

INDICE

0	Indice	i
1	Introducción	1
	1.1 Preámbulo	1
	1.2 Objetivo de la tesis	3
	1.3 Organización de la tesis	4
2	Estado del Arte	7
	2.1 Los elementos estructurales flexibles en movimiento	7
	2.1.1 La viga de Euler-Bernoulli giratoria	8
	2.1.2 La viga de Timoshenko giratoria	10
	2.1.3 Aplicación de los elementos finitos a los elementos estructurales flexibles	19
	2.2 Accionamiento de los elementos estructurales flexibles	20
	2.3 Control del accionamiento de los elementos estructurales flexibles	23
	2.4 Los elementos no lineales	26
	2.5 Modelización: Bond Graph	27
	2.6 Temas afines	28
3	Consideraciones teóricas	33
	3.1 Ecuaciones del movimiento de un sólido rígido giratorio accionado mediante un actuador lineal	33
	3.1.1 Análisis geométrico	33
	3.1.2 Análisis cinemático	34
	3.1.3 Análisis dinámico: ecuación de Lagrange	35
	3.1.4 Análisis dinámico: potencias virtuales	36
	3.2 Ecuaciones del movimiento de una viga flexible giratoria. Planteamiento general	37
	3.2.1 Hipótesis utilizadas	38
	3.2.2 Cinemática de un punto de la viga	39
	3.2.3 Cinemática de la carga en el extremo de la barra flexible	40

3.2.4 Dinámica de la viga flexible	41
3.2.5 Efecto de las fuerzas centrífuga y de Coriolis	42
3.2.6 Ecuaciones de Lagrange	43
3.2.7 Deducción de las ecuaciones de Lagrange	44
3.3 Ecuaciones del movimiento de una viga de Euler Bernoulli giratoria, sin masa en el extremo	50
3.3.1 Hipótesis utilizadas	50
3.3.2 Deducción de las ecuaciones de lagrange	51
3.3.3 Obtención de los modos propios	53
3.3.4 Estudio de los modos propios con Maple	55
3.3.5 Aplicaciones numéricas con Maple	59
3.3.5.1 Efecto del coeficiente Kprop del servosistema	59
3.3.5.1 Efecto de la posición del actuador lineal	61
4 Modelización del sistema	63
4.0 Introducción	63
4.1 Simulación analógica	63
4.2 Simulación numérica	64
4.2.1 Simulación analógica digital	64
4.2.2 Simuladores específicos	65
4.2.2.1 Simuladores multidisciplinares	66
4.2.3 Simulación física	66
4.2.4 Elección del programa	68
4.3 Descripción del modelo	68
4.3.1 Viga flexible	69
4.3.2 Subsistema oleohidráulico	71
4.3.2.1 Central Oleohidráulica	71
4.3.2.1.1 Bomba	73
4.3.2.1.2 Válvula limitadora de presión	73
4.3.2.1.3 Compresibilidad del fluido hidráulico	74
4.3.2.2 Servoválvula	75
4.3.2.3 Actuador lineal	81
4.3.2.4 Servoamplificador	83
4.3.3 Modelo global	83

