



Universidad
Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería Mecánica

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

Estudio de la estabilidad del bípedo Mimbot con MSC.Adams

Autor : Mario Ramiro Llave

Tutor: Higinio Rubio Alonso

Leganés, Mayo de 2012





Título: *Estudio de la estabilidad del bípedo Mimbot con MSC.Adams.*

Autor: **Mario Ramiro Llave.**

Director: **Higinio Rubio Alonso.**

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 10 de Mayo de 2012 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de _____

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE





AGRADECIMIENTOS

La defensa del proyecto fin de carrera supone la meta que todo estudiante universitario desea alcanzar. Es un documento de extensión limitada en el cual solo se pueden plasmar parte de los conocimientos adquiridos durante todos estos años, pero ni mucho menos recoge los momentos y experiencias vividos. Es inevitable echar la vista atrás y recordar el tiempo pasado en la universidad, la cual ha sido algo más que una segunda casa varios años de mi vida.

Mucha culpa de la nostalgia que guardo de estos años la tienen los amigos que encontré en ella, cuando llegué recién terminado el bachiller a una aventura nueva, que a la postre sería una de las más emocionantes vividas. Gracias a Zango, Lupi, Álvaro, Tobe, Samu, Rufo, Monas, Javi, Manolo y Fernando por estos años tan maravillosos. Espero que esta amistad dure toda la vida. A lo largo de estos años he conocido más compañeros y profesores, a ellos también quiero agradecer su ayuda y experiencias vividas.

Quiero agradecer, de forma especial, el apoyo recibido por mis padres y hermana, porque en los momentos duros siempre han estado a mi lado y han sido los primeros en alegrarse de los éxitos, a ellos se lo debo todo.

Me gustaría acordarme del resto de mi familia y amigos porque también han contribuido a mi felicidad a lo largo de estos años, todos ellos son muy importantes en mi vida.

Quiero hacer mención de aquellas personas que estaban al comienzo de esta aventura y ya no se encuentran entre nosotros, entre ellos mi tío José, sé que desde el cielo me guía y se alegra de este día.

Por último agradezco a mi tutor, Higinio, toda la ayuda que me ha ofrecido y las horas dedicadas, que han sido muchas. Gracias también por los consejos, tu paciencia y, sobre todo, tu humanidad.

Esta experiencia no ha sido un camino de rosas, pero en la vida para apreciar el valor de las cosas es inevitable que a veces existan dificultades. El balance de estos años es más que positivo.



ÍNDICE

Capítulo I:

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	17
1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	18
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	20
1.3. FASES DEL PROYECTO.	22
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	24

Capítulo II:

INTRODUCCIÓN	25
2.1. ROBOTS BÍPEDOS.....	26
2.2. PASIBOT Y SUS COMPONENTES.....	27
2.2.1. Mecanismo de Chebyshev	28
2.2.2. Mecanismo de Pantógrafo	28
2.2.3. Mecanismo de estabilización	30
2.3. Modelos antecedentes.....	32
2.3.1. Pasibot con nuevo sistema de estabilización.....	32
2.3.2. Pasibot con actuadores horizontales.....	34
2.4. El Robot Mimbot.....	35

Capítulo III:

METODOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN EN SOLID EDGE ST Y MSC. ADAMS	38
3.1. Metodología de trabajo	39
3.2. Descripción del Solid Edge ST	40
3.3. Descripción del MSC. Adams	42
3.3.1. Importación desde Solid Edge ST.....	43
3.3.2. Posicionamiento del modelo	46
3.3.3. Asignación de nombres, propiedades y colores	48
3.3.4. Implementación de juntas.	51
3.3.5. Implementación de motores.	54
3.3.6. Creación de suelo y juntas	55
3.3.7. Creación de contactos y gravedad	56
3.4. Modificaciones realizadas para conseguir el modelo final.....	59
3.4.1. Modificación del modelo con el estabilizador modificado	59
3.4.2. Modificación del modelo con el estabilizador primitivo.....	68
3.5. Estudios previos en MSC.Adams.....	71



Capítulo IV:

SIMULACIÓN FINAL DEL MIMBOT	84
4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES	85
4.2. MODELO COLGADO.....	86
4.2.1. <i>Modelo con el estabilizador modificado.</i>	86
4.2.2. <i>Modelo con el estabilizador primitivo.</i>	87
4.3. MODELO LIBRE.....	89
4.3.1. <i>Funciones en MSC.Adams.</i>	89
4.3.2. <i>Trayectorias descritas por los modelos.</i>	92
4.3.2.1. <i>Trayectoria del modelo con el estabilizador modificado.</i>	92
4.3.2.2. <i>Trayectoria del modelo con el estabilizador primitivo</i>	94
4.4. HABILIDADES DEL ROBOT MIMBOT	97
4.4.1. <i>Puesta en marcha del Robot.</i>	100
4.4.2. <i>Ascensión del primer escalón.</i>	100
4.4.3. <i>Ascensión del segundo escalón.</i>	101
4.4.4. <i>Fin del recorrido.</i>	102

Capítulo V:

ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	103
5.1. DESCRIPCIÓN DE LA TOMA DE DATOS DEL MODELO CON EL ESTABILIZADOR HORIZONTAL (MODIFICADO).....	104
5.2. DESCRIPCIÓN DE LA TOMA DE DATOS DEL MODELO CON EL ESTABILIZADOR DESCOLGADO (PRIMITIVO).....	107
5.3. RESULTADOS Y GRÁFICAS.....	110
5.3.1. <i>Estabilizador modificado.</i>	110
5.3.1.1. <i>Velocidad de 180°/s.</i>	110
5.3.1.2. <i>Velocidad de 360°/s.</i>	115
5.3.1.3. <i>Velocidad de 90°/s.</i>	120
5.3.1.4. <i>Velocidad de 45°/s.</i>	124
5.3.1.5. <i>Adición de masas en el modelo con el estabilizador modificado.</i>	126
5.3.2. <i>Estabilizador primitivo.</i>	158
5.3.2.1. <i>Velocidad de 180°/s.</i>	159
5.3.2.2. <i>Velocidad de 360°/s.</i>	160
5.3.2.3. <i>Velocidad de 90°/s.</i>	164
5.3.2.4. <i>Velocidad de 45°/s.</i>	165
5.3.2.5. <i>Adición de masas en el modelo con el estabilizador primitivo.</i>	166
5.4. GRÁFICAS COMPARATIVAS.....	187
5.4.1. <i>Coeficiente de avance.</i>	187
5.4.2. <i>Oscilación vertical.</i>	188
5.4.3. <i>Desviación lateral.</i>	190
5.4.4. <i>Gráficas de par.</i>	192



Capítulo VI:
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....202
6.1. CONCLUSIONES.....203
6.2. TRABAJOS FUTUROS.....205

Capítulo VII:
BILIOGRAFÍA.....206
7.1. BIBLIOGRAFÍA206
7.2. REFERENCIAS WEB.....208

ANEXOS.....209

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fases de la marcha	26
Figura 2 Ciclo de la marcha	26
Figura 3 Foto del modelo original	27
Figura 4 Mecanismo de Chebyshev.....	28
Figura 5 Mecanismo de Pantógrafo	29
Figura 6 Trayectorias de Chebyshev y Pantógraf.....	29
Figura 7 Chebyshev, Pantógrafo, Estabilizador.....	31
Figura 8 Movimiento del pie por el estabilizador primitivo.....	32
Figura 9 Cadera con contrapeso.....	33
Figura 10 Deslizadera y estabilizador nuevos	33
Figura 11 Diseño de la cadera para actuadores horizontales	34
Figura 12 Espacio de trabajo	35
Figura 13 Diseño definitivo de la cadera del Mimbot	36
Figura 14 Vista detallada de la posición inicial del actuador	37
Figura 15 Mimbot inicial.....	37
Figura 16 Vista lateral del modelo final Figura 17 Imagen del modelo final.....	41
Figura 18 Ventana de inicio de Adams View	43
Figura 19 Ventana de importación de modelo	44
Figura 20 Pantalla de selección de archivo a importar	44
Figura 21 Ventana de nombre del modelo	45
Figura 22 Modelo recién importado	45
Figura 23 Modelo renderizado.....	46
Figura 24 Modelo girado	47
Figura 25 Modelo posicionado.....	47
Figura 26 Database Navigator	48
Figura 27 Modificación de la pieza.....	49
Figura 28 Cambio de nombre de la pieza.....	49
Figura 29 Elección del material	50
Figura 30 MIMBOT con c.d.m.....	50
Figura 31 MIMBOT con color	51
Figura 32 Menú de Juntas	51
Figura 33 Junta de rotación entre biela y manivela	52
Figura 34 Junta Point curve entre el estabilizador y la corredera.....	52
Figura 35 Junta de traslación entre deslizadera y actuador	53
Figura 36 Junta de fijación entre las manivelas	53
Figura 37 Motor rotativo en la manivela derecha	54
Figura 38 Motores lineales en deslizadera y actuador	54
Figura 39 Creación del perfil rectangular.....	55
Figura 40 Redimensionamiento y posicionamiento del suelo	56
Figura 41 Menú de contacto	57
Figura 42 Contactos entre pies y suelo	57
Figura 43 Aceleración de la gravedad	58
Figura 44 Modelo original Primera modificación Modelo actual.....	59



Figura 45 Cadera del modelo actual Cadera del modelo futuro	61
Figura 46 Vista lateral Vista frontal	62
Figura 47 Distancia de los pies Longitud superpuesta de los pies.....	62
Figura 48 Vista lateral Vista frontal	63
Figura 49 Distancia de los pies Longitud superpuesta de los pies	63
Figura 50 Diseño de las piezas modificadas	65
Figura 51 Modificación previa.....	65
Figura 52 Modificación final.....	66
Figura 53 Diseño final del Mimbot.....	67
Figura 54 Nuevo estabilizador.....	68
Figura 55 Estabilizador original	68
Figura 56 Deslizadera unida al estabilizador	69
Figura 57 Corredera en la que va ubicado el estabilizador modificado.....	69
Figura 58 Corredera en la que va ubicado el estabilizador primitivo	69
Figura 59 Mimbot con el estabilizador primitivo	70
Figura 60 Mimbot con el estabilizador primitivo Mimbot con el estabilizador modificado ..	70
Figura 61 Mimbot con el pie derecho adelantado.....	71
Figura 62 Pie izquierdo adelantado.....	77
Figura 63 Pie izquierdo levantado.....	77
Figura 64 Diferentes posicionamientos de la masa	80
Figura 65 Secuencia de movimientos del modelo final	81
Figura 66 Posición inicial	82
Figura 67 Pie izquierdo levantado.....	82
Figura 68 Pie derecho levantado.....	82
Figura 69 Junta de fijación de la cadera.....	86
Figura 70 Movimiento del Mimbot con el estabilizador modificado, colgado	86
Figura 71 Movimiento del Mimbot con el estabilizador primitivo, colgado.....	87
Figura 72 Modelo libre	89
Figura 73 Posición del Mimbot al comienzo de la simulación	92
Figura 74 Posición del Mimbot en el segundo 10	92
Figura 75 Posición del Mimbot en el segundo 15	93
Figura 76 Posición del Mimbot al finalizar la simulación	93
Figura 77 Posicionamiento de los pies al caminar	94
Figura 78 Posición del Mimbot al comienzo de la simulación	95
Figura 79 Posición del Mimbot en el segundo 7	95
Figura 80 Posición del Mimbot en el segundo 13	95
Figura 81 Posición del Mimbot al finalizar la simulación	96
Figura 82 Posicionamiento de los pies al caminar	96
Figura 83 Subida de escalones	98
Figura 84 Elevación del paso del pie izquierdo	100
Figura 85 Elevación y alargamiento de la zancada del pie derecho.....	101
Figura 86 Zancada para el posicionamiento final.....	102
Figura 87 Modelo con el estabilizador horizontal.....	104
Figura 88 Modelo con el estabilizador descolgado.....	107



Figura 89 Paso descrito por el modelo con el estabilizador horizontal	110
Figura 90 Mimbot con adición de una masa	126
Figura 91 Mimbot con adición de una masa	137
Figura 92 Mimbot con adición de una masa	147
Figura 93 Paso descrito por el modelo con el estabilizador descolgado	158
Figura 94 Área de ubicación de las masas para mantener el equilibrio del sistema	166
Figura 95 Mimbot con adición de una masa	166
Figura 96 Mimbot con adición de una masa	168
Figura 97 Mimbot con adición de una masa	176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Masas de las piezas que componen el Mimbot.....	60
Tabla 2 Modificación del espesor de las piezas	64



ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Función a velocidad 180º/s.....	72
Gráfica 2: Desplazamiento en X del punto A del pie.....	73
Gráfica: 3 Desplazamiento en Y del punto A del pie.....	73
Gráfica 4: Desplazamiento en X del punto A' del pie.....	74
Gráfica 5: Desplazamiento en Y del punto A' del pie.....	74
Gráfica 6: Función a velocidad 360º/s.....	75
Gráfica 7: Desplazamiento en X del punto A del pie.....	75
Gráfica 8: Desplazamiento en Y del punto A del pie.....	75
Gráfica 9: Desplazamiento en X del punto A' del pie.....	76
Gráfica 10: Desplazamiento en Y del punto A' del pie.....	76
Gráfica 11 : Desplazamiento en X del punto A' del pie.....	78
Gráfica 12: Desplazamiento en Y del punto A' del pie.....	78
Gráfica 13: Función a velocidad -180º/s.....	79
Gráfica 14: Desplazamiento en X del punto A del pie.....	79
Gráfica 15: Desplazamiento en Y del punto A del pie.....	80
Gráfica 16: Recorrido del pie derecho del modelo con el estabilizador horizontal.....	87
Gráfica 17: Recorrido del pie derecho del modelo con el estabilizador descolgado.....	88
Gráfica 18: Función para velocidad de 45º/s.....	90
Gráfica 19: Función para velocidad de 90º/s.....	90
Gráfica 20: Función para velocidad de 180º/s.....	91
Gráfica 21: Función para velocidad de 180º/s.....	91
Gráfica 22: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X a 180º/s.....	110
Gráfica 23: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y a 180º/s.....	111
Gráfica 24: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z a 180º/s.....	111
Gráfica 25: Par –Posición vs Tiempo a 180º/s modelo colgado.....	112
Gráfica 26: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 180º/s modelo colgado.....	112
Gráfica 27: Detalle del Par demandante por la manivela.....	114
Gráfica 28: Par –Posición vs Tiempo a 180º/s modelo libre.....	114
Gráfica 29: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 180º/s modelo libre.....	115
Gráfica 30: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X a 360º/s.....	115
Gráfica 31: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y a 360º/s.....	116
Gráfica 32: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z a 360º/s.....	116
Gráfica 33: Par –Posición vs Tiempo a 360º/s modelo colgado.....	117
Gráfica 34: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 360º/s modelo colgado.....	118
Gráfica 35: Detalle del Par demandante por la manivela.....	118
Gráfica 36: Par –Posición vs Tiempo a 360º/s modelo libre.....	119
Gráfica 37: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 360º/s modelo libre.....	119
Gráfica 38: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X a 90º/s.....	120
Gráfica 39: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y a 90º/s.....	121
Gráfica 40: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z a 90º/s.....	121
Gráfica 41: Par –Posición vs Tiempo a 90º/s modelo colgado.....	122
Gráfica 42: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 90º/s modelo colgado.....	122
Gráfica 43: Par –Posición vs Tiempo a 90º/s modelo libre.....	123



Gráfica 44: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 90°/s modelo libre	123
Gráfica 45: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 45°/s modelo colgado.....	124
Gráfica 46: Par demandante por la manivela a 45°/s en el modelo libre.....	125
Gráfica 47: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	127
Gráfica 48: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	127
Gráfica 49: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	128
Gráfica 50: Par –Posición vs Tiempo	128
Gráfica 51: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	129
Gráfica 52: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	129
Gráfica 53: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	130
Gráfica 54: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	130
Gráfica 55: Par –Posición vs Tiempo	131
Gráfica 56: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	131
Gráfica 57: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	132
Gráfica 58: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	132
Gráfica 59: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	133
Gráfica 60: Par –Posición vs Tiempo	133
Gráfica 61: Detalle de la gráfica Par-Posición vs Tiempo.....	134
Gráfica 62: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	134
Gráfica 63: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	135
Gráfica 64: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	135
Gráfica 65: Par –Posición vs Tiempo	136
Gráfica 66: Detalle de la gráfica Par-Posición vs Tiempo.....	136
Gráfica 67: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	137
Gráfica 68: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	138
Gráfica 69: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	138
Gráfica 70: Par –Posición vs Tiempo	139
Gráfica 71: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	139
Gráfica 72: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	140
Gráfica 73: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	140
Gráfica 74: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	141
Gráfica 75: Par –Posición vs Tiempo	141
Gráfica 76: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	142
Gráfica 77: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	142
Gráfica 78: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	143
Gráfica 79: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	143
Gráfica 80: Par –Posición vs Tiempo	144
Gráfica 81: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	144
Gráfica 82: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	145
Gráfica 83: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	145
Gráfica 84: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	146
Gráfica 85: Par –Posición vs Tiempo	146
Gráfica 86: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	147
Gráfica 87: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	148



Gráfica 88: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	148
Gráfica 89: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	149
Gráfica 90: Par –Posición vs Tiempo	149
Gráfica 91: Par –Posición vs Tiempo 2 ciclos	150
Gráfica 92: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	150
Gráfica 93: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	151
Gráfica 94: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	151
Gráfica 95: Par –Posición vs Tiempo	152
Gráfica 96: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	152
Gráfica 97: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	153
Gráfica 98: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	153
Gráfica 99: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	154
Gráfica 100: Par –Posición vs Tiempo	154
Gráfica 101: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	155
Gráfica 102: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	155
Gráfica 103: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	156
Gráfica 104: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	156
Gráfica 105: Par –Posición vs Tiempo	157
Gráfica 106: Detalle de la gráfica Par-Posición vs Tiempo	157
Gráfica 107: Par demandante por la manivela en el modelo colgado a 180°/s	159
Gráfica 108: Par –Posición vs Tiempo a 180°/s modelo colgado	160
Gráfica 109: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X a 360°/s	160
Gráfica 110: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y a 360°/s	161
Gráfica 111: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z a 360°/s	161
Gráfica 112: Par demandante por la manivela en el modelo colgado a 360°/s	162
Gráfica 113: Par –Posición vs Tiempo en el modelo colgado a 360°/s	162
Gráfica 114: Par demandante por la manivela en el modelo libre a 360°/s	163
Gráfica 115: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo en el modelo libre a 360°/s	163
Gráfica 116: Par –Posición vs Tiempo en el modelo colgado a 90°/s	164
Gráfica 117: Par –Posición vs Tiempo a 45°/s modelo colgado	165
Gráfica 118: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	169
Gráfica 119: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	169
Gráfica 120: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	170
Gráfica 121: Par –Posición vs Tiempo	170
Gráfica 122: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	171
Gráfica 123: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	171
Gráfica 124: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	172
Gráfica 125: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	172
Gráfica 126: Par –Posición vs Tiempo	173
Gráfica 127: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	173
Gráfica 128: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	174
Gráfica 129: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	174
Gráfica 130: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	175
Gráfica 131: Par –Posición vs Tiempo	175



Gráfica 132: Detalle de la gráfica Par-Posición vs Tiempo	176
Gráfica 133: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	177
Gráfica 134: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	177
Gráfica 135: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	178
Gráfica 136: Par –Posición vs Tiempo	178
Gráfica 137: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	179
Gráfica 138: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	179
Gráfica 139: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	180
Gráfica 140: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	180
Gráfica 141: Par –Posición vs Tiempo	181
Gráfica 142: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	181
Gráfica 143: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	182
Gráfica 144: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	182
Gráfica 145: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	183
Gráfica 146: Par –Posición vs Tiempo	183
Gráfica 147: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo	184
Gráfica 148: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X	184
Gráfica 149: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y	185
Gráfica 150: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z	185
Gráfica 151: Par –Posición vs Tiempo	186
Gráfica 152: Detalle de la gráfica Par-Posición vs Tiempo	186
Gráfica 153: Coeficiente de avance de ambos modelos	187
Gráfica 154: Oscilación vertical de ambos modelos	188
Gráfica 155: Oscilación vertical para diferentes masas añadidas al modelo con estabilizador horizontal	188
Gráfica 156: Oscilación vertical para diferentes masas añadidas al modelo con estabilizador descolgado	189
Gráfica 157: Desviación lateral de ambos modelos	190
Gráfica 158: Desviación lateral para diferentes masas añadidas al modelo con estabilizador horizontal	190
Gráfica 159: Desviación lateral para diferentes masas añadidas al modelo con estabilizador descolgado	191
Gráfica 160: Par demandado por el modelo con el estabilizador horizontal, colgado, a diferentes velocidades	192
Gráfica 161: Par demandado por el modelo con el estabilizador descolgado, colgado, a diferentes velocidades	193
Gráfica 162: Par demandado por ambos modelos colgados a 45º/s	194
Gráfica 163: Par demandado por ambos modelos colgados a 90º/s	194
Gráfica 164: Par demandado por ambos modelos colgados a 180º/s	195
Gráfica 165: Par demandado por ambos modelos colgados a 270º/s	195
Gráfica 166: Par demandado por ambos modelos colgados a 360º/s	196
Gráfica 167: Par máximo demandado por los modelos colgados, a diferentes velocidades ...	196
Gráfica 168: Par demandado por ambos modelos libres	197



Gráfica 169: Par en los modelos colgado y libre a 90°/s para el modelo con el estabilizador horizontal	198
Gráfica 170: Par en los modelos colgado y libre a 180°/s para el modelo con el estabilizador horizontal	198
Gráfica 171: Par en los modelos colgado y libre a 270°/s para el modelo con el estabilizador horizontal	199
Gráfica 172: Par en los modelos colgado y libre a 360°/s para el modelo con el estabilizador horizontal	199
Gráfica 173: Par en los modelos colgado y libre a 360°/s para el modelo con el estabilizador descolgado	200
Gráfica 174: Máximo par demandado añadiendo masas en diferentes localizaciones para el modelo con el estabilizador horizontal.....	200
Gráfica 175: Máximo par demandado añadiendo masas en diferentes localizaciones para el modelo con el estabilizador descolgado	201



Capítulo I:

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Un robot es una entidad virtual o mecánica artificial. En la práctica, esto es por lo general un sistema electromecánico que, por su apariencia o sus movimientos, ofrece la sensación de tener un propósito propio. La palabra robot puede referirse tanto a mecanismos físicos como a sistemas virtuales de software, aunque suele aludirse a los segundos con el término de bots.

Los robots se empezaron a diseñar para ayudar en la realización de actividades humanas y aumentar la productividad en la industria. Etimológicamente, significa “trabajador” o “sirviente”. La mayor parte de los existentes hasta el momento son robots multi-articulados, en forma de brazo, que realizan tareas programadas, más o menos inteligentes, en los procesos de producción industrial, tales como la pintura, la soldadura o la carga de maquinaria. Por otro lado, los robots también están resultando muy útiles al servicio de la investigación, sobre todo en la exploración de rincones inaccesibles, como pueden ser el fondo oceánico o el espacio. Estos robots suelen adoptar formas móviles encima de plataformas rodantes o bien tipo artrópodo.

Existe una nueva generación de robots diseñados para el uso doméstico: tareas de limpieza, de cocina o de seguridad. Tienen la apariencia de pequeños electrodomésticos, pero se diferencian de ellos en que son capaces de detectar cambios en el entorno y actuar en función de lo que perciben.

Por otra parte, existe una rama de la robótica, la humanoide, que se encuentra en una fase de desarrollo inicial, pero que ha experimentado grandes avances en los últimos años. El objetivo de este desarrollo consiste en encontrar soluciones para la vida de muchas personas, con movilidad limitada o para amenizar algunas actividades de ocio.

Los robots bípedos (caminan sobre dos piernas) sortean obstáculos y suben o bajan escaleras tienen que ser máquinas inteligentes. Para realizar estas actividades de manera autónoma hace falta que los robots sean capaces de percibir el espacio, de detectar los objetos y de tomar decisiones. Mediante sensores de visión, de fuerza, de distancia, de inclinación y de unidades de proceso, incorporan estas capacidades que les permitirán decidir qué trayectoria seguir.

No obstante, antes de resolver esas cuestiones, se debe empezar por conseguir lo básico en un robot bípedo: el correcto funcionamiento y movimiento de sus dos piernas. Esto conlleva una ardua tarea de análisis de los mecanismos del robot, de modo tal que su movimiento resulte estable, sin que se vea afectado por vuelcos, balanceos, cambios de dirección u otros comportamientos anómalos. Con este fin, serán necesarias diversas variaciones sobre el modelo inicial de un robot, como por ejemplo modificar el movimiento de las piernas de los robots, consiguiendo más grados de libertad, lo que les da mayor flexibilidad de movimientos y permite realizar comportamientos más sofisticados.

En este escenario se situó el grupo de investigación MAQLAB del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid cuando se propusieron el diseño de un robot bípedo de tamaño natural, el PASIBOT, que imitaría el comportamiento humano al caminar. El reto planteado al inicio del desarrollo de dicho proyecto de investigación consistió en



conseguir el movimiento del robot con un solo grado de libertad, accionado por un único motor eléctrico, reduciendo con ello al mínimo el número de actuadores.

Gracias a esta particularidad, se reduciría el peso del robot, lo que conlleva un ahorro de energía y, finalmente, una reducción del coste económico. Por contra, aumentan las dificultades a la hora de conseguir una buena movilidad.

El proyecto del PASIBOT, por tanto, ofrece múltiples líneas de investigación, enfocadas a la mejora de su movilidad. Lo ideal es conseguir que el robot sea capaz de caminar sobre varias superficies: plano, con inclinación, escaleras, etc., además de ser capaz de ejecutar diferentes maneras de caminar. Al caminar, debe tener movimiento de cadera en los planos frontal y sagital y ser capaz de girar y de seguir curvas. El contacto entre el pie y el terreno ha de ser estudiado y ajustado (condiciones del pie: la forma, la rigidez, amortiguación,...). También, deberá ser capaz de caminar con una velocidad constante. En definitiva, conseguir la mayor similitud posible entre la manera de caminar de los seres humanos y la del PASIBOT.

La motivación final para la realización de este Proyecto es, pues, la participación en el desarrollo de un proyecto real de ingeniería mecánica enmarcado en un campo que se perfila de gran importancia en un futuro próximo. El interés de formar parte en ello radica en el aprendizaje de técnicas aplicadas a la Robótica, el manejo de programas informáticos de extendido uso en el mundo ingenieril y el uso de la creatividad en conjunción con los conocimientos en Mecánica adquiridos a lo largo de la carrera, con el fin de resolver los problemas más inmediatos que afectan al buen funcionamiento del PASIBOT, optimizar dicho funcionamiento y dotarlo de nuevas habilidades.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El desarrollo del robot bípedo Mimbot es un proyecto ambicioso en el campo de los robots de servicio: en contraposición con la gran mayoría robots humanoides actuales que presentan un gran número de grados de libertad, lo que repercute en elevado peso debido a los diferentes actuadores necesarios para producir el movimiento, con este robot se plantea una nueva concepción y un nuevo enfoque. Para ello se desarrolló un primer modelo, llamado Pasibot, de un solo grado de libertad, a través del cual se consiguió una configuración muy ligera que reproducía el caminar humano de una forma muy fiable.

Los Proyectos que se han ido realizando durante los últimos años ligados al Pasibot buscaban analizar y optimizar el diseño del robot para conseguir un funcionamiento del mismo más estable y funcional, y encaminar a la vez dicho diseño a la implementación de nuevas habilidades que amplíen el rango de movimientos del robot. En el desarrollo de las habilidades es donde empezó el desarrollo del Mimbot, con el proyecto *“Rediseño del robot bípedo MIMBOT para incorporar habilidades miméticas [1]”*, que tuvo como objetivo atribuir habilidades miméticas al antiguo Pasibot.

El objetivo de este proyecto consiste en mejorar el diseño de anteriores trabajos y empezar la implementación de los actuadores para conseguir desarrollar las habilidades miméticas, esto es, para dotar al robot de libertad de movimientos para poder superar diferente tipo de obstáculos. Se estudiarán dos diseños diferentes: el modelo primitivo, que tiene el estabilizador descolgado; y el modelo que ha sufrido la primera modificación, que tiene el estabilizador horizontal. Ligado a ello, se pretende que la trayectoria sea recta y uniforme, si no se dan órdenes de lo contrario. Por último, se analizarán las trayectorias y pares de los diferentes modelos estudiados.

Para lograr los objetivos marcados, ha sido necesario seguir unos pasos, que se enumeran a continuación:

- Evolución del Mimbot, para lograr un modelo estable.
- Modificación del diseño de diferentes piezas que forman el robot, como son la cadera o los pies, manteniendo la modificación que se realizó en el estabilizador de la cadera y la adición de los actuadores inferiores.
- Análisis de las propuestas y selección de la más favorable a nuestros intereses.
- Estudio de la implantación de los actuadores en el MIMBOT, con el rediseño de algunas de las piezas que constituyen el robot, si ello fuera necesario.
- Teniendo en cuenta las consideraciones de los anteriores puntos, obtención con el software Solid Edge de un modelo del MIMBOT listo para ser exportado al software de análisis MSC. Adams.
- Obtención de un diseño del modelo del MIMBOT que incluya el estabilizador primitivo, para poder determinar, en futuras pruebas, la influencia de los actuadores sobre la inclinación de los pies y la dinámica del paso.



- Implementación del modelo en MSC. Adams: materiales de los elementos; definición de contactos en juntas y apoyos; y motores y actuadores. Modificación de las propiedades asignadas a los elementos que forman el robot, para mejorar la estabilidad del mismo. Estas propiedades son velocidad de giro del motor, rozamiento entre piezas, contacto de los pies con el suelo o materiales empleados.
- Simulación del modelo para las distintas configuraciones y pruebas de estrategias con los actuadores en movimiento. Los resultados se ilustrarán en gráficas en las cuales se estudiará propiedades como el desplazamiento del robot en las diferentes direcciones del espacio o el par que demanda al motor para mantener el movimiento. Todo ello se realizará para el modelo con el estabilizador primitivo y el estabilizador modificado, colgados y con movimiento libre, para que, una vez obtenidos los resultados, se puedan realizar comparaciones y sacar conclusiones.
- Comprobación del funcionamiento de los actuadores en distintas situaciones.

1.3 FASES DEL PROYECTO

Todo proyecto de Ingeniería comprende una serie de fases a lo largo de su desarrollo. Los proyectos de innovación proporcionan una mayor libertad a la hora de llevarlos a cabo, ya que no establecen ninguna restricción previa para cumplir los objetivos del proyecto. El presente proyecto es un proyecto de innovación, pero sobre todo, de análisis, la primera parte del mismo es libre a la imaginación y consideraciones del que lo realiza; pero la segunda parte, y principal, se basa en datos empíricos y en la interpretación de los mismos. Por lo tanto, habrá que realizar comparaciones y sacar conclusiones.

Las fases planificadas para el desarrollo de este proyecto son:

- **FASE 1. Estudios previos:** En esta fase se plantean los objetivos, motivaciones y necesidades que el diseño debe cumplir. Se realiza un diseño conceptual y, sobre él, se hacen los estudios de viabilidad de forma analítica.
- **FASE 2. Diseño y simulación:** En esta fase se realiza el modelado del mecanismo diseñado anteriormente. Una vez implementado se procederá a la simulación y obtención de datos. Después de analizar dichos datos, se considerará si es necesario realizar modificaciones en el modelo preliminar.
- **FASE 3. Implementación final:** Si los resultados del modelo virtual modificado son satisfactorios y cumplen los objetivos establecidos se procederá a implementar el diseño y las modificaciones en el modelo real, el cual se someterá a las pruebas oportunas que determinen que, efectivamente, resultan válidos y funcionan correctamente.

Este Proyecto parte de la necesidad de implementar en el modelo varios mecanismos que lo habiliten para realizar ciertas tareas ya concretadas. Una vez implantados y probados, es necesario comprobar si hiciera falta realizar alguna modificación sobre los diseños previos. De este modo, se puede considerar que este Proyecto parte de la Fase 2, ya que el primer paso será diseñar las mejoras pensadas sobre el modelo en un programa de CAD y, a continuación obtener datos que muestren que estas modificaciones han sido correctas.

Las fases de las que consta este Proyecto se pueden resumir en las siguientes líneas:

El primer objetivo que se pretende al realizar este proyecto es que el robot no pierda el equilibrio, como ocurría en modelos precedentes. Para ello va a ser necesario realizar modificaciones en el diseño y en las propiedades del mismo. Para modificar el diseño se hará uso de un programa de CAD, el Solid Edge ST, para modelar una serie de modificaciones en la cadera y en los pies. Posteriormente, se analizarán todas las propuestas y se seleccionará la que más se adecúe a las necesidades del diseño. La nueva cadera y la modificación de los pies se implementarán en el modelo anterior de PASIBOT y se comprobará si resulta necesario realizar otras modificaciones menores para que la implementación se produzca correctamente.



Posteriormente, se exportará el modelo del robot a un programa de simulación de mecanismos, el MSC. Adams, donde se llevarán a cabo las operaciones que preparen el modelo para las simulaciones que se desean realizar y las modificaciones de las propiedades de los elementos. Las primeras simulaciones se efectuarán con el modelo del MIMBOT colgado, y serán de utilidad principalmente para verificar el correcto funcionamiento de las juntas y los actuadores. Una vez comprobado el buen funcionamiento del modelo se obtendrán gráficas de par.

En cuanto al modelo libre sobre suelo, las simulaciones servirán para demostrar la estabilidad dinámica del robot, esto es, que sea capaz de caminar sin perder el equilibrio, como ocurría anteriormente. Una vez conseguido, se obtendrán gráficas que muestren las trayectorias descritas por el modelo y el par necesario para su movimiento.

Finalmente, se desarrollarán ejercicios en los que se deberán implementar los nuevos actuadores de forma tal que puedan ser combinados para, a lo largo de una simulación, ser capaz de subir escalones sufriendo la menor inestabilidad posible.

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se encuentra dividido en seis capítulos, además de los anexos y la bibliografía.

- **Capítulo I – Motivación y objetivos del Proyecto.**

En este primer capítulo, se exponen las motivaciones y los objetivos del Proyecto, las fases de las que consta y la manera en la que se ha estructurado el documento.

- **Capítulo II – Introducción.**

Se explica brevemente el desarrollo de la Robótica a lo largo de la Historia y los antecedentes que existen del PASIBOT. Se realiza una descripción del robot y las evoluciones que ha sufrido desde su primer diseño.

- **Capítulo III – Metodología e implementación en Solid Edge ST y en MSC. Adams.**

Se describe el proceso de diseño de los modelos finales con el programa Solid Edge ST, numerando de forma detallada los pasos intermedios que han sido necesarios y la preparación para ser simulados en MSC.Adams. Se explican las modificaciones realizadas en el diseño y en las propiedades de las piezas y se describe de manera gráfica el modelo final, con el que se ha logrado la estabilidad buscada.

- **Capítulo IV – Simulación final del MIMBOT.**

En este capítulo, se describen las pruebas realizadas en el robot para poder conseguir equilibrio al caminar. Se explican las simulaciones que se llevaron a cabo en distintas situaciones: Primero, con el modelo colgado; posteriormente, con el modelo libre, incluyendo pruebas de estabilidad. Primero se realizó con el estabilizador modificado y, después con el estabilizador primitivo. Finalmente, se detallan los ejercicios que se llevaron a cabo para demostrar las nuevas habilidades del MIMBOT para subir escalones, entre otras habilidades.

- **Capítulo V – Análisis y resultados**

En este capítulo, se obtienen los resultados gráficos con el programa MSC Adams para ambos modelos: original y modificado, y se establece una comparación entre ellos.

- **Capítulo VI – Conclusiones y trabajos futuros.**

En este capítulo se obtienen las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del Proyecto y se proponen trabajos futuros relacionados con la optimización del prototipo y la evolución del robot.

- **Capítulo VII – Bibliografía.**

Se recogen las referencias bibliográficas que han sido manejadas.

- **Anexos.**



Capítulo II:

INTRODUCCIÓN

2.1 Robots bípedos

Desde hace siglos el ser humano ha intentado recrear de forma artificial las conductas humanas. La dimensión que han alcanzado hoy en día los robots es muy importante. En la industria existen robots muy distintos de todo tipo, dependiendo de las funciones que estén programados para realizar.

Los dos grandes grupos de robots que se utilizan hoy en día se pueden clasificar en: Robots Industriales y Robots de Servicio.

Es a este último grupo al que pertenecen los robots bípedos, en los cuales se engloba el robot que se va a estudiar en el presente proyecto, el Mimbot. El modo de caminar de los robots bípedos no es sino una aproximación lo más real posible al caminar humano. Durante el caminar de los bípedos existe una premisa fundamental que se ha de cumplir siempre y es que por lo menos uno de los dos pies mecánicos ha de estar apoyado en el suelo. Los dos mayores componentes del ciclo de la marcha son: la fase de apoyo y la fase de balanceo. Una pierna está en fase de apoyo cuando está en contacto con el suelo y en fase de balanceo cuando no contacta con el suelo. La cantidad relativa de tiempo gastado durante cada fase del ciclo de la marcha, a una velocidad normal, es:

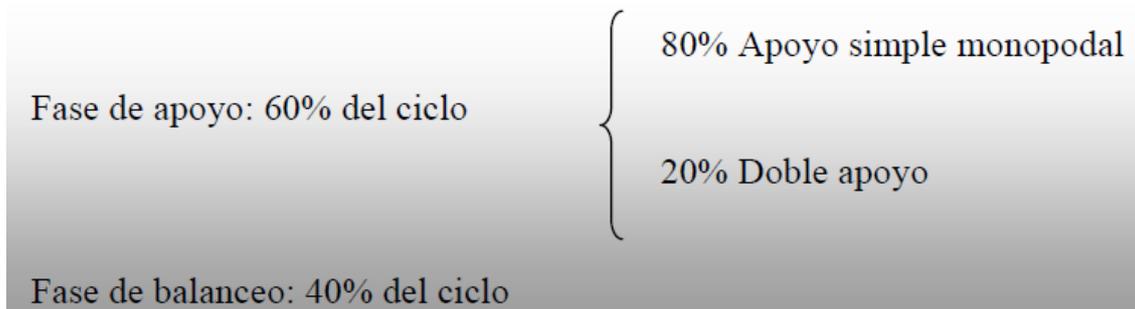


Figura 1 Fases de la marcha

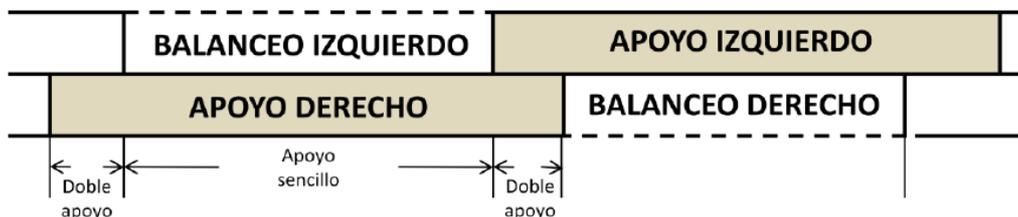


Figura 2 Ciclo de la marcha

Los robots bípedos se clasifican en tres grupos:

Activos: Para realizar su movimiento se sirven de motores o actuadores. Se trata de sistemas de control complejos en los que también se utilizan sensores.

Pasivos: Para realizar su movimiento no disponen de ningún tipo de actuador ni de motores. Se valen de la acción de la gravedad y pendiente del terreno. Su principal ventaja respecto a los activos es que no requieren el uso de energía y su principal desventaja es que no pueden subir pendientes.

Semiactivos: Para realizar su movimiento combinan características de los dos tipos anteriores.

El Mimbot combina los dos tipos de movimientos, el activo y el pasivo, como se podrá ver a lo largo del proyecto.

2.2 Pasibot y sus componentes

El diseño original del PASIBOT, modelo previo al Mimbot, se caracteriza en poseer un solo grado de libertad. El material empleado en la fabricación de los eslabones que forman parte del robot original es Aluminio 2024-T351, material muy resistente y ligero, muy beneficioso para cualquier construcción de máquinas.



Figura 3 Foto del modelo original

El diseño del robot está basado en dos mecanismos: el *Chebyshev* y el *Pantógrafo*. Además, se le ha añadido un mecanismo *estabilizador* para mantener el robot siempre estable y paralelo al suelo. A continuación, se realizan unas descripciones de estos mecanismos, de su funcionamiento y su composición.

2.2.1 Mecanismo de Chebyshev.

Con el mecanismo de Chebyshev, se convierte el movimiento circular del motor en la entrada del mecanismo, en un movimiento de tramo recto y curvo en la salida del mismo.

Se trata de un mecanismo simple, formado por tres eslabones: manivela motor, biela y balancín. La manivela transmite el movimiento puro de rotación a un movimiento compuesto en la biela. A continuación se muestra la representación de este mecanismo.

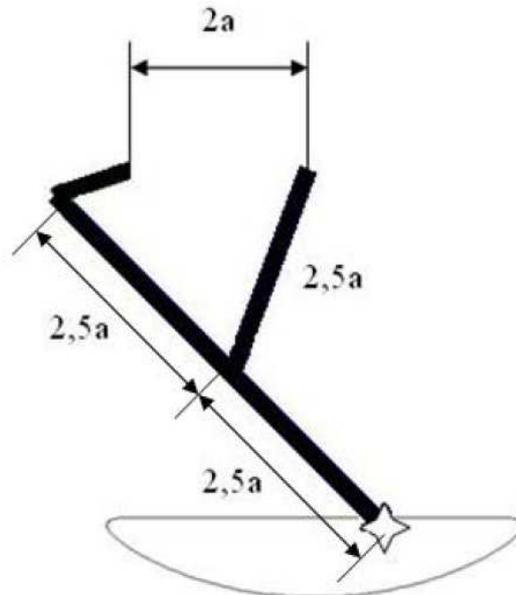


Figura 4 Mecanismo de Chebyshev

Este mecanismo es el mecanismo principal para el correcto funcionamiento del robot. Con la relación de dimensiones que se muestra en la figura anterior, se consigue transformar el movimiento circular puro que le transmite el motor a la manivela, en un movimiento de salida de la biela compuesto por un tramo casi recto y un tramo curvo. El movimiento recto se logra cuando el pie está apoyado totalmente en el suelo, y el otro pie está realizando la trayectoria elíptica que lo desplaza hacia delante para apoyar posteriormente su superficie en el suelo e invertir las funciones.

2.2.2 Mecanismo de Pantógrafo.

El pantógrafo es un mecanismo de origen griego basado en las propiedades de los paralelogramos. Está formado por varios eslabones (fémur, tibia y tendones) conectados entre sí de tal manera que se pueden mover respecto de un punto fijo (pivote).

El pantógrafo permite copiar una figura o reproducirla a escala distinta. Para ello se varía la distancia entre los puntos de articulación de cada uno de los eslabones, conservando siempre la condición de paralelismo entre ellos, dos a dos.

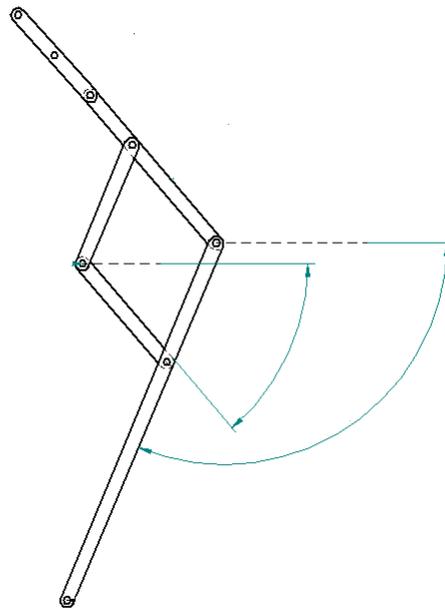


Figura 5 Mecanismo de Pantógrafo

En concreto, en su aplicación al robot PASIBOT se logra aumentar e invertir el movimiento que generaba el mecanismo de Chebyshev.

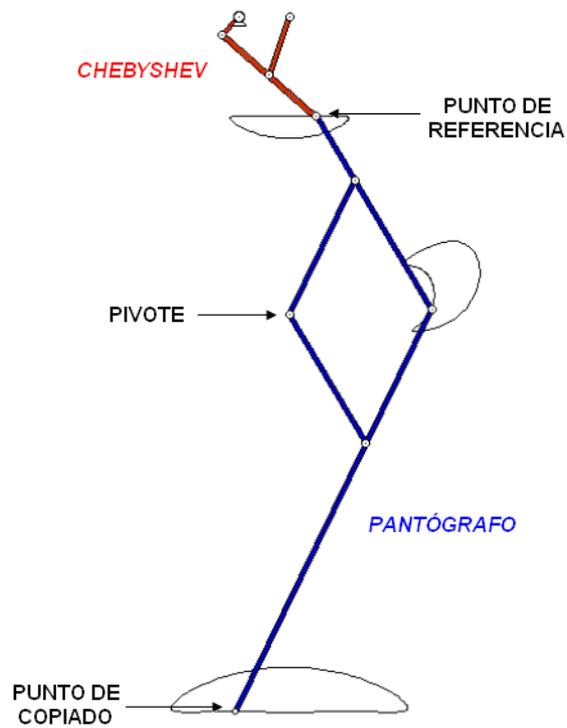


Figura 6 Trayectorias de Chebyshev y Pantógrafo

2.2.3 Mecanismo de Estabilización.

Una vez que se ha conseguido el movimiento deseado para realizar el paso, se necesita que el robot se mantenga estable mientras realiza este paso. Para ello hay que añadir un pie al mecanismo para que soporte el peso del robot y no vuelque. La adición de este pie, lleva consigo la adición de un nuevo mecanismo que haga que el pie permanezca en todo momento paralelo al suelo. Este mecanismo está formado por los siguientes eslabones: estabilizador, contrafémur, rodilla y peroné.

La solución original que se adoptó fue poner una corredera fija a la cadera en donde se encuentran los extremos fijos de la manivela y la biela pertenecientes al mecanismo de Chebyshev. En estudios posteriores, se demostró que este mecanismo no era del todo preciso, ya que el pie no permanecía en todo momento paralelo al suelo, y por ello se dedicó un Proyecto a su modificación.

La corredera está unida a un eslabón “estabilizador”, unido a su vez con el punto de referencia del pantógrafo y también unido a un sistema paralelo al pantógrafo, el *mecanismo de estabilización*, que obliga a que el ángulo descrito por ambos eslabones sea el mismo. Esta corredera solo permite movimiento en la dirección paralela al suelo, con lo cual los eslabones transmiten a su vez este movimiento al resto del mecanismo. Ambos mecanismo terminan en el mismo eslabón, que es el pie, con lo cual este siempre permanecerá paralelo a la superficie, (posteriormente, como se observa en la imagen, se demostró que no es del todo cierto).

En la figura que se muestra a continuación se puede observar, en azul, el mecanismo estabilizador unido mediante el eslabón “estabilizador” al pantógrafo, tal y como se describió anteriormente. En concreto, en esta imagen se observa cómo la pierna izquierda (en color blanco) está apoyada totalmente en el suelo (tramo recto del período de recorrido de la manivela) y la pierna derecha está realizando el paso para avanzar (tramo curvo del período de recorrido).

El mecanismo de Chebyshev se representa en color verde y el Pantógrafo, por su parte, en color rojo. Además de los mecanismos mencionados, se han nombrado todos los elementos que componen el robot.

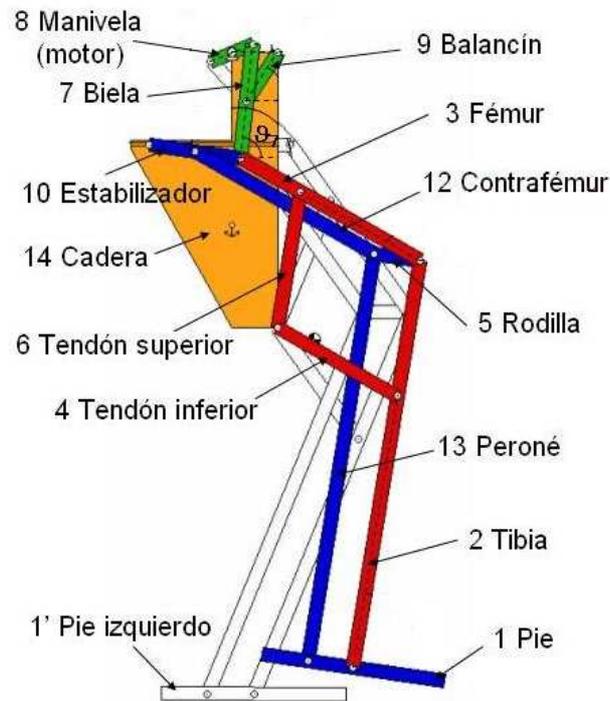


Figura 7 Chebyshev, Pantógrafo, Estabilizador

De esta forma se obtiene el mecanismo completo de transmisión de movimientos del robot. LA composición de la pierna izquierda es exactamente igual, ya que el robot es simétrico.

El prototipo inicial tiene un peso total de 5,077Kg, sin el sistema de transmisión, para el material anteriormente descrito (AI 2024-T351).

2.3 MODELOS ANTECEDENTES.

Este proyecto viene precedido por otros anteriores, los cuales han ido modificando diversas propiedades y elementos del robot para optimizar su funcionamiento. A continuación se van explicar de forma resumida, los proyectos que han servido de base para la realización del actual.

- **2.3.1 PASIBOT con nuevo sistema de estabilización.**

En este proyecto se realizó un estudio del modelo de PASIBOT original en Adams. Después de varios ensayos se observó que el robot no conseguía caminar recto y que avanzados unos pasos, acababa perdiendo la estabilidad y caía al suelo. Se dedujeron algunas de las causas por las cuales se podía producir este fenómeno.

El primer factor que generaba el desequilibrio era la mala posición del centro de gravedad. Esto generaba una oscilación en el sistema que le terminaba por hacer perder la verticalidad, avanzados unos pasos.

El segundo de los factores estaba originado por la trayectoria de la planta del pie, ya que al entrar en contacto con el suelo, lo primero que apoyaba era el pico delantero del pie. Esto es debido a que el estabilizador del robot no seguía una trayectoria paralela al suelo, sino que se inclinaba un poco hacia delante en su movimiento de giro transmitido por el mecanismo de *Chebyshev*, inclinando a su vez el pie hacia delante. Lo descrito anteriormente se puede observar en las siguientes imágenes.

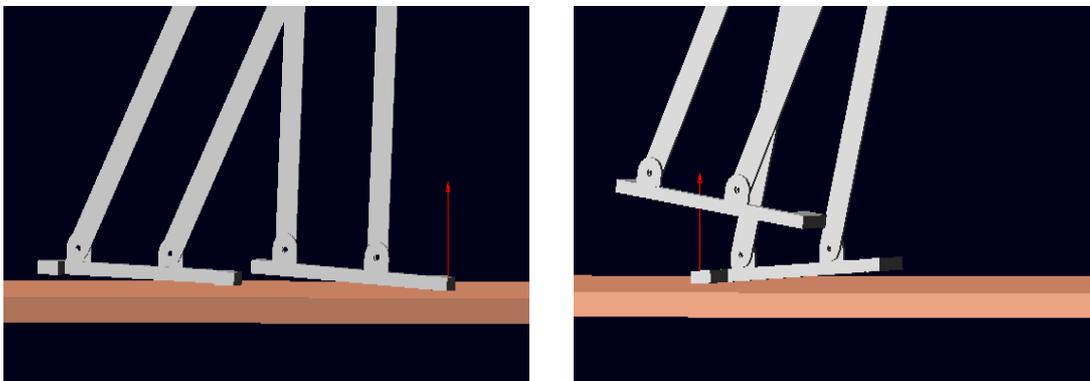


Figura 8 Movimiento del pie por el estabilizador primitivo

Este fenómeno provocaba que las dos superficies de los pies no estuvieran en contacto completo con el suelo durante el apoyo, produciendo una menor superficie de contacto.

Estos resultados condujeron a llevar a cabo modificaciones que mejoraran el comportamiento del robot bípedo. Se efectuaron modificaciones en el **estabilizador** para conseguir que los pies entraran completamente horizontales y paralelos al suelo, y también se propuso una mejora en el diseño de las *Caderas* y todo el *Sistema de Transmisión* para conseguir una posición del **centro de gravedad** que permitiera caminar de manera estable al robot.

Para corregir el problema relacionado con el centro de gravedad, se realizó una modificación en la cadera colocando un contrapeso que permitió recolocar el centro de gravedad del

bípido, hasta lograr la posición correcta del mismo. Esto repercutió de forma beneficiosa en el caminar del bípido, ya que favoreció que el momento de vuelco que se creaba anteriormente que hacía volcar hacia atrás al robot se viera reducido y no se desequilibrara.

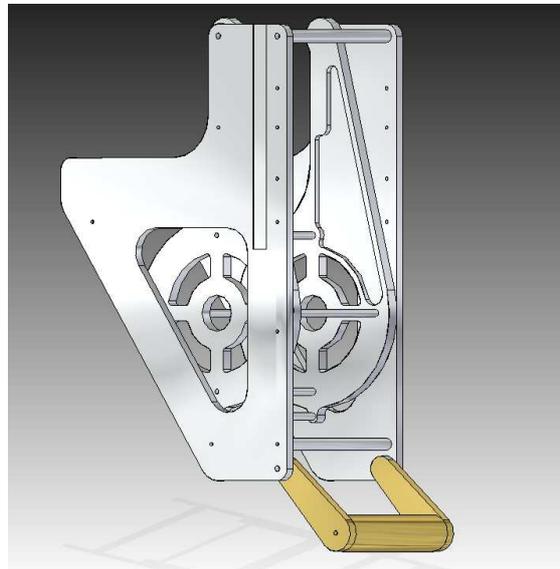


Figura 9 Cadera con contrapeso

Para el diseño del nuevo estabilizador se trató de abarcar el movimiento vertical de dicho elemento colocando una guía vertical en el borde delantero. Por ella se introdujo una deslizadera que a su vez hace de guía horizontal al nuevo estabilizador, esta de forma que rebasara el borde de la cadera para poder abarcar la totalidad del movimiento horizontal del estabilizador, como se refleja en la siguiente figura.

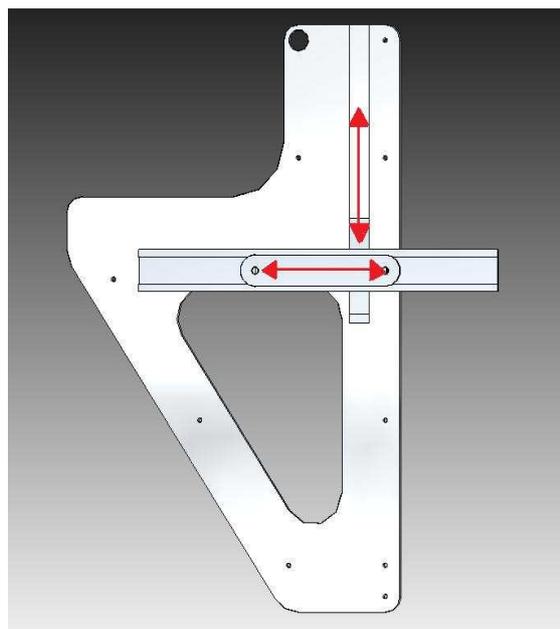


Figura 10 Deslizadera y estabilizador nuevos

- **2.3.2 PASIBOT con actuadores horizontales.**

La inclusión de actuadores horizontales en la cadera permitía ampliar el abanico de movimientos del robot, como el alargamiento y el acortamiento de la zancada.



Figura 11 Diseño de la cadera para actuadores horizontales

La adición de los actuadores horizontales permitía modificar el centro de gravedad del sistema, al poder alargar o acortar la longitud de la zancada y, además, se podía realizar cambios de trayectorias en el movimiento.

2.4. EL ROBOT MIMBOT

El robot PASIBOT fue diseñado con menos actuadores que juntas biológicas tiene la pierna humana, disponiendo de un único grado de libertad. Esta condición de diseño restringe considerablemente la movilidad del robot, por lo que se decidió efectuar un rediseño del mismo, añadiendo dos grados de libertad al mecanismo base. La modificación del diseño del PASIBOT consistió en colocar un par de actuadores lineales en cada uno de los puntos donde el mecanismo inferior de la pierna se fijaba a la cadera.

El robot *MIMBOT* constituye la evolución del robot PASIBOT tras las modificaciones realizadas encaminadas a habilitarlo para que imite lo más fielmente posible los movimientos del caminar humano. La nueva denominación procede del término “mimetismo”, es decir, adoptar comportamientos ajenos intentando imitarlos.

La adición de los pares de actuadores lineales antes mencionados permitiría al robot ser capaz de realizar acciones tales como subir un escalón, alargar o acortar el paso, inclinar el pie, superar un pequeño obstáculo, etc.

Así pues, en este modelo del robot MIMBOT se pretenden integrar los actuadores necesarios para permitir que el punto de la cadera donde se articulan los tendones superior e inferior pueda desplazarse linealmente en sentido horizontal y vertical. Asimismo, se mantendrá la modificación efectuada sobre el estabilizador.

Conocer cuál es este espacio de trabajo resulta vital a la hora de diseñar el sistema de actuadores y establecer sus dimensiones. Horizontalmente, la posición más retrasada posible del actuador es de 40 cm, y la más adelantada, de otros 40 cm. En caso de que se hiciese más largo el recorrido del mismo, se producirían colisiones y malos funcionamientos del mecanismo apareciendo aceleraciones y momentos demasiado altos para el posible funcionamiento del robot. Con la adición de los actuadores, la máxima zancada que el pie podría llegar a realizar sería de 522 mm, y la mínima de 42,5 mm. Todas las demás posiciones serían realizables dentro de las posibilidades que ofrezcan los rozamientos y en definitiva la estabilidad del MIMBOT.

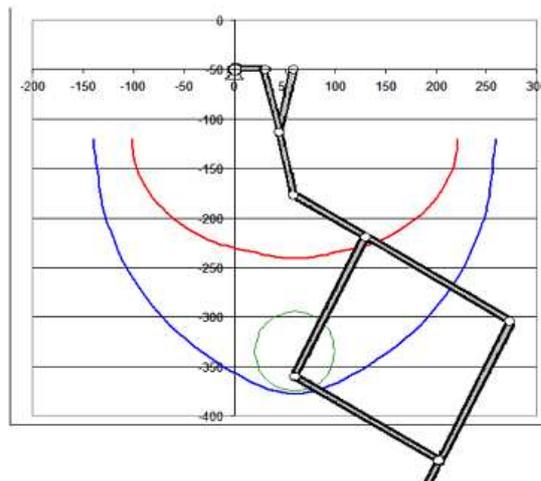


Figura 12 Espacio de trabajo

Para el diseño del Mimbot, fueron necesarias varias modificaciones en el diseño del antiguo Pasibot.

La cadera fue el sistema que mayor transformación sufrió. Se prolongó la vía para la deslizadera del estabilizador hasta el borde inferior de la misma, recorriendo toda su extensión. Se ideó una nueva deslizadera en forma de T invertida, con el actuador alojado en la guía que forma su tramo horizontal. El aspecto que muestra el diseño definitivo del conjunto se aprecia en la siguiente figura.

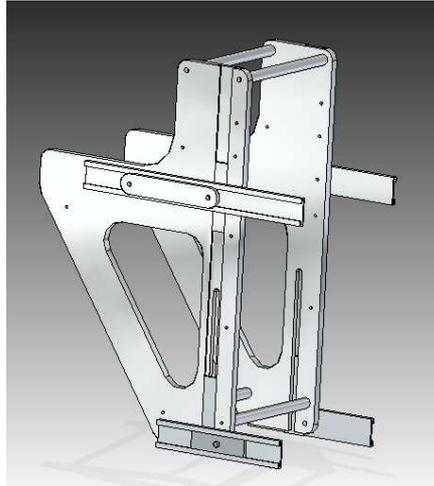


Figura 13 Diseño definitivo de la cadera del Mimbot

A la hora de construir el modelo real, los motores de los actuadores irán alojados en el interior de la cadera, por ese motivo se dejó el espacio en el hueco vertical de la cadera, que aloja las correderas.

Como se aprecia en la figura, la deslizadera no es simétrica, ya que la vía se prolonga más hacia la derecha que hacia la izquierda. Esto se debe a que la vía por la que se desplaza esta pieza no pasa exactamente por el punto en el que se unen los tendones superior e inferior con la cadera (en lo que sería la posición inicial del actuador); de este modo, dicho punto queda justo en la mitad de la guía de la deslizadera y el actuador puede recorrer la misma distancia tanto en un sentido como en el otro.

La distancia que se le va a permitir recorrer al actuador es de 40 cm en la dirección positiva del eje X, y de otros 40 cm en la dirección negativa, lo cual suma 80 cm de recorrido total que puede efectuar el punto de articulación de los tendones superior e inferior. Dado que la longitud del actuador horizontal va a ser de 6 cm, hay que contar con 3 cm más a cada lado, por lo que la guía horizontal de la deslizadera posee una longitud total de 14 cm. Este tipo de consideraciones no son aplicables al movimiento vertical de los actuadores, dado que la guía de la cadera se aplica a lo largo de toda su superficie, con lo que los límites al recorrido vertical de la deslizadera vienen dados por parte de la futura implementación de las funciones que definen su movimiento.

El punto central del actuador se situará en su posición de inicio en el punto de la cadera donde se articulan tendón inferior y superior. En la siguiente figura se muestra el conjunto de la deslizadera con el actuador ya instalado en su guía:

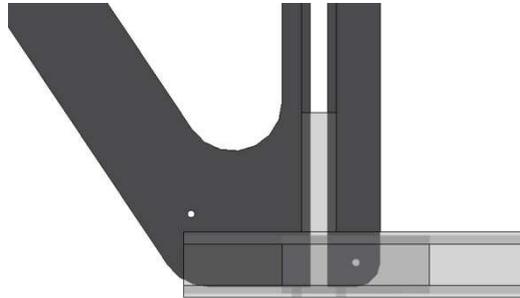


Figura 14 Vista detallada de la posición inicial del actuador

Para el diseño inicial del Mimbot se prescindió del montaje de la cadera interior instalada en anteriores Proyectos para sostener el conjunto de los mecanismos internos que dan movimiento al robot, para descartar posibles interferencias entre las piezas. Para el montaje del MIMBOT completo en Solid Edge, se tomaron el resto de las piezas del anterior modelo, incluyendo el estabilizador, y se instalaron sobre la cadera. Como se verá más adelante, en este proyecto, este modelo inicial del mimbot tuvo que sufrir otra modificación en su diseño, ya que al incluir los actuadores, algunos de sus elementos, como el contrafémur, fémur y tendón inferior colisionaban con ellos, por lo que hubo que darles más separación.

A continuación se muestra una imagen del diseño del modelo inicial del Mimbot.

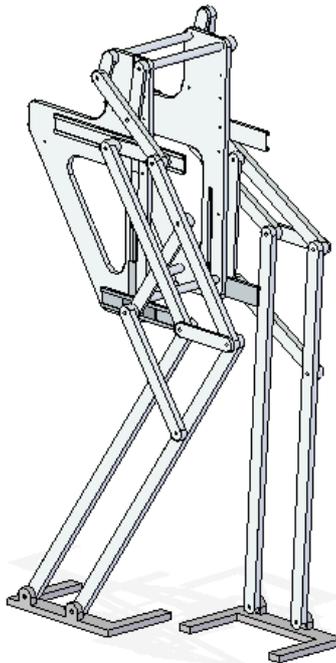


Figura 15 Mimbot inicial



Capítulo III:

METODOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN EN SOLID EDGE ST Y EN MSC. ADAMS.

3.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El método de trabajo para la realización de este proyecto ha seguido los siguientes puntos:

- 1. Documentación y estudio de los modelos predecesores.** Para ello se ha tenido que estudiar las características de los modelos anteriores. El proyecto que ha servido como base de este estudio ha sido “Rediseño del robot bípedo MIMBOT para incorporar habilidades miméticas” ya que es un proyecto centrado en las habilidades miméticas, no solo en las características del Pasibot, como los anteriores.
- 2. Mejorar el diseño de anteriores trabajos y empezar la implantación de los actuadores.** Los proyectos realizados hasta la fecha, tenían problemas en la estabilidad de los modelos al caminar de forma libre, esto es un problema crítico, porque sin ella es imposible poder sacar otro tipo de conclusiones y, con ello, construir un modelo real. La estabilidad es la principal característica que se va a tratar, pero no solo para el modelo Pasibot, sino para el Mimbot. La solución al problema ha consistido en rediseñar los pies, ya que el diseño del Mimbot original, supuso la modificación del espesor de varios elementos que lo componen. Esto generó un desplazamiento lateral de los pies, separándose y produciendo un desequilibrio también lateral al iniciar el paso en el modelo libre. Para ello se va a desgranar el robot y se va a hacer un estudio exhaustivo de los focos del problema. Se va tener que rediseñar el modelo con el programa Solid Edge ST y, una vez se tenga el modelo final se procederá a simular con el programa MSC.Adams. Una vez que se haya corregido el problema de estabilidad, se procederá a descolgar el estabilizador horizontal del Mimbot para conseguir un modelo que tenga el estabilizador original para aprovechar sus cualidades.
- 3. Por último, se simularán los modelos para las distintas configuraciones y se sacarán conclusiones.**

A continuación se describe el procedimiento que se ha seguido en la utilización de ambos programas.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL SOLID EDGE ST

El programa Solid Edge ST es un programa de diseño asistido por computador (CAD). Para diseñar los diferentes elementos se trabaja en su “entorno pieza”. Las funciones que se han utilizado con mayor asiduidad han sido “protrusión” y “vaciado”.

Una vez realizadas las modificaciones pertinentes en las piezas, se ha procedido a montarlas y ensamblarlas unas con otras. Para ello se ha utilizado el “entorno conjunto” del programa *Solid Edge ST*. Después del montaje de las piezas se necesita asegurar el correcto funcionamiento del conjunto completo, para evitar que se produzcan interferencias entre las piezas.

Para el montaje de las piezas se han utilizado las relaciones asociativas que se exponen a continuación:



Hacer coincidir:

Mediante esta aplicación se garantiza que una cara plana de la pieza entrante sea coincidente con la cara plana de otra pieza ya existente, manteniendo el paralelismo entre ellas.



Alinear caras:

Garantiza que una cara plana de la pieza entrante sea coincidente con la cara plana de una pieza ya existente, de forma que sus normales tengan el mismo sentido, manteniendo el paralelismo entre ambas caras.



Alineación axial:

Garantiza que una superficie cilíndrica de la pieza entrante sea coaxial con otra de la pieza existente.



Insertar:

Se trata de una aplicación que combina las aplicaciones de *Hacer coincidir* y *Alineación axial* que inmoviliza la pieza entrante. No se logra el mismo efecto que al aplicar ambas relaciones por separado, ya que en ese caso se permitiría el giro de la pieza, mientras que con la relación *Insertar* la pieza queda totalmente fija. Una aplicación característica de este tipo de relaciones es la de colocación de tornillos o piezas de fijación similares.



Paralelo:

Garantiza que una línea o eje cilíndrico de la pieza entrante sea paralela a (o coincidente con) una línea o eje cilíndrico de una pieza existente.

Para acoplar las piezas se ha utilizado la aplicación *Biblioteca de piezas*, mediante la cual se seleccionan las piezas que se quieren ir incorporando al conjunto, a través del directorio donde se encuentra la pieza, siendo aconsejable que todas las piezas se encuentren en el mismo directorio. Una vez que se selecciona la pieza se arrastra con el botón izquierdo del ratón hasta la ventana gráfica donde se quiere realizar el ensamblaje del conjunto. La primera pieza que se inserta queda anclada y sirve de base para la colocación de las demás. Una vez que se ha montado todo el conjunto sólo falta comprobar que no existen interferencias entre los elementos que lo componen. Para ello se ha utilizado el *Entorno Motion*, en el cual se simulará un motor actuando en el conjunto. Se debe comprobar que durante la simulación del movimiento no exista ninguna interferencia entre los elementos y que todas las articulaciones entre piezas se mantengan estables.

En la siguiente imagen se pueden apreciar el diseño final del modelo.

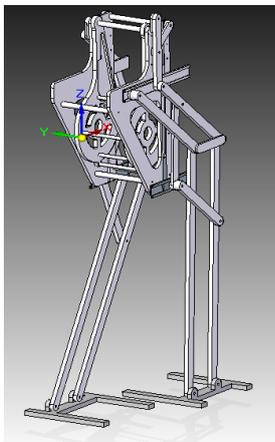


Figura 16 Vista lateral del modelo final

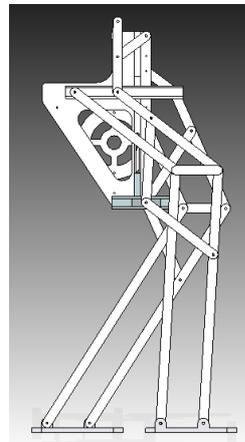


Figura 17 Imagen del modelo final

Las modificaciones realizadas hasta el momento han sido efectuadas, como se ha comentado, con la base de la cadera de la primera modificación, esto es, con el estabilizador horizontal. El objetivo buscado era conseguir que el robot caminara de forma que mantuviera el equilibrio.

A continuación se explica el procedimiento que se ha seguido para utilizar el programa MSC.Adams, con el que se han realizado las simulaciones del Mimbot.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL MSC. ADAMS

MSC. Adams es uno de los programas de análisis de movimiento y dinámica multicuerpo más utilizado en el mundo. Adams permite estudiar la dinámica de las partes móviles, analizar el modo en el que las cargas y las fuerzas se distribuyen a lo largo de los sistemas mecánicos y mejorar y optimizar el rendimiento de sus productos.

Los métodos de diseño usados tradicionalmente, basados en ir efectuando pruebas a medida que se construye, son caros, consumen mucho tiempo, y en ocasiones hacen que la tarea resulte prácticamente imposible de llevar a cabo. Las herramientas basadas en el CAD ayudan a evaluar cosas como la interferencia entre partes y el movimiento cinemático básico, pero ignoran el comportamiento dinámico basado en físicas reales de sistemas mecánicos complejos. Por otra parte, los programas que hacen uso del Método de Elementos Finitos (MEF) son adecuados para el estudio de la vibración lineal y dinámica transitoria, pero resultan poco eficientes en el análisis de grandes rotaciones y otros movimientos no lineales de sistemas mecánicos.

En cambio, este programa permite a los ingenieros crear y probar fácilmente prototipos virtuales de sistemas mecánicos en mucho menos tiempo y con menor costo que los requeridos si hubiera que construirlos físicamente y someterlos a pruebas. A diferencia de la mayoría de herramientas de CAD, Adams incorpora las físicas real resolviendo simultáneamente ecuaciones de cinemática, estática, cuasi-estática y dinámica.

Por otra parte, la tecnología de resolución de sistemas dinámicos multicuerpo que incorpora Adams le permite procesar dinámicas no lineales en mucho menos tiempo que el empleado por las herramientas de MEF. Las cargas y fuerzas calculadas por las simulaciones de Adams mejoran la precisión del MEF proporcionando un mejor cálculo de sus variaciones a lo largo de un amplio rango de movimientos y entornos operativos.

El programa MSC. Adams consta de diversos módulos opcionales, que permiten a los usuarios simular e integrar componentes mecánicos, neumáticos, hidráulicos, electrónicos y de tecnologías de control de sistemas para construir y probar prototipos virtuales que representan con precisión las interacciones entre estos subsistemas.

Concretamente, en este Proyecto se utilizará el módulo Adams/View, que es el indicado cuando se desea llevar a cabo simulaciones de un mecanismo. A continuación se muestra de forma detalla el proceso llevado a cabo en el presente proyecto del manejo de este programa.

En este apartado, se detallarán los pasos preliminares que se aplicarán sobre el modelo importado, como puedan ser su correcto posicionamiento, especificar de las propiedades del material o establecer las relaciones entre piezas y restricciones de movimiento necesarias.

3.3.1 Importación desde Solid Edge ST.

El modelo de MIMBOT que se desea estudiar se ha guardado previamente en Solid Edge como un archivo de tipo Parasolid, que posee la extensión “.x_t”. Esto es esencial para que el Adams reconozca el tipo de archivo y nos permita abrirlo y operar con él. Tras abrir el módulo Adams View, aparece la ventana de inicio de la figura:

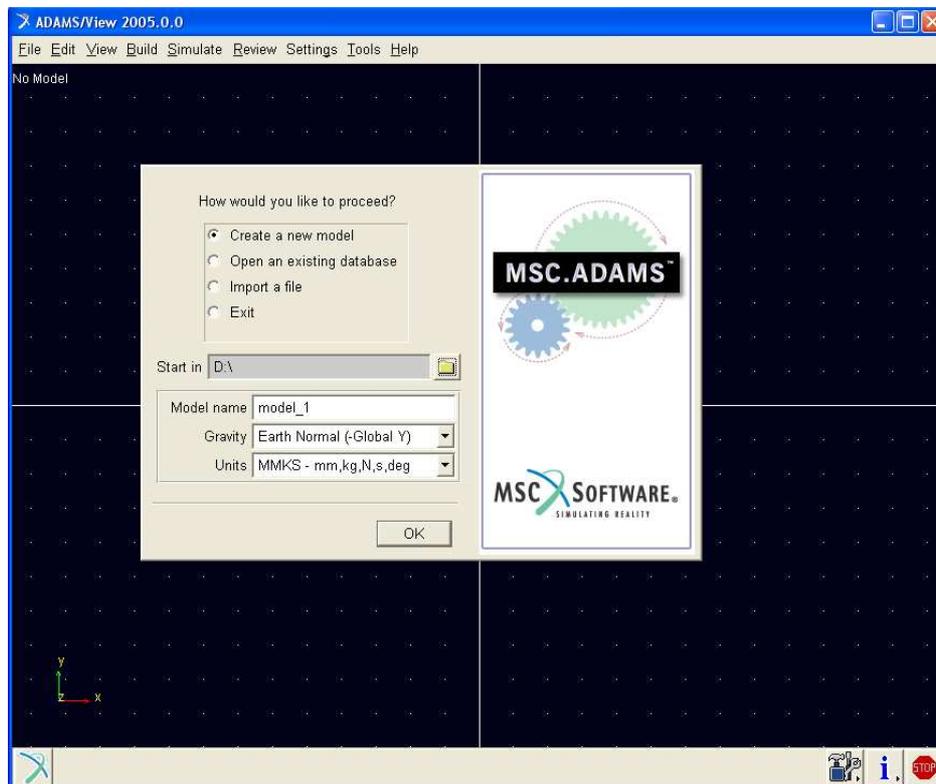


Figura 18 Ventana de inicio de Adams View

En ella, se elige la opción “Import a file” y, en la línea de “Start in”, se podrá seleccionar la carpeta en la que queramos ir guardando nuestro trabajo con el programa.

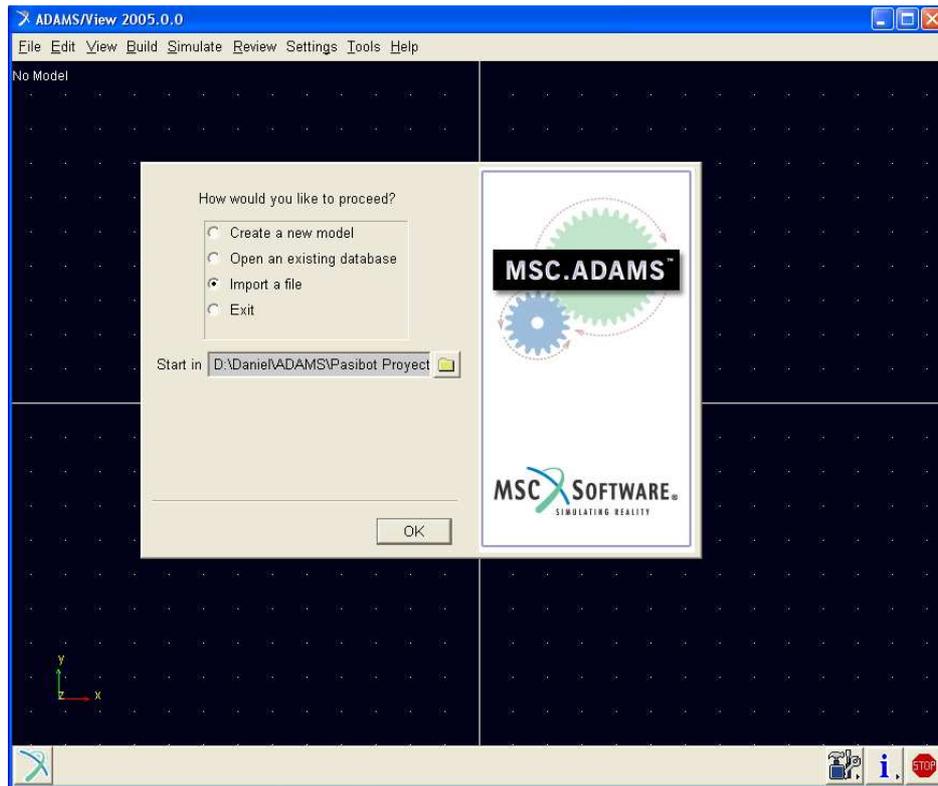


Figura 19 Ventana de importación de modelo

Una vez se ha pinchado en “OK”, aparece la pantalla de la figura, en la que se podrá elegir el archivo de tipo Parasolid que nos interesa. Para ello, en “File type” se elegirá el tipo “Parasolid”; a continuación, en el cuadro de diálogo junto a “File to read” se pinchará con el botón derecho del ratón, apareciendo un menú desplegable, del que se hará click en “Browse”.

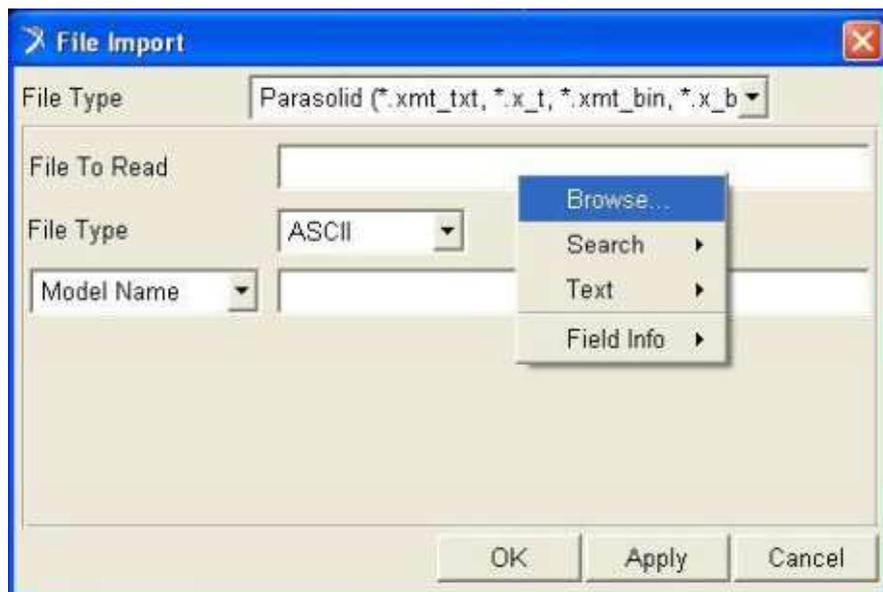


Figura 20 Pantalla de selección de archivo a importar

Se buscará y seleccionará el archivo del MIMBOT, tras lo cual únicamente resta nombrarlo como se desee. Para ello, se hace click en el cuadro de diálogo junto a "Model Name", se elige "Create" y, en la siguiente ventana, se escribe el nombre deseado:

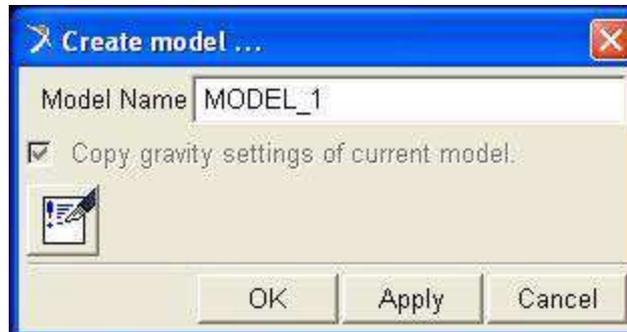


Figura 21 Ventana de nombre del modelo

El programa no admite nombres que contengan espacios, por lo que, si se escriben varias palabras, será conveniente separarlas mediante guiones bajos.

