

# Índice general

<b>1. Conceptos Preliminares</b>	<b>2</b>
1.1. Modos Deslizantes . . . . .	2
1.1.1. Introducción . . . . .	2
1.1.2. Ejemplo Introdutorio a los Modos Deslizantes . . . . .	3
1.2. Control Equivalente . . . . .	9
1.2.1. Introducción . . . . .	9
1.2.2. Propiedades del Control Equivalente . . . . .	11
1.3. Modos Deslizantes Integrales . . . . .	12
1.3.1. Introducción . . . . .	12
1.4. Algoritmo Super Twisting . . . . .	13
1.4.1. Introducción . . . . .	13
1.4.2. Propiedades del Super Twisting . . . . .	16
<b>2. Control de Posición</b>	<b>17</b>
2.0.3. Introducción . . . . .	17
2.0.4. Modelado de la Planta . . . . .	18
2.0.5. Diseño del Controlador . . . . .	19
2.0.6. Compensador de Perturbaciones por Modos Deslizantes . . . . .	21
2.1. Ganancia Variable . . . . .	23
2.1.1. Introducción . . . . .	23
2.1.2. Ley de Adaptación de Control por Modos Deslizantes . . . . .	24
2.2. Algoritmo Super Twisting . . . . .	24
2.2.1. Introducción . . . . .	24

2.2.2. Ley de Control . . . . .	25
<b>3. Planta</b>	<b>26</b>
3.1. Descripción de la Planta . . . . .	26
3.1.1. Implementación del Control en Tiempo-Real . . . . .	30
3.1.2. Motor . . . . .	30
3.1.3. Sensores . . . . .	31
<b>4. Modelado Matemático</b>	<b>32</b>
4.1. Modelo Matemático . . . . .	32
4.1.1. Representación en Espacio de Estados . . . . .	34
4.1.2. Modelo Matemático Reducido . . . . .	36
<b>5. Diseño del Controlador</b>	<b>38</b>
5.1. Control $v$ . . . . .	39
5.1.1. Configuración PID . . . . .	39
5.1.2. Configuración PD . . . . .	40
5.2. Control por Modos Deslizantes . . . . .	42
5.2.1. Modo Deslizante de Primer Orden . . . . .	42
5.2.2. Modo Deslizante de Primer Orden de Ganancia Variable . . . . .	43
5.2.3. Super Twisting . . . . .	45
5.3. Estimación de la Velocidad . . . . .	47
5.3.1. Diferenciador . . . . .	47
<b>6. Resultados Experimentales</b>	<b>50</b>
6.1. Primer Experimento . . . . .	50
6.2. Segundo Experimento . . . . .	58
<b>7. Conclusiones</b>	<b>64</b>
<b>A. Control Proporcional Integral Derivativo PID</b>	<b>67</b>
A.1. Sintonización PID . . . . .	68

B. Entorno Simulink

70

# Índice de figuras

1.	Equipo hidráulico experimental para pruebas de algoritmos de control por modos deslizantes [10] . . . . .	II
2.	Componentes electro-hidráulicos en una turbina de viento [15] . . . . .	III
3.	Vehículo de carga con equipo hidráulico [9] . . . . .	III
4.	Analogía del funcionamiento de un cilindro hidráulico con un sistema masa resorte [9] . . . . .	V
1.1.	Movimiento uni-dimensional de una masa unitaria . . . . .	3
1.2.	Convergencia asintótica para $f(x_1, x_2, t) \equiv 0$ . . . . .	4
1.3.	Convergencia al dominio $\Omega$ para $f(x_1, x_2, t) = \sin 2t$ . . . . .	4
1.4.	Variable deslizante . . . . .	8
1.5.	Convergencia asintótica para $f(x_1, x_2, t) = \sin 2t$ . . . . .	8
1.6.	Plano de fase . . . . .	9
1.7.	Acercamiento en el plano de fase . . . . .	9
1.8.	Control por modos deslizantes (SMC) . . . . .	10
1.9.	Acercamiento al control por modos deslizantes (SMC) . . . . .	10
1.10.	Estimación del control equivalente . . . . .	12
1.11.	Estimación de la perturbación . . . . .	12
1.12.	Variable deslizante $\sigma$ . . . . .	15
1.13.	Control Super Twisting . . . . .	15
1.14.	Seguimiento de la trayectoria . . . . .	15
3.1.	Sistema masa-amortiguador-resorte Modelo 210 de ECP . . . . .	26
3.2.	Sistema Experimental de Control . . . . .	27
3.3.	Descripción del Sistema Físico . . . . .	28

