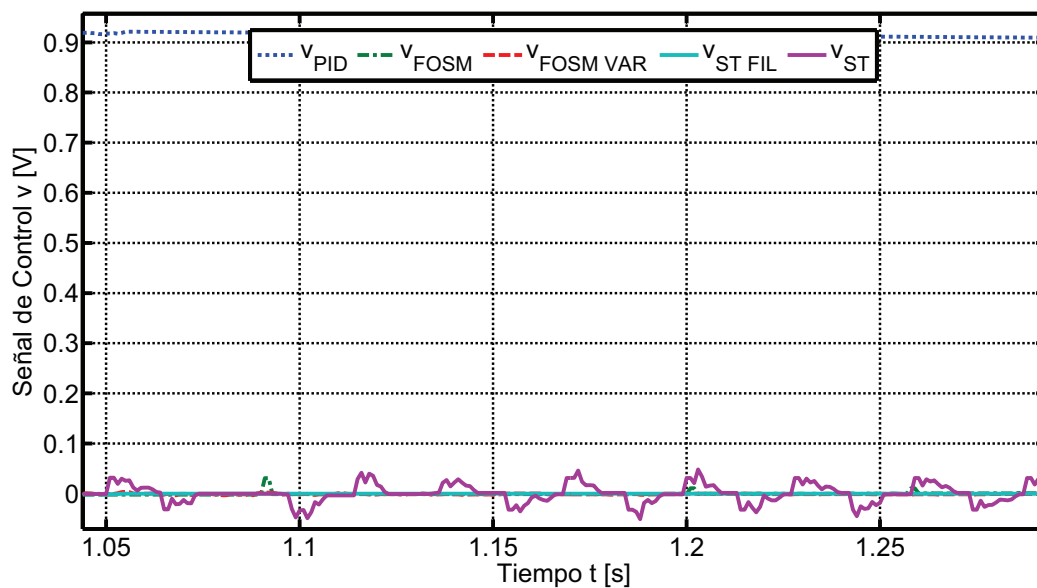
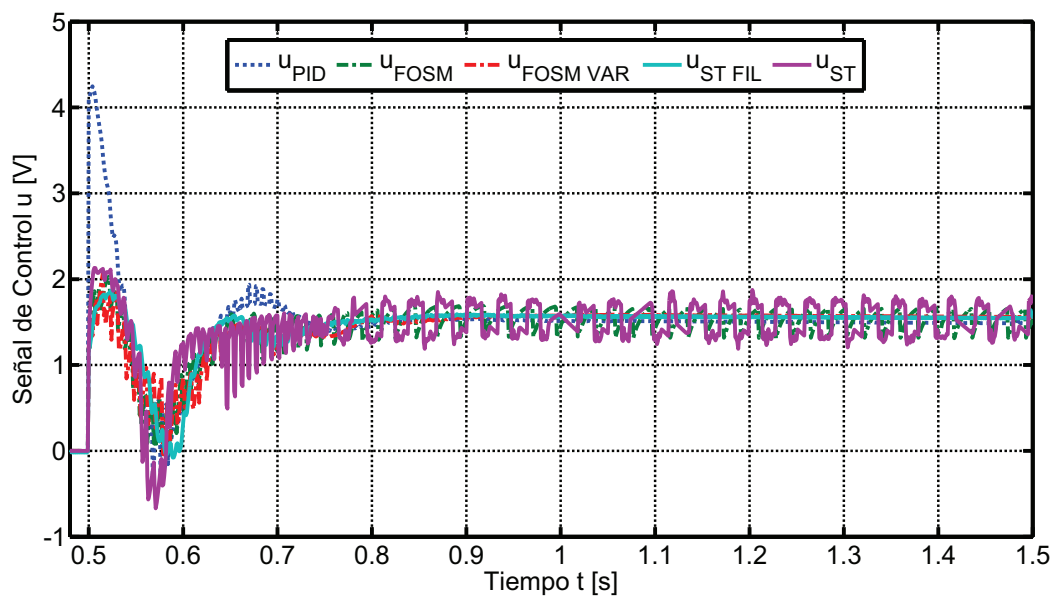
Figura 6.8: Control v