Tras pulsar "OK" dos veces, se abrirá el modelo, que probablemente se encontrará en una posición no deseada, tal y como muestra la figura:

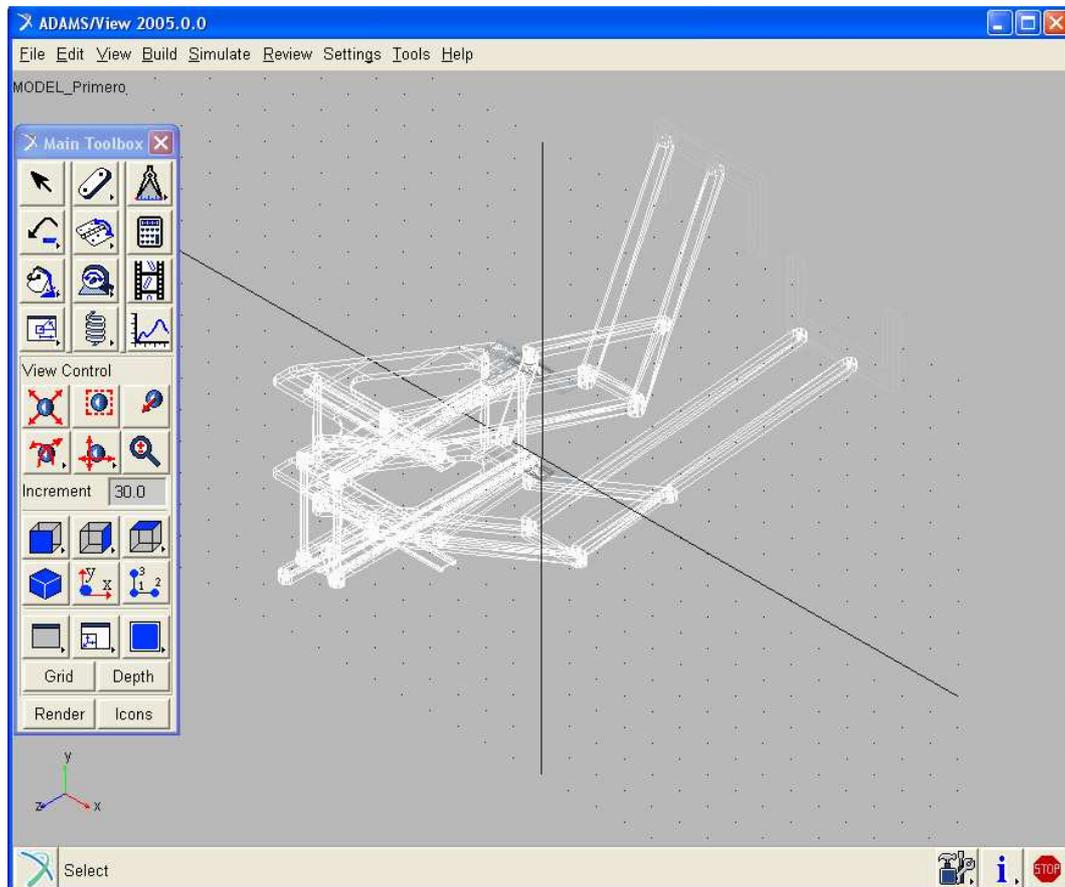


Figura 22 Modelo recién importado

Esto se debe a que los ejes en los que se diseñó con Solid Edge no coinciden con los de MSC Adams.

3.3.2 Posicionado del modelo.

En primer lugar, se reposicionará el MIMBOT, con el fin de que se sitúe más acorde con la malla de trabajo y los ejes que aparecen. Para hacer más cómodo el manejo del modelo, se recomienda renderizarlo pulsando el botón **Render** de la barra de herramientas principal (“Main Toolbox”), tras lo cual se tendrá una mejor visión de él.

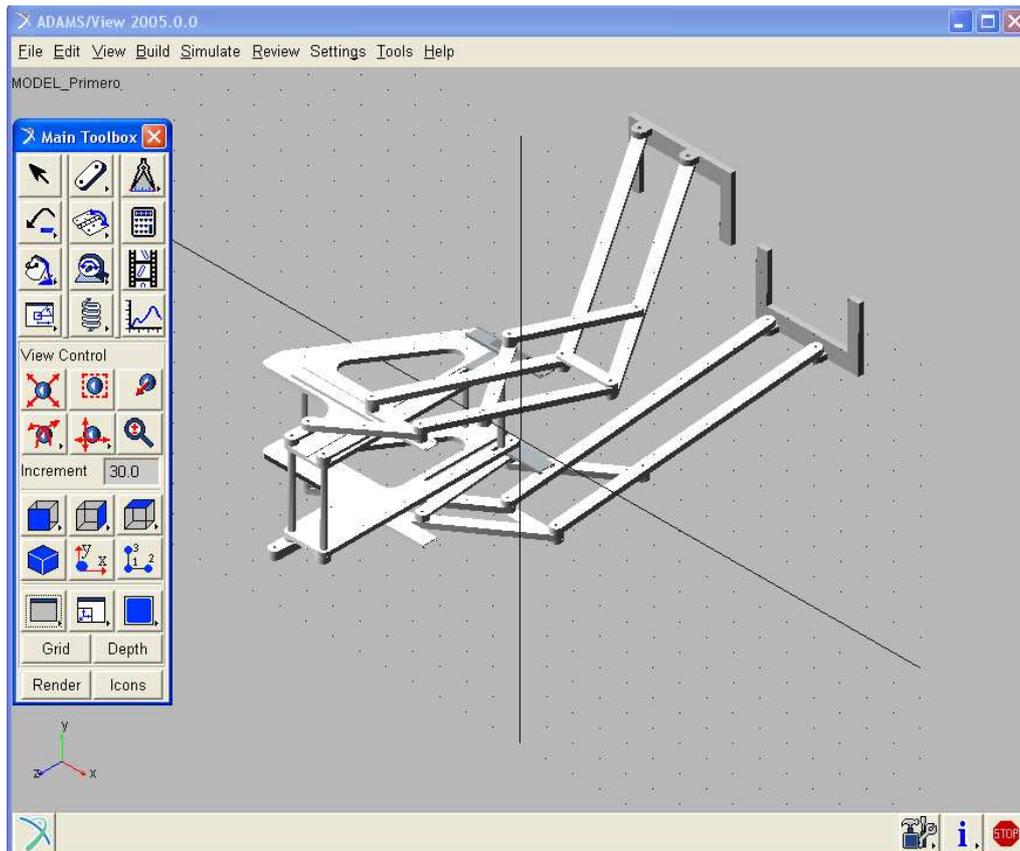


Figura 23 Modelo renderizado

El siguiente paso es girar el modelo completo, y para ello se hará click en  y, mediante las flechas y eligiendo el ángulo, se podrá posicionar correctamente.

En mi caso, bastó con seleccionar la vista lateral, elegir un ángulo de 90° y pulsar la flecha . De este modo, el modelo queda de la siguiente forma:

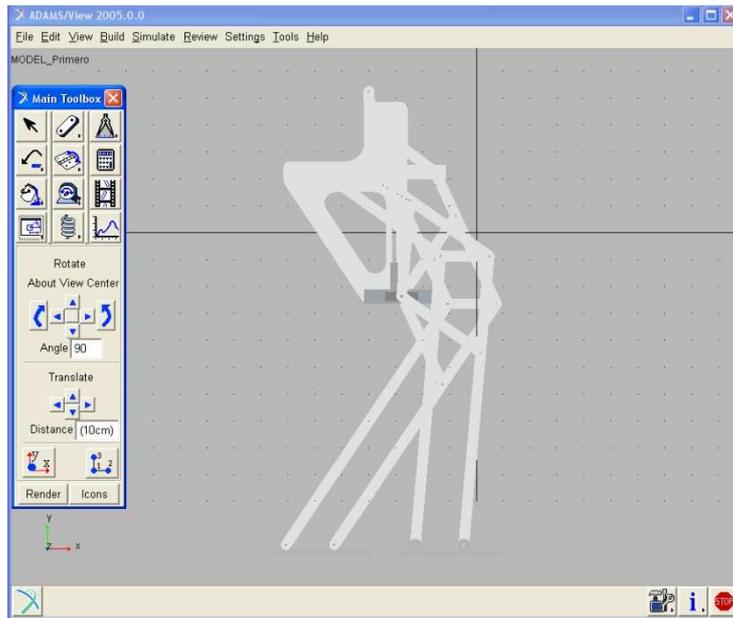


Figura 24 Modelo girado

A continuación, se situará un punto significativo del MIMBOT en el centro de coordenadas de la malla de trabajo; se ha elegido el eje de rotación de la manivela izquierda. Para trasladar el modelo, se despliega con el botón derecho el menú de posición y se elige el icono de traslación



. Se marca el recuadro de la opción "Selected" y se selecciona, arrastrando el ratón, el modelo completo. Después, se hace click en el centro de rotación de la manivela y, a continuación, en el centro de coordenadas de la malla, con lo que el MIMBOT queda finalmente posicionado, tal y como se ve en la figura.

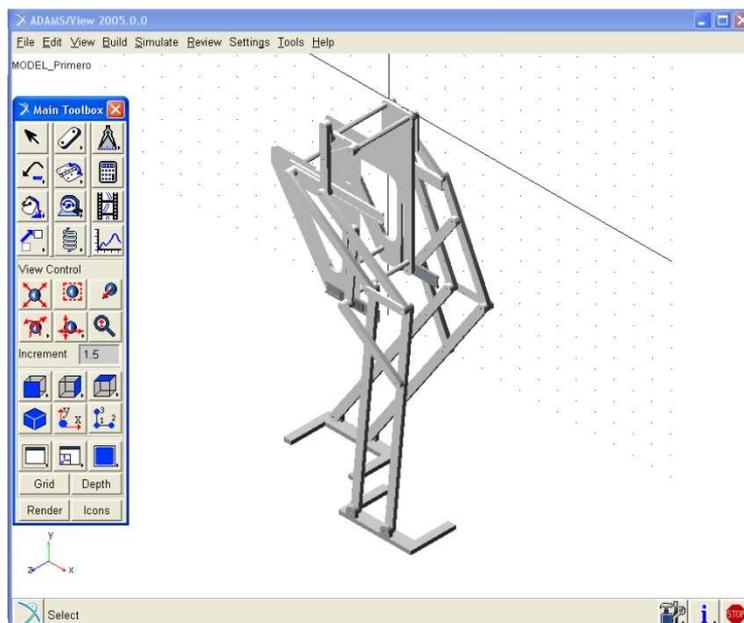


Figura 25 Modelo posicionado

3.3.3 Asignación de nombres, propiedades y color.

Por defecto, el programa identifica a las distintas piezas que forman parte del modelo como PART_X, donde “X” es el número asignado a esa pieza. Será necesario, por tanto, ir asignando a todas y cada una de las piezas un nombre que facilite su diferenciación a posteriori, y un material para que cuando el programa efectúe las simulaciones tenga en cuenta sus propiedades.

Para ello, se procede de la siguiente manera: se pincha en el menú “Tools” de la parte superior de la ventana del programa y se selecciona “Database Navigator”. Aparecerá la ventana de la figura 57, en la que se eligen las opciones “Browse” y, más abajo, “Bodies”.

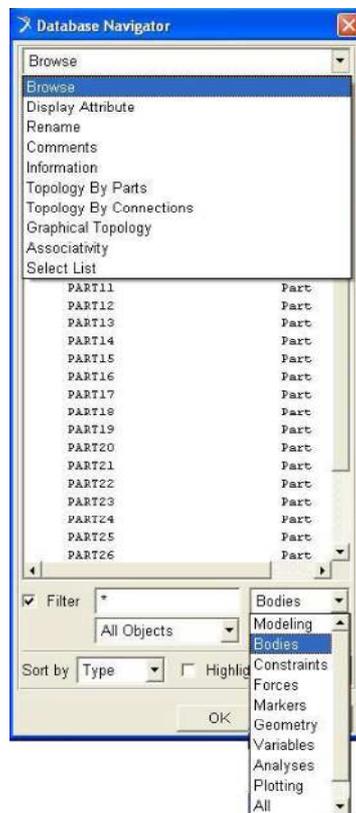


Figura 26 Database Navigator

Tras ello, se irá pinchando en las piezas del modelo (“parts”) una por una, y en la ventana de Información que aparece se hace click en “Modify”, tras lo cual surgirá la ventana de modificación de la pieza (“Modify Body”) de la figura.

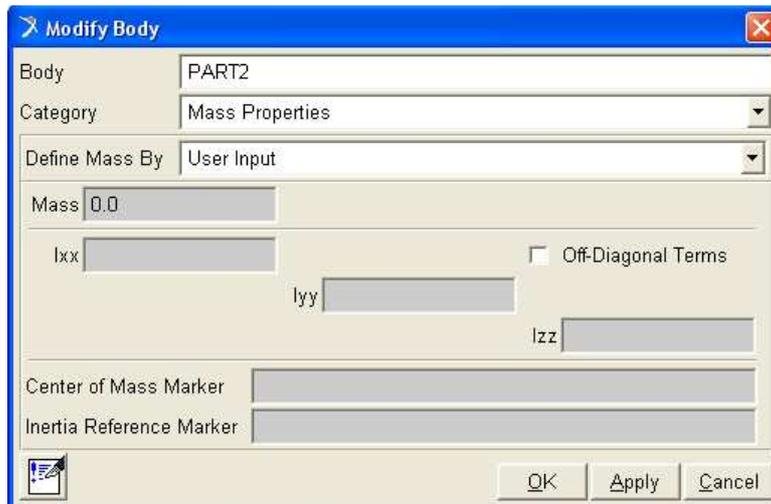


Figura 27 Modificación de la pieza

Para cada una de las piezas, en el cuadro de diálogo junto a “Category” se elegirá “Name and position”, donde podremos modificar el nombre que el programa proporciona por defecto a la pieza, escribiéndolo en “New name” y pulsando “Apply” (fig. 59).

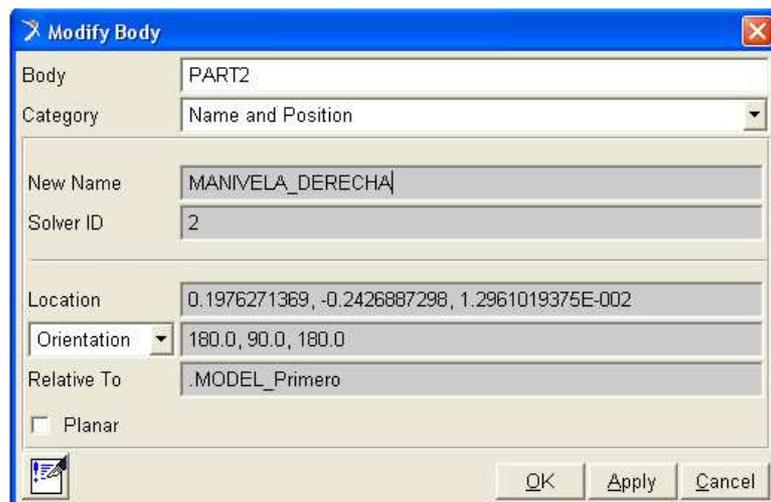


Figura 28 Cambio de nombre de la pieza

Tras ello, se pincha en “Category> Mass properties”, en “Define Mass By” se elige “Geometry and Material Type” y en el cuadro de diálogo de “Material Type” haremos click con el botón derecho, seleccionando a continuación “Material> Guesses”, que nos ofrecerá elegir entre una serie de materiales cuyas propiedades tiene ya almacenadas el programa. En todos los casos, el material es el aluminio (“aluminium”).

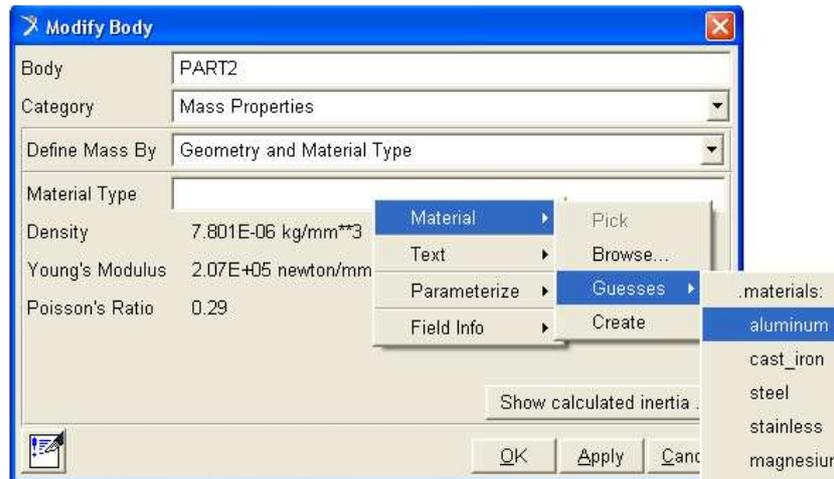


Figura 29 Elección del material

Tras aceptar pulsando “OK” y realizar la operación con todas las piezas, en la figura se puede apreciar cómo, en cada pieza del robot, han aparecido unos ejes locales que señalan dónde se encuentran sus centros de masas, con sus respectivos “markers”.

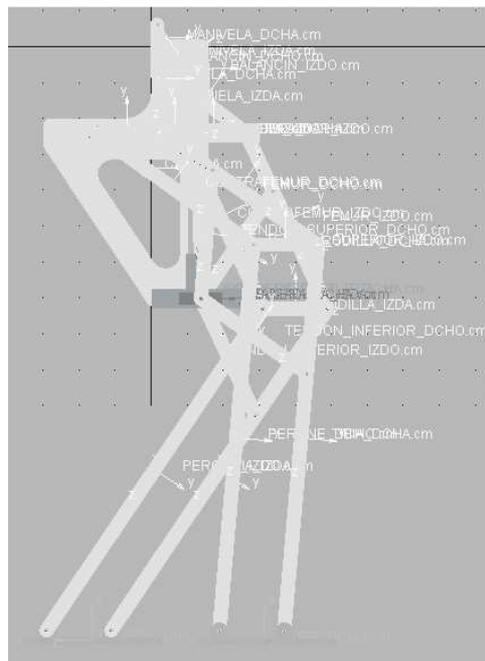


Figura 30 MIMBOT con c.d.m.

Por último, se decidió cambiar el color de alguna pieza mediante el menú “Appearance” seleccionable tras pinchar en cada sólido, con el fin de mejorar su visualización a la hora de observar las simulaciones y los vídeos. Las piezas homónimas y simétricas a izquierda y derecha se han coloreado de igual manera, como se ve en la figura.

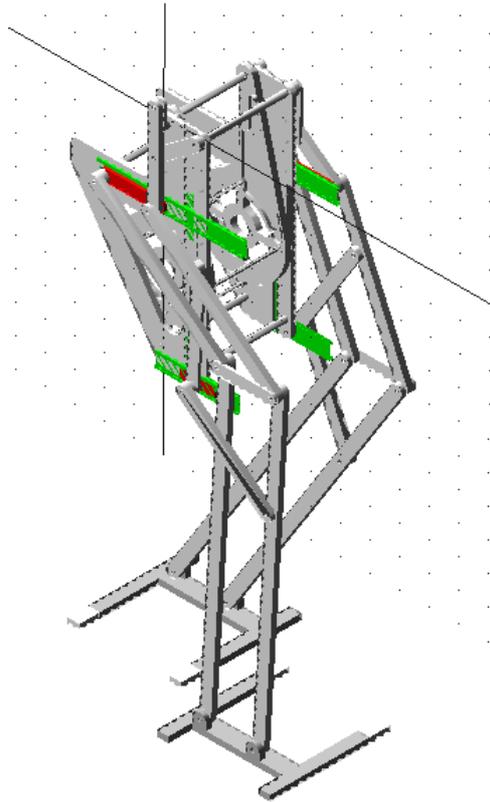


Figura 31 MIMBOT con color

3.3.4 Implementación de juntas.

Esta es una de las partes más delicadas del proceso de preparación del modelo, ya que se requiere una correcta implementación de las juntas entre piezas para establecer los movimientos que es capaz de efectuar cada pieza.

Las juntas que se han implementado entre las piezas del MIMBOT han sido de tres tipos: por una parte, las de rotación, para aquellas piezas que efectúan un movimiento de giro en torno a un eje; por otra, las traslacionales, que se aplicarán a piezas que deban desplazarse a lo largo de una trayectoria rectilínea; a estas dos se les une un tipo de junta, la de fijación, que se usará en momentos puntuales para anclar dos piezas entre sí, o bien una pieza en el espacio (“ground”, en el interfaz del programa). Más adelante, los motores rotativos o lineales se instalarán sobre juntas ya existentes.



Figura 32 Menú de Juntas

Se comenzará implementando las juntas de rotación sobre todos aquellos puntos en los que se articulan piezas que tienen libertad para girar en torno a un punto. Para ello, se seleccionará el

tipo de juntas de revolución  y se mantendrá la opción de dos cuerpos y una localización. De este modo, se pinchará en primer lugar sobre los dos cuerpos entre los que se va a establecer la junta, y posteriormente, en el punto (marcado con un círculo) que pertenece al eje del giro, apareciendo el icono mostrado en la figura.

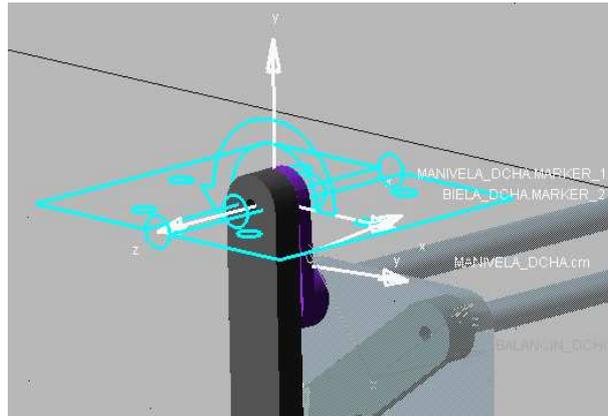


Figura 33 Junta de rotación entre biela y manivela

Una vez establecidas todas las juntas de rotación, se procederá a implementar las de traslación. Para la deslizaderas se utilizará la junta "Point Curve" seleccionando "Edge", de esta manera se podrá elegir una esquina de la deslizadera y posteriormente la línea sobre la que discurrirá su movimiento. Se realizará esta operación al menos en 3 puntos de la deslizadera para asegurar que ésta se mueva en un plano y no gire respecto a su guía y así no interferir con la cadera en su movimiento de ida y vuelta. Esta junta se utilizará entre el estabilizador y la corredera y entre la corredera y la guía vertical de la cadera.

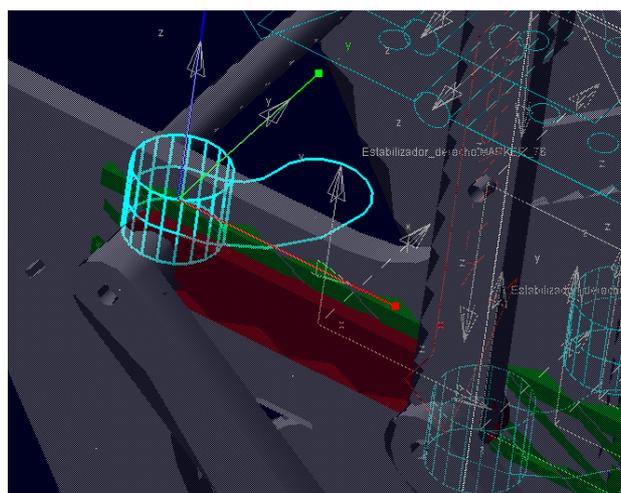


Figura 34 Junta Point curve entre el estabilizador y la corredera

En las correderas y deslizaderas de la parte inferior de la cadera, en las que irán ubicados los actuadores verticales y horizontales, se han utilizado las juntas de traslación, representadas

con el icono . Para ello, se seleccionará el tipo de junta, se pinchará sobre la pieza que se desee y se volverá a hacer click cuando la flecha que aparece se encuentre en la dirección en la que se quiera que se produzca el movimiento.

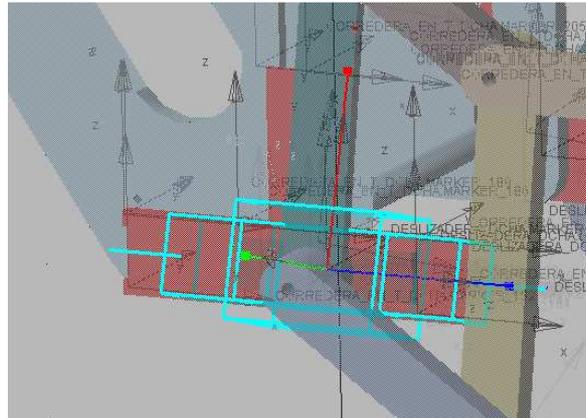


Figura 35 Junta de traslación entre deslizadera y actuador

Por último, se implementará una junta de fijación (“Fixed” ) entre las manivelas izquierda y derecha. Esto se hace porque el motor rotativo se instalará sobre la manivela derecha, y se desea que el mismo movimiento se transmita también a la manivela izquierda. Para implementar la junta, se elige la de fijación, se hace click sobre ambas piezas y, finalmente, se pincha sobre cualquiera de los “markers” que se indican para dejar la junta establecida.

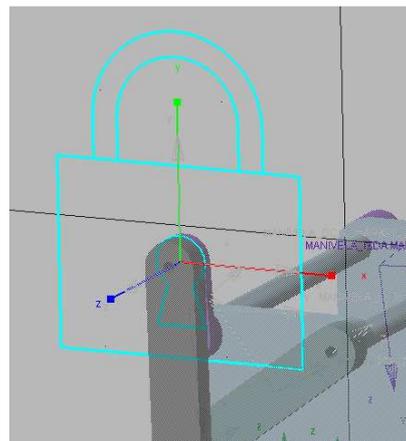


Figura 36 Junta de fijación entre las manivelas

Con esto, quedan implementadas todas las juntas que son comunes a todas las simulaciones que se efectuarán con Adams. Según se estudie el modelo colgado o el modelo libre, se tendrán que establecer algunas juntas más, tal y como se explicará en el apartado correspondiente.

3.3.5 Implementación de motores.

Una vez establecidas todas las juntas, se procederá a implementar los motores donde corresponda. En primer lugar, se instalará un motor rotativo en la junta de rotación que relaciona la cadera con la manivela derecha.

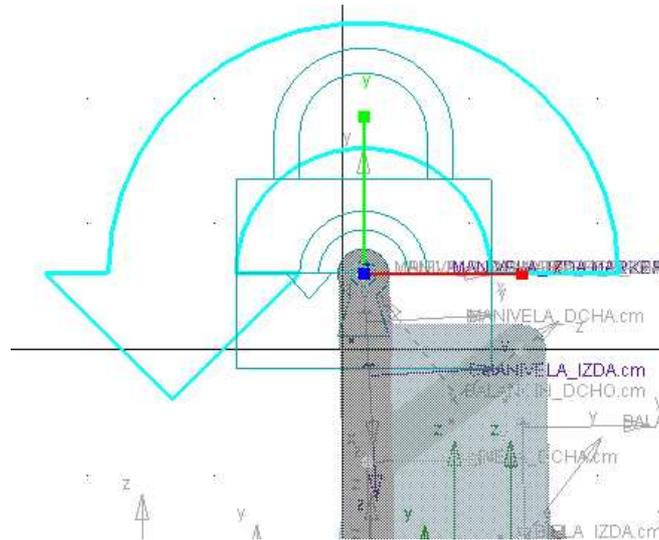


Figura 37 Motor rotativo en la manivela derecha

Se aplicarán, además, dos motores lineales en cada lateral de la cadera: uno sobre la junta de traslación de la deslizadera en T y otro sobre la junta del actuador a lo largo de la deslizadera.

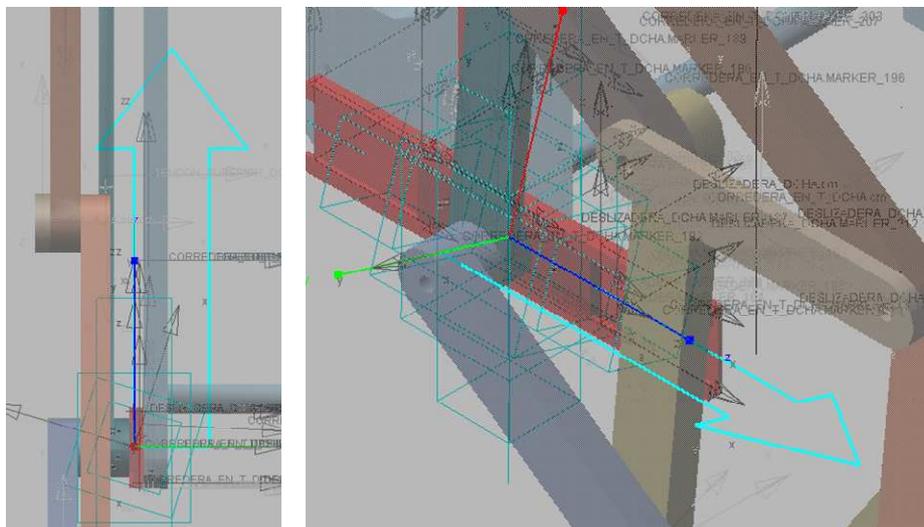


Figura 38 Motores lineales en deslizadera y actuador

Los valores de la velocidad de los motores los asigna el programa por defecto, pero en este momento se recomienda dar valores nulos a todos ellos, es decir, mantener parados los motores. Ya que primero se va a estudiar la estabilidad del modelo, sin la utilización de los estabilizadores, con las propiedades del Pasibot. Con la implementación de los motores se puede dar por concluida la fase de preparación del MIMBOT, para el modelo colgado. Pero si se deja el modelo libre, además son necesarios los siguientes pasos.

3.3.6 Creación del suelo y juntas.

La pieza del suelo se puede crear desde la barra de tareas de diseño de Adams mediante dos procedimientos: o bien como extrusión, o bien de la manera en la que se realizó en este caso,

con el comando “BOX”, que se representa como . Este comando crea un paralelepípedo a partir de un perfil rectangular que se traza sobre la malla de trabajo.

La creación del suelo siguió los siguientes pasos: en primer lugar, se trazó un perfil rectangular de la longitud deseada, de forma que su vértice superior izquierdo coincidiera con la esquina inferior delantera del pie más adelantado, de modo que no se produjeran interferencias y que no hubiera que modificar la altura a la que se sitúa el suelo.

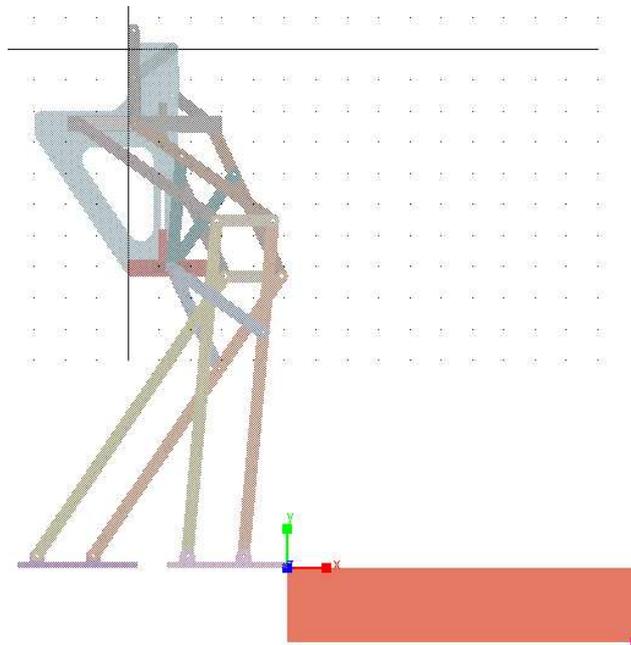


Figura 39 Creación del perfil rectangular

Después, se proporcionó la anchura deseada al suelo. Para ello, hay que entrar en el menú “Settings> Working Grid” y desactivar la casilla “Show Working Grid”. Después, se selecciona la vista cenital del modelo y se pincha en la esquina del suelo desde la cual se quiera agrandar hasta el tamaño deseado. Finalmente, mediante los comandos de la barra de posición se sitúa el suelo de en la posición que convenga. El material que se ha asignado al suelo ha sido Aluminio, al igual que para el robot.

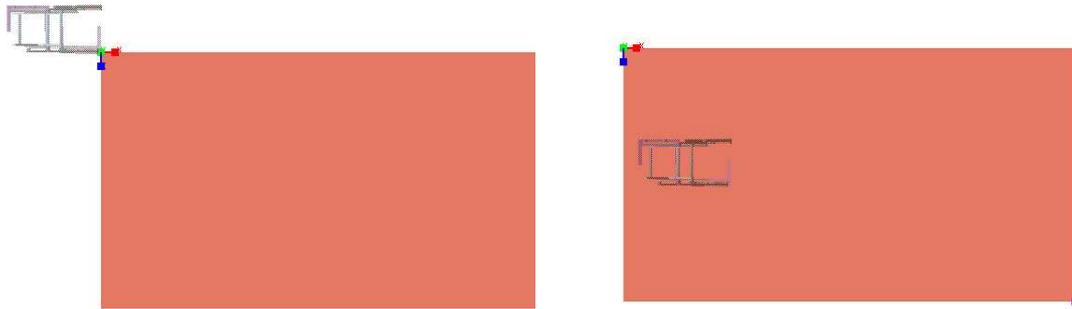


Figura 40 Redimensionamiento y posicionamiento del suelo

En cuanto a las juntas, dado que en el paso siguiente se aplicó aceleración de la gravedad al modelo, se tuvo que establecer una junta de fijación entre el suelo y el espacio de trabajo, para que se mantuviera fijo y no cayera. Esta operación se realizó tras asegurarse de que el suelo no iba a modificar su posición más, dado que, una vez establecidas las juntas, si el objeto se mueve, estas juntas han de ser aplicadas de nuevo para que la simulación las reconozca. Es importante recordar, dado que lo usual es que se parta del modelo colgado, que en esta ocasión no existe la junta de fijación entre la cadera y el espacio de trabajo, ya que obviamente ahora se requiere que el MIMBOT se mueva libremente y sin restricciones.

3.3.7 Creación de contactos y gravedad.

En esta ocasión, el MIMBOT debe reconocer la presencia de un suelo para que las simulaciones se puedan llevar a cabo correctamente así que se procedió a implementar los contactos entre los pies y el suelo. Para ello, es necesario pinchar en la barra de herramientas el menú de Contacto, que se encuentra en el menú desplegable de aplicación de fuerzas sobre el modelo,



representado por el icono . Al hacer click sobre él, se abre la ventana de la figura, con la que se podrá establecer el contacto entre pares de piezas.

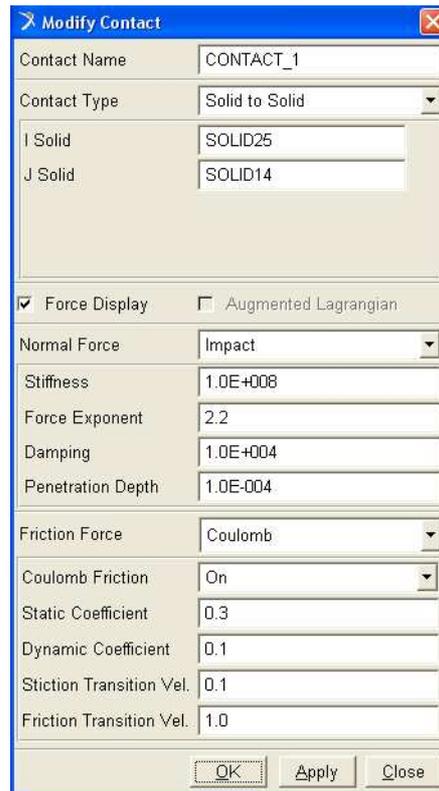


Figura 41 Menú de contacto

En primer lugar, se hace click con el botón derecho en el cuadro de diálogo junto a “I solid”, se selecciona “Contact_Solid> Pick” y se pulsa sobre una de las dos piezas entre las cuales se quiere aplicar el contacto, por ejemplo, uno de los pies. A continuación, se escoge la misma opción para el cuadro de diálogo de “J solid” y se pincha sobre la segunda pieza, en este caso, el suelo. Los parámetros de la fuerza normal se dejan por defecto y, en “Friction Force”, se selecciona Coulomb. En principio, también se mantienen los parámetros que aparecen por defecto, pero durante las simulaciones se podrán variar algunos como el del coeficiente estático. Esta operación se repite para el otro pie. Una vez terminado, se elige “Apply” y se cierra la ventana, ya que no es necesario establecer ningún otro contacto.

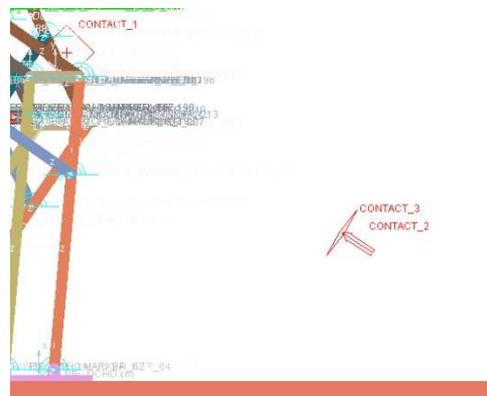


Figura 42 Contactos entre pies y suelo

Un elemento importante entra en juego en este caso es la aceleración de la gravedad, ya que el MIMBOT ahora se ve sometido a sus efectos. Para su aplicación, en el menú de fuerzas de la

barra de tareas se selecciona el icono , que crea automáticamente el vector de la aceleración de la gravedad. Para modificar su valor y dirección, se selecciona “Gravity” en el menú “Settings” y se especifica un valor de -9,81 en la dirección del eje Y. Con esto, los pasos previos a las simulaciones con el MIMBOT se dan por concluidos.

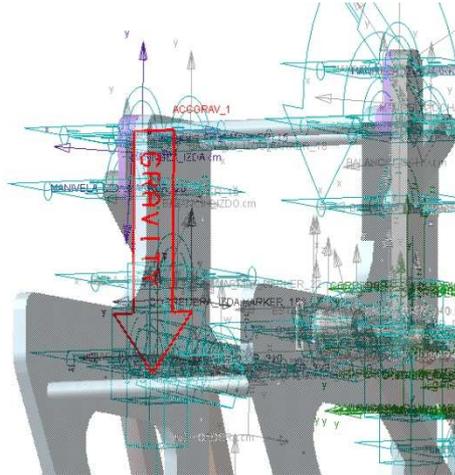


Figura 43 Aceleración de la gravedad

Una vez explicados los programas necesarios para realizar este proyecto, se procederá a numerar los pasos que se han llevado a cabo hasta conseguir el modelo final.

3.4 Modificaciones realizadas para conseguir el modelo final

3.4.1 Modificación del modelo con el estabilizador modificado

Antes de proceder al estudio del modelo final se han realizado una serie de pruebas para conseguir una mejor estabilidad en el robot, ya que el modelo del que se partía era muy inestable y, por tanto, no permitía continuar sacando conclusiones con garantías. La raíz del problema era desconocida, por lo que se empezó a modificar diferentes aspectos, tanto del modelado como de relaciones entre piezas, siempre siguiendo una coherencia. La cadera ha sufrido una serie de modificaciones desde el modelo inicial a éste último.

El modelo con el que se va a trabajar es el denominado Mimbot. Este modelo posee la primera modificación en la corredera de la cadera y, como su nombre indica, la inclusión de actuadores lineales en ambos lados de la parte inferior de la misma. Estos actuadores servirán para modificar la longitud de la zancada tanto vertical como horizontalmente.

Las modificaciones que se han ido efectuando se pueden ver en las siguientes imágenes:

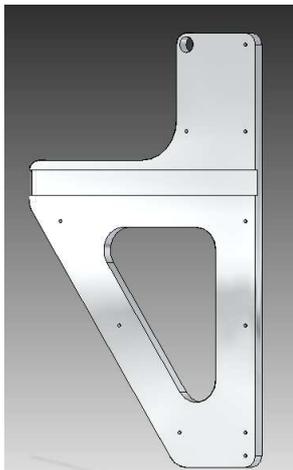
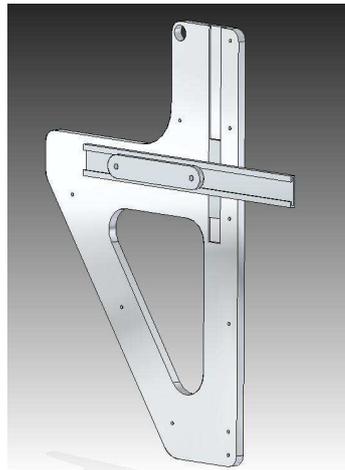
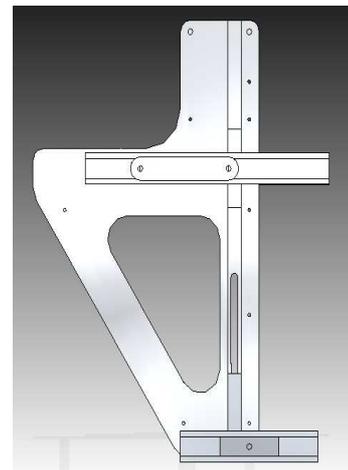


Figura 44 Modelo original



Primera modificación



Modelo actual

El primer aspecto del diseño que se comprobó fue la masa y longitud de las piezas que componen el mecanismo. En la siguiente tabla se muestran los valores de todas las masas de las piezas del sistema.

Pie izquierdo 0.2805674328 kg	Pie derecho 0.2804620345 kg
Peroné izquierdo 0.3034519684 kg	Peroné derecho 0.3034519684 kg
Tibia izquierda 0.3029139706 kg	Tibia derecha 0.3029139706 kg
Tendón inferior izquierdo 0.1126279413 kg	Tendon inferior derecho 0.1126279413 kg
Rodilla izquierda 2.8425984193E-002 kg	Rodilla derecha 2.8425984193E-002 kg
Tendón superior izquierdo 6.1962946935E-002 kg	Tendón superior derecho 6.1962946935E-002 kg
Contrafémur izquierdo 0.1635619345 kg	Contrafémur derecho 0.1635619345 kg
Fémur izquierdo 0.1549539706 kg	Fémur derecho 0.1549539706 kg
Deslizadera izquierda 1.2244799323E-002 kg	Deslizadera derecha 1.2244799323E-002 kg
Corredera en T izquierda 3.483636E-002 kg	Corredera en T derecha 3.483636E-002 kg
Estabilizador izquierdo 5.0435034193E-002 kg	Estabilizador derecho 5.0435034193E-002 kg
Corredera izquierda 5.17038E-002 kg	Corredera derecha 5.17038E-002 kg
Biela izquierda 8.9193970645E-002 kg	Biela derecha 8.9193970645E-002 kg
Balancín izquierdo 2.9157963871E-002 kg	Balancín derecho 2.9157963871E-002 kg
Manivela izquierda 1.6827963871E-002 kg	Manivela derecha 1.6827963871E-002 kg
Cadera 1.8103851021 kg	

Tabla 1 Masas de las piezas que componen el Mimbot

Se puede observar que solamente los pies tienen una pequeña variación de peso, la cual es ínfima y no repercutirá en el equilibrio del sistema. El resto de las piezas tienen las mismas masas para ambas piernas.

Se procedió con el programa **Solid Edge** a revisar los planos originales y las medidas del modelo. Primero se comprobó que las medidas de las piezas actuales coincidieran con las teóricas. Efectivamente coincidían. El siguiente paso consistió en comparar estas medidas con el modelo que sufrió la primera modificación, ya que éste último es una evolución de aquel y dicho modelo tenía estabilidad. En este punto se vio que el hueco vertical de la cadera donde va la corredera insertada se había desplazado 3 mm. Se volvió a rediseñar y se llevó la corredera a su ubicación inicial.

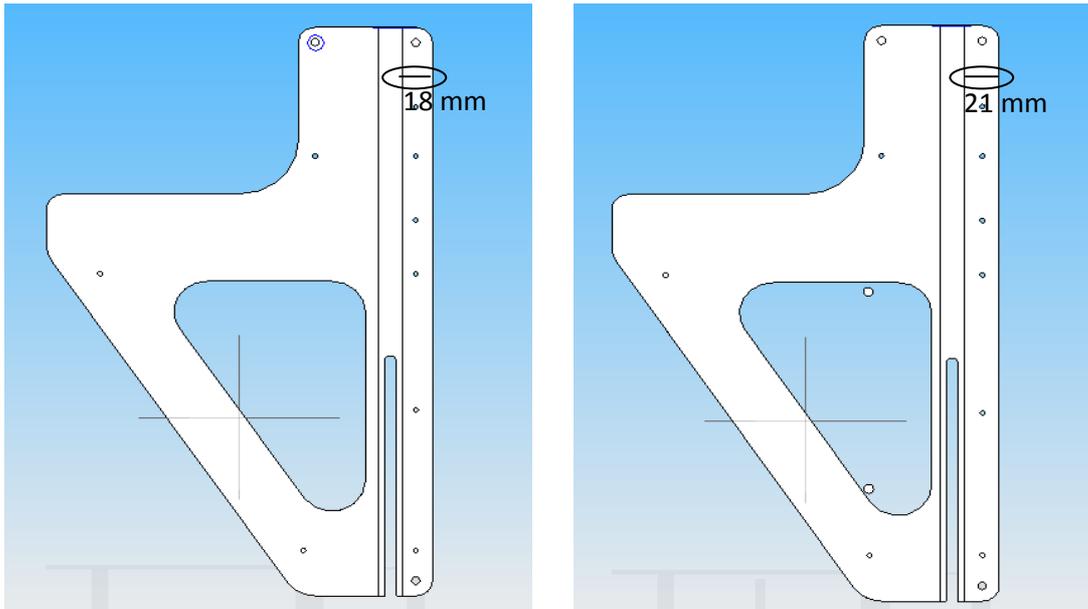


Figura 45 Cadera del modelo actual

Cadera del modelo futuro

Se volvió a montar el robot con esta modificación y se dejó preparado en Solid Edge para exportarlo a MSC.Adams con la posición inicial requerida, una vez dados los contactos necesarios en el programa de diseño. Esta modificación no era suficiente para equilibrar el sistema, pero podría ayudar ya que las manivelas, que dan el movimiento al sistema, arrancaban giradas y ahora tienen la posición inicial similar a la primera modificación. Por lo tanto, en adelante se continuará con esta definición.

Comparando el modelo Mimbot con los modelos de Pasibot se pudo ver que el espesor de varias piezas había cambiado, aumentando en todos los casos, respecto a la primera modificación y, con ello, la envergadura total del robot.

Este aumento de longitud transversal podría ser el motivo del desequilibrio inicial, debido a que siempre se produce lateralmente, hacia el lado de la pierna que primero se levanta. Otro factor que complementa esta teoría es que el aumento lateral de la longitud provoca que los pies se separen y, al empezar a caminar, la parte suspendida ejerce más momento sobre el pie de apoyo.

Además se decidió añadir al modelo la cadera interior, para dar más estabilidad al sistema.

En las siguientes imágenes se describe la modificación sufrida y se ilustra lo explicado anteriormente.

Primera modificación

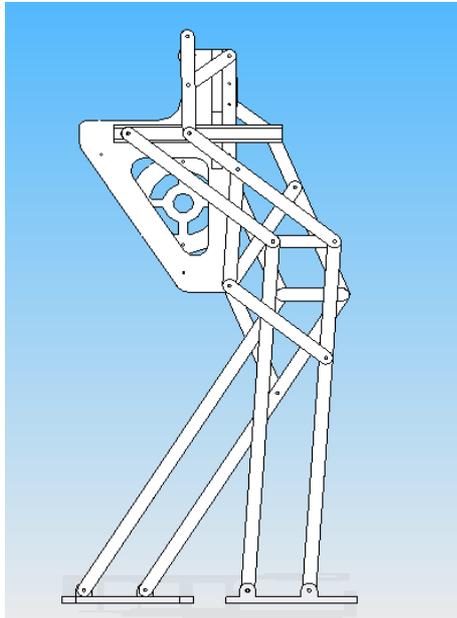
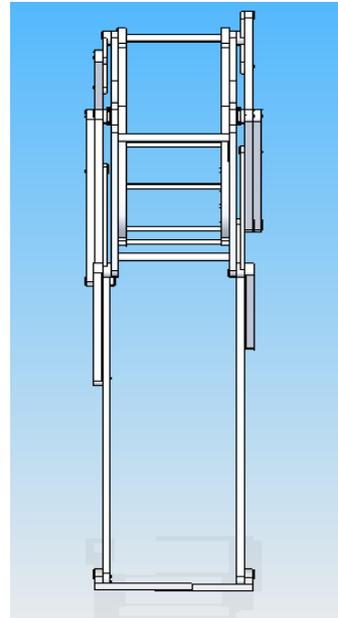


Figura 46 Vista lateral



Vista frontal

En las imágenes mostradas a continuación se puede observar cómo era la disposición de los pies y las distancias que había entre sus elementos.

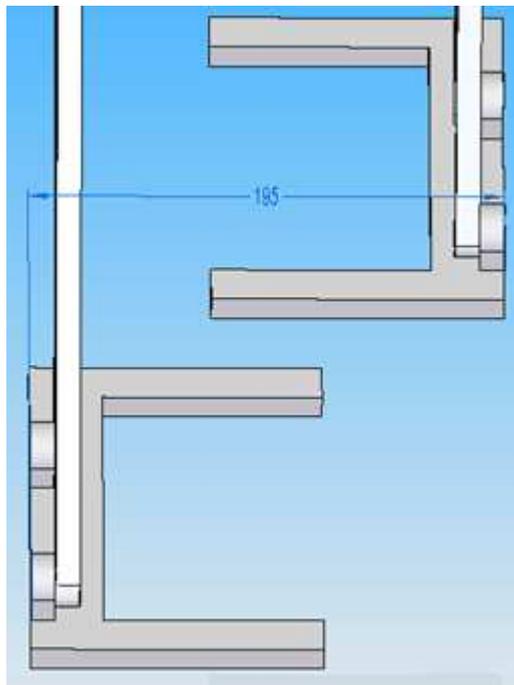
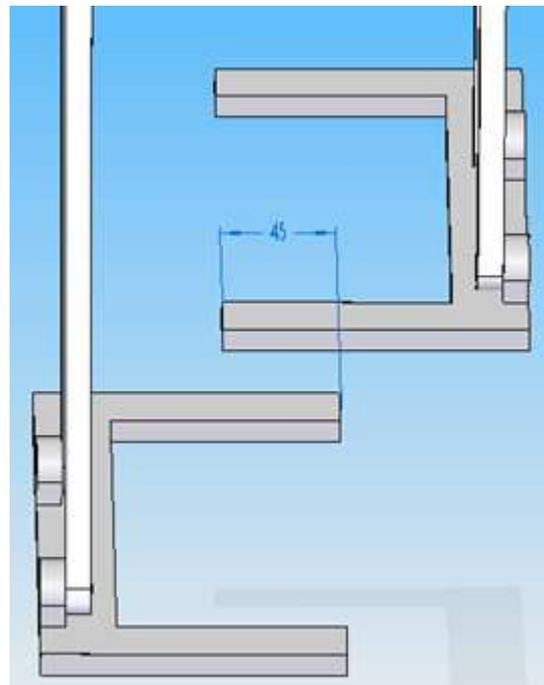


Figura 47 Distancia de los pies



Longitud superpuesta de los pies

Modelo Mimbot original con la cadera interior

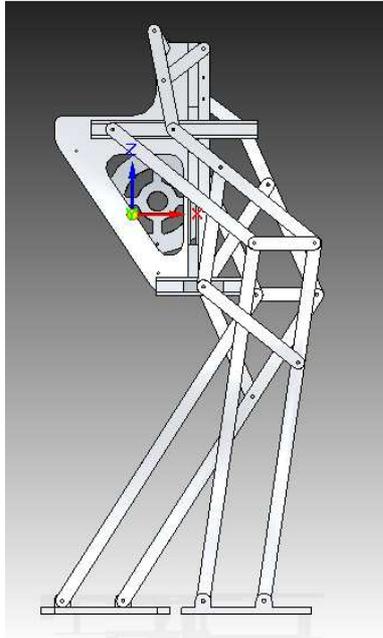
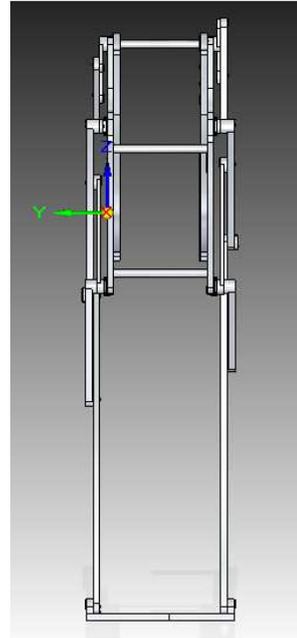


Figura 48 Vista lateral



Vista frontal

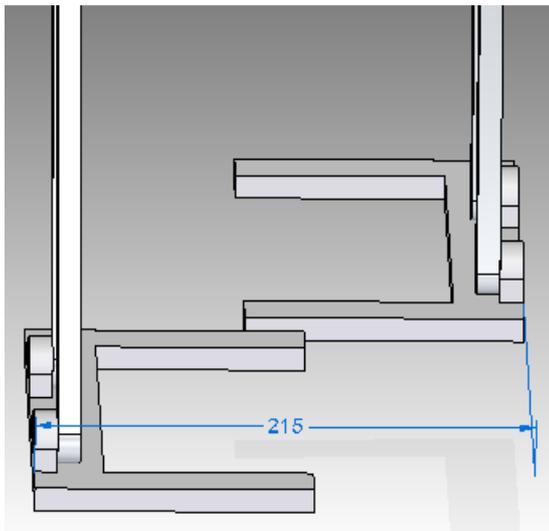
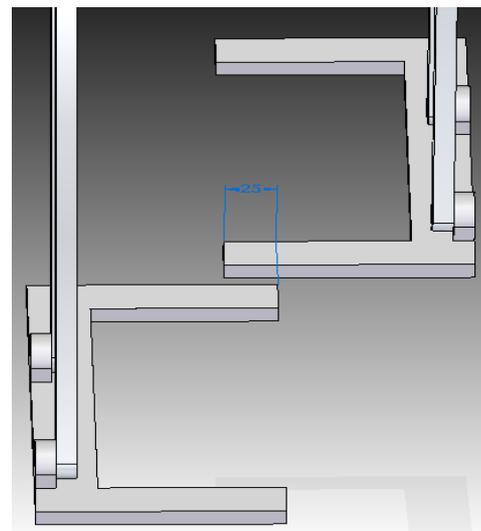


Figura 49 Distancia de los pies



Longitud superpuesta de los pies

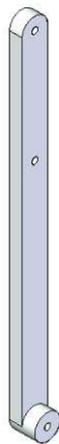
Se puede observar que, efectivamente, la modificación de las piezas ha producido un desplazamiento lateral de los pies y, como consecuencia de ello, ha modificado el equilibrio del sistema. Este cambio se ha efectuado en dos magnitudes. La primera de ellas es la separación de los pies. La segunda viene como consecuencia de la primera y es la disminución de la internada de las pezuñas de los pies. Se ha pasado de compartir una longitud de 45 mm a 25 mm. Todo esto se ha producido debido a que se han modificado diferentes medidas del mecanismo, pero entre ellas no estaban los pies.

La modificación de longitud transversal ha sido producida por el aumento de espesor de las siguientes piezas:

Pieza	Espesor primera modificación	Espesor actual
Biela	5 cm	10 cm
Fémur	5 cm	10 cm
Contrafémur	5 cm	10 cm
Tibia	5 cm	10 cm
Peroné	5 cm	10 cm
Tendón inferior	5 cm	10 cm

Tabla 2 Modificación del espesor de las piezas

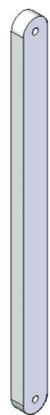
Al aumento de espesor hay que añadir, que para salvar el espacio donde van albergadas las correderas inferiores, se ha tenido que realizar una modificación extra en fémur, contrafémur y tendón inferior, izquierdo y derecho.



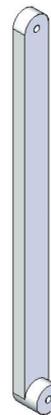
Fémur anterior



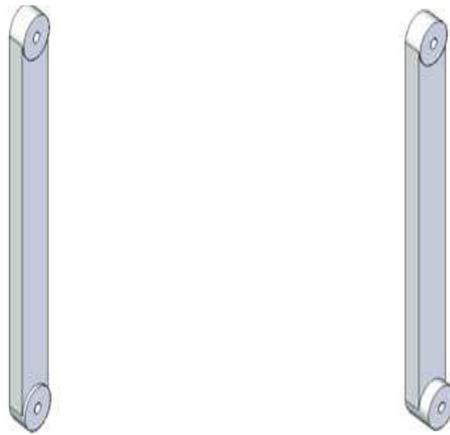
Fémur actual



Contrafémur anterior



Contrafémur actual



Tendón inferior anterior

Tendón inferior actual

Figura 50 Diseño de las piezas modificadas

Para conseguir el equilibrio buscado se va a modificar la longitud y el diseño de los pies. El primer cambio que se va a proponer consiste en prolongar la longitud transversal de los pies. Primero se alargó lo suficiente para tener una penetración de 45 mm, tal y como tenía la primera modificación. Se comprobó en MSC.Adams que no era suficiente para conseguir un buen equilibrio y se siguió prolongando hasta que se consiguió tener equilibrio dinámico.

A continuación se muestra la disposición de los pies, una vez realizada esta modificación.

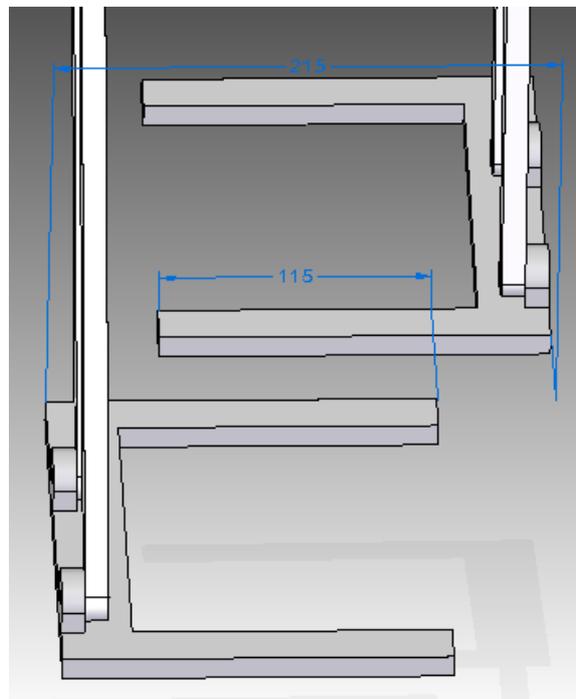


Figura 51 Modificación previa

Se observa que la prolongación transversal es considerable, para poder alcanzar el equilibrio. Sin embargo, después de diversos ensayos, se llegó a la conclusión que el diseño que mejor equilibrio conseguía era una modificación de este último. Además de la prolongación transversal en la parte interior, se le realizó una prolongación, transversal, en la parte exterior.

En la siguiente imagen se puede observar cómo quedará el diseño final.

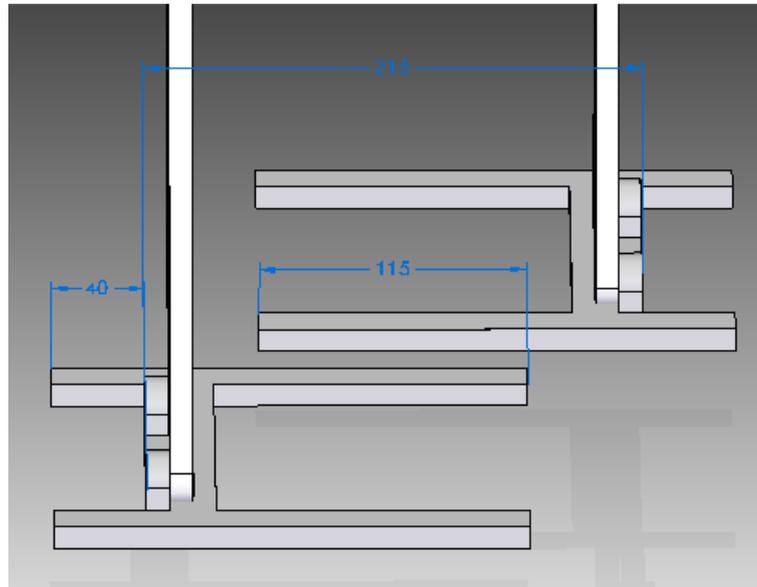


Figura 52 Modificación final

Se ha prolongado respecto a la primera modificación, 40mm en la parte exterior y 45mm en la parte interior de cada pie. Este es el diseño final del modelo y con él se realizará el estudio y los ensayos de este proyecto.

Por tanto, las modificaciones que se han realizado al robot han sido las siguientes:

1. Modificación de la cadera, desplazando el hueco de la corredera 3mm.
2. Modificación del diseño de los pies, prolongando la longitud transversal interior y exterior.
3. Por último se añadió la cadera interior, como en la primera modificación, para dar mayor estabilidad al sistema.

A continuación se muestra una imagen del diseño final del Mimbot:

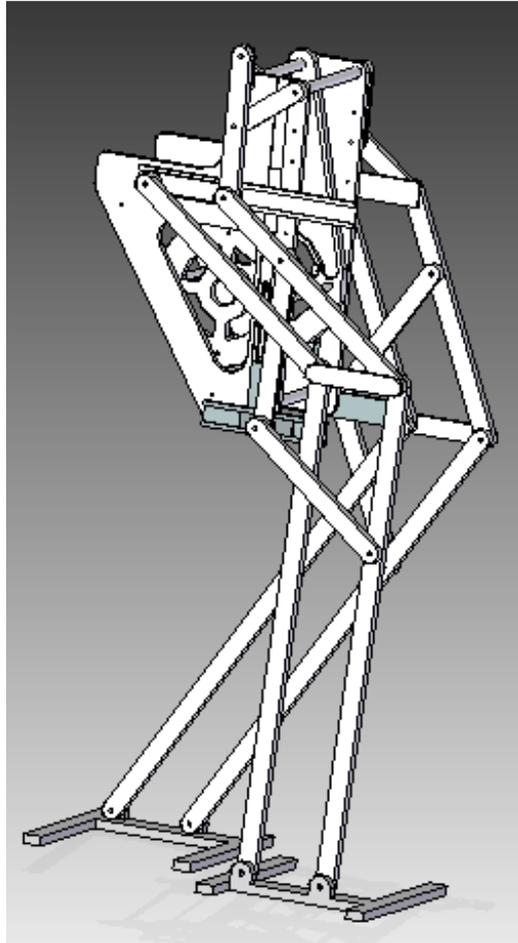


Figura 53 Diseño final del Mimbot

Una vez rediseñado el Mimbot, con el estabilizador horizontal (modificado), se va rediseñar el modelo con el estabilizador descolgado (original) ya que es útil en el futuro, para poder subir o bajar pendientes debido al diseño de su zancada. Más adelante se compararán ambos modelos.

3.4.2 Modificación del modelo con el estabilizador primitivo

Como ya se ha comentado, se propuso la consecución de un modelo de MIMBOT que combinara los actuadores vertical y horizontal de la zona inferior de la cadera pero, en esta ocasión, descartando la instalación del nuevo estabilizador. El estabilizador permite que el pie se mantenga en posición horizontal, disminuyendo de este modo el impacto de los pies contra el suelo y contribuyendo a la estabilidad del conjunto.

Sin embargo, la ausencia del estabilizador proporciona al MIMBOT la opción de experimentar con su funcionamiento en pendientes. Con los actuadores instalados, se abre la posibilidad de analizar en qué manera éstos pueden influir sobre la inclinación del pie, pudiendo llegar incluso a implementar funciones de movimiento que permitan al robot modificar el ángulo de entrada del pie respecto al suelo, según la inclinación de éste sea cuesta arriba, cuesta abajo y, en cada uno de los casos, más o menos pronunciada.

Como de lo que se trata es de ofrecer un modelo de MIMBOT con el que poder llevar a cabo las simulaciones posteriormente en ADAMS y observar su comportamiento, el cambio que se ha realizado en el diseño en Solid Edge ha consistido en descolgar el estabilizador para que el mecanismo funcione igual que antes de su instalación. Por definición, el Mimbot, al caminar, siempre tiene el estabilizador, la rodilla y la planta del pie, en ambas piernas, paralelos. Por tanto, al descolgar el estabilizador, la inclinación que tome éste, la tendrán los otros dos elementos también.

Para realizar esta modificación, se ha tenido que diseñar el estabilizador como en el modelo original.

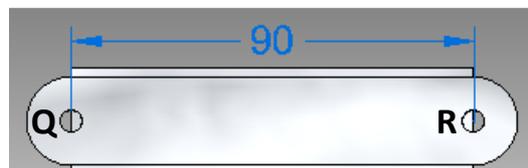


Figura 54 Nuevo estabilizador

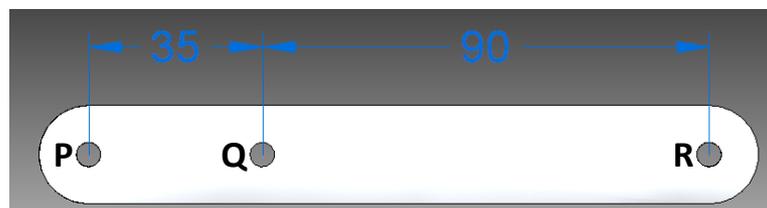


Figura 55 Estabilizador original

El fémur y contrafémur van unidos a los puntos R y Q, respectivamente, en el modelo que tiene el estabilizador modificado. El estabilizador primitivo tiene estos puntos a la misma distancia que el modelo modificado, por tanto el fémur y el contrafémur van unidos exactamente de la misma forma. La única modificación que se ha realizado ha sido prolongar el estabilizador y unirlo, mediante una deslizadora, a la corredera. Mientras que el modelo modificado tenía una deslizadora adherida al estabilizador, en toda su longitud, que hacía de

unión con la corredera. El resto de relaciones entre piezas tiene las mismas proporciones que tenía.

Además de la modificación del estabilizador, se ha tenido que diseñar una deslizadera que irá unida al punto P, para insertarlo en la corredera horizontal, como se muestra a continuación.



Figura 56 Deslizadera unida al estabilizador

Por último, se ha tenido que prolongar la longitud de la corredera, ya que el recorrido de este estabilizador, al caminar, es mayor, que el modificado.



Figura 57 Corredera en la que va ubicado el estabilizador modificado

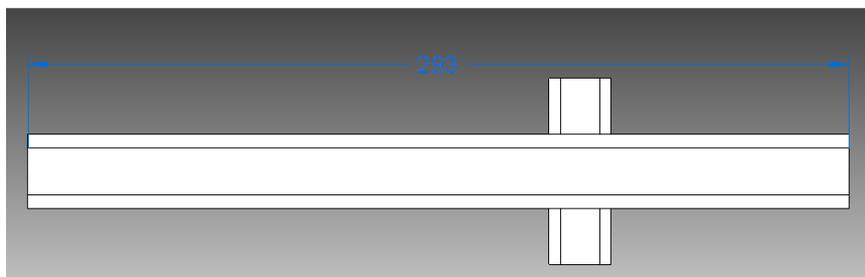


Figura 58 Corredera en la que va ubicado el estabilizador primitivo

Se observa en las imágenes anteriores que es necesario prolongar 4.5 cm la longitud de la corredera para abarcar el recorrido del estabilizador antiguo. Por lo tanto, el modelo final que se ha diseñado, con el estabilizador primitivo, ha consistido en coger la última modificación que se ha realizado en el presente proyecto y modificar el estabilizador de la forma que se ha explicado. Las modificaciones que se habían realizado hasta el momento consistían en: la modificación de los pies prolongándolos de forma transversal interna y externamente; el desplazamiento del hueco de la cadera en 3 cm hacia el interior de la misma y; adición de la cadera interior. A continuación se muestra una imagen de cómo queda el diseño final del Mimbot con el estabilizador primitivo.

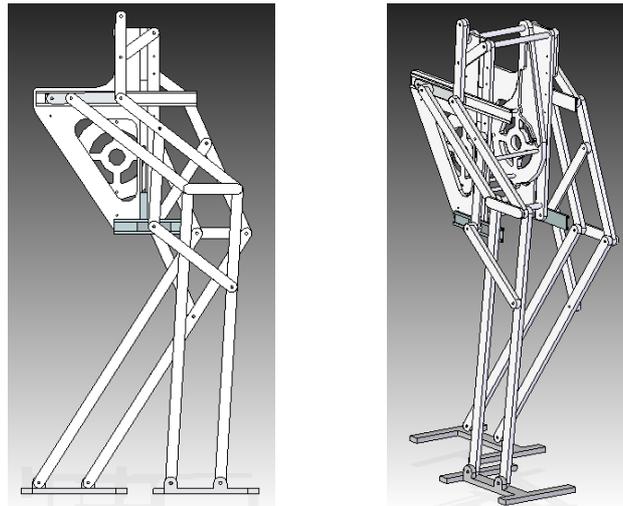


Figura 59 Mimbot con el estabilizador primitivo

En las imágenes que se muestran a continuación se puede ver la diferencia entre ambos estabilizadores, el primitivo y el modificado.

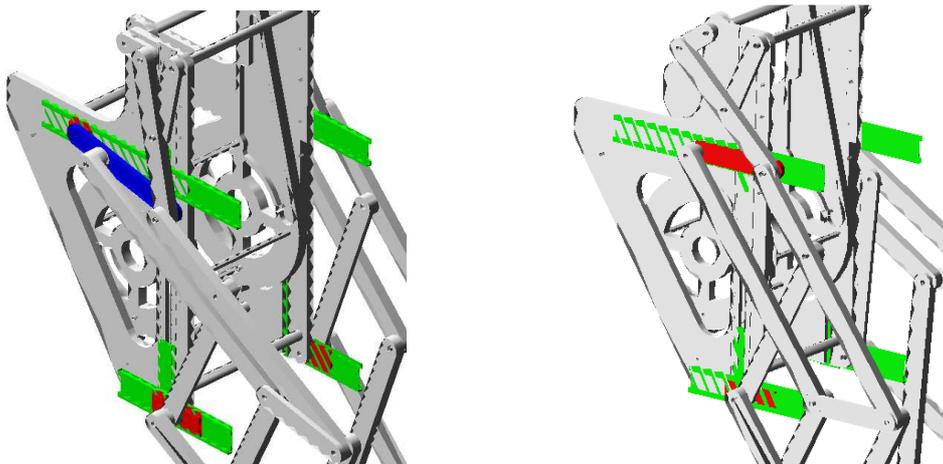


Figura 60 Mimbot con el estabilizador primitivo

Mimbot con el estabilizador modificado

Se puede apreciar cómo el estabilizador primitivo se descuelga de la corredera al caminar, mientras que el modificado permanece horizontal en todo momento. Las rodillas realizan un movimiento paralelo al de ambos estabilizadores.

Este modelo también consigue mantener el equilibrio al caminar, pero es más inestable y depende de las condiciones iniciales, como la velocidad del motor o algún elemento auxiliar de peso. En el capítulo 5 se estudiará en detalle.

Una vez se tiene el diseño final del Mimbot, para los dos modelos de estabilizador se va a proceder a la simulación de ambos con el programa MSC.Adams, pero antes se ha considerado de utilidad comentar los estudios previos que se realizaron antes de las simulaciones finales, ya que ayudaron a comprender el programa y descartaron otros fallos en el Mimbot fuera del diseño, para la estabilidad.

3.5 Estudios previos en MSC. Adams

Se realizaron diferentes modificaciones en el modelo original del Mimbot. Como ejemplo se va a tomar el siguiente modelo, que es una réplica del modelo original de Mimbot. Los resultados obtenidos son para el modelo original, antes de la modificación final.

A continuación se muestra el modelo:

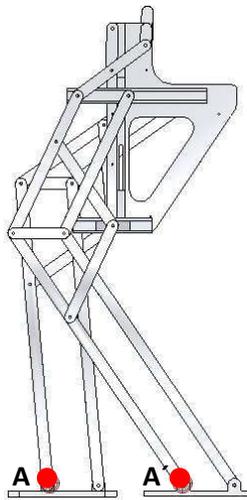


Figura 61 Mimbot con el pie derecho adelantado

Las medidas se realizaron con el pie derecho adelantado y con el modelo colgado. Se han destacado los puntos A y A' que son las uniones de las tibias y pies derechos e izquierdo, respectivamente, porque dichos puntos serán los utilizados para calcular las gráficas de desplazamiento.

La primera magnitud que se modificó fue la velocidad del motor rotatorio unido a la manivela, que da el movimiento al robot, ya que la velocidad de partida era lineal en el tiempo y, por lo tanto, generaba una arrancada brusca. Se probó a introducir una función progresiva.

Dicha función consistía en mantener parado el Mimbot hasta el segundo 3, de ahí hasta el segundo 6 aplicar una función con pendiente ascendente hasta el segundo 6 que alcanzara 180°/s, y de ahí en adelante una función lineal de 180°/s, hasta un tiempo considerado.

La función utilizada tiene el siguiente aspecto:

0-3s: $y=0$

3s-6s: $y= (t-3)\frac{180^\circ/s}{3}$

6s-20s: $y=180^\circ/s$

Para introducir esta ecuación en MSC.Adams hubo que realizar una serie de modificaciones.

La función que se ha utilizado es del tipo IF, que se explica a continuación:

El símbolo “d” se refiere a los grados y “time” al tiempo.

IF (time-A:B,C,D), donde:

A: tiempo para el cual está definida la función

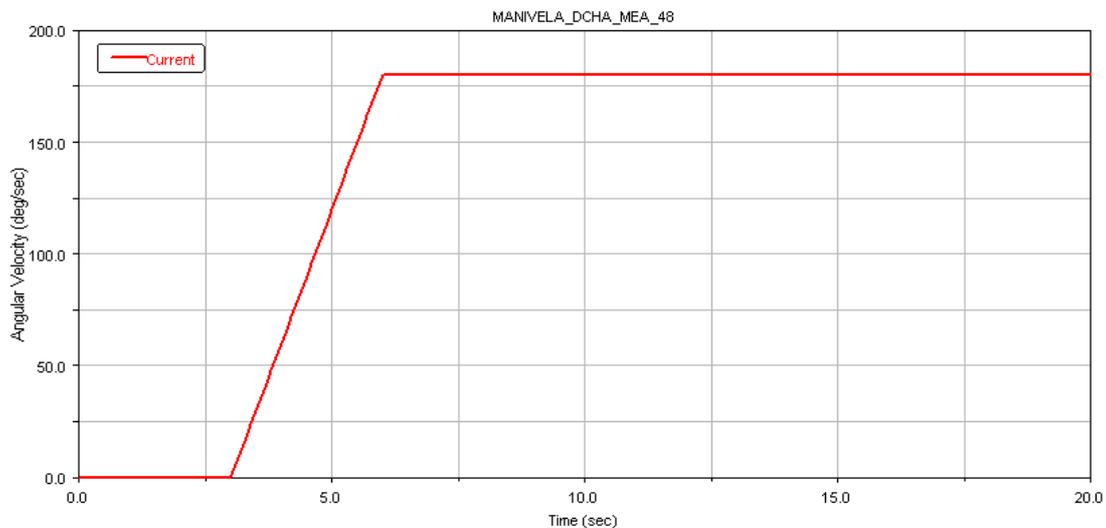
B: función que debe realizar antes del tiempo A

C: función que debe realizar durante el tiempo A

D: función que debe realizar después del tiempo A

El motivo de escribir la segunda función restando es que debe contrarrestar la primera para que solo actúe en el intervalo especificado.

Los resultados obtenidos son los siguientes:



Gráfica 1: Función a velocidad 180°/s

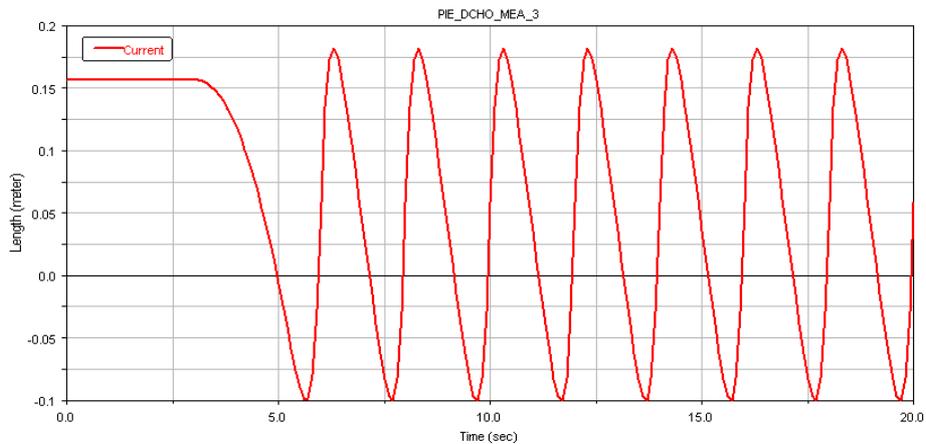
Función en MSC.Adams:

```
if(time-3:0,0,((30d*time)-90d)*(time-3))+if(time-6:0,0,90d*(time-6))-if(time-6:0,0,((30d*time)-90d)*(time-6))
```

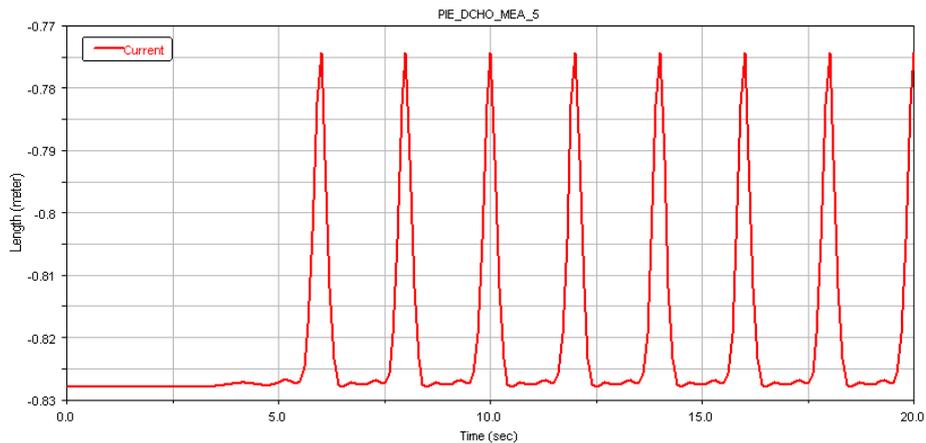
Modelo colgado

Los resultados que se muestran a continuación han sido obtenidos con el modelo colgado, por lo que se acercan a los teóricos. A continuación se muestran los valores obtenidos para el pie derecho.

➤ **Pie derecho:**



Gráfica 2: Desplazamiento en X del punto A del pie

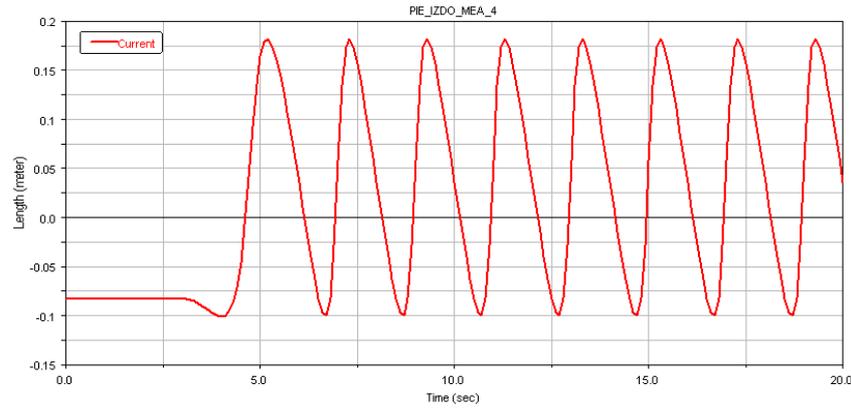


Gráfica 3: Desplazamiento en Y del punto A del pie

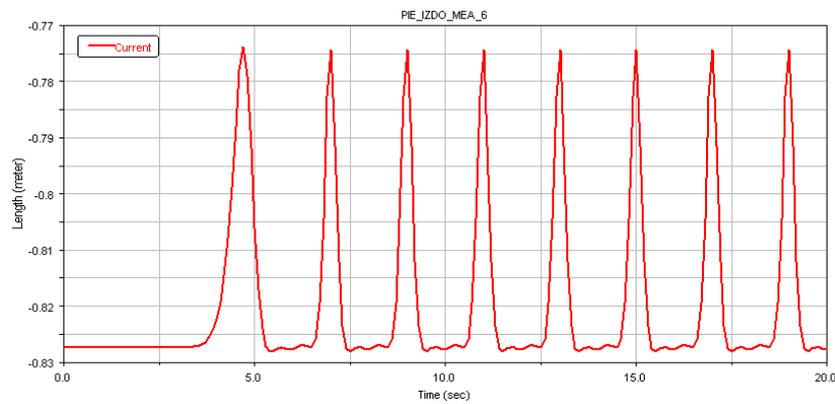
Se observa que hasta el segundo 3 el pie está parado, empieza a moverse y a partir del segundo 6 traza una trayectoria uniforme, tanto en el eje X como en el eje Y, de amplitud constante.