3.4. Componentes del sistema 210 de ECP . . . . .	29
3.5. Vista transversal de un motor típico de DC sin escobillas (cuatro polos) . . .	31
3.6. Principio de Operación de un Encoder Óptico Incremental . . . . .	31
4.1. Diagrama de bloques del sistema masa-resorte-amortiguador . . . . .	32
4.2. Diagrama de cuerpo libre de la masa 1 . . . . .	33
4.3. Diagrama de cuerpo libre de la masa 2 . . . . .	33
4.4. Diagrama de Bloques del Sistema dividido en dos secciones . . . . .	36
4.5. Diagrama de bloque reducido considerando perturbaciones . . . . .	37
5.1. Oscilaciones sostenidas obtenidas experimentalmente aplicando el segundo método de Ziegler-Nichols con $K_{cr} = 2796$ y $P_{cr} = 0.2[s]$ . . . . .	39
5.2. Diagrama del Control $v$ con configuración PID en Simulink . . . . .	40
5.3. Frecuencia natural del sistema en función de la masa . . . . .	41
5.4. Respuesta escalón de $G(s)$ para distintos valores de $\omega_n$ . . . . .	41
5.5. Diagrama del Control $v$ con configuración PD en Simulink . . . . .	42
5.6. Superficie deslizante $s$ correspondiente a una ganancia $L = 9$ . . . . .	42
5.7. Diagrama del controlador SMC de primer orden en Simulink . . . . .	43
5.8. Diagrama del controlador SMC de primer orden de ganancia variable en Simulink	43
5.9. Diagrama de la adaptación de ganancia Simulink . . . . .	44
5.10. Superficie $s$ y ganancia adaptable $L$ . . . . .	44
5.11. Diagrama del controlador SMC Super Twisting en Simulink . . . . .	45
5.12. Diagrama del controlador Super Twisting con filtro en Simulink . . . . .	45
5.13. Diagrama del bloque Super Twisting sin filtro en Simulink . . . . .	46
5.14. Superficie $s$ para Super Twisting con y sin filtro paso-bajas . . . . .	46
5.15. Comparación de la velocidad estimada en el sistema y la respuesta simulada de la función de transferencia $G(s)$ . . . . .	48
5.16. Diagrama del Diferenciador en Simulink . . . . .	49
5.17. Diagrama del Diferenciador Numérico basado en el Método de la Secante en Simulink . . . . .	49
5.18. Diagrama del Diferenciador de Levant en Simulink . . . . .	49

6.1. Comparación de la posición alcanzada con los distintos algoritmos de control a una referencia dada de 1 [cm] . . . . .	51
6.2. Zoom de la posición en la respuesta transitoria . . . . .	51
6.3. Zoom de la posición en el estado permanente . . . . .	52
6.4. Error $e$ . . . . .	53
6.5. Zoom Error $e$ . . . . .	53
6.6. Velocidades del sistema . . . . .	54
6.7. Zoom de las velocidades del sistema . . . . .	54
6.8. Control $v$ . . . . .	55
6.9. Zoom del control $v$ . . . . .	56
6.10. Control $u$ . . . . .	56
6.11. Zoom del control $u$ . . . . .	57
6.12. Comparación de la posición alcanzada con los distintos algoritmos de control a una referencia dada de 1 [cm], en presencia de perturbaciones . . . . .	58
6.13. Zoom de la posición en la respuesta transitoria . . . . .	59
6.14. Zoom de la posición en el estado permanente . . . . .	60
6.15. Velocidades del sistema . . . . .	60
6.16. Zoom de las velocidades del sistema . . . . .	61
6.17. Control $v$ . . . . .	61
6.18. Zoom del control $v$ . . . . .	62
6.19. Control $u$ . . . . .	62
6.20. Zoom del control $u$ . . . . .	63
A.1. Oscilaciones sostenidas aplicando el método de lazo cerrado de Ziegler-Nichols	68
A.2. Curva de respuesta en forma de $S$ aplicando el método de lazo abierto de Ziegler-Nichols . . . . .	69
B.1. Parámetros de Configuración del RTW . . . . .	70
B.2. Bloque de Reset en Simulink . . . . .	71
B.3. Diagrama de la planta en Simulink . . . . .	71