



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

“Conéctate con un científico y te estarás conectando con un niño”

Ray Bradbury





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



MODELADO Y CONTROL DE UN SCARA UTILIZANDO TÉCNICAS PARA LA REDUCCIÓN DE OSCILACIONES DURANTE LA EJECUCIÓN DE TRAYECTORIAS EN EL INSTITUTO DE SISTEMAS MECATRÓNICOS DE LA UNIVERSIDAD DE HANNOVER, BAJA SAJONIA, ALEMANIA

Autor:

Iván Isaías Barona Zamora

Director:

Ing. Andrés Marcelo Gordón Garcés



AGENDA

- Antecedentes
- Justificación e Importancia
- Objetivo General
- Objetivos Específicos
- Fundamentación Teórica
- Modelado del Robot
- Control del Robot
- Pruebas y Resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones



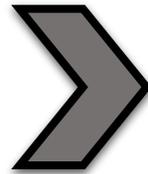
ANTECEDENTES

ROBOTS INDUSTRIALES



<https://goo.gl/J5Ef7X>

Repetitividad
Precisión
Velocidad

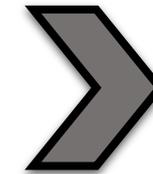


SCARA



<https://goo.gl/vbwkqD>

Creado en 1979 en la
Universidad de
Yamanashi



INSTITUTO DE SISTEMAS MECATRÓNICOS



Simulación de
un proceso de
manipulación



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA



Automatización

- Precisión en procesos de ensamblaje
- Inspección de productos terminados
- Atornillado de piezas



<https://goo.gl/sfNpq1>



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Modelar y controlar un SCARA utilizando técnicas para la reducción de oscilaciones durante la ejecución de trayectorias de pick and place.



OBJETIVOS

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar acerca de herramientas matemáticas para localización espacial, cinemática, dinámica y control con métodos de reducción de oscilaciones.
- Resolver matemáticamente la cinemática y dinámica del SCARA del laboratorio.
- Analizar el modelo matemático haciendo uso de software de ingeniería.
- Controlar la posición y orientación del efector final para ejecutar diferentes trayectorias aplicando métodos de reducción de oscilaciones.
- Realizar pruebas de funcionamiento en la fábrica a escala dentro del Instituto de Sistemas Mecatrónicos de la Universidad de Hannover.



FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

ROBOTS CON ELEMENTOS FLEXIBLES

Articulaciones

- Bandas de transmisión
- Ejes largos
- Rigidez propia de cables
- Harmonic drives
- Acoplamientos elásticos



Eslabones



goo.gl/sszVXS



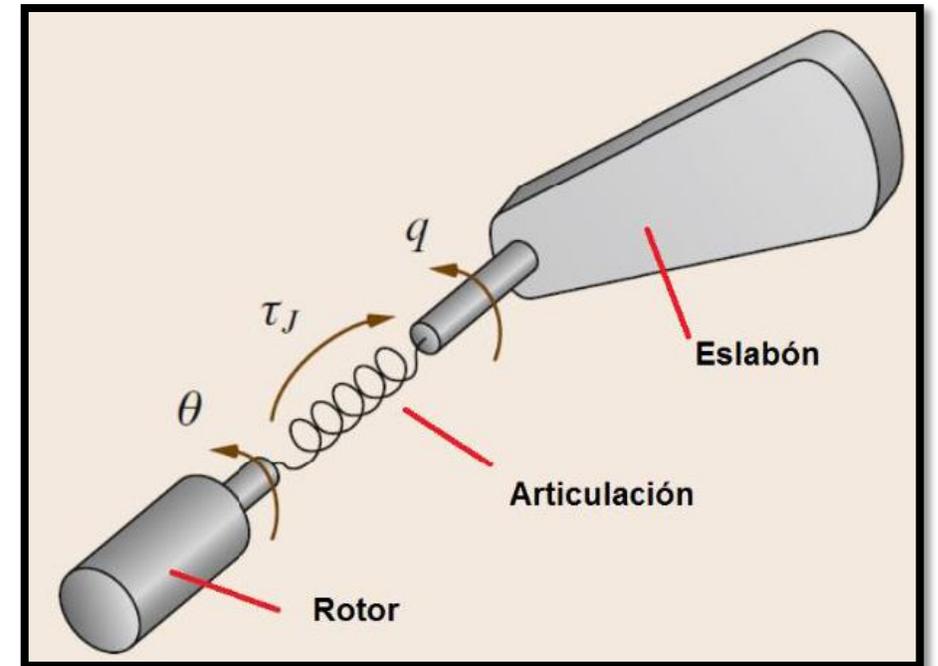
<https://goo.gl/6rMnhL>



FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

MODELAMIENTO DINÁMICO

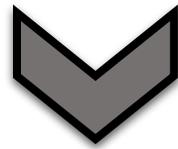
1. Elasticidad estimada como lineal
2. Los rotores son cuerpos uniformes que tienen sus centros de masa en los ejes de rotación.
3. Cada motor está localizado en una posición anterior al eslabón que controla.



FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

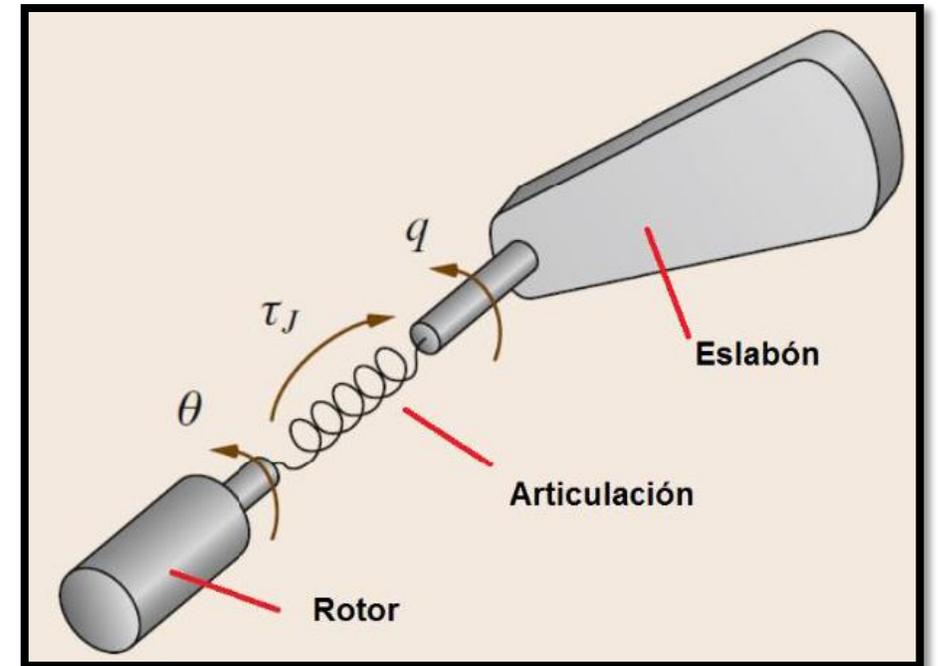
MODELAMIENTO DINÁMICO

$$\Theta = \begin{pmatrix} q \\ \theta \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2N}$$



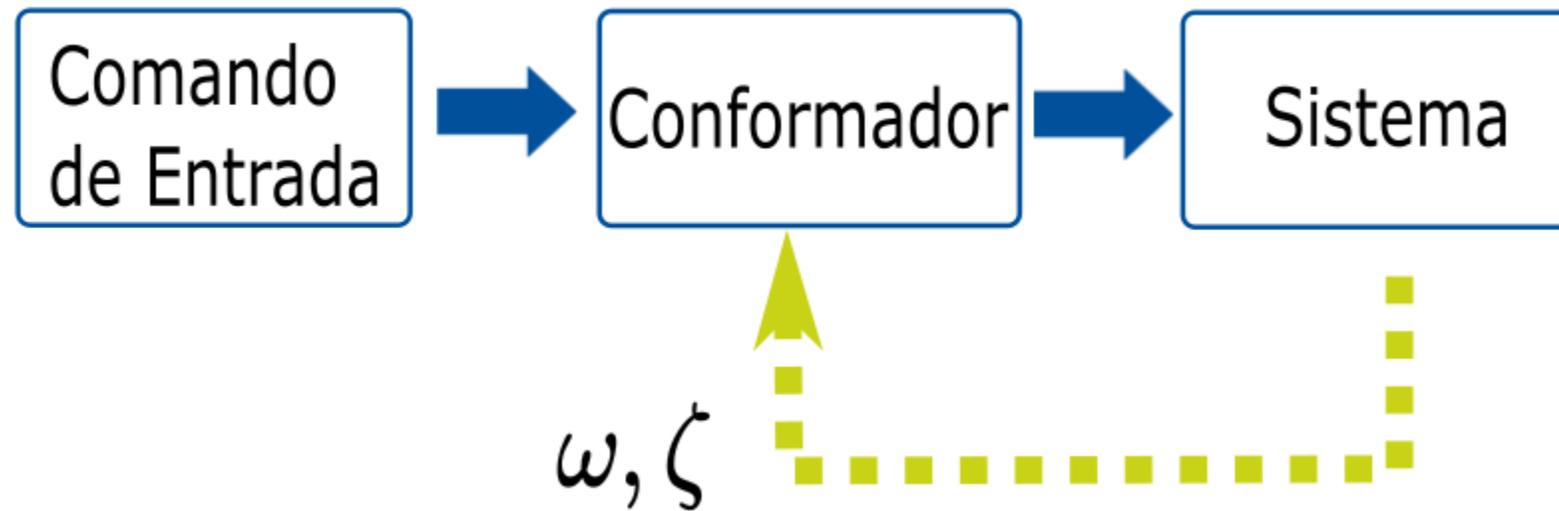
$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) + D(\dot{q} - \dot{\theta}) + K(q - \theta) + F_q \dot{q} = 0$$

$$B\ddot{\theta} + D(\dot{\theta} - \dot{q}) + K(\theta - q) + F_{\theta} \dot{\theta} = \tau$$



FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

CONFORMACIÓN DE ENTRADA



FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

CONFORMACIÓN DE ENTRADA

GRÚA



MOVIMIENTO

CARGA ÚTIL

<https://goo.gl/n2uumM>

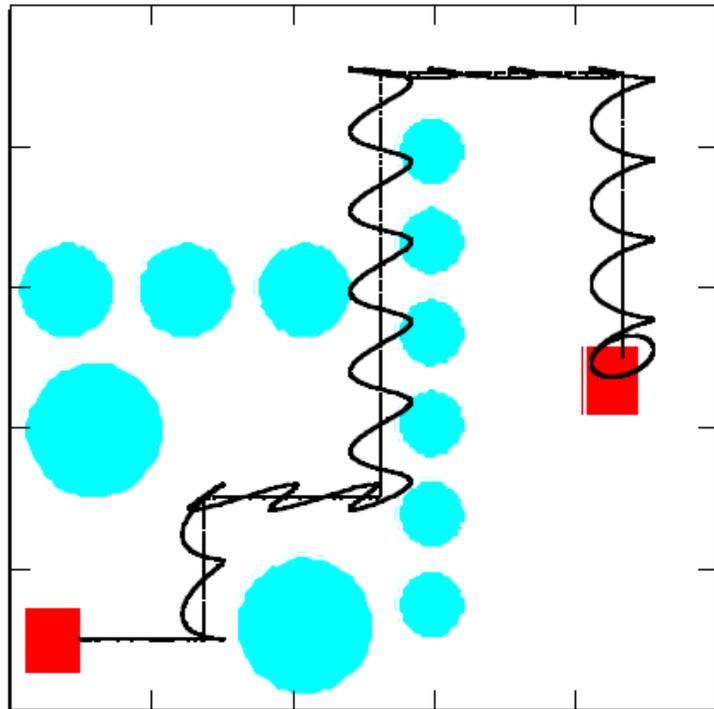
OSCILACIONES
RESIDUALES



FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

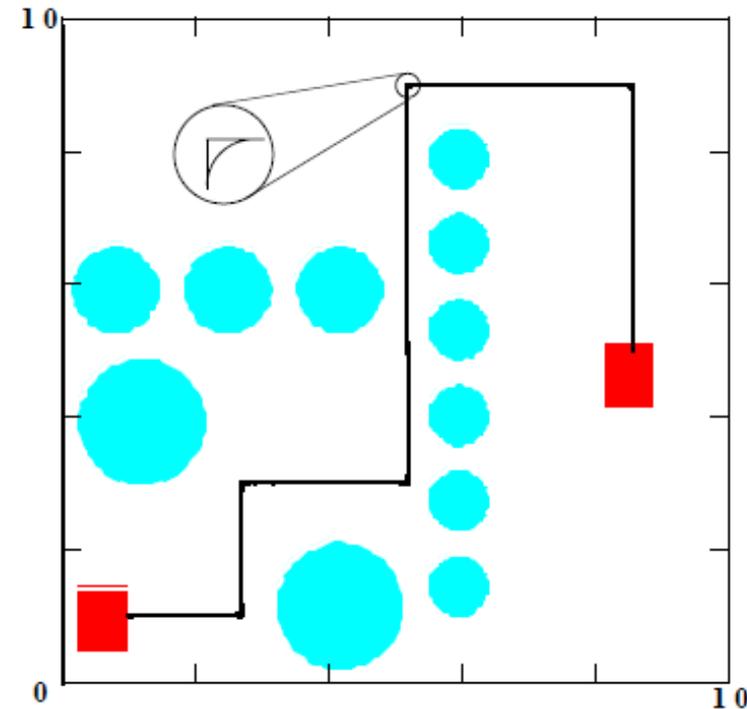
CONFORMACIÓN DE ENTRADA

SIN CONFORMACIÓN



W.E. Singhose
Georgia Institute of Technology

CON CONFORMADOR



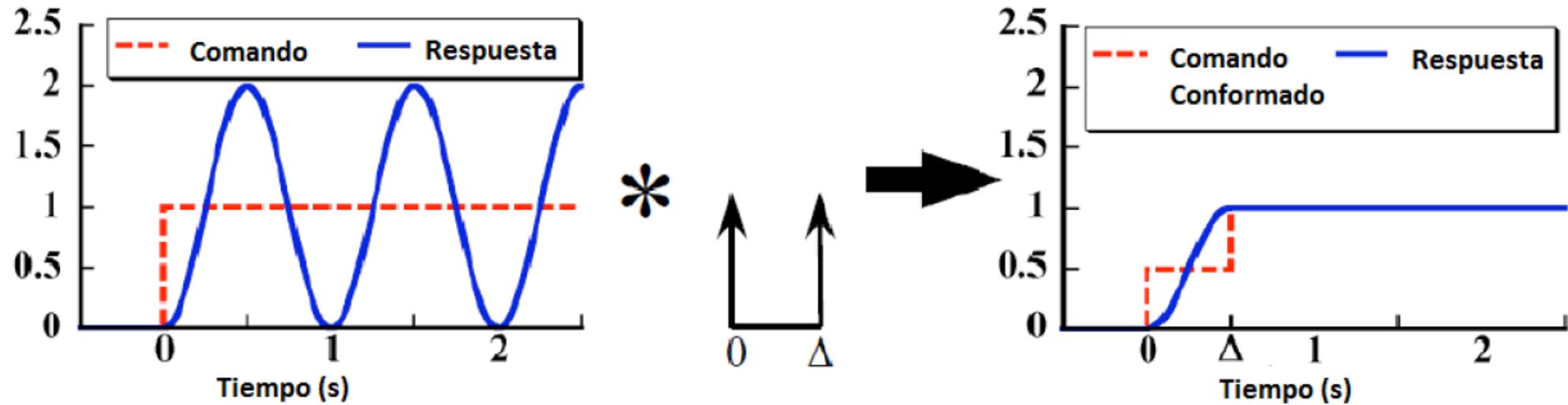
W.E. Singhose
Georgia Institute of Technology



