



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL, MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

TÍTULO

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL ROBOT BÍPEDO PASIBOT

Autor: José Manuel Jiménez Crespo.

Tutor: Higinio Rubio Alonso.

Leganés, Enero de 2011

Título: Análisis y simulación del robot bípedo Pasibot.

Autor: José Manuel Jiménez Crespo.

Director: Higinio Rubio Alonso.

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 31 de Enero de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

“Ve tan lejos como alcance tu vista y cuando llegues allí podrás ver más allá”
Thomas Carlyle.



ÍNDICE

	Página
Capítulo I:	
MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	1
1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.....	2
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	6
1.3. FASES DEL PROYECTO.....	8
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	10
Capítulo II:	
INTRODUCCIÓN	12
2.1. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA	13
2.2. CLASIFICACIÓN, TIPOS DE ROBOTS Y FUNDAMENTOS DE LA MARCHA BÍPEDA.....	17
2.2.1. Clasificación por generaciones.....	17
2.2.2. Clasificación por prestaciones.....	17
2.2.3. Fundamentos de la marcha bípeda	18
2.2.4. Robots Industriales.....	20
2.2.5. Robots de servicio	20
2.3. HISTORIA DE LOS ROBOTS BÍPEDOS.....	23
2.3.1. Robots bípedos pasivos	24
2.3.2. Robots bípedos activos	27
Capítulo III:	
PROPUESTAS DE DISEÑO DEL PASIBOT	44
3.1. DISEÑO INICIAL. MODELO ANALÍTICO BASE.	45
3.2. DISEÑO MODIFICADO.	47
3.3 DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO DE LA PIERNA.	48
3.3.1. Mecanismo de línea recta de chebyshev	48
3.3.2. Pantógrafo.	49
3.3.3 Acción conjunta de ambos mecanismos.....	50
3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO MODIFICADO EN MSC.ADAMS. ...	51
3.4.1. Modelo fibrilar.....	51
3.4.2. Modelo gamba.	53
3.5. ACTUADORES EN EL PANTÓGRAFO. MODELO TEÓRICO.....	58
3.5.1. Diseño teórico de los actuadores.....	58
3.5.2. Relación de posiciones del pantógrafo.	60
3.5.3. Espacio de trabajo del pantógrafo.	65



3.6.- EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS.....	68
3.6.1. Desarrollo en el diseño del Pasibot.....	68
Capítulo IV:	
MANUAL DE APRENDIZAJE DE MSC ADAMS.....	74
4.1. INTRODUCCIÓN.....	75
4.2. CONTROLES BÁSICOS.....	76
4.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....	78
4.3.1. Diseño de sólidos.....	83
4.3.2. Operaciones booleanas.....	85
4.3.3. Modificación de sólidos.....	85
4.3.4. Modificación de las especificaciones iniciales de los sólidos.....	86
4.3.5. Posición.....	87
4.3.6. Dimensiones.....	89
4.3.7. Diseño de juntas, actuadores y fuerzas.....	90
4.4. SIMULACIÓN DEL MODELO.....	99
4.5. ANIMACIÓN DEL MODELO.....	100
4.6. TOMA DE MEDIDAS.....	101
4.7. POSTPROCESADOR.....	102
4.8. EJEMPLO.....	106
4.8.1. Importación.....	106
4.8.2. Posicionado.....	109
4.8.3. Cambio de propiedades.....	113
4.8.4. Implementación de juntas.....	117
4.8.5. Implementación de motores.....	119
4.8.6. Implementación del suelo.....	120
4.8.7. Implementación de contactos.....	122
4.8.8. Implementación de funciones.....	123
Capítulo V:	
ESTUDIO DE FUNCIONALIDAD EN ADAMS Y DISEÑO DEL NUEVO ACTUADOR.....	126
5.1. ESTUDIO DE FUNCIONALIDAD DEL PASIBOT EN ADAMS.....	127
5.2. MODIFICACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL PASIBOT.....	128
5.3. ACTUACIONES SOBRE LA TRAYECTORIA DEL PASIBOT.....	129
5.4. COMPARACIÓN DE LAS PIEZAS MODIFICADAS.....	131
5.5. OTRAS INFLUENCIAS SOBRE LA ESTABILIDAD.....	132