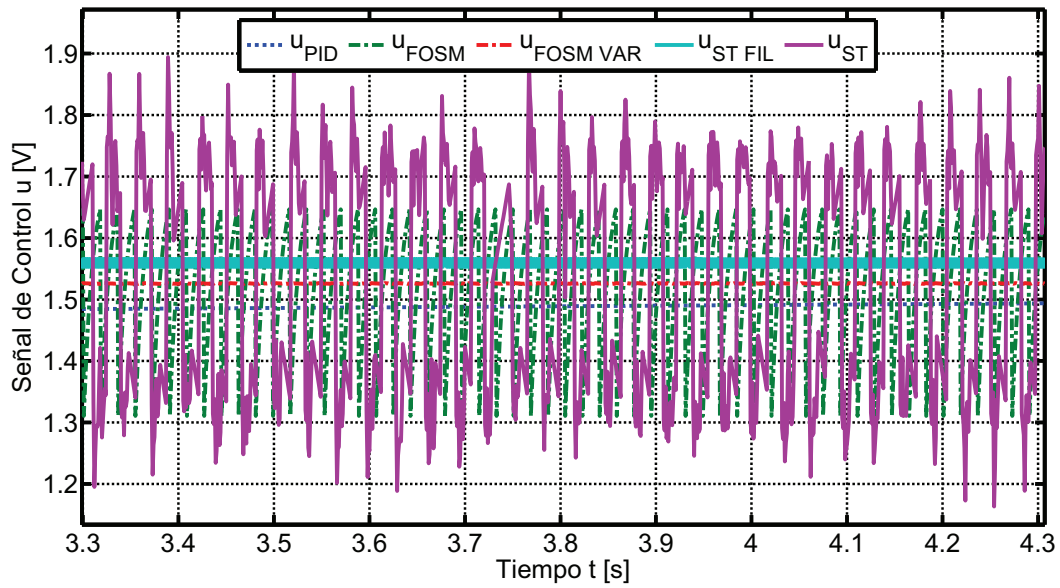
En el caso de la Figura 6.8 hay una clara diferencia entre la señal de control v del PID y de los demás controladores. El control PID no está sujeto a la ayuda de los modos deslizantes, por lo que está entrando directamente como señal de control u a la planta. En el caso cuando se utilizan los modos deslizantes, el control v prácticamente se vuelve cero y la acción dominante de control proviene del mismo controlador por modos deslizantes, como se podrá apreciar en las siguientes figuras.

Haciendo un acercamiento de las señales de control v , Figura 6.9, se puede ver que ésta es una señal continua y suave.

Por otro lado, la acción de control que está siendo inyectada al sistema, es el control u . En la Figura 6.10 se observa que algunas señales presentan oscilaciones, sobre todo aquellas correspondientes a los algoritmos por modos deslizantes. Sin embargo, el acercamiento mostrado en la Figura 6.11, permite ver que los controladores PID, modos deslizantes de primer orden de ganancia variable y Super Twisting con filtro, poseen una señal continua y uniforme. Por otro lado, los controladores por modos deslizantes de primer orden y Super Twisting sin filtro presentan oscilaciones, lo cual puede llegar a ser perjudicial para el actuador.

Finalmente la tabla 6.1, hace un recuento de datos cuantitativos que resumen los resultados hasta ahora mostrados.

Figura 6.9: Zoom del control v Figura 6.10: Control u

Figura 6.11: Zoom del control u

Cuadro 6.1: Resumen de resultados del primer experimento

Controlador	Sobre pa- so máximo [μm]	Convergencia en tiempo finito	Tiempo de con- vergencia [s]	Error en estado per- manente [μm]	Nivel de ruido en la señal de control Δu
PID	2400	<i>No</i>	–	2	700 [μ V]
FOSM	16	<i>Si</i>	0.93	0	300 [mV]
FOSM VAR	7	<i>Si</i>	1.66	0	300 [μ V]
ST FIL	3	<i>Si</i>	1.12	0	1.4 [mV]
ST	2	<i>No</i>	–	25	710 [mV]

6.2. Segundo Experimento

Las Figuras 6.2, 6.13 y 6.14 muestran el comportamiento de la salida del sistema con los distintos algoritmos de control propuestos.