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

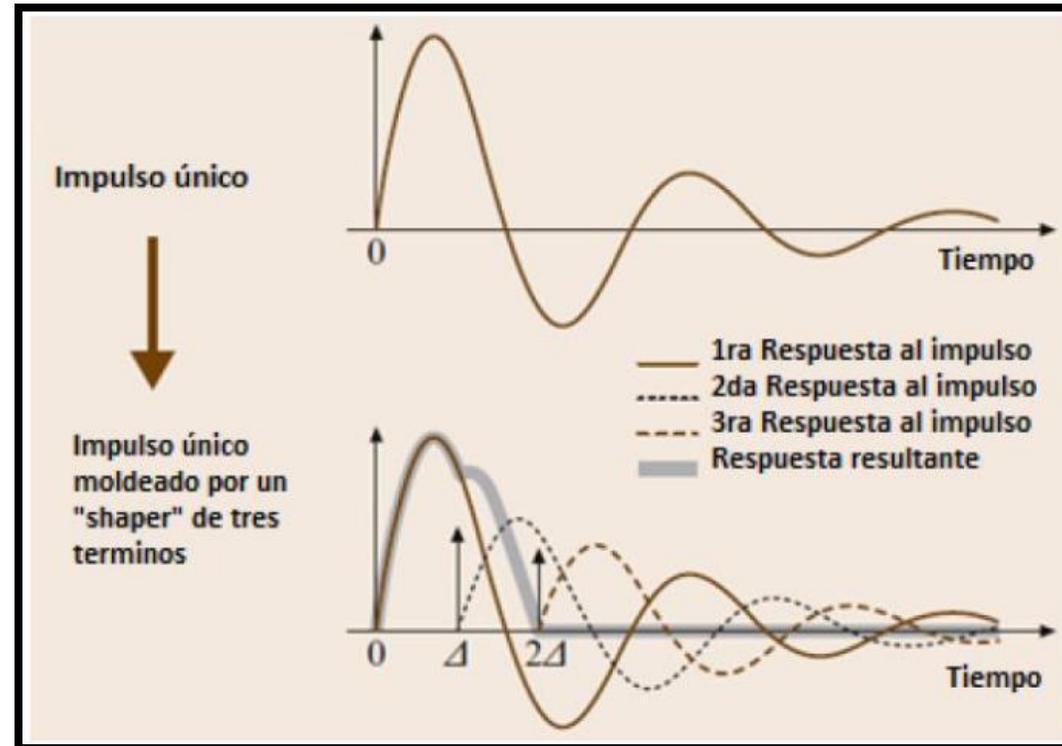
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

CONFORMACIÓN DE ENTRADA



FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

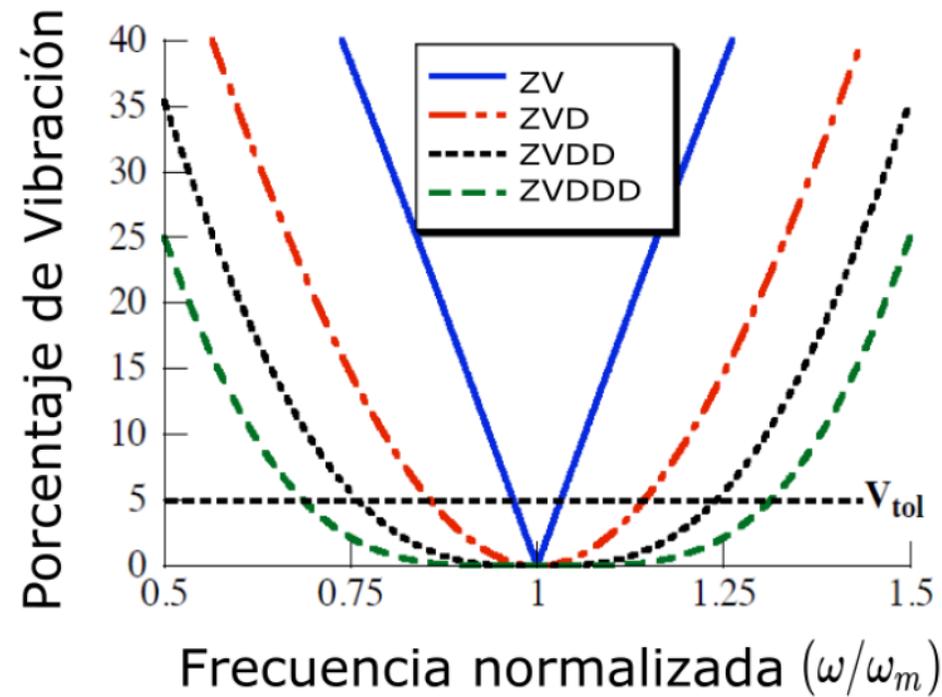
CONFORMACIÓN DE ENTRADA



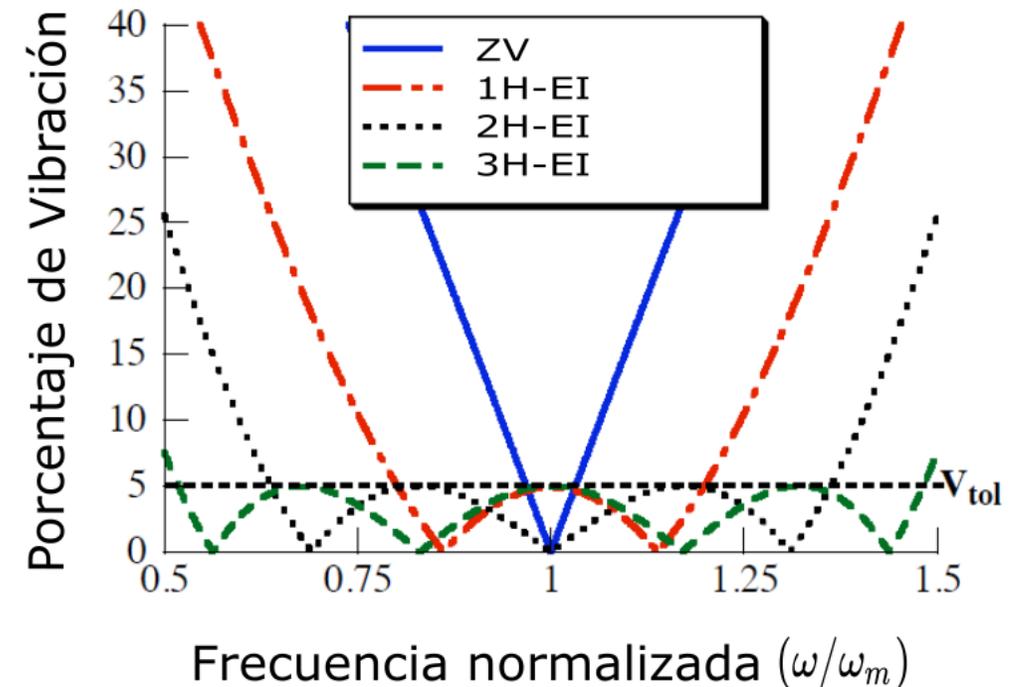
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

TIPOS DE CONFORMADORES

Derivativos



Extra Insensibles



FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

ESTRUCTURA DE UN CONFORMADOR

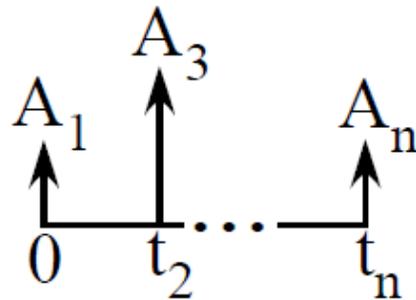
$$ZV = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1 + K & \frac{K}{s} \\ 0 & \frac{\tau_d}{s} \end{bmatrix}$$

$K = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$

$\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_d}$

AMPLITUDES

TIEMPOS



FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

ESTRUCTURA DE UN CONFORMADOR

Vibración Cero

$$ZV = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1 + K & 1 + K \\ 0 & \frac{\tau_d}{s} \end{bmatrix}$$



Vibración cero y triple derivada

$$ZVDDD = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 4K & 6K^2 & 4K^3 & K^4 \\ \frac{1}{D} & \frac{4K}{D} & \frac{6K^2}{D} & \frac{4K^3}{D} & \frac{K^4}{D} \\ 0 & \frac{\tau_d}{2} & \tau_d & \frac{3}{2}\tau_d & 2\tau_d \end{bmatrix}$$



FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

MÁQUINAS DE MEDICIÓN
POR COORDENADAS



es.wikipedia.org

ROBOT HIDRÁULICO DE
ELEVACIÓN PESADA



<https://goo.gl/4iE1mE>

ROBOTS DE MANEJO
DE OBLEAS



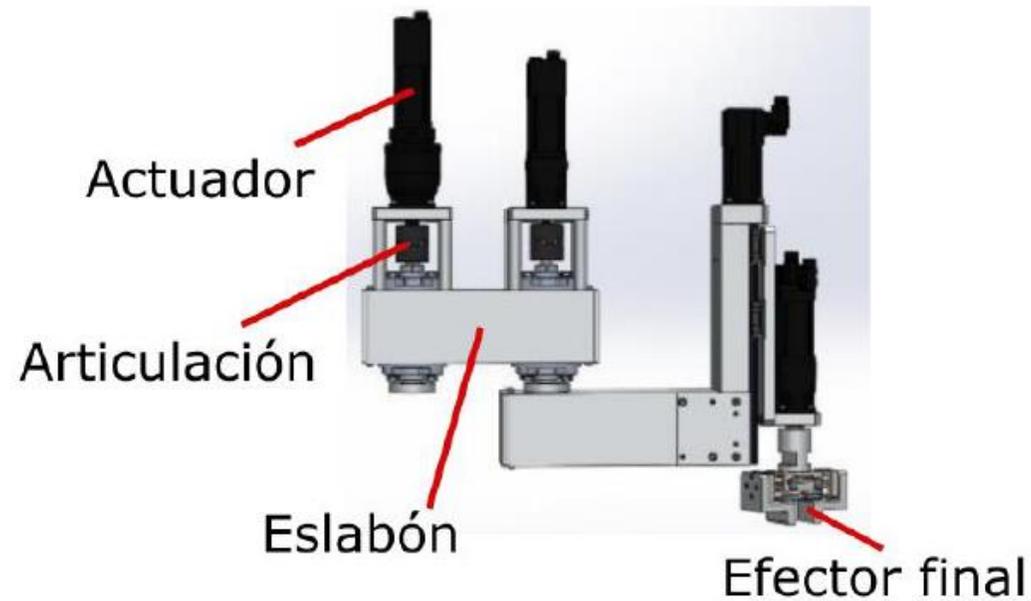
<https://goo.gl/u52pVs>



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

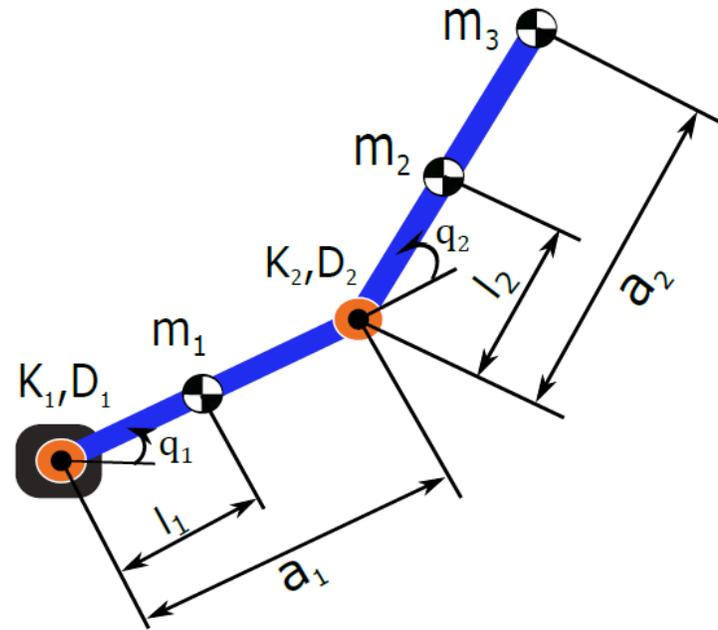
MODELADO DEL ROBOT

IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS



MODELADO DEL ROBOT

MODELO



$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + D(\dot{q} - \dot{\theta}) + K(q - \theta) = 0$$



