

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
1.1. Generalidades . . . . .	7
1.1.1. Rueda de inercia . . . . .	7
1.1.2. Rodamientos . . . . .	7
1.2. Motivación del trabajo . . . . .	9
1.3. Objetivos . . . . .	10
<b>2. Modelo matemático del sistema</b>	<b>11</b>
2.1. Modelo de la rueda de inercia . . . . .	12
2.1.1. Dinámica de traslación . . . . .	13
2.1.2. Dinámica de rotación . . . . .	14
2.2. Modelo del actuador . . . . .	21
2.2.1. Principio electrodinámico . . . . .	21
2.2.2. Distribución espacial de las bobinas . . . . .	21
2.2.3. Circuitos magnéticos . . . . .	21
2.2.4. Fuerzas y torques generados . . . . .	21
2.2.5. Dinámica de las bobinas . . . . .	25
2.3. Modelo de los sensores . . . . .	25
2.3.1. Distribución espacial de los sensores . . . . .	26
2.3.2. Tipos de sensores . . . . .	26
2.3.3. Sensado axial . . . . .	28
2.3.4. Sensado radial . . . . .	29
<b>3. Realimentación de la planta</b>	<b>31</b>
3.1. Realimentación de la dinámica de traslación . . . . .	31
3.1.1. Diseño del regulador . . . . .	31
3.1.2. Ubicación deseada de los polos a lazo cerrado . . . . .	33
3.1.3. Ancho de banda . . . . .	34
3.2. Realimentación de la dinámica de rotación . . . . .	35
3.2.1. Diseño del regulador . . . . .	35
3.2.2. Casos particulares de realimentación (con $K_{dc} = 0$ ) . . . . .	37
3.2.3. Ancho de banda . . . . .	42
3.2.4. Entrada de referencia . . . . .	45
3.3. Estrategias de control . . . . .	47
3.3.1. Desacoplado . . . . .	48
3.3.2. Acoplado - 2 modos . . . . .	48
3.3.3. Acoplado - combinado . . . . .	49

<b>4. Análisis de perturbaciones</b>	<b>51</b>
4.1. Fuerzas no inerciales . . . . .	52
4.1.1. Rechazo a perturbación de traslación . . . . .	53
4.2. Torques no inerciales . . . . .	54
4.2.1. Rechazo a perturbación de rotación . . . . .	55
4.3. Desbalanceo de la Rueda . . . . .	57
4.3.1. Desbalanceo estático . . . . .	57
4.3.2. Desbalanceo dinámico . . . . .	59
4.3.3. Ruido generado por el desbalanceo . . . . .	61
4.3.4. Supresión activa de ruido mediante banda muerta . . . . .	61
<b>5. Simulaciones</b>	<b>63</b>
5.1. Sistema simulado . . . . .	63
5.2. Simulación de la dinámica de traslación . . . . .	65
5.3. Simulaciones de la dinámica de rotación . . . . .	66
5.4. Pérdida del control . . . . .	69
5.4.1. Choque de traslación . . . . .	71
5.4.2. Choque de rotación . . . . .	72
5.5. Consumo de potencia . . . . .	72
<b>6. Implementación práctica del controlador</b>	<b>75</b>
6.1. Descripción del controlador . . . . .	75
6.2. Formas de implementación . . . . .	76
6.3. Implementación digital . . . . .	78
6.3.1. Discretización de las leyes de control . . . . .	78
6.3.2. Frecuencia de muestreo . . . . .	79
6.3.3. Cuantización y Punto Fijo . . . . .	80
6.3.4. Ganancias del controlador . . . . .	81
6.3.5. Filtro de derivada temporal . . . . .	82
6.4. Muestreo. Conversión frecuencia $\rightarrow$ digital . . . . .	84
6.4.1. Sensores utilizados . . . . .	84
6.4.2. Análisis frecuencial de la conversión $f \rightarrow d$ . . . . .	85
6.5. Etapa de potencia . . . . .	86
6.5.1. Modulación de ancho de pulso (PWM) . . . . .	87
6.6. Realimentación de la corriente . . . . .	88
6.6.1. Estimador de corriente . . . . .	89
<b>7. Ensayos y mediciones en modelo real</b>	<b>91</b>
7.1. Calibración de los sensores y del frecuencímetro . . . . .	91
7.2. Caracterización del actuador . . . . .	91
7.3. Diagramas de Bode de los compensadores . . . . .	94
<b>8. Conclusiones</b>	<b>97</b>
8.1. Trabajo a futuro . . . . .	99
<b>Índice de figuras</b>	<b>101</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>103</b>