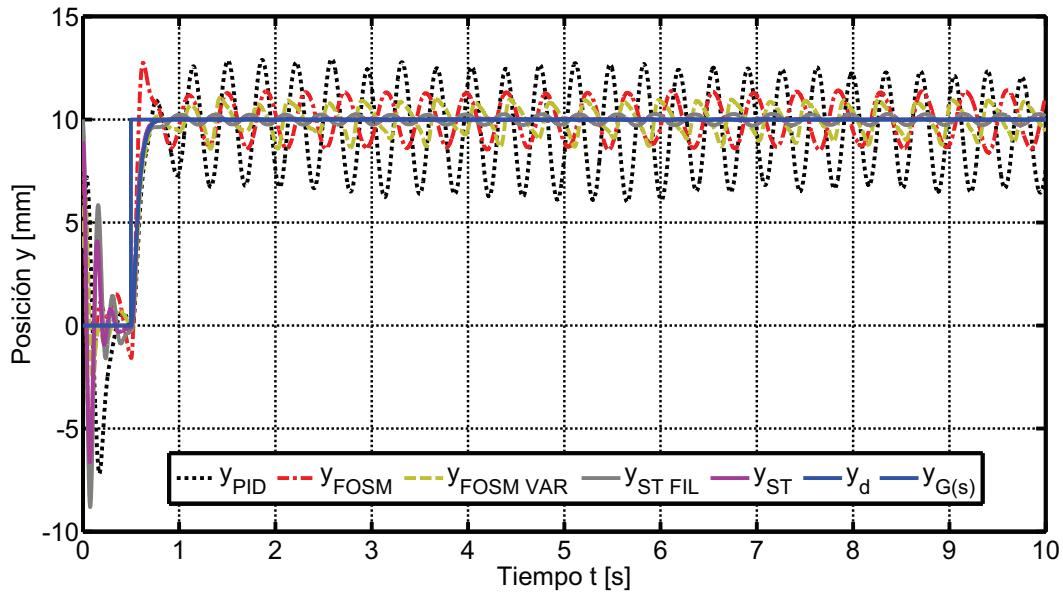


Figura 6.12: Comparación de la posición alcanzada con los distintos algoritmos de control a una referencia dada de 1 [cm], en presencia de perturbaciones

A simple vista puede observarse en la Figura que el controlador que presenta mayor amplitud en sus oscilaciones, es el PID. Por otro lado, los controladores por modos deslizantes presentan oscilaciones de menor amplitud.

En la Figura 6.13, se aprecia un acercamiento del estado permanente de las respuestas. Aquí se ve claramente como el algoritmo Super Twisting supera a los demás algoritmos de control. De hecho, es necesario hacer un acercamiento mayor para poder apreciar la amplitud de las oscilaciones del algoritmo Super Twisting sin filtro, ver Figura 6.14

El comportamiento de las velocidades del sistema con los distintos algoritmos de control se observa en las Figuras 6.15 y 6.16. En estas figuras se puede observar que el controlador PID genera velocidades mayores que el Super Twisting.

Cabe mencionar que el diferenciador combinado que fue propuesto para esta tesis, ayuda a estimar señales más suaves cuando el sistema está en movimiento, lo cual ayuda a generar señales de control igualmente suaves para ser inyectadas al sistema.

Las señales del control v se muestran en las Figuras 6.17 y 6.18. De nuevo, la señal de control v en el controlador PID, es la misma que la señal de control u .

Las señales del control u se muestran en las Figuras 6.19 y 6.20.