AMORTIGUAMIENTO

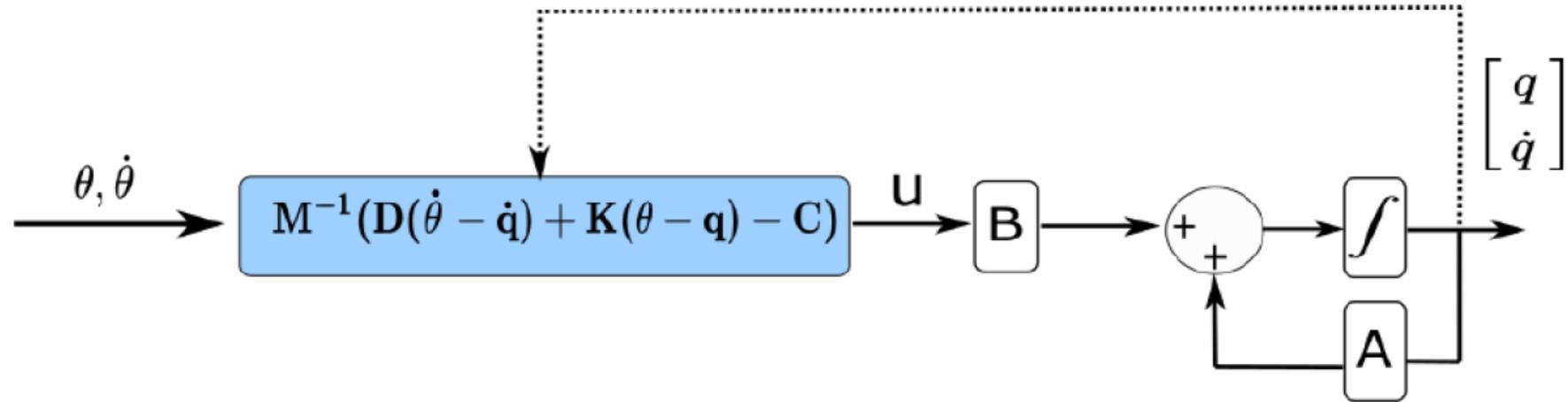


ELASTICIDAD



MODELADO DEL ROBOT

ALGORITMO PARA LA SOLUCIÓN DEL MODELO DINÁMICO



MODELADO DEL ROBOT

COMPROBACIÓN DE MODELO

$$a_1 = 0.5 \text{ m}$$

$$a_2 = 0.5 \text{ m}$$

$$l_1 = 0.25 \text{ m}$$

$$l_2 = 0.25 \text{ m}$$

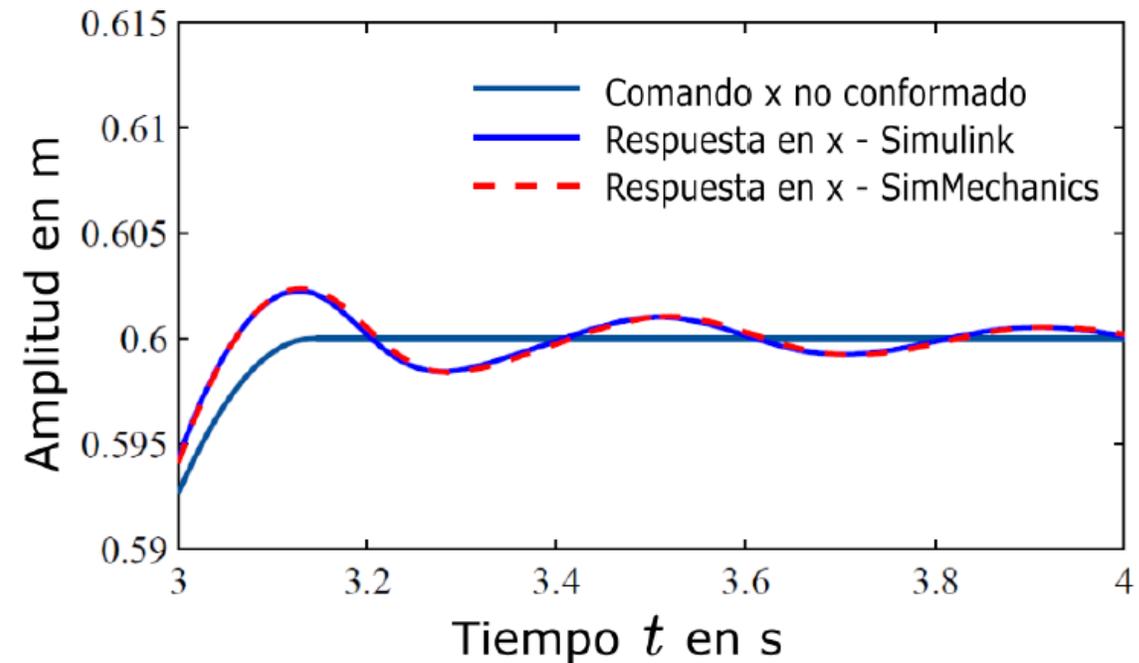
$$m_1 = 15 \text{ kg}$$

$$m_2 = 15 \text{ kg}$$

$$m_3 = 15 \text{ kg}$$

$$K_1 = K_2 = 3000 \text{ Nm/rad}$$

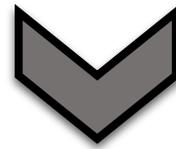
$$D_1 = D_2 = 40 \text{ Nms/rad}$$



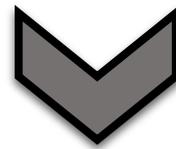
MODELADO DEL ROBOT

LINEALIZACIÓN

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + D(\dot{q} - \dot{\theta}) + K(q - \theta) = 0$$



LINEARIZACIÓN

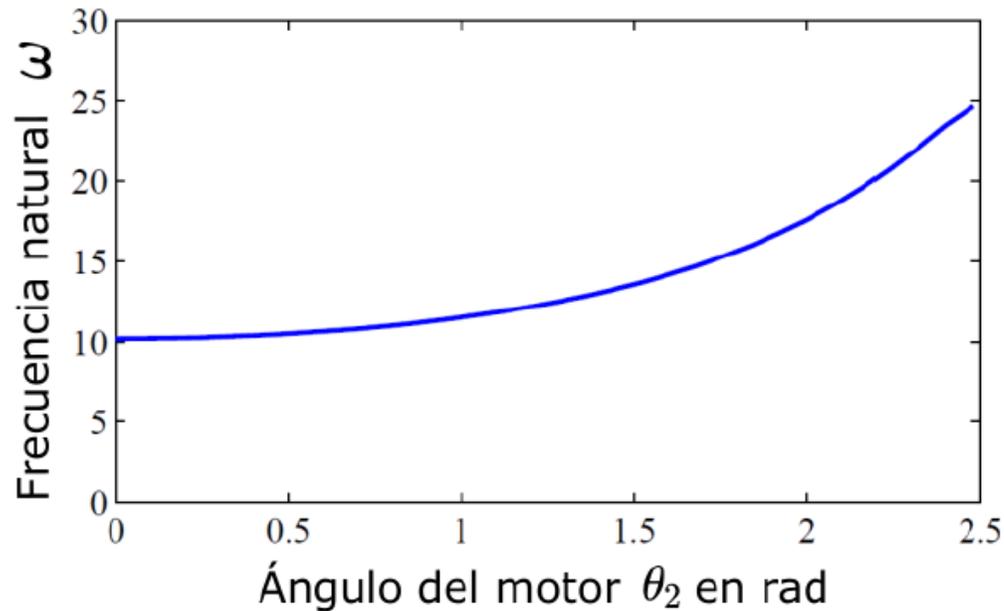


$$M(\theta)\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = 0$$



CONTROL DEL ROBOT

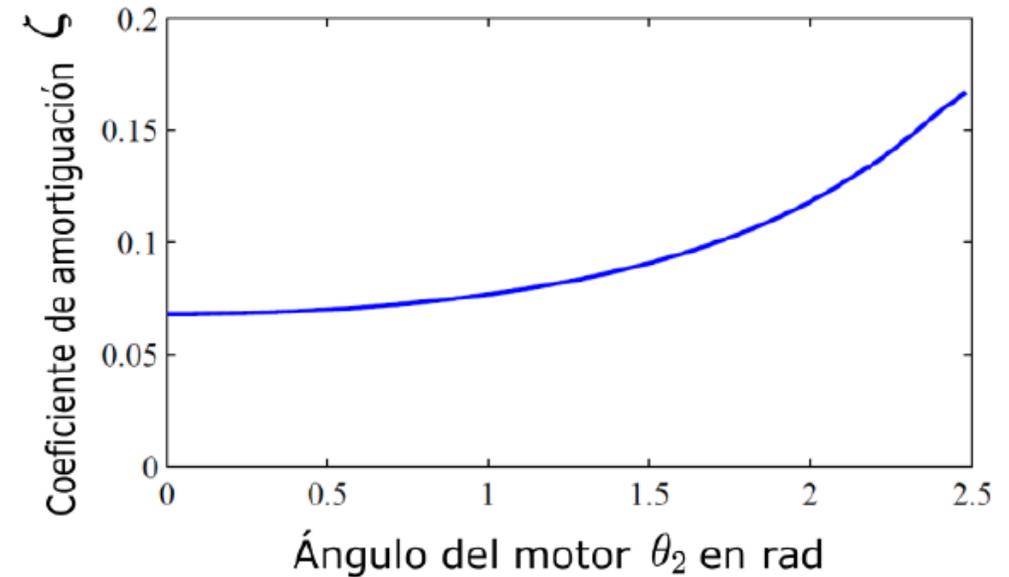
$$M(\theta)\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = 0$$



