

# Índice general

<b>1. Motivación y objetivos</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivos de la tesis . . . . .	6
1.3. Contribución de la tesis . . . . .	7
1.4. Estructura del documento . . . . .	7
<b>2. Estado del arte</b>	<b>9</b>
2.1. Introducción . . . . .	10
2.2. Modelado del sistema Músculo-Esquelético . . . . .	12
2.2.1. Disecciones del miembro inferior . . . . .	17
2.2.2. Software de modelado . . . . .	21
2.3. Uso de los modelos Músculo-Esqueléticos en rehabilitación . . . . .	24
2.4. Robots de rehabilitación . . . . .	28
2.4.1. Robots paralelos para rehabilitación . . . . .	30
2.4.2. Modelos ME para el control de Robots . . . . .	31
<b>3. Modelo Músculo-esquelético del miembro inferior</b>	<b>35</b>
3.1. Introducción . . . . .	36
3.2. Justificación de la movilidad del modelo propuesto . . . . .	37
3.3. Modelado . . . . .	38
3.3.1. Sistemas de referencia de los segmentos . . . . .	40
3.3.2. Parámetros de Denavit-Hartenberg . . . . .	41
3.3.3. Definición de las articulaciones . . . . .	43

3.4. Cinemática . . . . .	46
3.4.1. Parámetros inerciales y escalado de los segmentos . . . . .	53
3.4.2. Escalado de los músculos . . . . .	54
3.4.3. Enrollamiento de los músculos . . . . .	55
3.4.4. Coeficiente patelar . . . . .	60
3.5. Dinámica Inversa . . . . .	64
3.5.1. Cálculo de los jacobianos . . . . .	67
3.5.2. Cálculo de los factores musculares . . . . .	67
3.5.3. Cálculo de las fuerzas musculares . . . . .	69
<b>4. Implementación en tiempo real del Modelo ME</b>	<b>75</b>
4.1. Introducción . . . . .	76
4.2. Grado de libertad funcional . . . . .	77
4.3. Cálculo de los coeficientes musculares . . . . .	80
4.4. Cálculo de las fuerzas musculares en tiempo real . . . . .	81
4.5. Estructura programa . . . . .	83
4.5.1. Escalado y definición de las articulaciones . . . . .	83
4.5.2. Cálculo del GDLF y los coeficientes musculares . . . . .	85
4.5.3. Cálculo de las fuerzas musculares en tiempo real . . . . .	86
<b>5. Proceso de validación del modelo</b>	<b>87</b>
5.1. Introducción . . . . .	88
5.2. Comparación con “Gold Standard” . . . . .	91
5.2.1. Modelo en AnyBody . . . . .	92
5.2.2. Comparación cinemática y dinámica de las articulaciones . . . . .	92
5.2.3. Comparación de las fuerzas muscular . . . . .	94
5.2.4. Conclusiones comparación “Gold Standard” . . . . .	97
5.3. “Grand Challenge” . . . . .	98
5.3.1. Comparación electromiografía . . . . .	100
5.3.2. Comparación medidas “eTibia” . . . . .	101
5.3.3. Conclusiones comparación datos empíricos . . . . .	102

5.4.	Materiales y métodos . . . . .	103
5.5.	Análisis de solidez . . . . .	108
5.5.1.	Grado de libertad funcional . . . . .	108
5.5.2.	Posición de los marcadores . . . . .	110
5.5.3.	Parámetros inerciales . . . . .	114
5.5.4.	Conclusiones del análisis de solidez . . . . .	115
5.6.	Envolvente de fuerzas . . . . .	116
5.6.1.	Cálculo de la envolvente de fuerzas . . . . .	117
5.6.2.	Calibración de la envolvente de fuerzas . . . . .	120
5.6.3.	Estimación de la activación . . . . .	122
5.6.4.	Validación de la envolvente de fuerzas . . . . .	123
5.7.	Cálculo de la fuerza externa . . . . .	123
5.7.1.	Validación del cálculo de la fuerza externa . . . . .	126
5.8.	Conclusiones . . . . .	128
<b>6.</b>	<b>Resultados</b>	<b>131</b>
6.1.	Introducción . . . . .	132
6.2.	Prueba de funcionamiento . . . . .	133
6.3.	Envolvente de fuerzas . . . . .	139
6.4.	Seguimiento de la fuerza muscular . . . . .	141
6.5.	Resumen de los resultados . . . . .	143
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y futuros trabajos</b>	<b>145</b>
	<b>Referencias</b>	<b>157</b>
<b>A.</b>	<b>Ángulos de giro de la cadera y el tobillo</b>	<b>171</b>
A.1.	Cálculo de los ángulos girado en las articulaciones . . . . .	172
A.1.1.	Cálculo de los ángulos girados en la cadera . . . . .	172
A.1.2.	Cálculo de los ángulos girados en el tobillo . . . . .	176
<b>B.</b>	<b>Parámetros de Denavit–Hartenberg</b>	<b>181</b>

B.1. Método de cálculo de los parámetros entre ejes de revolución . . . . .	182
B.2. Parámetros de Denavit–Hartenberg del modelo . . . . .	184
B.2.1. Cadera . . . . .	184
B.2.2. Rodilla . . . . .	185
B.2.3. Tobillo . . . . .	186
<b>C. Puntos de inserción de los músculos</b>	<b>189</b>
C.1. Orígenes e inserciones de las fibras musculares . . . . .	190
C.2. Puntos intermedios de inserción . . . . .	190
<b>D. Cálculo de la distancia mínima entre rectas</b>	<b>197</b>
<b>E. Cálculo de los puntos tangenciales al cilindro</b>	<b>201</b>
<b>F. Documento consentimiento informado</b>	<b>205</b>