Capítulo VI:



ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	134
6.1. ESTUDIO DEL PAR EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD.	135
6.1.1. Modelo colgado.....	137
6.1.2. Modelo libre.	146
6.1.3. Comparativas modelo libre-modelo colgado.....	153
6.1.4. Comportamiento con variación de masa en la cadera.	155
6.2. ESTUDIO DEL CDM.	157
6.2.1. Posición inicial.....	160
6.2.2. Adelantando uno de los actuadores.	163
6.2.3. Atrasando uno de los actuadores.	172
6.2.4. Adelantando ambos actuadores.	180
6.2.5. Atrasando ambos actuadores.....	188
6.2.6. Adelantando uno y atrasando otro simétricamente.	195
6.2.7. Variación del CDM global del sistema según el eje x en función de la posición del actuador.	204
Capítulo VII:	
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	211
7.1. CONCLUSIONES	212
7.2. TRABAJOS FUTUROS.....	214
Capítulo VIII:	
BIBLIOGRAFÍA	215
BIBLIOGRAFÍA.	216
Direcciones WEB:.....	218



ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1: Robots en una cadena de montaje.....	2
Figura 1.2: evolución de los robots humanoides.	3
Figura 1.3: Silla andante	5
Figura 1.4: Vuelco lateral debido al apoyo simple	6
Figura 2.1: Telar mecánico de Jacquard	14
Figura 2.2: Jaquemarts	14
Figura 2.3: Robot articulado	15
Figura 2.4: Robot médico	16
Figura 2.5: Robot explorador SPIRIT	16
Figura 2.6: Ciclo de la marcha.....	19
Figura 2.7: Robot IRb6	20
Figura 2.8: Telemanipuladores de Goertz	21
Figura 2.9: Handy-Man de Mosher.....	22
Figura 2.10: Robot bípedo pasivo de McGeer.....	24
Figura 2.11: Robot Ranger.....	25
Figura 2.12: Robot Toddler del MIT.....	26
Figura 2.13: Robot Denise.....	27
Figura 2.14: Robot ELEKTRO	28
Figura 2.15: WABOT-1	29
Figura 2.16: WABOT-2.....	29
Figura 2.17: E0.....	30
Figura 2.18: E1, E2, E3.....	30
Figura 2.19: Shadow Walker	31
Figura 2.20: E4, E5, E6	32
Figura 2.21: P1, P2, P3.....	33
Figura 2.22: Hadaly-2.....	34
Figura 2.23: HRP-1S	34
Figura 2.24: SDR-3X	35
Figura 2.25: ASIMO.....	36
Figura 2.26: H6.....	37
Figura 2.27: SDR-4X	38
Figura 2.28: HRP-2P	38
Figura 2.29: HRP-2	39



Figura 2.30: QRIO	40
Figura 2.31: Partner	40
Figura 2.32: Rh-1	41
Figura 2.33: MechaDroid Type C3	42
Figura 2.34: NIT Humanoide	43
Figura 3.1: Diseño Inicial.....	46
Figura 3.2: Diseño Básico Final.....	47
Figura 3.3: Mecanismo Chebyshev	48
Figura 3.4: Notación del Chebyshev.	48
Figura 3.5: Notación del Pantógrafo.....	49
Figura 3.6: Notación utilizada y trayectorias.....	50
Figura 3.7: Modelo FIBRILAR implementado en Working Models y en MSC.ADAMS.....	51
Figura 3.8: Modelo FIBRILAR.	53
Figura 3.9: Modelo de PASIBOT en SolidWorks.....	54
Figura 3.10: Modelo de PASIBOT. Vista lateral.	55
Figura 3.11: Modelo GAMBA en Working Models.	55
Figura 3.12: Modelo GAMBA implementado en MSC.ADAMS.....	57
Figura 3.13: Trayectorias generadas por variación de la Posición del Punto M.	58
Figura 3.14: Diseño de Actuador.....	59
Figura 3.15: Diagrama de movimiento del actuador.....	60
Figura 3.16: Modelo GAMBA con Manivela 1 a 180°	61
Figura 3.17: Modelo inicial.....	68
Figura 3.18: Modelo con paso cambiado	68
Figura 3.19: Pareja.....	69
Figura 3.20: Variante con taladros	69
Figura 3.21: Rigidizadores en la cadera.....	69
Figura 3.22: Carenado	70
Figura 3.23: Modelo sin actuador	70
Figura 3.24: Pies en doble T	71
Figura 3.25: Pies en cuadrado	71
Figura 3.26: Modelo con actuador.....	72
Figura 3.28: Modelo simplificado.....	73
Figura 4.1: Menú de inicio	75
Figura 4.2: Espacio de trabajo y barra de tareas.....	76