$$\omega = f(\theta_2)$$

$$\omega = 17,1102 \text{ rad/s}$$

$$\zeta = 0.1174$$

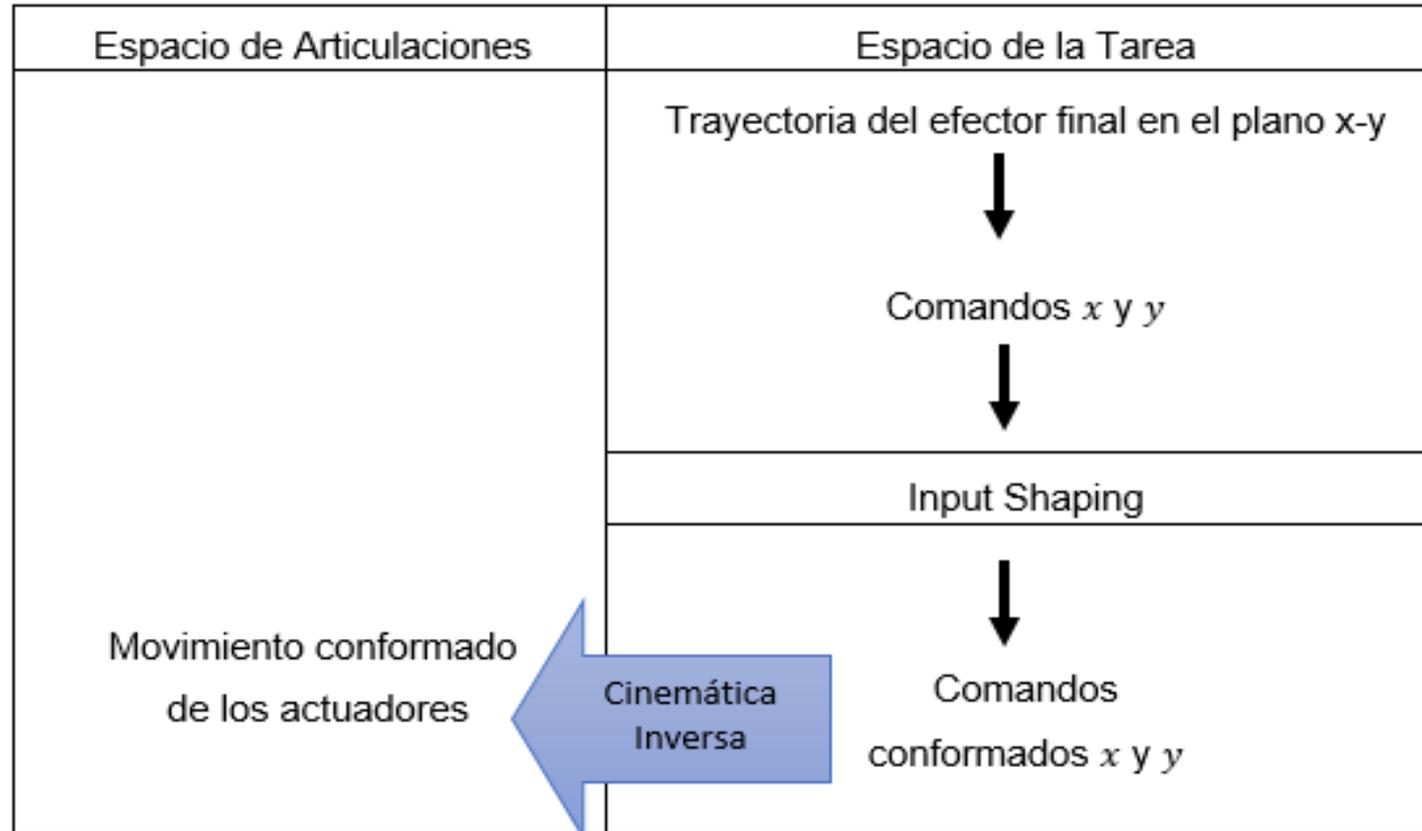


$$\zeta = f(\theta_2)$$



CONTROL DEL ROBOT

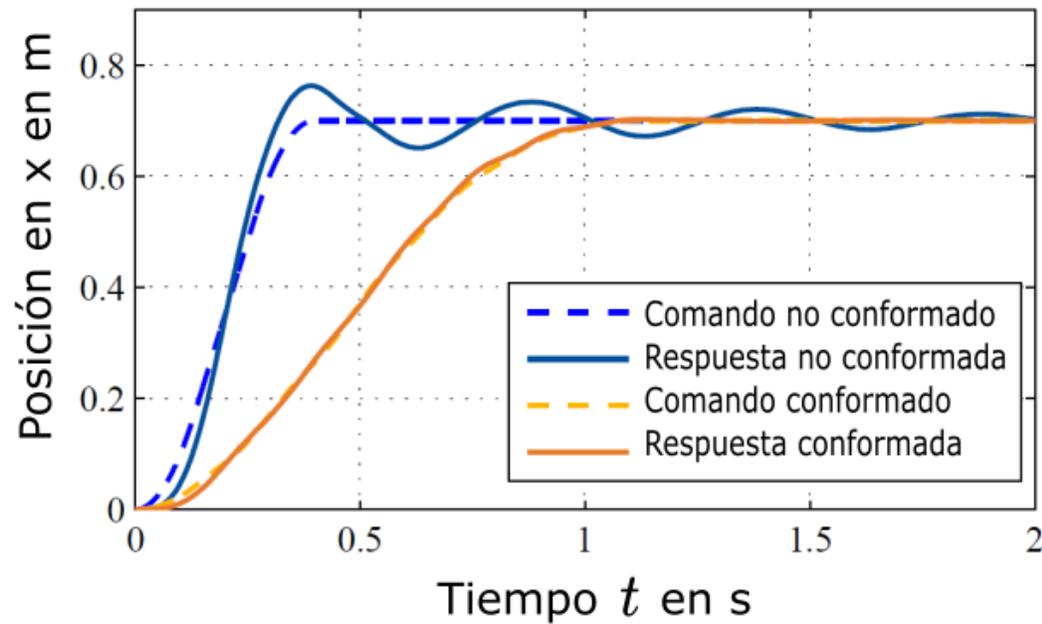
PROCEDIMIENTO



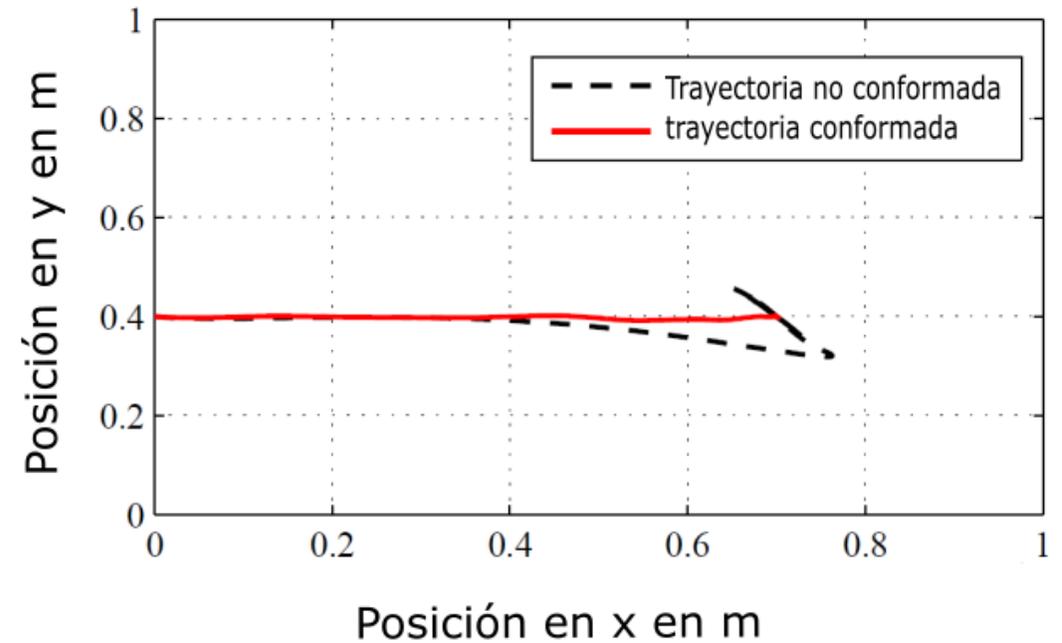
CONTROL DEL ROBOT

ALTERACIÓN EN LOS COMANDOS

Alto tiempo de Transición



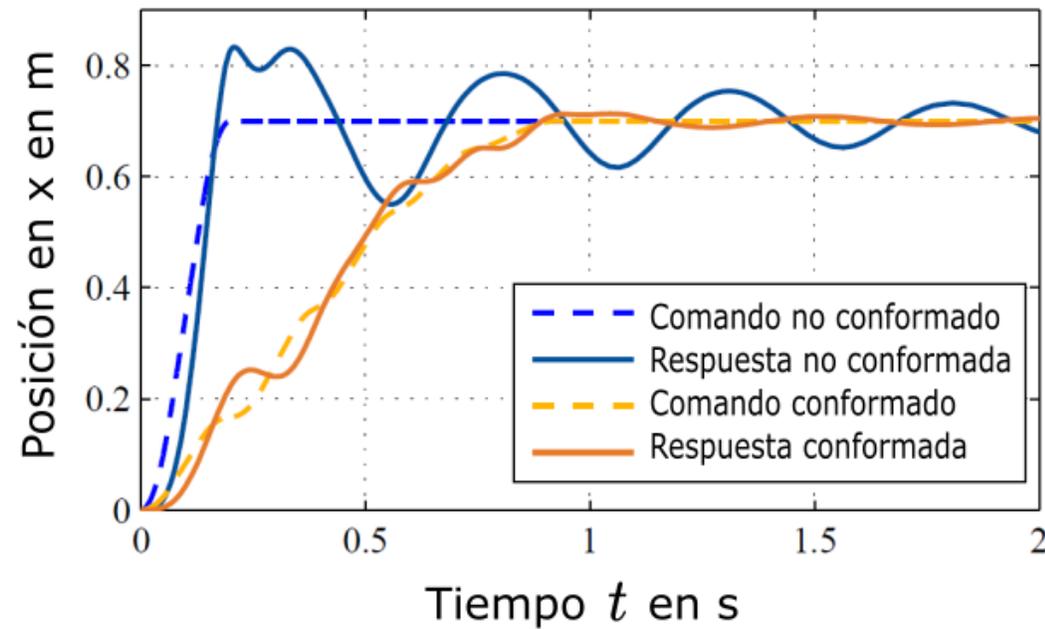
Respuestas



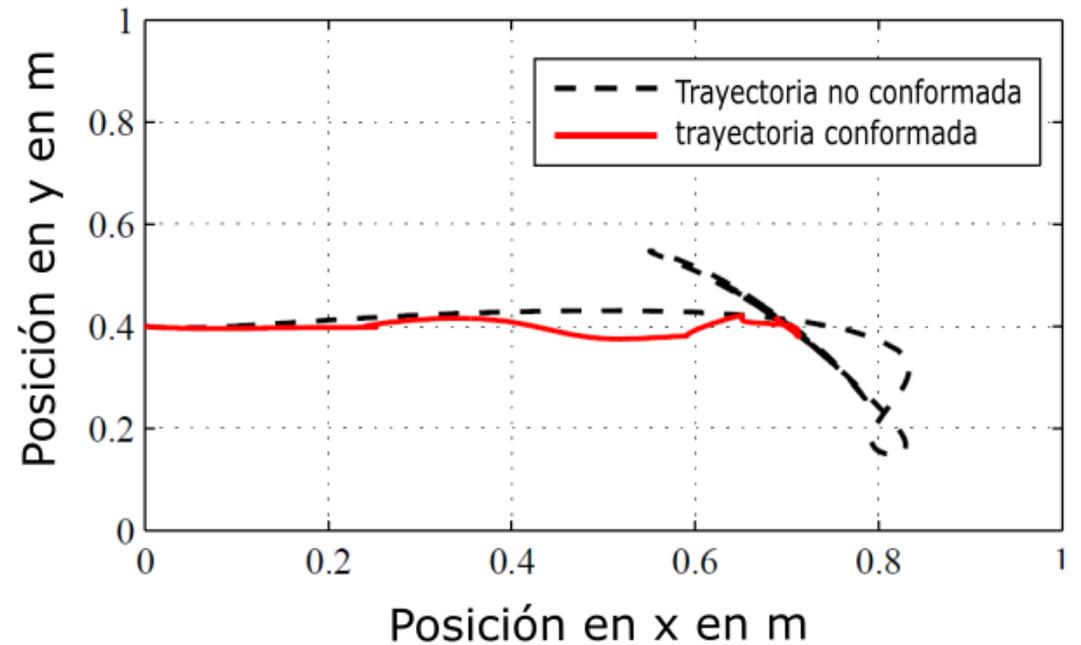
CONTROL DEL ROBOT

ALTERACIÓN EN LOS COMANDOS

Bajo Tiempo de Transición



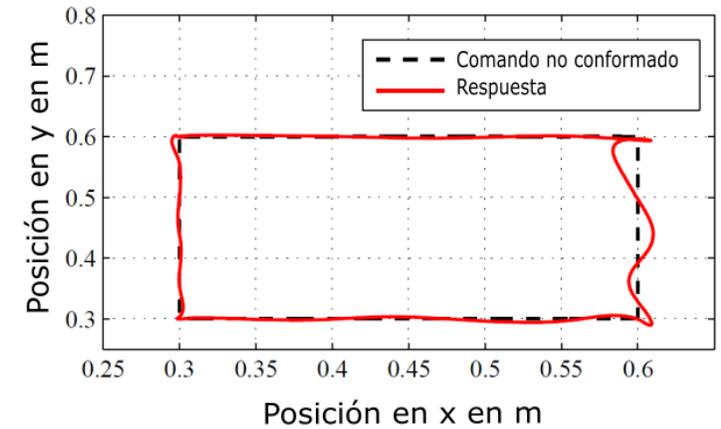
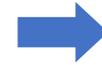
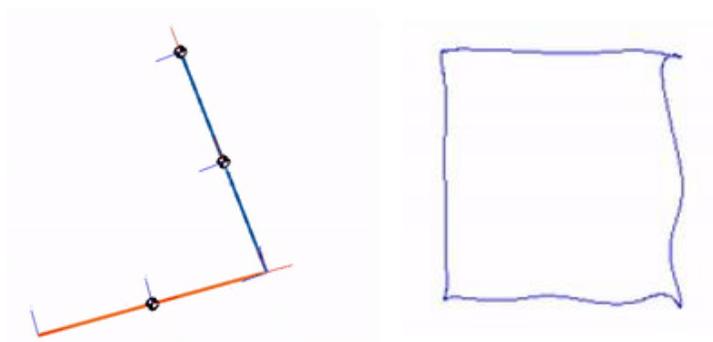
Respuestas



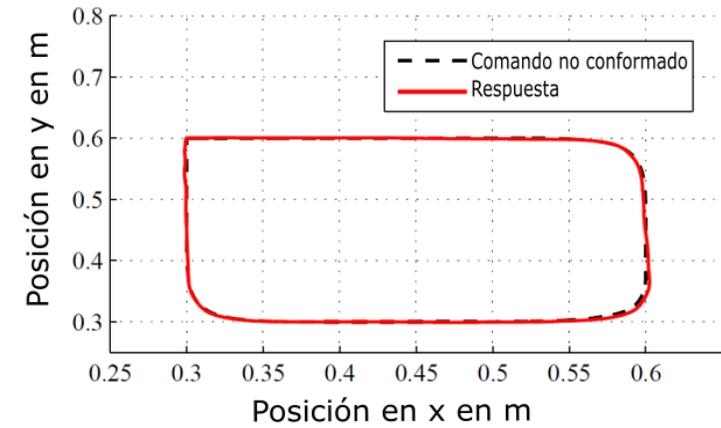
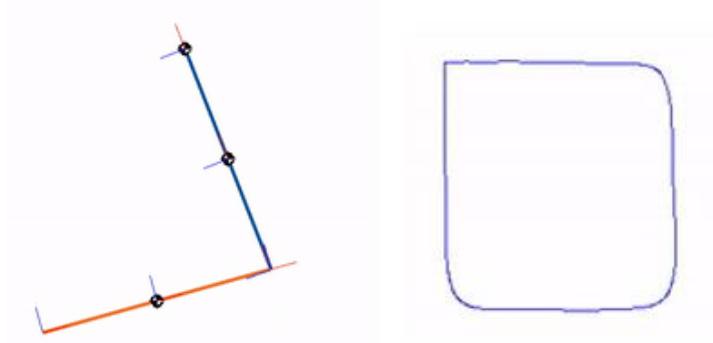
CONTROL DEL ROBOT

COMPARACIÓN

Caso no conformado



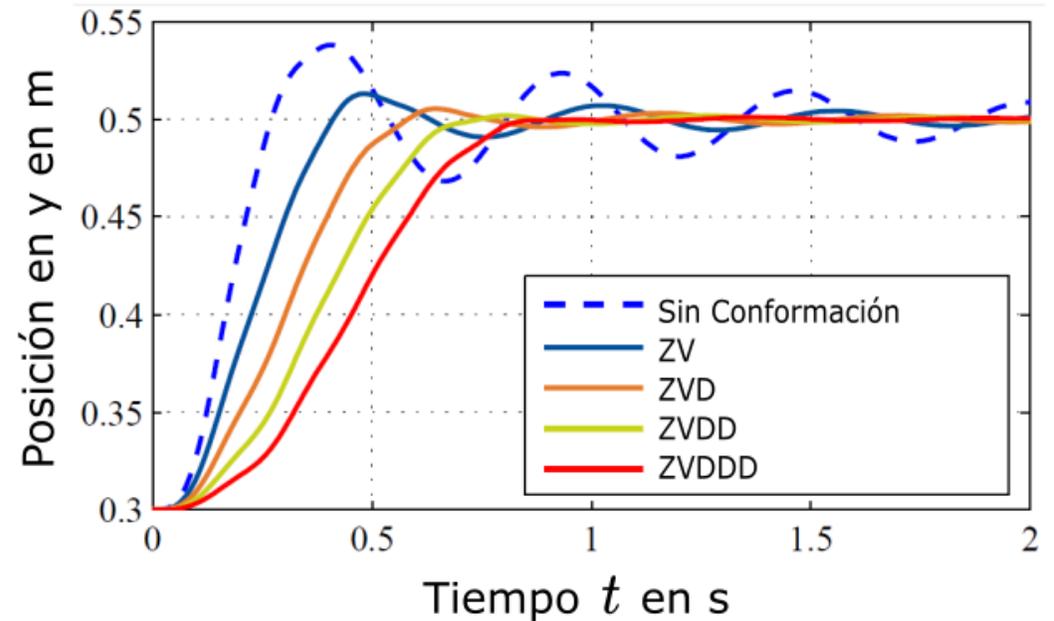
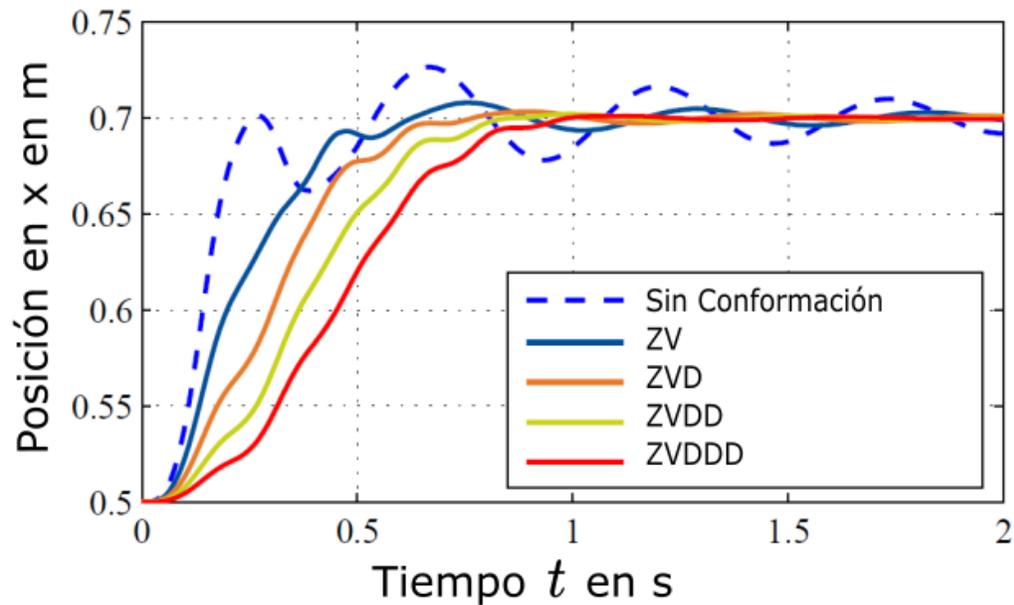
Caso Conformado



CONTROL DEL ROBOT

PRUEBA DE CONFORMADORES

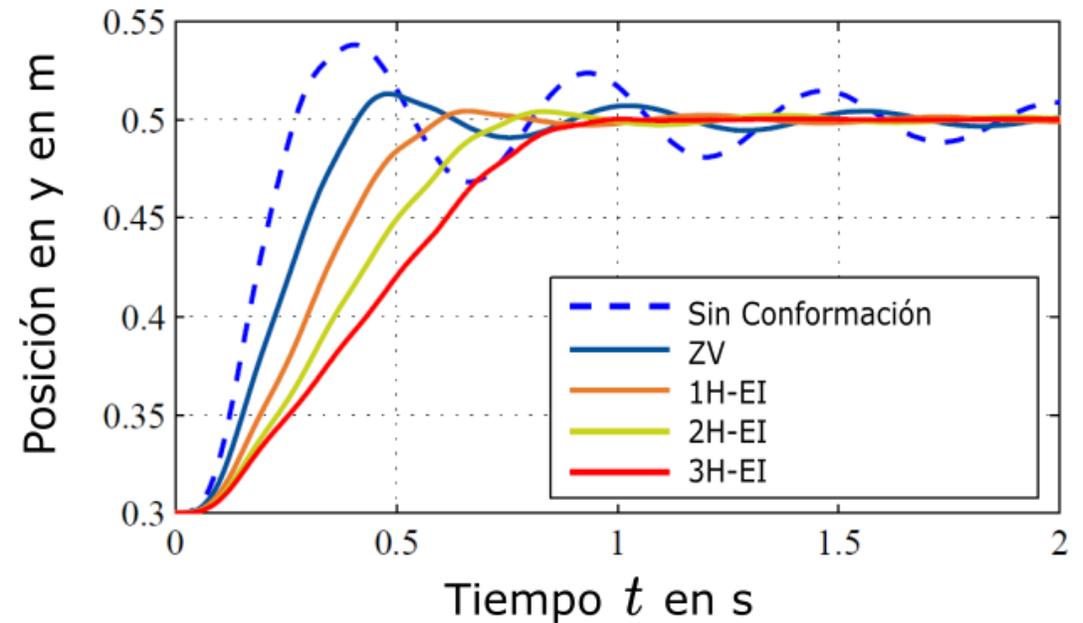
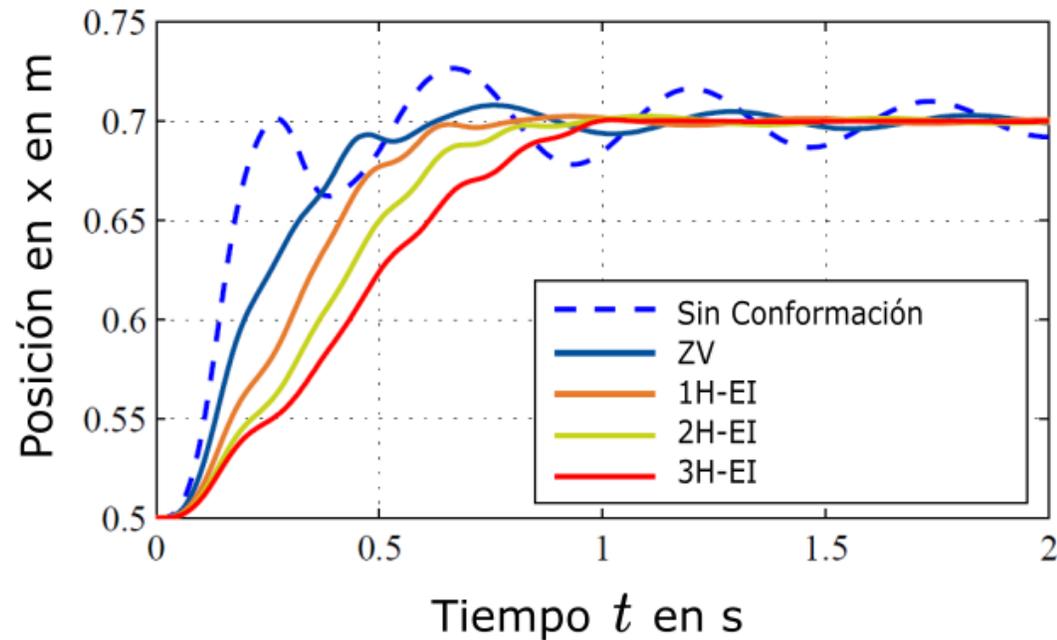
Respuestas con Conformadores Derivativos