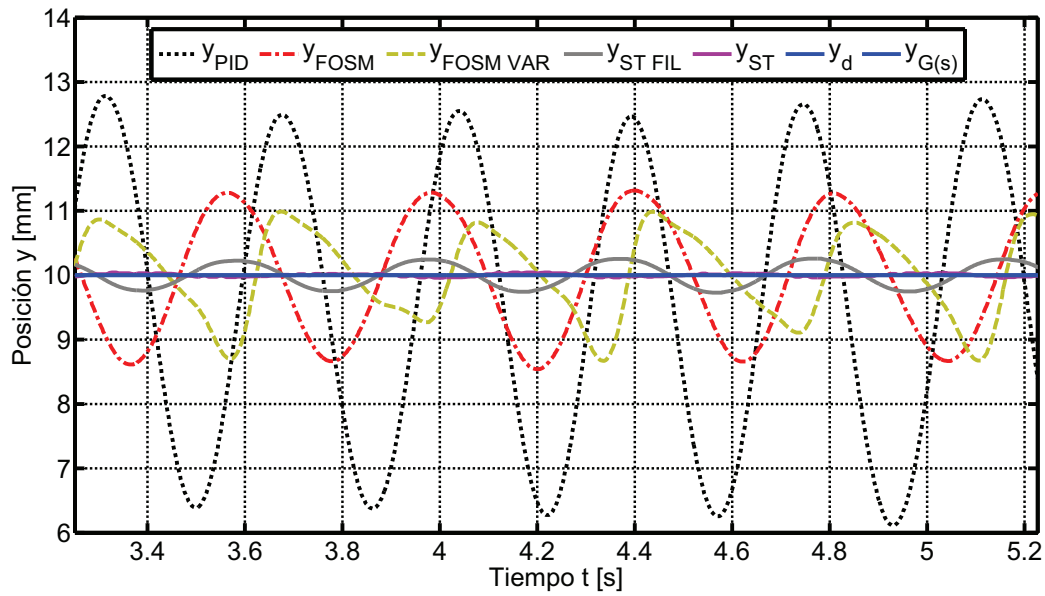


Figura 6.13: Zoom de la posición en la respuesta transitoria

La Figura 6.19 muestra las señales de control u que son inyectadas al sistema. El mejor desempeño se logra con el Super Twisting sin filtro.

En la Figura 6.20 se aprecia que este controlador tiene la señal menos suave, sin embargo es la señal que mejor logra compensar las perturbaciones.

Finalmente, las amplitudes de las oscilaciones alcanzadas con los distintos algoritmos de control, se resumen en la tabla 6.2.