Se realiza el mismo ensayo para el pie izquierdo.

➤ **Pie izquierdo:**



Gráfica 4: Desplazamiento en X del punto A' del pie



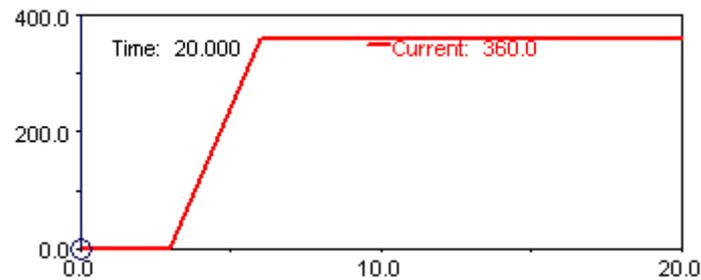
Gráfica 5: Desplazamiento en Y del punto A' del pie

El resultado obtenido para el pie izquierdo es idéntico al del pie derecho, con un desfase de 180° . Se aprecia que el módulo del desplazamiento es el mismo en ambos pies. Por tanto, se puede asegurar, con los resultados obtenidos que el robot tiene un funcionamiento correcto cuando está colgado, con una velocidad progresiva.

Una vez comprobado el funcionamiento del modelo colgado se procedió a dejarlo libre en el suelo y darle contacto. Obteniendo un resultado no esperado, ya que cuando se disponía a dar el primer paso, perdía el equilibrio. Se observó que la inestabilidad se producía de forma lateral, hacia el lado del pie que primero elevaba para la consecución del paso.

Pensando que podría ser un desequilibrio por la baja velocidad de arranque, se procedió a realizar la misma operación, pero esta vez con valores dos veces superiores de magnitud. Se empezó con una velocidad de 0 y progresivamente se consiguió $360^\circ/\text{s}$.

Los resultados obtenidos son:

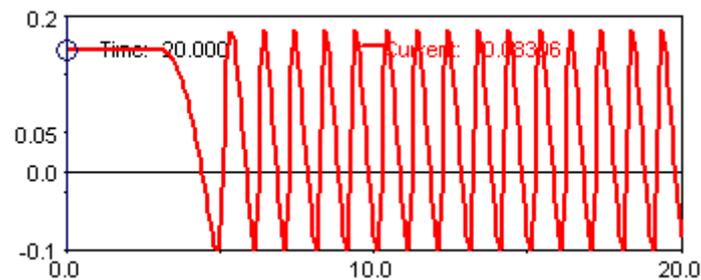


Gráfica 6: Función a velocidad 360°/s

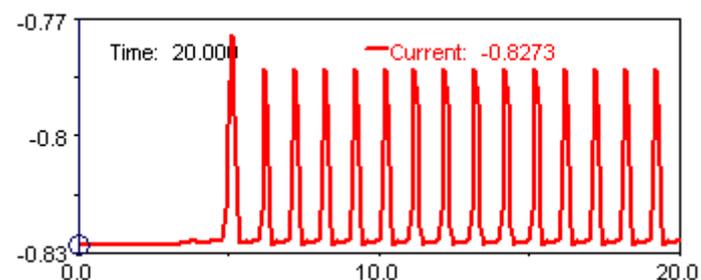
Función en MSC.Adams:

$\text{if}(\text{time}-3:0,0,(180d*(\text{time}-3))/3*(\text{time}-3))-\text{if}(\text{time}-6:0,0,(180d*(\text{time}-3))/3*(\text{time}-6))+\text{if}(\text{time}-6:0,0,180d*(\text{time}-6))$

➤ Pie derecho:



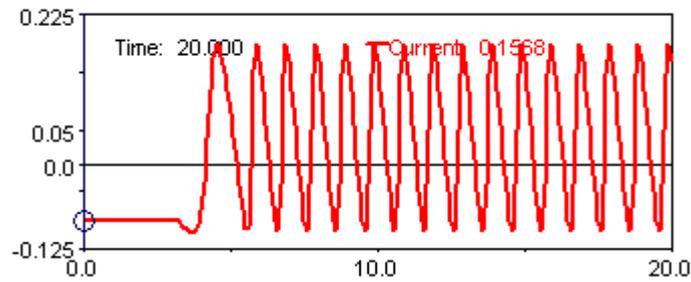
Gráfica 7: Desplazamiento en X del punto A del pie



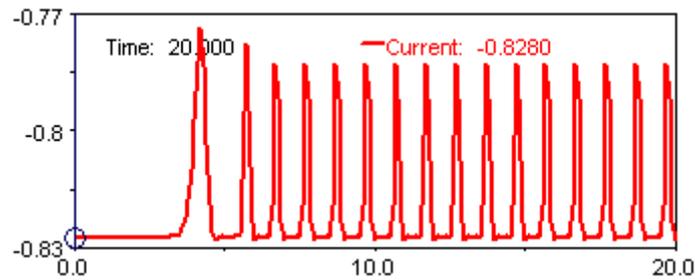
Gráfica 8: Desplazamiento en Y del punto A del pie

Se observa que hasta que se estabiliza el paso, este modelo sufre más inestabilidades. Pero a partir del segundo 6 la trayectoria se hace uniforme y de la misma amplitud que para la velocidad de 180°/s, la única diferencia es que su frecuencia es el doble, ya que su velocidad es también el doble.

➤ **Pie izquierdo:**



Gráfica 9: Desplazamiento en X del punto A' del pie



Gráfica 10: Desplazamiento en Y del punto A' del pie

El resultado es similar al del pie derecho, la única diferencia es que en el eje Y tarda más en estabilizar el paso.

Se probó a dejar libre este modelo, para comprobar si al dar más velocidad de arranque éste era capaz de mantener el equilibrio dinámico. Al dar el primer paso, perdía el equilibrio de la misma manera que lo había hecho anteriormente. Para descartar todas las velocidades posibles, se realizó la misma operación a 90°/s y a 45°/s, obteniendo los mismos resultados negativos. Por tanto, se puede afirmar que el motivo del desequilibrio no es la velocidad de arranque.

Descartada la velocidad se procedió a seguir investigando el motivo del desequilibrio.

La **segunda magnitud** que se modificó fue la posición inicial del robot. Anteriormente se había comenzado con los dos pies apoyados en el suelo y el derecho adelantado. A continuación se va a probar comenzando con el pie izquierdo adelantado y, después, con el pie izquierdo levantado.

➤ **Pie izquierdo adelantado**

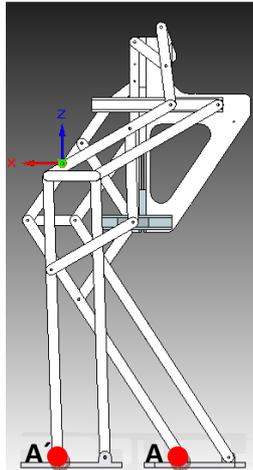


Figura 62 Pie izquierdo adelantado

Las gráficas de movimiento de este modelo colgado son exactamente iguales que las obtenidas para el pie derecho adelantado, solo que desfasadas como es de esperar. Por ese motivo no se han ilustrado en el documento.

El cambio se realizó para ver si este posicionamiento daba un mejor arranque al modelo libre. Al darle movimiento se pudo comprobar que se volvía a desequilibrar lateralmente. Por lo que no dispaba dudas sobre el problema.

➤ **Pie izquierdo levantado**

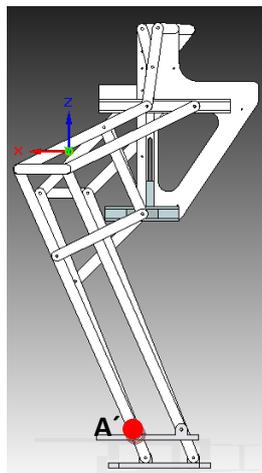
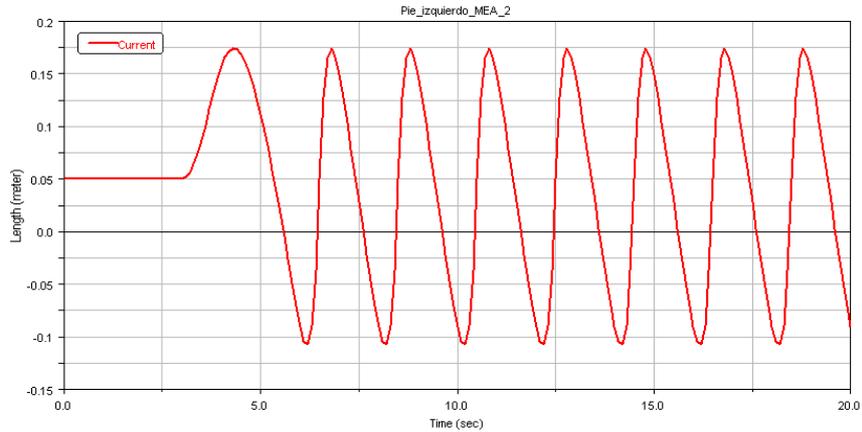
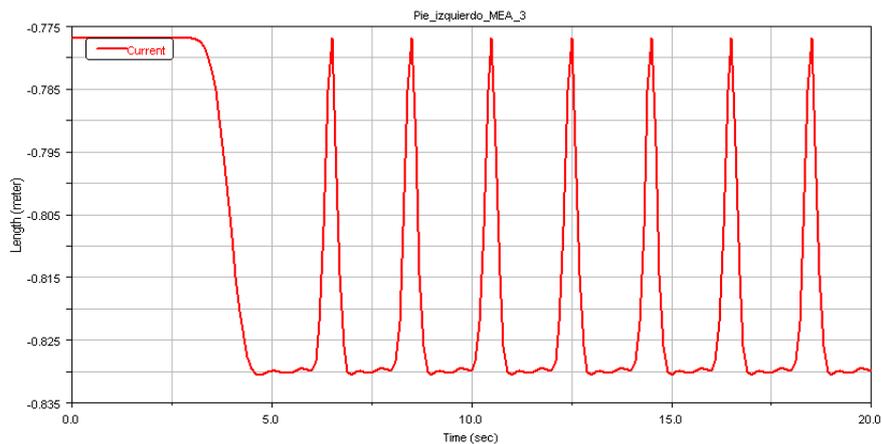


Figura 63 Pie izquierdo levantado

Se realizó un equilibrio estático de este modelo y no daba los resultados esperados, aún así se procedió a darle movimiento. A continuación se muestran las gráficas de desplazamiento del punto A' del pie izquierdo.



Gráfica 11 : Desplazamiento en X del punto A' del pie



Gráfica 12: Desplazamiento en Y del punto A' del pie

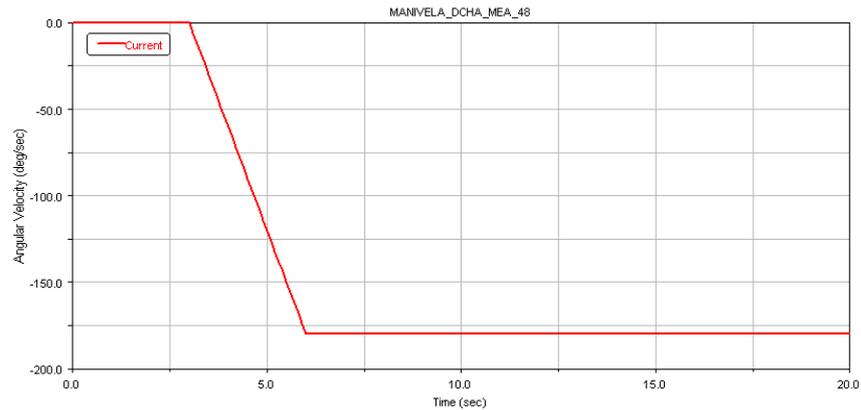
Se puede observar que el módulo del desplazamiento tanto en el eje X como en el eje Y es el mismo, salvo que está un poco desplazado respecto al modelo con los dos pies en el suelo. El primer ciclo no es completo ya que el pie empieza desde el aire. Luego se verá si ese desplazamiento repercute en el movimiento. El desplazamiento del pie derecho se ha suprimido ya que es similar al del pie izquierdo.

Una vez comprobado el movimiento con el modelo colgado se probó el movimiento dejándolo libre y volvió a perder el equilibrio de la misma manera que en casos anteriores, por lo tanto la posición inicial no influye en el desequilibrio tampoco.

La **tercera magnitud** que se modificó fue el sentido del paso. Se comprobó si arrancar hacia atrás favorecería al equilibrio del robot. Se posicionó con ambos pies apoyados y el pie derecho adelantado.

La función que se aplicó fue progresiva desde 0 a $180^\circ/\text{s}$ en los mismos intervalos de tiempo que las anteriores.

La gráfica de la función que efectúa el movimiento es la siguiente:

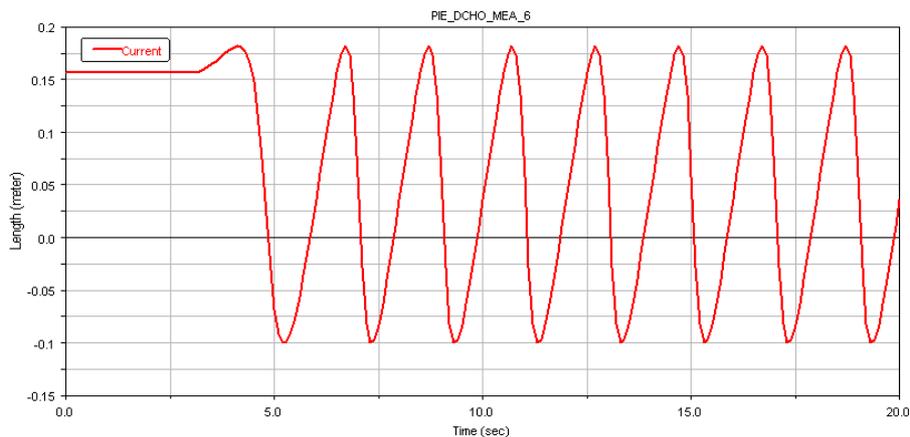


Gráfica 13: Función a velocidad $-180^\circ/\text{s}$

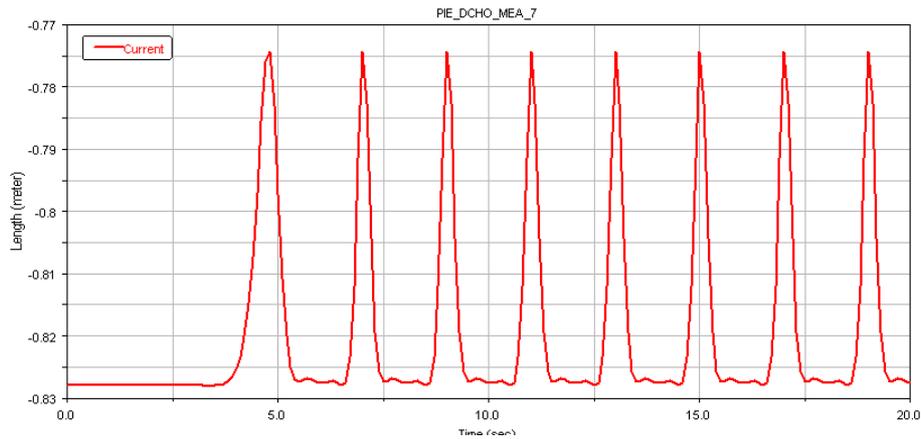
La función tiene la siguiente expresión:

$$\text{if}(\text{time}-3:0,0,-((30\text{d}*\text{time})-90\text{d})*(\text{time}-3))+\text{if}(\text{time}-6:0,0,-90\text{d}*(\text{time}-6))-\text{if}(\text{time}-6:0,0,-((30\text{d}*\text{time})-90\text{d})*(\text{time}-6))$$

Obteniendo las gráficas:



Gráfica 14: Desplazamiento en X del punto A del pie



Gráfica 15: Desplazamiento en Y del punto A del pie

Los resultados obtenidos para el pie izquierdo son similares, por lo que se ha considerado no plasmarlos para no ser reiterativo. Se puede comprobar que el valor de la trayectoria es igual que si el desplazamiento es hacia adelante. Al dejar el modelo libremente se volvió a desequilibrar de la misma forma que en ensayos anteriores. Por tanto, el sentido de la velocidad no repercute al desequilibrio inicial.

La **cuarta magnitud** que se modificó fue el centro de gravedad del sistema. Para ello se añadió una masa de 2 kg y luego de 5 kg. Estas masas se situaron en diferentes posiciones del plano de simetría de la cadera.

A continuación se puede ver una imagen del modelo con las masas.

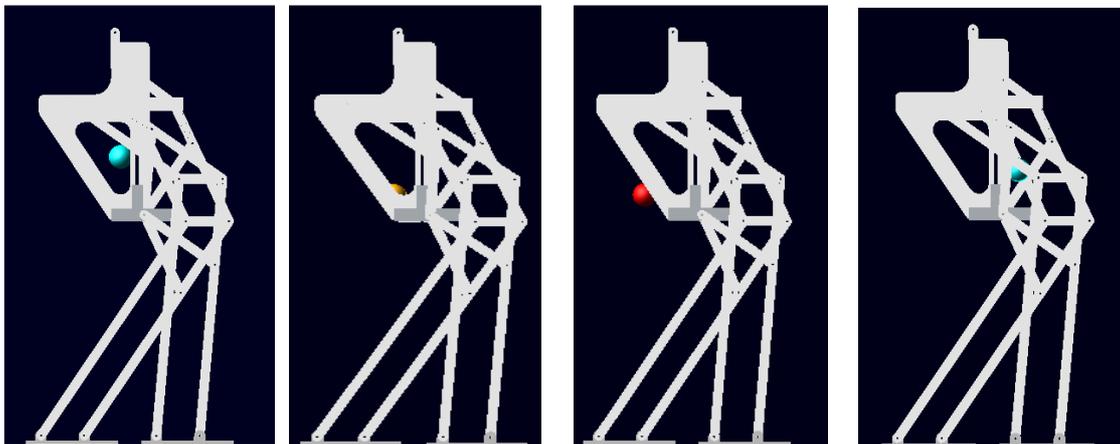


Figura 64 Diferentes posicionamientos de la masa

Al dar movimiento dejando los modelos libres se pudo apreciar una pequeña mejora en la estabilidad, pero al avanzar volvía a perder el equilibrio de una forma muy similar. Si bien es cierto que tardaba más en perder el equilibrio, no era capaz de dar el segundo paso correctamente. Por tanto, aunque se puede intuir que una adicción de masa ayudará a la estabilidad del sistema, no es el problema principal que hace que el modelo pierda la verticalidad. Por tanto hubo que seguir buscando la fuente del problema.

La quinta magnitud que se modificó consistió en cambiar las relaciones efectuadas con el programa MSC.Adams. Dentro de este apartado se engloban todas las relaciones definidas, tales como juntas, el contacto con el suelo o el posicionamiento inicial. Se comprobaron una a una todas las juntas, se volvieron a definir para asegurar, se probó a definir las correderas como tales y como una función de desplazamiento en el plano, que es más exacta. Pero se comprobó que estaban correctamente definidas ya que el problema persistió. Por último se hizo hincapié en el contacto con el suelo. Se revisaron todas las definiciones de rozamiento, penetración, se probó con diferentes materiales y rozamientos estático y dinámico. Pero al igual, que al modificar las juntas, seguía el mismo problema de estabilidad.

Comprobadas todas las magnitudes que se pueden medir con el programa MSC. Adams, y visto que el desequilibrio no era motivado por ninguna de ella, solo podía ser problema del diseño del modelo, se modificó la geometría del Mimbot como ya se ha explicado.

En la siguiente secuencia de imágenes se puede ver cómo camina el Mimbot ya modificado y con estabilidad, a una velocidad progresiva de 180º/s. Para realizar las simulaciones se ha dejado una distancia con el suelo de 0.5 cm, para que no haya problemas con el contacto y el robot se posicione de forma correcta antes de empezar a caminar, dejándose caer hacia el suelo y logrando un equilibrio estático. Esto corresponde al próximo capítulo, en el cual se trata íntegramente del programa MSC. Adams, pero se ha considerado conveniente adelantarlo para demostrar que los cambios realizados han sido satisfactorios para el equilibrio del sistema.

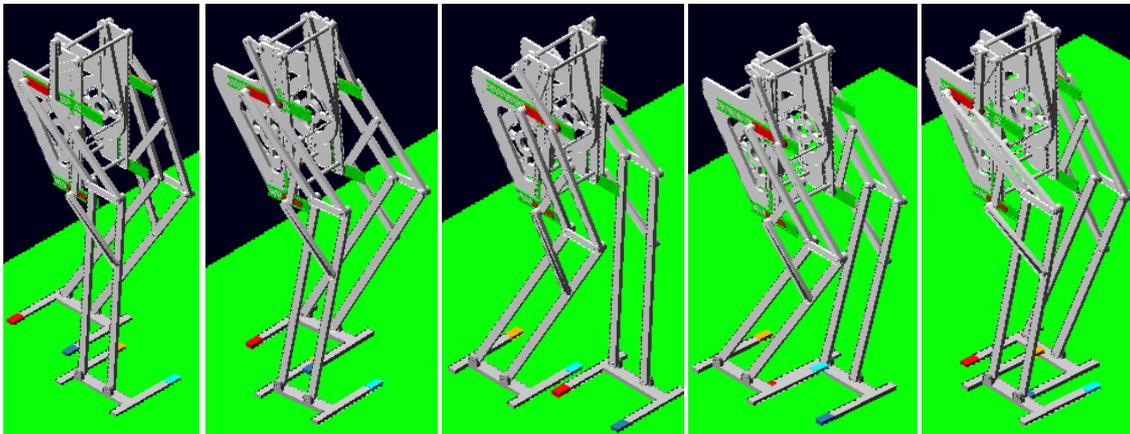


Figura 65 Secuencia de movimientos del modelo final

A continuación se muestra la trayectoria descrita por el modelo final.

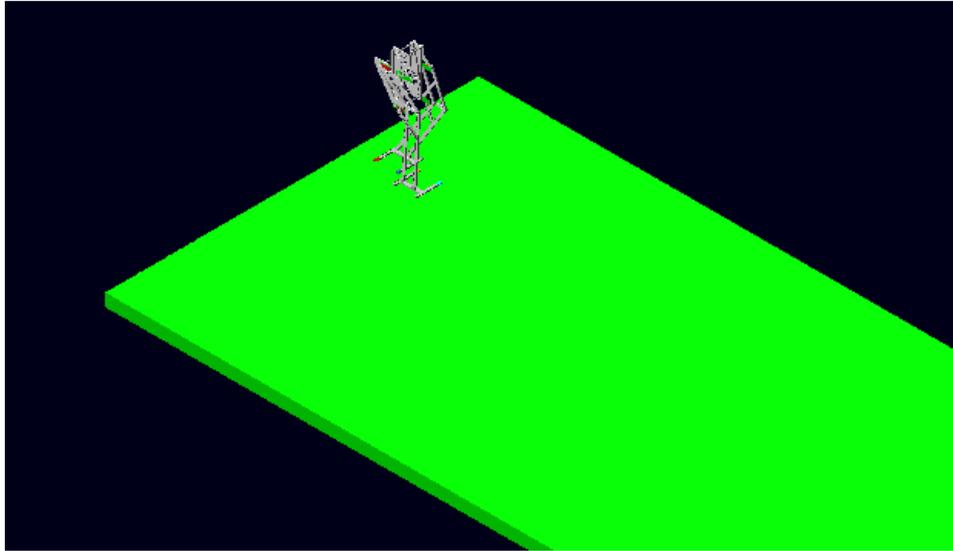


Figura 66 Posición inicial

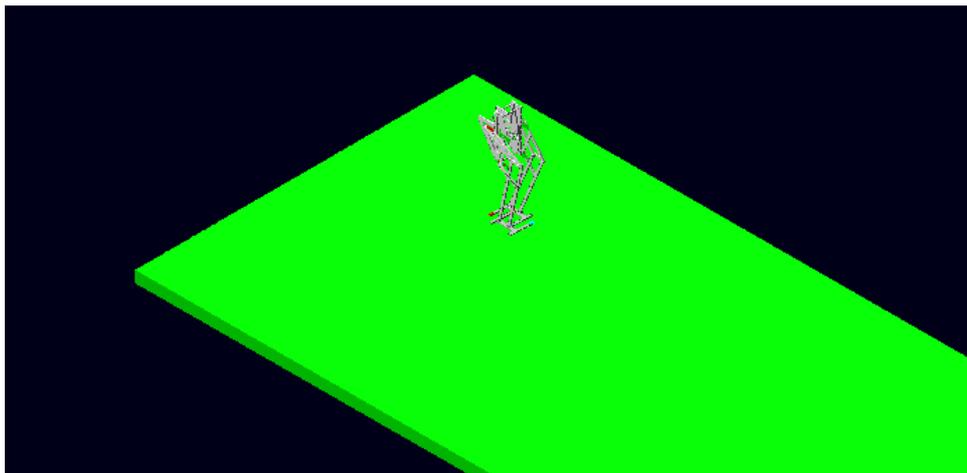


Figura 67 Pie izquierdo levantado

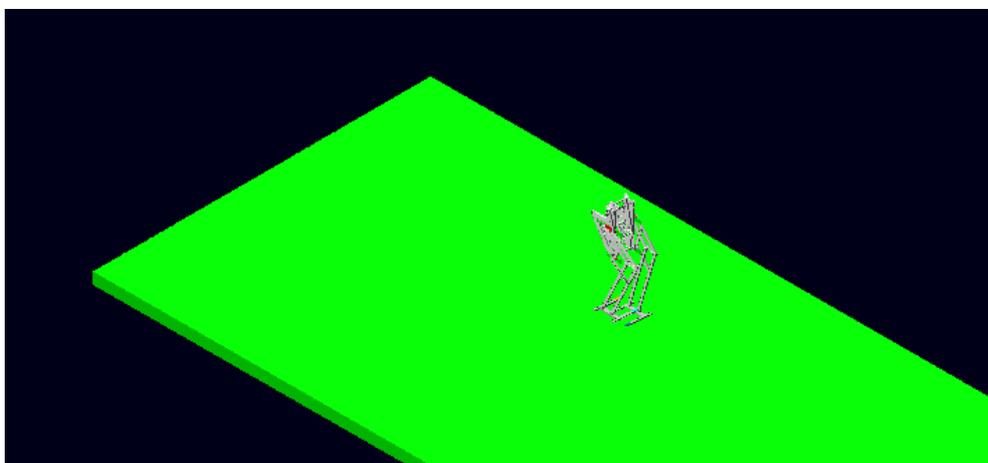


Figura 68 Pie derecho levantado



En el capítulo siguiente se explicará de forma extendida las características del movimiento. Esta secuencia se ha mostrado para demostrar que los cambios realizados han conseguido el fin que se buscaba, que no era otro, que mantener el equilibrio.

Una vez explicado la modificación realizada para lograr la estabilidad del Mimbot, se va a realizar la misma mejora para el modelo que tiene el estabilizador primitivo, para después poder sacar conclusiones y comparar ambos modelos.



Capítulo IV:

Simulación final del MIMBOT.



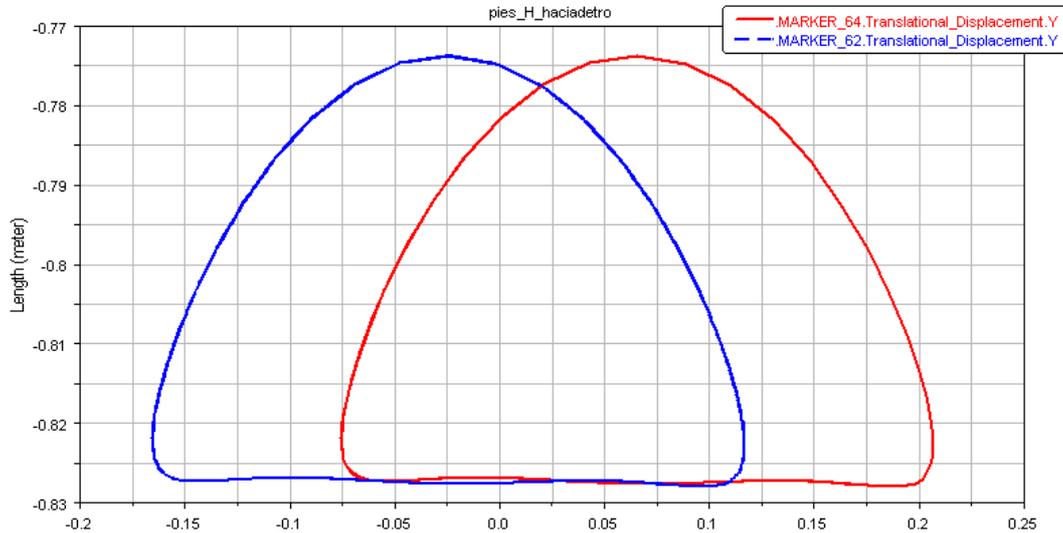
4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES.

Una vez se dispuso del modelo del MIMBOT con todas sus juntas y motores implementados, se procedió a realizar distintas simulaciones en MSC. Adams para comprobar que los actuadores tienen la capacidad de cumplir con los cometidos para los que fueron diseñados.

Se simuló el movimiento del MIMBOT en dos situaciones diferenciadas: en primer lugar, se situó el robot colgado. Para ello, se ancló el modelo al espacio de trabajo. Este ejercicio se realizó para comprobar que el movimiento de todos los elementos que forman el Mimbots es correcto. Pero la ausencia de interacción física con el suelo y otros elementos hace que el comportamiento que muestra el robot en las simulaciones se aleje de lo que ocurriría realmente en las condiciones en las que un robot suele desarrollar su actividad.

Tras estudiar el modelo colgado, se realizaron una serie de simulaciones de distinta naturaleza con el modelo libre, es decir, en contacto con el suelo y libre para avanzar sobre él. Por tanto, fue necesario establecer contacto entre el suelo y los pies del robo. Con el MIMBOT libre, se efectuaron distintas simulaciones con los dos modelos diseñados, con el estabilizador modificado y el modelo del estabilizador primitivo. Por último se realizó una simulación en la que se puede apreciar la utilidad de los actuadores, a la hora de alargar, acortar, elevar o descender el paso.

En la secuencia de imágenes anterior, se puede apreciar cómo el estabilizador, la rodilla y el pie son horizontales y, por tanto, paralelos en todo momento, en el movimiento. A continuación se muestra una gráfica en la que se puede visualizar el recorrido del pie.



Gráfica 16: Recorrido del pie derecho del modelo con el estabilizador horizontal

La gráfica anterior muestra la trayectoria descrita por los puntos de unión del pie derecho con la tibia (en color rojo) y con el peroné (en color azul). Se ve que la curva descrita se asemeja a la teórica, con una zona curva y otra horizontal, producidas por el mecanismo de Chebyshev. Ambos puntos realizan el mismo recorrido ya que están posicionados en la misma horizontal. La gráfica del recorrido del pie izquierdo se ha suprimido al ser igual que la del pie derecho.

4.2.2 Modelo con el estabilizador primitivo

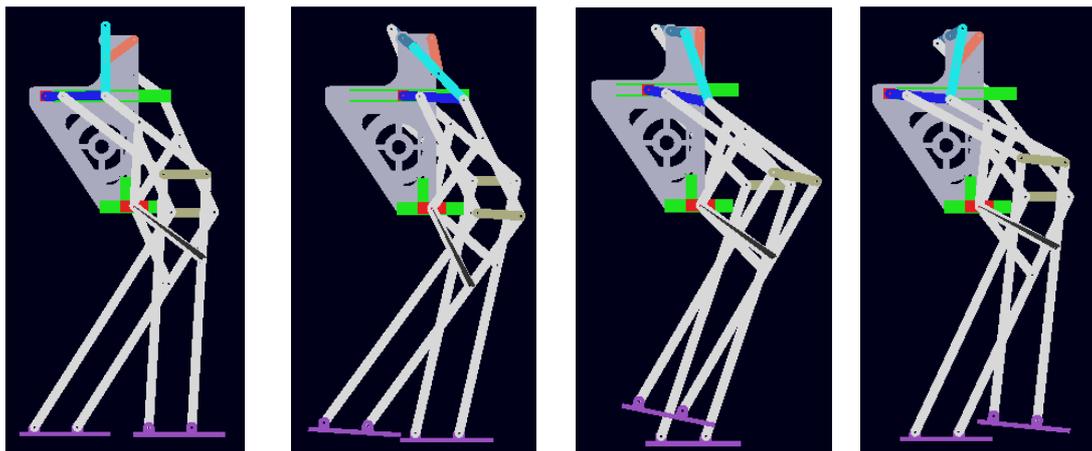
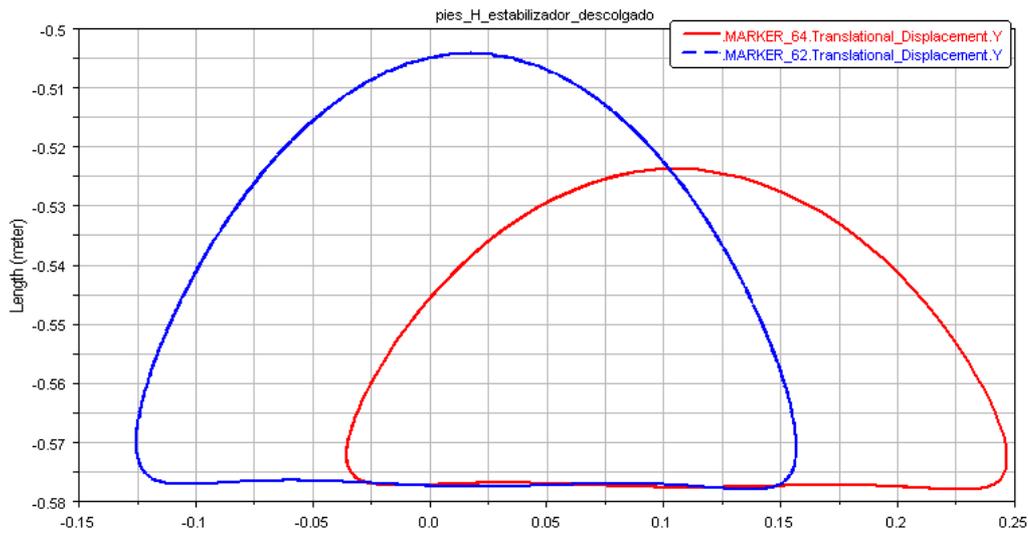


Figura 71 Movimiento del Mimbot con el estabilizador primitivo, colgado

Se puede observar en la secuencia de imágenes anterior, que en este modelo, el estabilizador no sigue una trayectoria horizontal, pero tanto la rodilla como el pie siguen su misma trayectoria, porque siguen siendo paralelos. La gráfica del movimiento del pie mostrará un resultado diferente al anterior, al no ser horizontal el estabilizador.



Gráfica 17: Recorrido del pie derecho del modelo con el estabilizador descolgado

La gráfica anterior muestra la trayectoria descrita por los puntos de unión del pie derecho con la tibia (en color rojo) y con el peroné (en color azul). En este caso también la curva descrita se asemeja a la teórica, con una zona curva y otra horizontal, producidas por el mecanismo de Chebyshev. La diferencia en la amplitud de las trayectorias viene motivada por el estabilizador, que no sigue una trayectoria recta y esto se traduce en que el punto delantero del pie gira el mismo ángulo que gira el punto delantero del estabilizador. Las simulaciones se han realizado durante de 20 segundo y a 2000 pasos.

Una vez comprobado el funcionamiento de ambos modelos colgados, se procedió a dejarlos libres y darles contacto con el suelo para poder sacar conclusiones del movimiento.

4.3 MODELO LIBRE

4.3.1 funciones en MSC. Adams

Una vez realizadas las simulaciones con el modelo colgado se va a probar si todo lo realizado hasta el momento ha sido de utilidad, ya que hay que recordar que los cambios producidos han sido con el fin de encontrar el equilibrio dinámico del modelo libre, en contacto con el suelo. Para este apartado, el primer paso que hay que dar es construir el suelo con el programa MSC.Adams y dar contactos, como se ha explicado en el capítulo anterior.

Una vez se tienen todos los elementos necesarios para la simulación de los modelos libres, se procederá a mostrar los resultados obtenidos tanto para el modelo del estabilizador modificado como para el modelo del estabilizador primitivo.

Antes de comenzar es importante destacar que todas las simulaciones se han realizado dejando los modelos a una distancia de 0.5 cm del suelo, además se ha dejado un periodo de 3 segundos antes de comenzar la simulación para comprobar que existe equilibrio estático, si no lo hubiese, el modelo perdería el equilibrio antes de comenzar a caminar. Por último, comentar que la velocidad angular con la que se han alimentado los modelos, se ha suministrado de forma progresiva, como muestra la siguiente ecuación:

$$0-3s: \gamma=0$$

$$3s-6s: \gamma= (t-3)\frac{180^\circ/s}{3}$$

$$6s-20s: \gamma=180^\circ/s$$

En la función anterior, el eje de abscisas corresponde al tiempo y el eje de ordenadas corresponde a la velocidad. En este caso se ha utilizado una velocidad de $180^\circ/s$, pero las simulaciones se han realizado a velocidades de $45^\circ/s$, $90^\circ/s$, $180^\circ/s$ y $360^\circ/s$.

Estas funciones tienen un lenguaje propio en MSC.Adams, como se ha explicado al comienzo de este proyecto, a continuación se van a mencionar, pero no se explicarán para no ser reiterativo.

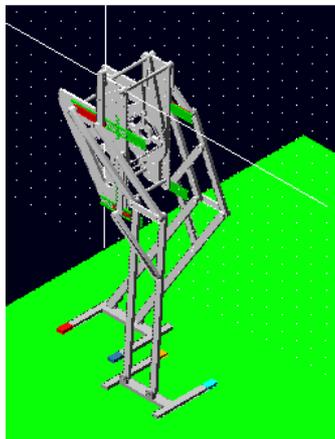
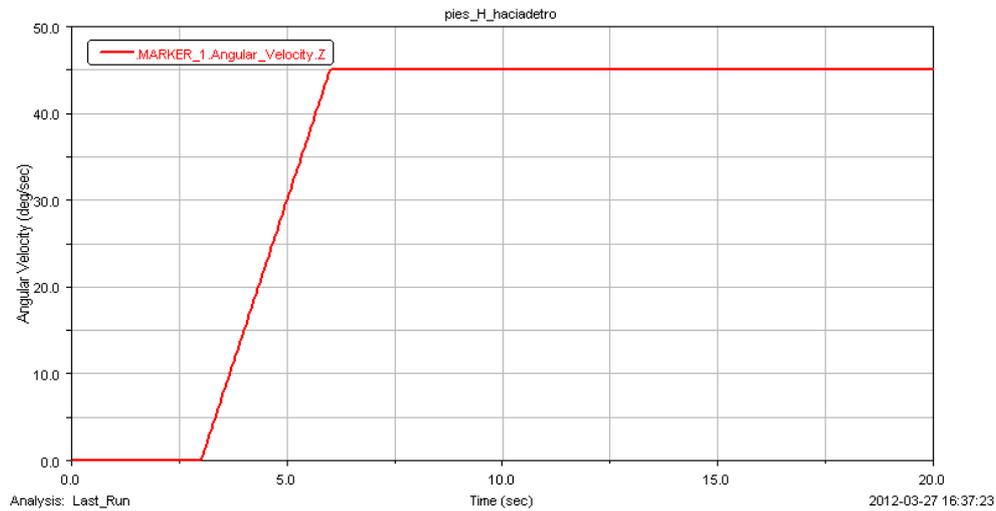


Figura 72 Modelo libre

Velocidad de 45º/s

Función en MSC.Adams:

```
if(time-3:0,0,(22.5d*(time-3))/3*(time-3))-if(time-6:0,0,(22.5d*(time-3))/3*(time-6))+if(time-6:0,0,22.5d*(time-6))
```

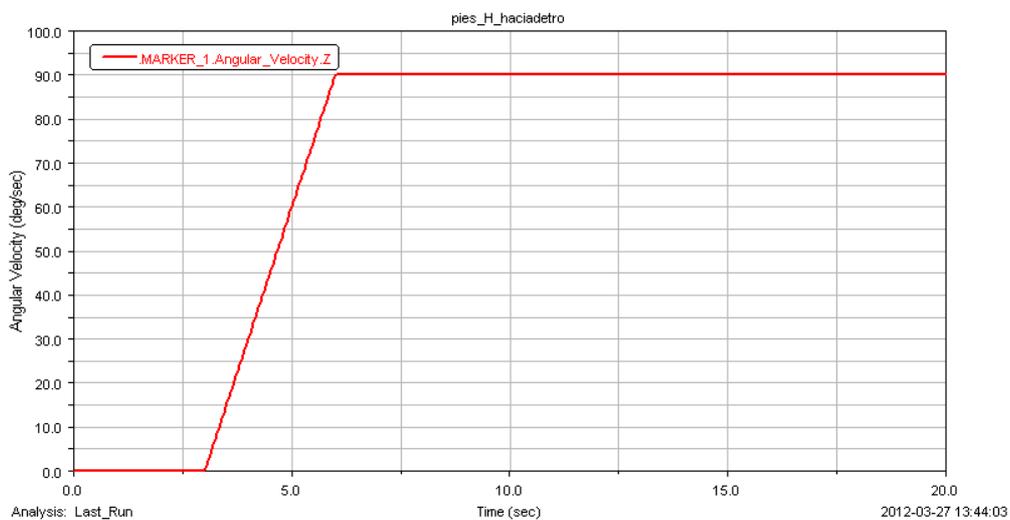


Gráfica 18: Función para velocidad de 45º/s

Velocidad de 90º/s

Función en MSC.Adams:

```
if(time-3:0,0,(45d*(time-3))/3*(time-3))-if(time-6:0,0,(45d*(time-3))/3*(time-6))+if(time-6:0,0,45d*(time-6))
```

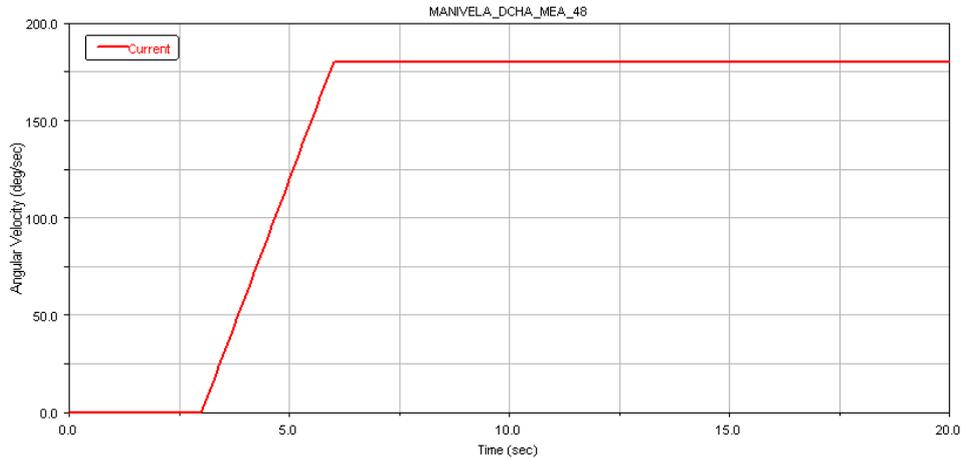


Gráfica 19: Función para velocidad de 90º/s

Velocidad de 180°/s

Función en MSC.Adams:

```
if(time-3:0,0,((30d*time)-90d)*(time-3))+if(time-6:0,0,90d*(time-6))-if(time-6:0,0,((30d*time)-90d)*(time-6))
```

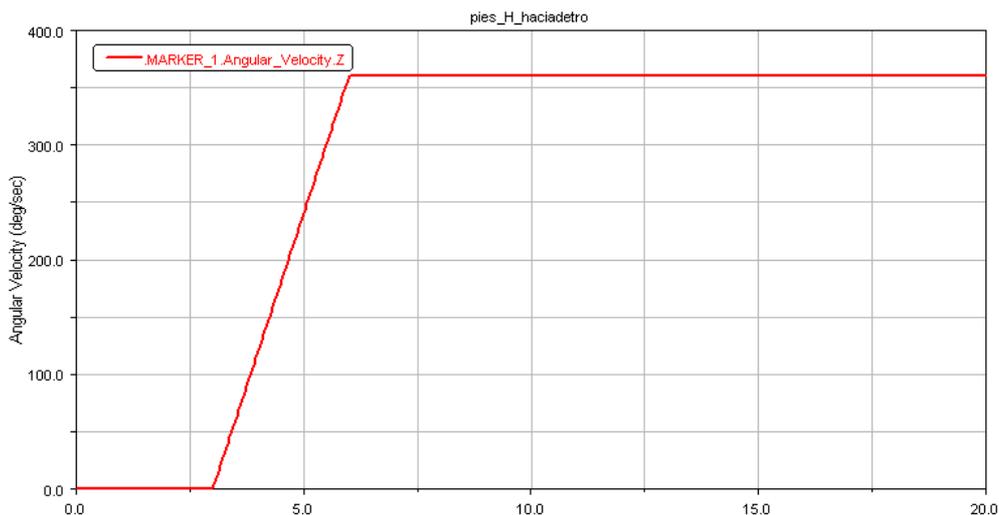


Gráfica 20: Función para velocidad de 180°/s

Velocidad de 360°/s

Función en MSC.Adams:

```
if(time-3:0,0,(180d*(time-3))/3*(time-3))-if(time-6:0,0,(180d*(time-3))/3*(time-6))+if(time-6:0,0,180d*(time-6))
```



Gráfica 21: Función para velocidad de 180°/s

Estas 4 velocidades, más 270°/s son las que se van a utilizar a lo largo de este proyecto, por ello se ha considerado conveniente ilustrar sus funciones. Una vez explicado esto, se va a ilustrar cómo quedó el paso del Mimbot, en los dos modelos.

4.3.2 Trayectorias descritas por los modelos

4.3.2.1 Trayectoria del modelo con el estabilizador modificado

En la secuencia de imágenes que se ilustra a continuación se ve la trayectoria descrita por el Mimbot, sin la utilización de los actuadores y a la velocidad de $180^\circ/\text{s}$. En el capítulo anterior ya se ha mostrado la forma de caminar que tiene este modelo y la trayectoria que describe, pero aquí se explicará de forma detallada.

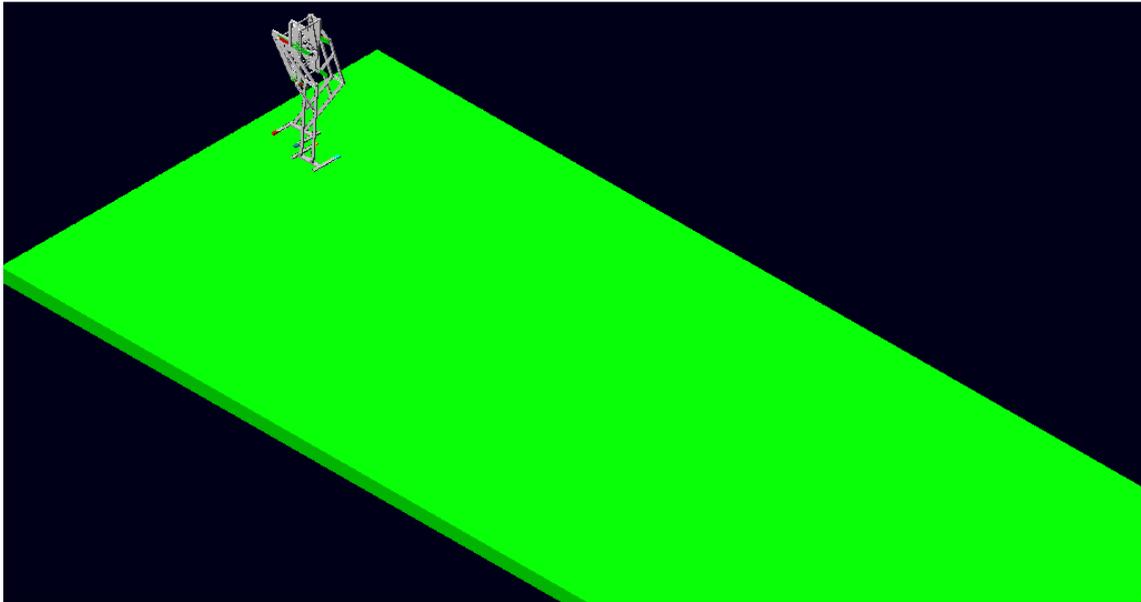


Figura 73 Posición del Mimbot al comienzo de la simulación

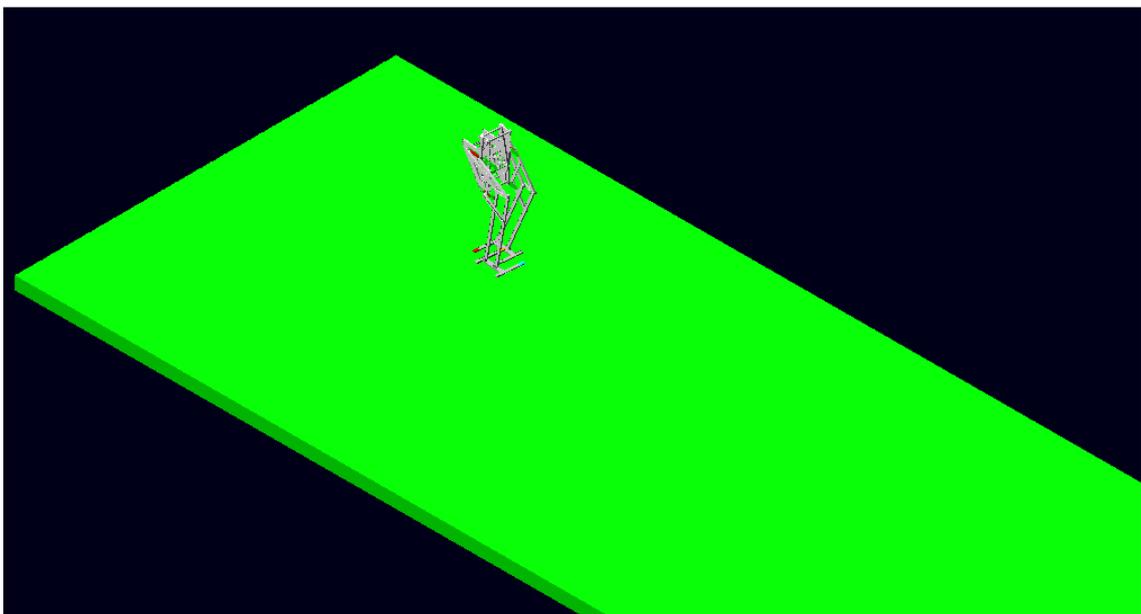


Figura 74 Posición del Mimbot en el segundo 10

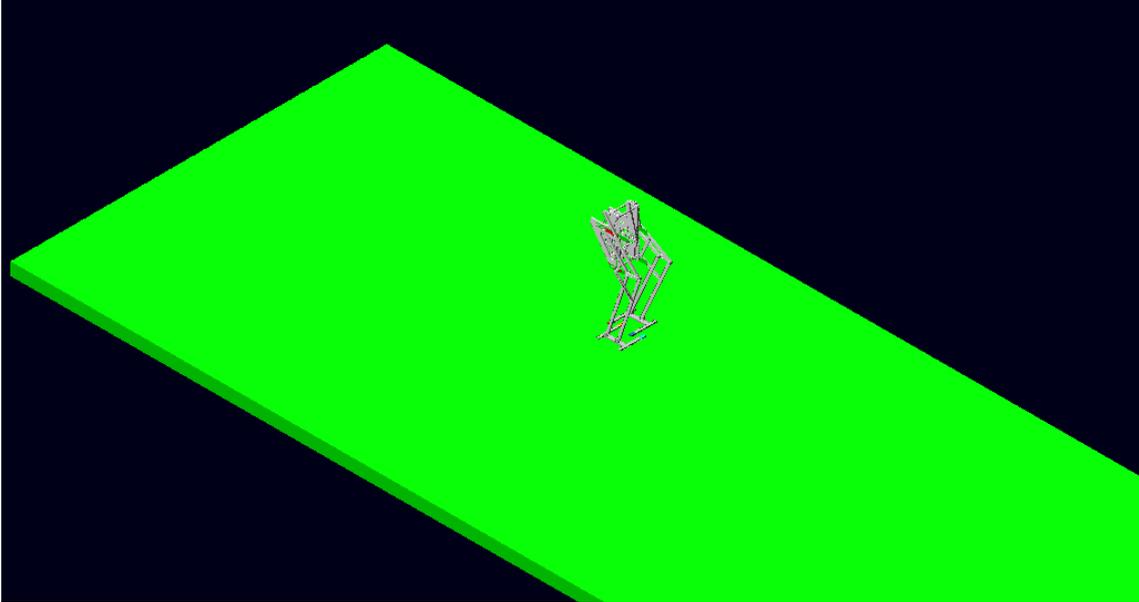


Figura 75 Posición del Mimbot en el segundo 15

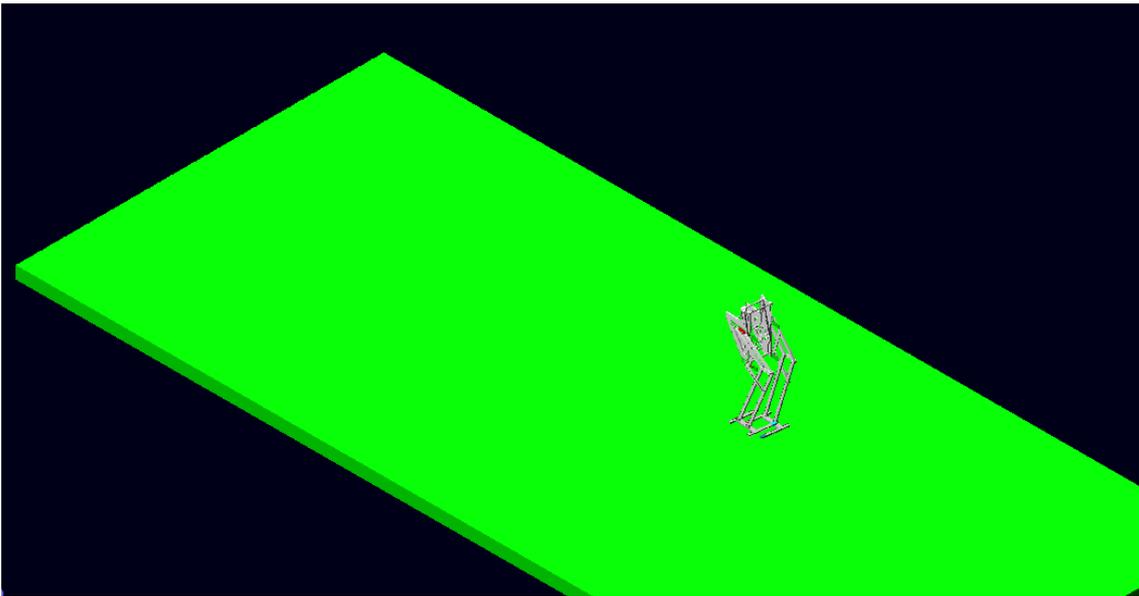


Figura 76 Posición del Mimbot al finalizar la simulación

La primera observación que se puede realizar es que el modelo mantiene el equilibrio al caminar. En el capítulo siguiente se estudiarán de forma detallada las trayectorias descritas, en los modelos libres, a diferentes velocidades y con la adición de masas para intentar lograr la mayor estabilidad y la trayectoria más recta. Aún así, se puede ver que sin añadir masa alguna, el robot mantiene el equilibrio y es capaz de caminar de forma satisfactoria.

En la secuencia de imágenes mostrada, se puede observar, que con las modificaciones efectuadas, el robot no sólo mantiene perfectamente el equilibrio al caminar, sino que también realiza una trayectoria significativamente recta, en comparación con los modelos que

se habían estudiado hasta el momento. Además la forma de realizar el paso es muy similar a la teórica, ya que los pies pivotan al entrar en contacto con el suelo, movimiento que se hace de forma natural al caminar. El arranque es el momento más crítico para el equilibrio, se observa una oscilación mayor, pero es soportada por el sistema, y luego continúa con un paso estacionario. Esta descripción se puede ver de forma gráfica a continuación.

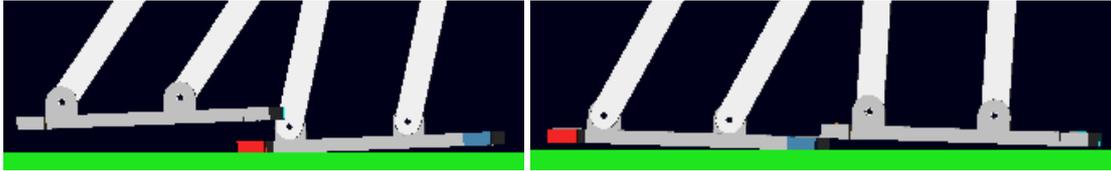


Figura 77 Posicionamiento de los pies al caminar

En las imágenes anteriores se puede observar cómo al levantar uno de los dos pies para dar un paso, el otro soporta el peso con su parte posterior y; al tomar contacto con el suelo el pie que está en el aire, el otro, tiende a apoyarse con su parte delantera, soportando el peso sobre ella. La distancia que se levantan del suelo los pies que están apoyados es suficientemente pequeña para que el robot pueda mantener el equilibrio dinámico y continúe su movimiento. Esta descripción es válida tanto para el paso con el pie derecho, como para el pie izquierdo. Este modelo su centro de gravedad mejor posicionado para el movimiento que los modelos precedentes, ya que no pierde el equilibrio hacia atrás, como ocurría en modelos anteriores.

4.3.2.2 Trayectoria del modelo con el estabilizador primitivo

En la secuencia de imágenes que se ilustra a continuación se ve la trayectoria descrita por el Mimbot, sin la utilización de los actuadores y a la velocidad de $180^\circ/s$, al igual que en el modelo anterior. Antes de continuar es necesario comentar que este modelo, con el estabilizador primitivo, a la velocidad de $180^\circ/s$ pierde el equilibrio al caminar, por tanto se le ha suministrado una velocidad de $360^\circ/s$, ya que a esta velocidad es capaz de caminar. En el capítulo siguiente se estudiarán diferentes velocidades y la adición de masas para lograr un mejor equilibrio. Este modelo, a priori, ya se ve que es más inestable que el anterior, puesto que en las mismas condiciones que el anterior, pierde la estabilidad.

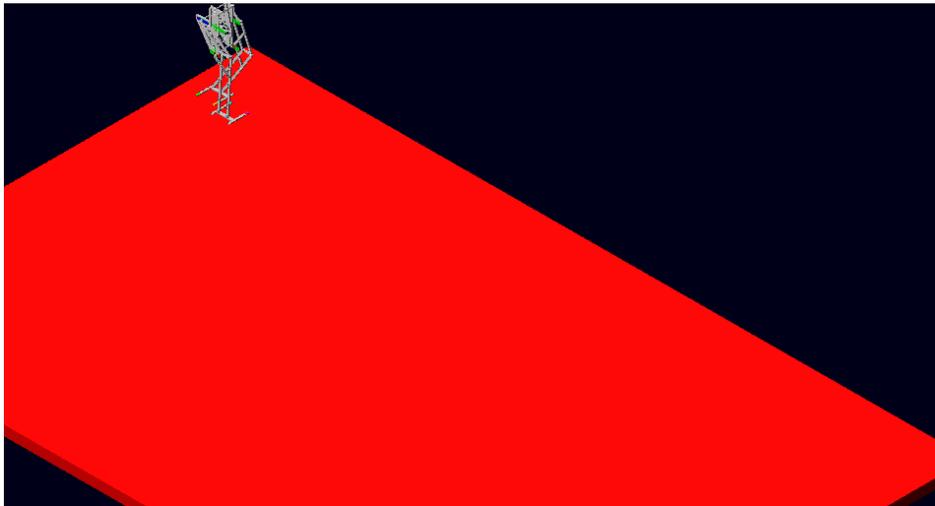


Figura 78 Posición del Mimbot al comienzo de la simulación

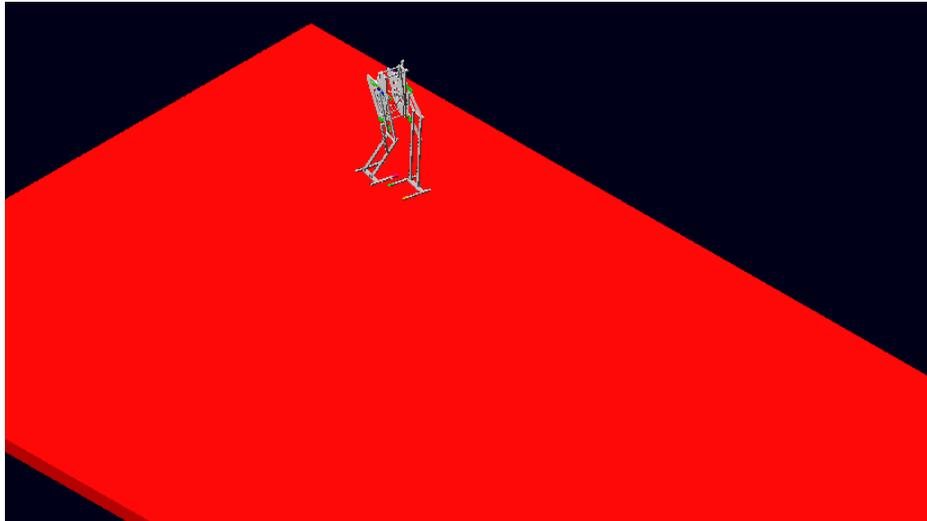


Figura 79 Posición del Mimbot en el segundo 7

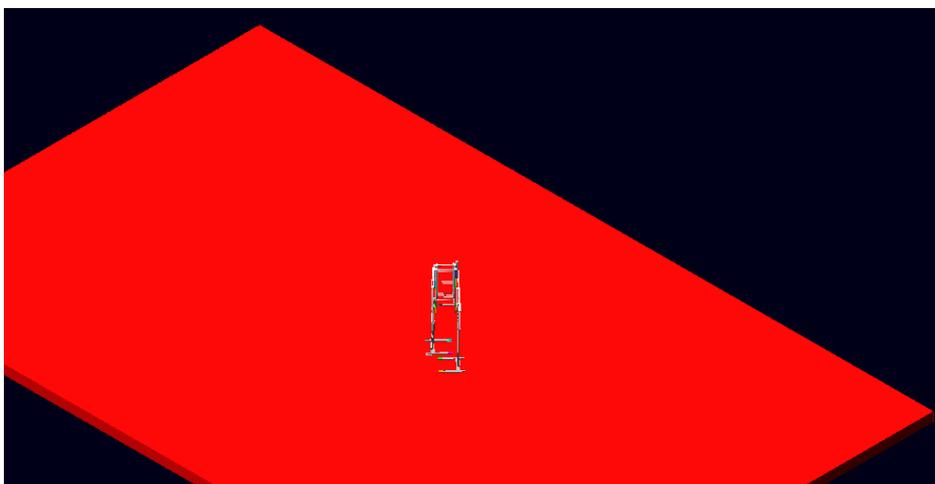


Figura 80 Posición del Mimbot en el segundo 13

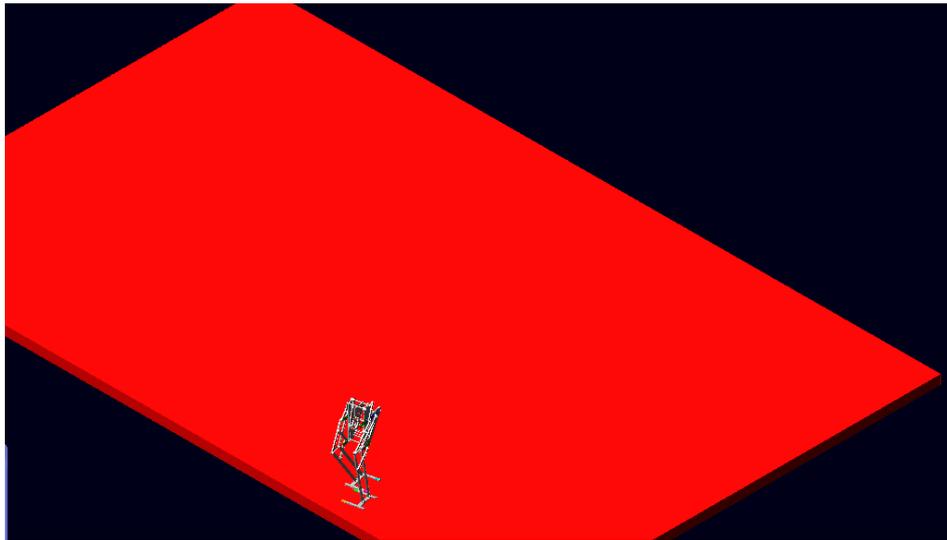


Figura 81 Posición del Mimbot al finalizar la simulación

El arranque de este modelo es más brusco, lo que genera una inestabilidad mayor. Se recorre mucho más espacio al ser la velocidad empleada el doble que la del otro modelo. Además se aprecia que la trayectoria descrita es más variable que la del modelo anterior. Al final del recorrido gira hacia la derecha y se desvía de su trayectoria. Estos aspectos se estudiarán en profundidad en el capítulo siguiente.

El contacto que van a tener los pies con el suelo va a ser diferente, ya que para empezar, los pies cuando están en el aire no siguen horizontales, giran al igual que el estabilizador.

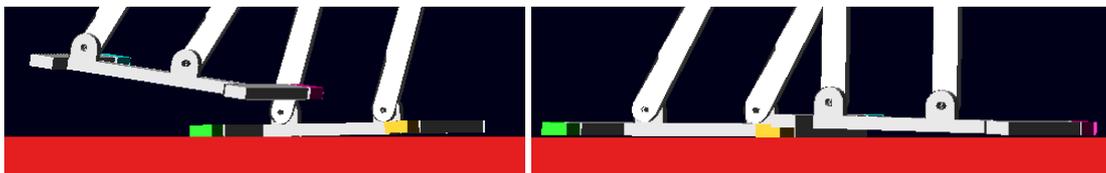


Figura 82 Posicionamiento de los pies al caminar

En las imágenes anteriores se puede observar cómo al levantar uno de los dos pies para dar un paso, el otro soporta el peso con su parte posterior y; al tomar contacto con el suelo el pie que está en el aire, el otro, se apoya con la mayor parte de la planta, al contrario que ocurría en el otro modelo que se apoyaba con su parte delantera. La distancia que se levantan del suelo los pies que están apoyados es suficientemente pequeña para que el robot pueda mantener el equilibrio dinámico y continúe su movimiento. Esta descripción es válida tanto para el paso con el pie derecho, como para el pie izquierdo. Por la propia geometría del movimiento de los pies, este modelo es más inestable.

Una vez descritas las trayectorias de ambos modelos, se va a ilustrar el estudio de las características del Mimbot con el nuevo diseño. Como su propio nombre indica, este robot, además de caminar, tiene propiedades miméticas, esto es, puede alargar o acortar el paso y subir y bajar la zancada, como ya se comentó. Esto es muy útil para cambiar de trayectoria, describir trayectorias curvas o subir y bajar escaleras, entre otras cosas.

4.4 HABILIDADES DEL ROBOT MIMBOT

Para mostrar las cualidades del Mimbot se va a proponer subir 2 escalones al modelo. El proceso que se siguió para realizar el ejercicio fue el siguiente: El Mimbot da 4 pasos antes de subir el primer escalón, para tomar el suficiente impulso y no perder el equilibrio. El primer escalón los sube con el pie izquierdo, utilizando los dos actuadores de ese lado de la cadera elevando la zancada y alargándola, para volver a su estado inicial antes de poner el pie en el suelo; acto seguido se eleva y alarga la zancada de la pierna derecha para superar el segundo escalón con esta pierna, para ello se utilizan los actuadores de ese lado de la cadera, también vuelven a su estado inicial antes de posarse el pie en el suelo.

En cuanto a las funciones implementadas en los actuadores para regular su movimiento, éstas fueron de tipo SENO (SIN), dado que se adecuaban bien a las exigencias del movimiento, pudiendo elegir la amplitud y la velocidad. Estas funciones fueron implementadas específicamente para funcionar en este modelo en los instantes requeridos; en futuros modelos reales del robot, éste contaría con sensores que midieran distancias en el espacio, y de esta forma el sistema de control podría efectuar los cálculos pertinentes para adaptarse en tiempo real a los movimientos exigidos a la pierna en cada situación.

En la siguiente secuencia de imágenes se puede ver la trayectoria descrita por el Mimbot, para superar ambos escalones.

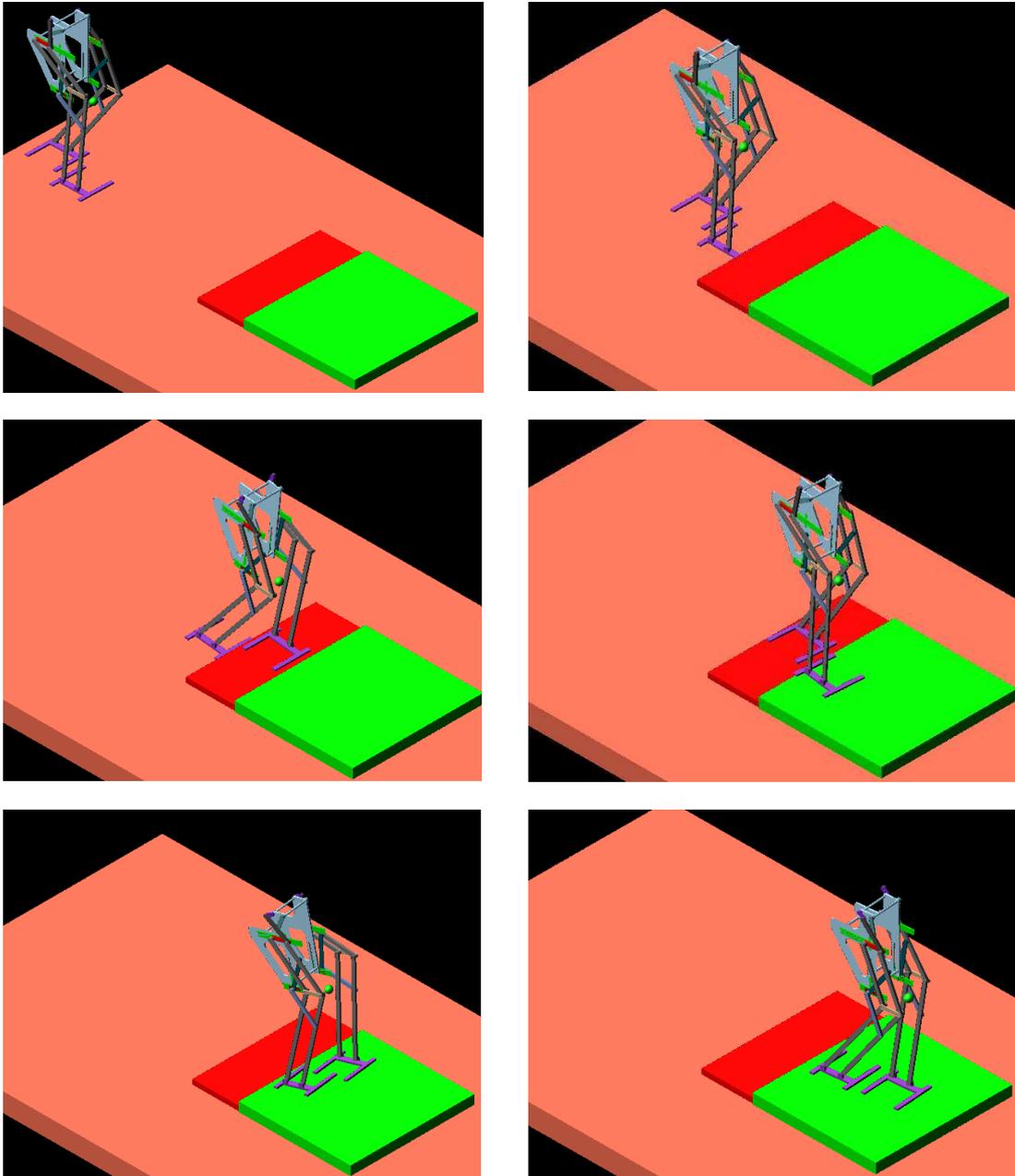


Figura 83 Subida de escalones

Hay que destacar que el Mimbot ha sido capaz de subir los escalones sin añadir ninguna junta extra, y los resultados demuestran que sigue una trayectoria bastante recta. Se ha añadido una pequeña masa de 1.5 kg en la parte delantera para mejorar la estabilidad. Este ejercicio no buscaba estudiar la trayectoria descrita, sino demostrar que la modificación realizada beneficiaba también las cualidades miméticas.

En cuanto a las funciones utilizadas, en este caso se quisieron implementar funciones sinusoidales, ya que se adecuaban a las características del ejercicio.

La función de movimiento del motor (“motion 1”) fue la siguiente:

if(time-3:0,0,((30d*time)-90d)*(time-3))+if(time-6:0,0,90d*(time-6))-if(time-6:0,0,((30d*time)-90d)*(time-6))

La función implementada en la deslizadera derecha (“motion 2”) fue:

***if(time-9.5:0,0,(SIN(time-9.5)/25))-if(time-10:0,0,SIN(time-10)/25)
+if(time-10:0,0,-SIN(time-10)/25)-if(time-10.5:0,0,-SIN(time-10.5)/25)***

La función de la deslizadera izquierda (“motion 3”) fue:

***if(time-8.5:0,0,(SIN(time-8.5)/25))-if(time-9.25:0,0,SIN(time-9.25)/25)
+if(time-9.25:0,0,-SIN(time-9.25)/25)-if(time-9.75:0,0,-SIN(time-9.75)/25)
+if(time-10.5:0,0,(SIN(time-10.5)/25))-if(time-11:0,0,SIN(time-11)/25)
+if(time-11:0,0,-SIN(time-11)/25)-if(time-11.5:0,0,-SIN(time-11.5)/25)***

En cuanto a las funciones implementadas en los actuadores horizontales, la del derecho (“motion 4”) fue la que viene a continuación.

***if(time-9.5:0,0,(SIN(time-9.5)/50))-if(time-10.25:0,0,SIN(time-10.25)/50)
+if(time-10.25:0,0,-SIN(time-10.25)/50)-if(time-11:0,0,-SIN(time-11)/50)***

Mientras que la función para el actuador horizontal izquierdo (“motion 5”) fue la siguiente:

***if(time-10.5:0,0,(SIN(time-10.5)/50))-if(time-11:0,0,SIN(time-11)/50)
+if(time-11.25:0,0,-SIN(time-11.25)/50)-if(time-11.75:0,0,-SIN(time-11.75)/50)***

4.4.1 Puesta en marcha del robot

La simulación comienza con el MIMBOT en reposo. Tras unos segundos, el robot se pone en marcha en dirección a los escalones, con la velocidad especificada.

4.4.2 Ascensión del primer escalón

Esta acción es efectuada en primer lugar por el pie izquierdo. Para ello, la deslizadera del lateral izquierdo se eleva desde el momento en el que el pie se levanta del suelo, de modo que pueda salvar el obstáculo que supone el escalón y baja hasta su posición inicial a tiempo de posarse sobre el escalón.

Además, existe un alargamiento de la zancada con el fin de que el pie izquierdo se apoye completamente sobre el primer escalón; de otro modo, quedaría un tramo del pie apoyado en el aire.

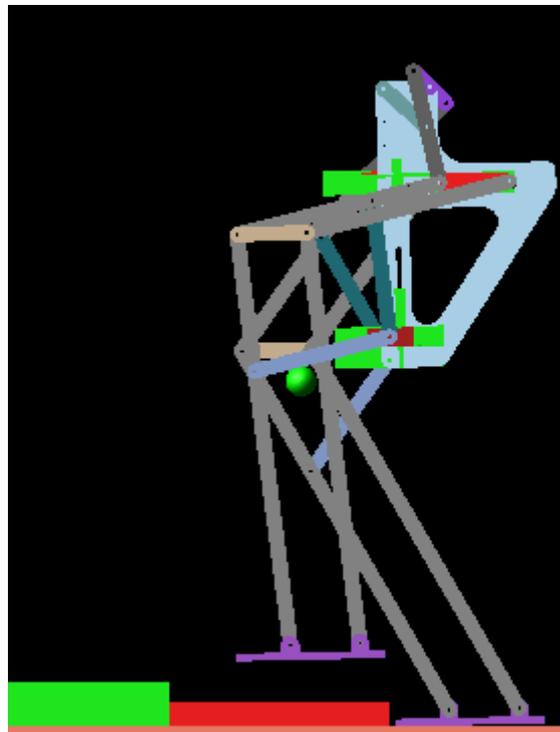


Figura 84 Elevación del paso del pie izquierdo

Después, le toca el turno al pie derecho, que, aprovecha el asentamiento del pie izquierdo en el primer escalón, para ascender el segundo escalón, seguidamente.

4.4.3 Ascensión del segundo escalón

El segundo peldaño es alcanzado por el pie derecho. En esta ocasión, también existe un alargamiento de la zancada con el fin de que el pie derecho se apoye completamente sobre el segundo escalón.

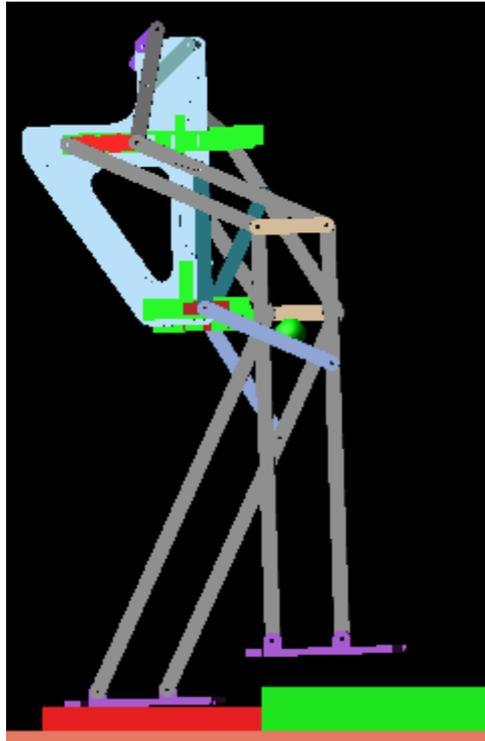


Figura 85 Elevación y alargamiento de la zancada del pie derecho

Para subir el segundo escalón, el pie izquierdo tiene que volver a elevar y alargar la zancada, igual que hizo para superar el primero, pero antes de que el pie tenga contacto con el suelo ambos actuadores vuelven a su posición de partida.

4.4.4 Fin del recorrido

Finalmente, una vez el robot ha salvado los dos escalones, efectúa dos pasos sobre el rellano y queda parado en la misma posición que la inicial.

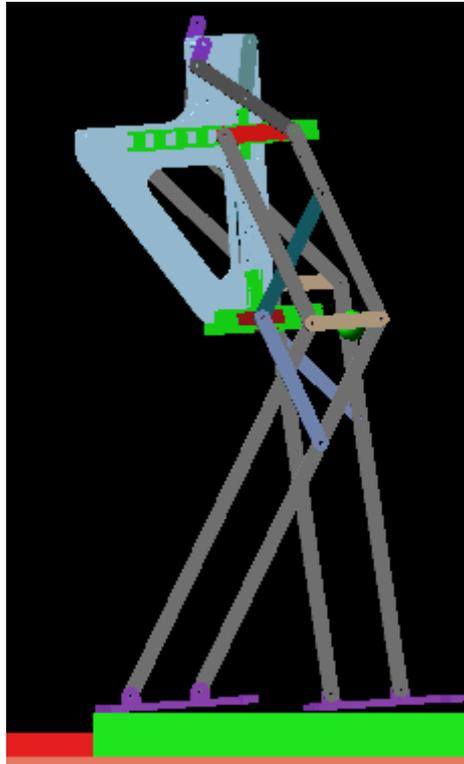


Figura 86 Zancada para el posicionamiento final

Se puede observar en la imagen anterior el pivotamiento que sufren los pies para mantener el equilibrio, al subir los escalones.

El ejercicio para demostrar la capacidad mimética del Mimbot se ha realizado con el modelo que tiene el estabilizador horizontal. No se profundiza más en el estudio de las propiedades miméticas, ya que no es objetivo de este proyecto.

Una vez contruidos y descritos los modelos en el programa MSC.Adams, se va a proceder a estudiar la estabilidad de los mismos, para sacar conclusiones posteriormente.