CONTROL DEL ROBOT

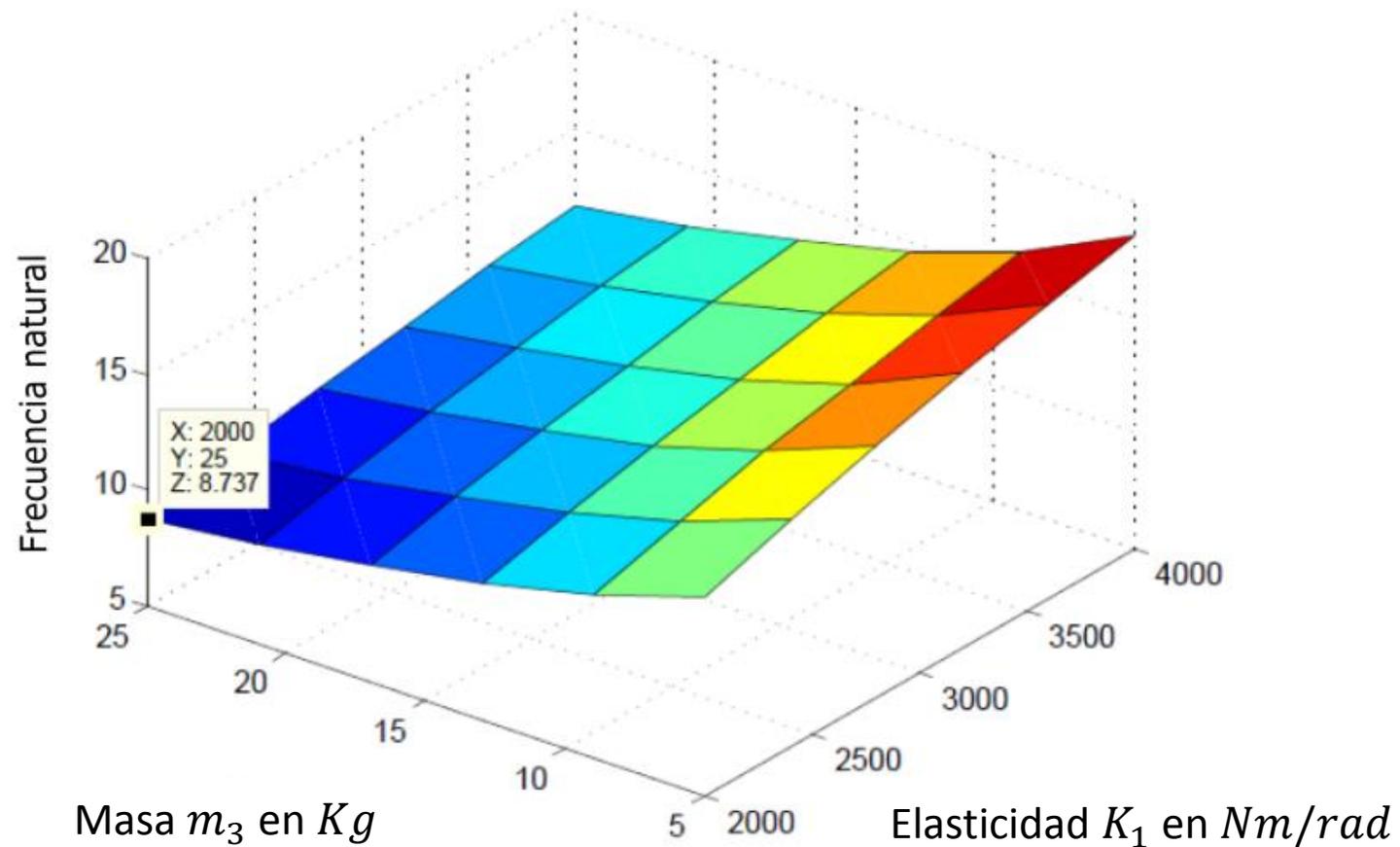
PRUEBA DE CONFORMADORES

Respuestas con Conformadores Extra Insensitivos



CONTROL DEL ROBOT

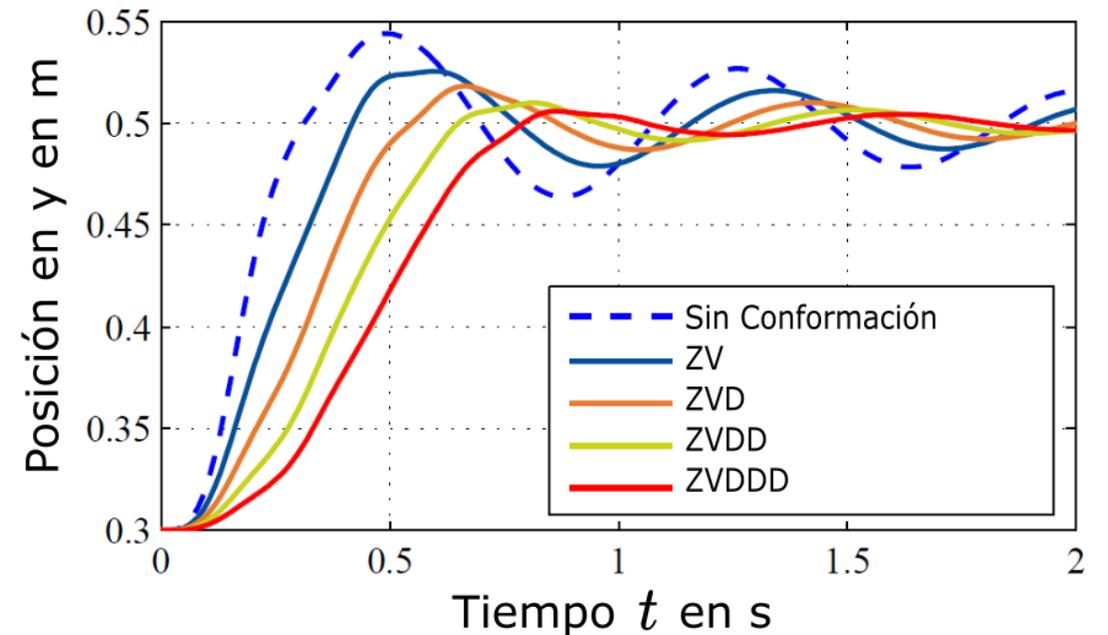
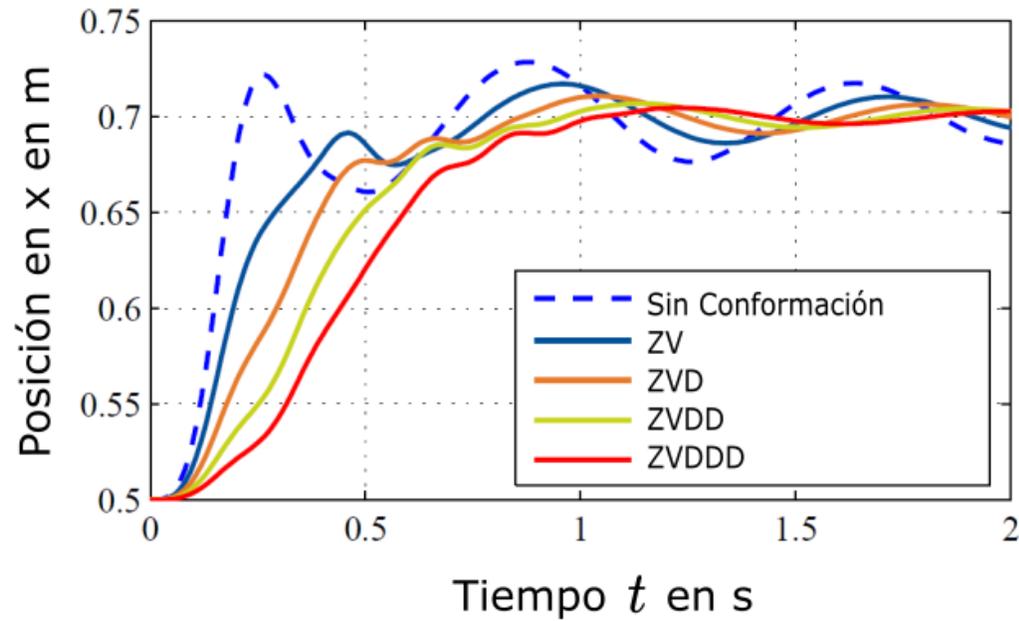
PRUEBA DE ROBUSTEZ



CONTROL DEL ROBOT

PRUEBA DE ROBUSTEZ

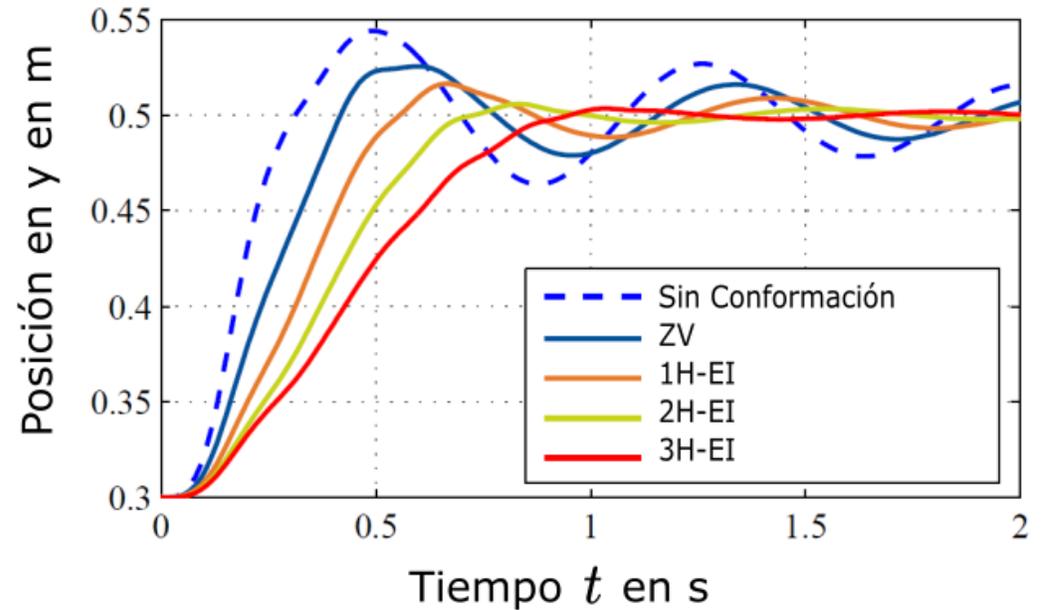
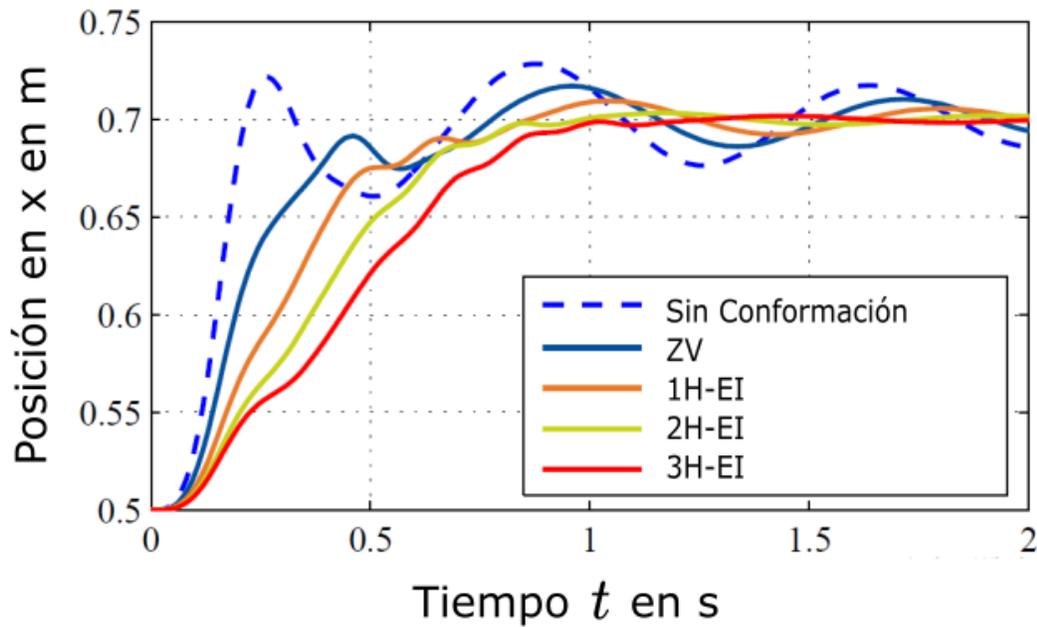
Respuestas con Conformadores Derivativos