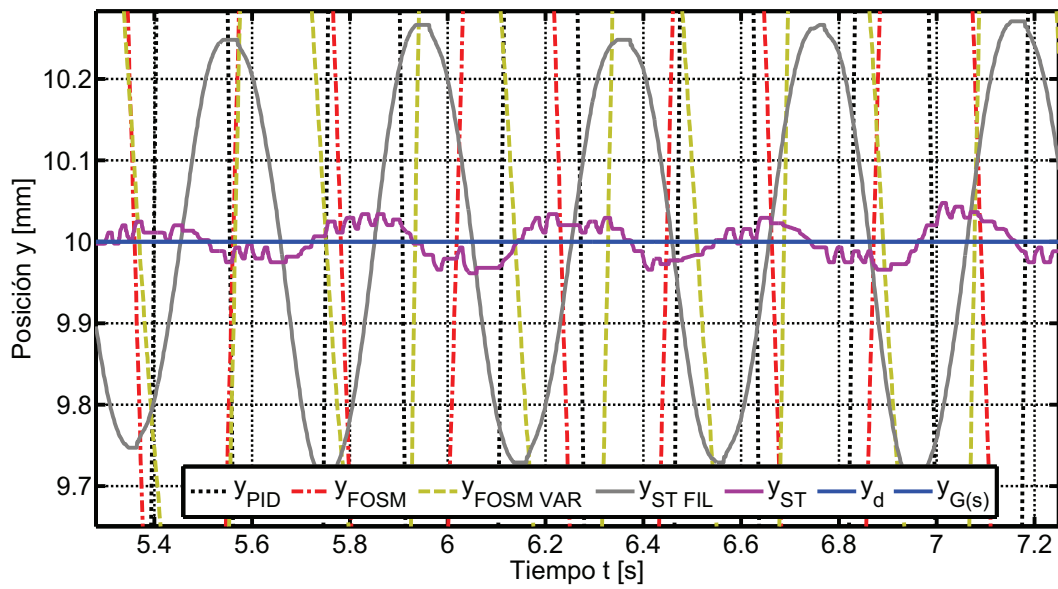


Figura 6.14: Zoom de la posición en el estado permanente

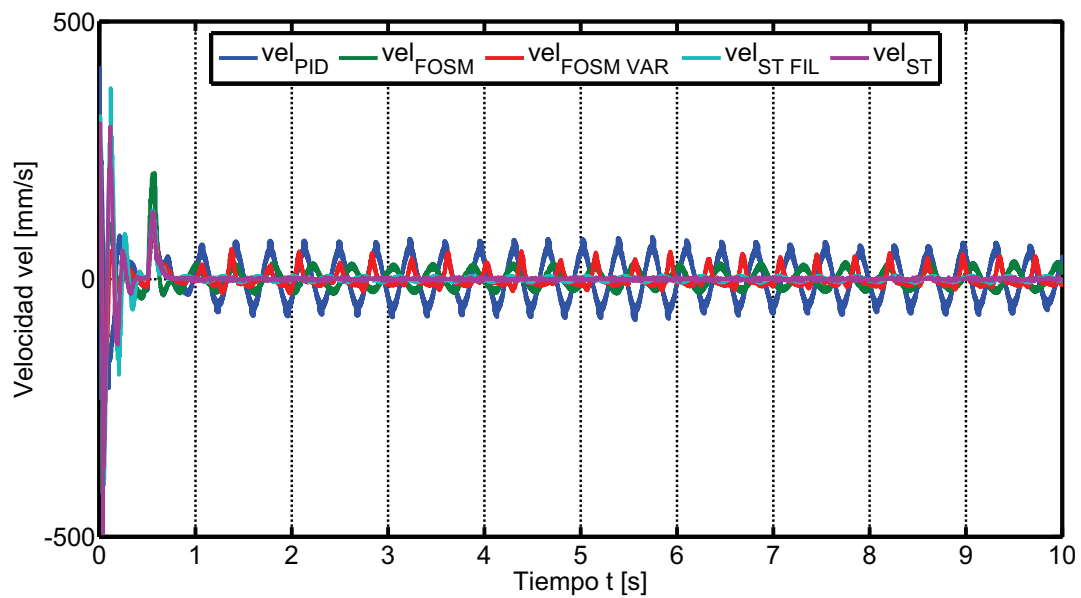


Figura 6.15: Velocidades del sistema