Capítulo V:

ANÁLISIS Y RESULTADOS

El procedimiento que se va a seguir en este capítulo va a consistir en estudiar los dos modelos con los dos tipos de estabilizadores. En ambos se van a obtener gráficas del par, en los modelos colgados y; gráficas de las trayectorias en las 3 direcciones del espacio y el par en los modelos libres. Esto se realizará a diferentes velocidades y añadiendo distintas masas en lugares diversos de la cadera. Con los datos obtenidos se podrá comparar y sacar conclusiones de los modelos. Por tanto el estudio que se va a efectuar queda de la siguiente forma.

5.1. Descripción de la toma de datos para el Modelo con el estabilizador horizontal (modificado)

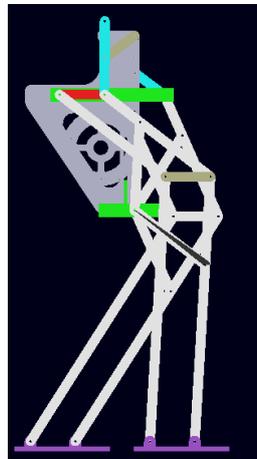


Figura 87 Modelo con el estabilizador horizontal

- **Velocidad de 180°/s**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio).
 - Gráficas del par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Velocidad de 360°/s**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio).
 - Gráficas del par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Velocidad de 90°/s**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio).
 - Gráficas del par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Velocidad de 45°/s**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio).
 - Gráficas del par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.

Como se verá más adelante, la velocidad que más estabilidad da al modelo es $180^\circ/s$, por tanto, tomándola como base para el desplazamiento, se han añadido masas en diferentes lugares de la cadera, para estudiar el comportamiento del Mimbot.

Localización A



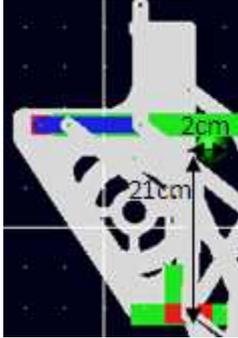
- **Masa de 1 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 1,5 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 2 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 4kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.

Localización B



- **Masa de 1 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 1,5 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 2 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 4kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.

Localización C



- **Masa de 1 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 1,5 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 2 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 4kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.

Para el modelo con el estabilizador descolgado (primitivo) se ha realizado la misma operación.

5.2. Descripción de la toma de datos para el Modelo con el estabilizador descolgado (primitivo)

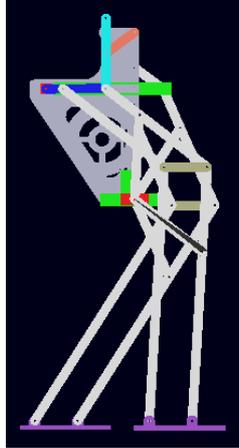


Figura 88 Modelo con el estabilizador descolgado

- **Velocidad de 180°/s**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio).
 - Gráficas del par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Velocidad de 360°/s**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio).
 - Gráficas del par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Velocidad de 90°/s**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio).
 - Gráficas del par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Velocidad de 45°/s**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio).
 - Gráficas del par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.

También se le añadieron masas, en este modelo es más importante ya que sin ellas no es capaz de caminar en equilibrio, salvo a 360°/s.

Localización A



- **Masa de 1 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 1,5 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 2 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 4kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.

Localización B



- **Masa de 1 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 1,5 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 2 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 4kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.

Localización C



- **Masa de 1 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 1,5 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 2 kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.
- **Masa de 4kg**
 - Gráficas de las 3 trayectorias descritas por la cadera (ejes X, Y y Z del espacio) y par demandado por el robot en la manivela para caminar en el modelo colgado y en el modelo libre.

Una vez explicado brevemente como se va a proceder para explicar los resultados obtenidos, no queda más que empezar el estudio.

5.3. Resultados y gráficas

Las trayectorias se han calculado para conseguir un modelo que tenga el mínimo de oscilaciones posibles y mantenga su trayectoria de avance lo mas rectilínea posible. El par generado en la manivela del robot se va a estudiar para comprobar la potencia que el motor debe tener para que sea viable la construcción del Mimbot. Una vez calculado el par, se ha descrito los puntos de la trayectoria del pie donde éste genera picos y, por tanto, es más conflictivo. Por último se va a comparar el par demandado por el modelo libre y el modelo colgado, para ver las diferencias e irregularidades generadas en el modelo libre, producto del contacto con el suelo.

5.3.1 Estabilizador modificado

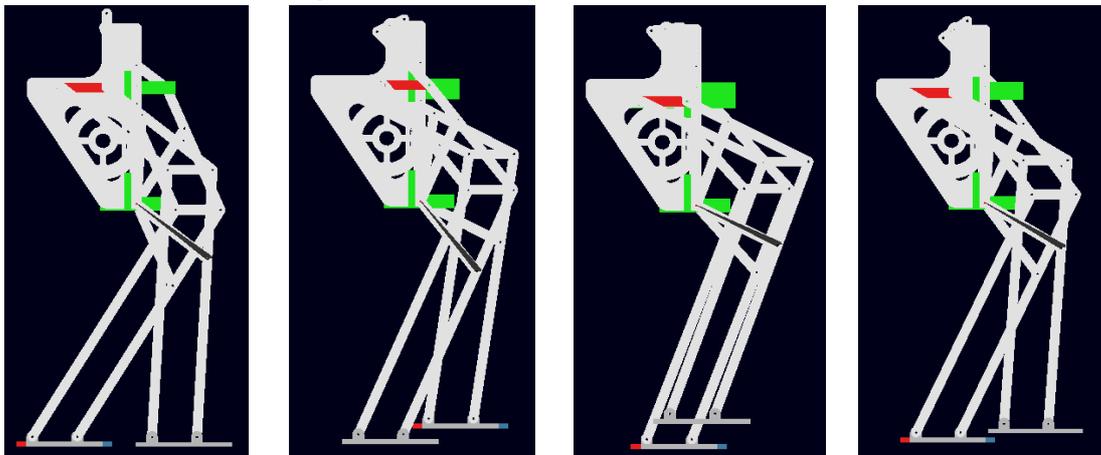
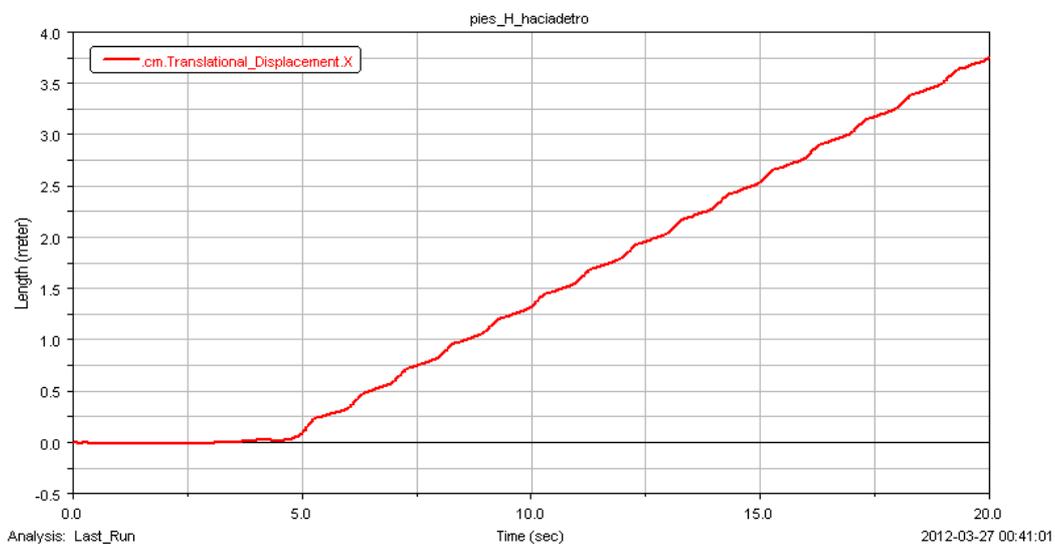


Figura 89 Paso descrito por el modelo con el estabilizador horizontal

5.3.1.1 Velocidad de 180°/s

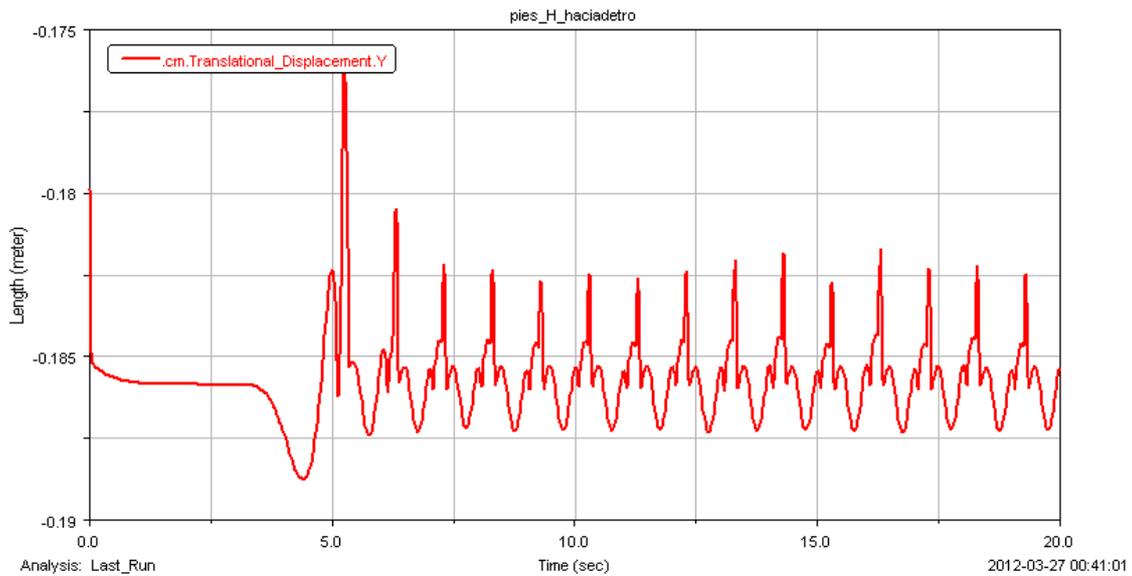
Se ha realizado una simulación a 800 pasos y 20 segundos de duración.

➤ Modelo libre



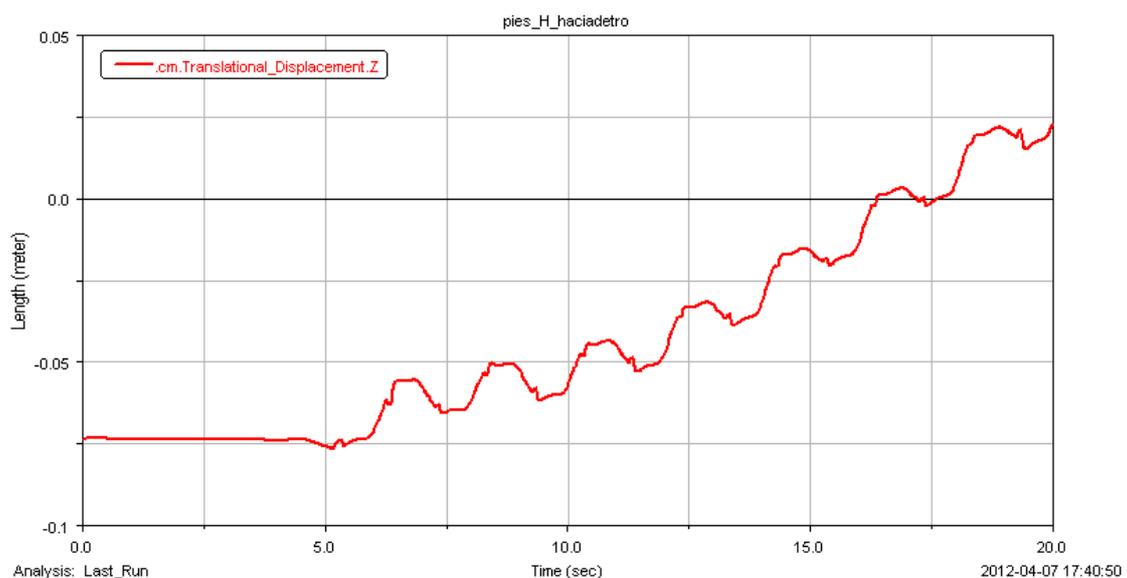
Gráfica 22: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X a 180°/s

Se puede observar que la trayectoria longitudinal se asemeje a una recta espacio-tiempo. Como es de esperar la línea nos es completamente recta, existen irregularidades, originadas por diversos factores, principalmente relacionados con el rozamiento con el suelo y con la potencia generada por el motor.



Gráfica 23: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y a 180º/s

En el eje Y, vertical, se observa que la trayectoria descrita por el CM es constante en el tiempo, una vez que se estabiliza la velocidad, a partir del segundo 6.

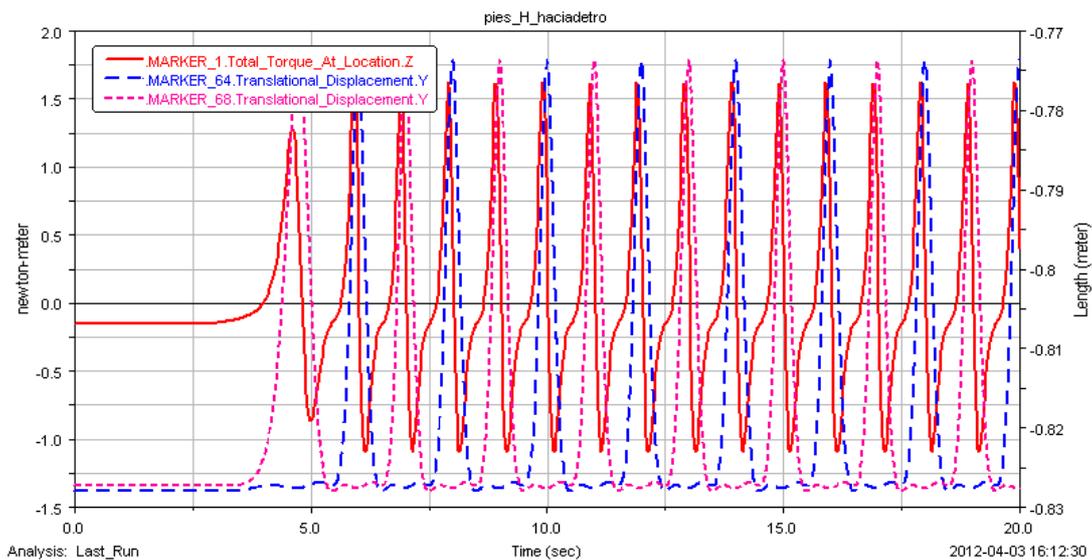


Gráfica 24: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z a 180º/s

En un modelo ideal, la trayectoria longitud-tiempo en el eje transversal, debería ser una recta horizontal, ya que el objetivo es que el modelo camine recto. Como se puede ver esto no es del todo real, pero una vez vistos todos los modelos, se llegará a la conclusión de que esta velocidad es la que menos desviación transversal sufre. Una vez calculadas las trayectorias del Cm de la cadera, se ha procedido a comprobar el par demandante en la manivela para mover el robot. Se va a comparar el par necesario para mover el modelo colgado y el modelo libre.

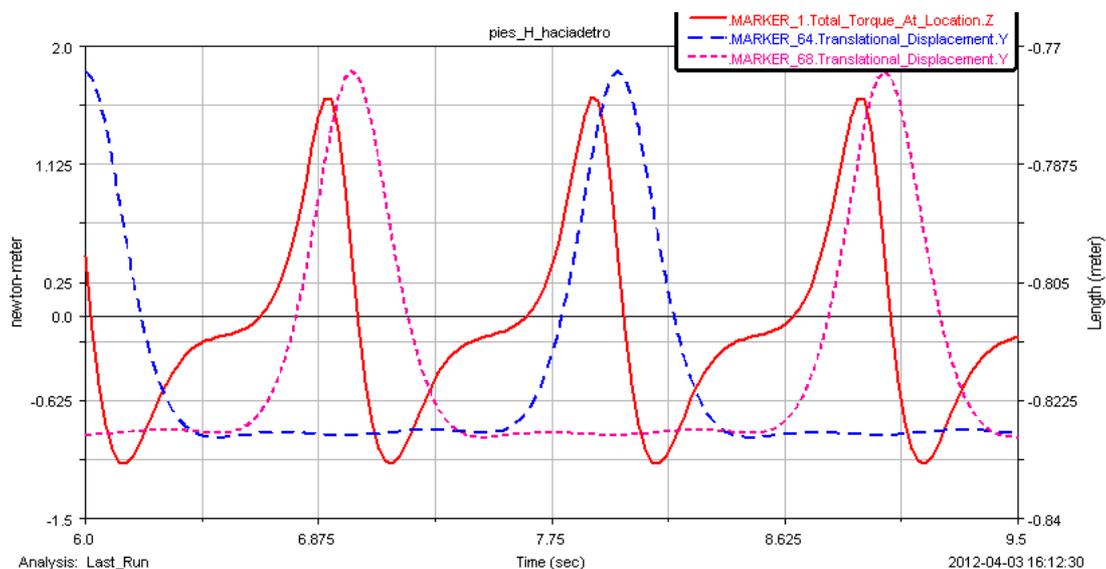
➤ **Par en el modelo colgado**

Para ver los puntos en los que se producen los picos del par y los cambios de trayectoria, se va a ilustrar en las siguientes gráficas el par junto con el desplazamiento vertical de los pies.



Gráfica 25: Par –Posición vs Tiempo a 180º/s modelo colgado

Se puede apreciar cómo la demanda de par es constante en los ciclos



Gráfica 26: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 180º/s modelo colgado

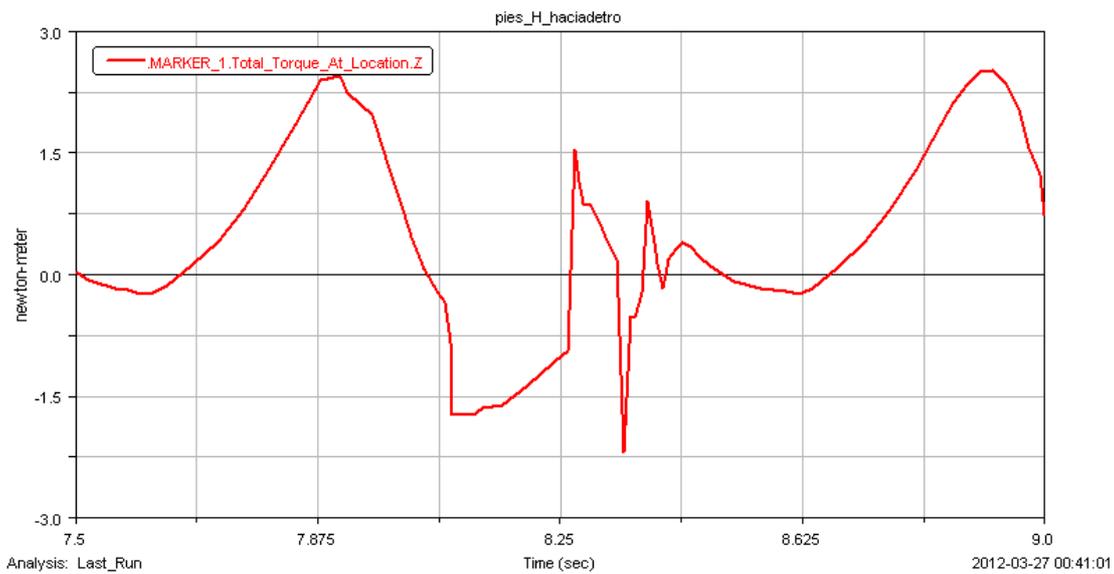
Se puede observar cómo se producen las demandas y los excesos de par en el punto que actúa el motor sobre la manivela. Un instante antes de que el pie del Pasibot se encuentre en su punto más alto, se observa que se llega al pico de demanda de par por parte del robot. Esto indica que el punto en el que es preciso un par mayor en el caminar del modelo es el momento en el que la pierna está llegando a su punto más alto pero sin alcanzarlo. Posteriormente se observa una caída en la demanda llegando a valores negativos antes de llegar el pie al suelo, con lo cual se puede afirmar que si el motor estuviese proporcionando siempre la misma cantidad de par, habría cierto momento del ciclo en el que el robot se vería empujado por el motor y viceversa, el modelo intentaría frenar el motor. Por tanto, la forma óptima de poder aprovechar dicha energía sería la capacidad del Pasibot de arrancar y parar el motor en el momento exacto en el que el robot esté demandando o desaprovechando energía. Éste es uno de los fundamentos de funcionamiento de un robot pasivo.

En el tiempo en el cual el pie del robot está en contacto con el suelo, éste no demanda energía por parte del motor, sino que aprovecha su propia inercia en el movimiento de caída de la pierna hacia el suelo para realizar el paso.

➤ **Par en el modelo libre**

Dejando el modelo libre, en contacto con el suelo, se observarán ciertas diferencias. La primera que se puede encontrar es que debido al contacto con el suelo, la evolución de par en la manivela tiene ciertas irregularidades repetitivas a lo largo de los periodos de cada paso. Observando las gráficas que a continuación se muestran, se puede ver cómo aparecen unos picos en el momento de entrada del pie en el apoyo. Es decir, para el momento en el que la pierna está en vuelo, al no haber nada diferente al modelo colgado, se comporta igual que en el caso anterior, pero cuando el pie entra en contacto con el suelo, aparecen ciertas inestabilidades. Estos picos de par ocurren debido al golpe que se produce en el momento de contacto desde que el pie está en vuelo hasta el punto donde toca con el suelo. Posteriormente, la evolución de los datos, tampoco va a ser exactamente igual que en el caso anterior, ya que existen fuerzas de rozamiento.

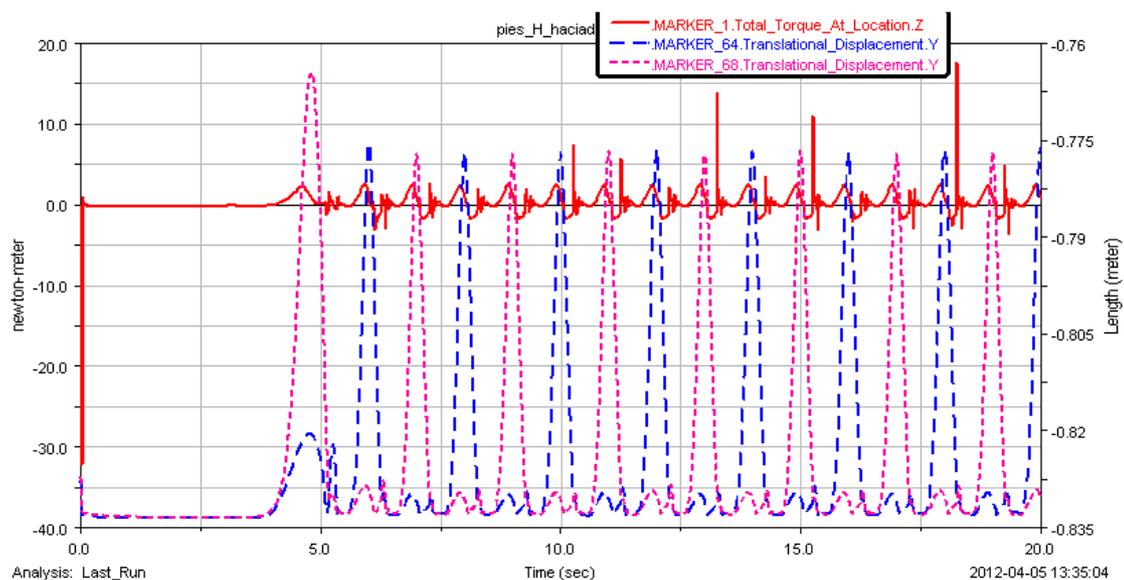
Los motores que se simulan en Adams son comparables a motores eléctricos, los cuales dan un pico de par en la arrancada de los mismos. Hecho por el cual se hace más complicado el control del robot para aprovechar sus inercias. Este control se podría realizar mediante un sistema de transmisión lo suficientemente progresivo como para no provocar inestabilidades de ese tipo en cada momento de dar o cortar la energía ofrecida por el motor.



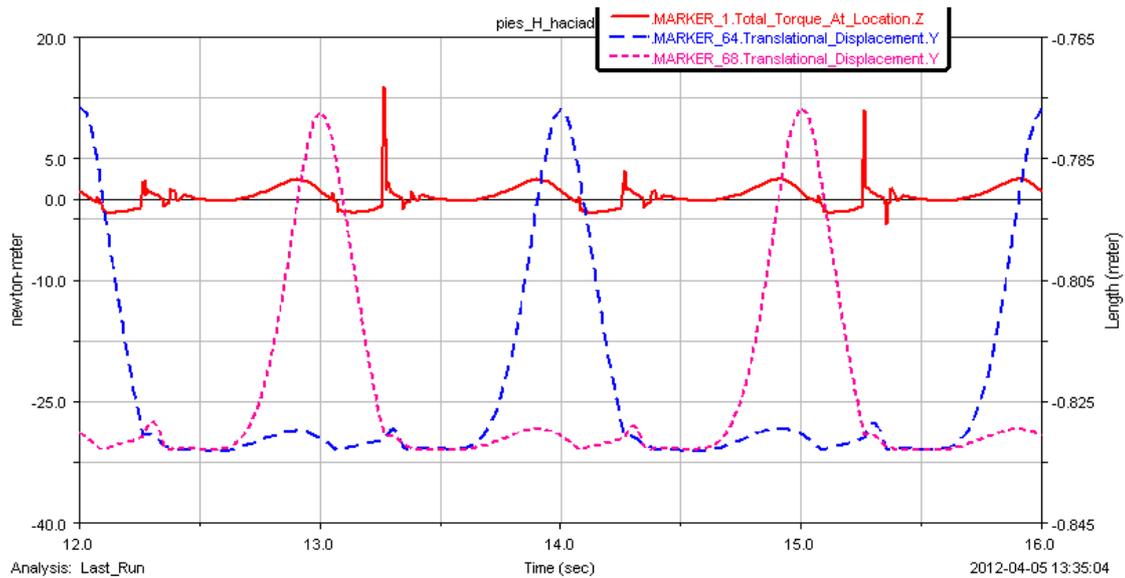
Gráfica 27: Detalle del Par demandante por la manivela

En la gráfica detallada se observa lo comentado anteriormente, el inicio de los pasos describe una trayectoria similar a la del modelo colgado, mientras que al entrar en contacto con el suelo se producen irregularidades y picos de par que generan una modificación de la trayectoria descrita.

A continuación se ilustran los puntos del pie donde se producen los picos de par y las modificaciones en la trayectoria. Para ello se compara el par generado en la manivela derecha con el desplazamiento vertical de los pies.



Gráfica 28: Par –Posición vs Tiempo a 180º/s modelo libre

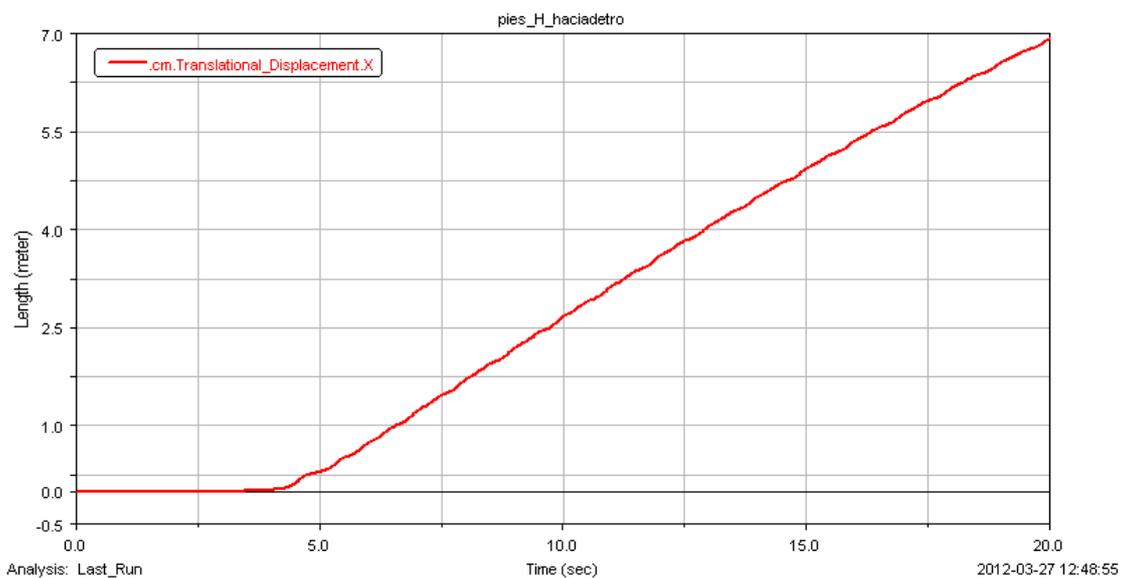


Gráfica 29: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 180º/s modelo libre

En las gráficas se puede observar de forma clara cuales son los puntos críticos de par. Siempre se producen los picos en el momento que uno de los dos pies entra en contacto con el suelo. Por otra parte es lógico ya que para producir movimiento superando el contacto con el suelo es necesario aportar más par que si no existe rozamiento, salvo el del aire que es muy inferior comparándolo con un medio sólido.

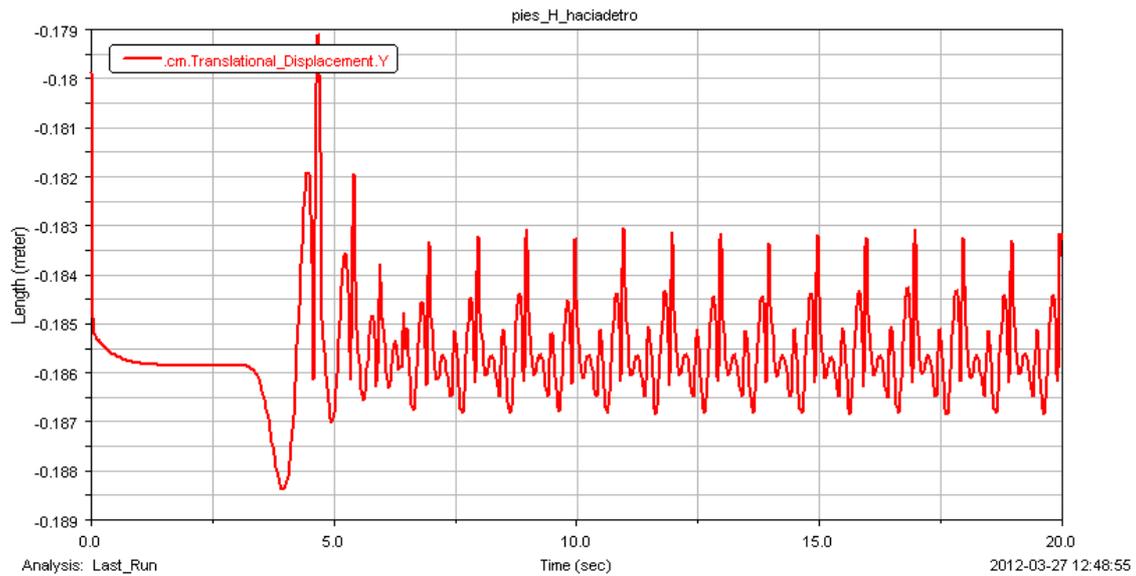
A continuación se va a realizar el mismo estudio, pero esta vez a una velocidad de 360º/s, las simulaciones se han realizado a 800 pasos y han tenido una duración de 20 segundos.

5.3.1.2. Velocidad de 360º



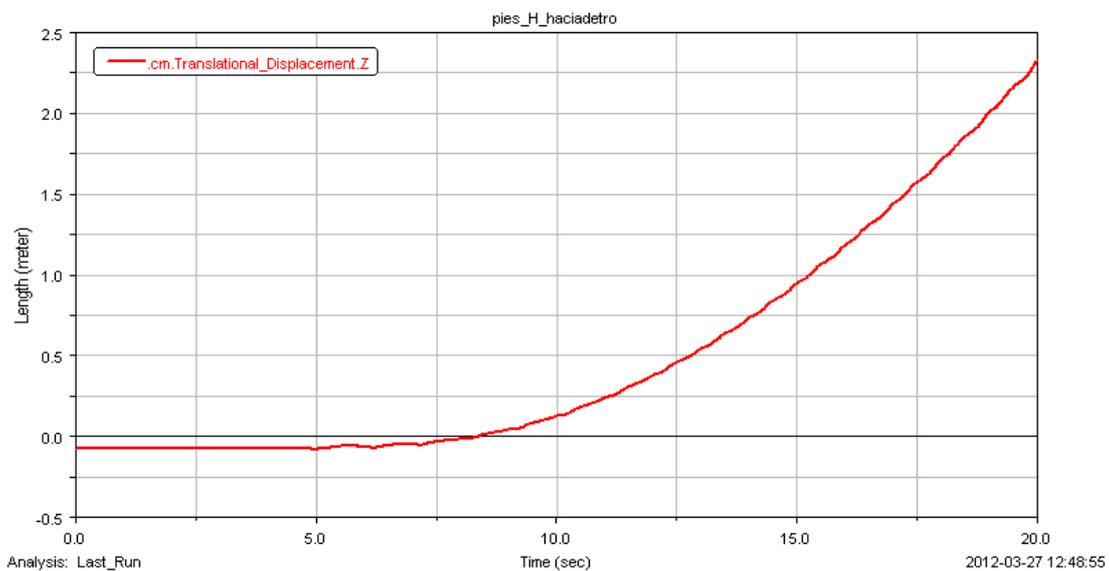
Gráfica 30: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X a 360º/s

Comparando esta gráfica con la equivalente a la velocidad de 180°/s, se observa que el desplazamiento en el eje X se asemeja mejor a una línea recta, tiene menos oscilaciones, que es el fin que se busca. Esta trayectoria discurre hasta el segundo 12, a partir del cual empieza a dibujar una curva. Esto es producido, como se verá en el desplazamiento transversal, porque el robot se desvía de su trayectoria recta. Gira hacia su izquierda.



Gráfica 31: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y a 360°/s

Al estabilizarse el paso, el modelo tiene una oscilación vertical ínfima y uniforme, similar al de la velocidad de 180°/s.



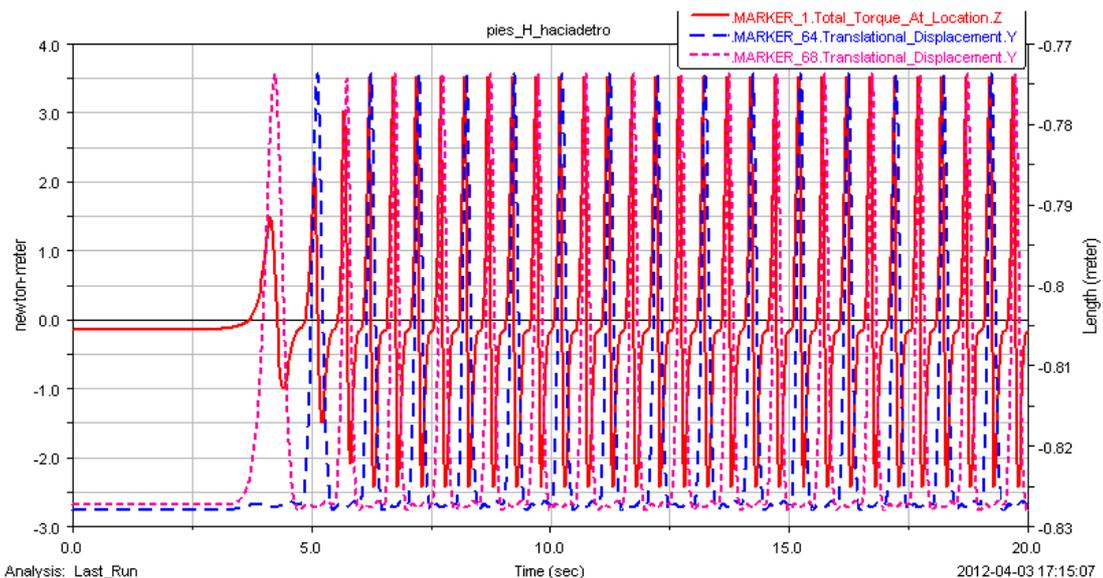
Gráfica 32: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z a 360°/s

El desplazamiento transversal de este modelo es más uniforme que el producido a 180º/s, que oscilaba periódicamente. Pero, en cambio, en los 20 segundos que dura la simulación sufre una desviación en su trayectoria de 2.3 metros, lateralmente. En cambio la desviación sufrida a 180º/s era de 0.025 metros. Por tanto, se puede demostrar de forma visual que la velocidad del motor influye de manera muy notable en la forma de caminar y comportarse del robot. No solo se traduce en un paso más o menos rápido, sino que la trayectoria de éste cambia. Al contrario que para la velocidad de 180º/s donde el desplazamiento longitudinal era muy superior en módulo a los otros dos, en este caso se ve que el desplazamiento transversal tiene una magnitud considerable.

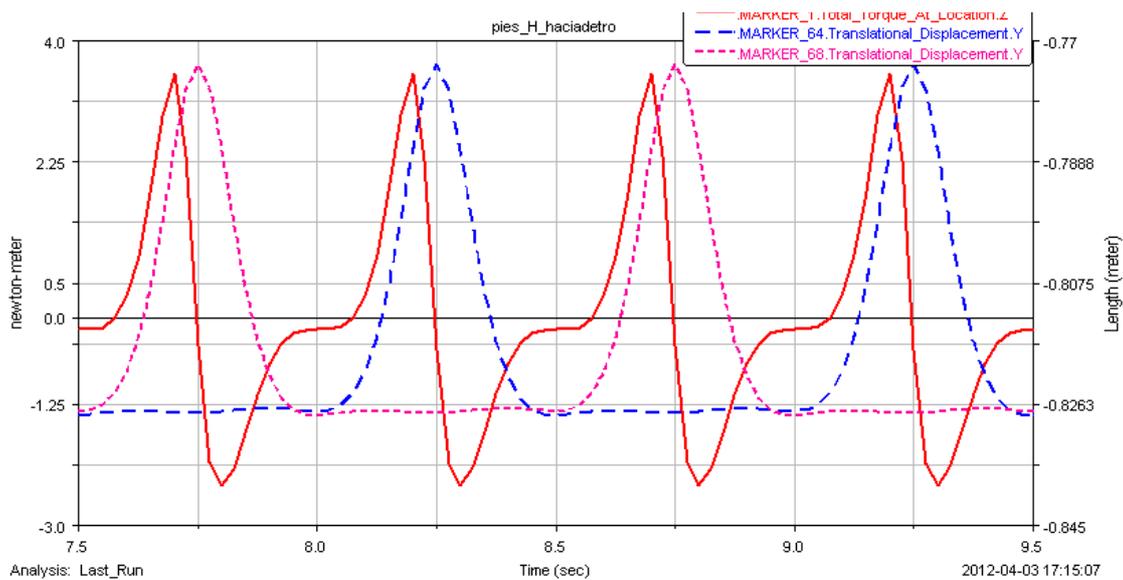
A continuación se mostrará el par necesario para dar movimiento a este modelo, colgado y dejándolo libre.

➤ **Par en el modelo colgado**

Se observa que los instantes en los que el Pasibot andaría por sí mismo (zonas de momento negativo) son más suaves, es decir, hay una variación menor entre momentos negativos. También se puede ver que el robot llega a un punto en el que está cerca de demandar energía al motor, esto se verá en las siguientes gráficas en las cuáles se muestra el par junto con el desplazamiento vertical del pie. Esta mayor demanda de par es debida a que al ser ésta una simulación a mayor velocidad que la anterior, la recuperación ha de ser desde un punto de momento más bajo que en el caso anterior, provocando que al robot le sea más complicado continuar su marcha por su propia inercia.



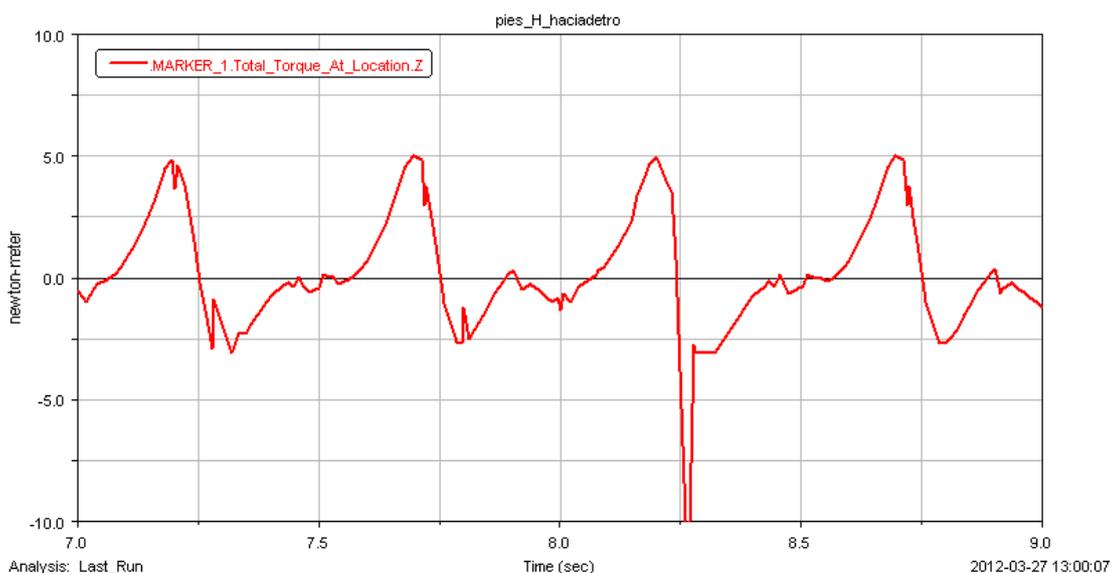
Gráfica 33: Par –Posición vs Tiempo a 360º/s modelo colgado



Gráfica 34: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 360º/s modelo colgado

Se vuelve a observar que el máximo de demanda de par se produce antes que el punto más alto en el paso del pie. Desde el punto de vista de la eficiencia energética, esta velocidad cumple con los objetivos de los robots pasivos, ya que en el momento de elevación de la pierna se produce una demanda de par, pero esta demanda no supera la línea neutra lo que supondría una entrega de energía extra por parte del motor. Al mantenerse en el rango de par negativo el robot es capaz de moverse por su propia inercia, una vez superado el punto crítico inicial, hasta que se estabiliza el paso.

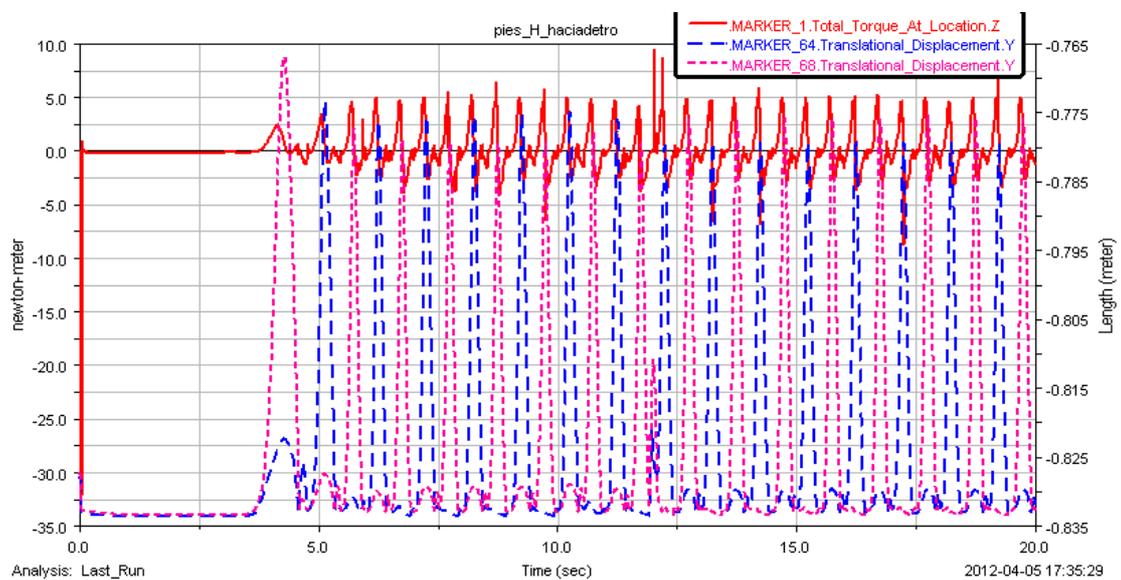
➤ **Par en el modelo libre**



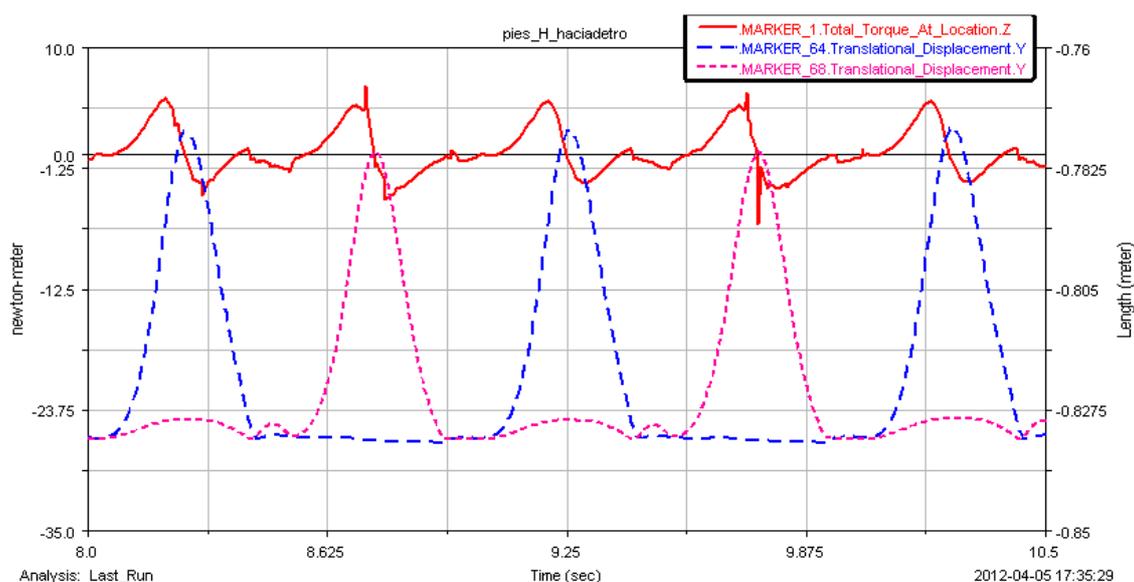
Gráfica 35: Detalle del Par demandante por la manivela

Se puede ver que las gráficas de par del modelo libre siguen una trayectoria similar a las del modelo colgado hasta que uno de los pies entra en contacto con el suelo, como se verá en las siguientes gráficas. Además se vuelven a producir picos de demanda en el par, como a otras velocidades, en los contactos con el suelo. Otra apreciación que se puede destacar es que el par demandante por parte del modelo al motor es mayor en el modelo libre que si se deja colgado, lógicamente es normal ya que al tener contacto con el suelo, el par es necesario para dar movimiento al robot y, además, para superar fuerzas de fricción o rozamiento entre otras, que en el anterior modelo no existían.

En las siguientes gráficas se ilustran los puntos críticos del movimiento de los pies en los que existen picos de par.



Gráfica 36: Par –Posición vs Tiempo a 360°/s modelo libre

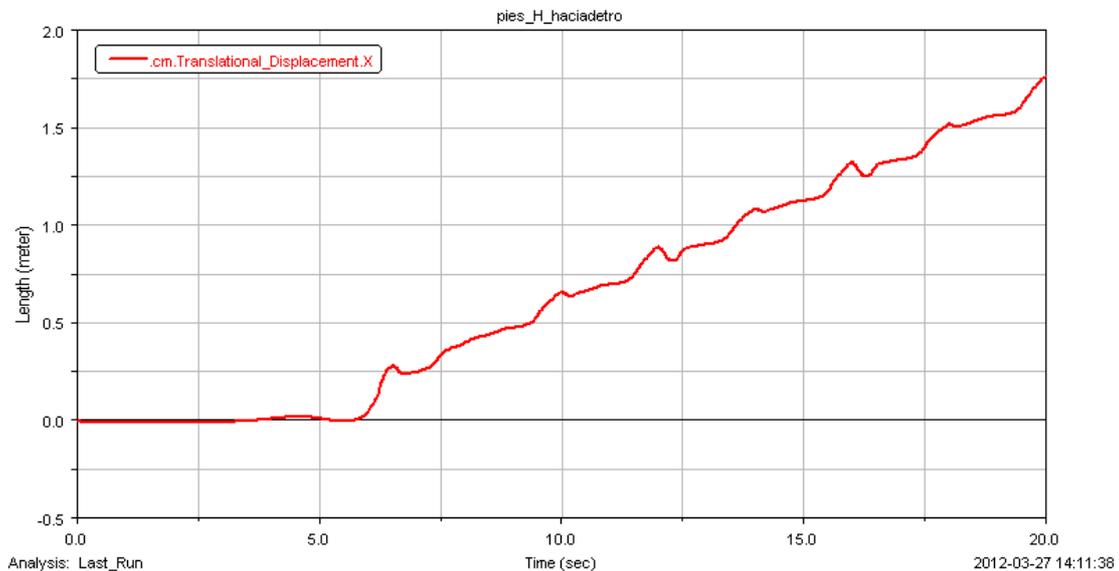


Gráfica 37: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 360°/s modelo libre

La máxima demanda de par se vuelve a producir antes del punto más elevado del paso del pie, al igual que en el modelo colgado. En este caso al entrar en contacto los pies con el suelo, es necesario un aporte de par por parte del motor, ya que no es suficiente la energía aportada por la propia inercia del movimiento. Esto se puede observar en la gráfica, ya que el par toma valores positivos en el momento del contacto del pie con el suelo. Se vuelven a producir picos de par en puntos concretos, debido al contacto con el suelo, en los cuales se producen inestabilidades. Además se observan pequeños picos de par en el momento que los pies alcanzan su punto superior de la zancada.

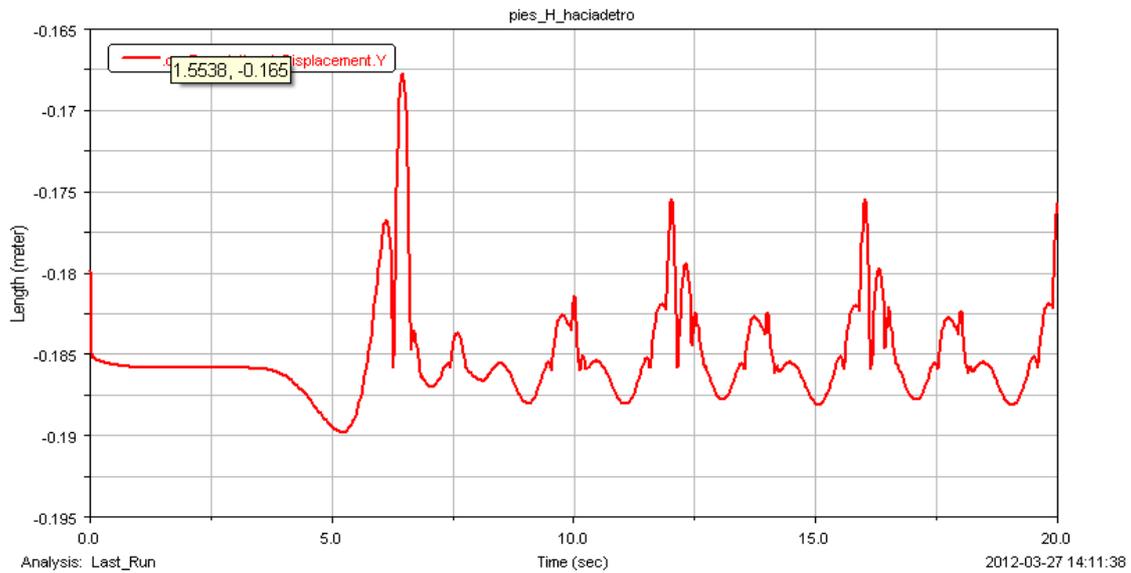
La siguiente velocidad con la que se probó fue a $90^\circ/\text{s}$, para comprobar el comportamiento del robot en esas condiciones.

5.3.1.3. Velocidad de 90°



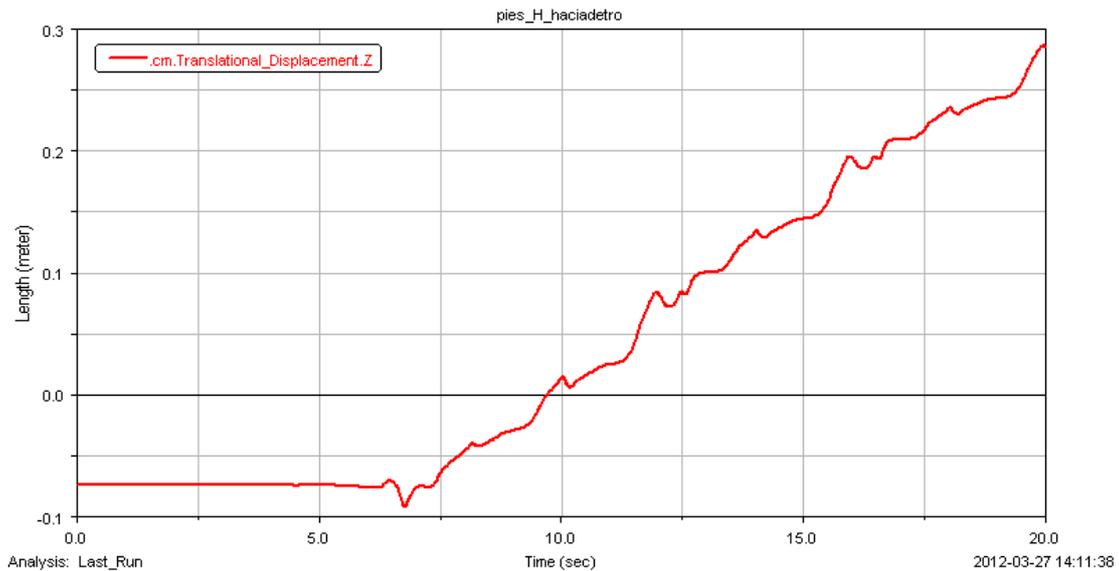
Gráfica 38: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X a $90^\circ/\text{s}$

Se observa en la gráfica que el desplazamiento longitudinal del robot no describe una línea recta. Esto es debido a que a baja velocidad, las fuerzas de rozamiento influyen más en el movimiento.



Gráfica 39: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y a 90°/s

El desplazamiento en el eje vertical debería ser uniforme, ya que no se ha puesto ningún obstáculo en el camino que modifique la trayectoria del robot. Se puede ver que no sigue un dibujo uniforme. Esto es debido a la baja velocidad de alimentación del motor, genera oscilaciones en los pies al caminar y hace pivotar al modelo. Estas oscilaciones no son uniformes lo que se traduce en un dibujo irregular de la trayectoria vertical.

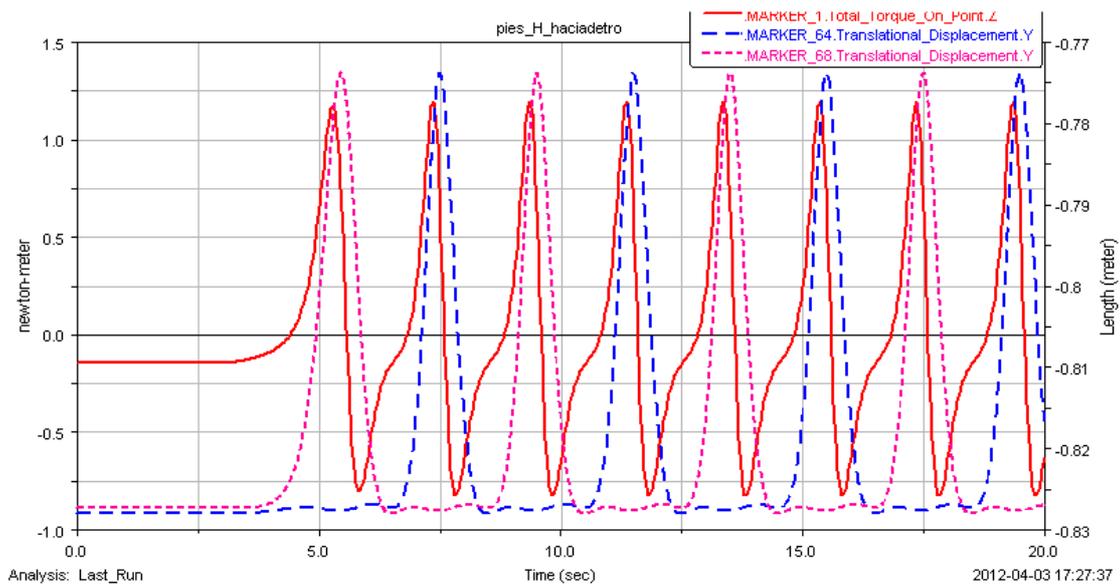


Gráfica 40: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z a 90°/s

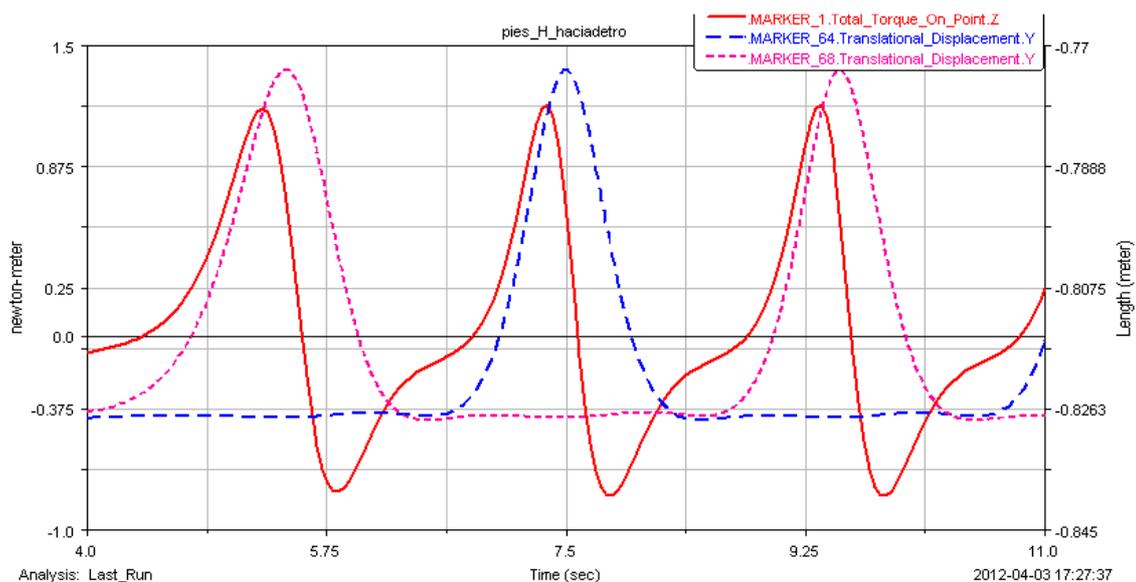
La desviación transversal que se produce al caminar a esta velocidad es considerablemente menor que a 360º/s, pero curiosamente mayor que a 180º/s, lo que significa que la velocidad que describe una trayectoria más recta es la de 180º/s.

A la velocidad de 90º/s hay que tener en cuenta una pequeña desviación lateral. Hasta el momento, la velocidad que genera una trayectoria más uniforme es a 180º/s. A continuación se mostrará el par necesario para dar movimiento a este modelo, colgado y dejándolo libre.

➤ **Par en el modelo colgado**



Gráfica 41: Par –Posición vs Tiempo a 90º/s modelo colgado

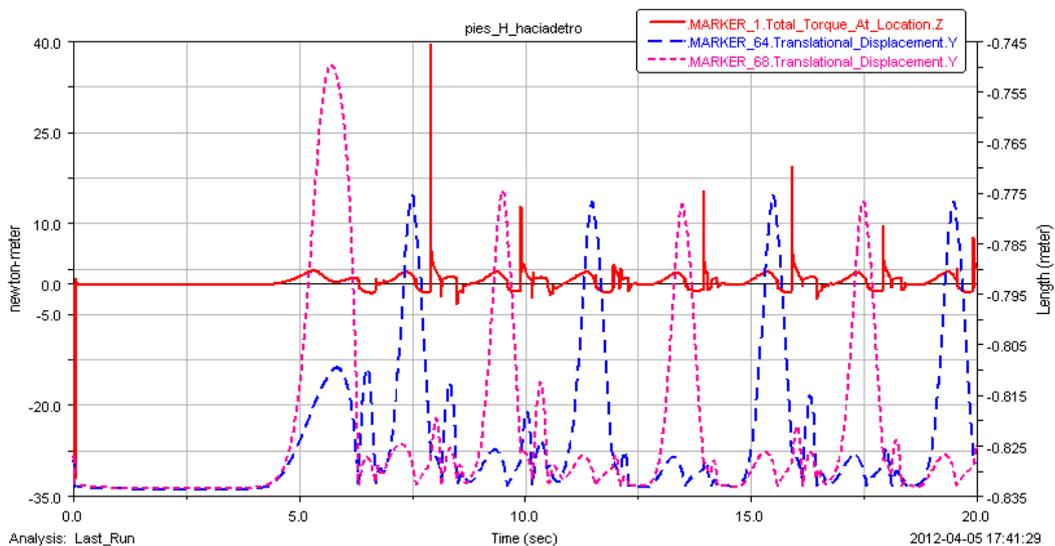


Gráfica 42: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 90º/s modelo colgado

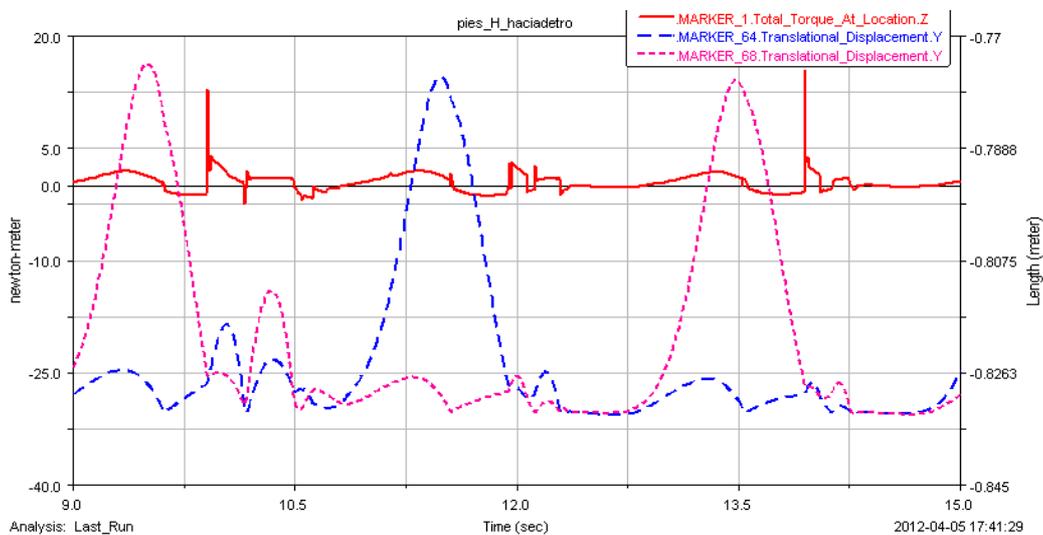
En las gráficas anteriores, se ve claramente cómo el par máximo se vuelve a demandar un instante antes de la posición más elevada del pie, al caminar. Pero esta vez es más cerca del punto más elevado. El periodo en el que están los pies en su posición más baja, el modelo demanda un par negativo, lo que significa que se alimenta por su propia inercia. Esta velocidad es la que más clara refleja esta característica de los robots pasivos. Al ser esta la menor velocidad utilizada hasta el momento, el par demandante por la manivela para poner en marcha el robot, también es el más bajo.

➤ **Par en el modelo libre**

Al igual que para las velocidades probadas anteriormente, se aprecia una parte de la zancada en la que la curva se asemeja a la obtenida para el modelo colgado, siendo el par demandante en este caso superior. Pero en cuanto entra el pie en contacto con el suelo se producen irregularidades y picos en el par, como se ha comentado para otros ensayos.



Gráfica 43: Par –Posición vs Tiempo a 90º/s modelo libre

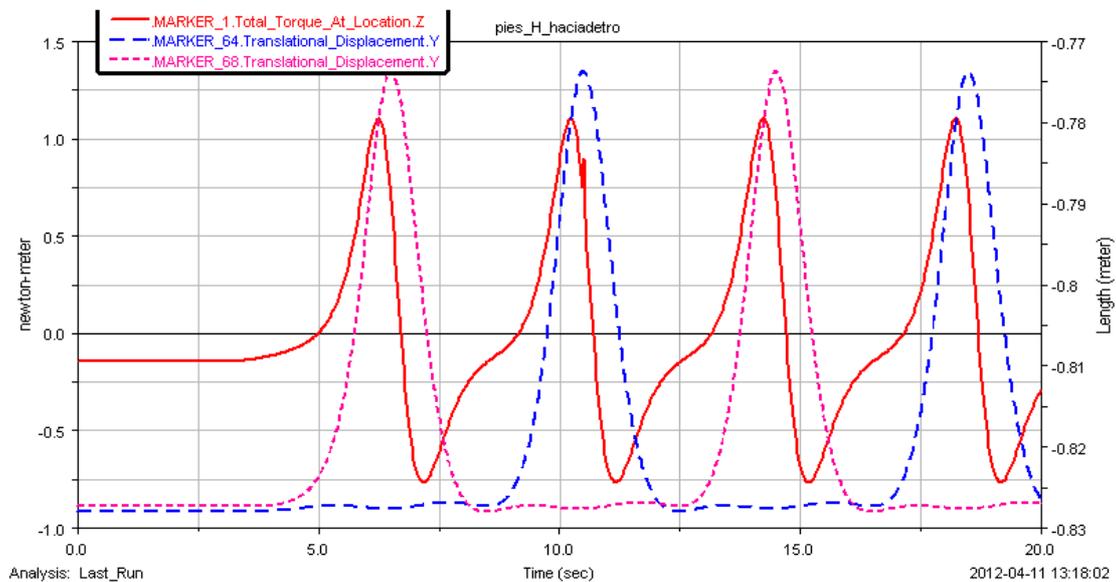


Gráfica 44: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 90º/s modelo libre

Este modelo sufre más inestabilidades al caminar. Esto es debido a que se le ha suministrado una velocidad menor y le cuesta más superar el rozamiento con el suelo. Los picos de par se vuelven a producir en el instante que los pies entran en contacto con el suelo. La curva de par en los instantes que el pie está en el aire es similar a la del modelo colgado, demandando más par, lógicamente. El par demandante en este caso es menor que a mayores velocidades, por ello la curva es más suave. En los instantes que los pies están en contacto con el suelo, se alimenta de su propia inercia, ya que en ningún instante el par supera los valores negativos. La alimentación a 360º/s si entraba en valores positivos, por lo que ese modelo necesitaba aporte de energía del motor en esos instantes.

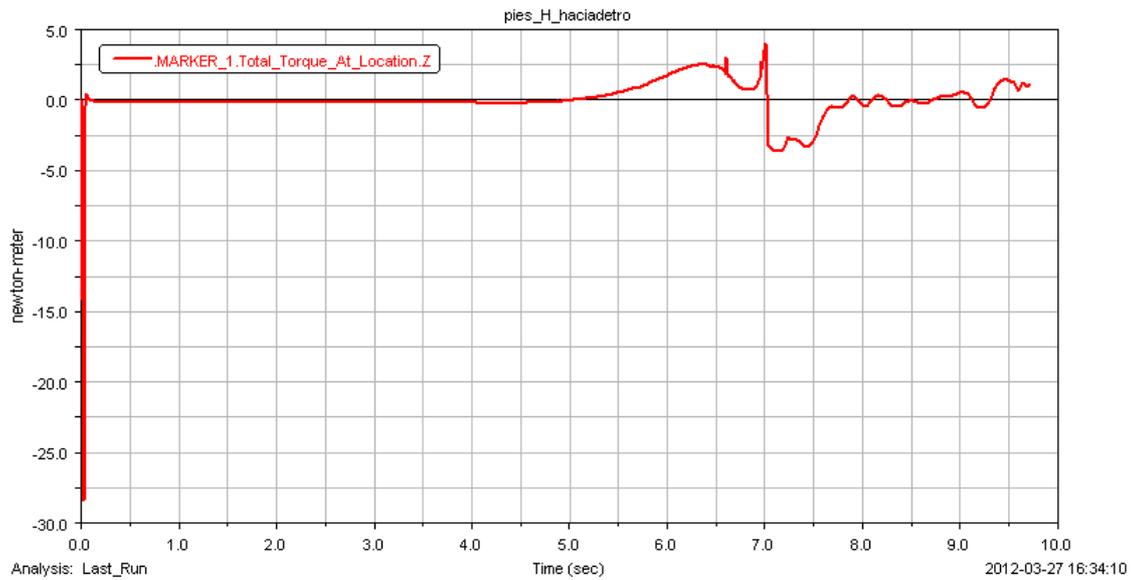
5.3.1.4. Velocidad de 45º

Para esta velocidad la gráfica del par demandante en el modelo colgado sigue un dibujo similar al de las otras velocidades. El par resultante es el menor de todos, por ser la velocidad más baja. En la zona de par negativo, los pies están en el suelo y su movimiento es generado por la propia inercia, como ya se ha explicado anteriormente.



Gráfica 45: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo a 45º/s modelo colgado

En la anterior gráfica se detalla lo comentado. El máximo par demandante se produce instantes antes del punto superior de la zancada del pie, muy próximo al obtenido a la velocidad de 90º/s. Las zonas de par negativo alimentan el movimiento por su propia inercia y coincide en los instantes que los pies están en sus puntos inferiores del paso.



Gráfica 46: Par demandante por la manivela a 45°/s en el modelo libre

La última velocidad con la que se alimentó el modelo fue de 45°/s. Se procedió a simular 20 segundos a 800 pasos, pero en esta ocasión, al ser la velocidad tan baja, el robot dio un paso y perdió el equilibrio. Se desestabilizó por la parte trasera, perdiendo la verticalidad en esa dirección. Por tanto ha sido imposible realizar un estudio con esta velocidad. En la gráfica anterior se muestra el par demandante durante el periodo que mantiene el equilibrio.

Una vez realizado el estudio del par y desplazamiento del robot a diferentes velocidades, se procedió a añadir masa adicional, para intentar conseguir una mejor estabilidad del modelo, con el objetivo de lograr que camine de forma recta y estable. Se probó añadiendo masas de 1, 1.5, 2 y 3 kg en diferentes localizaciones de la cadera, en lugares que, a priori, se pensó que serían más críticos, por la forma de comportarse del robot al caminar.

5.3.1.5. Adición de masas en el modelo con el estabilizador modificado

La primera masa que se añadió fue de 1 kg. Se colocó en la posición que muestran las figuras. Se decidió esta posición, observando la forma de caminar del robot. El estudio de las diferentes velocidades condujo a la conclusión de que el modelo tiende a desprender los pies del suelo al caminar, por tanto es conveniente añadirle una masa en la zona delantera de la cadera. Estudios futuros demostrarán cual es la mejor localización atendiendo a aspectos de par y desplazamiento. La velocidad que se transmitió a la manivela para el movimiento ha sido de $180^\circ/\text{s}$ ya que sin añadir masa es la que genera un movimiento más rectilíneo en el robot.

- **Localización A**

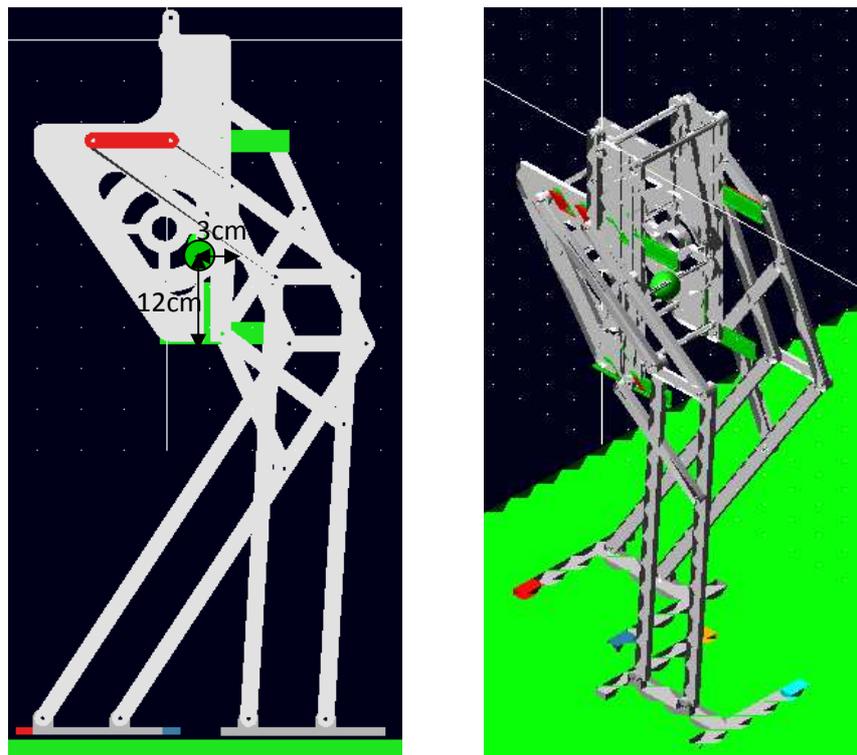
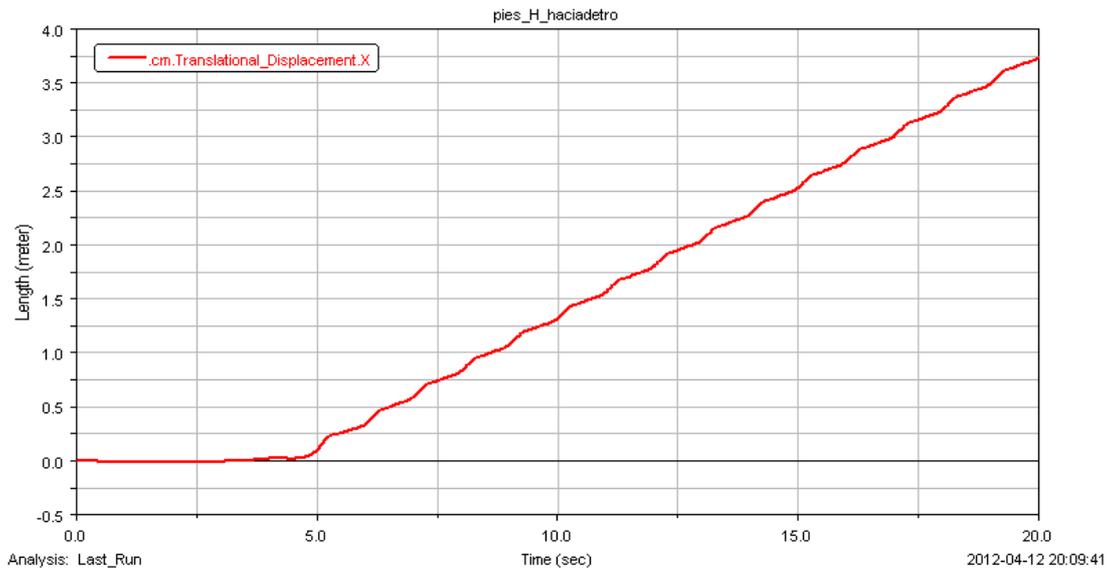


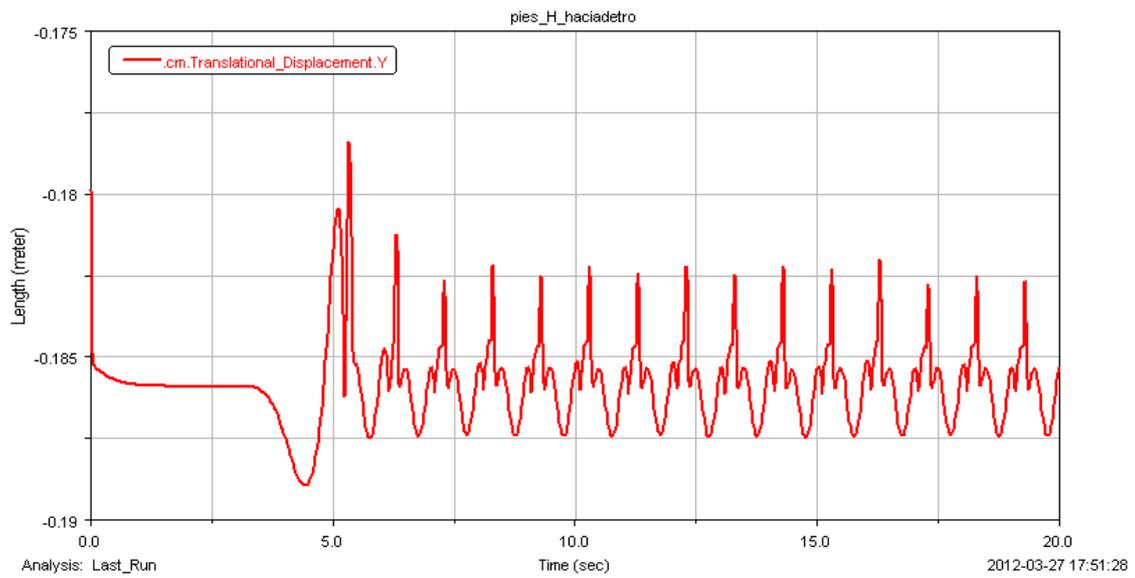
Figura 90 Mimbot con adición de una masa

- ❖ **Masa de 1 kg**

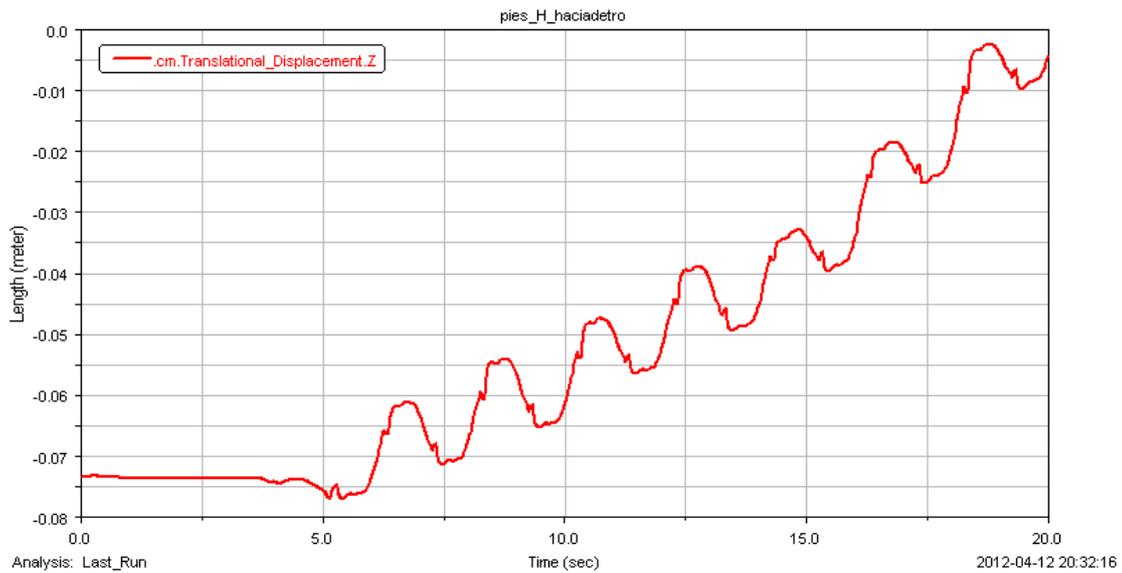
Lo primero que se comprobó fue la trayectoria que describe al caminar el modelo. Si se compara en las mismas condiciones con el respectivo robot sin la masa, se puede ver que en los ejes X e Y no se aprecia ninguna variación, pero en el eje Z sufre una desviación significativamente menor que si se deja sin añadir masa. Pasa de desviarse 10 cm en el tiempo simulado, a una desviación de 7 cm, por tanto se reducen 3 cm en 20 segundos, lo que es destacable en un espacio de tiempo tan pequeño. Por tanto, la adición de 1kg en esa localización tiene consecuencias positivas en la trayectoria del robot. En las siguientes gráficas se puede comprobar lo comentado.