CONTROL DEL ROBOT

PRUEBA DE ROBUSTEZ

Respuestas con Conformadores Extra Insensitivos

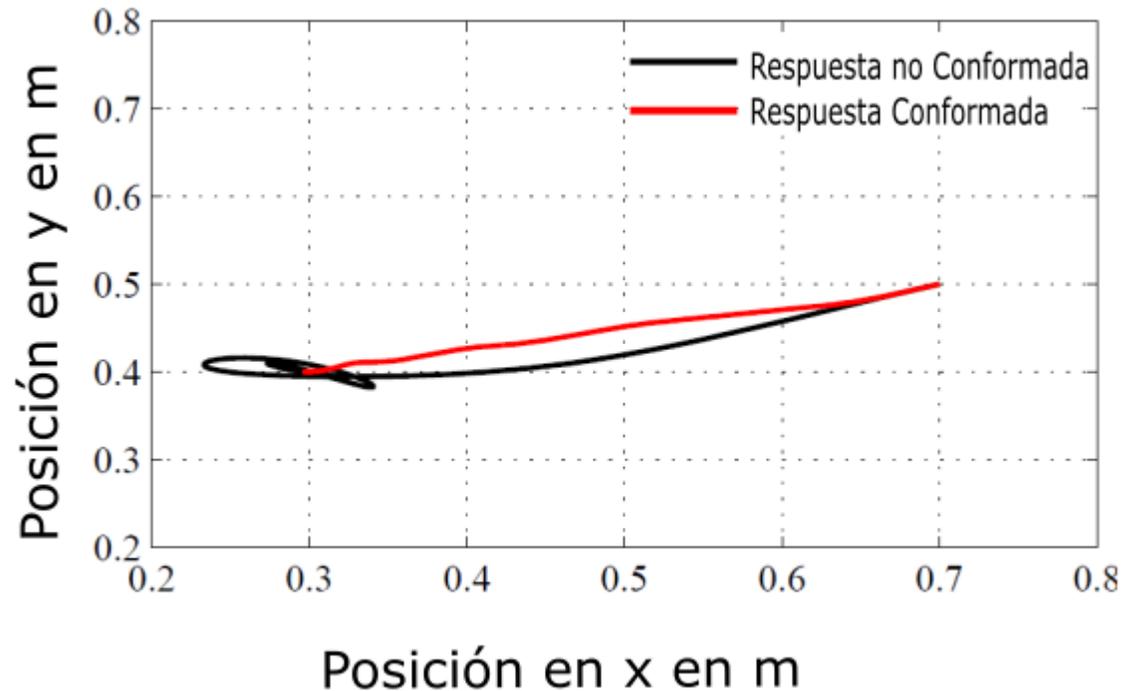


CONTROL DEL ROBOT

PRUEBA DE ROBUSTEZ

- Trayectoria

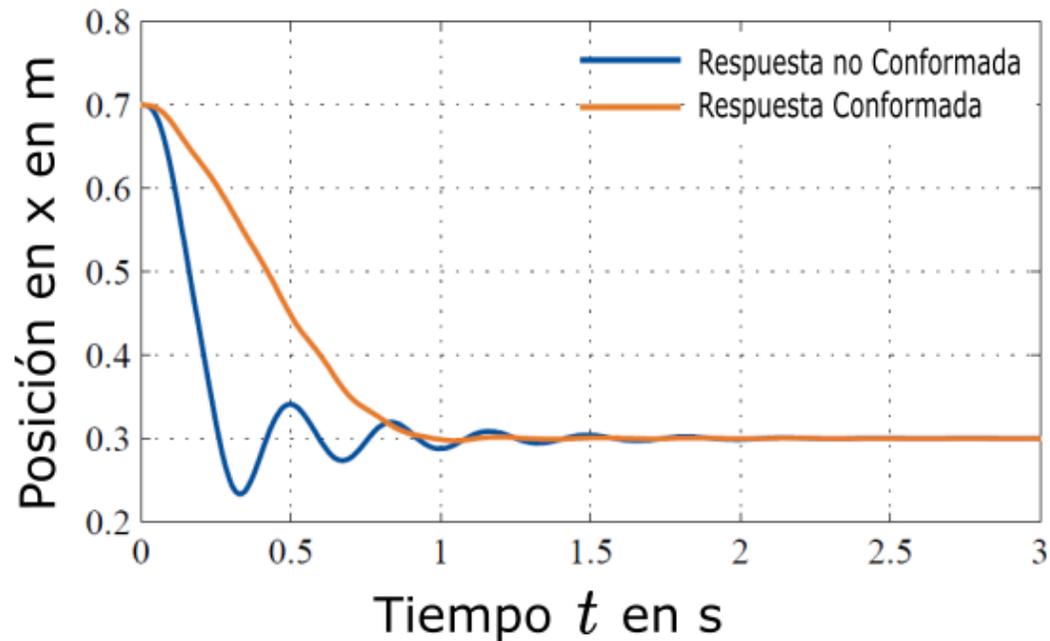
Reducción de sobre impulso:
95.44%



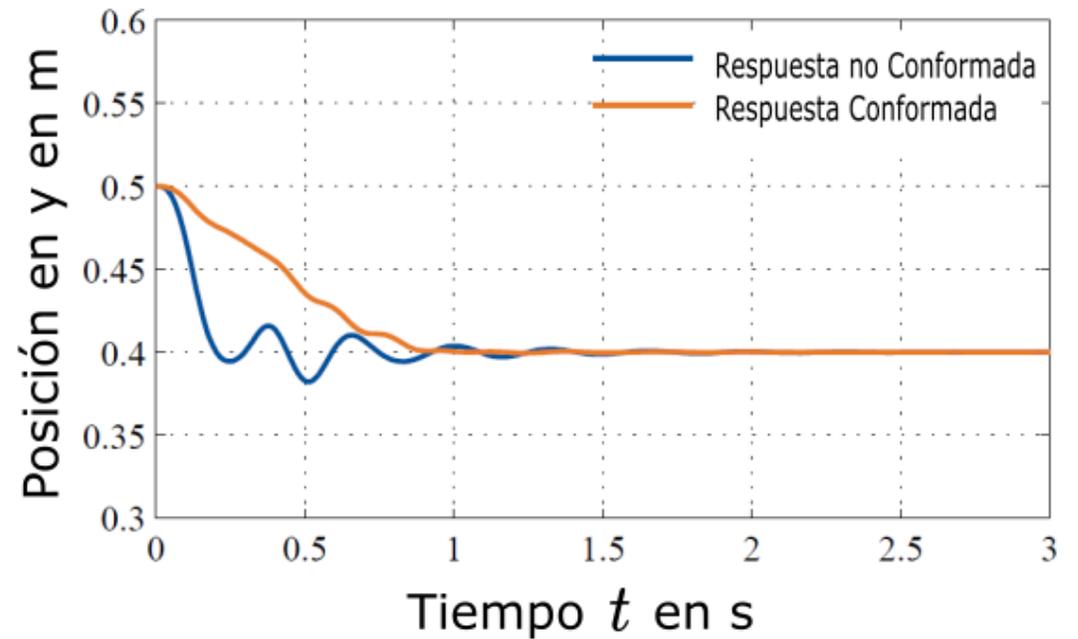
CONTROL DEL ROBOT

PRUEBA DE ROBUSTEZ

Respuesta en X



Respuesta en Y

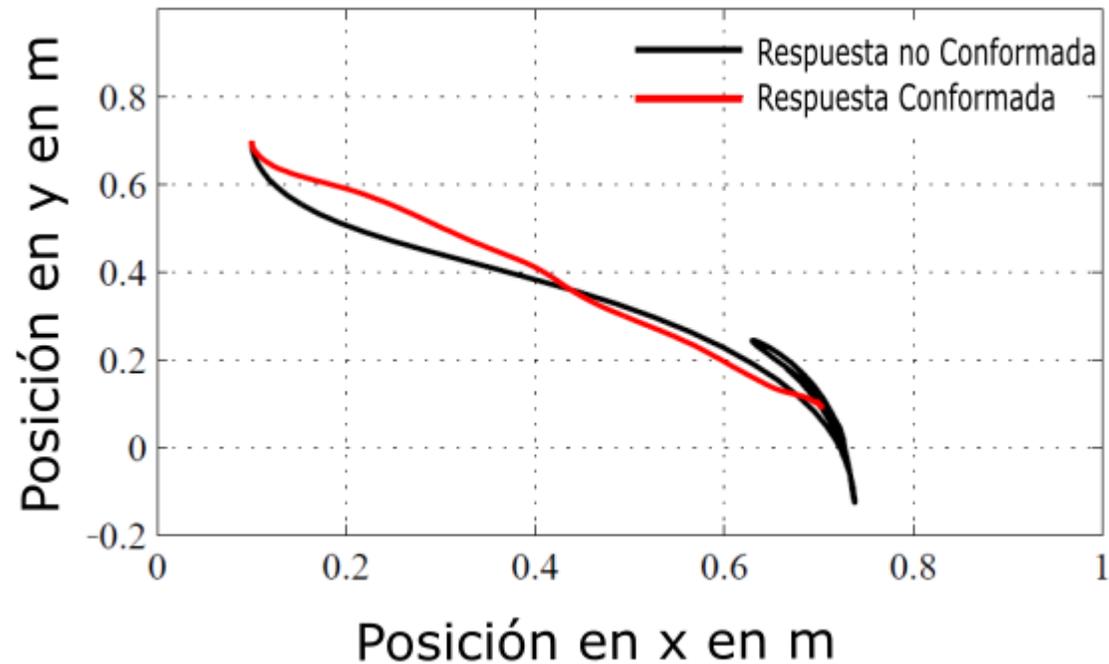


CONTROL DEL ROBOT

PRUEBA DE ROBUSTEZ

- Trayectoria

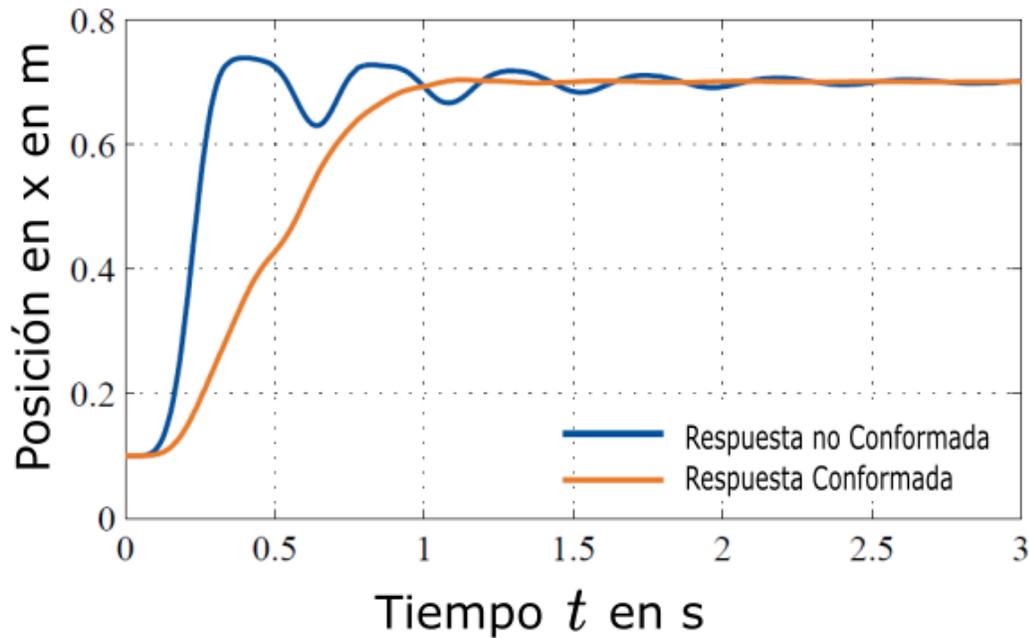
Reducción de sobre impulso:
95.96%



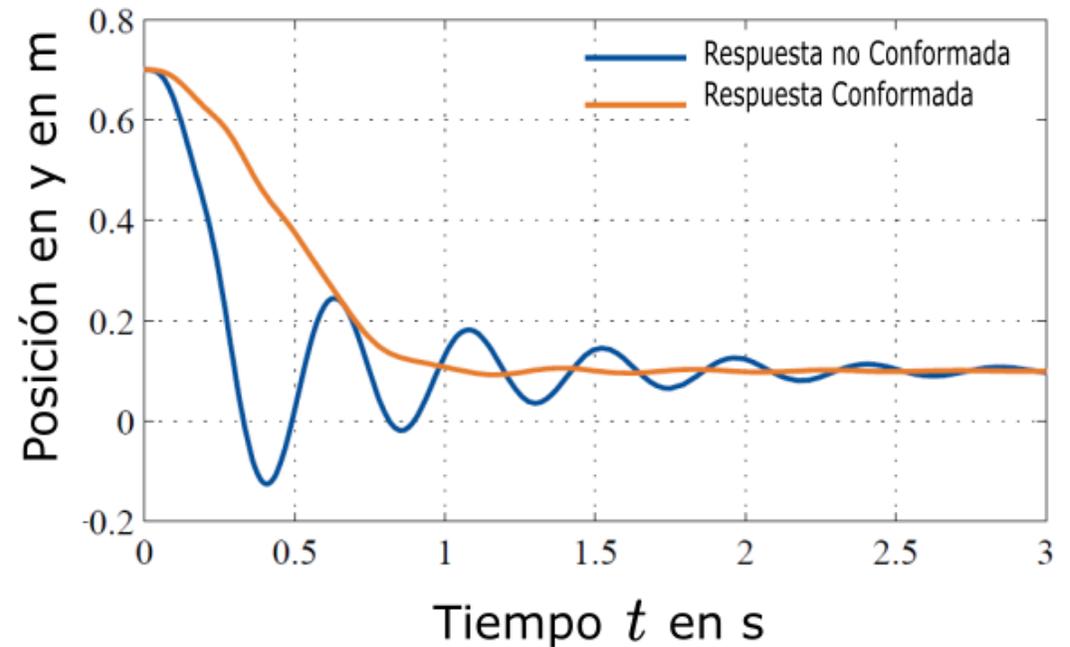
CONTROL DEL ROBOT

PRUEBA DE ROBUSTEZ

Respuesta en X



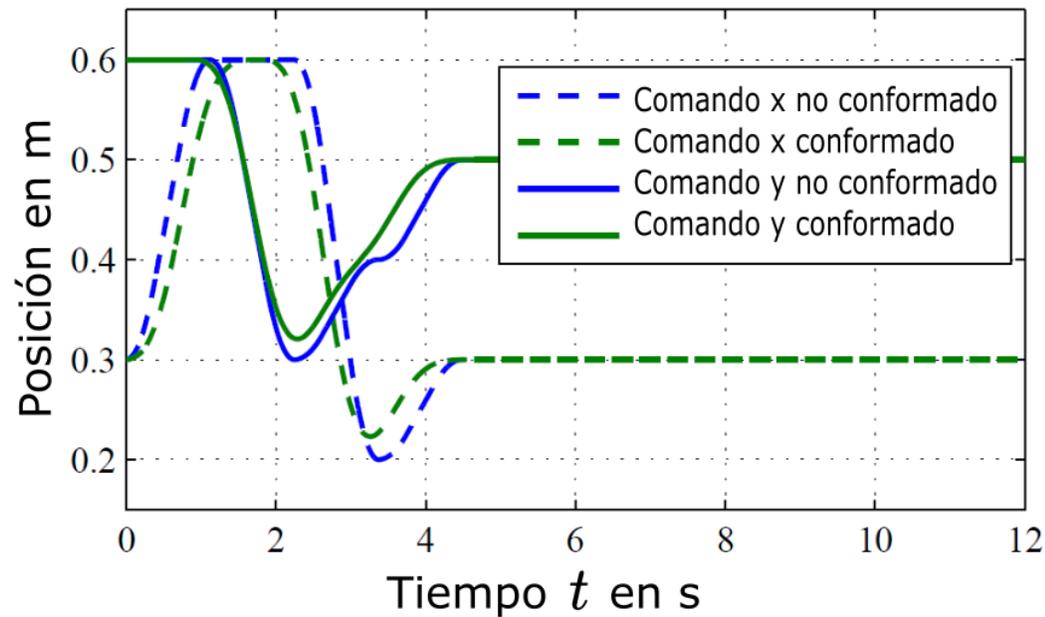
Respuesta en Y



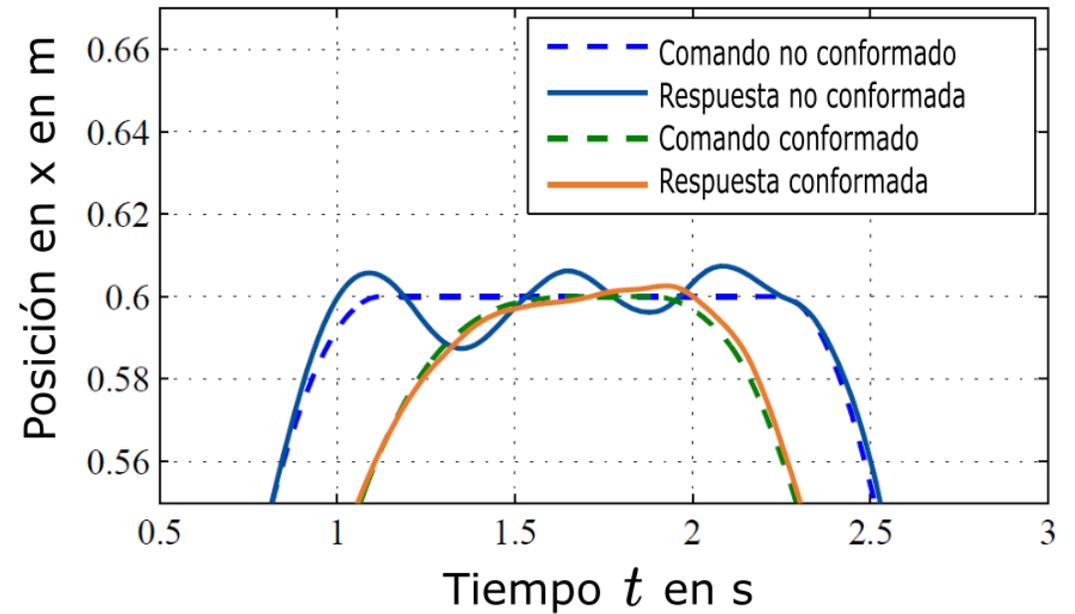
CONTROL DEL ROBOT

COMANDOS CON MISMA DURACIÓN

Comandos de Entrada