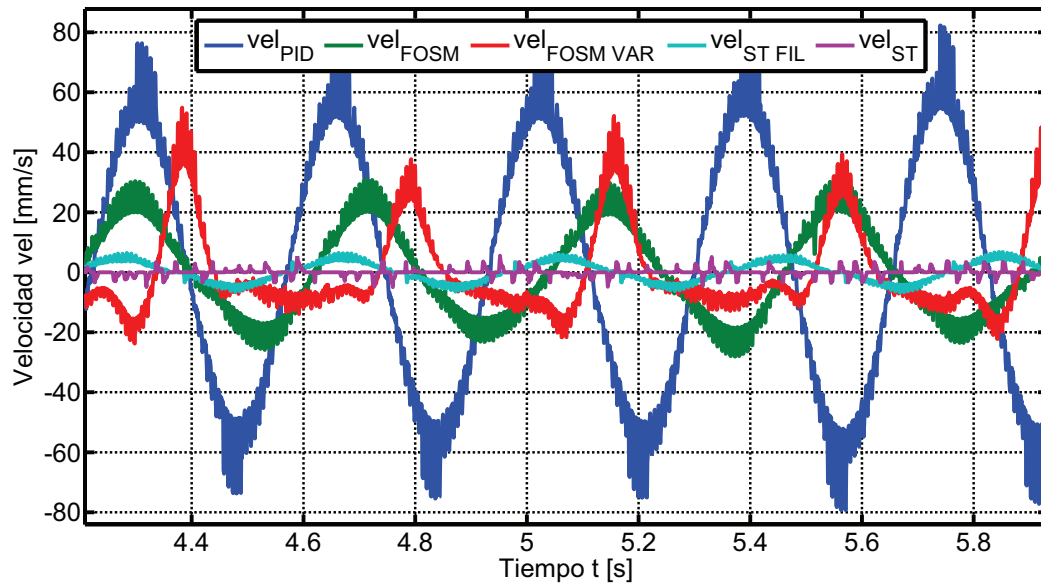
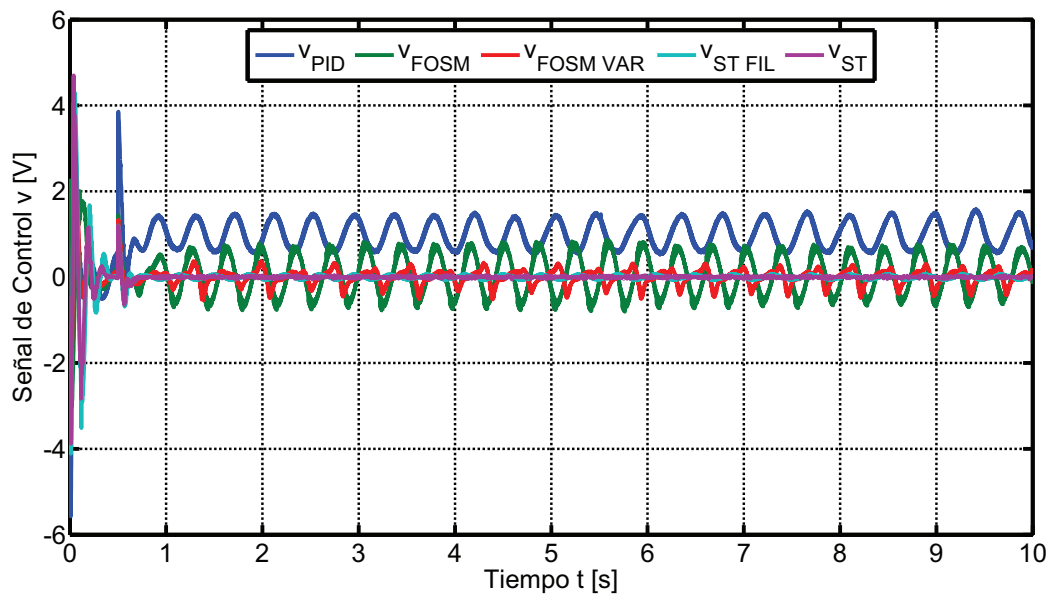
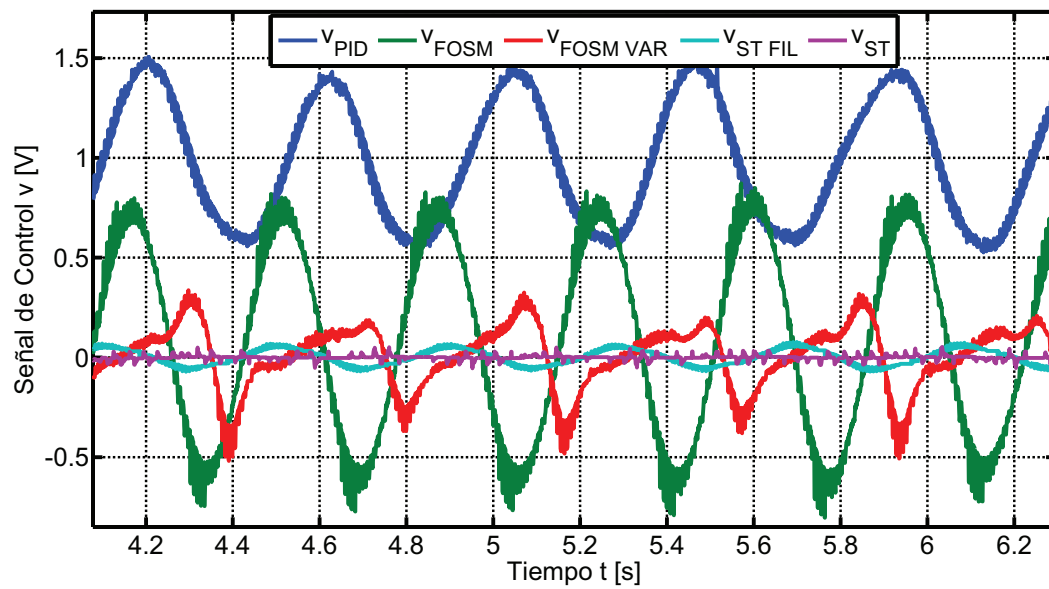
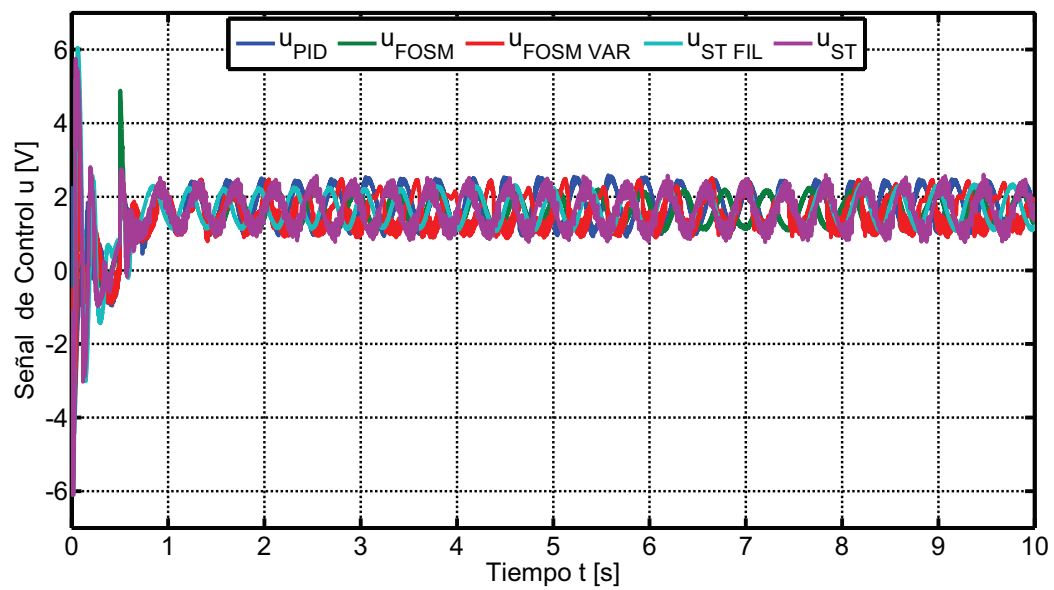