4.4	Caracterización de parámetros	84
4.5	Simulaciones efectuadas	87
4.5.1	Caracterización del sistema en lazo abierto	87
4.5.1.1	Efecto de la modificación del canto de la viga flexible	88
4.5.1.2	Efecto de la modificación del material de la viga flexible	92
4.5.1.3	Efectos de la modificación de la posición del actuador lineal	94
4.5.1.4	Efecto de la presión de alimentación	100
4.5.1.5	Efecto del área del actuador lineal	103
4.5.1.6	Efecto del caudal nominal de la servoválvula	109
4.5.1.6	Efecto del conjunto servoválvula-actuador lineal	115
4.5.1.7	Efecto del rozamiento en el actuador lineal	120
4.5.1.8	Efecto de las fugas en el actuador lineal	126
4.5.2	Caracterización del sistema con el servoamplificador hidráulico	132
4.5.3	Respuesta del sistema en lazo cerrado	134
5	Descripción del banco de pruebas	141
5.1	Introducción	141
5.2	Descripción de los elementos mecánicos	142
5.2.1	Sólido elástico	142
5.2.2	Actuador lineal MOOG 32/22/22 x 150	143
5.2.3	Servoválvula Moog D760-232	144
5.2.4	Transductor de posición LVDT	148
5.2.5	Descripción del sistema hidráulico	150
5.2.5.1	Bomba	151
5.2.5.2	Válvula limitadora de presión	151
5.2.5.1	Válvula de control de caudal	152
5.2.5.1	Válvula reductora de presión	153
5.2.5.1	Válvula de control direccional	153
5.3	Descripción de los elementos eléctricos	154
5.3.1	Acelerómetros Kistler K-Beam	154
5.3.2	Tarjetas de adquisición de datos	157
5.3.3	Sistema de filtrado	158

5.4	Descripción de los programas de adquisición de datos y de control	162
6	Caracterización experimental de una viga flexible accionada mediante un servoactuador oleohidráulico	163
6.1	Métodos experimentales de análisis de la respuesta de un sistema	163
6.2	Obtención experimental de la respuesta frecuencial del sistema	164
6.2.1	Captura de datos	164
6.2.2	Almacenamiento de datos	167
6.2.3	Exportación de datos a Matlab	168
6.2.4	Tratamiento de datos bajo entorno Matlab	168
6.3	Estimación de la función de transferencia del sistema	177
7	Estudio experimental de las estrategias de control	189
7.1	Estudio de las estrategias de control	189
7.2	Objetivo del sistema de control	190
7.3	Montaje del sistema de Control	190
7.4	Comportamiento del sistema en lazo abierto	192
7.5	Estudio de las estrategias de control	196
7.5.1	Estrategia 1	196
7.5.2	Estrategia 2	200
7.5.2.1	Sintonización del controlador mediante simulación	202
7.5.2.	Sintonización del controlador experimentalmente	202
7.5.3	Estrategia 3	207
7.6	Determinación de los parámetros de evaluación	217
8	Conclusiones	223
8.1	Estudio teórico	223
8.2	Simulación	227
8.3	Estudio experimental	229
8.4	Estrategias de control	231
8.5	Recapitulación final	231
8.6	Futuras ampliaciones	233
9	Bibliografía	235

Anexos		241
Anexo 1.1	Nomenclatura	243
A1.1	Nomenclatura	243
A1.2	Definiciones	245
Anexo 3.1	Deducción de las ecuaciones del movimiento de un sólido rígido giratorio accionado mediante un actuador lineal	247
Anexo 3.2	Comparación numérica de los resultados obtenidos al estimar la fuerza que ha de hacer el actuador, aplicando Lagrange y potencias virtuales	251
Anexo 3.3	Expresión de la energía cinética de la carga	257
Anexo 3.4	Deducción de las ecuaciones del movimiento de una viga de Timoshenko giratoria	259
Anexo 3.5	Deducción de las ecuaciones del movimiento de una viga de Euler-Bernoulli giratoria	291
Anexo 3.6	Determinación de las frecuencias propias una viga de Euler-Bernoulli	301
Anexo 5.1	Descripción de las tarjetas de captura de datos	322
A5.1.1	Tarjeta PCI-1200	322
A5.1.1	Tarjeta PCI-6035E	327
Anexo 6.1	Descripción de los programas utilizados para caracterizar el sistema viga flexible/actuador	330
A6.1.1	Introducción	330
A6.1.2	Diseño de los programas de captura y generación de señales	332
A6.1.3	Descripción del programa de captura y generación de señales	334
Anexo 7.1	Descripción de los programas utilizados para controlar el sistema viga flexible/actuador	350
Anexo 7.2	Documentación multimedia	359