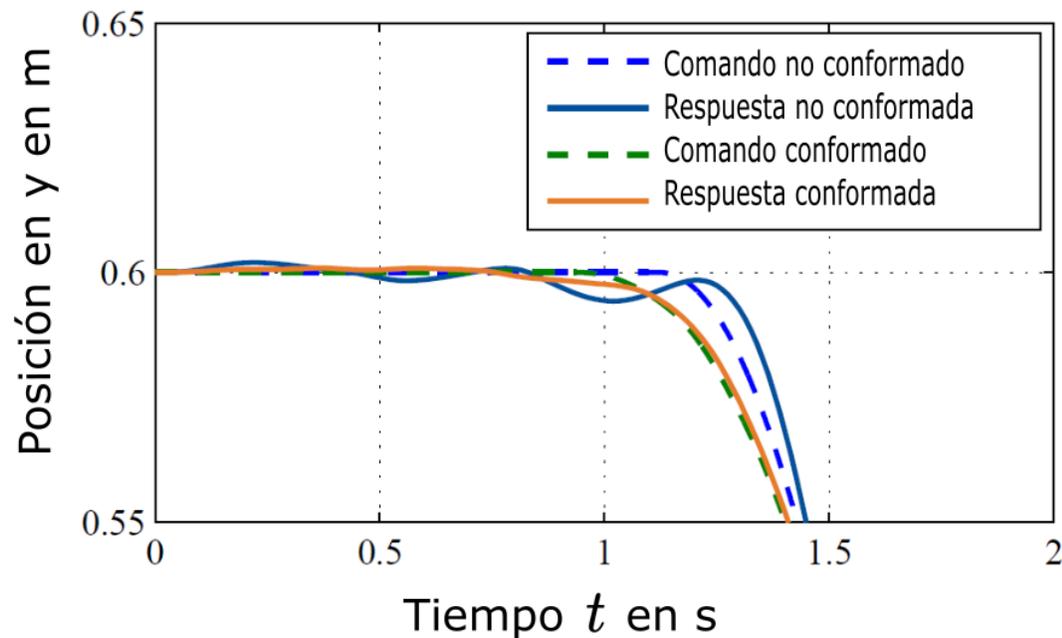
Respuestas en X



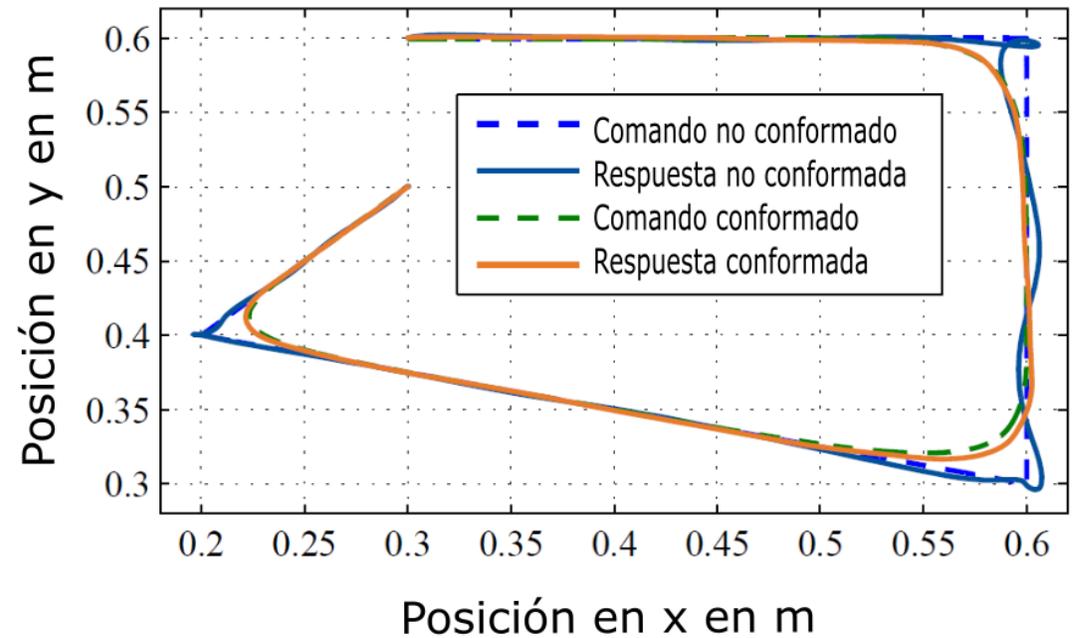
CONTROL DEL ROBOT

COMANDOS CON MISMA DURACIÓN

Respuestas en Y



Trayectoria



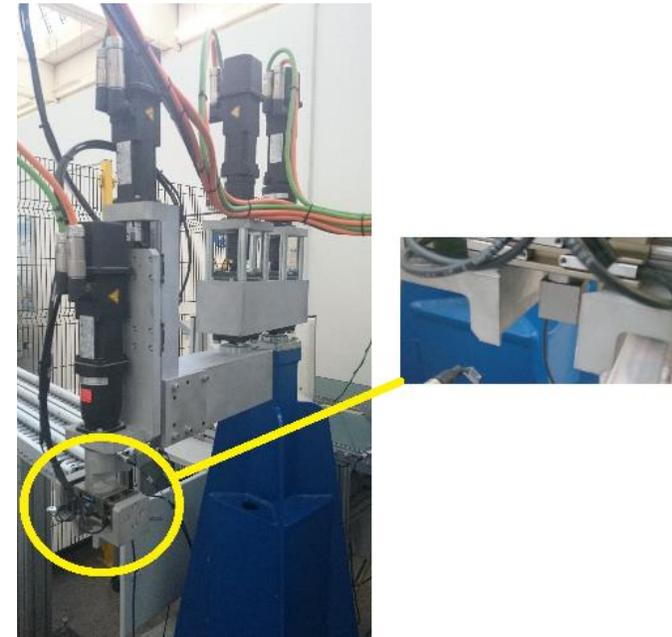
PRUEBAS Y RESULTADOS

MEDICIÓN DE PARÁMETROS

Acelerómetro



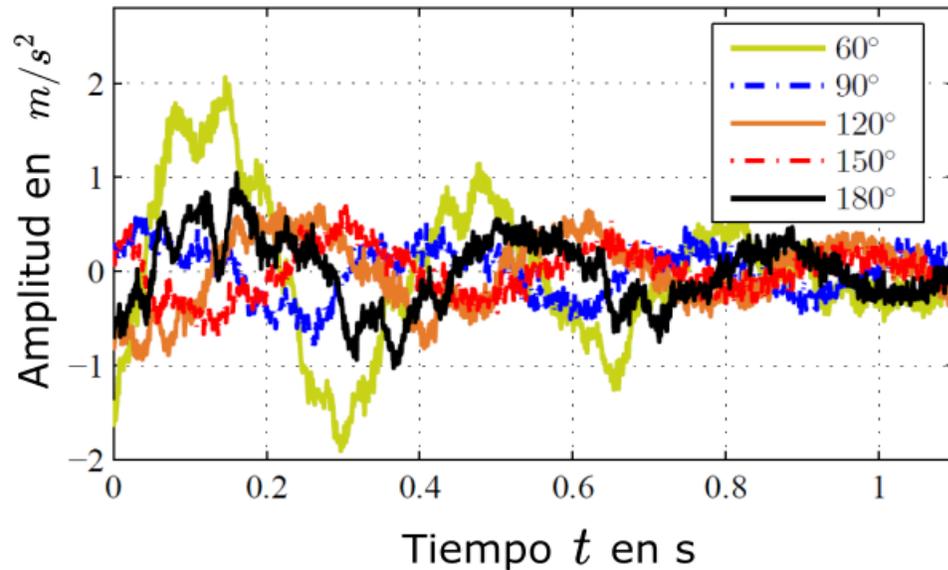
Acelerómetro en TCP



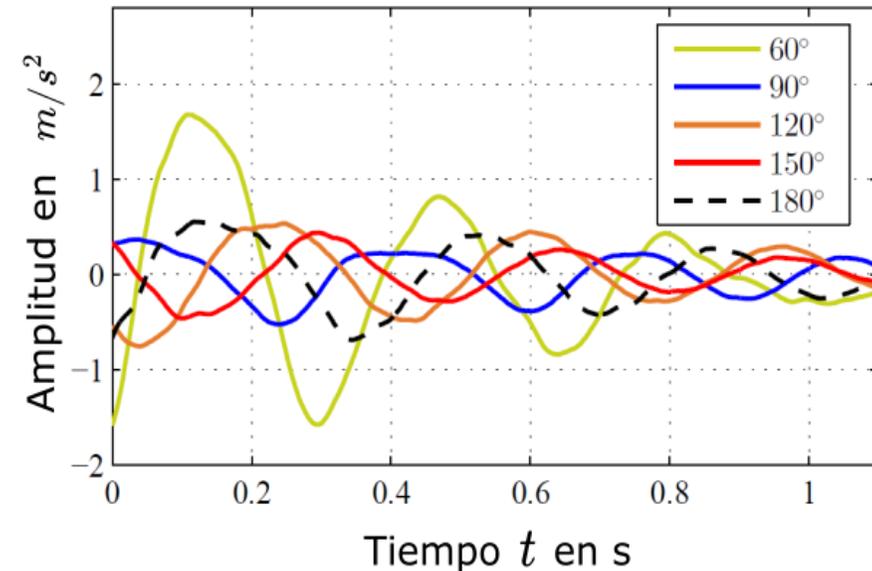
PRUEBAS Y RESULTADOS

ANÁLISIS DE DATOS

Aceleración residual medida en diferentes ángulos de θ_2



Datos de la aceleración después de ser filtrados por un filtro Savitzky-Golay

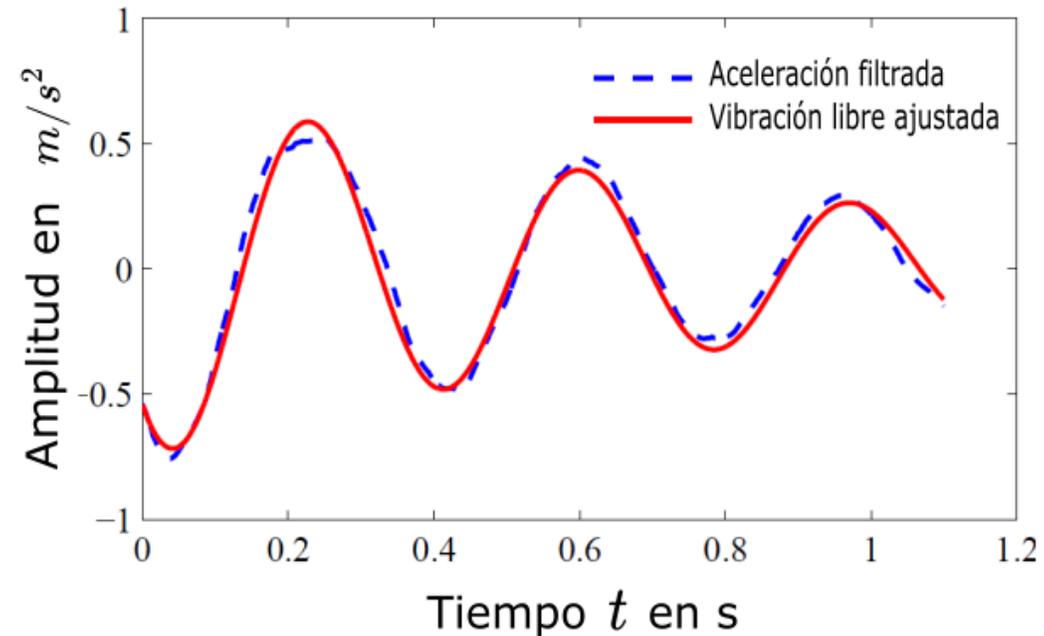


PRUEBAS Y RESULTADOS

CURVA AJUSTADA A ACELERACIÓN

- Ecuación de Aceleración Residual

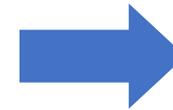
$$a(t) = C_1 e^{-\zeta\omega t} \cos(\omega_d t + \psi_1)$$