Figura 6.16: Zoom de las velocidades del sistema

Figura 6.17: Control v

Figura 6.18: Zoom del control v Figura 6.19: Control u

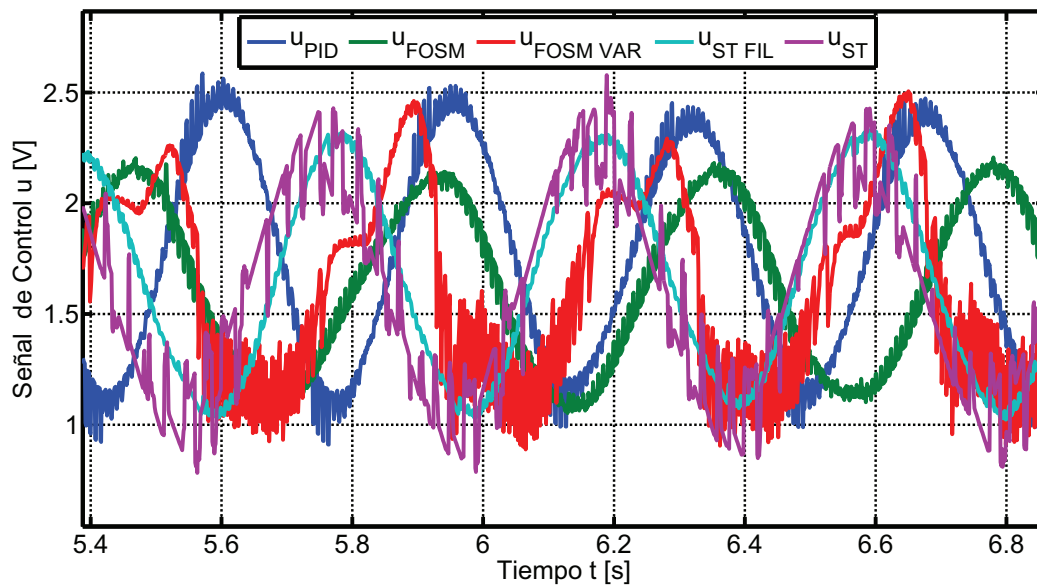


Figura 6.20: Zoom del control u

Cuadro 6.2: Resumen de resultados del segundo experimento

Controlador	Amplitud de las oscilaciones en la salida[mm]
PID	6.11
FOSM	2.78
FOSM VAR	2.16
ST FIL	0.47
ST	0.069