Gráfica 47: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



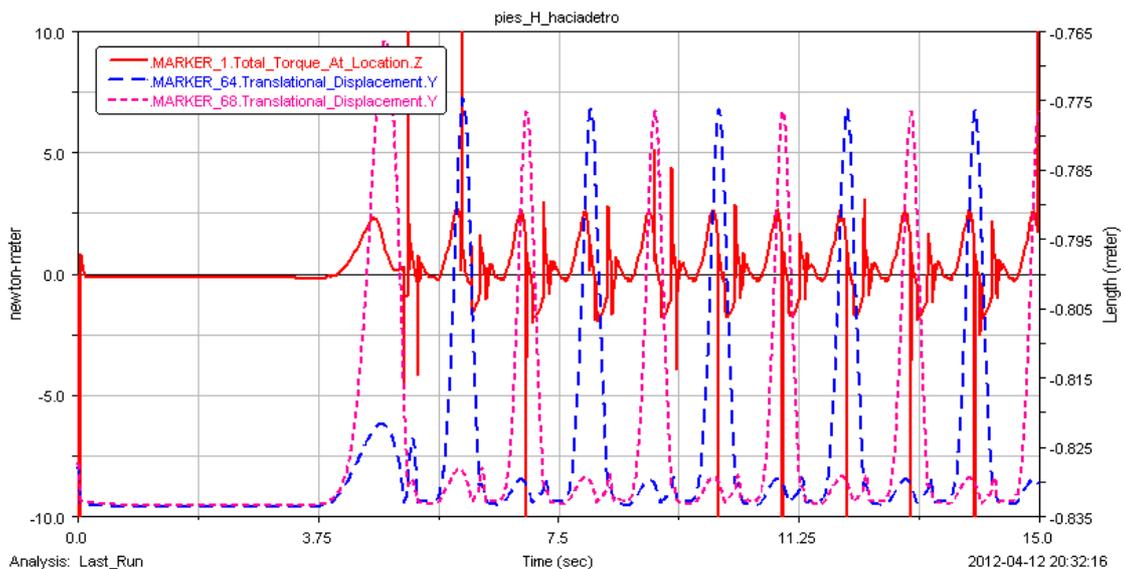
Gráfica 48: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y



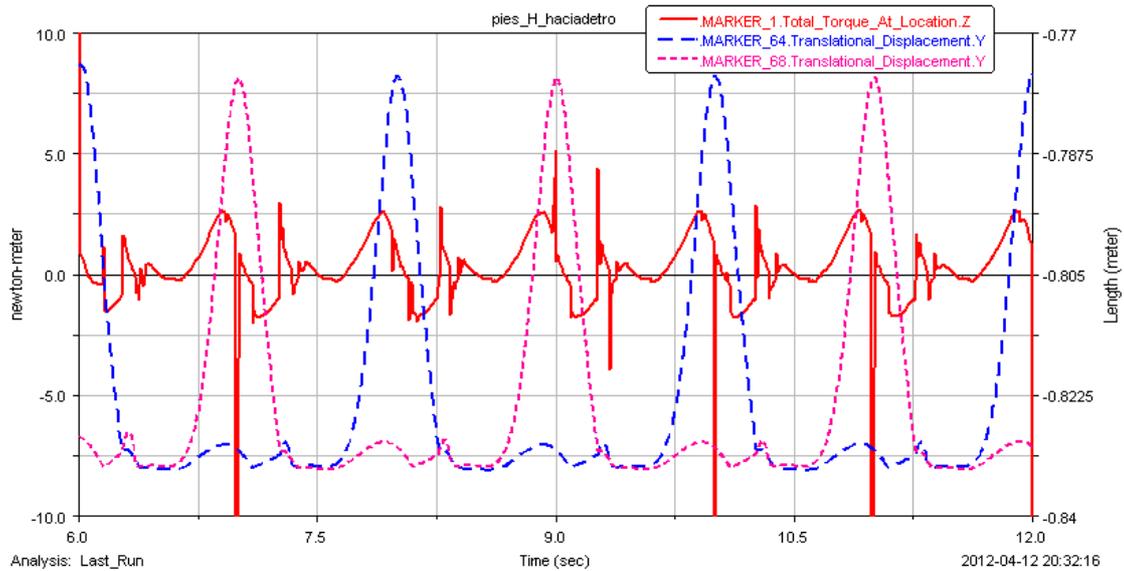
Gráfica 49: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

Se ha demostrado que para la trayectoria es beneficioso añadir una masa de 1kg en esa localización. A continuación se va a comprobar cómo se comporta el par ejercido por la manivela en este caso. El par demandado por la manivela en el modelo colgado no se ha ilustrado ya que es similar al calculado para el modelo a $180^\circ/\text{s}$ sin masa.

➤ Par en el modelo libre



Gráfica 50: Par –Posición vs Tiempo

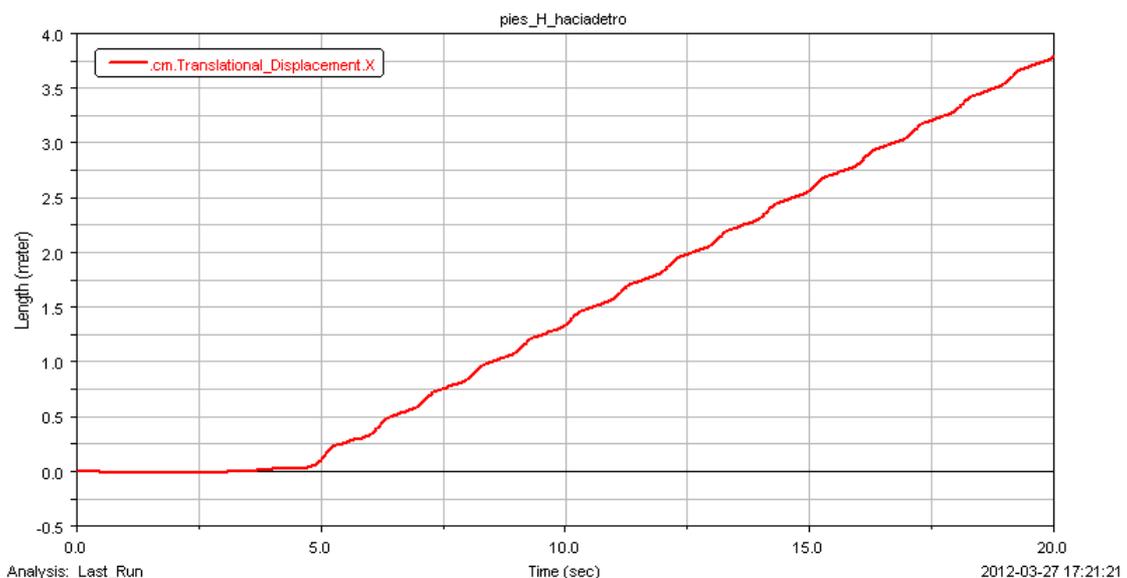


Gráfica 51: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

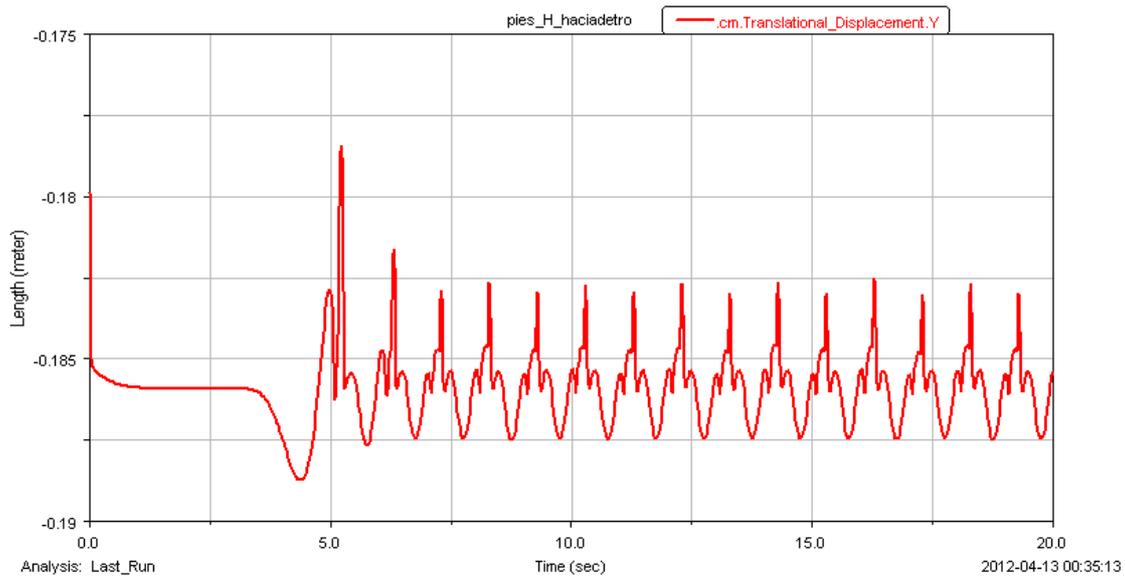
Si se comparan las gráficas anteriores con sus equivalentes sin la masa, se puede observar que el par necesario es similar en ambos casos. El máximo par se necesita instantes antes del punto superior del paso, igual que en el caso anterior, y los picos de par se producen en el momento de contacto de los pies con el suelo. Existe una diferencia, se producen en este modelo picos de par, también, en el momento que uno de los pies llega a su punto superior de la zancada. Esto ocurría en el modelo libre de masa, pero a 360º/s.

La siguiente masa que se añadió fue de 1.5 kg, en la misma localización. A continuación se detallan las conclusiones obtenidas.

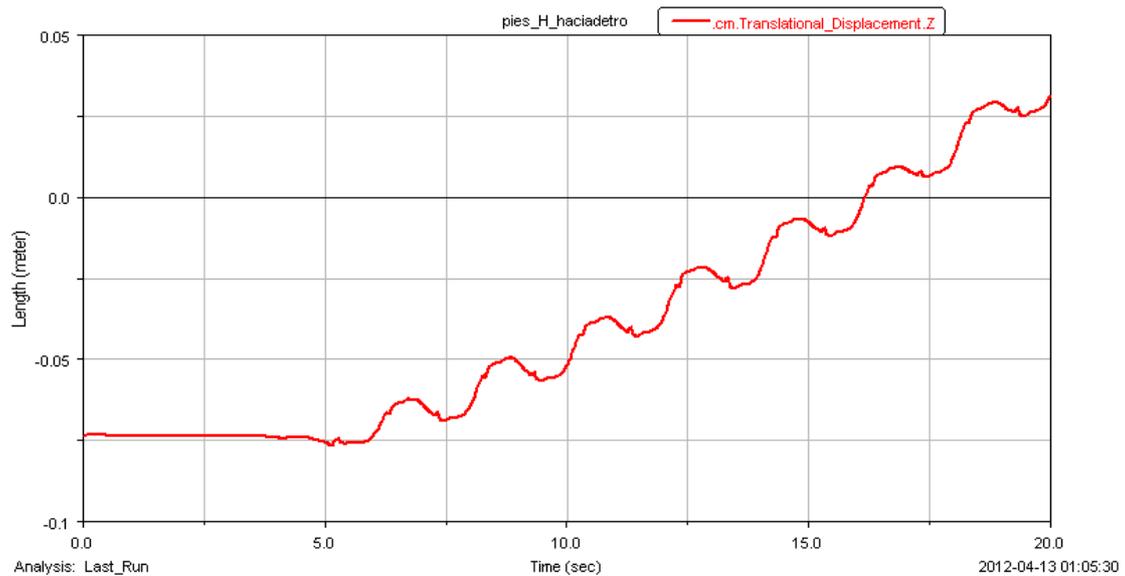
❖ Masa de 1,5 kg



Gráfica 52: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



Gráfica 53: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

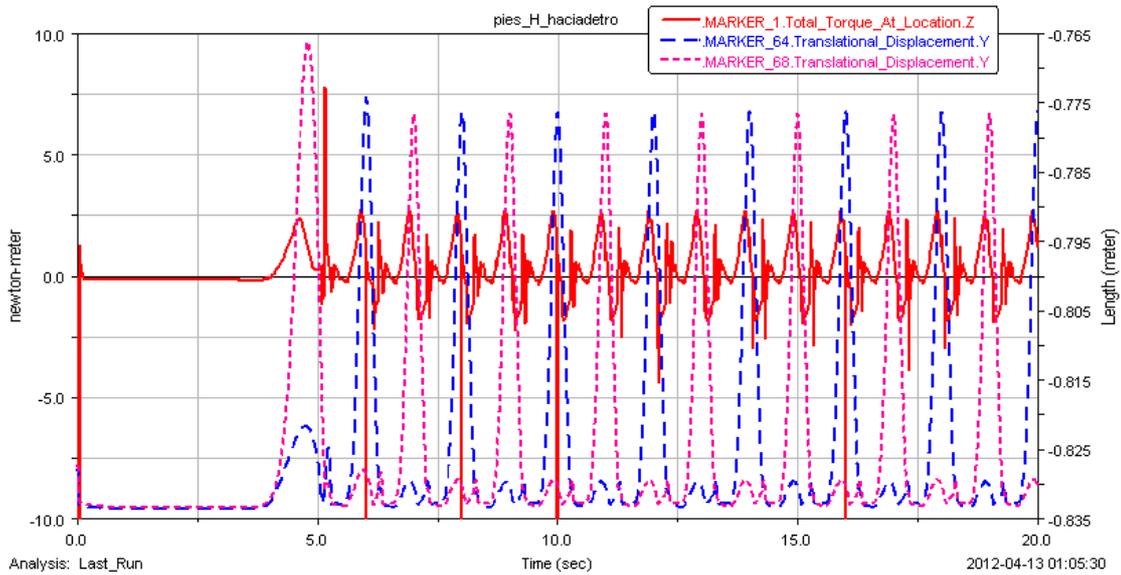


Gráfica 54: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

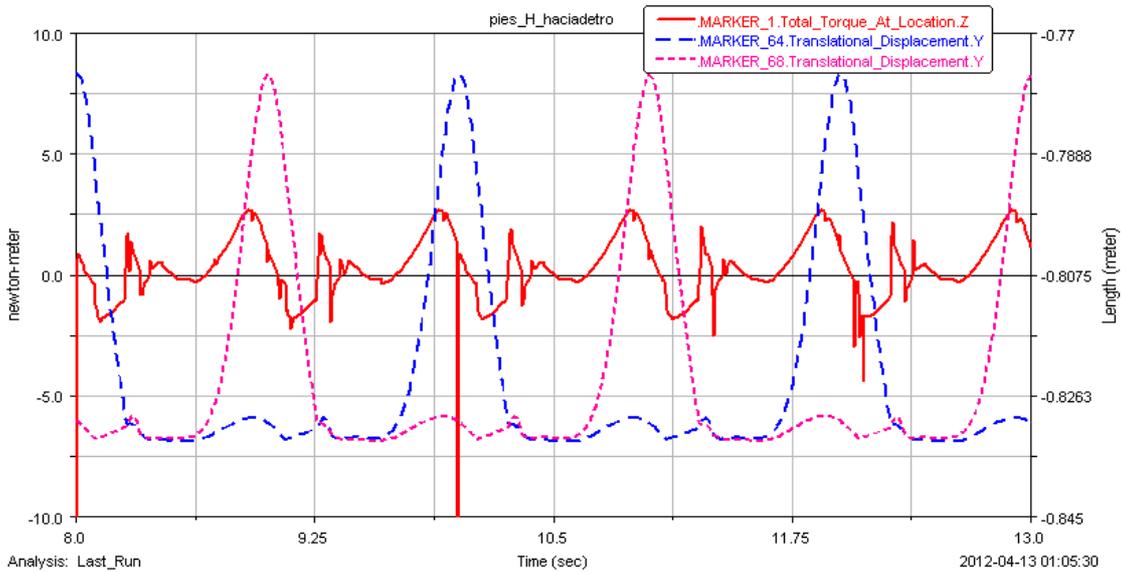
Observando las gráficas anteriores se puede decir que añadiendo una masa de 1.5 kg, en esa localización de la cadera es positivo para el desplazamiento vertical, ya que las oscilaciones en dicho eje son más cortas. Eso significa que, al caminar, el paso es más estable, oscila en menor medida. Sin embargo, la desviación transversal no sufre alteración, cosa que si ocurría con la masa de 1 kg.

El par obtenido para el modelo colgado es exactamente igual que en casos anteriores en los que se ha alimentado con una velocidad de 180°/s, por lo que se ha suprimido la gráfica, ya que está representada con anterioridad.

➤ Par en el modelo libre



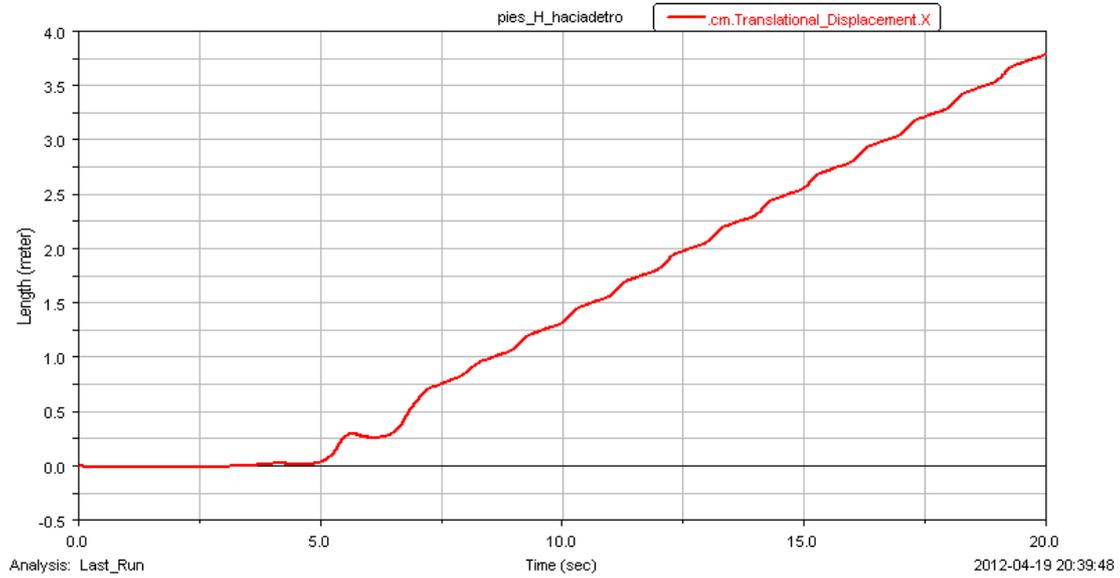
Gráfica 55: Par –Posición vs Tiempo



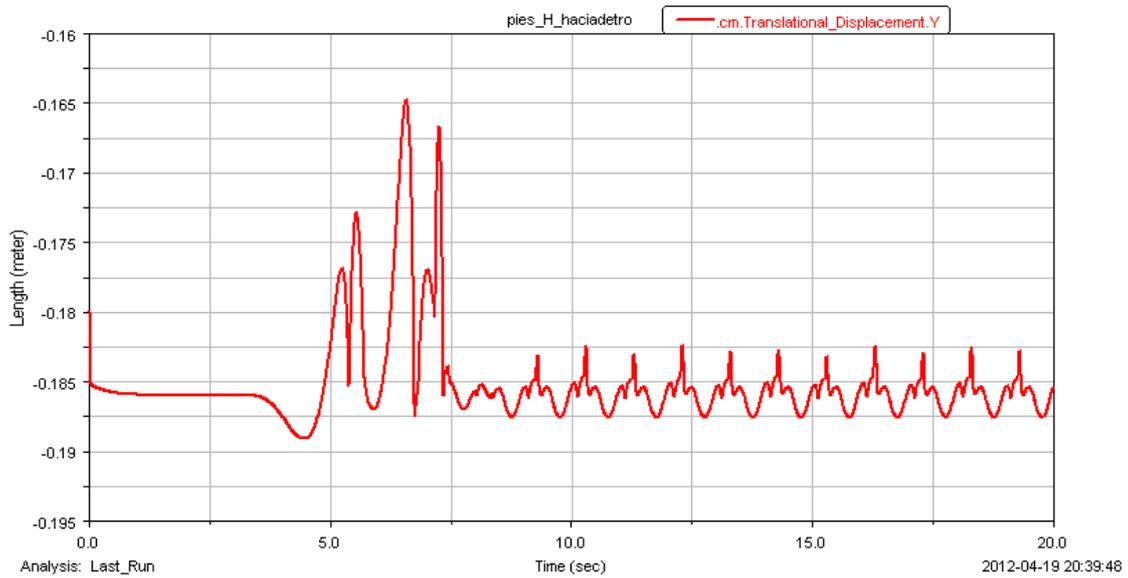
Gráfica 56: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

Las gráficas de par obtenidas son similares a las equivalentes para 1 kg de masa añadida. El máximo par se necesita instantes antes del punto superior del paso, igual que en el caso anterior, y los picos de par se producen en el momento de contacto de los pies con el suelo. Existe una diferencia, se producen en este modelo picos de par, también, en el momento que uno de los pies llega a su punto superior de la zancada. En este caso, las zonas en las que están los pies en contacto con el suelo, se aprecia que la inercia no es suficiente para mantener el movimiento, es necesario un aporte de par por parte del motor.

❖ Masa de 2 Kg

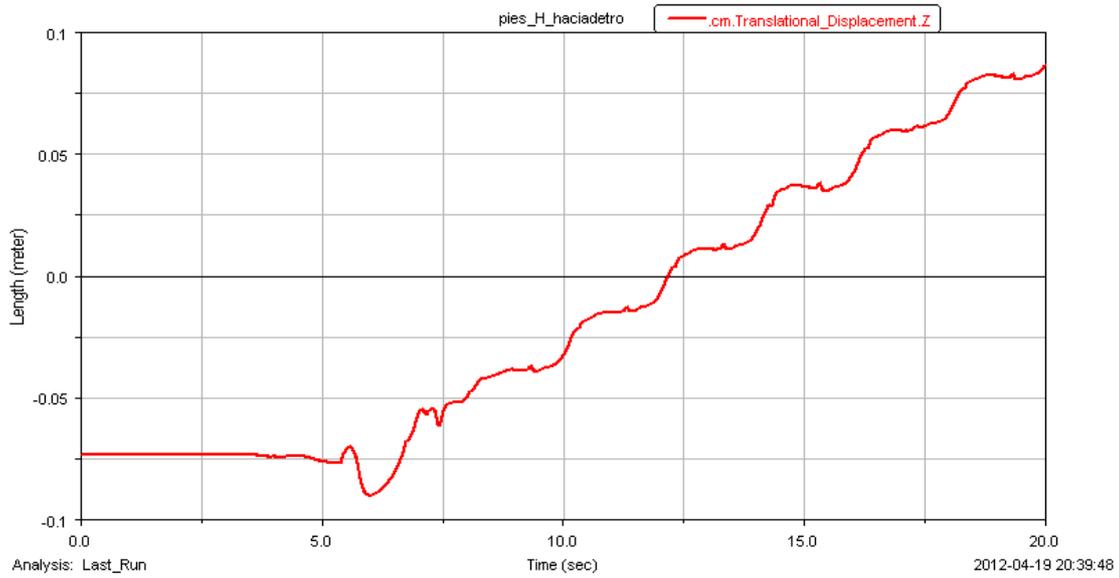


Gráfica 57: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



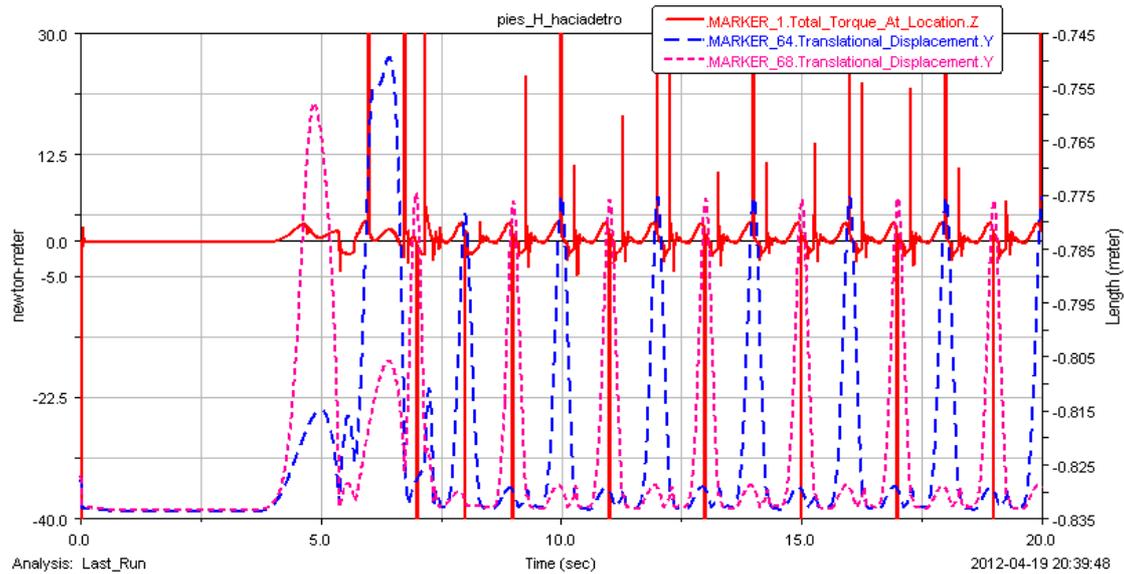
Gráfica 58: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

La masa de 2 kg no aporta ninguna novedad para los desplazamientos longitudinal y vertical. La trayectoria transversal es ligeramente superior a la obtenida con 1,5 kg.

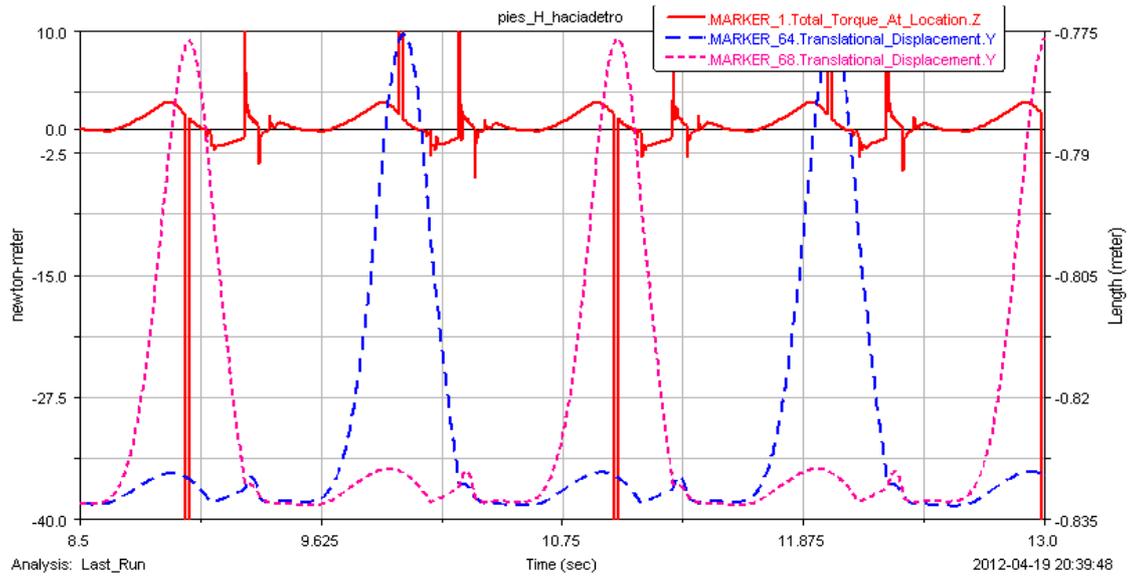


Gráfica 59: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

➤ Par en el modelo libre



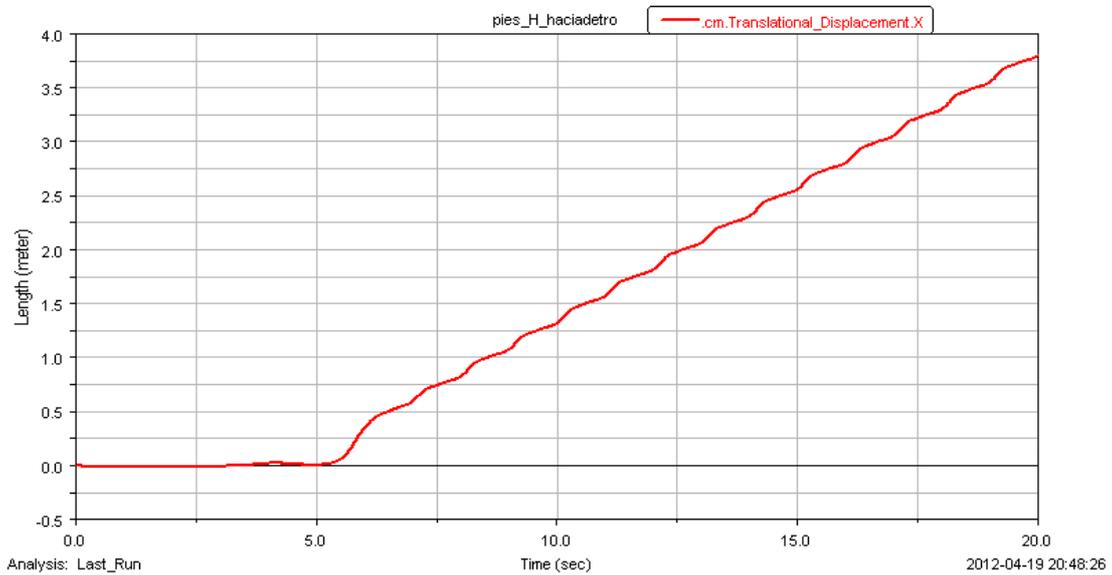
Gráfica 60: Par –Posición vs Tiempo



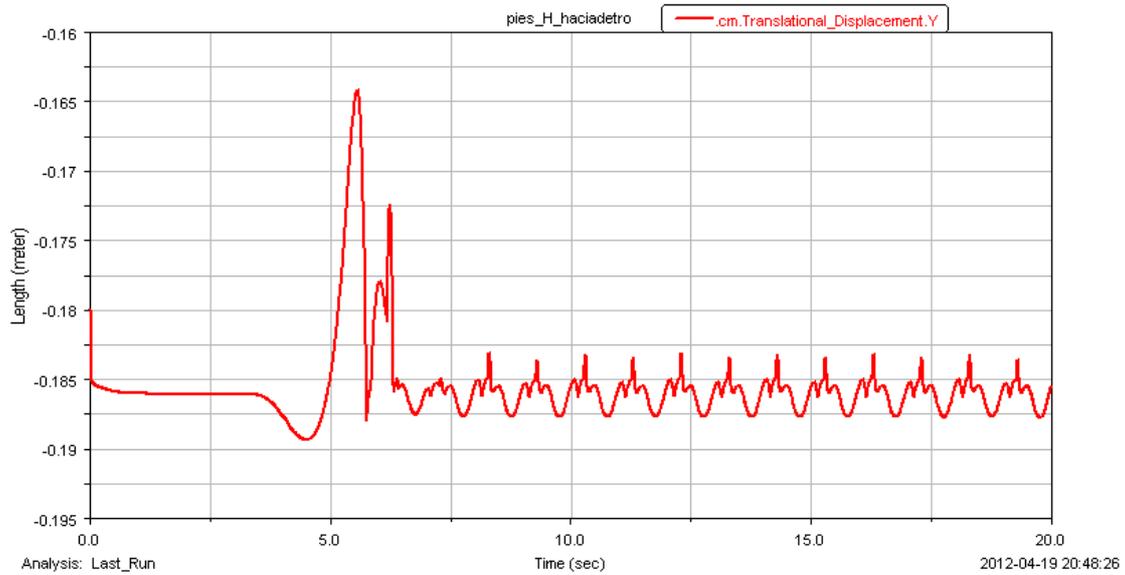
Gráfica 61: Detalle de la gráfica Par-Posición vs Tiempo

El par demandado es ligeramente superior, pero sigue la línea de los anteriores.

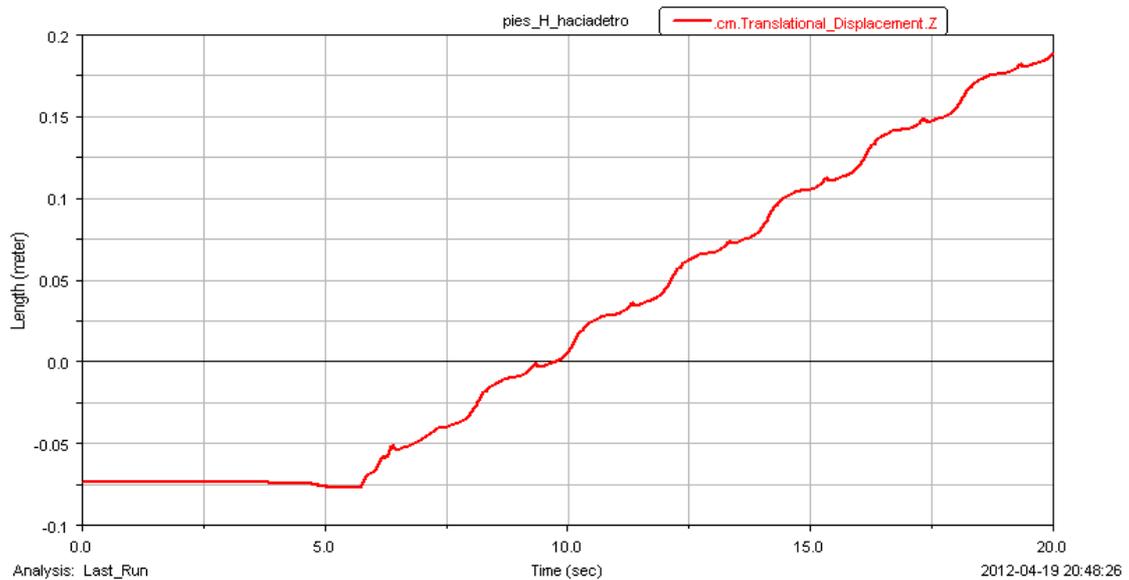
❖ Masa de 4 kg



Gráfica 62: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X

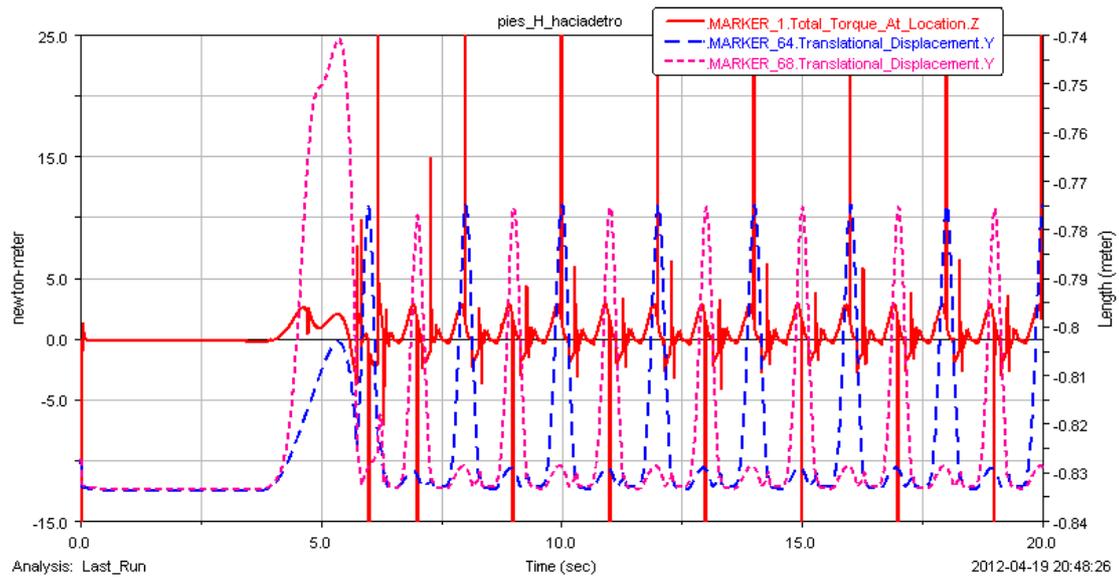


Gráfica 63: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

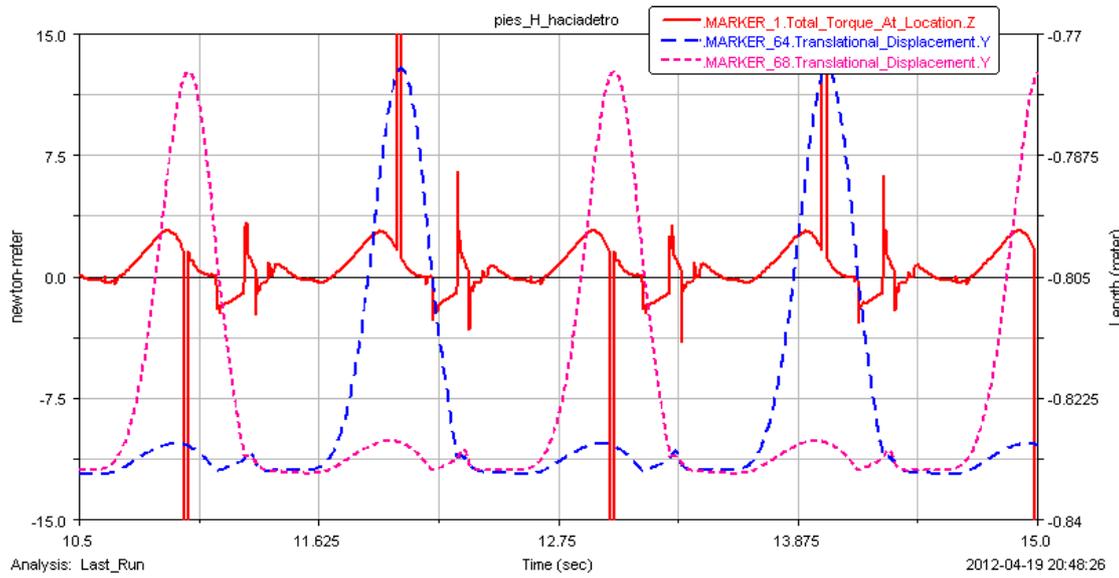


Gráfica 64: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

El desplazamiento vertical se ve reducido mínimamente, mientras que la desviación transversal vuelve a crecer.



Gráfica 65: Par –Posición vs Tiempo



Gráfica 66: Detalle de la gráfica Par-Posición vs Tiempo

El par demandado crece en la línea de los anteriores.

Una vez realizado el estudio anterior, se procedió a realizar uno similar, añadiendo las mismas masas en otra localización. Con las conclusiones obtenidas se probó a colocar la masa en una localización inferior de la cadera. En las siguientes imágenes se ilustra dónde se ubicó, en la esquina inferior derecha de la cadera.

- **Localización B**

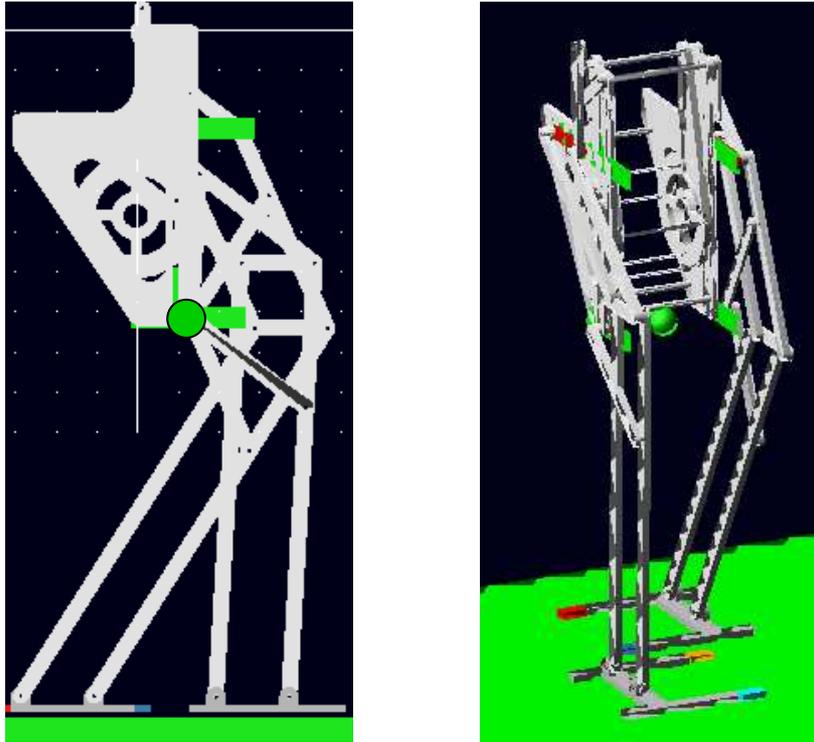
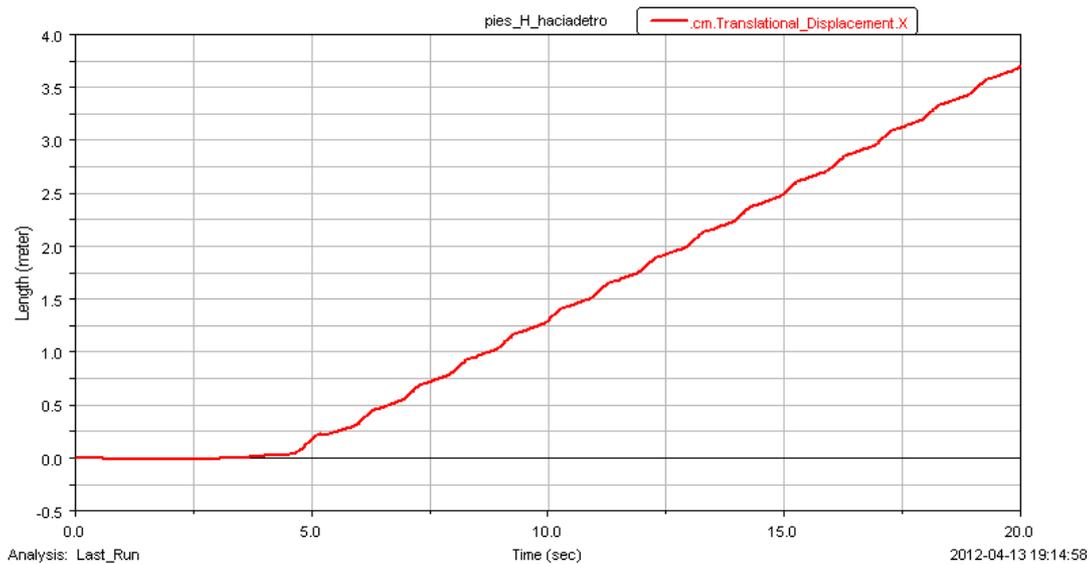
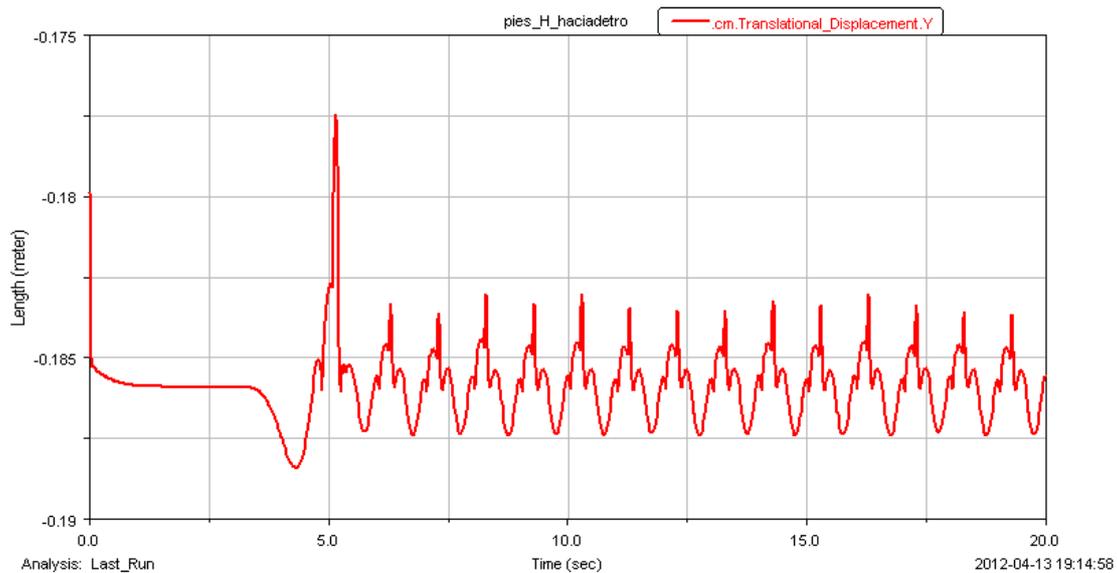


Figura 91 Mimbot con adición de una masa

- ❖ **Masa de 1 kg**

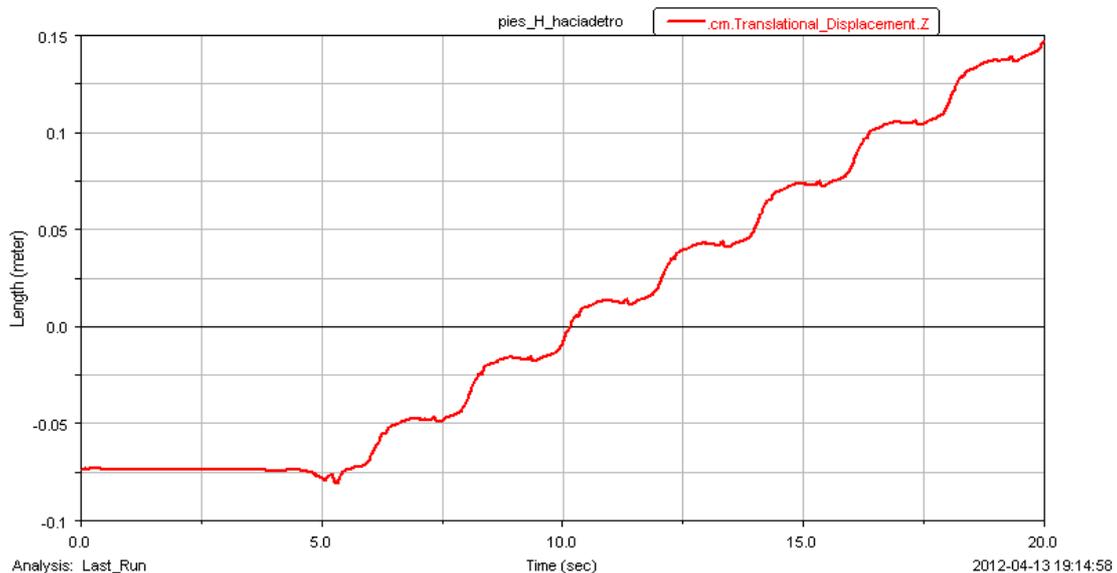


Gráfica 67: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



Gráfica 68: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

Viendo las gráficas se llega a la conclusión que este modelo avanza pocos centímetros menos que los anteriores en dirección X, es casi inapreciable. En cambio, el desplazamiento vertical, producido por las oscilaciones al caminar, se reduce considerablemente, comparado con modelos anteriores. Esto da más estabilidad al modelo a la hora de avanzar.

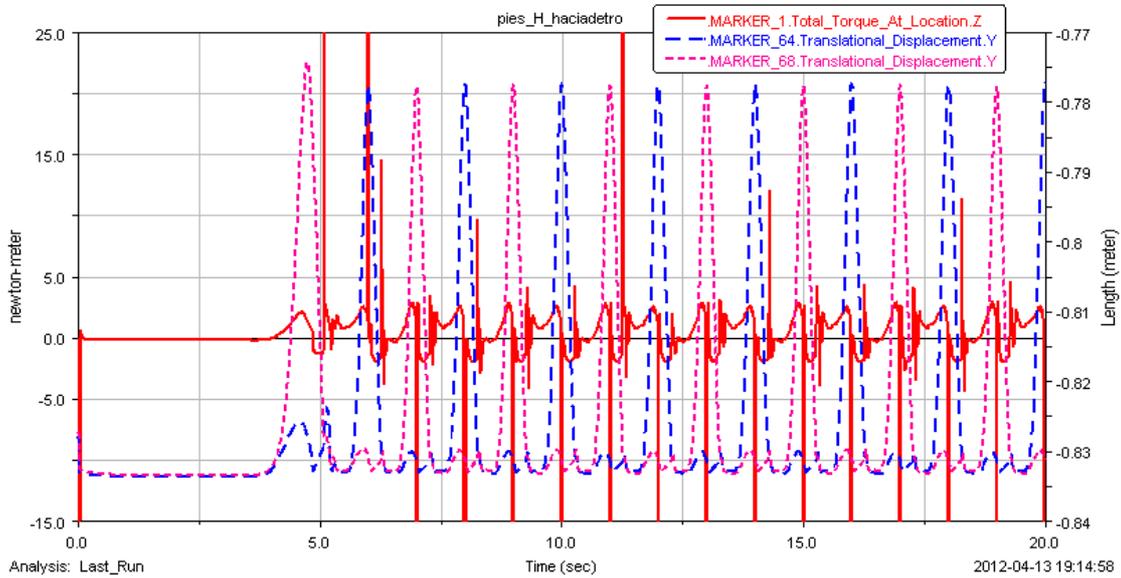


Gráfica 69: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

Este modelo no aporta resultados satisfactorios en la desviación transversal, ya que el desplazamiento que sufre es mayor de 10 cm, distancia que se desviaba sin añadir ninguna masa.

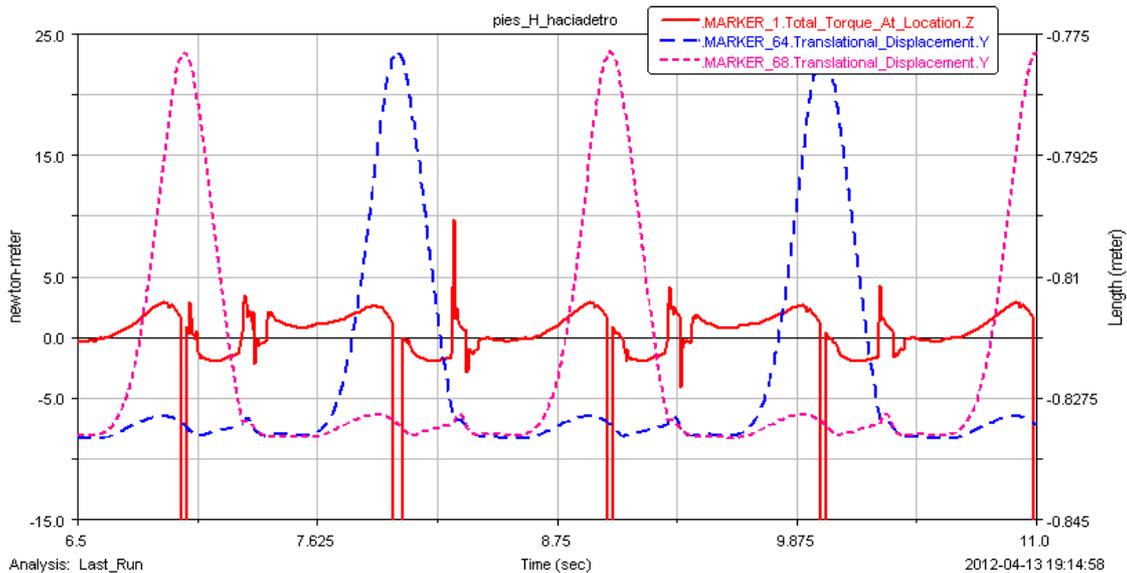
La gráfica de par del modelo colgado no se ha añadido porque es similar al de todos los modelos que se alimentan a velocidad de 180º/s.

➤ Par en el modelo libre



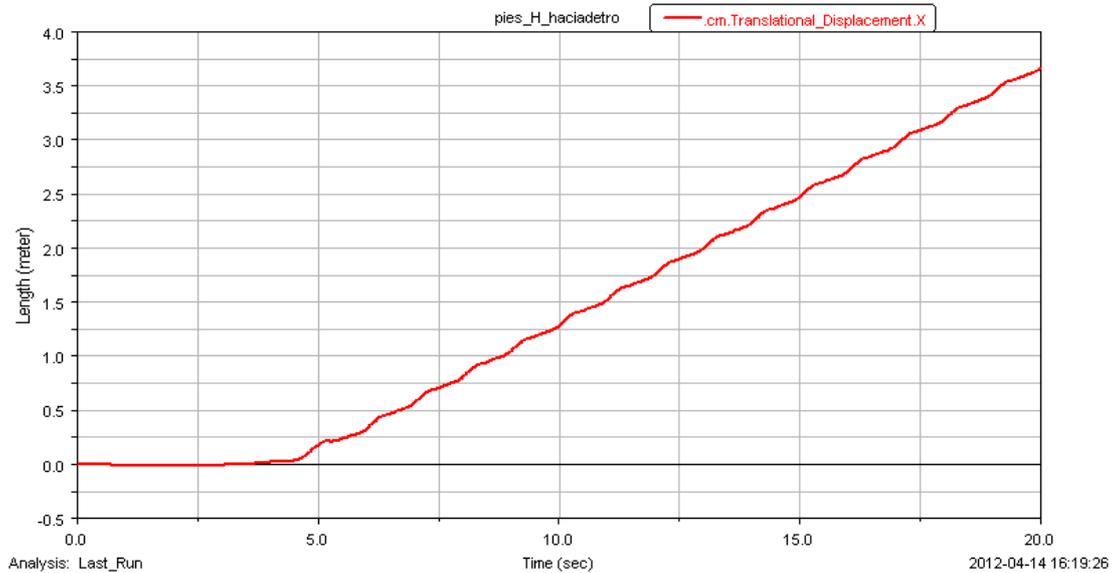
Gráfica 70: Par –Posición vs Tiempo

En las gráficas de par se puede observar que los máximos y mínimos obtenidos son similares a los casos anteriores. La máxima demanda de par se produce instantes antes del punto más alto de la zancada y durante el tiempo de contacto de los pies con el suelo no es capaz de caminar por su propia inercia, ya que produce un par positivo. Se producen picos de par en el momento de máxima altura de la zancada y cuando los pies entran en contacto con el suelo. Es de destacar que el pico producido en los instantes de contacto de los pies con el suelo toma valores similares al máximo par demandante, antes del punto más alto del pie. Este pico de par en modelos anteriores era muy inferior. En la gráfica siguiente se puede comprobar lo descrito.

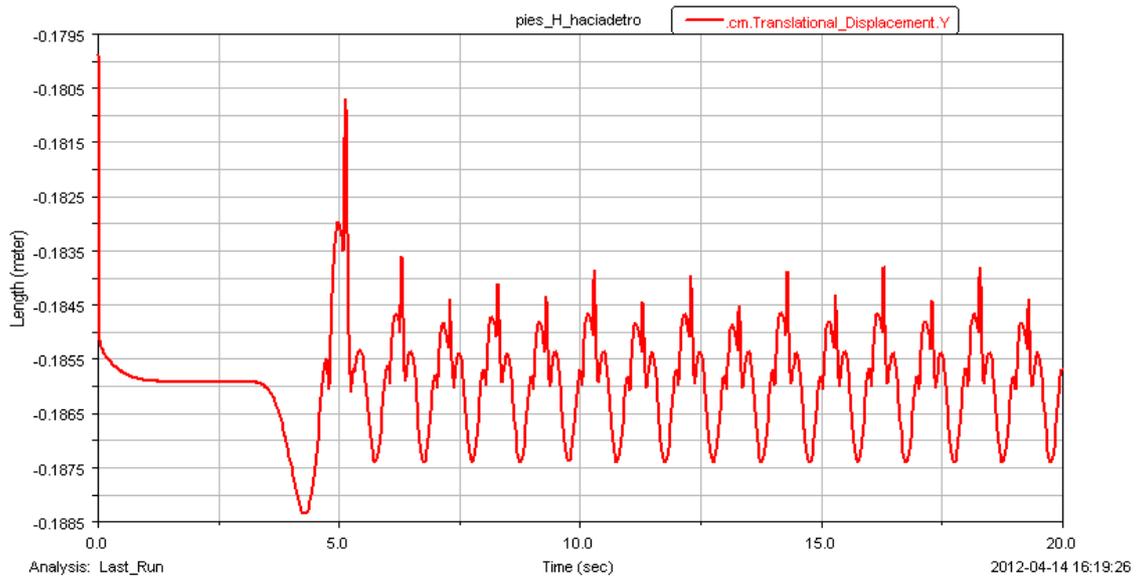


Gráfica 71: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

❖ Masa de 1,5 kg

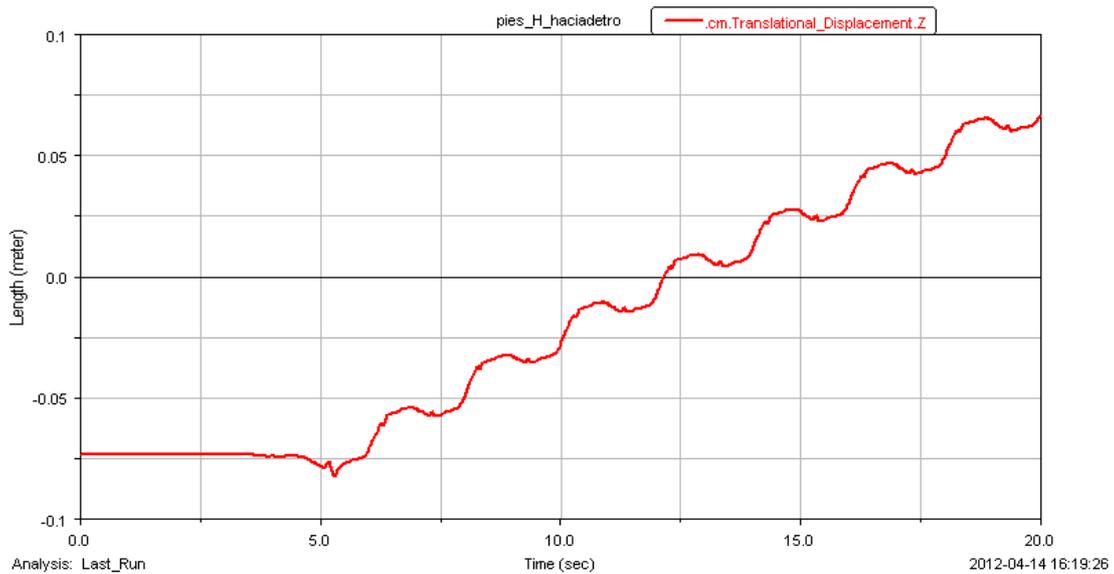


Gráfica 72: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



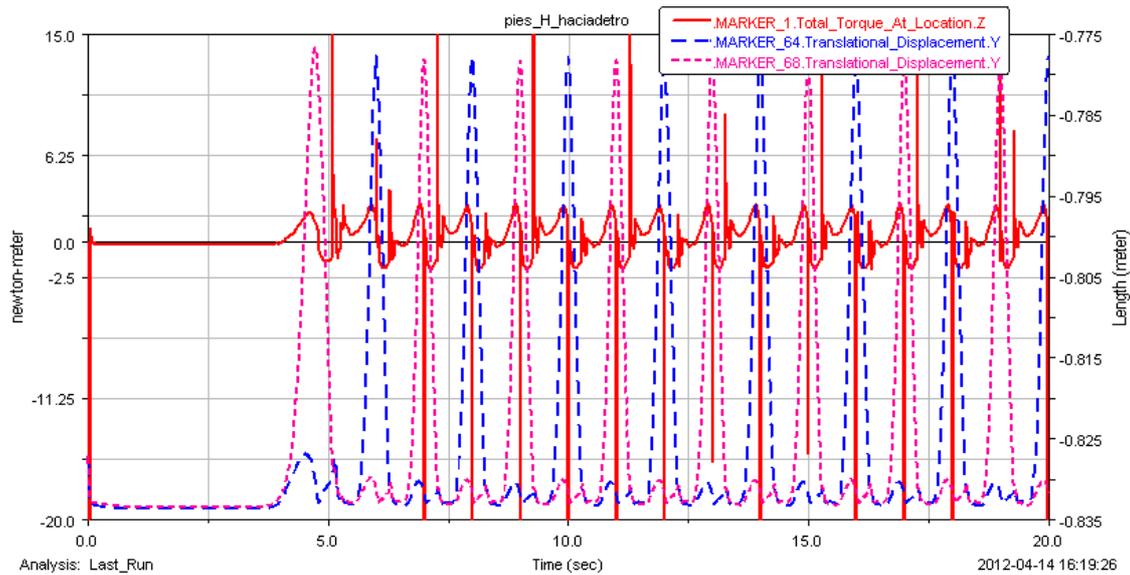
Gráfica 73: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

El desplazamiento longitudinal es similar al caso anterior, en el que añadió 1 kg. El desplazamiento vertical es ligeramente inferior al anterior, no es muy apreciable pero se ve la tendencia a disminuir las oscilaciones, añadiendo una masa en esa localización. El desplazamiento transversal se corrige en parte, pero no se logra igualar el mejor resultado hasta el momento, que es de 7 cm, al añadir 1 kg en la anterior localización, Aun así es una desviación aceptable, se desvía 14 cm.



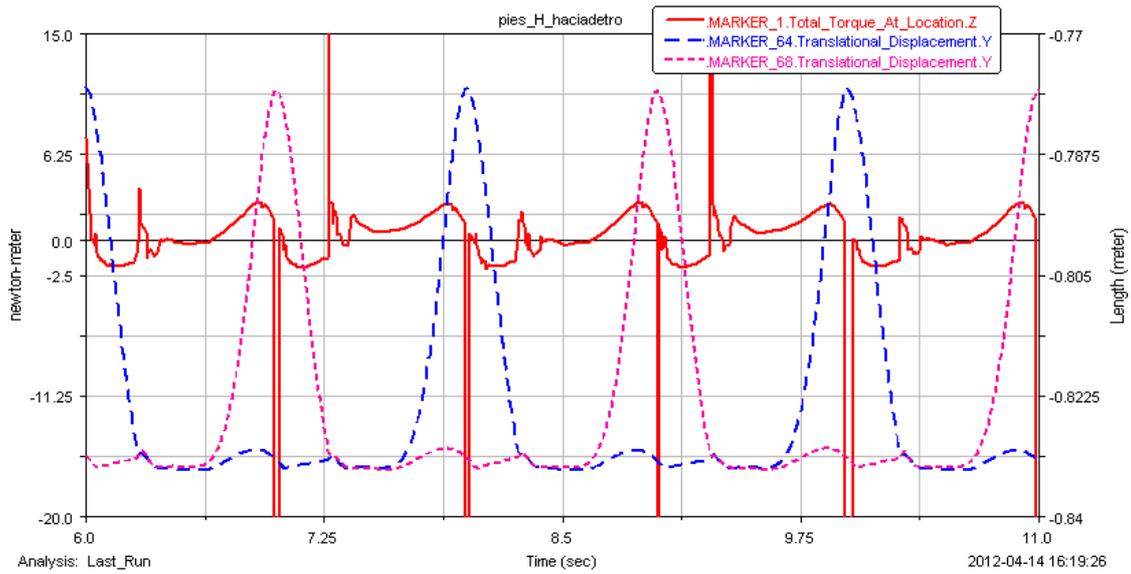
Gráfica 74: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

➤ Par en el modelo libre



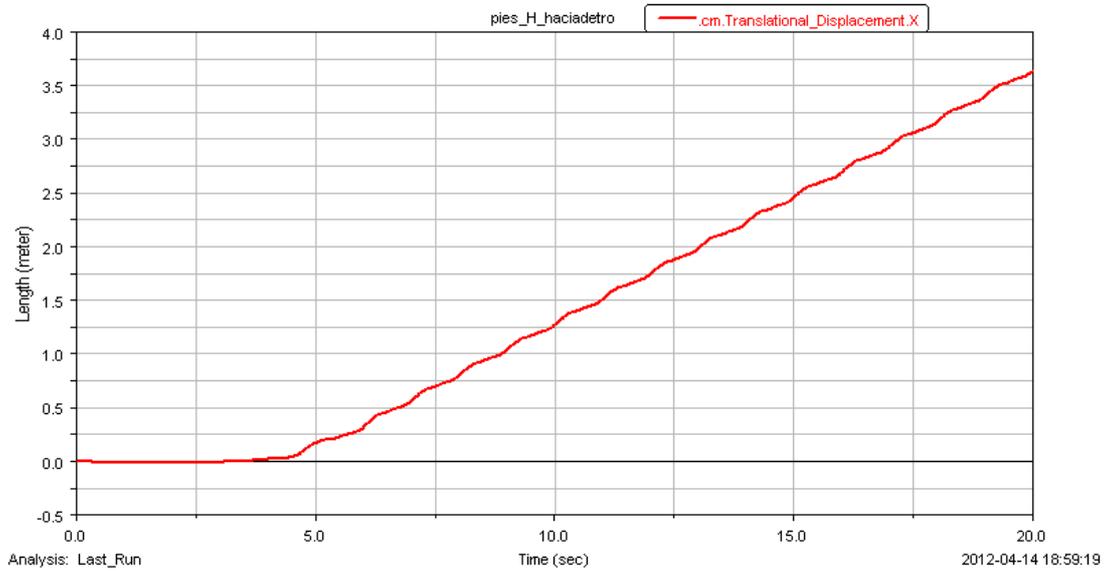
Gráfica 75: Par –Posición vs Tiempo

La gráfica de par obtenida es similar a la equivalente para 1kg, si bien es cierto que se puede apreciar que la demanda de par es ligeramente superior. En cuanto a los máximos y picos se producen en los mismos puntos que anteriormente. Las zonas críticas siguen siendo los contactos con el suelo y el punto más elevado en la trayectoria de los pies.

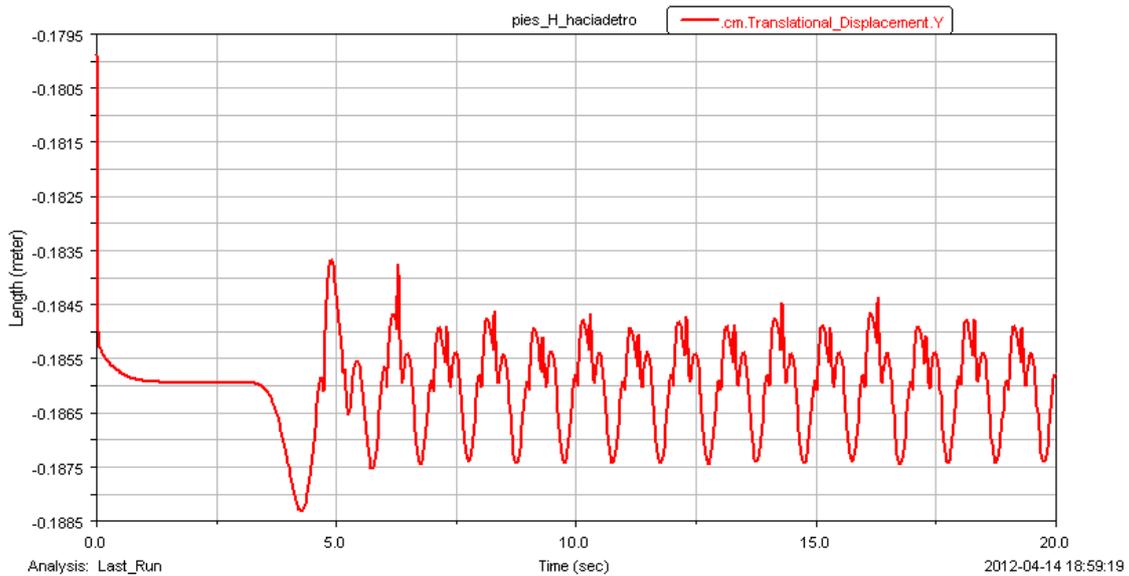


Gráfica 76: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

❖ Masa de 2 kg

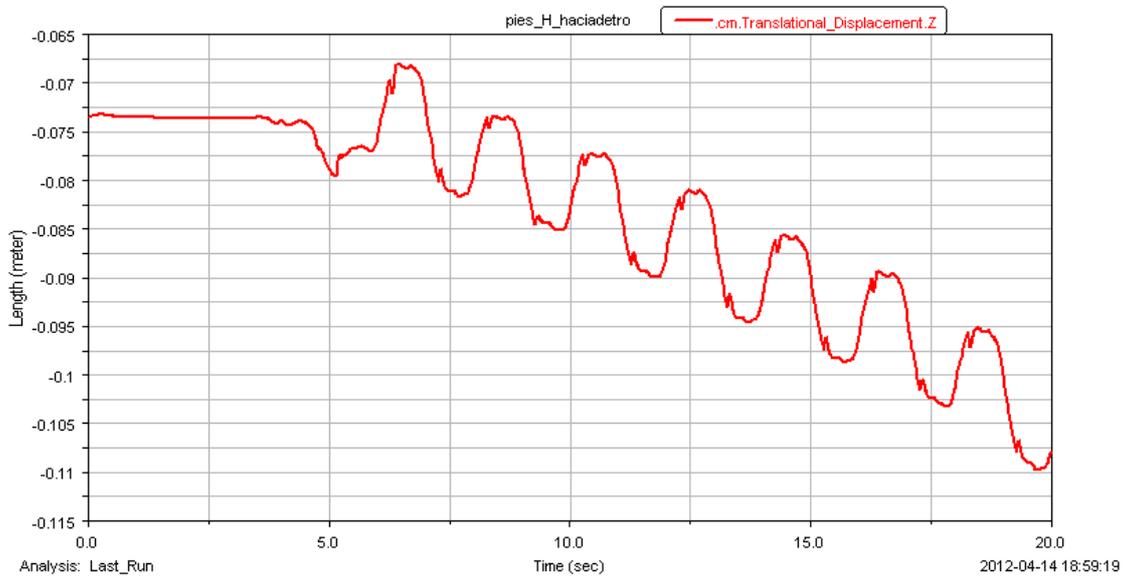


Gráfica 77: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



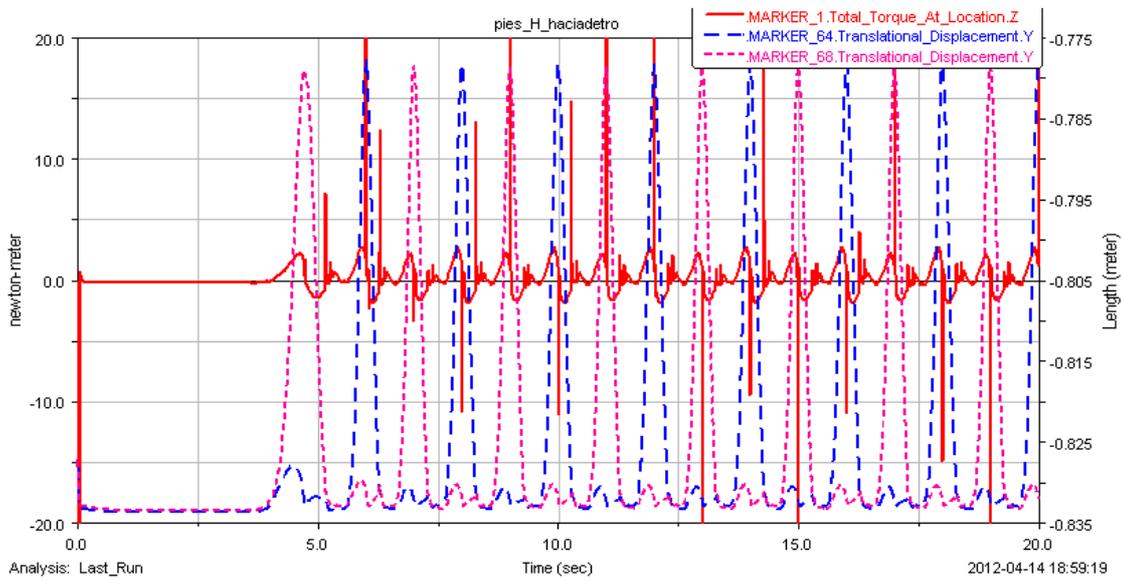
Gráfica 78: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

Los desplazamientos longitudinal y vertical son similares a los equivalentes con 1,5 kg de masa. En cambio, el desplazamiento transversal se reduce de manera muy considerable y el desvío se produce en la dirección opuesta a la que se había producido hasta este momento. Este cambio de masa genera una desviación transversal de 4 cm, 10 cm menos que en el ensayo anterior, y además, cambia la trayectoria. Es un dato a tener en cuenta.



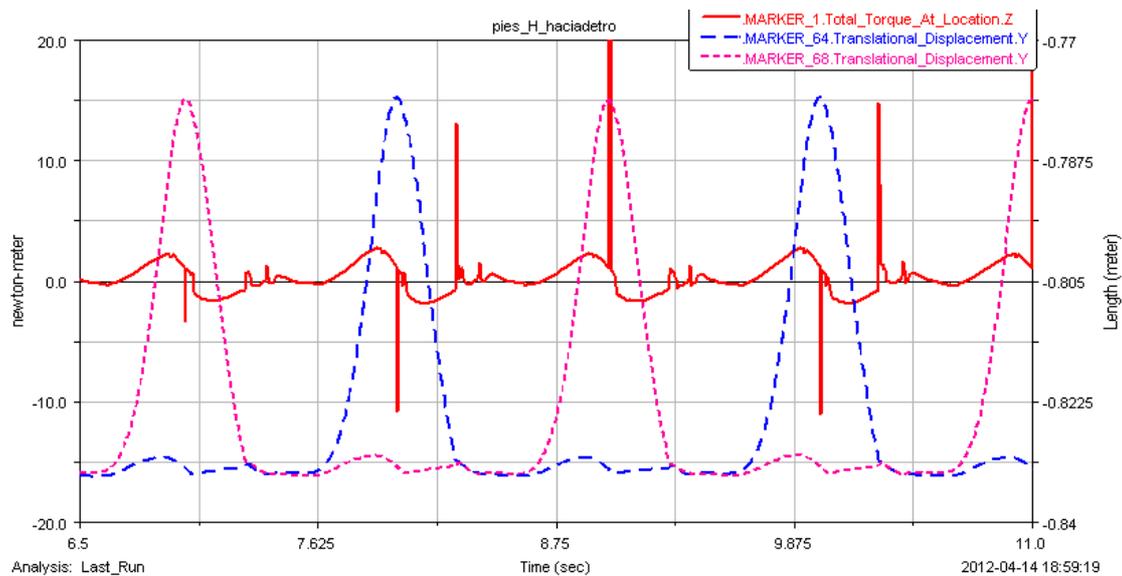
Gráfica 79: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

➤ Par en el modelo libre



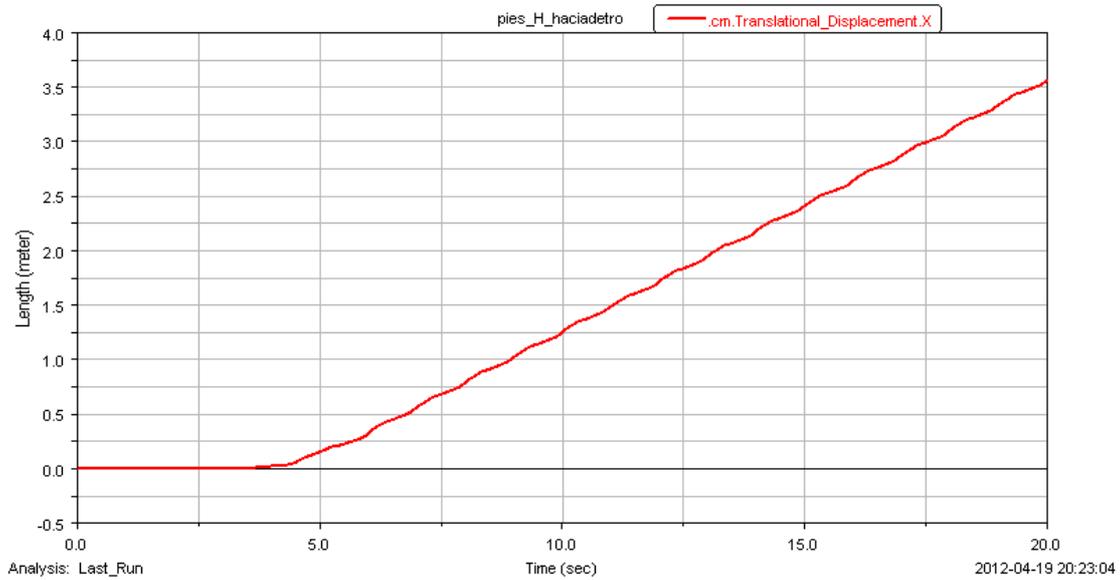
Gráfica 80: Par –Posición vs Tiempo

Las gráficas del par obtenidas siguen la misma tendencia que las anteriores. El máximo par se demanda instantes antes del punto más elevado del paso, existen picos cuando los pies entran en contacto con el suelo y en el punto más alto de la trayectoria. La diferencia con las gráficas obtenidas par 1,5 kg es que en los instantes de contacto con el suelo el par toma valores positivos, pero menores.

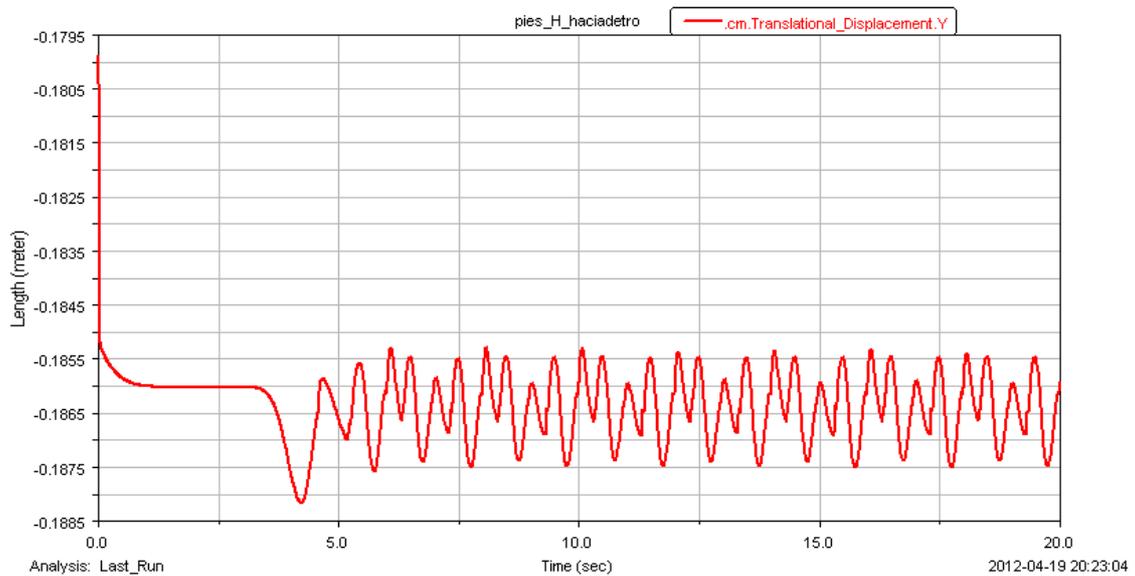


Gráfica 81: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

❖ Masa de 4 kg

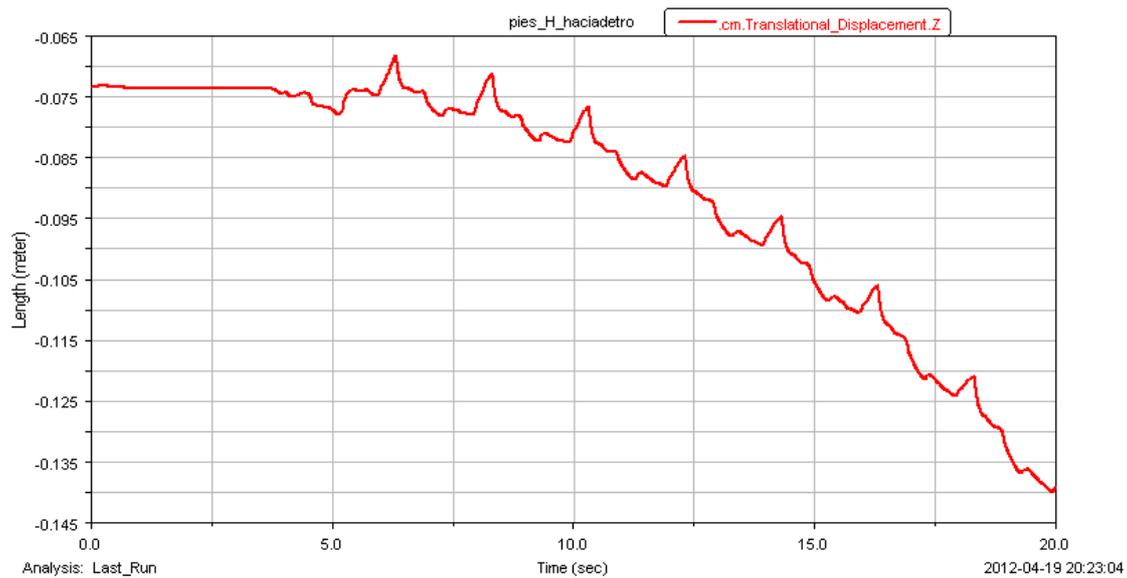


Gráfica 82: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



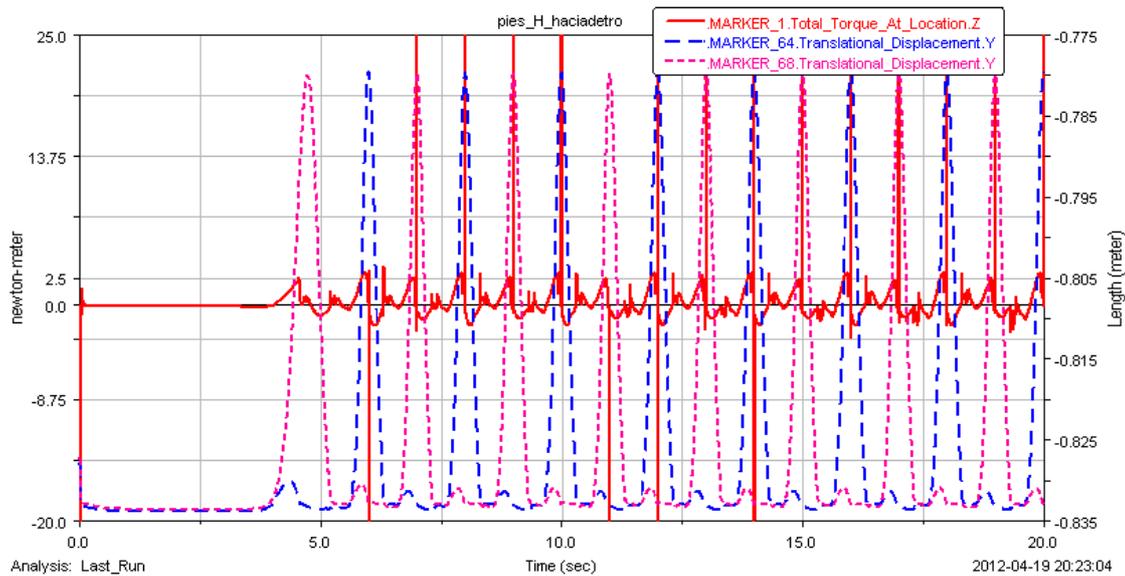
Gráfica 83: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

La trayectoria longitudinal se ve reducida en este modelo, siendo negativo para el ensayo porque conlleva que ha sufrido mayor desviación, aunque sigue siendo muy baja, una de las más bajas de todos los modelos estudiados hasta el momento. La oscilación vertical es muy pequeña también, apenas 2 mm.