PRUEBAS Y RESULTADOS

VALORES MEDIDOS

Ángulo	ω en rad/s	ζ
60°	18.4	0.12
90°	17.6	0.08
120°	16.9	0.06
150°	16.9	0.07
180°	17.1	0.09



$$\omega = 17.68 \text{ rad/s} \pm 5\%$$

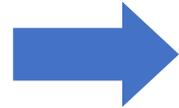
$$\zeta = 0.09 \pm 31\%$$



PRUEBAS Y RESULTADOS

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

$$G(s) = \frac{K_s \omega^2}{s^2 + 2\zeta \omega s + \omega^2}$$



- ZVD
- 1H-EI
- 3H-EI



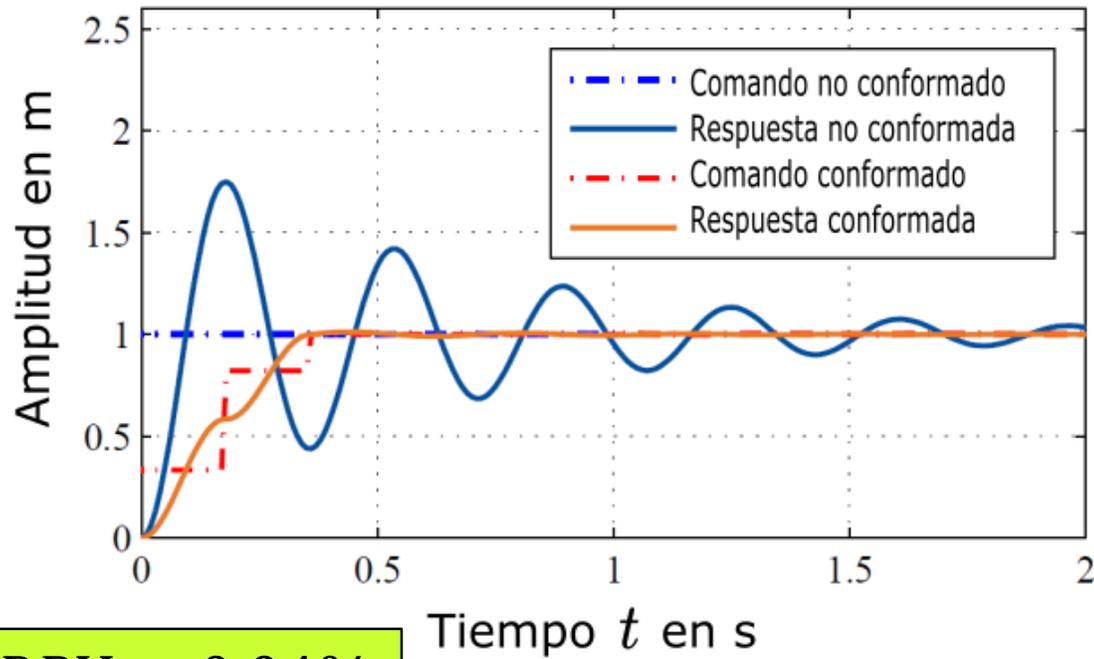
$$G(s) = \frac{312.52}{s^2 + 3.22 s + 312.52}$$



PRUEBAS Y RESULTADOS

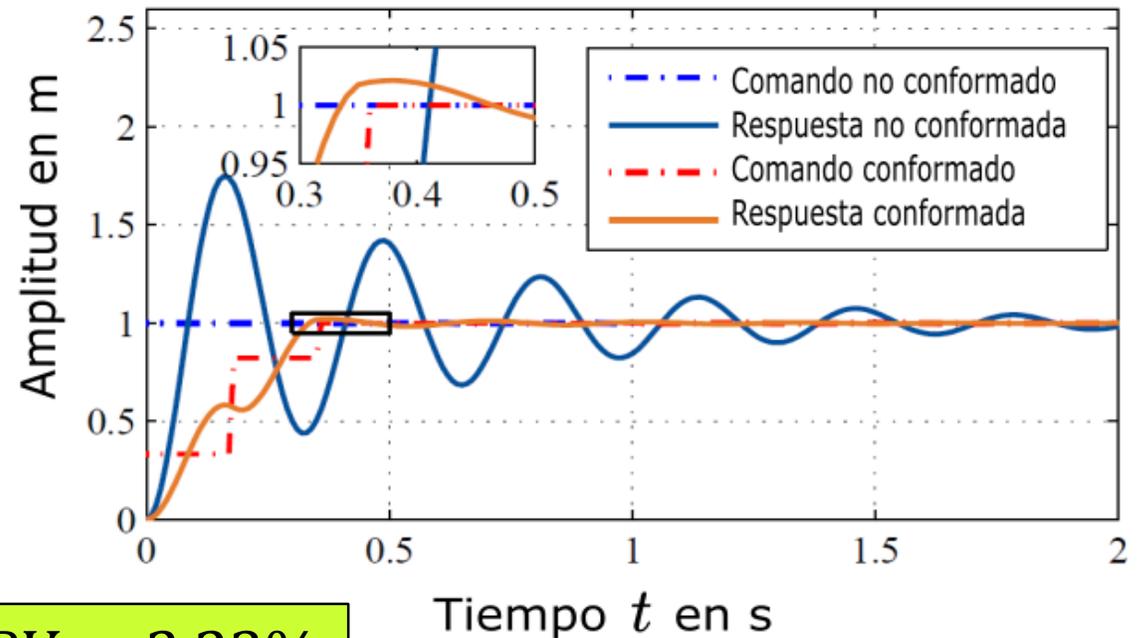
RESULTADOS DE CONFORMADOR ZVD

Frecuencia Natural Exacta



$PRV = 0.04\%$

Frecuencia Natural +10%



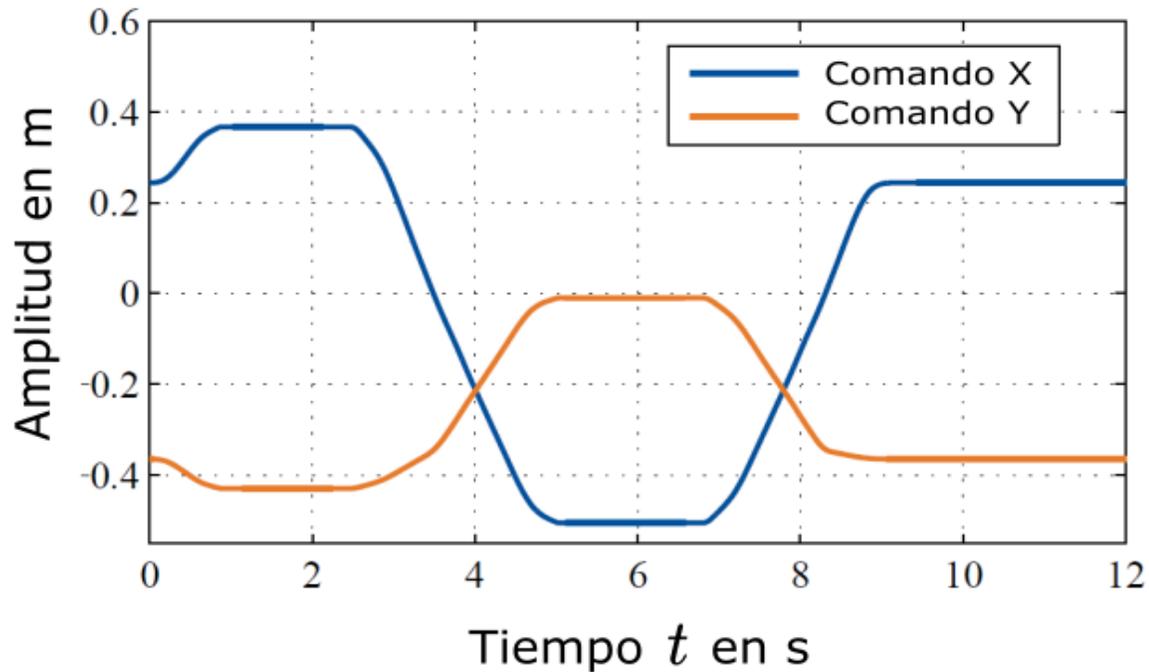
$PRV = 2.23\%$



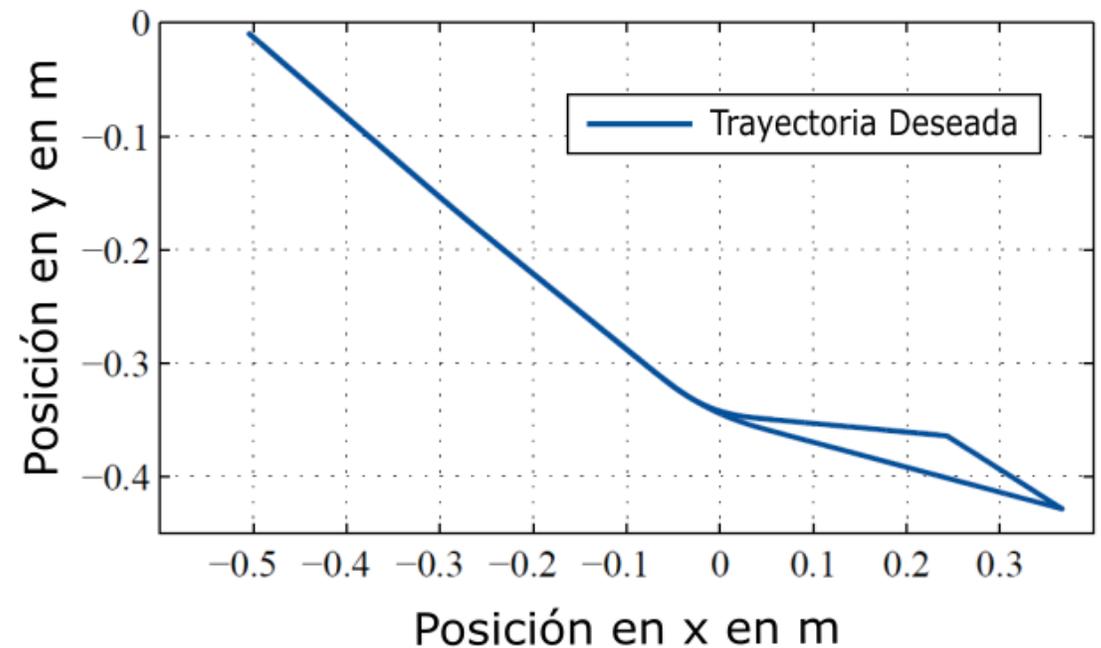
PRUEBAS Y RESULTADOS

PLANEACIÓN DE TRAYECTORIA

COMANDOS X Y Y



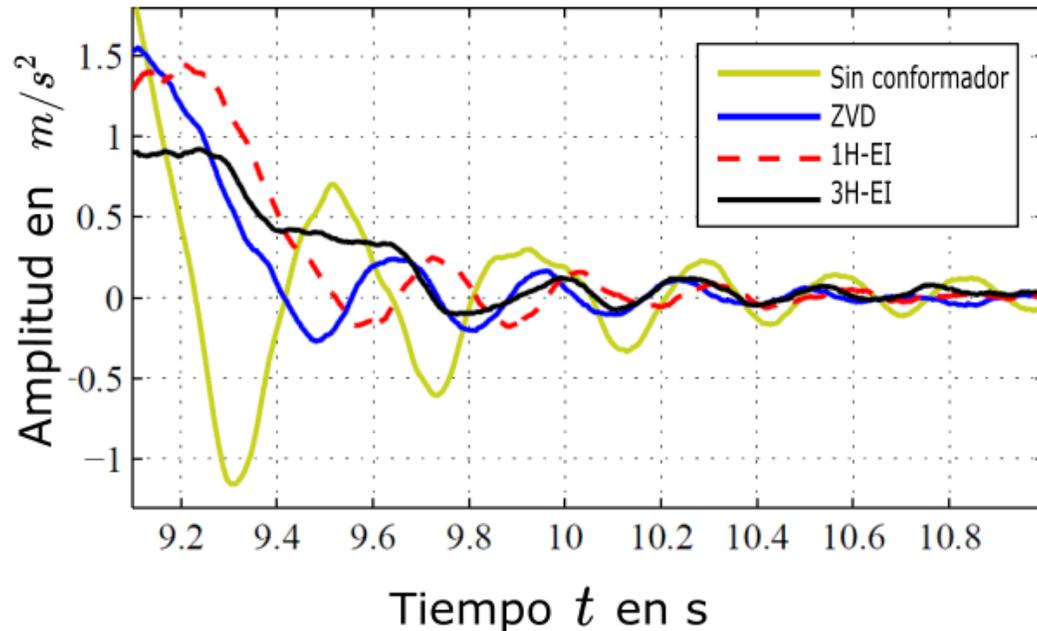
TRAYECTORIA



PRUEBAS Y RESULTADOS

RESULTADOS

ACELERACIÓN DEL TCP AL FINAL DEL MOVIMIENTO



Conformador	Retardo en s	Aceleración m/s^2	Porcentaje de Reducción de Aceleración en %
No Conformado	0	1.158	0
ZVD	0.168	0.2706	76.63
1H-EI	0.251	0.1719	85.15
3H-EI	0.451	0.1043	90.1



VIDEO

<https://youtu.be/NSiXylCixw4>



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

Las oscilaciones en robots pueden llevar a pérdidas en la calidad y tiempo en las líneas de producción. Una técnica económica para resolver este problema es la conformación de entrada.

El sensor acelerómetro puede ser utilizado para medir aceleraciones residuales y por lo tanto encontrar los valores para calcular los impulsos y tiempos de los conformadores.

La técnica ZVD fue aplicada al robot SCARA y para reducir aún más las oscilaciones se utilizaron otras técnicas, estas fueron 1H-EI y 3H-EI. Los resultados mostraron que con un conformador 3H-EI la aceleración residual es reducida a un 90.1%



CONCLUSIONES

Los conformadores
trabajaron apropiadamente
en los modelos
aproximados del robot

El sensor acelerómetro no
proporciona suficientes
datos como para calcular
una trayectoria aproximada
real del robot, por lo tanto
los datos no son adecuados
para demostrar la reducción
de oscilaciones durante la
ejecución de trayectorias

Cuando el robot realiza el
proceso de Pick and Place,
en sus posiciones
estacionarias, activa el
tercer y cuarto eje, además
del efector final, esto en
conjunto podría generar
oscilaciones y alterar los
resultados esperados.



RECOMENDACIONES

Si se encuentran más de una frecuencia en el robot, para mejorar el control, será necesario aplicar una técnica de conformación de entrada para varios modos de vibración

Si se requieren medidas mucho más precisas de la posición del TCP para crear un modelo más preciso, será necesario utilizar un acelerómetro con un giroscopio, con este sensor es posible medir trayectorias en el espacio.

Recordar que si el robot tiene características flexibles en sus eslabones, ya sea por la longitud de los mismos o por el material netamente flexible, el modelo propuesto en esta tesis no sería útil y debería modelarse la flexión en los eslabones.



RECOMENDACIONES

Para aplicar y estudiar las técnicas de conformación de entrada, es recomendable realizar trayectorias con cambio de dirección, pues los efectos de la técnica son más notorios.

Si las mediciones demuestran un cambio en la frecuencia dependiendo del ángulo de los actuadores del robot, las técnicas de conformación pueden modificarse dependiendo de las trayectorias a realizarse

Se recomienda utilizar un conformador con el doble de robustez de lo necesario teóricamente.



TRABAJO FUTURO

- El método llamado “Conformación de Entrada sin Retardo de Comandos para Movimientos Suaves de Robots Industriales” podría ser útil para eliminar el tiempo que aparece luego de la convolución en la señal de entrada. Los autores de este método aseguran inclusive que las trayectorias no sufren alteraciones.



MUCHAS GRACIAS