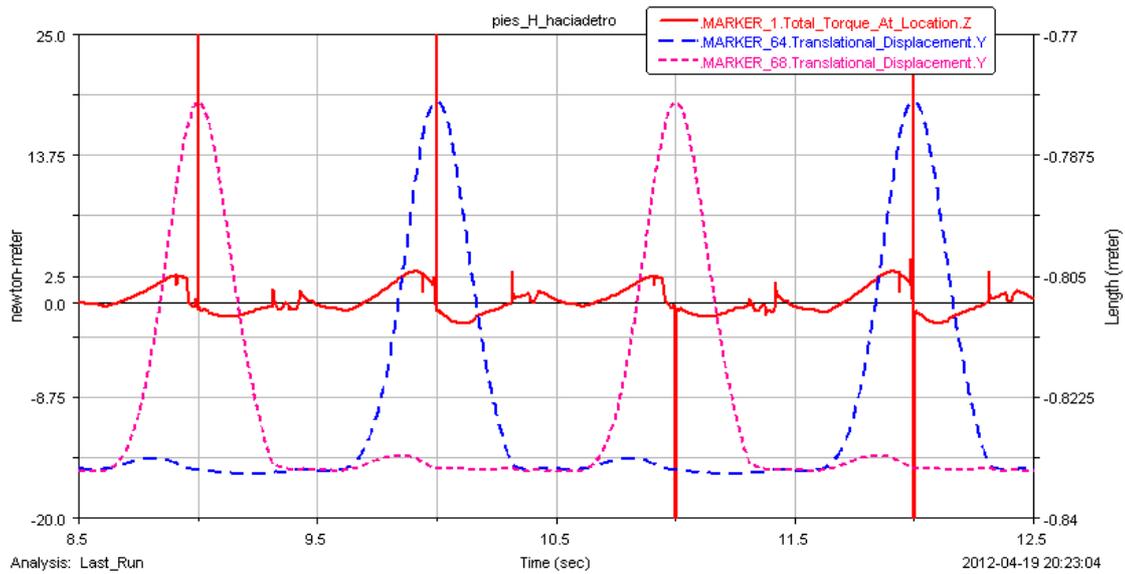
Gráfica 84: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

➤ Par en el modelo libre



Gráfica 85: Par - Posición vs Tiempo

El par demandado es ligeramente superior al anterior, pero continúa la linealidad en el aumento.



Gráfica 86: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

El último modelo que se va a estudiar con el estabilizador horizontal, lleva la masa añadida en un lugar estratégico y es muy importante su estudio para comparar sus resultados con el modelo que más adelante se medirá, que lleva el estabilizador descolgado. Su dibujo se muestra a continuación.

- **Localización C**

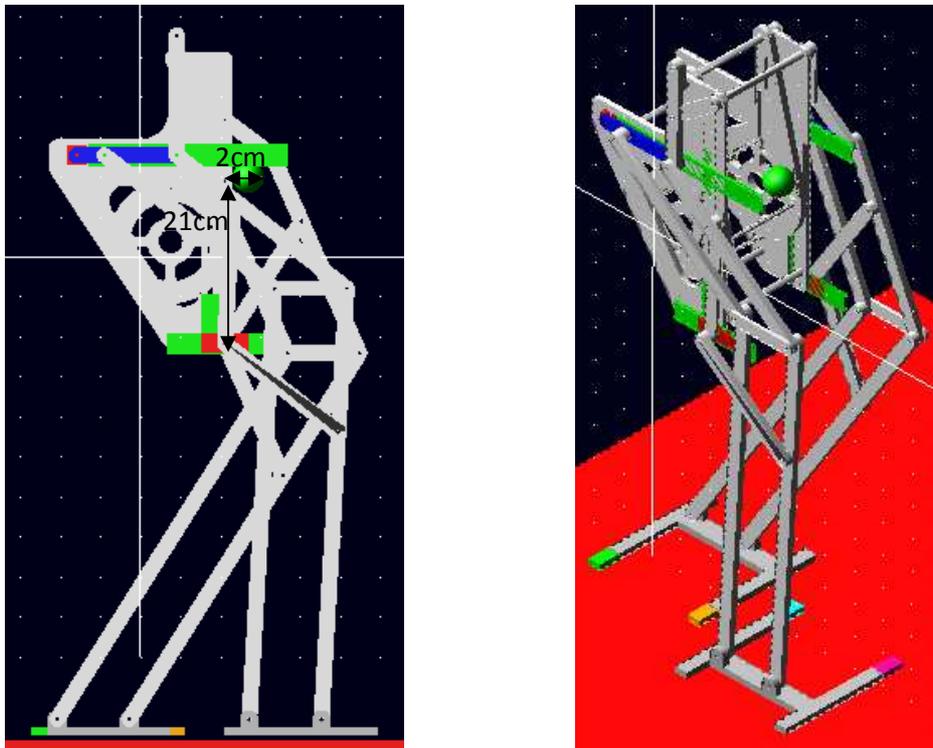
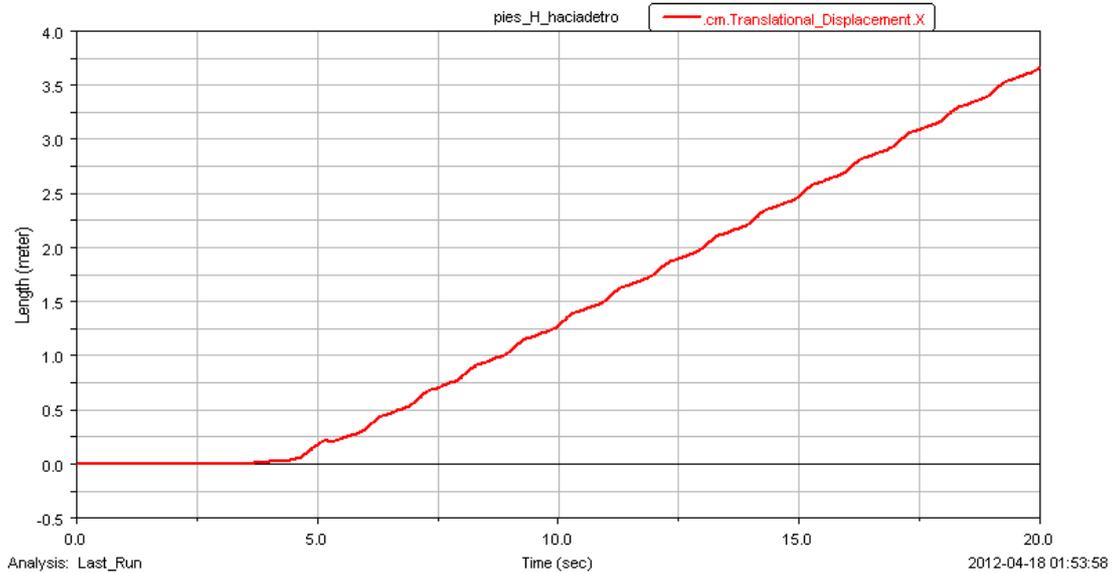
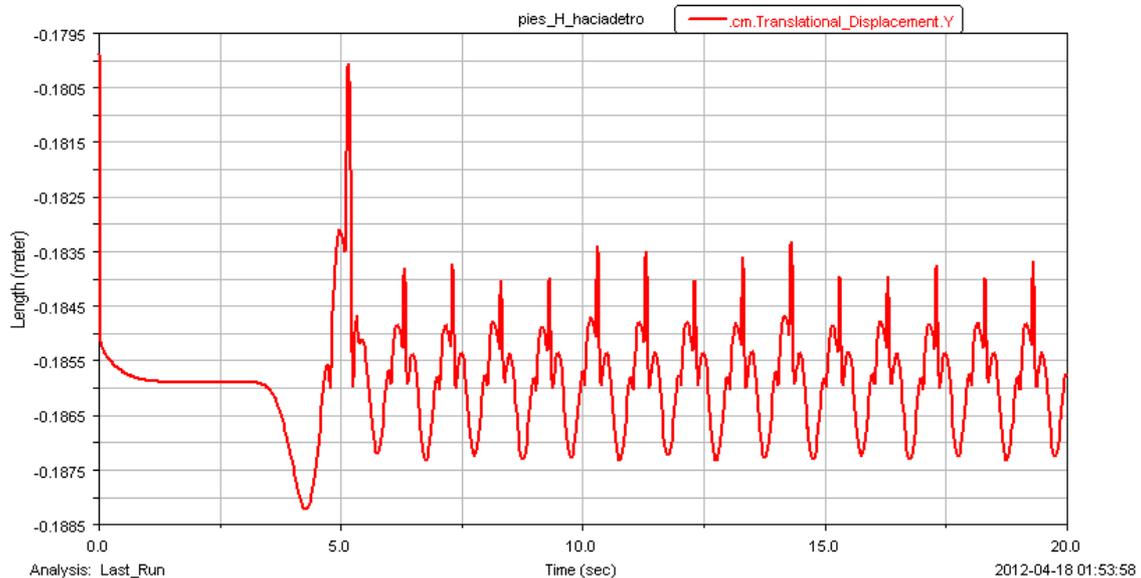


Figura 92 Mimbot con adición de una masa

❖ Masa de 1 kg

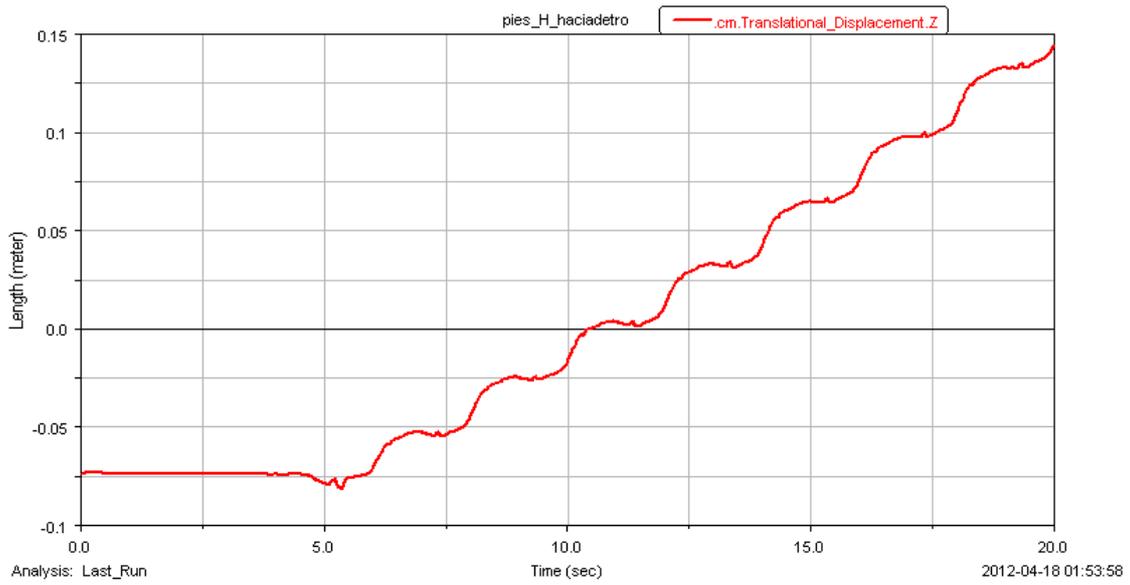


Gráfica 87: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



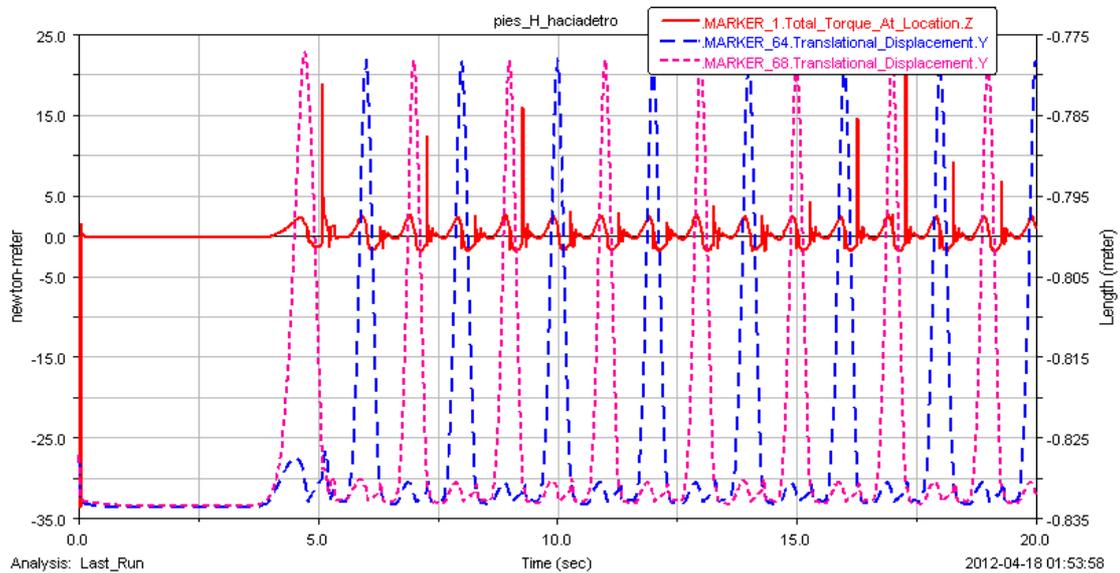
Gráfica 88: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

El desplazamiento longitudinal en todos los modelos es similar, no hay diferencias muy grandes. Las oscilaciones verticales de este modelo son bastante suaves lo que se traduce en un desplazamiento de 4 mm, de los más bajos obtenidos hasta el momento. La desviación transversal es de 22,5 cm en todo el recorrido. No es muy elevada, pero es mejorable.



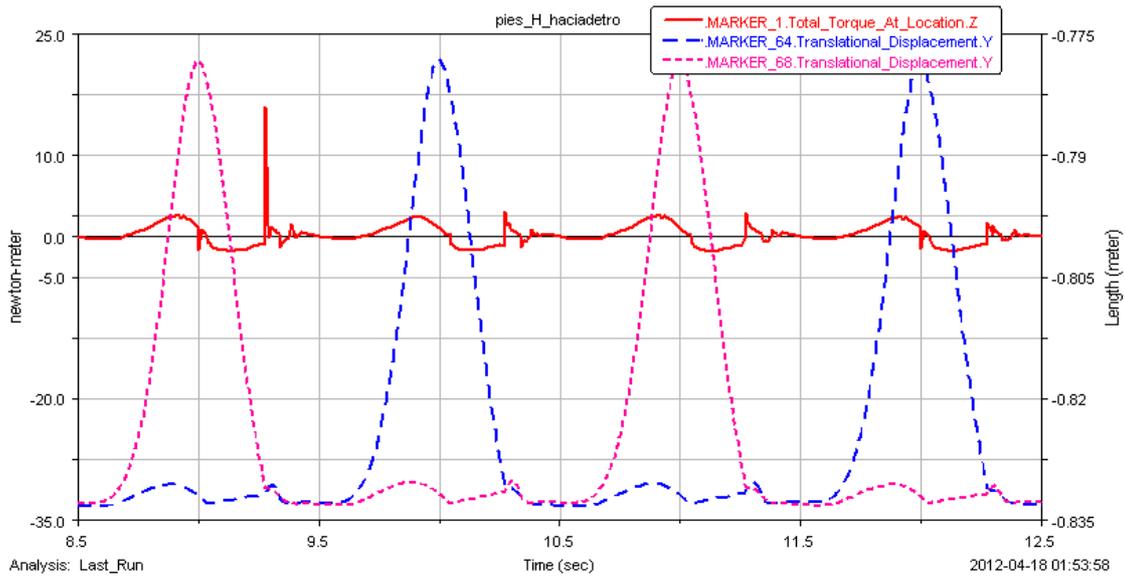
Gráfica 89: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

➤ Par en el modelo libre



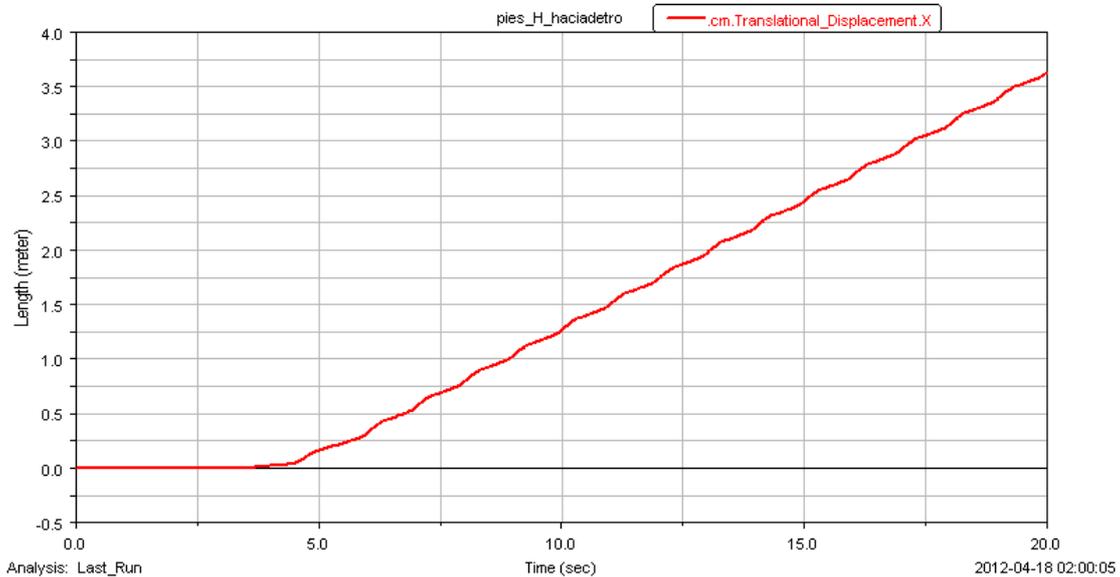
Gráfica 90: Par –Posición vs Tiempo

El par demandado por la manivela es similar al obtenido en anteriores modelos en los que se ha añadido la misma masa, tanto en forma como en magnitud.

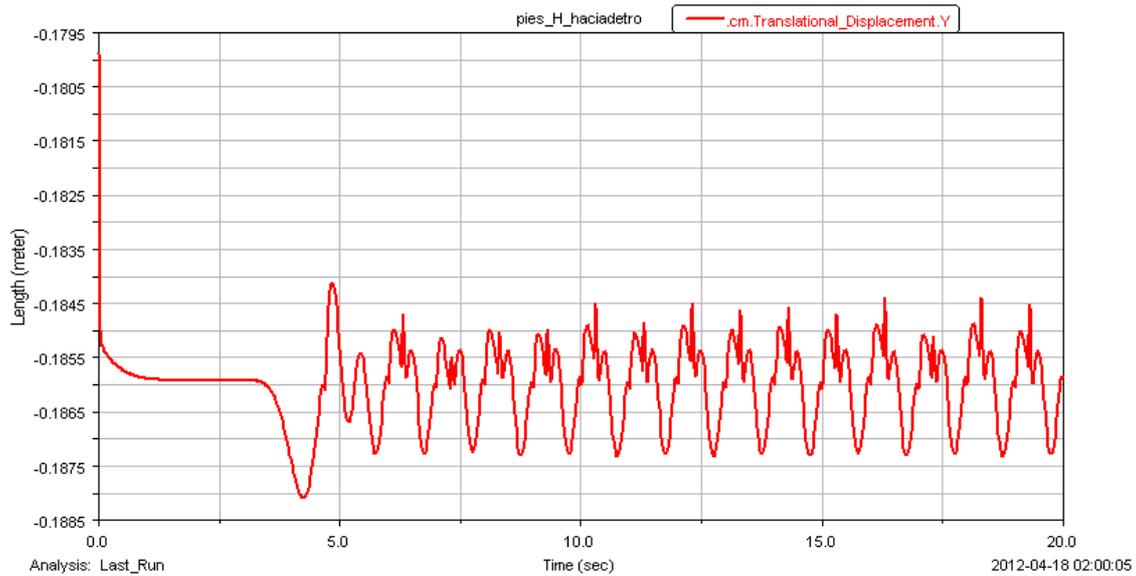


Gráfica 91: Par -Posición vs Tiempo 2 ciclos

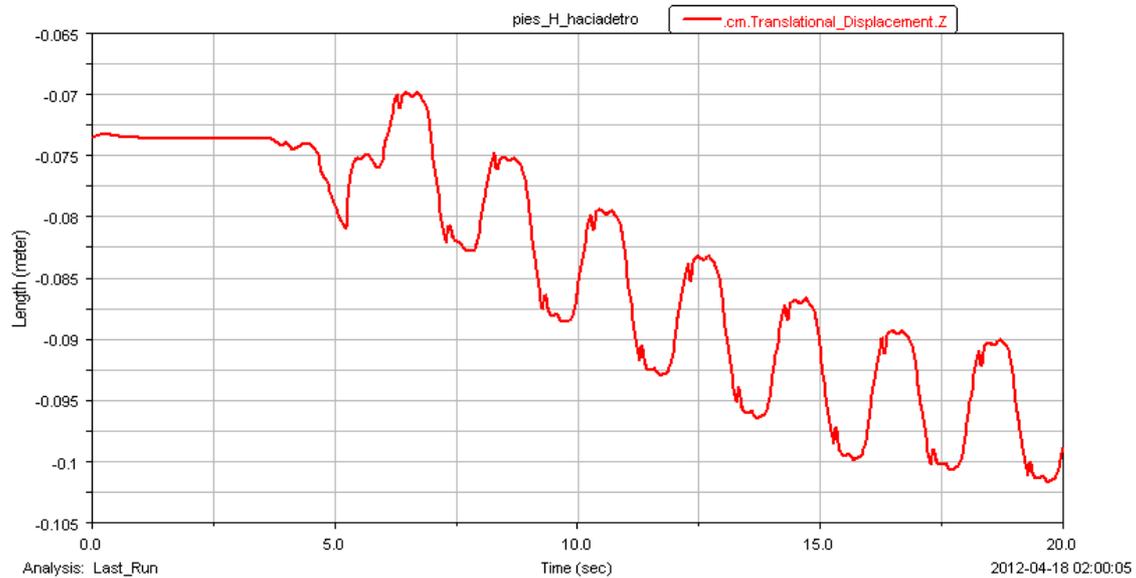
❖ Masa de 1,5 kg



Gráfica 92: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



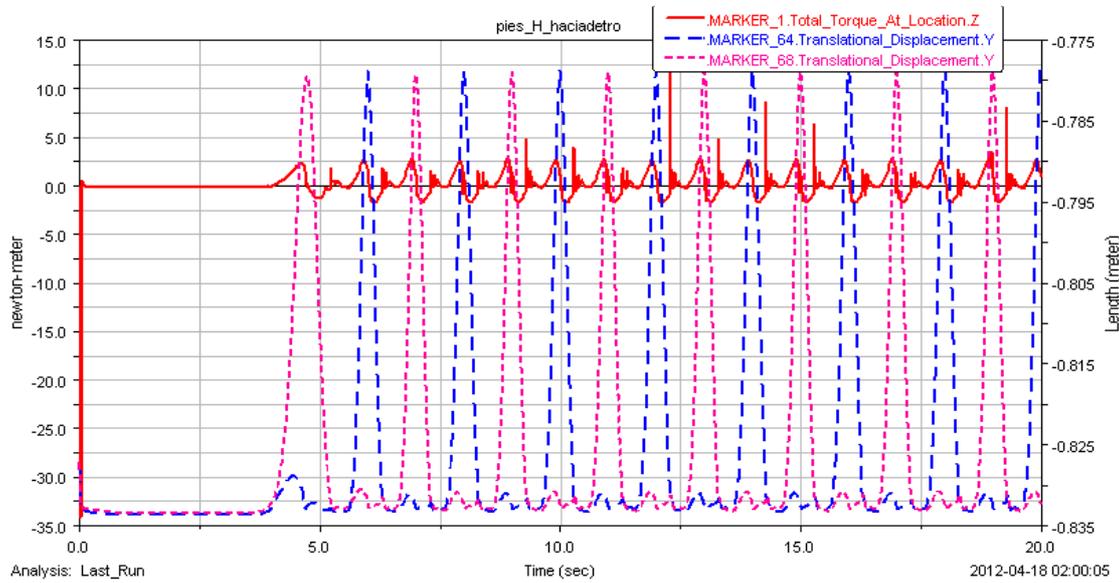
Gráfica 93: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y



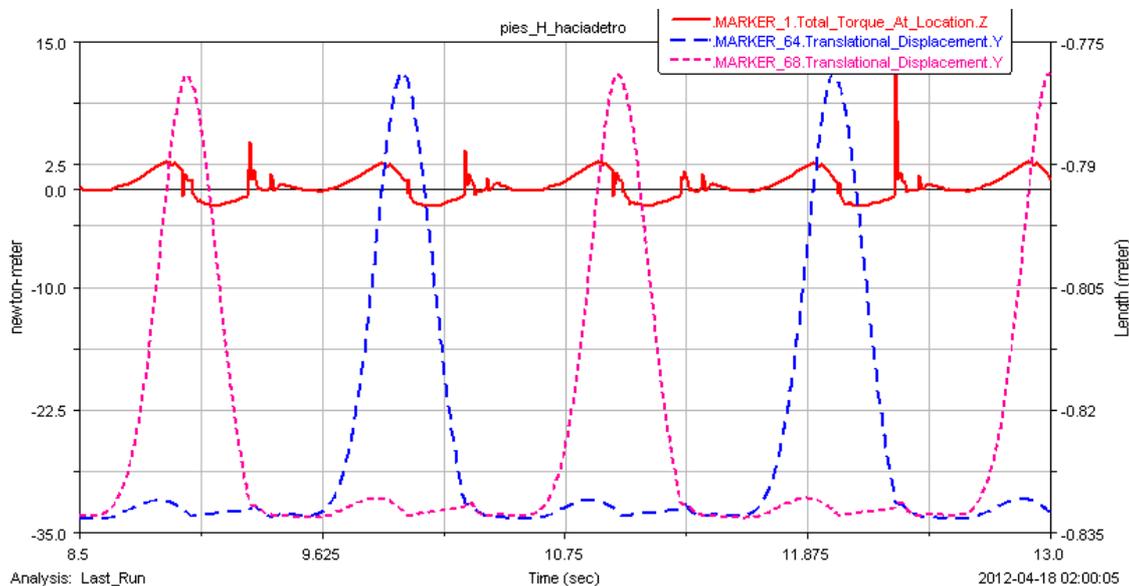
Gráfica 94: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

Lo más destacable de este modelo es que las oscilaciones verticales se reducen de forma muy considerable hasta conseguir un desplazamiento vertical de 2 mm, el de menor magnitud hasta el momento. La desviación transversal también sufre una disminución drástica, solo se desplaza en esta dirección 3 cm. Por tanto, añadir una masa de 1,5 kg en esta localización de la cadera aporta grandes beneficios al modelo.

➤ Par en el modelo libre



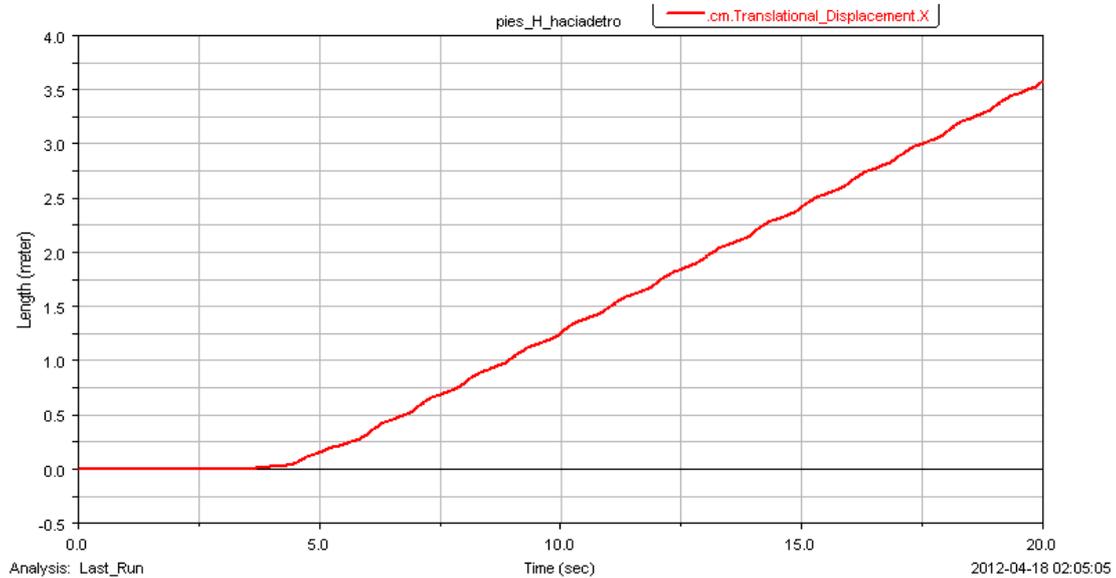
Gráfica 95: Par –Posición vs Tiempo



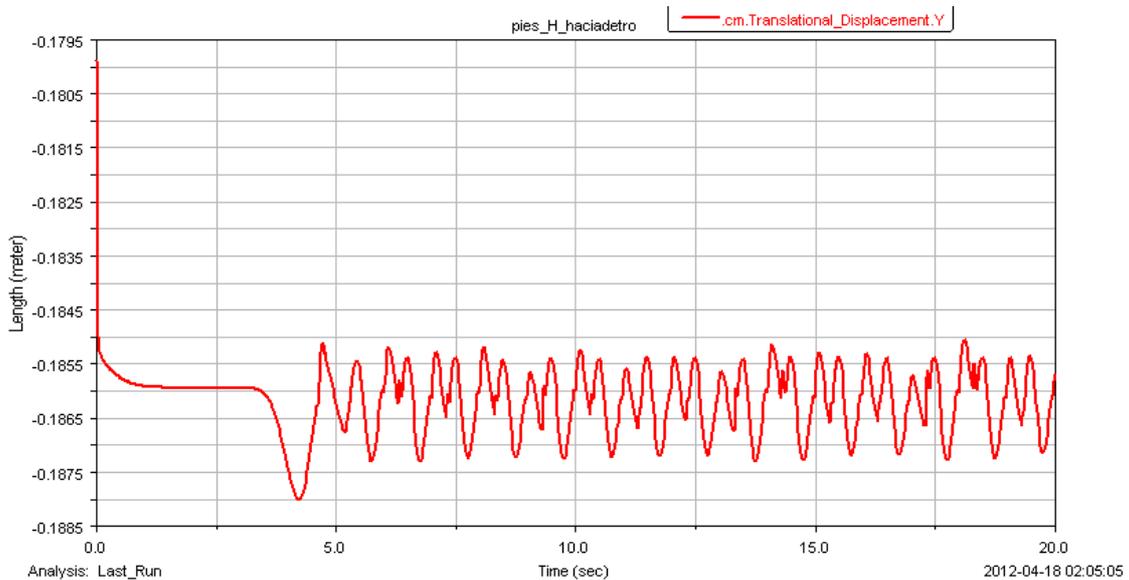
Gráfica 96: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

El aporte de esta masa no solo es beneficioso para corregir las trayectorias del modelo, sino que, además, esto se traduce en el par demandando ya que disminuye ligeramente durante el recorrido, si se compara con otras gráficas en las que se ha añadido la misma masa, en otro lugar.

❖ Masa de 2 kg

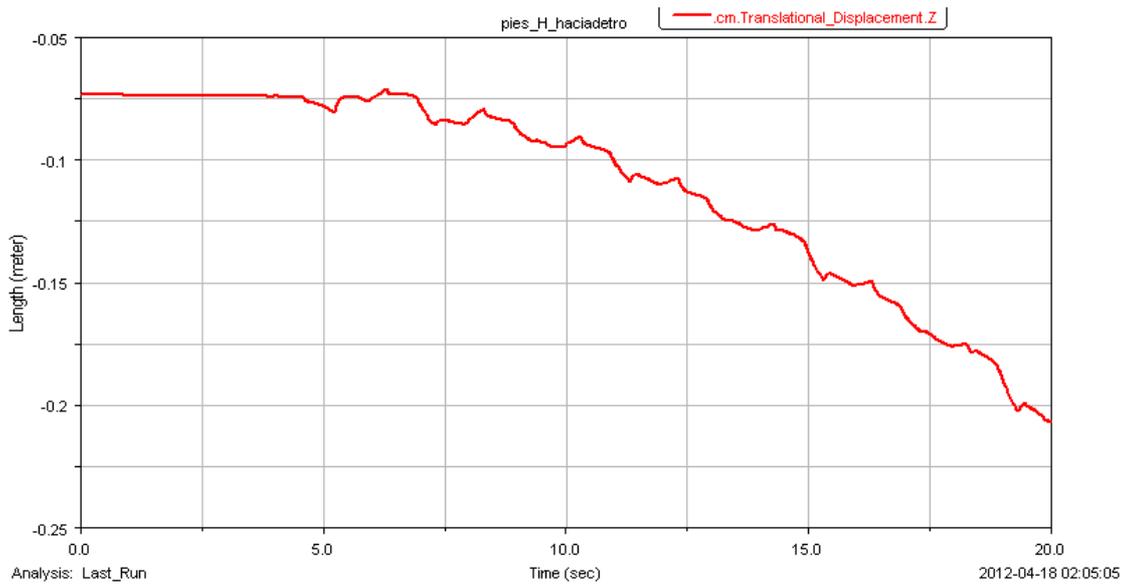


Gráfica 97: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



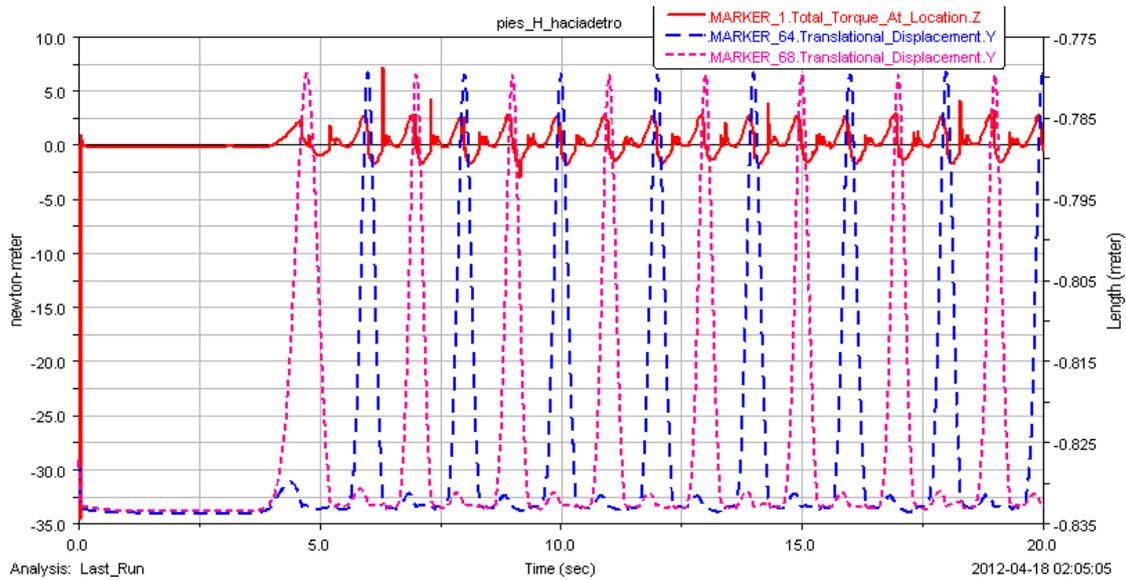
Gráfica 98: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

El aporte de una masa de 2 kg suaviza todavía más las oscilaciones verticales, reduciendo el desplazamiento hasta 1,5 mm. Sin embargo, las desviación transversal no se corrige cómo se hubiese esperado, el modelo sufre una desviación de 12 cm, no es muy elevada, pero no se puede comparar con la anterior que solo era de 3 cm.



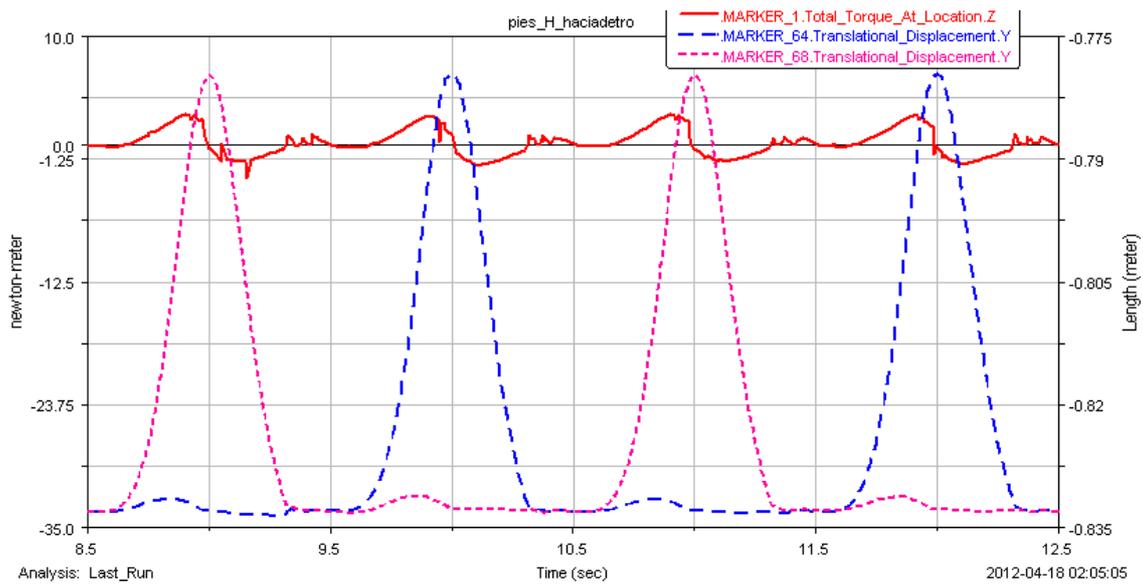
Gráfica 99: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

➤ Par en el modelo libre



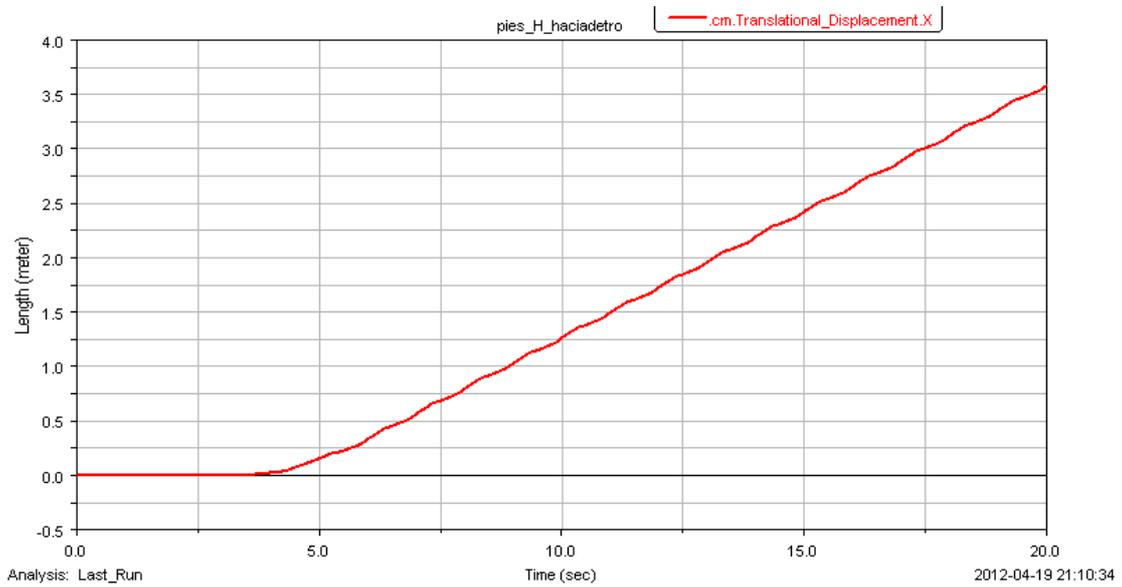
Gráfica 100: Par –Posición vs Tiempo

Las curvas de par obtenidas son similares a las de modelos anteriores, con la salvedad que en los instantes que el modelo está con los pies en el suelo, el par necesario es inferior al de los anteriores, para que pueda continuar con su movimiento. Esto supone un ahorro energético.

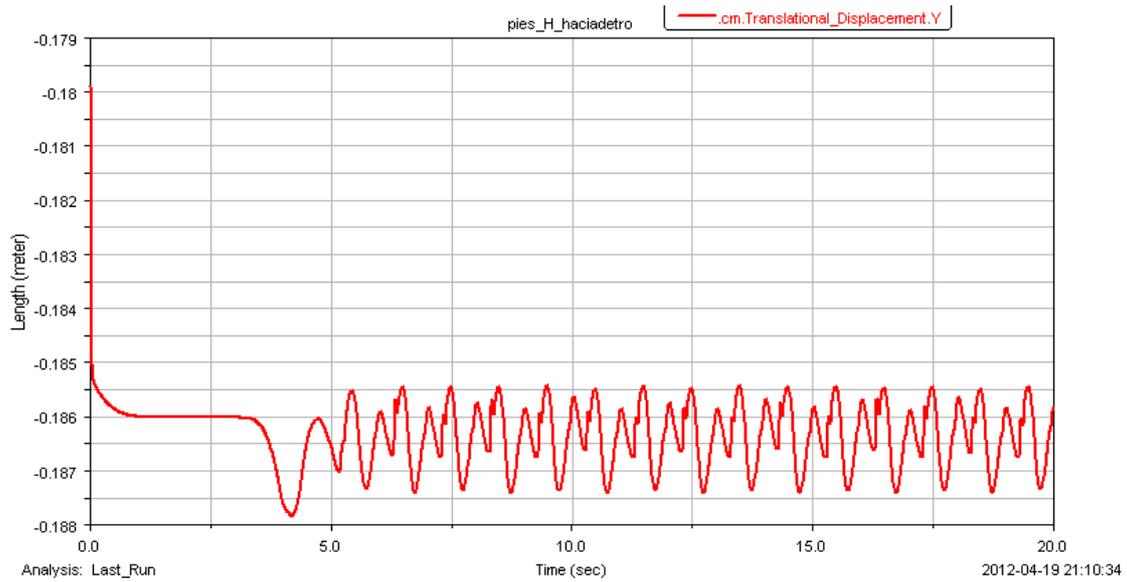


Gráfica 101: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

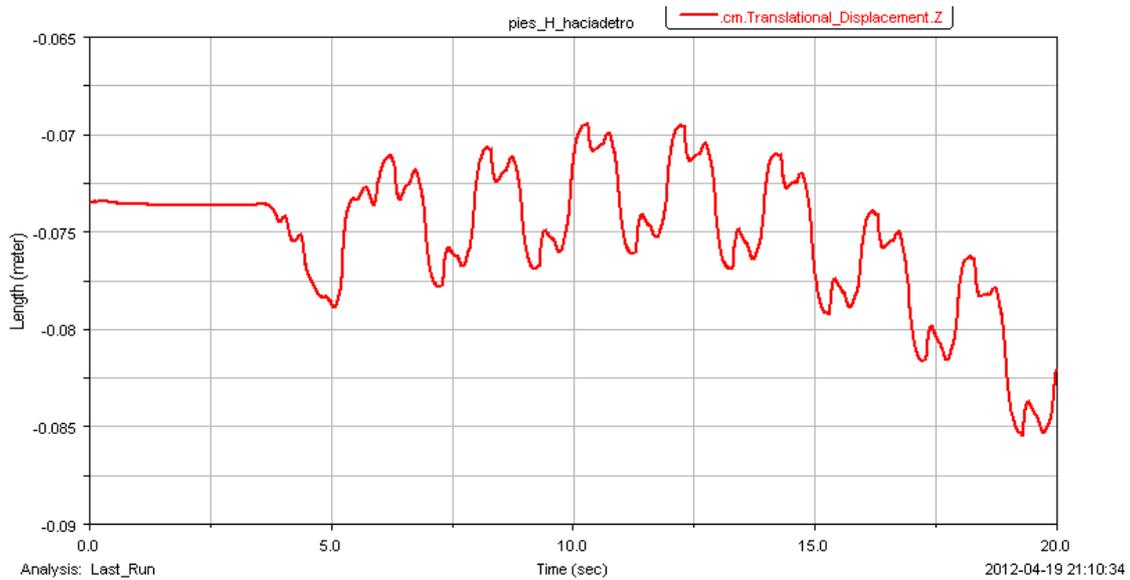
❖ Masa de 4 kg



Gráfica 102: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



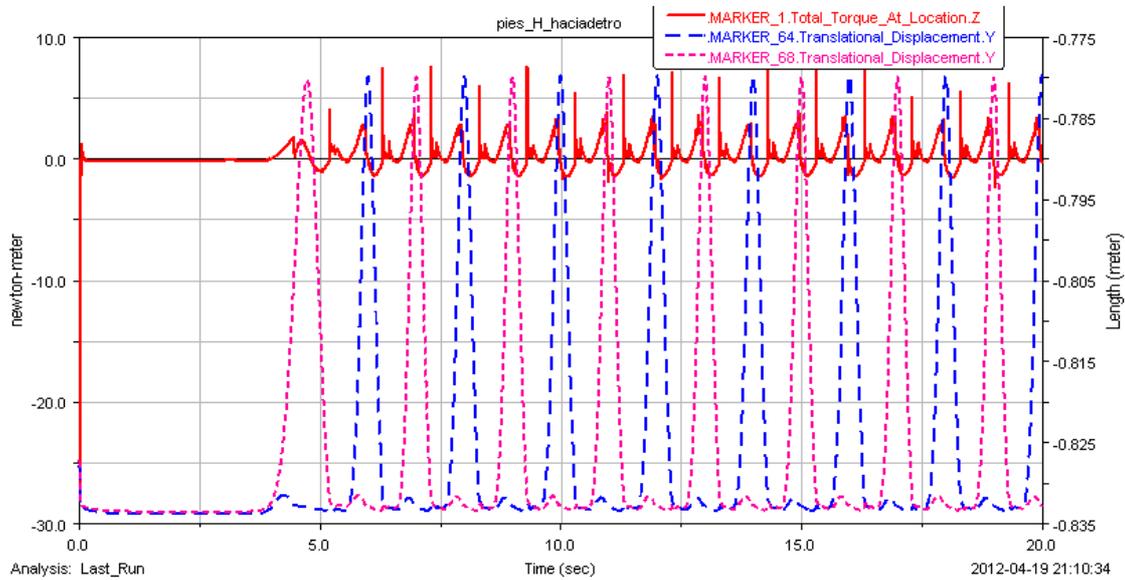
Gráfica 103: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y



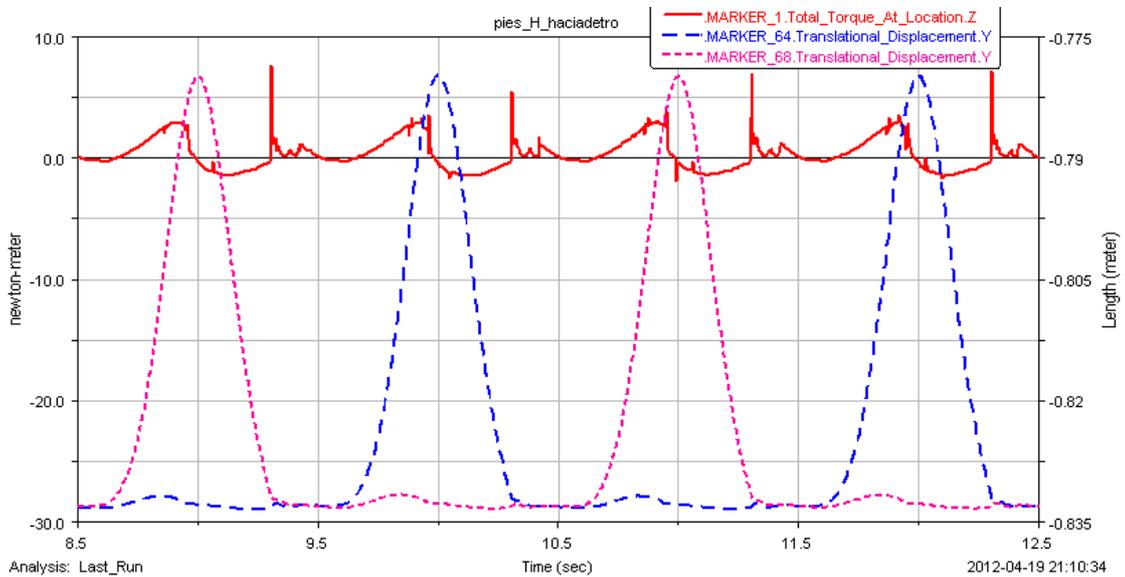
Gráfica 104: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

La oscilación vertical es similar a la anterior, habiéndose reducido ligeramente. La desviación transversal obtenida es la más baja hasta el momento, con 1,5 cm. En este apartado, este modelo logra unos resultados satisfactorios.

➤ Par en el modelo libre



Gráfica 105: Par –Posición vs Tiempo



Gráfica 106: Detalle de la gráfica Par-Posición vs Tiempo

El par demandado es ligeramente superior al anterior, si bien, en el momento de contacto de los pies con el suelo crece con respecto a la masa de 2 kg.

Una vez concluido el estudio de las trayectorias descritas y el par demandado por el robot en su movimiento, para el modelo que tiene el estabilizador horizontal, se va a proceder a realizar el mismo estudio para el modelo que tiene el estabilizador descolgado. Dicho modelo tiene los mismos componentes y dimensiones que el anterior. La diferencia entre ambos es que, mientras el primero mantenía el pie horizontal a lo largo de su recorrido, el modelo que se estudia a continuación va a generar un ángulo en el recorrido de su pie. Este ángulo es el mismo que describe el estabilizador, en su trayectoria, con la horizontal. El paralelismo es motivado por la geometría del robot, que como se describió al comienzo del presente proyecto está compuesto por un mecanismo de Chebyshev y un pantógrafo. Este último es el causante de que ambos elementos sean paralelos.

5.3.2. Estabilizador primitivo

Antes de comenzar el estudio del nuevo modelo se va a ilustrar para que se aprecien las diferencias con el anterior modelo. Este modelo es, en esencia, similar al modelo original del Pasibot, solo que tiene las modificaciones en la parte inferior de la cadera. A continuación se muestra una secuencia de imágenes que ilustran el paso descrito por este modelo.

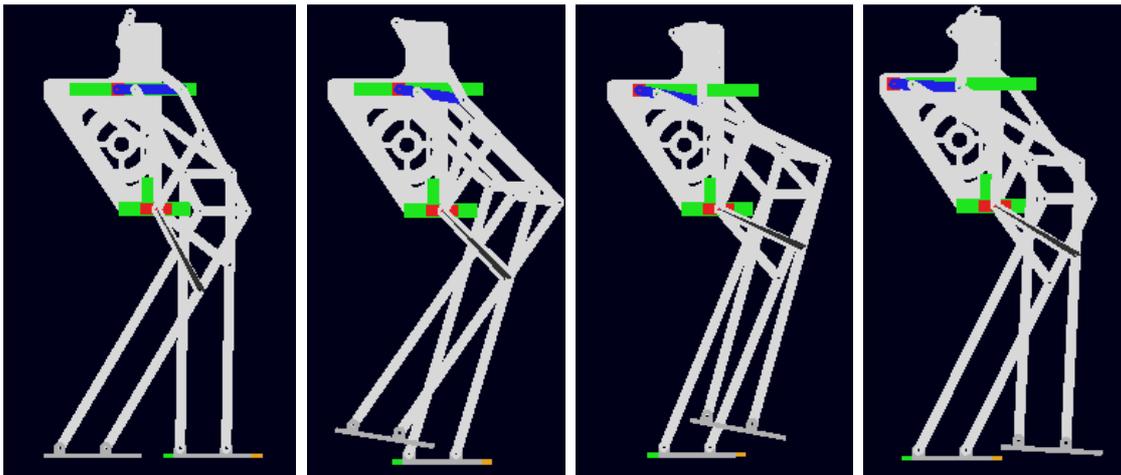


Figura 93 Paso descrito por el modelo con el estabilizador descolgado

En las imágenes anteriores se puede ver de forma clara como el estabilizador (en azul) está descolgado por uno de sus extremos de la corredera (en verde) y tanto los pies como las rodillas siguen una trayectoria paralela a él.

Para el estudio de este modelo se le ha dotado de las mismas velocidades que al anterior, para poder sacar conclusiones fiables. La primera observación que se puede hacer es que este modelo no es capaz de caminar a $45^\circ/s$, $90^\circ/s$ ni $180^\circ/s$, sin añadirle una masa extra, ya que al iniciar el paso pierde el equilibrio hacia su parte trasera. En cambio, a $360^\circ/s$ es capaz de caminar sin añadir una masa, sin que su trayectoria sea recta.

Antes de continuar este estudio, se ha considerado interesante comentar que se ha probado a dar movimiento para que el robot se desplace hacia atrás y se ha visto que a las velocidades de 90º/s, 180º/s y 360º/s el modelo es capaz de caminar sin necesidad de añadir ningún elemento adicional. El hecho de que el robot sea capaz de caminar hacia atrás y no hacia adelante es motivado porque su centro de masas está ligeramente retrasado y, por tanto al desplazarse en esa dirección no tiene problemas. En cambio, al desplazarse hacia adelante, en el modelo que tenía el estabilizador horizontal y, por ello, los pies se mantenían horizontales, era capaz de superar este inconveniente y caminar hacia adelante. En este modelo, con el estabilizador descolgado, hay que sumar la localización del centro de masas y el ángulo que giran los pies al caminar, como se ha visto en las imágenes. Este giro de los pies ayuda al desequilibrio del robot.

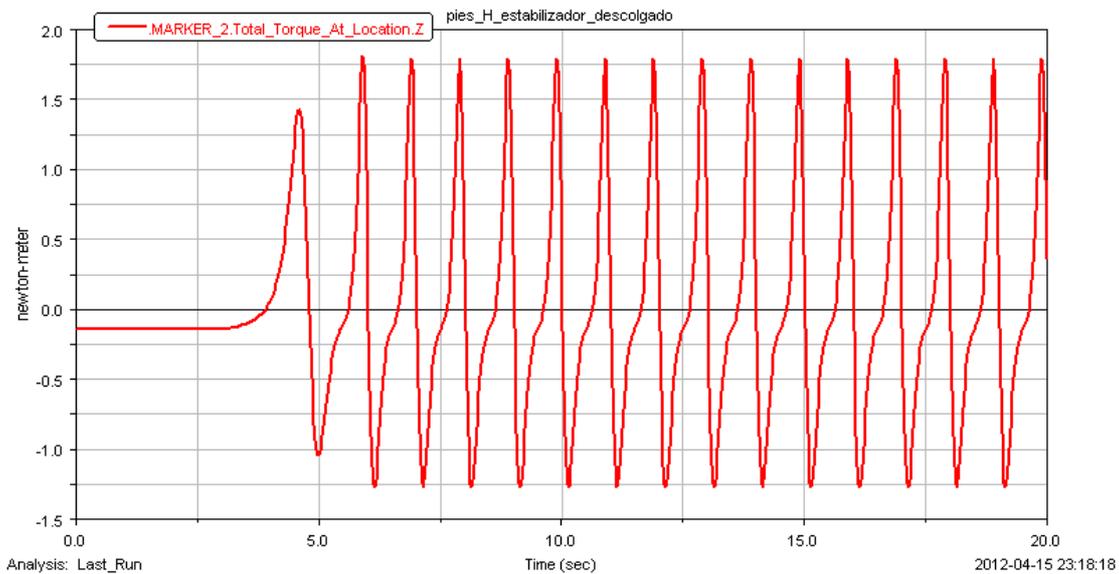
5.3.2.1 Velocidad de 180º/s

Para este modelo se van a estudiar las mismas variables que se estudiaron para el que tiene el estabilizador horizontal. Estas son las trayectorias descritas por el modelo en los 3 ejes y comparar el par demandado por el modelo colgado con el del modelo libre.

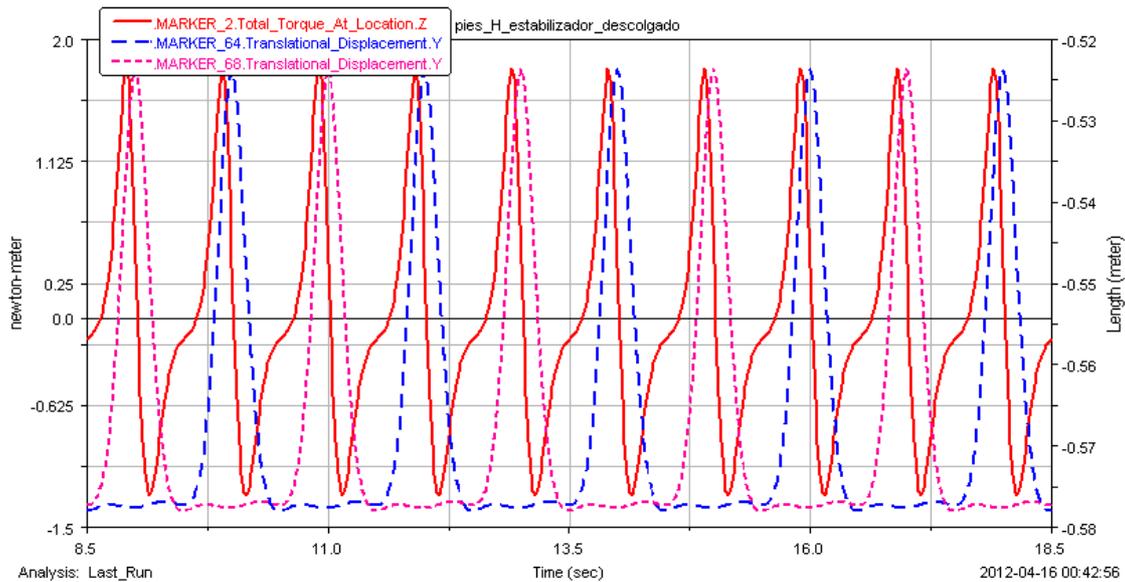
Las trayectorias no se van a ilustrar debido a que al hacer la simulación el robot pierde el equilibrio, por tanto no se puede sacar ninguna conclusión.

A continuación se muestra el estudio del par.

➤ Par en el modelo colgado



Gráfica 107: Par demandante por la manivela en el modelo colgado a 180º/s

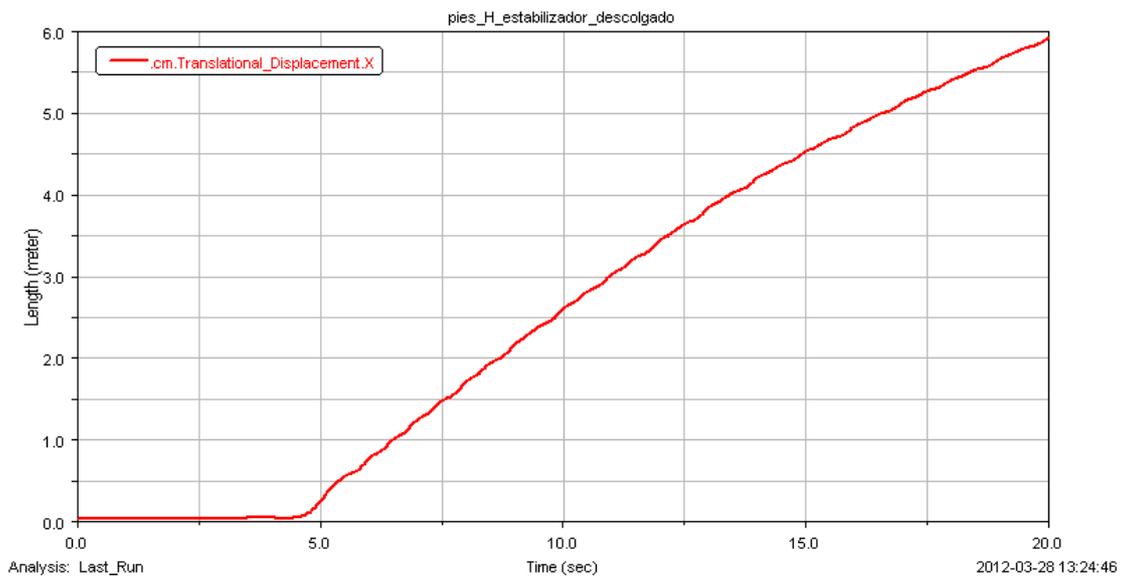


Gráfica 108: Par –Posición vs Tiempo a 180º/s modelo colgado

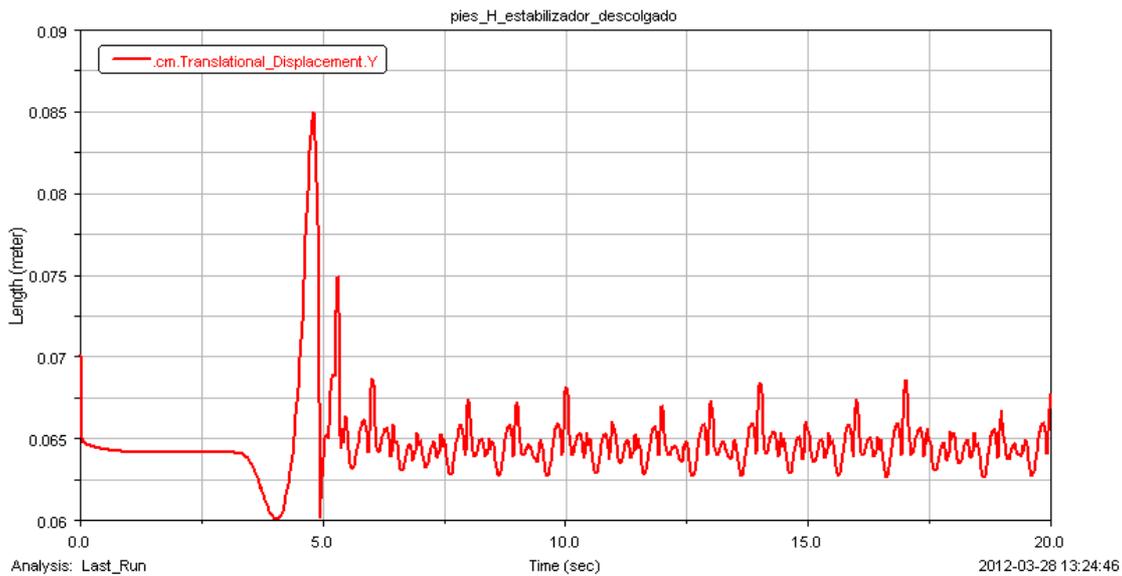
El par demandado por el modelo colgado es ligeramente superior al equivalente del modelo con el estabilizador horizontal. El aumento es muy ligero por lo que no es significativo. El dibujo de la gráfica del par es similar en ambos casos. El par máximo se adelanta al punto más elevado de la trayectoria del pie. Los instantes en los que los pies están en su punto inferior, el modelo se mueve por su propia inercia, como ocurría en anteriores modelos.

La gráfica que ilustra el par demandado por el modelo libre no se va a estudiar por el mismo motivo que no se han estudiado las trayectorias.

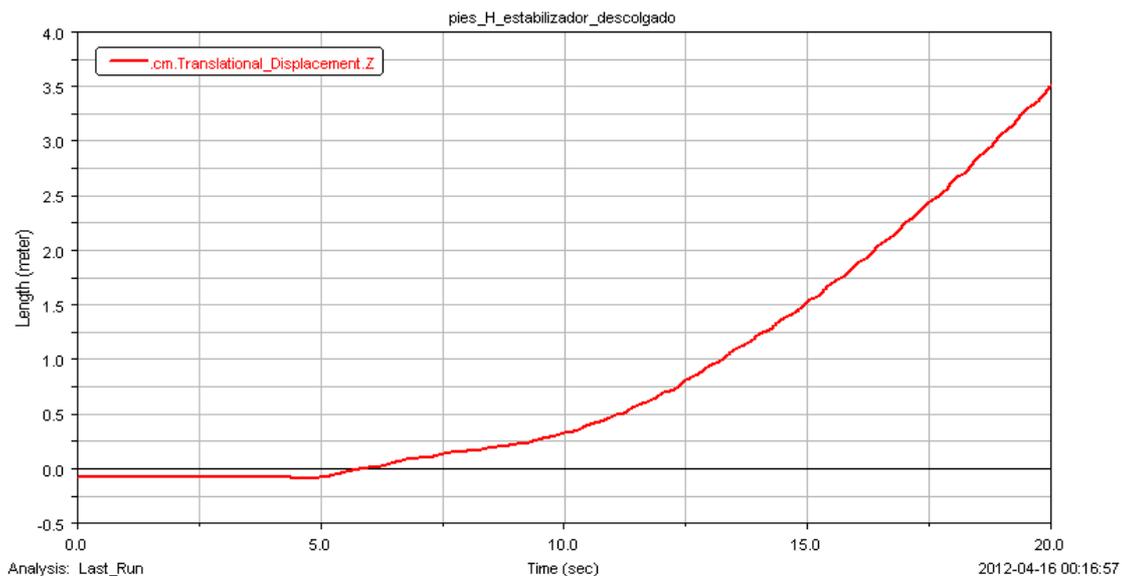
5.3.2.2. Velocidad de 360º/s



Gráfica 109: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X a 360º/s



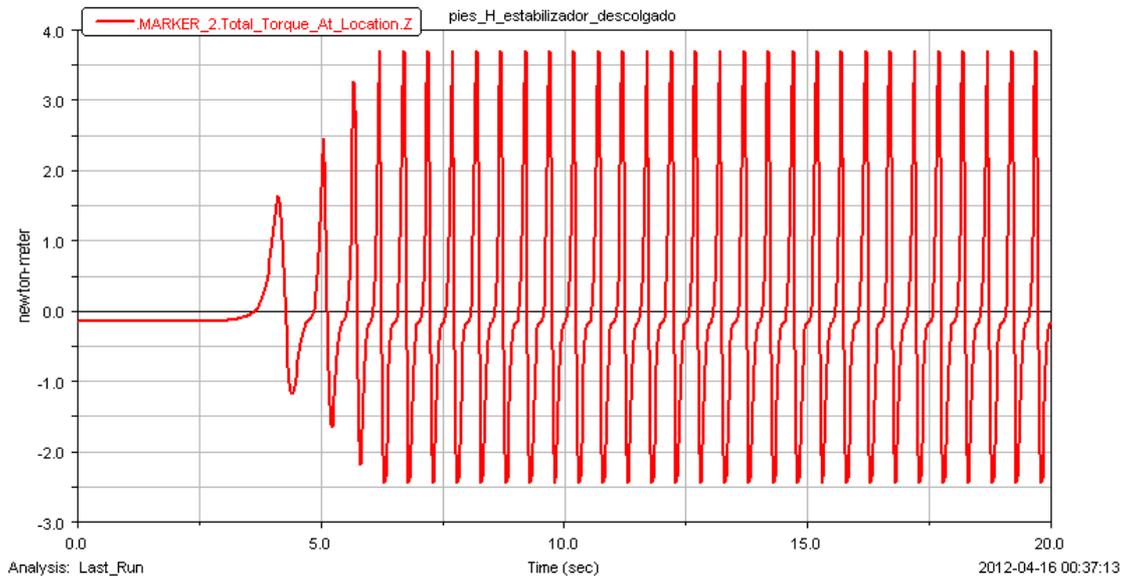
Gráfica 110: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y a 360º/s



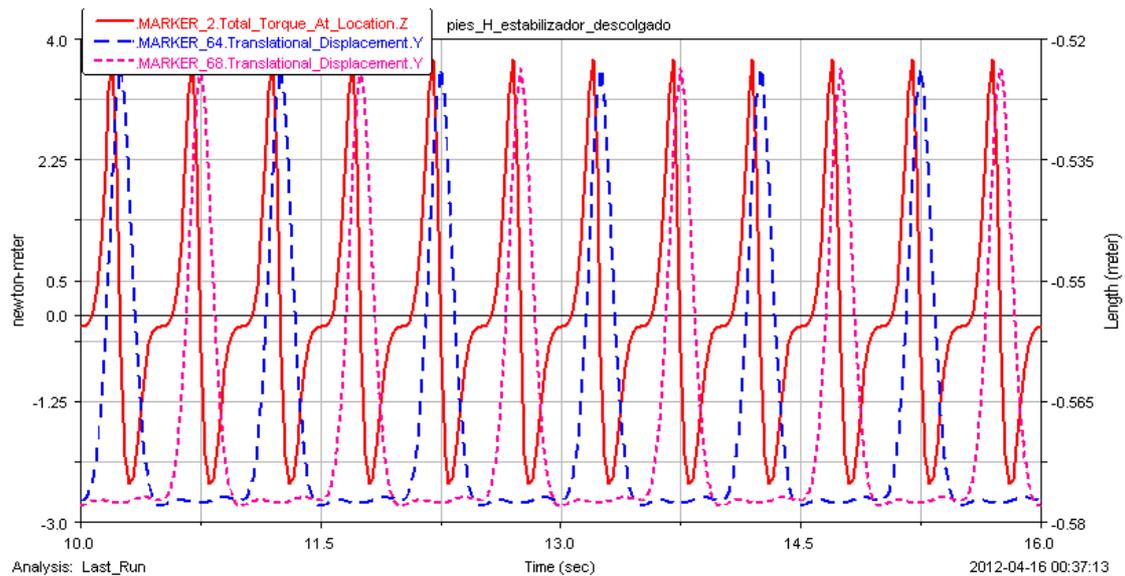
Gráfica 111: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z a 360º/s

Si se compara los resultados obtenidos con las gráficas obtenidas para el estabilizador horizontal, se pueden sacar las siguientes conclusiones. El desplazamiento en el eje longitudinal se acorta, como se verá después, está motivado por la desviación transversal que se produce. La oscilación sufrida, genera un mayor desplazamiento vertical mayor, pero no es muy significativo, solo 2 mm más. Por último, el desplazamiento transversal, también se ve incrementado en 1 m, para ese tiempo, valor que hay que tener en cuenta, ya que el modelo del estabilizador horizontal ya sufría una desviación importante.

➤ Par en el modelo colgado



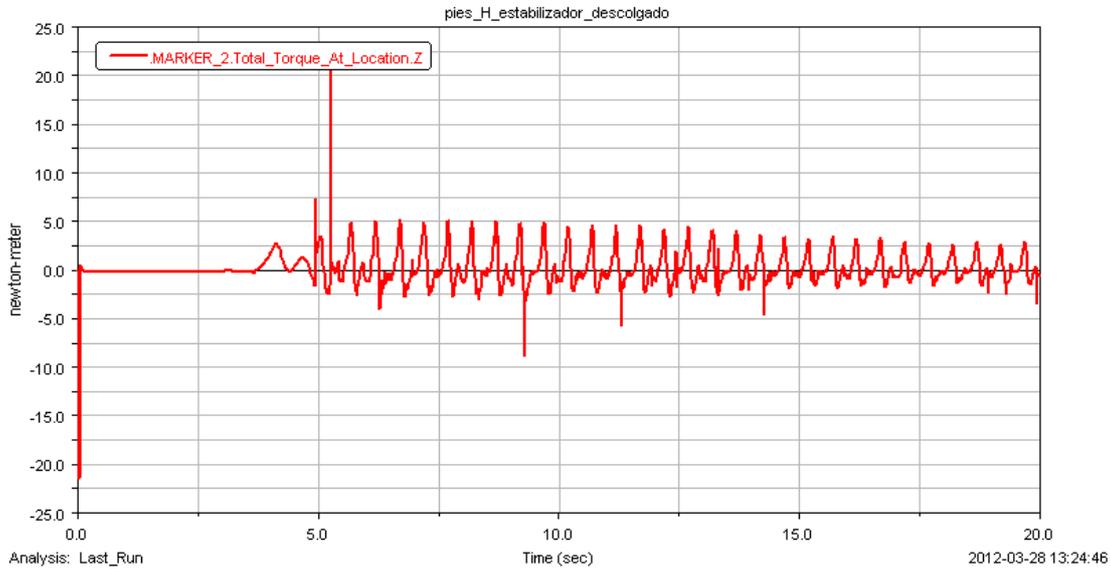
Gráfica 112: Par demandante por la manivela en el modelo colgado a 360º/s



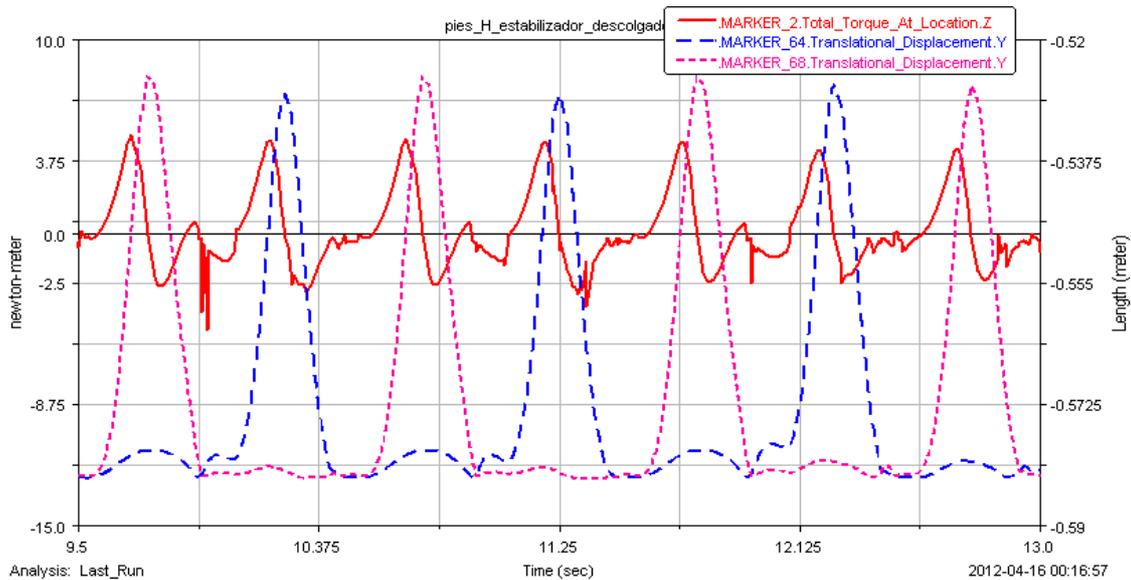
Gráfica 113: Par –Posición vs Tiempo en el modelo colgado a 360º/s

El par demandado por el modelo colgado es ligeramente superior al anterior modelo, a esta velocidad. La variación es ínfima por lo que no es motivo de estudio. El par máximo se da instantes antes del punto más elevado en el paso del pie. La zona de contacto con el suelo se mueve por inercia, como se aprecia en la gráfica, por estar en la zona negativa del par.

➤ Par en el modelo libre



Gráfica 114: Par demandante por la manivela en el modelo libre a 360º/s

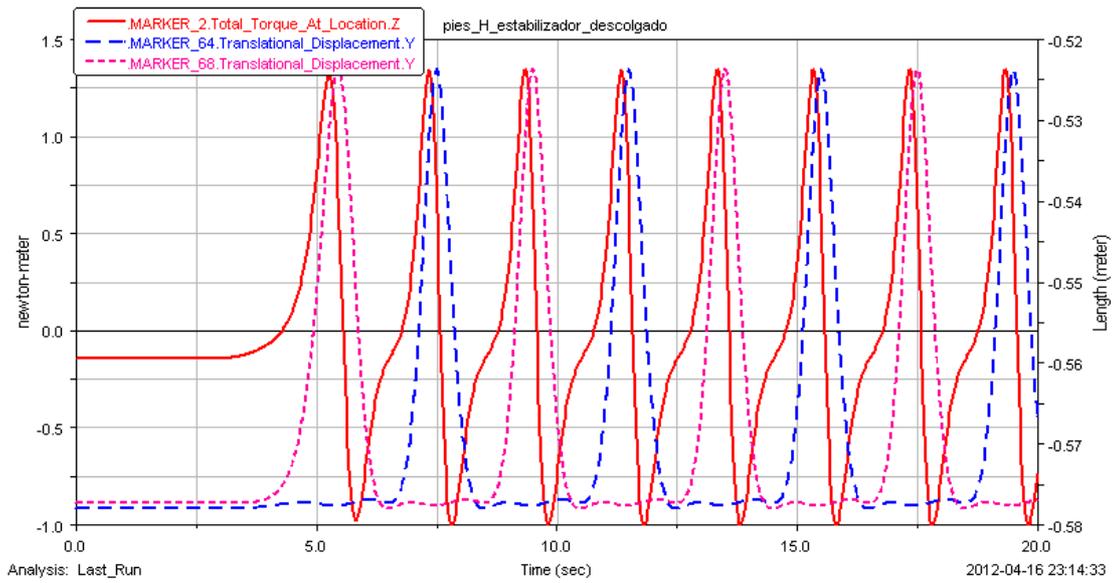


Gráfica 115: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo en el modelo libre a 360º/s

El par demandado por el modelo libre sufre una transición curiosa. Empieza demandando 5 Nm, que es 1,5 Nm más de lo que necesita el modelo con el estabilizador horizontal; pero, a media que avanza en su camino, esta demanda va disminuyendo hasta estabilizarse en 2,5 Nm. La forma de la curva del par es similar al resto que se han calculado para modelos libres. La única salvedad que se puede observar es que las primeras zonas de contacto de los pies con el suelo, necesita aportar potencia por parte del motor para continuar su camino; en cambio, según avanza, es capaz de moverse por su inercia en estos instantes.

5.3.2.3. Velocidad de 90°/s

Al igual que ha ocurrido al aportar una velocidad de 180°/s, la velocidad de 90°/s es insuficiente para que el modelo camine. Pierde el equilibrio hacia atrás. Por tanto, ha sido imposible dibujar las gráficas de desplazamiento. Las únicas gráficas que se van a ilustrar son las que representan el par demandado por el modelo colgado, que a continuación se verán. Las gráficas de par del modelo libre tampoco se han podido representar.

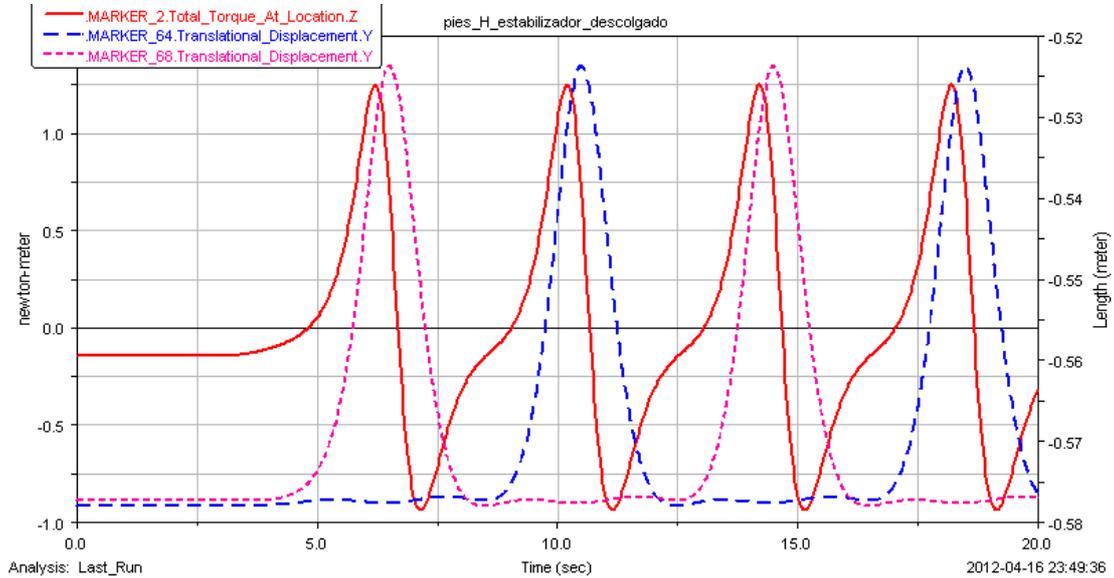


Gráfica 116: Par –Posición vs Tiempo en el modelo colgado a 90°/s

Los resultados obtenidos en estas gráficas siguen la tendencia de todas las gráficas estudiadas hasta el momento, para este modelo (que tiene el estabilizador descolgado), de demandar, en las mismas condiciones, un par ligeramente superior al modelo que tiene el estabilizador horizontal. Por lo demás, el dibujo es similar y los puntos conflictivos son los mismos.

5.3.2.4. Velocidad de 45°/s

A esta velocidad, el modelo también se caía, por lo que sólo se realizó el estudio del par con el robot colgado.



Gráfica 117: Par –Posición vs Tiempo a 45°/s modelo colgado

En esta gráficas se cumple lo mismo que se ha comentado para la velocidad de 90°/s.

Una vez realizado el estudio de las trayectorias y el par generado por el mimbot con el estabilizador descolgado libre de condicionamientos extras, se va a proceder a añadir elementos con diferentes masas (de 1kg, 1,5kg y 2kg), como se hizo para el modelo del estabilizador horizontal. Estas masas se colocarán en diferentes posiciones de la cadera, como se verá más adelante. La velocidad con la que se alimentará el movimiento va a ser de 180°/s.

Se ha realizado un estudio preliminar, motivado por la inestabilidad de este modelo. Esta característica no la tenía el modelo anterior. Para ello se han colocado diferentes masas en lugares distintos de la cadera y comprobado si ayudaban a equilibrar el sistema. Después de muchos ensayos se ha llegado a la conclusión que muestra el siguiente esquema.

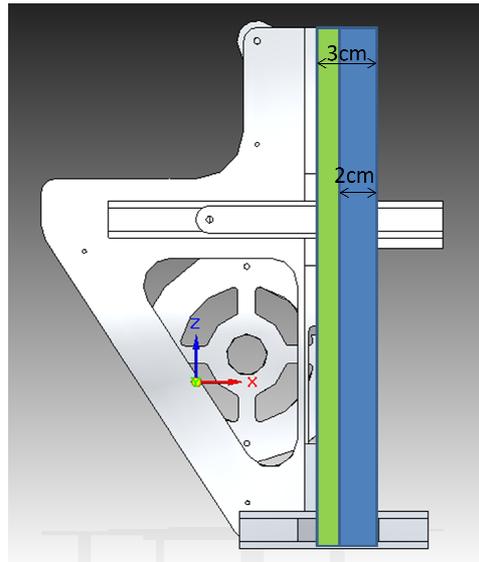


Figura 94 Área de ubicación de las masas para mantener el equilibrio del sistema

El área sombreado de azul corresponde a la superficie en la cual se pueden colocar las masas de 1 kg y el sistema no pierde el equilibrio al caminar. Fuera de esta área el sistema no consigue caminar sin caerse. La suma de las áreas verde y azul forma la zona de ubicación para las masas de 2 kg, fuera de ellas ocurre lo mismo. Por tanto se puede adelantar, que la primera ubicación de las masas no será capaz de mantener el sistema en equilibrio, dado que está fuera de las áreas mencionadas.

5.3.2.5. Adición de masas en el modelo con el estabilizador primitivo

- **Localización A**

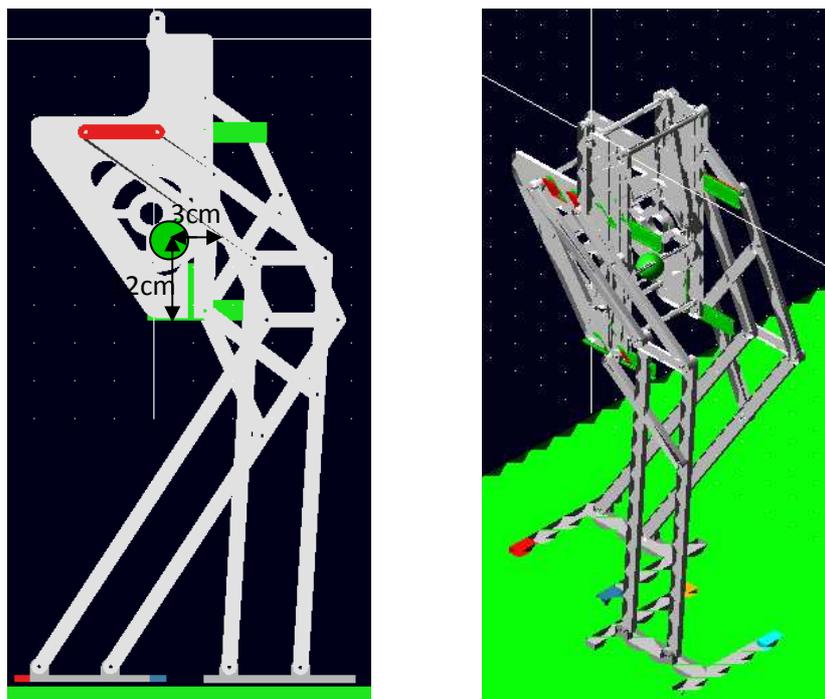


Figura 95 Mimbot con adición de una masa

La primera masa se ha añadido en la posición que indican las imágenes. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

❖ **Masa de 1 kg**

La adición de esta masa no aporta nada relevante al modelo, ya que pierde el equilibrio de la misma forma. LA gráfica del par obtenido para el modelo colgado es similar que si no se hubiese añadido la masa y el resto de gráficas no se pueden estudiar. Por tanto, se pasará a añadir una masa de 1,5 kg.

❖ **Masa de 1,5 kg**

Esta masa tampoco es suficiente para mantener el equilibrio del modelo, se vuelve a desequilibrar al comenzar a caminar. Se probará con una masa de 2 kg.

❖ **Masa de 2 kg**

Esta masa es insuficiente también. Pensando que el problema pudiese venir de las masas, se probó a añadir una masa de 3kg y 4kg, pero también perdía el equilibrio. Por lo que se llegó a la conclusión de que la localización de la masa no era la correcta para corregir el desequilibrio y, por tanto, mejorar la situación del centro de gravedad.

❖ **Masa de 4 kg**

Añadir una masa de 4 kg no soluciona el problema de inestabilidad de este modelo. Pierde el equilibrio de la misma manera que los anteriores.

Una vez comprobado que colocar una masa en esa localización no soluciona los problemas de equilibrio del modelo, se va a probar otra ubicación, como ya se hizo en el modelo del estabilizador horizontal.

- **Localización B**

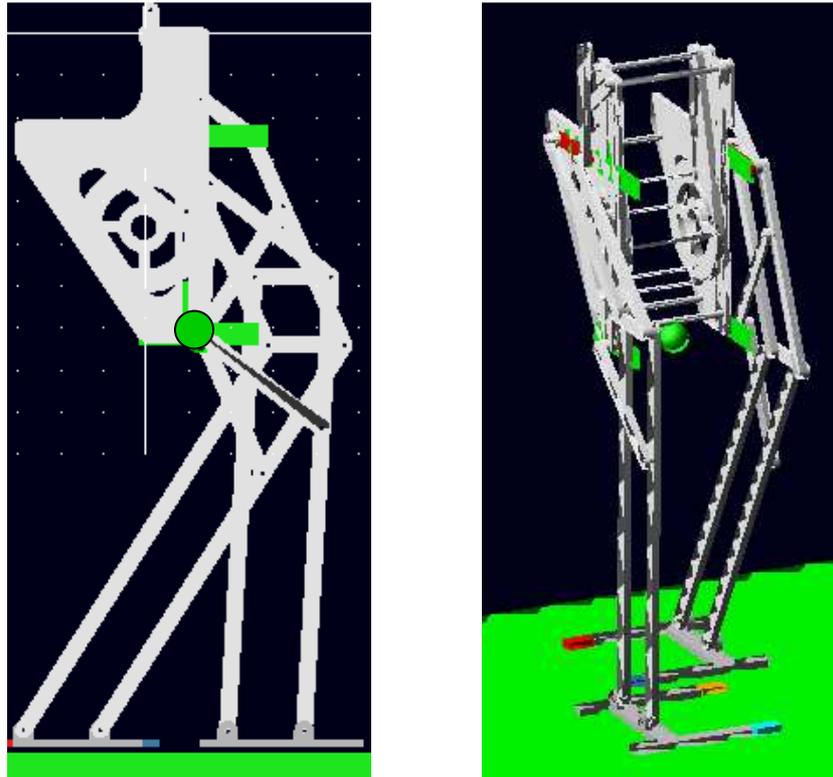


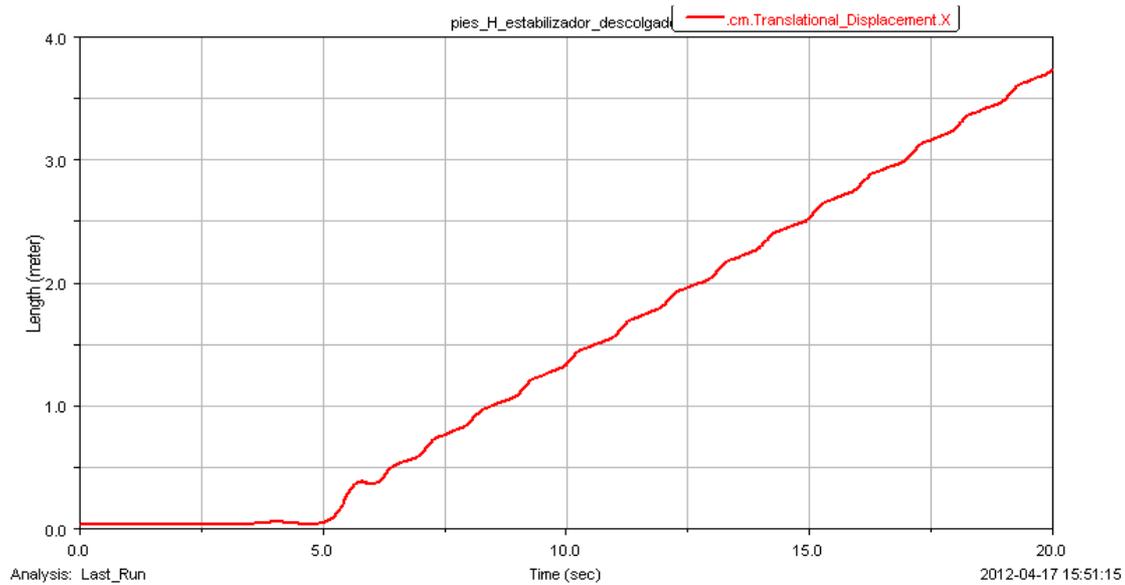
Figura 96 Mimbot con adición de una masa

- ❖ **Masa de 1 kg**

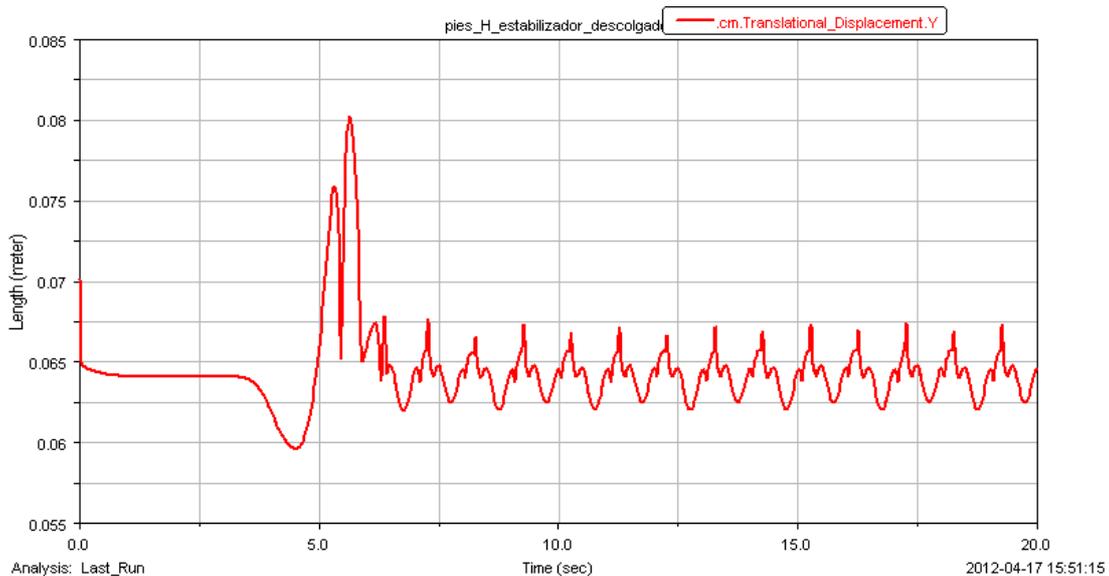
Esta masa no es suficiente para mantener el equilibrio.

- ❖ **Masa de 1,5 kg**

La masa de 1,5 kg, en esa localización consigue que el modelo mantenga el equilibrio al caminar. Por tanto, se puede realizar los estudios de sus trayectorias y el par que demanda. A continuación se detallan todos ellos. Al visualizar la simulación se observa que el arranque es brusco, pero una vez superado el primer paso el paso se estabiliza.

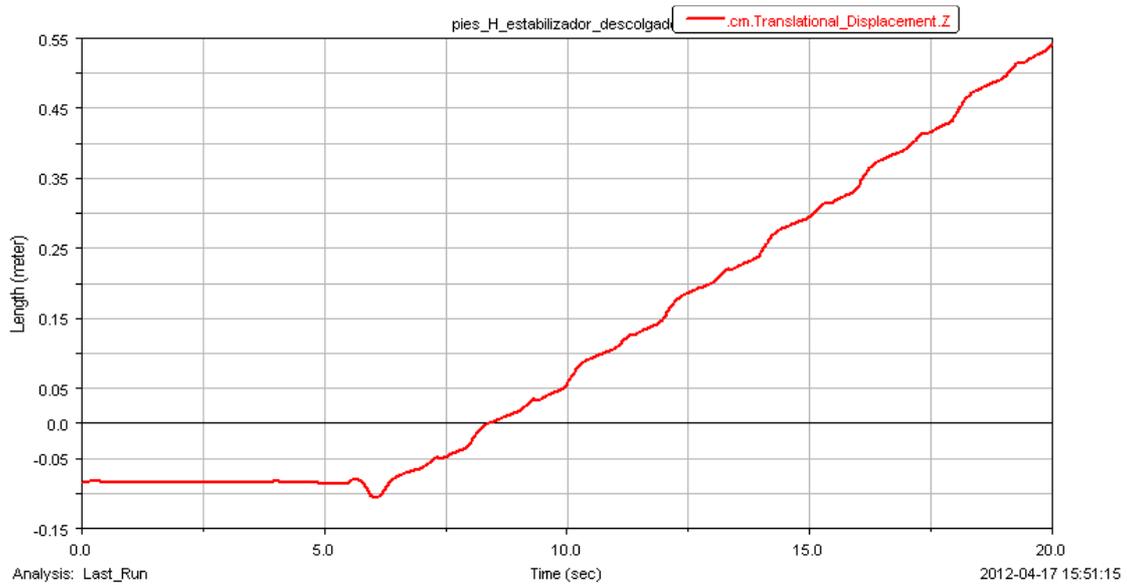


Gráfica 118: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



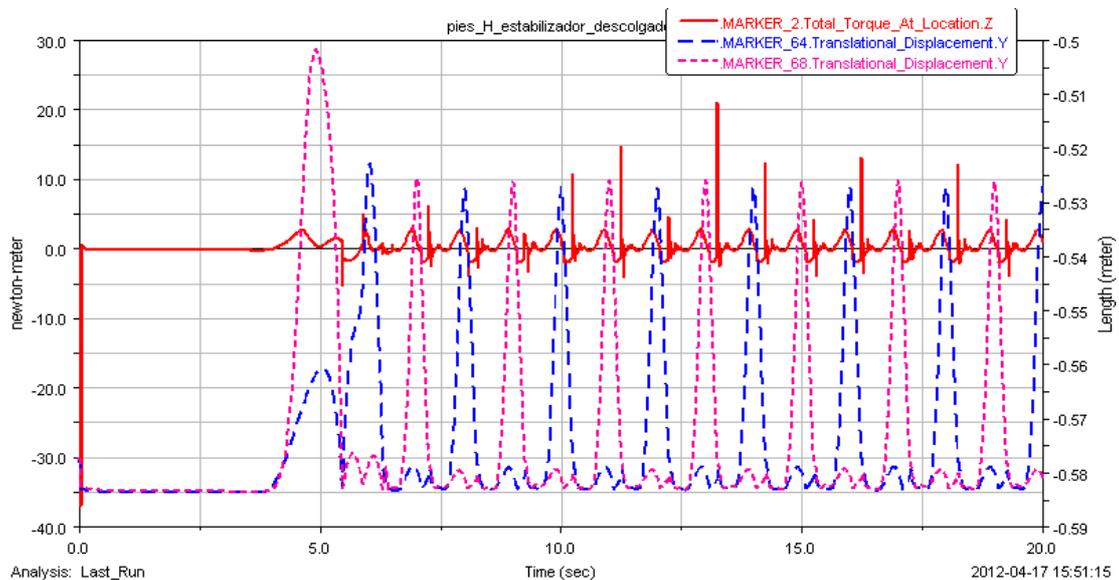
Gráfica 119: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

La trayectoria longitudinal es similar a la descrita por el modelo que tiene el estabilizador horizontal, con esta misma masa. Si bien es cierto que este modelo no sigue una línea tan recta como el anterior, como se puede ver al observar la desviación transversal. En el tiempo que dura la simulación este último desplazamiento es de 60 cm, mientras que en otro modelo era de 14 cm, por lo que produce un aumento muy considerable. Las oscilaciones verticales se ven aumentadas, ligeramente, en 2mm cuando se estabiliza el paso. Al inicio del mismo se produce una gran inestabilidad que genera el pico de desplazamiento.



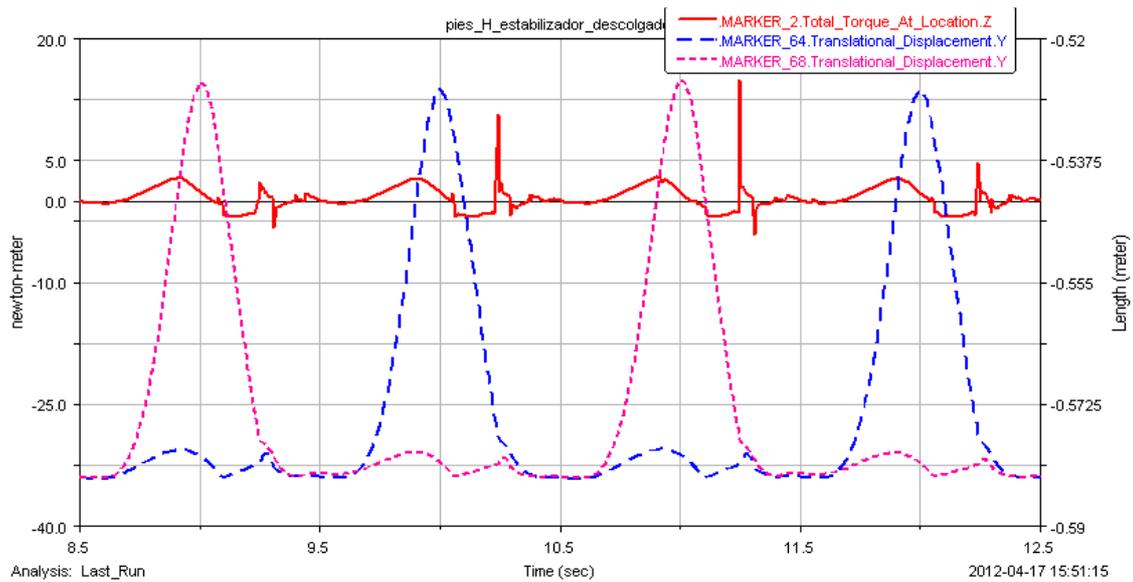
Gráfica 120: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

➤ Par en el modelo libre



Gráfica 121: Par –Posición vs Tiempo

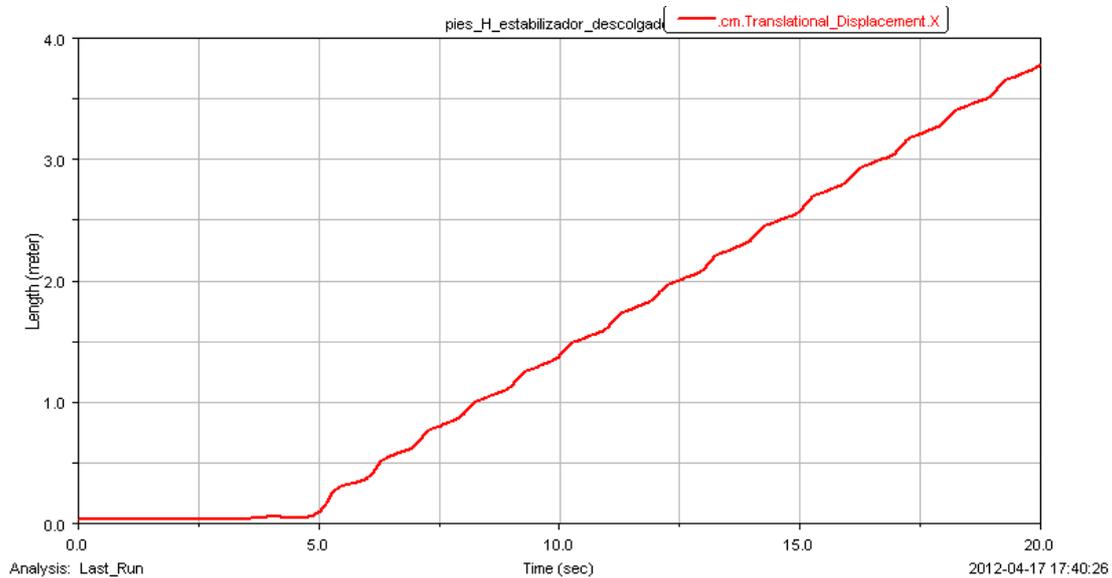
La gráfica del par sigue la tendencia de las anteriores. En ella se pueden ver los puntos críticos de par, que coinciden con el momento en el cual se apoyan los pies. Existe un pequeño aumento de demanda de par, en comparación con el modelo que tiene el estabilizador horizontal. Los instantes que los pies toman contacto con el suelo sufren un pico de par, pero es menor que en el modelo del estabilizador horizontal, necesita un menor aporte de potencia por parte del motor, lo que significa que su inercia ejerce una fuerza mayor. Además, los picos de par, en general, toman valores inferiores a los que habían tomado hasta el momento.



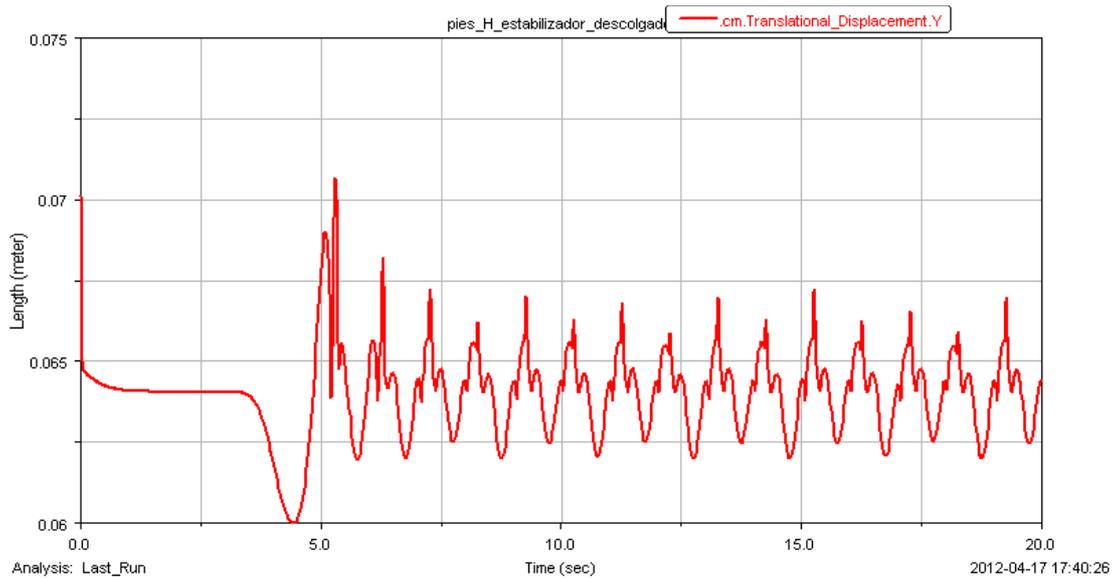
Gráfica 122: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

Una vez realizado el estudio para una masa de 1,5 kg, se compararán con los resultados obtenidos para una masa de 2 kg.

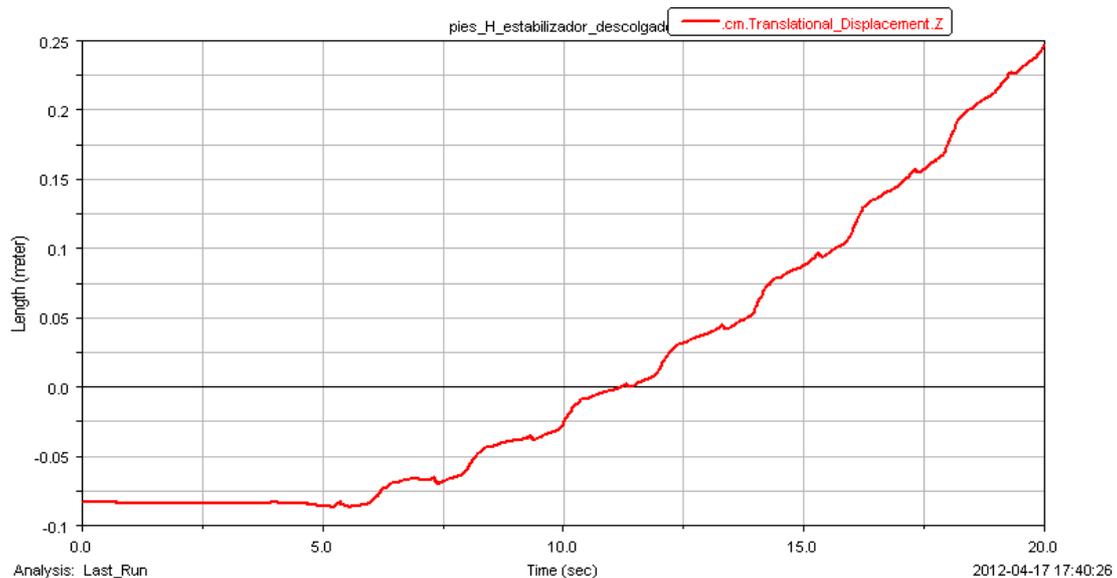
❖ **Masa de 2 kg**



Gráfica 123: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



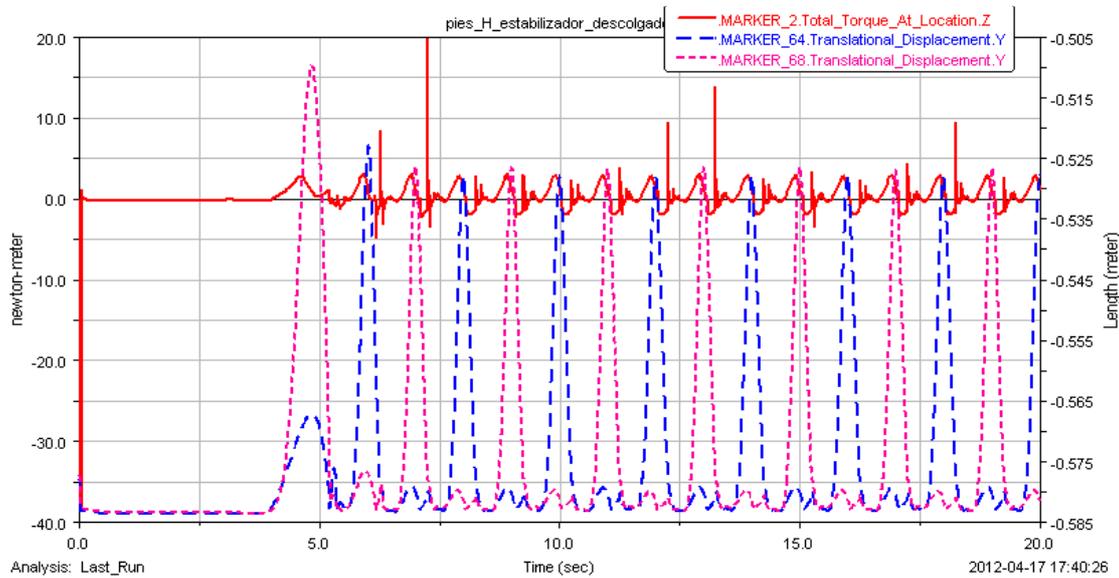
Gráfica 124: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y



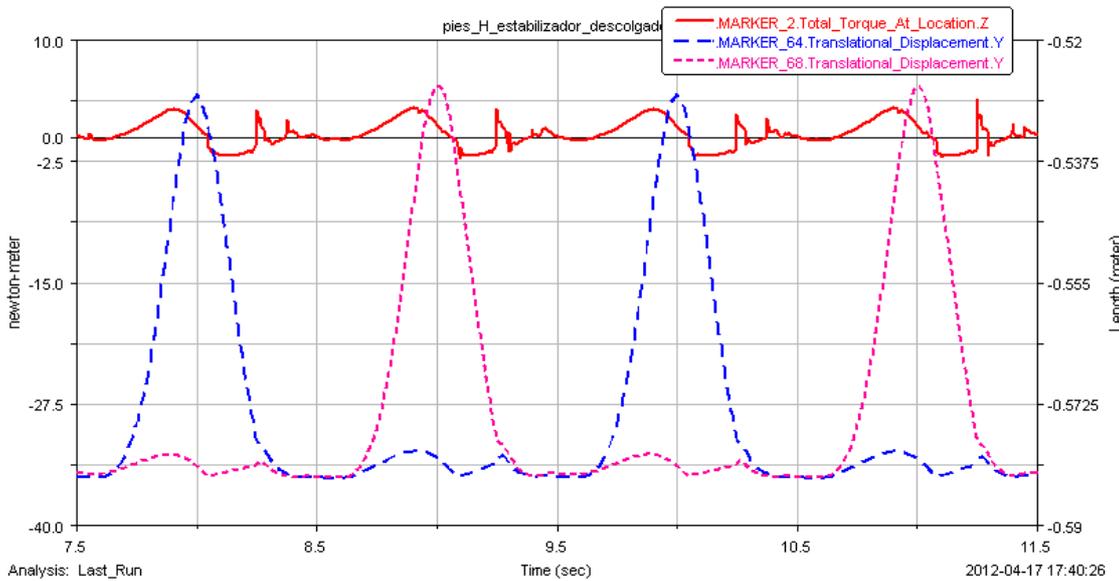
Gráfica 125: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

La trayectoria longitudinal es similar a todas las estudiadas. Las oscilaciones verticales se ven incrementadas, si se compara con el modelo del estabilizador horizontal. Las anteriores tenían una amplitud de 2mm y estas últimas de 4mm, ligeramente inferiores a las que sufría el modelo anterior (con la masa de 1,5 kg). La trayectoria transversal se corrige bastante respecto al anterior modelo. La desviación se reduce en 30 cm, pasa de 60 cm a 30 cm, lo que demuestra la influencia que puede tener una masa tan pequeña en la trayectoria del robot. Es un dato positivo, pero el resultado es muy superior al obtenido en el modelo del estabilizador horizontal.

➤ Par en el modelo libre



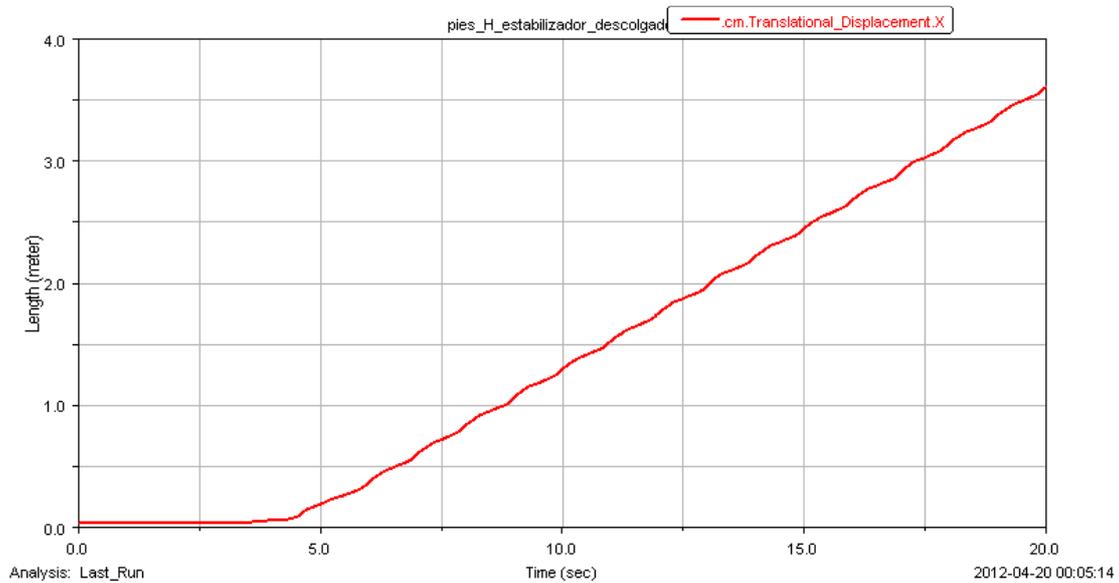
Gráfica 126: Par –Posición vs Tiempo



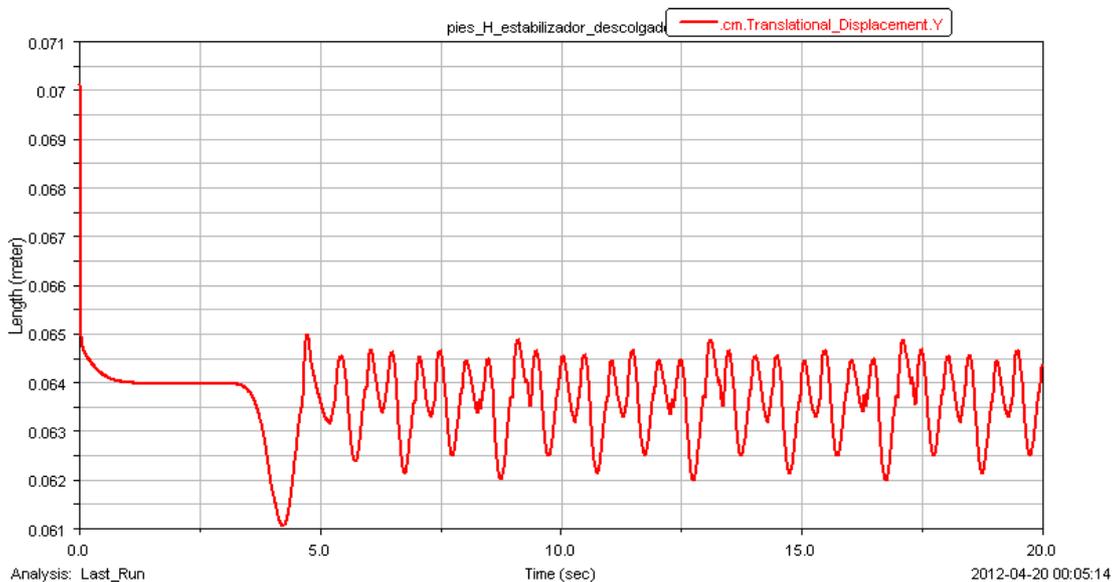
Gráfica 127: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

Las gráficas de par dan el resultado esperado, la demanda es ligeramente superior a la del modelo que tiene el estabilizador horizontal. Los picos de par son más suaves, como ocurría con la masa de 1,5 kg. El comportamiento sigue la tendencia de todas las gráficas estudiadas hasta el momento.

❖ Masa de 4 kg

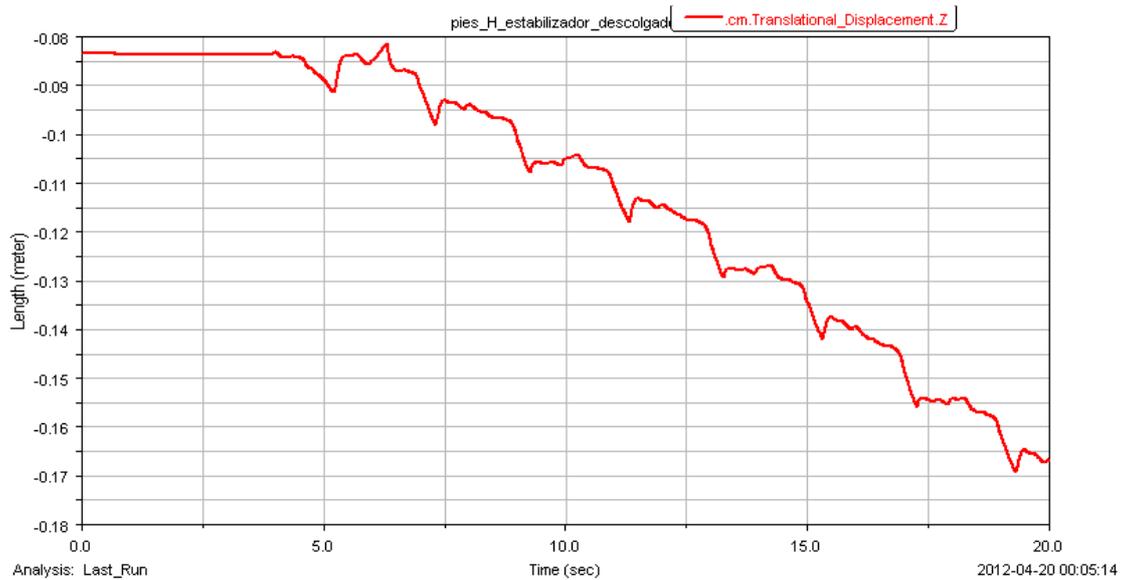


Gráfica 128: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



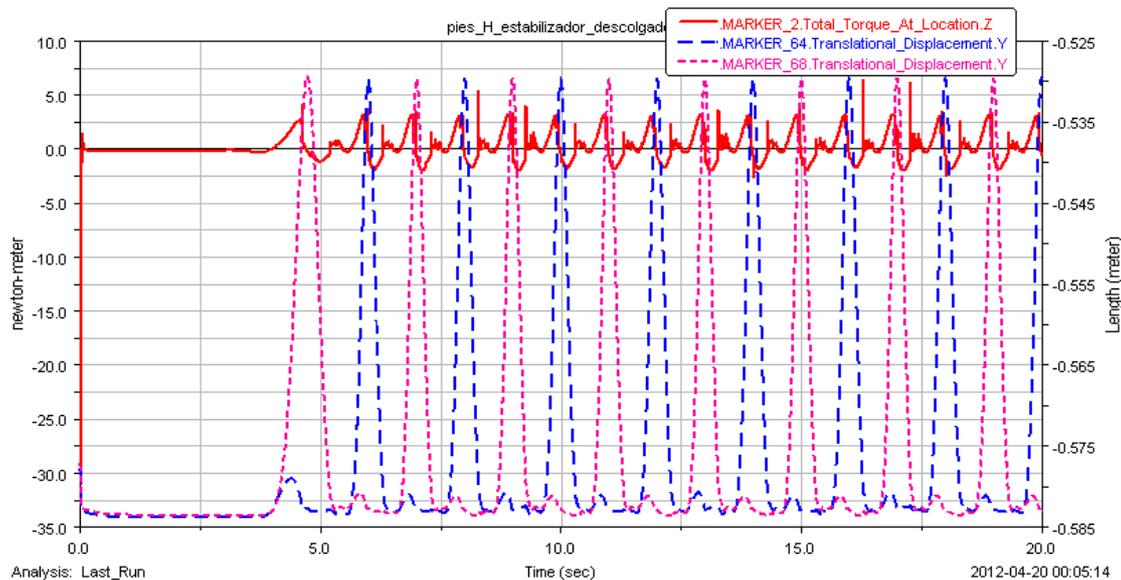
Gráfica 129: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

El desplazamiento en el eje longitudinal se ve ligeramente reducido. Las oscilaciones verticales disminuyen de forma significativa, beneficiando a la marcha del robot. La desviación transversal sufre un descenso muy pronunciado y, además cambia la dirección de la desviación. Esta distancia se reduce a solo 8.5 cm, que para este modelo es muy baja.



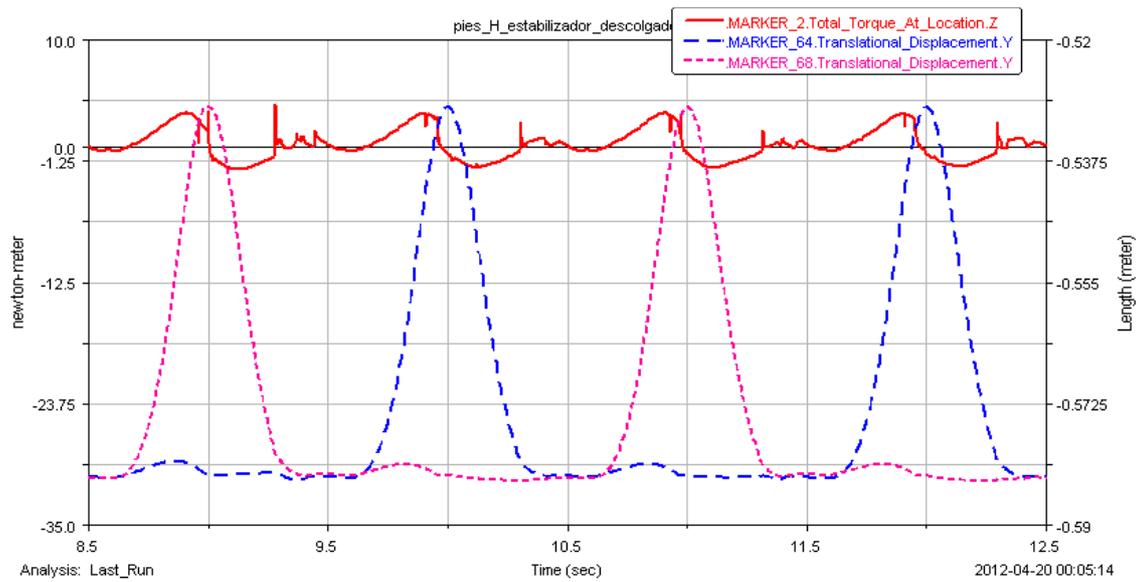
Gráfica 130: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

➤ Par en el modelo libre



Gráfica 131: Par –Posición vs Tiempo

El par demandado por este modelo es ligeramente superior que para la masa de 2 kg, pero este aumento sigue la linealidad que ha sufrido los anteriores. Se puede observar que la zona de movimiento pasivo, en la que el par es negativo, no tiene picos, como tenían las anteriores. Esto es porque al existir oscilaciones menores, el contacto del pie con el suelo es más suave y por tanto más beneficioso para caminar.



Gráfica 132: Detalle de la gráfica Par-Posición vs Tiempo

A continuación se va a estudiar la tercera, y última distribución de masas.

- **Localización C**

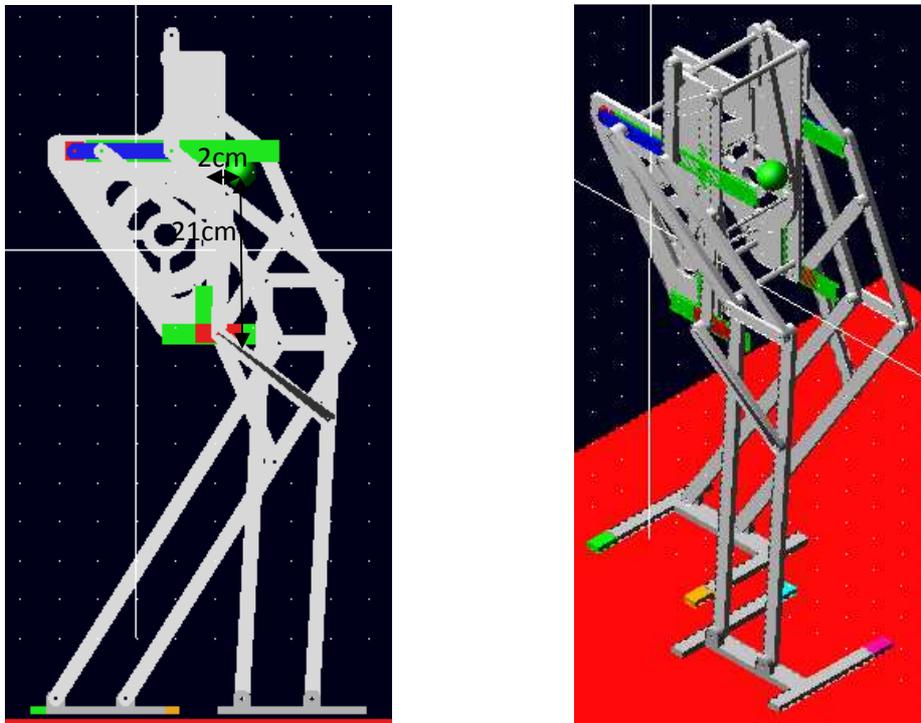
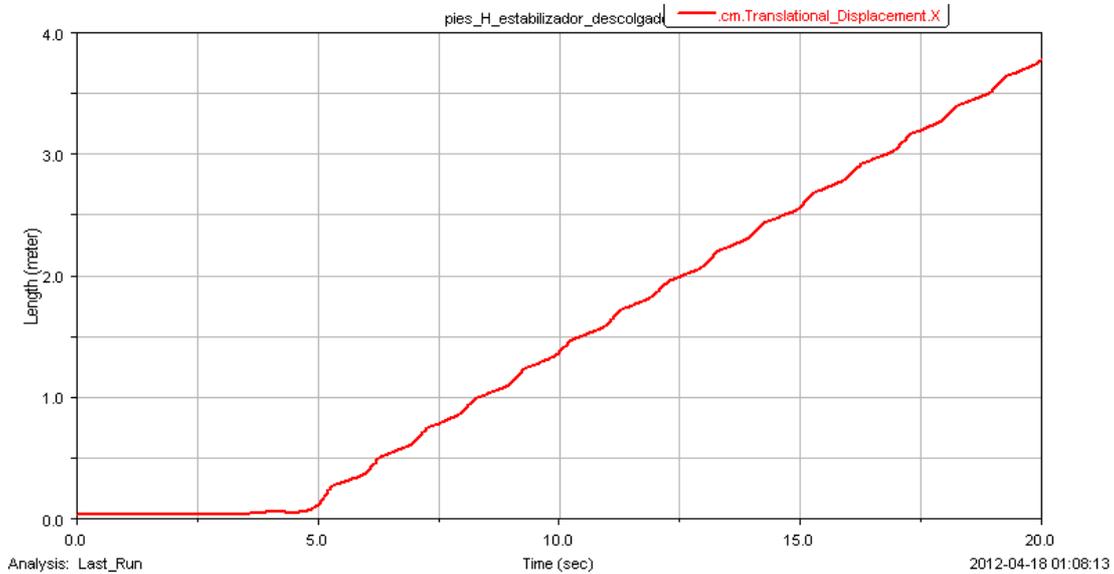
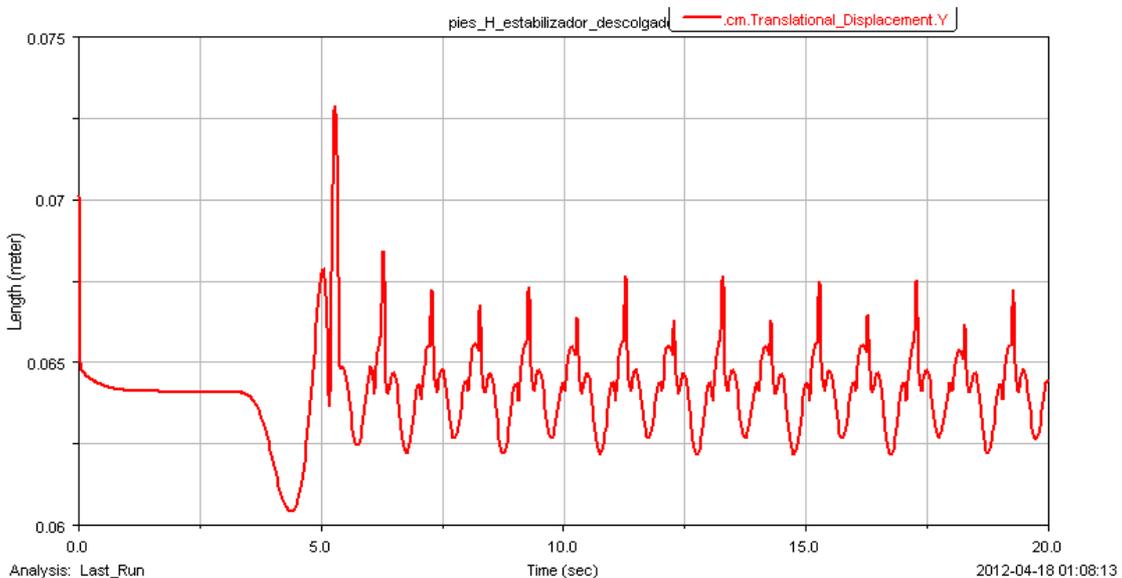


Figura 97 Mimbot con adición de una masa

❖ Masa de 1kg



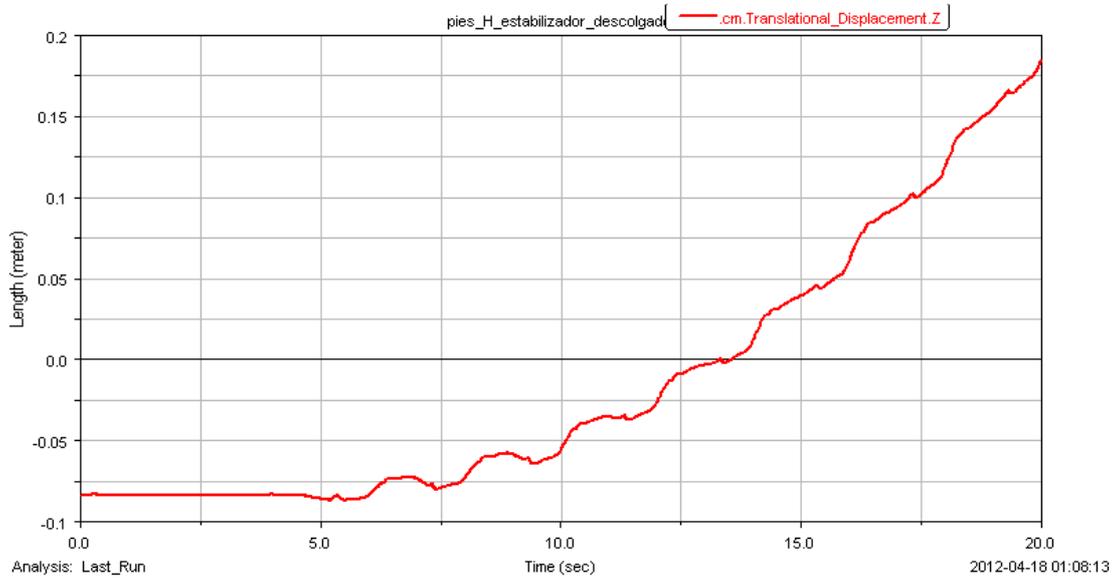
Gráfica 133: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



Gráfica 134: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y

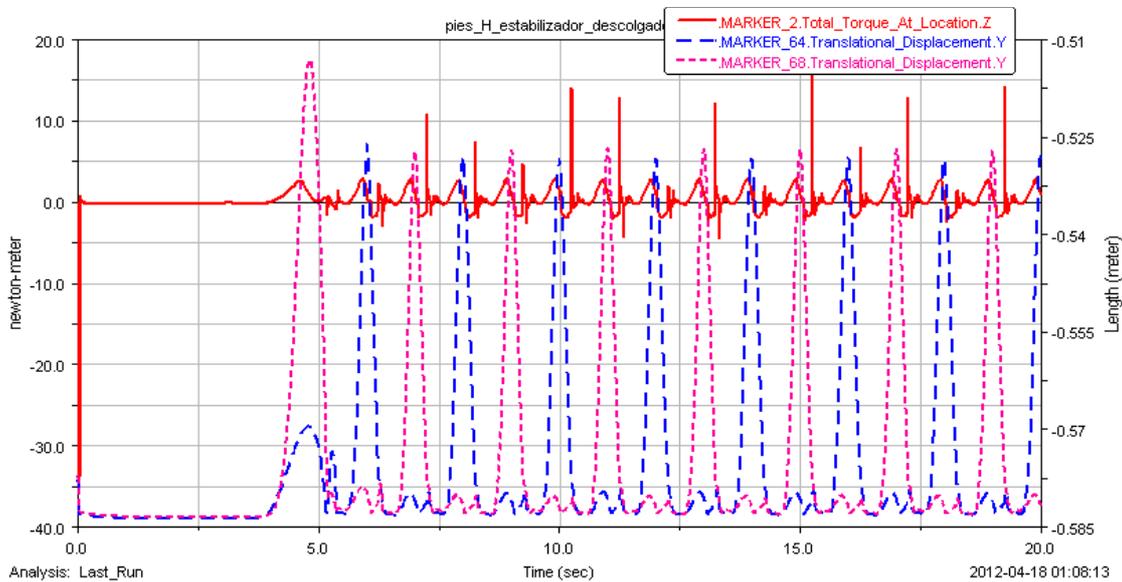
El desplazamiento longitudinal y vertical no se ven alterados de forma significativa en este modelo. En cambio, la desviación transversal se ve corregida de forma muy notable. La desviación sufrida es de 24 cm, que para este modelo es un resultado muy aceptable. En anteriores ensayos sufría un desplazamiento lateral muy superior.

Otro dato a considerar es que colocando la masa en este lugar, el modelo ha sido capaz de caminar con una masa de 1 kg, lo que no se había podido conseguir añadiéndola en otras ubicaciones

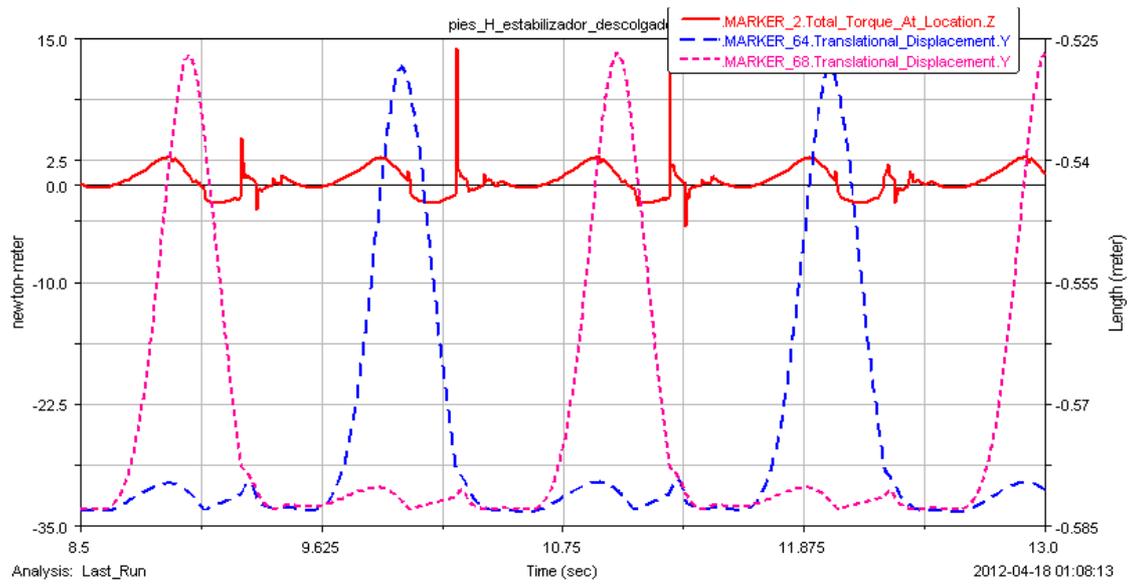


Gráfica 135: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

➤ Par en el modelo libre



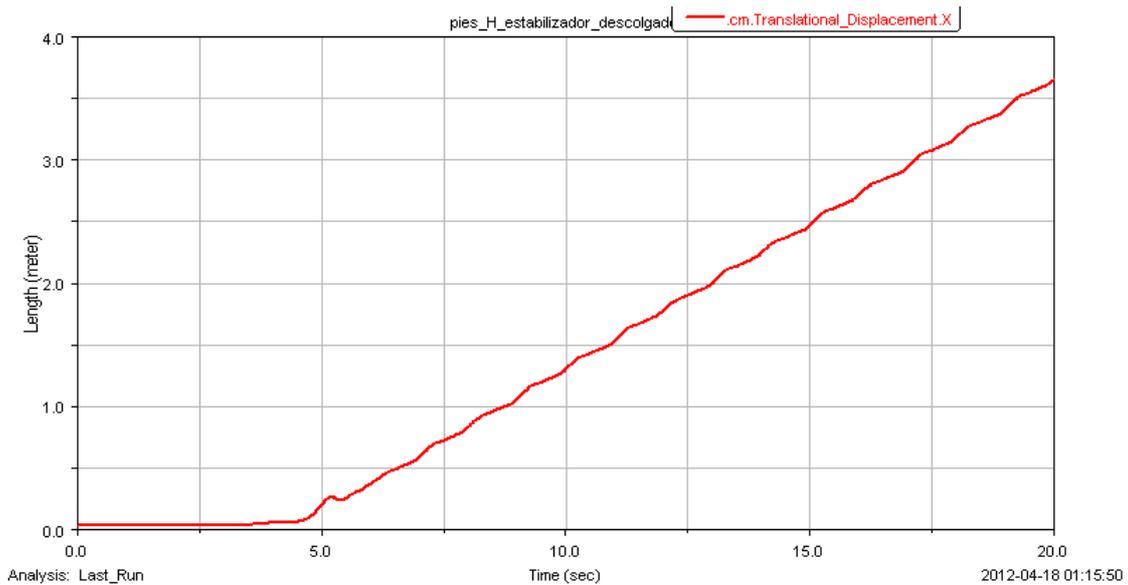
Gráfica 136: Par –Posición vs Tiempo



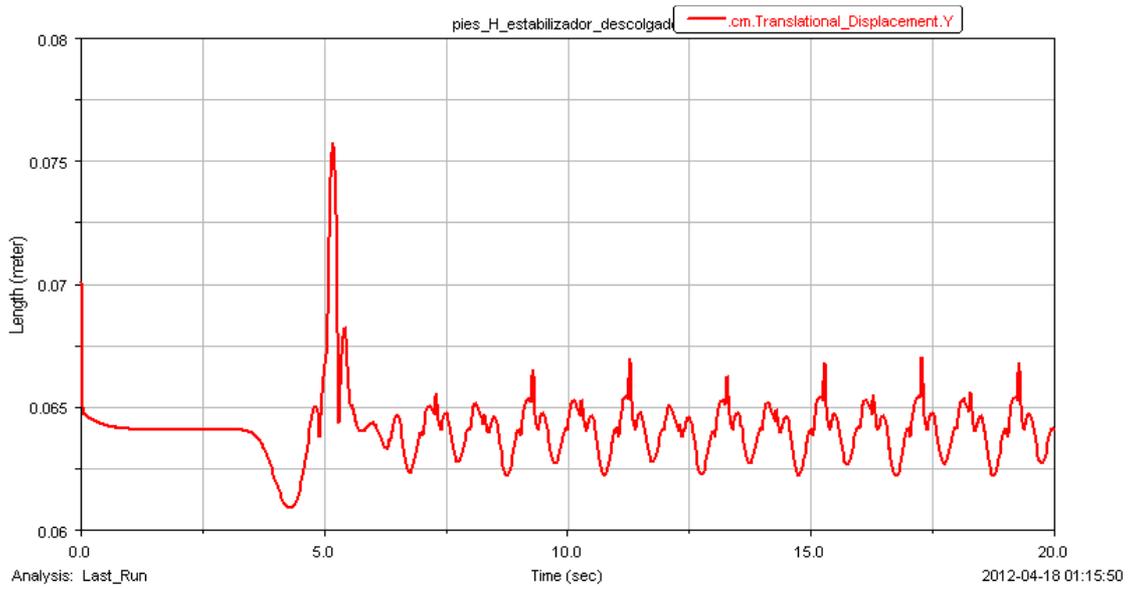
Gráfica 137: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

La gráfica del par muestra la tendencia que siguen todos los modelos, no hay nada que destacar.

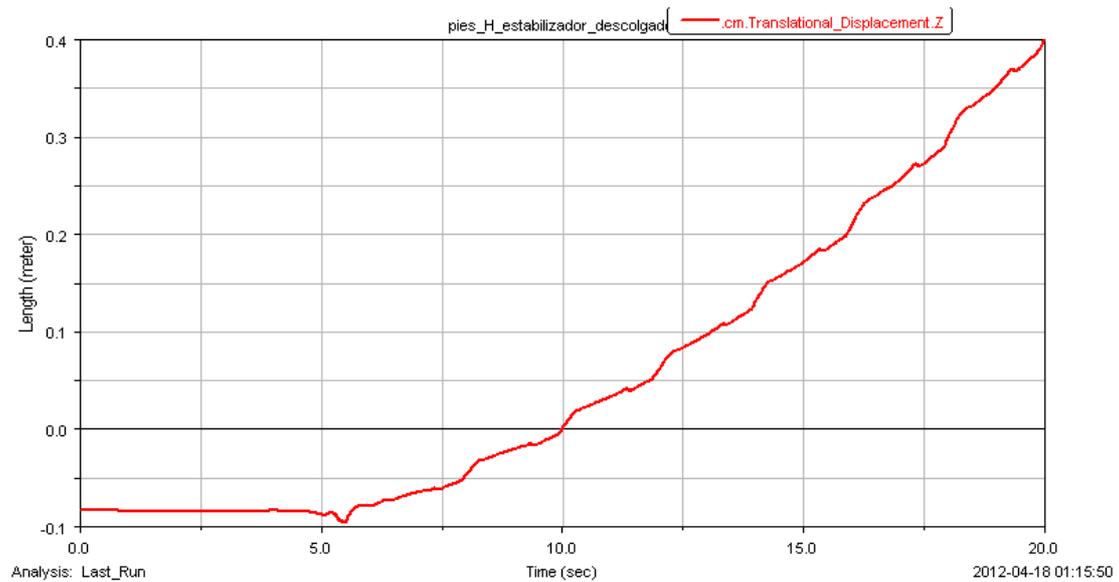
❖ Masa de 1,5 kg



Gráfica 138: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



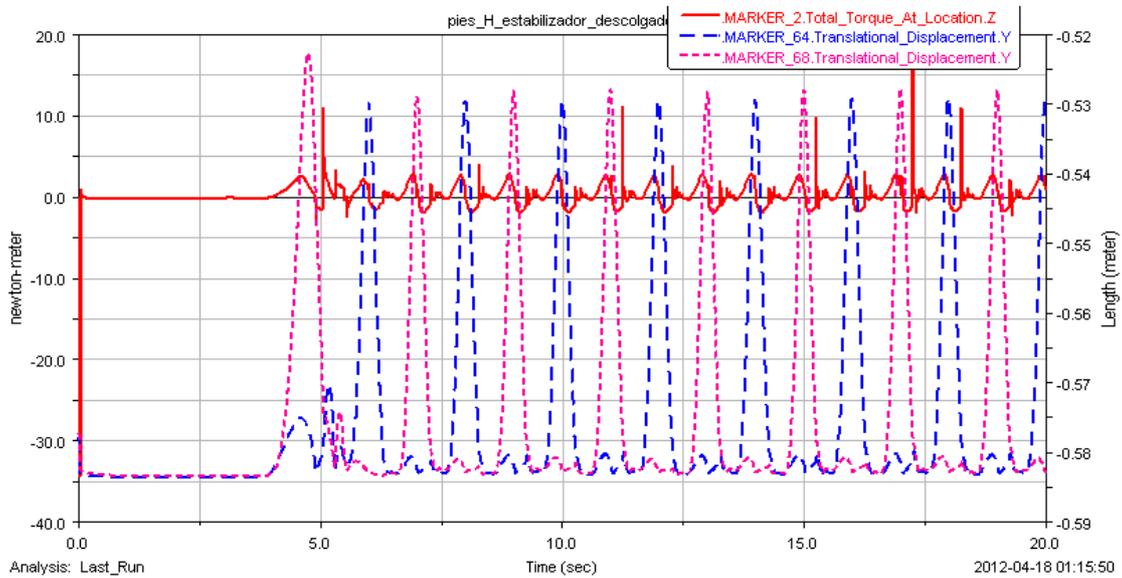
Gráfica 139: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y



Gráfica 140: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

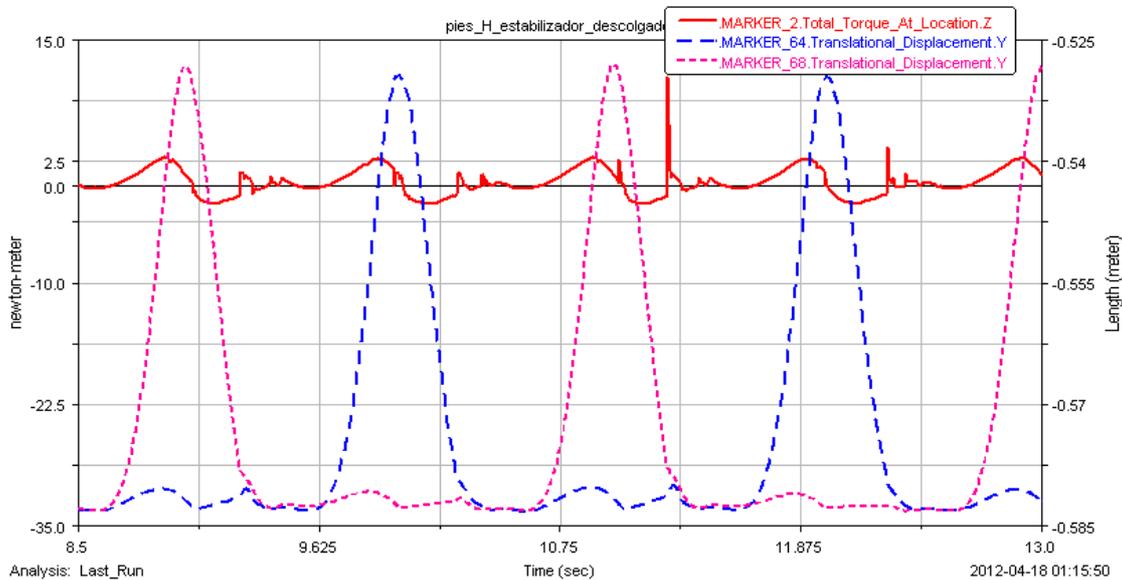
La masa de 1,5 mejora el desplazamiento vertical, reduciéndolo hasta 2,5 mm, el mejor hasta el momento para el modelo con el estabilizador descolgado. Sin embargo la desviación transversal vuelve a ser elevada, el doble de la que se obtenía en el caso anterior.

➤ Par en el modelo libre



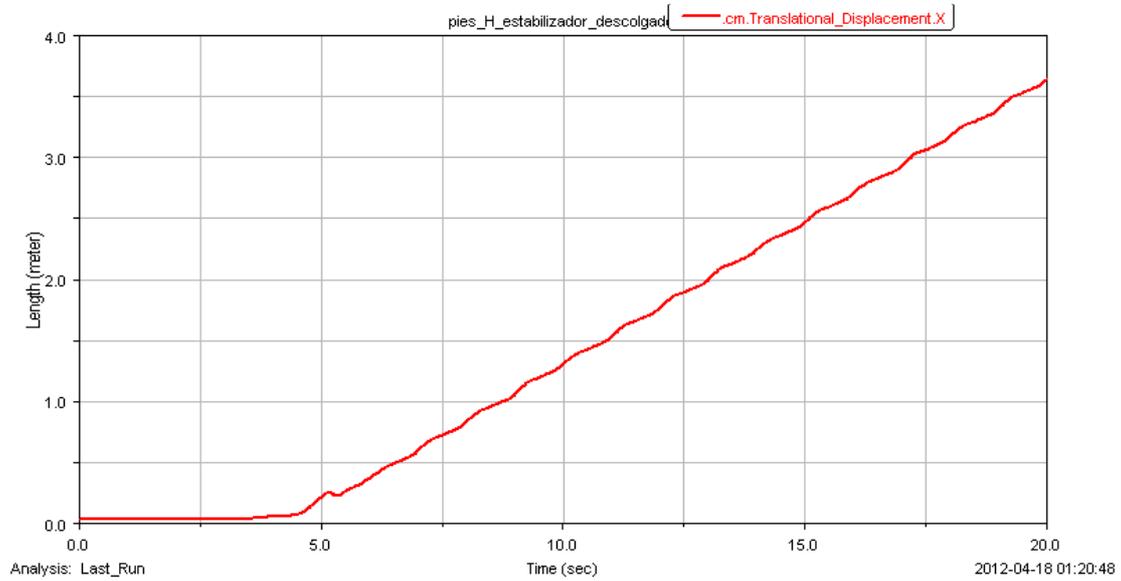
Gráfica 141: Par –Posición vs Tiempo

El par, en este caso, tampoco sufre ninguna alteración.

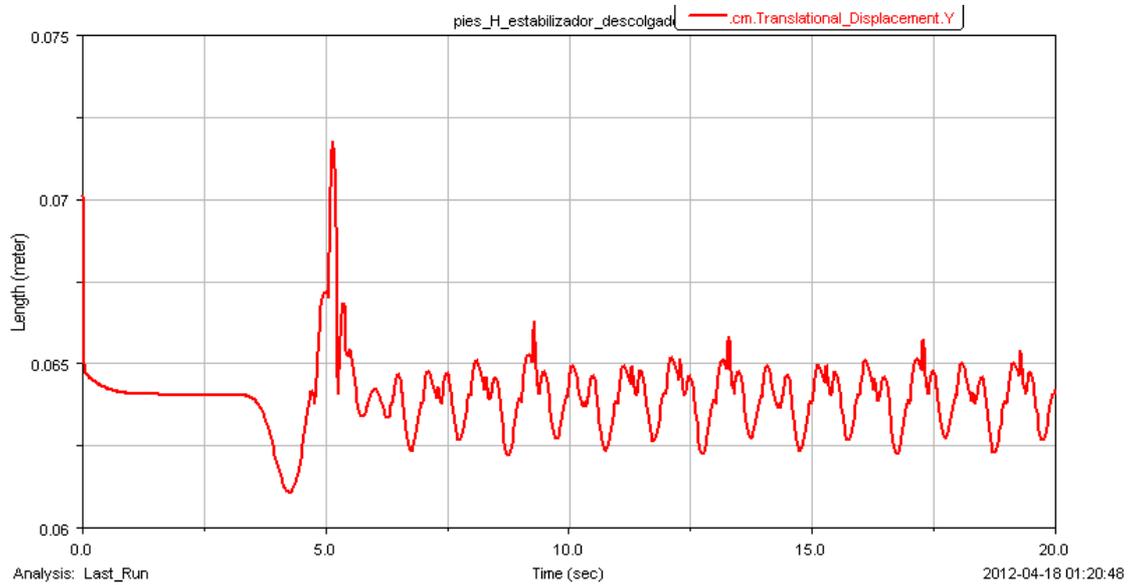


Gráfica 142: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

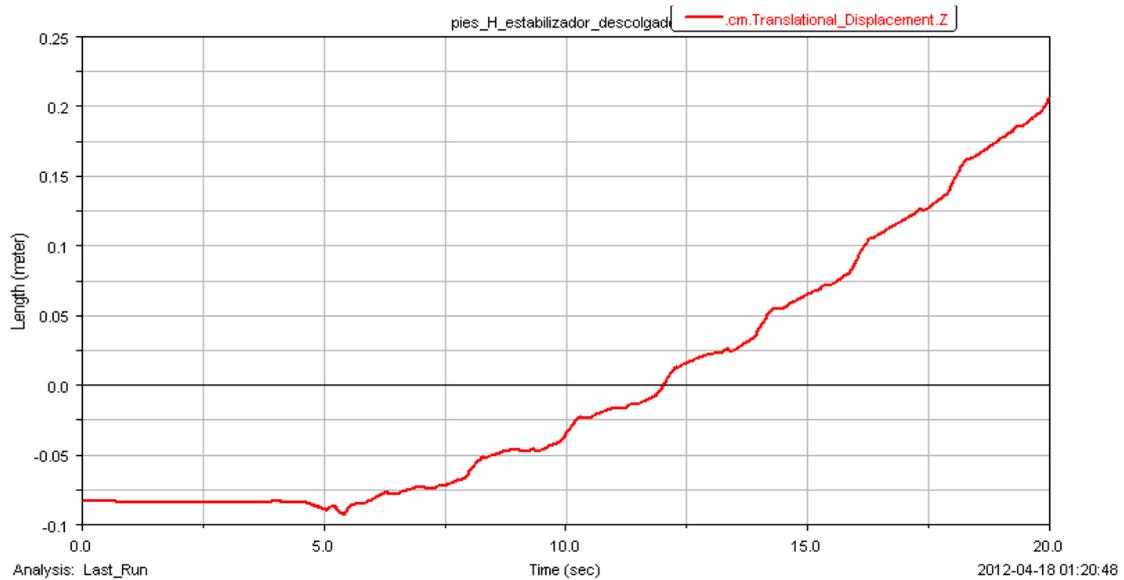
❖ Masa de 2 kg



Gráfica 143: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



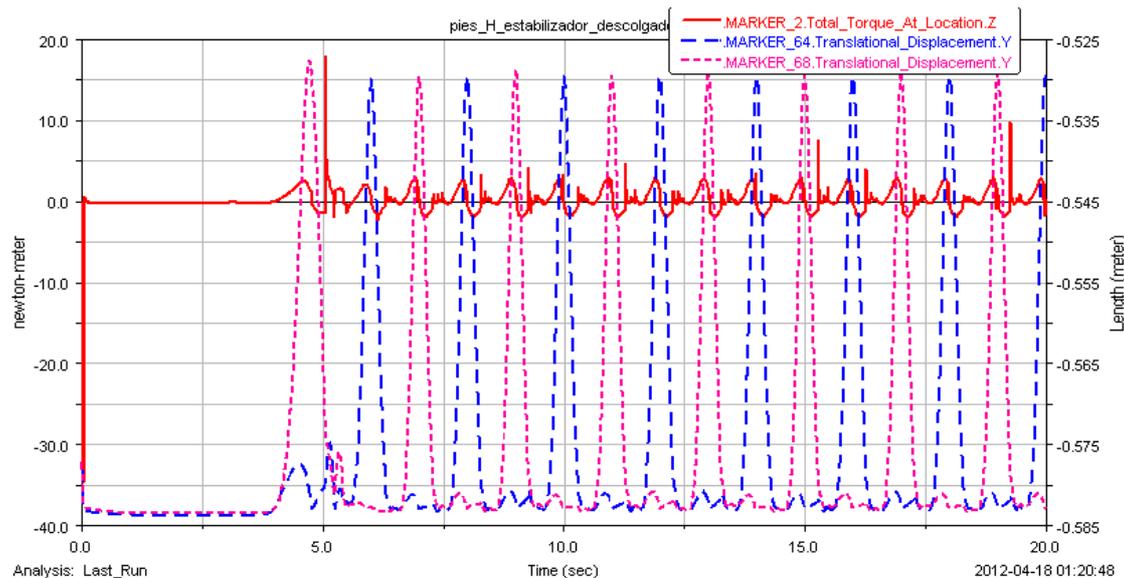
Gráfica 144: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y



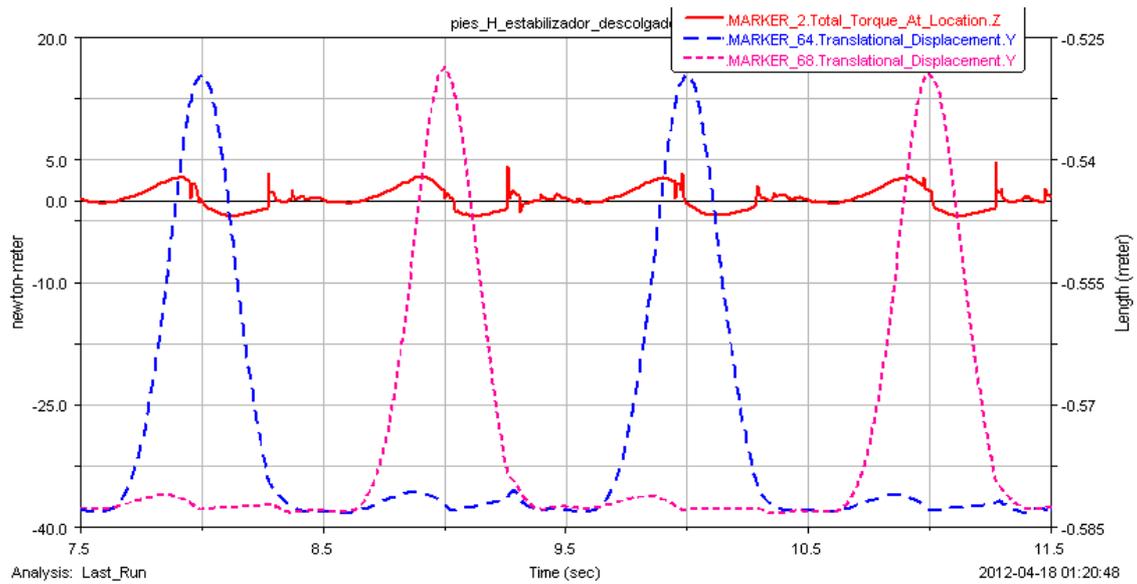
Gráfica 145: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

Las oscilaciones verticales continúan la tendencia a la baja, logrando un desplazamiento de 2,5mm. La desviación transversal no es muy elevada, 28 cm, algo superior que la obtenida para la masa de 1 kg.

➤ Par en el modelo libre



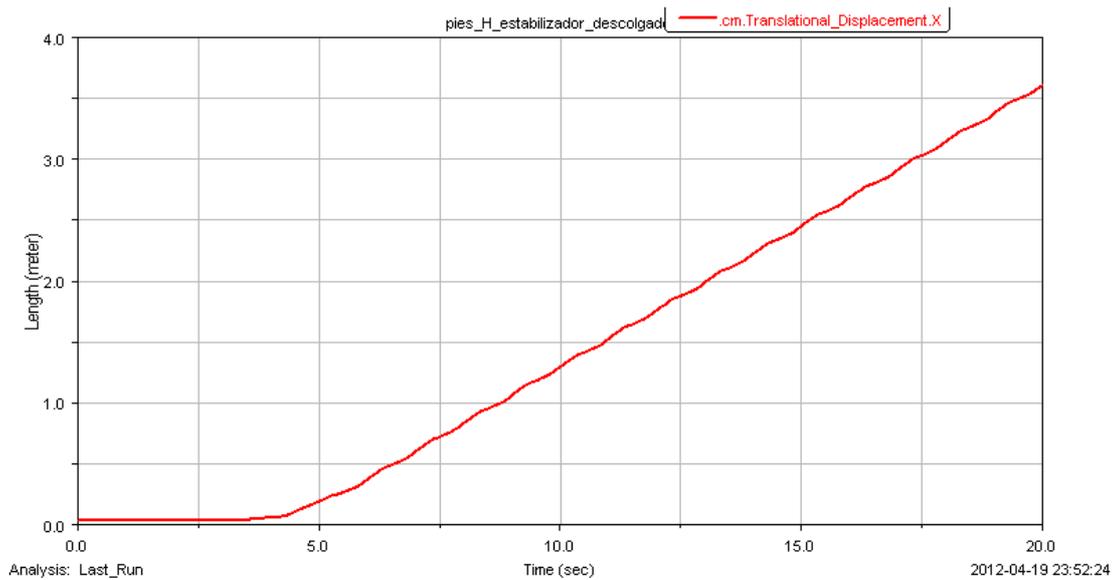
Gráfica 146: Par –Posición vs Tiempo



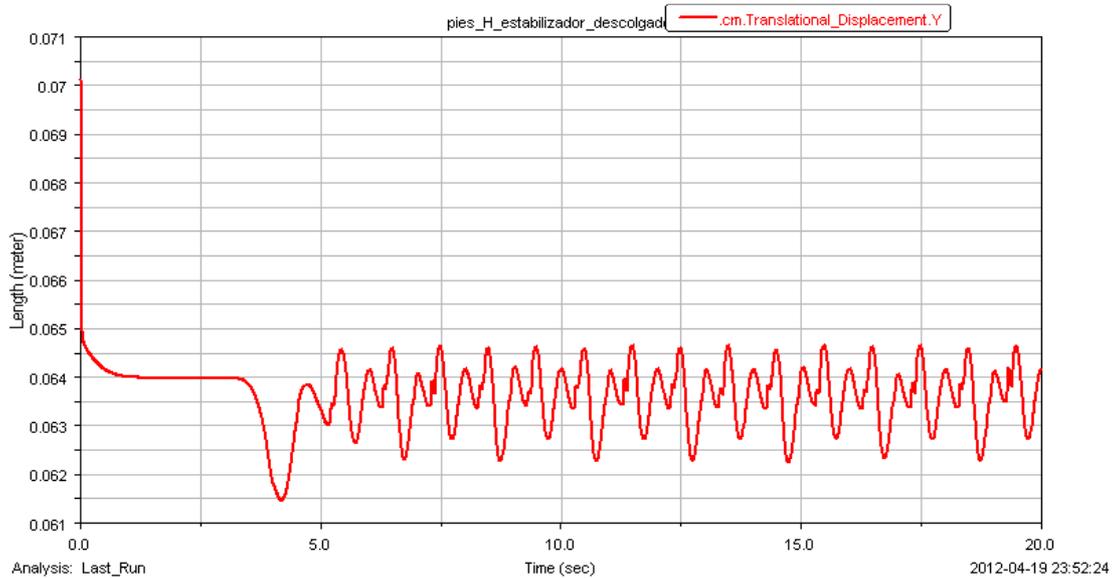
Gráfica 147: Detalle de la gráfica Par –Posición vs Tiempo

El par, en este modelo, tampoco sufre ninguna alteración.

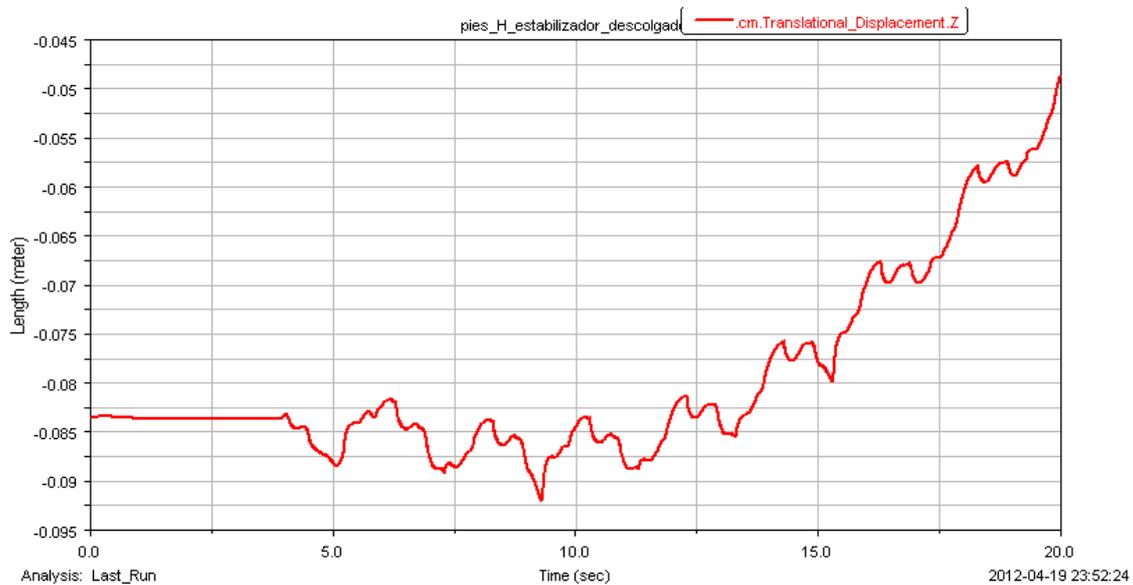
❖ Masa de 4 kg



Gráfica 148: Trayectoria del CM de la cadera en dirección X



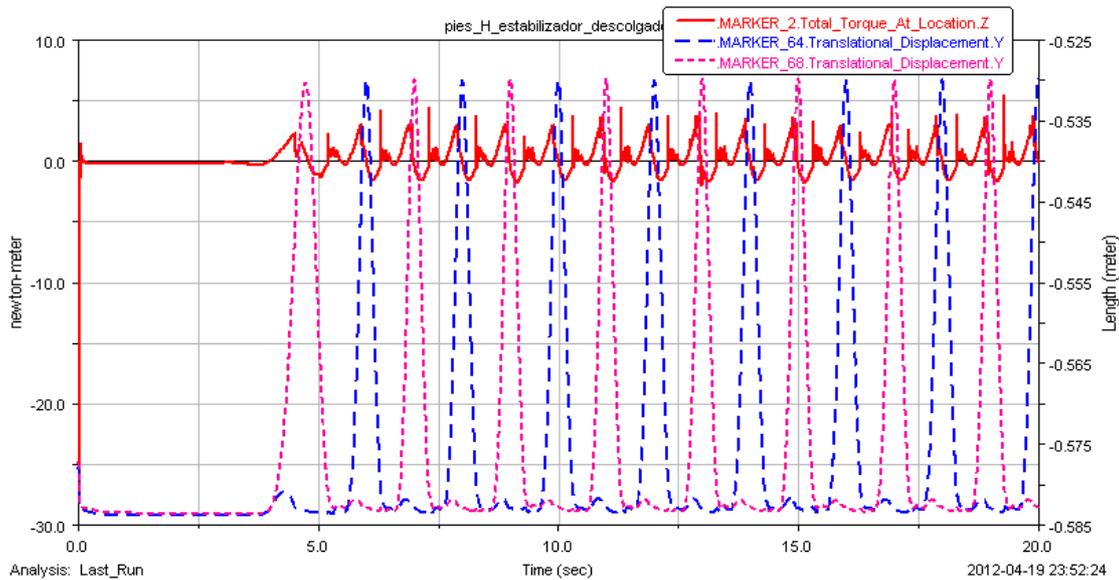
Gráfica 149: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Y



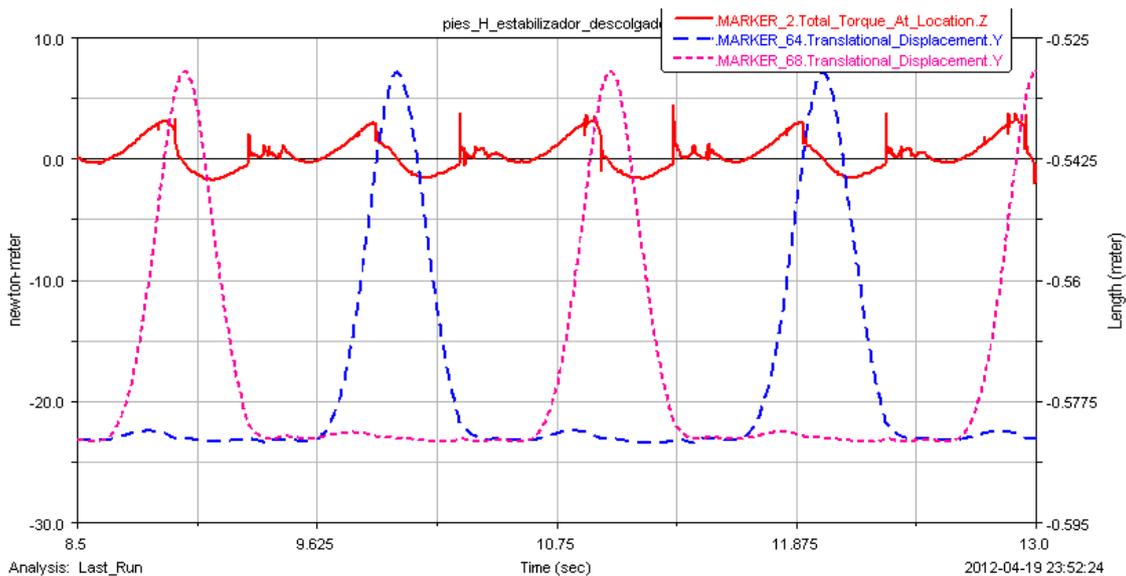
Gráfica 150: Trayectoria del CM de la cadera en dirección Z

La oscilación vertical se ve reducida a 2 mm, que es la mínima que se ha obtenido en este proyecto. La desviación transversal ha sufrido un descenso importante, ha pasado de 28 cm a 4 cm, valor muy pequeño para este modelo.

➤ Par en el modelo libre



Gráfica 151: Par –Posición vs Tiempo



Gráfica 152: Detalle de la gráfica Par-Posición vs Tiempo

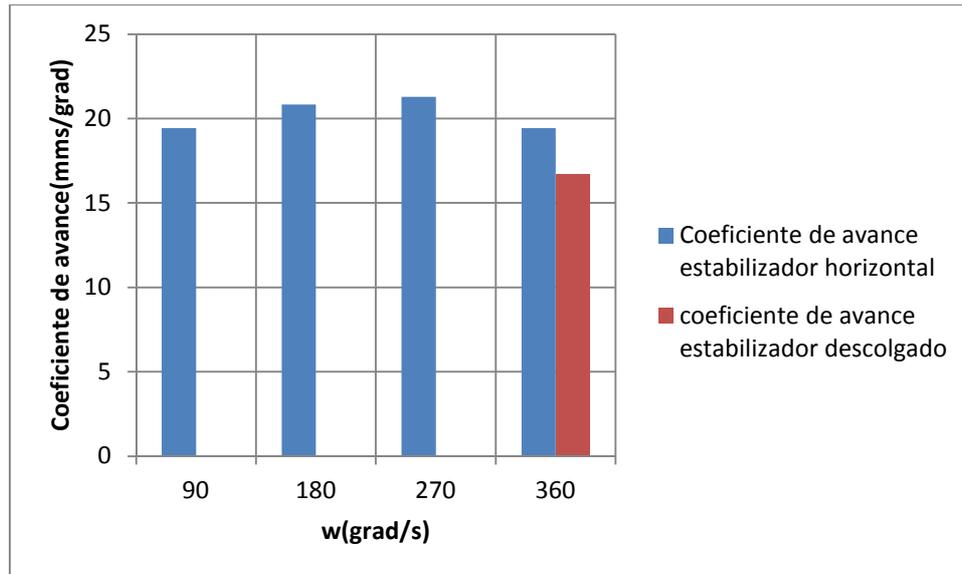
El par sigue la tendencia de los anteriores.

Una vez terminado el estudio de las diferentes gráficas de par se debe comentar que al inicio de las simulaciones se producen los picos más grandes de par y las oscilaciones sufren las mayores amplitudes. Esto es normal ya que el arranque es un momento en el que se produce una demanda de energía grande al tener que superar fuerzas estáticas. Los datos utilizados para las gráficas que se van a estudiar a continuación han sido seleccionados a partir de los 6 segundo de simulación, cuando el paso del modelo libre se estabiliza y con ello su trayectoria y par. Se ha procedido de esta manera por ser un estudio dinámico, en futuros proyectos se estudiarán los esfuerzos estáticos y las oscilaciones y par producidas en el arranque.

5.4. GRÁFICAS COMPARATIVAS

En el siguiente apartado se van a analizar los resultados obtenidos y comparar para extraer conclusiones. Las gráficas obtenidas se clasificarán en dos grupos: Las relacionadas con el desplazamiento en los diferentes ejes y las relacionadas con el par. Se comenzará el estudio con las primeras.

5.4.1. Coeficiente de avance

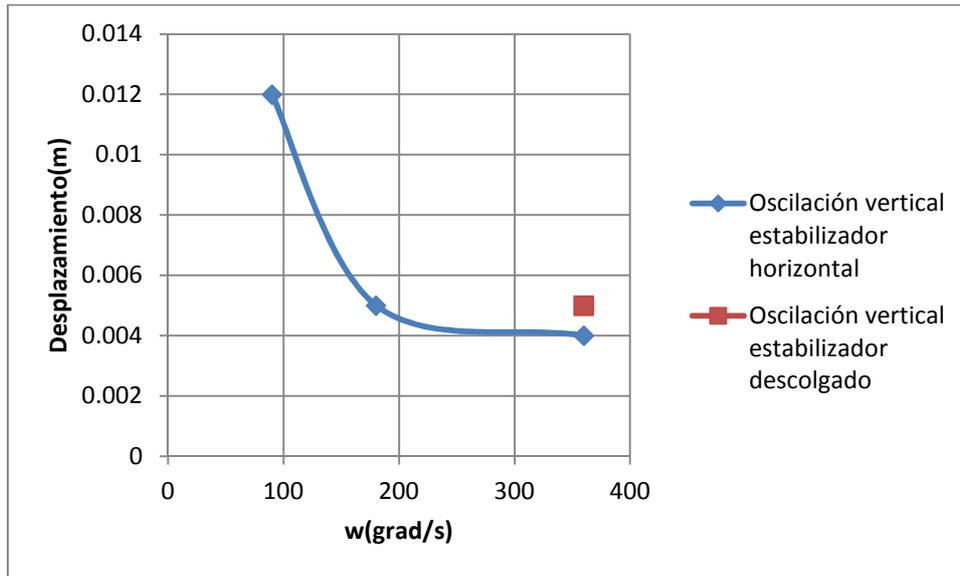


Gráfica 153: Coeficiente de avance de ambos modelos

La primera magnitud que se ha medido ha sido el coeficiente de avance del robot. Esta gráfica mide el avance longitudinal del robot respecto a la velocidad angular de alimentación. Para ello se ha considerado un tiempo de 20 segundos. La primera conclusión que se puede sacar es que la velocidad más eficiente es 270°/s, ya que muestra un mayor valor de esta magnitud; le sigue 180°/s.

Del modelo con el estabilizador descolgado solo se ha podido obtener resultado a 360°/s, ya que las demás velocidades no logran mantener en movimiento al modelo libre sin perder el equilibrio, sin añadir masa adicional, como se ha visto. El coeficiente de avance del modelo con el estabilizador horizontal es superior, a esta velocidad.

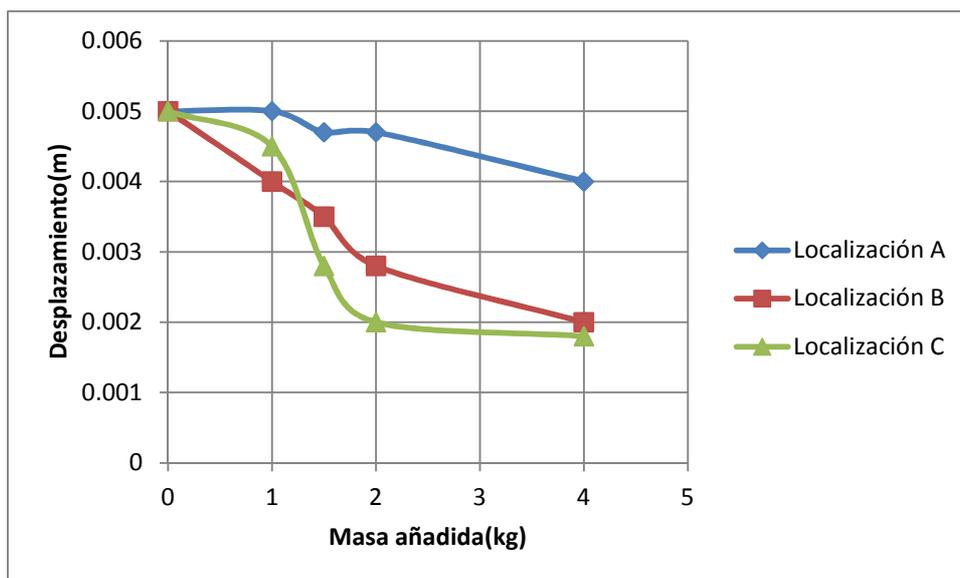
5.4.2. Oscilación vertical



Gráfica 154: Oscilación vertical de ambos modelos

Para el modelo del estabilizador horizontal, el aumento de velocidad favorece la horizontalidad del robot, ya que a medida que se aumenta la amplitud de la oscilación disminuye. Se ve una tendencia a estabilizarse en torno a 4mm. Para el modelo del estabilizador descolgado solo se ha podido obtener resultados a 360º/s. Este resultado muestra que a la misma velocidad el modelo del estabilizador horizontal es más estable que el del estabilizador primitivo.

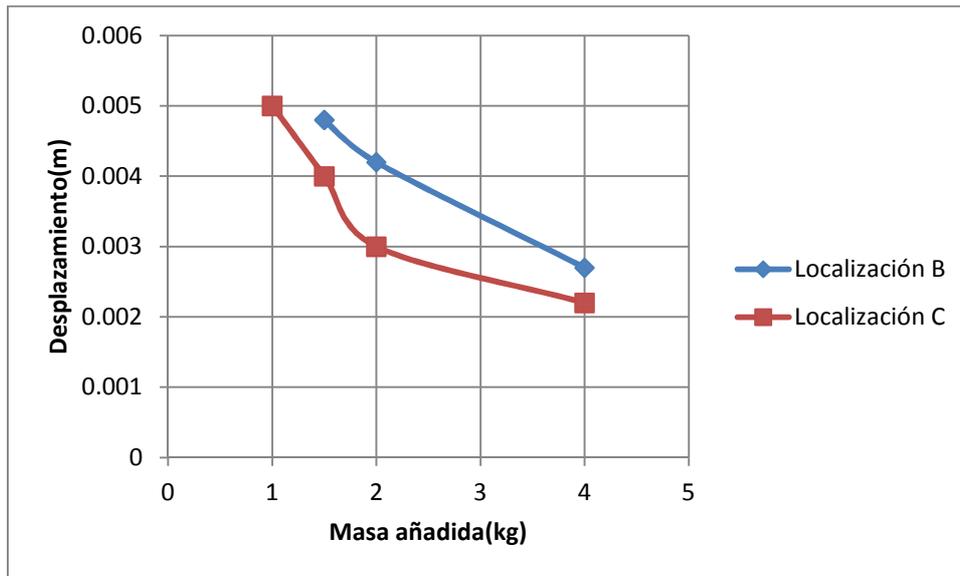
En la siguiente gráfica se muestra un estudio que compara la oscilación vertical sufrida por el modelo con el estabilizador horizontal, a una velocidad de 180º/s, con la aportación de las diferentes masas (de 1kg, 1.5kg, 2kg, 4kg) en las 3 posiciones que se han considerado en la cadera (A, B, C).



Gráfica 155: Oscilación vertical para diferentes masas añadidas al modelo con estabilizador horizontal

Las 3 líneas muestran una tendencia de estabilidad vertical a medida que se añade una masa mayor. Las masas añadidas en la localización C muestran una oscilación menor, pero para 4 kg el resultado se asemeja bastante al obtenido para la localización B, obteniendo una oscilación menor de 2 mm. En la localización A solo se obtiene cierta mejora al añadir 4 kg, el resto no aporta demasiado.

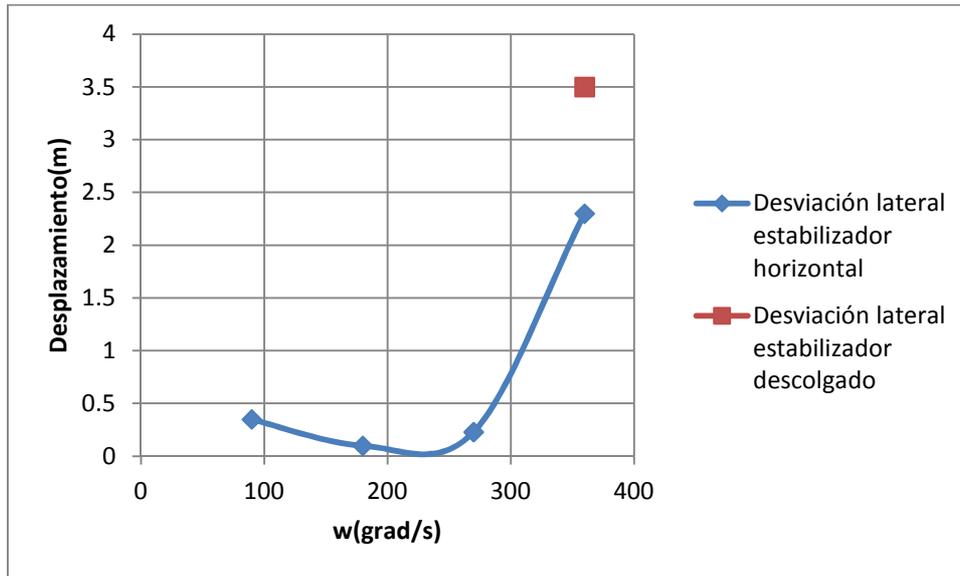
A continuación se va a realizar el mismo estudio para el modelo con el estabilizador descolgado.



Gráfica 156: Oscilación vertical para diferentes masas añadidas al modelo con estabilizador descolgado

De la localización A no se ha podido obtener resultados, ya que el robot no consiguió mantener el equilibrio al realizar las simulaciones. En este modelo, la localización C vuelve a ser más beneficiosa para el equilibrio y, además, para todas las masas añadidas. Se sigue la tendencia de reducir el desplazamiento al aumentar la masa. Los resultados obtenidos para este modelo son ligeramente superiores que los obtenidos para el modelo anterior, para todas las masas añadidas.

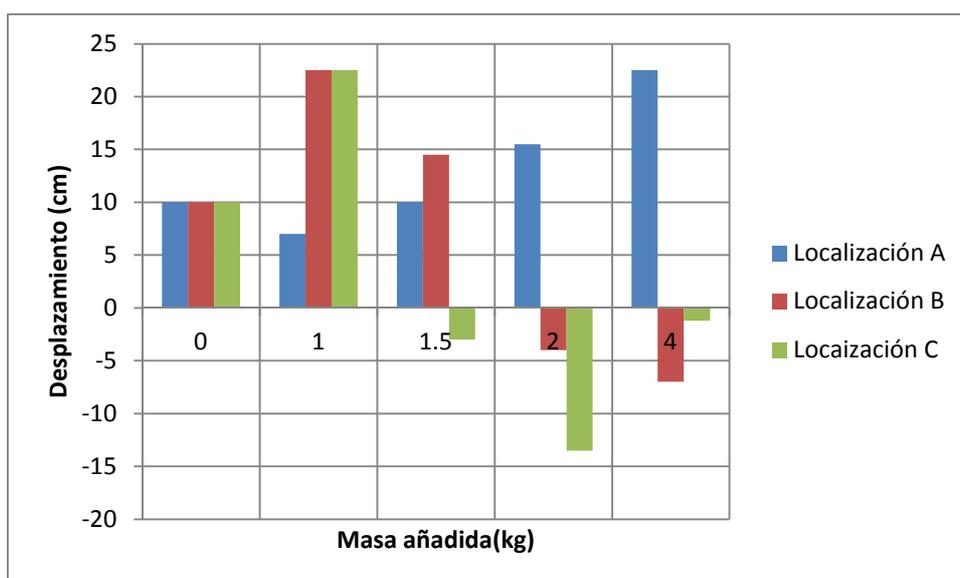
5.4.3. Desviación lateral



Gráfica 157: Desviación lateral de ambos modelos

La velocidad que consigue una trayectoria más recta para el modelo con el estabilizador horizontal es a $180^\circ/\text{s}$ sufriendo una desviación de 10cm, siendo la desviación a $90^\circ/\text{s}$ y a $270^\circ/\text{s}$ aceptable. A $360^\circ/\text{s}$ se dispara el valor de las distancia. Igual ocurre para el estabilizador descolgado, la única velocidad a la que se ha podido realizar el estudio ha sido a $360^\circ/\text{s}$ y la desviación es más elevada aún, 3.5 m. Como a $180^\circ/\text{s}$ se consigue la trayectoria más recta, se tomó como base para todas las modificaciones de masa que se han efectuado.

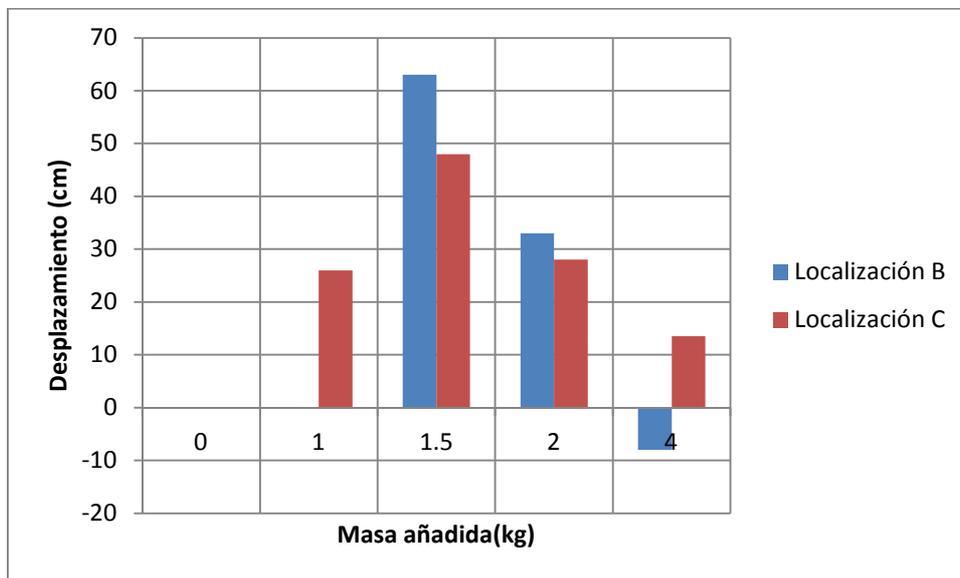
Una vez analizada la desviación para los modelos libres, a diferentes velocidades, se añadieron masas a los dos modelos, en las posiciones A, B y C y se compararon los resultados de la desviación lateral obtenidos.



Gráfica 158: Desviación lateral para diferentes masas añadidas al modelo con estabilizador horizontal

La gráfica anterior ilustra los resultados obtenidos para las distintas masas. En ella se puede apreciar que la disposición que mejor resultado consigue es añadir una masa de 4 kg en la posición C, pues origina una desviación de 1.2 cm en los 20 segundos que ha durado la simulación. La localización C muestra que, al añadir una masa de 1.5 kg o superior, el sentido de la desviación cambia. La adición de masas no es tan beneficiosa como se podría imaginar, para mantener el robot en una trayectoria recta. Además para esta magnitud, no se sigue una linealidad puesto que para la localización A la trayectoria más recta se consigue con una masa de 1 kg; para la localización B con una masa de 2 kg; y para la localización C con una masa de 4 kg. Se han conseguido desviaciones mínimas con algunas disposiciones, como se puede apreciar.

El mismo estudio se realizó para el modelo con el estabilizador descolgado.



Gráfica 159: Desviación lateral para diferentes masas añadidas al modelo con estabilizador descolgado

La adición de masa en la disposición A no ha logrado mantener en equilibrio a este modelo, como ya se ha comentado. Esta gráfica sí que muestra cierta linealidad en el resultado, ya que se puede ver cómo, a medida que se aumenta el valor de la masa para la localización B, la desviación se reduce, llegando a un valor de 8 cm para 4 kg que, además genera un cambio en la dirección. La localización C no sigue esta tendencia ya que, la masa de 1 kg no genera una gran desviación, en cambio al aumentar la masa 0.5 kg esta aumenta considerablemente, para luego ir disminuyendo a medida que crece el valor de la masa hasta conseguir la menor desviación con 4 kg.

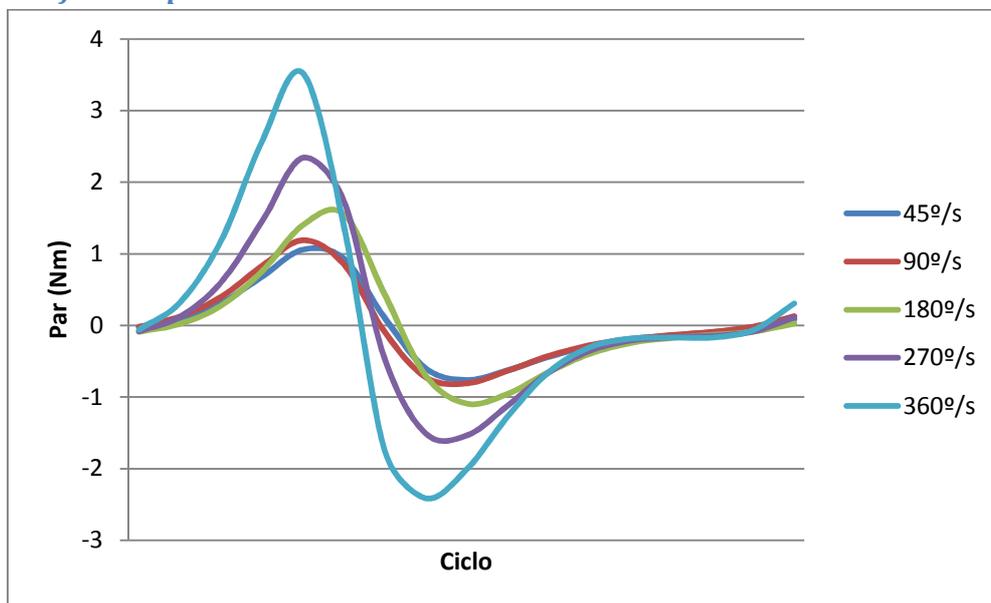
El desplazamiento obtenido en esta dirección para cada modelo con el estabilizador descolgado ha sido más elevado que para cada modelo equivalente con el estabilizador horizontal.

Las conclusiones que se pueden obtener una vez comparadas las gráficas de desplazamiento son las siguientes:

1. El modelo con el estabilizador horizontal es más estable que el modelo con el estabilizador descolgado, ya que las oscilaciones verticales son menores y, además, dibuja una trayectoria más recta. Las velocidades más altas contribuyen a una mejor estabilidad.
2. Las velocidades que generan un coeficiente de avance mayor son $180^\circ/s$ y $270^\circ/s$ y, también una menor desviación lateral.
3. La adición de masas en la localización C es la disposición más beneficiosa en ambos modelos tanto para la estabilidad vertical, como para la estabilidad longitudinal, siendo la masa de 4 kg la que mejor resultados da de todas. Añadir masas en la localización A es la menos beneficiosa de las 3, ya que solo mejora ligeramente la estabilidad vertical y no aporta ningún beneficio en la estabilidad longitudinal. De la disposición B se pueden sacar dos conclusiones: la primera de ellas es que una masa de 4 kg da los mejores resultados de estabilidad vertical; mientras que una masa de 2 kg es la mejor disposición para la estabilidad longitudinal, en ambos modelos.
4. Los resultados obtenidos para ambos modelos siguen la misma tendencia para las mismas disposiciones de masa.

Una vez comparados los resultados de los diferentes desplazamientos se procederá a sacar conclusiones de los valores de par obtenidos. Primero se estudiará el par necesario para dar movimiento a los modelos colgados y después se compararán con los modelos libres.

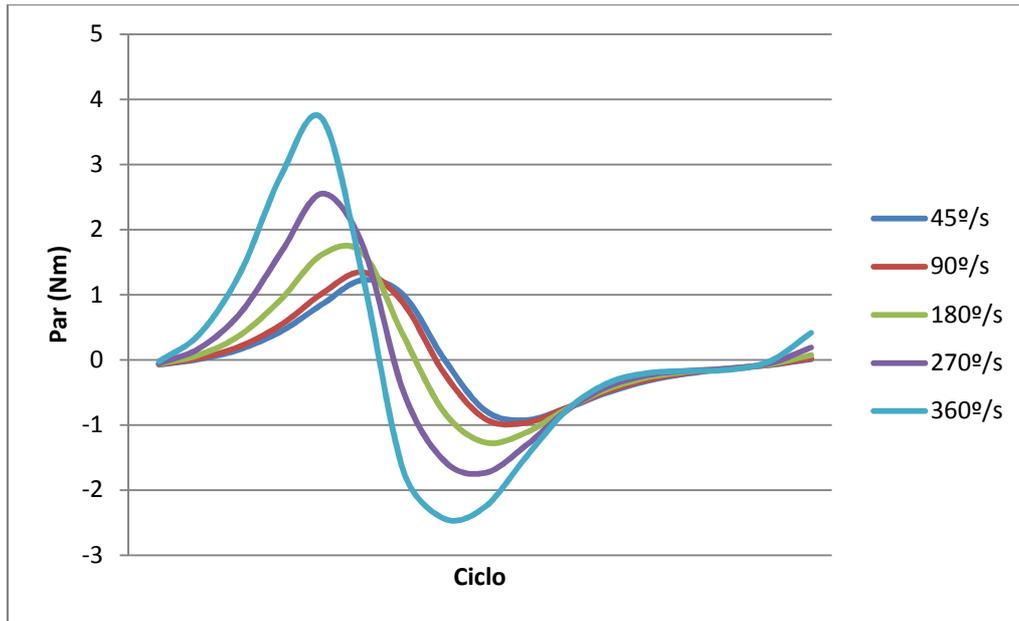
5.4.4. Gráficas de par



Gráfica 160: Par demandado por el modelo con el estabilizador horizontal, colgado, a diferentes velocidades

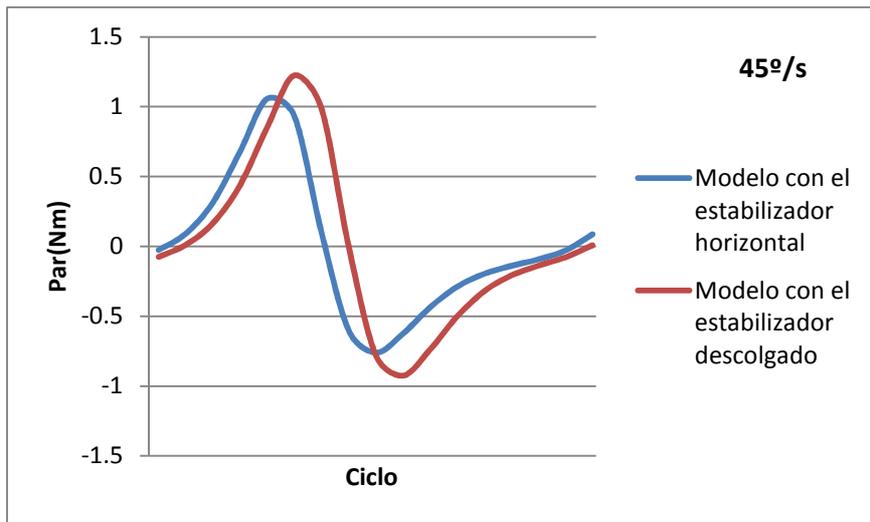
Estos cálculos se hicieron teniendo en cuenta los esfuerzos en la pierna en vuelo, ya que los que tiene la pierna que permanece en el suelo no se consideraron representativos. El punto en el que es preciso un par mayor en el caminar del modelo es el momento en el que la pierna está llegando a su punto más alto pero sin alcanzarlo. Posteriormente se observa una caída en la demanda de par muy acusada llegando incluso a valores negativos antes de llegar el pie al

suelo, con lo cual se puede afirmar que si el motor estuviese proporcionando siempre la misma cantidad de par, habría cierto momento del ciclo en el que el robot se vería empujado por el mismo y viceversa, el modelo intentaría frenar el motor. Por tanto, la forma óptima de poder aprovechar dicha energía sería la capacidad del Mimbot de arrancar y parar el motor en el momento exacto en el que el robot esté demandando o desaprovechando energía. Éste es uno de los fundamentos de funcionamiento de un robot pasivo. Entre las velocidad de 45º/s y 90º/s no hay apenas diferencia de par, pero a partir de esta última, la demanda crece de manera gradual con la velocidad.

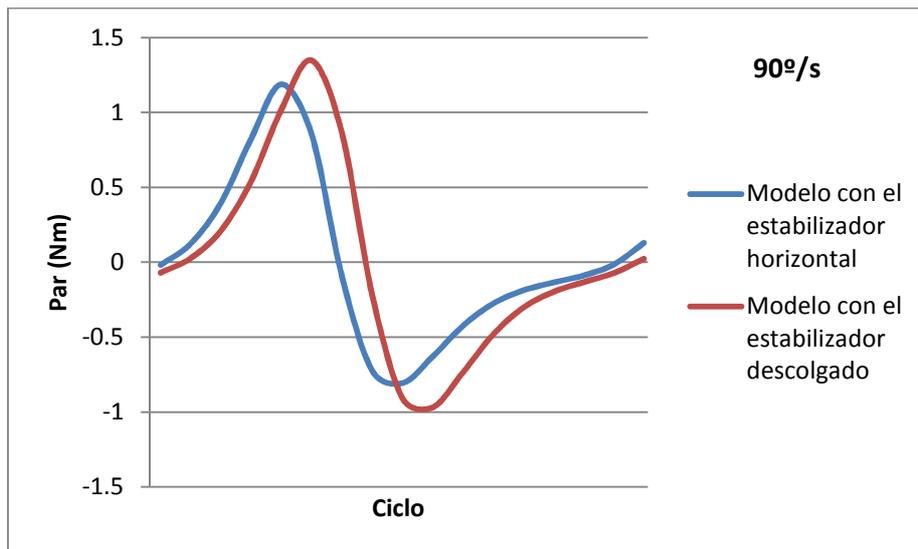


Gráfica 161: Par demandado por el modelo con el estabilizador descolgado, colgado, a diferentes velocidades

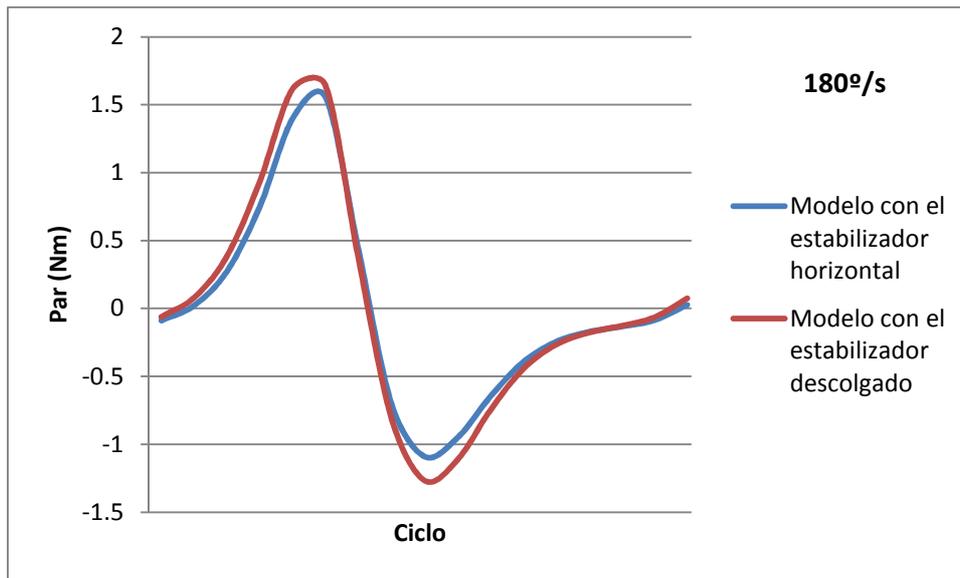
El dibujo descrito por la gráfica para el modelo con el estabilizador descolgado es similar al anterior, con la salvedad que los valores de par demandados por la manivela para las diferentes velocidades son superiores a los equivalentes del modelo con el estabilizador horizontal. En las siguientes gráficas se puede observar la comparación de ambos modelos a las diferentes velocidades.



Gráfica 162: Par demandado por ambos modelos colgados a 45°/s

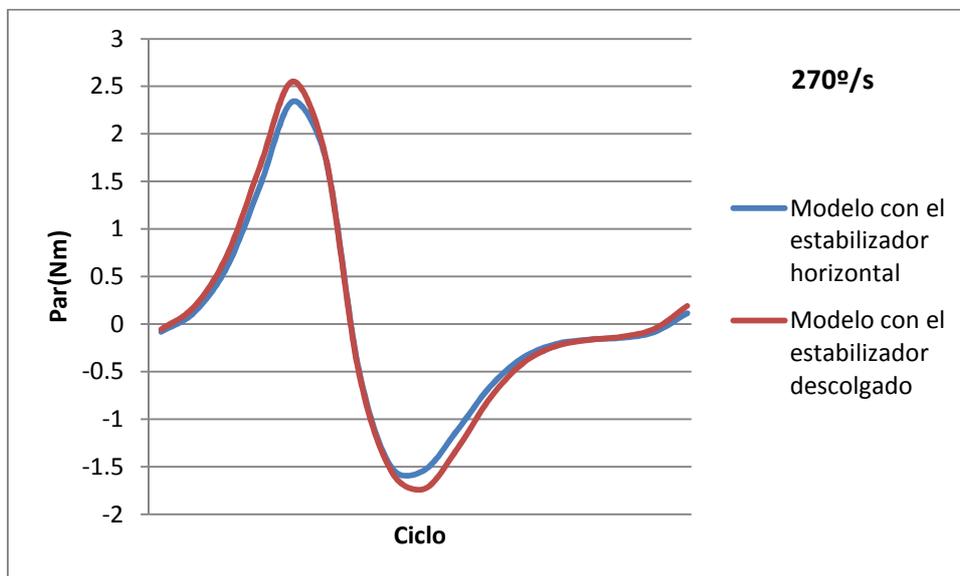


Gráfica 163: Par demandado por ambos modelos colgados a 90°/s

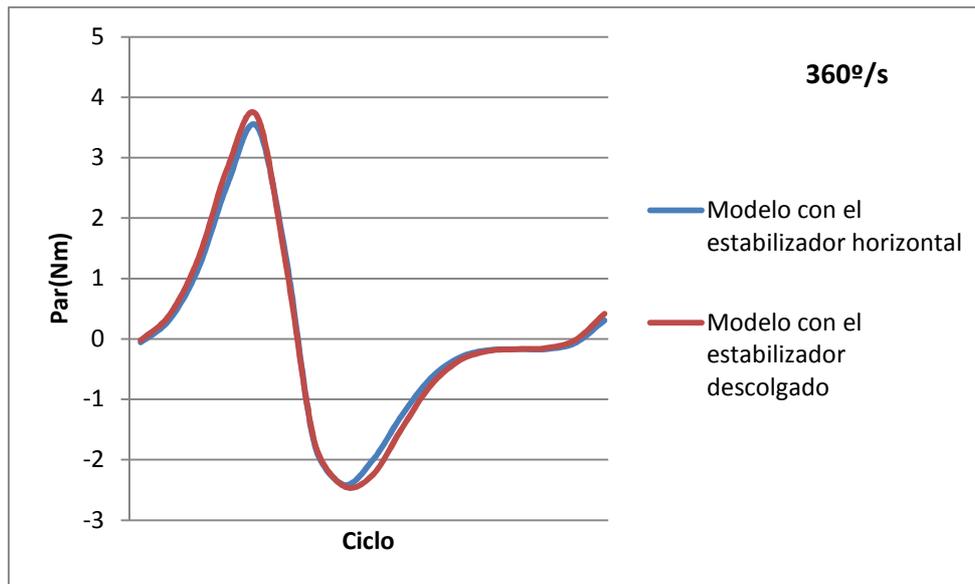


Gráfica 164: Par demandado por ambos modelos colgados a $180^\circ/s$

Como ciclo se ha tomado un giro de 180° de la manivela, aunque realmente un ciclo entero sería el giro de 360° . Se ha considerado así ya que el máximo y mínimo par, que son las magnitudes que se quieren medir, son iguales para ambas piernas y con medio ciclo del paso se ve, que es el resultado obtenido para la pierna derecha.



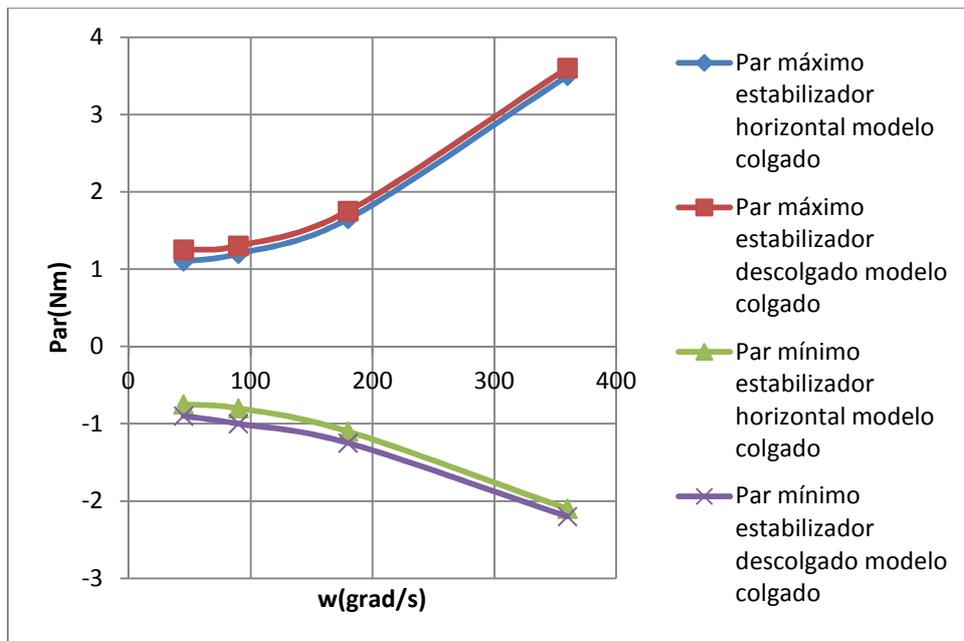
Gráfica 165: Par demandado por ambos modelos colgados a $270^\circ/s$



Gráfica 166: Par demandado por ambos modelos colgados a 360º/s

En las gráficas anteriores se puede observar lo comentado acerca del par. Para cada velocidad analizada, la amplitud de par demandado por el modelo con el estabilizador primario es superior al modelo con el estabilizador modificado. Otro detalle a destacar es que en todas las gráficas los máximos de par son de módulo mayor que los mínimos. Esto es debido a que la demanda es mayor que el exceso, ya que en el movimiento se disipa energía, en forma de calor, por rozamientos entre piezas, por ejemplo.

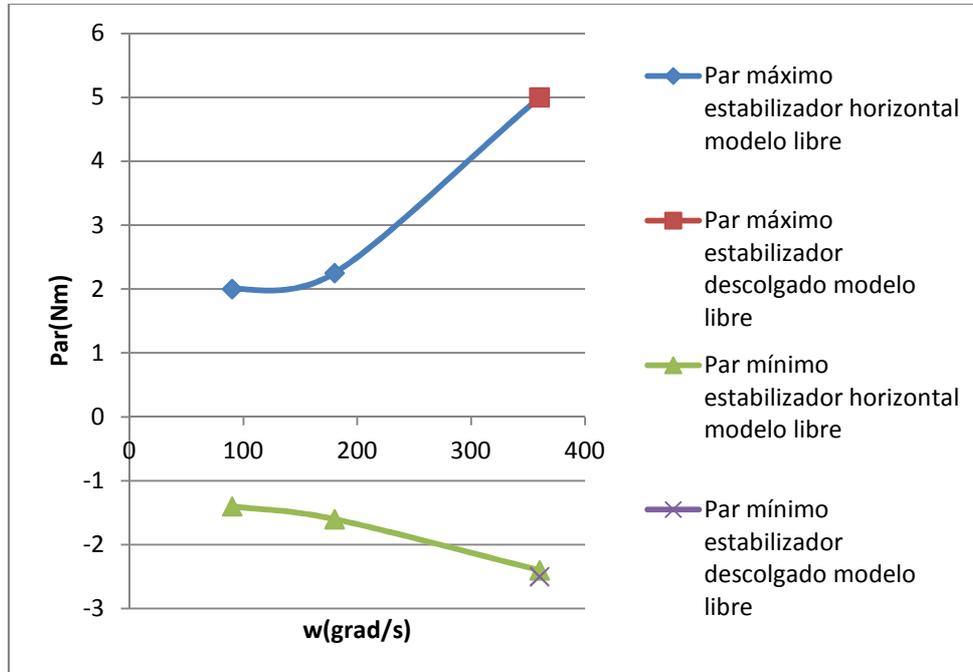
A continuación se van a comparar los máximos obtenidos.



Gráfica 167: Par máximo demandado por los modelos colgados, a diferentes velocidades

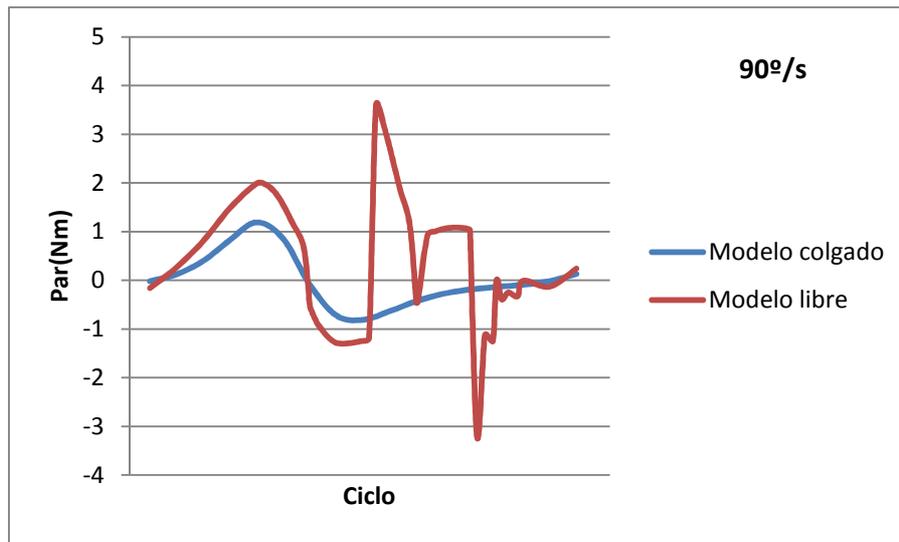
En la gráfica anterior se puede observar que ambas curvas siguen la misma tendencia, siendo los valores obtenidos para el modelo con el estabilizador descolgado ligeramente superiores en valor absoluto para todas las velocidades, tanto los máximos como los mínimos.

Una vez estudiado el par demandado por los modelos colgados, se va a proceder a calcular el equivalente para los modelos libres, ya que son los modelos reales.

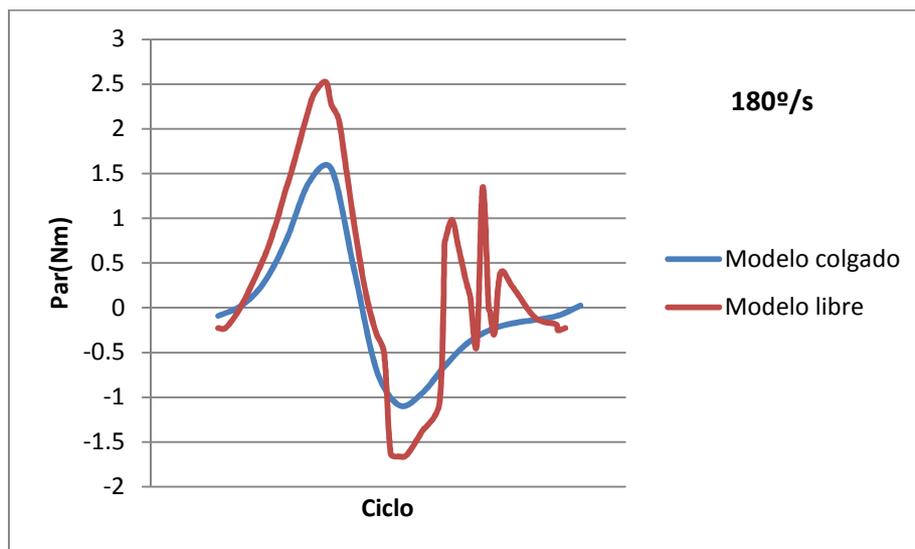


Gráfica 168: Par demandado por ambos modelos libres

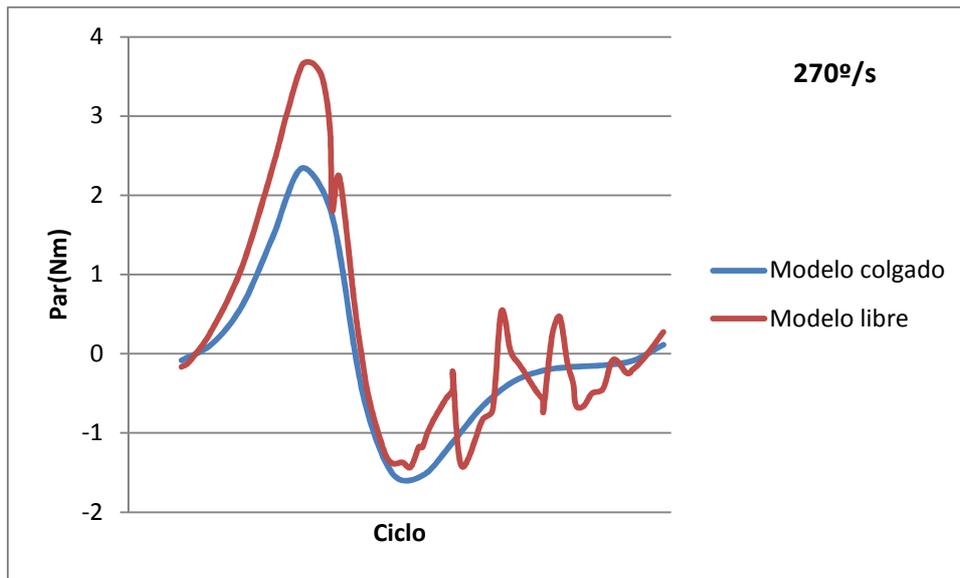
En la gráfica anterior no se pueden comparar ambos modelos, ya que para el modelo con el estabilizador primitivo solo se ha podido simular a la velocidad de 360º/s, obteniéndose un resultado de par muy similar al resultante para el modelo con el estabilizador horizontal. Se puede apreciar que, a medida que aumenta la velocidad, también aumenta la demanda de par. Los módulos de los máximos de par también son mayores en valor absoluto que los mínimos. Por último, destacar que los valores obtenidos para los modelos libres son superiores que para los modelos colgados, es lógico ya que hay que hacer frente a más fuerzas que en el caso anterior. Los máximos demandantes son del orden de 1 Nm superiores y los mínimos se ven incrementados en menor magnitud. A continuación se va a comparar el par demandado por la manivela en los modelos colgados y libres, tanto para el Mimbot con el estabilizador horizontal como con el estabilizador descolgado, a las velocidades que se ha podido mantener en equilibrio.



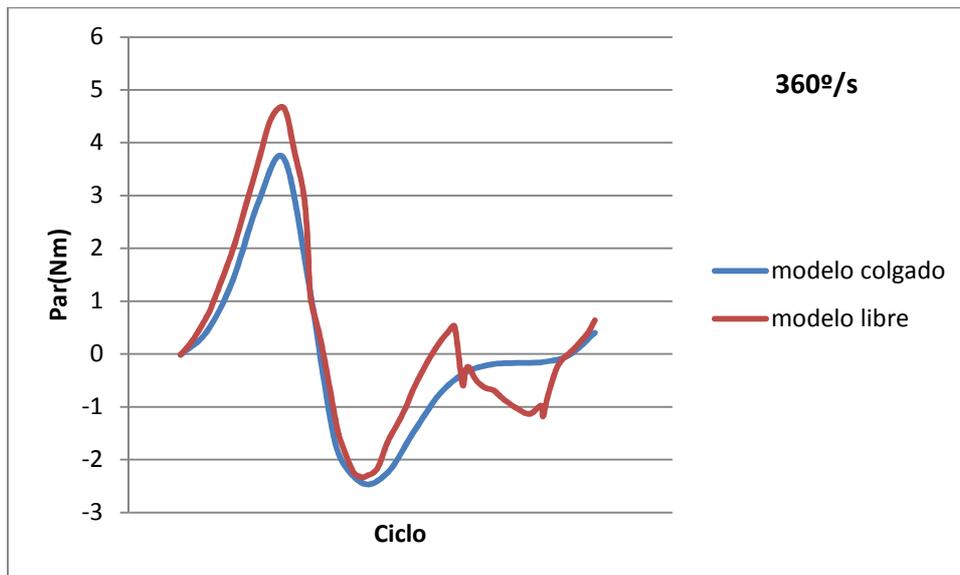
Gráfica 169: Par en los modelos colgado y libre a 90°/s para el modelo con el estabilizador horizontal



Gráfica 170: Par en los modelos colgado y libre a 180°/s para el modelo con el estabilizador horizontal

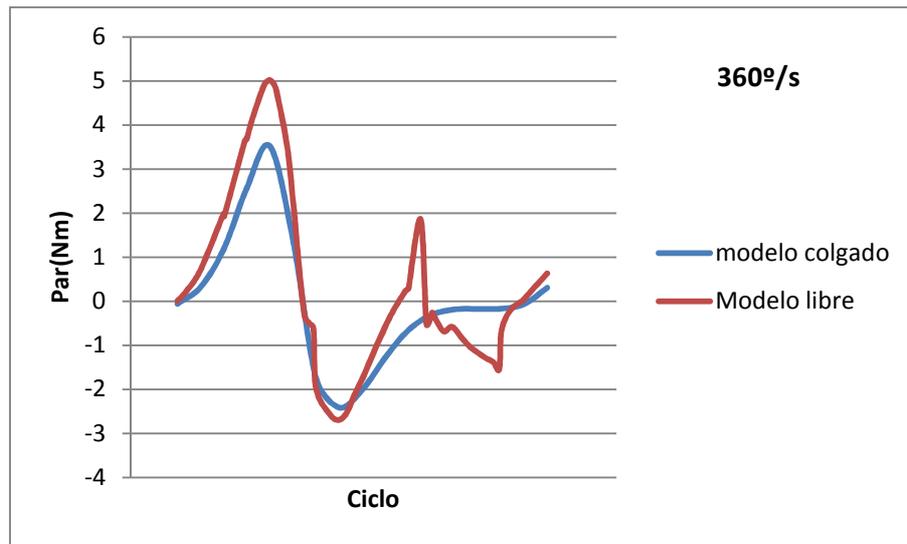


Gráfica 171: Par en los modelos colgado y libre a 270°/s para el modelo con el estabilizador horizontal



Gráfica 172: Par en los modelos colgado y libre a 360°/s para el modelo con el estabilizador horizontal

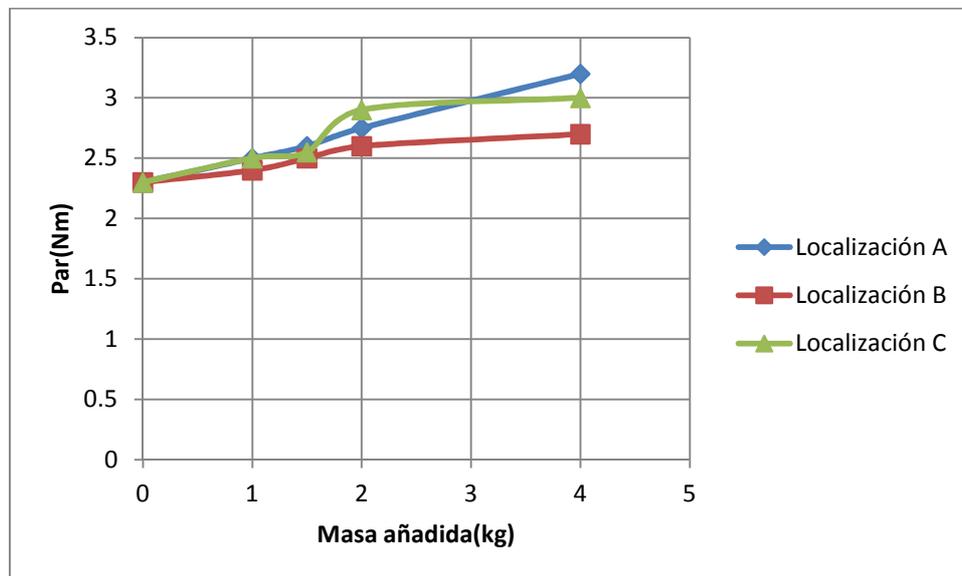
En las gráficas anteriores se puede apreciar que los valores de los máximos de par del modelo libre son de 1 Nm superior a los máximos de par del modelo colgado. También se aprecian irregularidades en el par motivadas por el contacto con el suelo, pero en, esencia, el dibujo descrito por ambas curvas es similar. Cuanto más baja es la velocidad de alimentación más pronunciados son los picos, debido a que existe menos inercia y es más difícil superar el rozamiento con el suelo y como se ha visto en el apartado de los desplazamientos, el aumento de velocidad contribuye a la estabilidad del modelo. Por tanto las velocidades bajas generan más oscilaciones en el paso, lo que provoca más picos en el par.



Gráfica 173: Par en los modelos colgado y libre a 360º/s para el modelo con el estabilizador descolgado

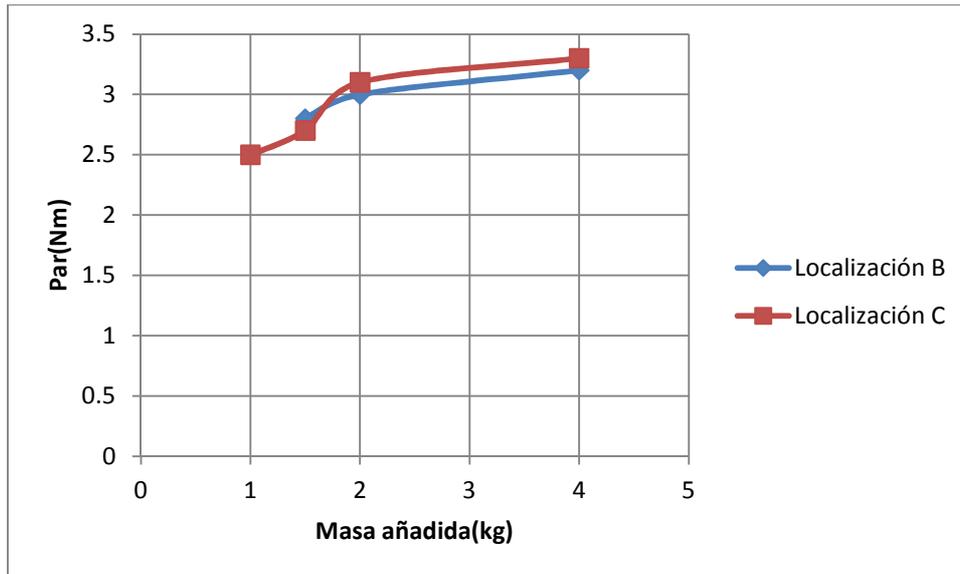
La gráfica obtenido para el modelo con el estabilizador descolgado describe unas curvas similares a la anterior, con la salvedad que el par demandado es superior y tiene más irregularidades motivadas por la propia inestabilidad del modelo que es superior al anterior.

Una vez estudiado el par a diferentes velocidades, se va a realizar el último ensayo, el cual consistirá en comparar los pares demandados por los modelos añadiendo masas en diferentes lugares.



Gráfica 174: Máximo par demandado añadiendo masas en diferentes localizaciones para el modelo con el estabilizador horizontal

La adición de masas en la localización A sigue una distribución lineal, pero es la disposición que más par demanda y la que menos estabilidad genera. La distribución de masas en la localización C era la más beneficiosa para la estabilidad del sistema, pero demanda más par que la adición de masas en la localización B. Como es de esperar, a medida que se aumenta el valor de la masa añadida, aumenta el par demandado. Añadir una masa de 4 kg es la disposición más beneficiosa ya que se vio que para la estabilidad se obtenía los mejores resultados y en las gráficas de par se observa que no tiene una demanda muy superior a las demás, siendo el aumento de 2 kg a 4 kg insignificante en términos de par.



Gráfica 175: Máximo par demandado añadiendo masas en diferentes localizaciones para el modelo con el estabilizador descolgado

Para el modelo con el estabilizador descolgado la mejor disposición es añadir una masa de 4 kg en la localización B. Se obtienen resultados no tan positivos, pero se mejora de forma considerable la estabilidad del sistema con una demanda de par no muy elevada, siendo esta superior a la del modelo anterior. En esta disposición se obtiene una menor desviación lateral y además se demanda menos par.



Capítulo VI:

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. CONCLUSIONES

Una vez se ha llegado al final del presente Proyecto, se puede concluir afirmando que se han alcanzado con éxito los objetivos propuestos al comienzo del mismo.

Se han cumplido satisfactoriamente los objetivos principales:

- Se ha cumplido el objetivo principal. Se ha mejorado el diseño de los anteriores trabajos, logrando un modelo capaz de caminar de forma libre, sin ayudas externas, sin perder el equilibrio, de una forma estable y describiendo una trayectoria considerablemente rectilínea. Además se ha iniciado la implementación de los actuadores de la parte inferior de la cadera, consiguiendo que el Mimbot sortee obstáculos, en forma de escalones, sin desestabilizarse.
- El proceso de diseño ha supuesto enfrentarse a una toma de decisiones en busca de la idoneidad del diseño elegido y ha implicado el uso de un buen número de las herramientas que el programa Solid Edge pone a disposición del usuario. Se ha logrado realizar un diseño satisfactorio de los dos modelos de Mimbot, con el estabilizador primitivo y modificado.
- Se ha comprobado con el programa MSC. Adams el correcto funcionamiento de todos los modelos colgados y libres. Además se ha estudiado con este mismo programa la estabilidad del Mimbot con el nuevo mecanismo (los actuadores de la parte inferior de la cadera), obteniendo resultados muy positivos: se ha observado que se puede evitar el balanceo hacia delante o hacia atrás actuando sobre dichos elementos y se ha visto que se podían implementar diferentes trayectorias con la mera variación de uno o de los dos actuadores de los que el robot dispone. Se ha proporcionado una variante del nuevo modelo del robot formado por la modificación de los pies, pero con el estabilizador primitivo, para el caso en el que se quiera estudiar la influencia de los actuadores sobre la inclinación de los pies para posibles aplicaciones en cuestas.
- Por otro lado se han observado las diferentes gráficas obtenidas, haciendo el estudio del par en la manivela del robot, comprobando que el modelo cumple fielmente las condiciones de un robot pasivo pudiendo aprovechar la propia inercia de sus eslabones para la continuación de su movimiento.
- El cruce de información entre el par y la posición del pie ha ayudado a comprobar en qué momentos del paso podemos actuar para que por la inercia del modelo, éste consiga realizar el paso completo con un mínimo de energía necesaria por parte del motor.
- Los resultados obtenidos de estas gráficas también muestran que los picos de par aumentan exponencialmente con la velocidad, de forma que llega a ciertos puntos en el que la inercia del robot se vuelve en su contra haciendo que al tener una frenada muy brusca, le cueste luego volver a recuperar su inercia haciendo que el motor tenga



que actuar de nuevo en un momento en el que no era el idóneo para otras velocidades.

- Por tanto, el estudio de las gráficas ha proporcionado datos para conocer el rango de velocidades para las cuales el Mimbot puede realizar su movimiento pasivo y además con la adición de diferentes masas en lugares distintos de la cadera se ha podido modificar su cdm de tal forma que se pueda influir sobre la estabilidad del robot y sobre la trayectoria.
- Las conclusiones sobre la trayectoria y el par, obtenidas por las gráficas, se han obtenido para ambos modelos por separado y comparándolos entre ellos, el Mimbot con el estabilizador horizontal y con el estabilizador descolgado.

Finalmente, se puede concluir confirmando la disponibilidad del nuevo modelo del robot MIMBOT para posteriores estudios sobre el uso y funcionamiento del sistema de actuadores para seguir avanzando en el estudio y conseguir reproducir de la forma más fiel posible el caminar humano.

6.2. TRABAJOS FUTUROS

Una vez concluido el trabajo, se puede aconsejar que se sigan las siguientes vías de desarrollo para continuar con la mejora del Mimbot:

- Se sugiere la implementación y estudio de un modelo del Mimbot con el paso cambiado, con el que se podría analizar la influencia que la elección del paso que inicia el movimiento tiene sobre la trayectoria que el robot efectúa.
- Se plantea el estudio de los rozamientos producidos entre las juntas y los elementos que conforman el Mimbot, para ver la energía que se disipa en forma de calor al caminar.
- Se recomienda estudiar de forma exhaustiva las habilidades miméticas del Mimbot con el programa MSC.Adams. Realizar diferentes ejercicios que requieran la utilización de los actuadores verticales y horizontales, de la parte inferior de la cadera, alargando y acortando el paso, elevando y descendiendo, para ambos modelos de Mimbot (con ambos estabilizadores). Comprobar la capacidad del Mimbot con el estabilizador primitivo de subir y bajar pendientes. Una vez realizado, se propone obtener gráficas que estudien las trayectorias de los modelos, así como el par demandado.
- Estudio de los picos de par en los modelos libres, motivo que los producen y si es posible suavizar los arranques.



Capítulo VII:

BIBLIOGRAFÍA

7.1. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Zango Casado, Daniel. "Rediseño del robot bípedo MIMBOT para incorporar habilidades miméticas", Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2011.
- [2] Gallardo Mielgo, Jorge. "Estudio de la implementación de habilidades a un robot bípedo", Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2008.
- [3] Jiménez Crespo, José Manuel. "Análisis y simulación del robot bípedo Pasibot", Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2011.
- [4] Pérez Caballero, Javier. "Diseño y análisis de un nuevo sistema de estabilización para el robot bípedo Pasibot", Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2009.
- [5] Espantoso Miranda, Víctor. "Modelado y simulación del robot Pasibot. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral", Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2009.
- [6] Redondo Perales, Alejandro. "Análisis y simulación del comportamiento del robot bípedo Pasibot", Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2009.
- [7] Corral Abad, Eduardo. "Análisis mecánico del robot bípedo Pasibot", Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2008.
- [8] Pérez Perdiguero, Juan Manuel. "Desarrollo e implementación de la aplicación informática Mimbot 5.0", Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2010.
- [9] García de Oteyza Hafner, Óscar. "Análisis comparativo de un nuevo sistema de estabilización para el robot bípedo Pasibot", Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2010.
- [10] Apuntes de la asignatura *Teoría de Máquinas y Mecanismos*, de la I.T.I. Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid: 2007.
- [11] M.E. Escobar., H. Rubio., J.C. García-Prada., and M. Ceccarelli., "Sistema de Estabilización del Robot Pasibot" XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Ciudad Real. España: 2010.
- [12] Meneses Alonso, Jesús; Álvarez Caldas, Carolina; Rodríguez Fernández, Santiago; "Introducción al Solid Edge". Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid. Ed. Thomson.



7.2. REFERENCIAS WEB

[13] Información MSC. Adams.

<http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/Adams.aspx>

(Última visita: 2-05-2012)

[14] Manual Adams/View.

http://www.am.chalmers.se/~anbo/mekfk/view_gs.pdf

(Última visita: 02-05-2012)

[15] Wikipedia.

<http://es.wikipedia.org>

(Última visita: 21-04-2012)

[16] Wordreference.

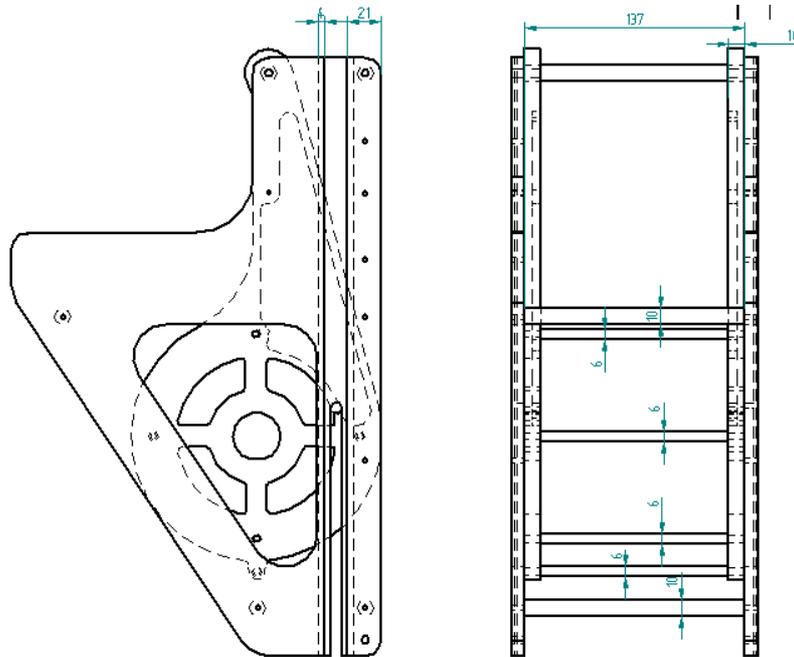
<http://www.wordreference.com/es/>

(Última visita: 02-05-2012)

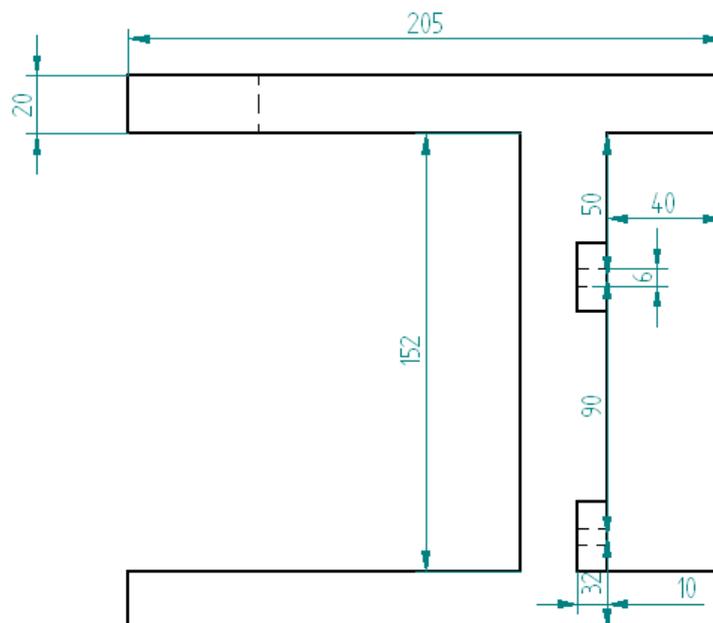
ANEXOS

Planos de las piezas

Cadera final del Mimbot

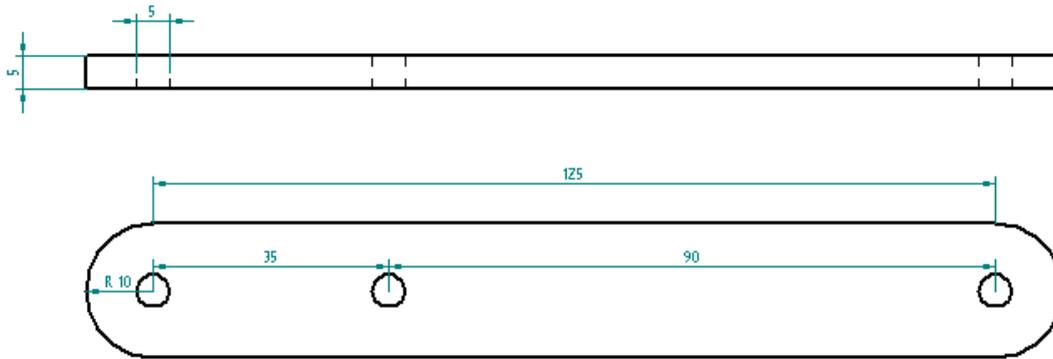


Pie derecho

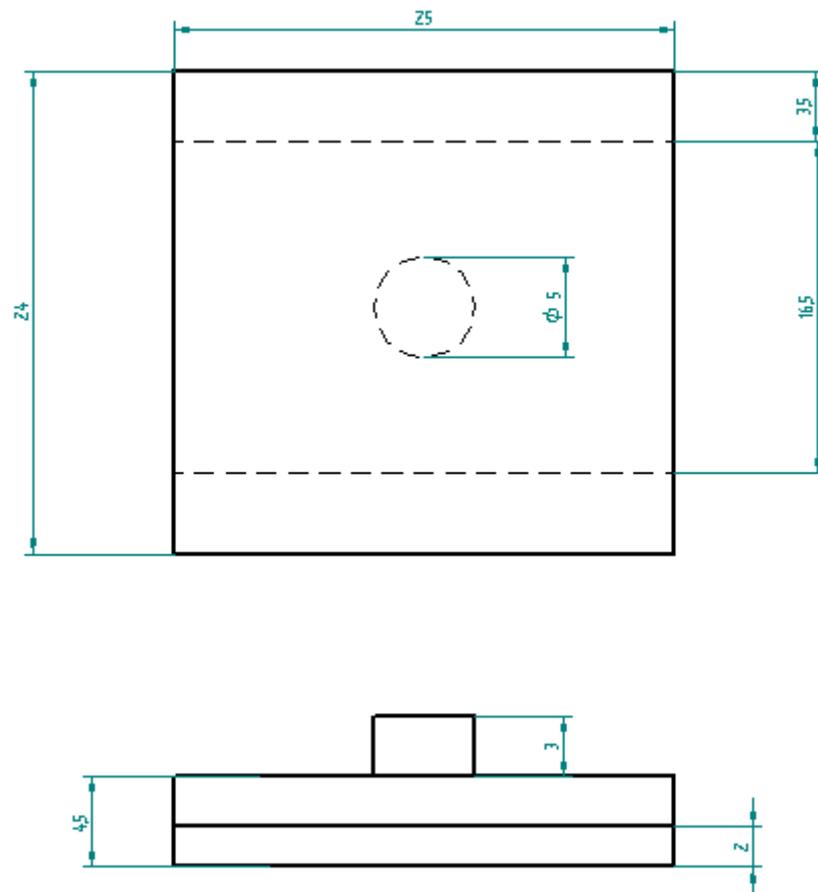


El pie izquierdo es simétrico

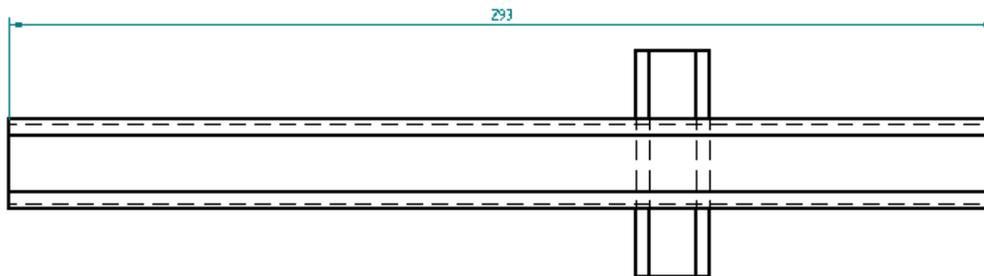
Estabilizador primitivo



Deslizadera unida al estabilizador primitivo



Corredora que alberga al estabilizador primitivo



Las medidas de las cotas están en mm.

Las medidas referentes a piezas del Mimbot, que no se han ilustrado, se encuentran en el proyecto **[1]**, ya que en este proyecto sólo se han representado las modificaciones realizadas de aquel. El resto de piezas y medidas no encontrados en el presente proyecto se encuentran en los proyectos **[4]** y **[5]**.