Figura 4.3: Barra de tareas.....	77
Figura 4.4: Barra de tareas de diseño.....	78
Figura 4.5: Menú de diseño.....	79
Figura 4.6: Editor de Puntos “Point Table”.....	80
Figura 4.7: Punto añadido al suelo “Ground”.....	80
Figura 4.8: MARKERS.....	81
Figura 4.9: Cuadro de diálogo de MARKERS.....	82
Figura 4.10: Tipos de líneas.....	83
Figura 4.11: Modificación de dimensiones.....	87
Figura 4.12: Posición de.....	88
los sólidos.....	88
Figura 4.13: Modificación de dimensiones.....	89
Figura 4.14: Diseño de Juntas.....	90
Figura 4.15: Selección de Elementos.....	91
Figura 4.16: Menú de modificación de juntas.....	92
Figura 4.17: Menú de movimientos de precisión de juntas.....	92
Figura 4.18: Definición de juntas.....	93
Figura 4.19: Cuadro de Diálogo de actuadores.....	95
Figura 4.20: Menú de Juntas.....	95
Figura 4.21: Constructor de funciones.....	96
Figura 4.22: Menú de Fuerzas.....	97
Figura 4.23: Menú de Contactos.....	98
Figura 4.24: Menú de simulación.....	99
Figura 4.25: Menú de Animación.....	100
Figura 4.26: Barra de herramientas de medidas.....	101
Figura 4.27: Medidas.....	101
Figura 4.28: Medidas de elementos.....	102
Figura 4.29: Paso de medidas al POSTPROCESADOR.....	103
Figura 4.30: Postprocesador.....	103
Figura 4.31: Exportación de datos y archivos.....	104
Figura 4.32: Carga y visualización de animaciones en el Postprocesador....	105
Figura 4.33: Ventana de inicio.....	106
Figura 4.34: Tipo de archivo a importar.....	107
Figura 4.35: Buscar archivo a importar.....	107
Figura 4.36: Creación del modelo.....	108
Figura 4.37: Cambio de nombre para el modelo.....	108



Figura 4.38: Modelo sin renderizar.....	109
Figura 4.39: Modelo renderizado.....	109
Figura 4.40: Giro del modelo.....	110
Figura 4.41: Traslación del modelo.....	111
Figura 4.42: Multiselección.....	112
Figura 4.43: Database Navigator.....	113
Figura 4.44: Ventana de información.....	114
Figura 4.45: Modificación del elemento.....	114
Figura 4.46: Cambio de nombre.....	115
Figura 4.47: Selección de material.....	115
Figura 4.48: Cambio de nombre múltiple.....	116
Figura 4.49: Markers CDM.....	116
Figura 4.50: Junta de revolución.....	117
Figura 4.51: Junta "Point Curve".....	118
Figura 4.52: Junta de Fijación.....	118
Figura 4.53: Junta de traslación.....	119
Figura 4.54: Implementación del motor rotativo.....	119
Figura 4.55: Implementación del motor lineal.....	120
Figura 4.56: Implementación del suelo.....	120
Figura 4.57: Propiedades de la malla.....	121
Figura 4.58: Redimensionado del suelo.....	121
Figura 4.59: Añadir contacto.....	122
Figura 4.60: Seleccionar elementos.....	122
Figura 4.61: Selección de partes.....	123
Figura 4.62: Constructor de funciones.....	124
Figura 4.63: Ventana de selección.....	124
Figura 5.1: Pie pivotando en el talón al inicio del paso.....	128
Figura 5.2: Pie pivotando en la punta al inicio del paso.....	128
Figura 5.3: Cadera nueva.....	129
Figura 5.4: Cadera antigua.....	132
Figura 5.5: Cadera nueva.....	132
Figura 6.1: Denominación de puntos.....	158



ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 3.1: Relación de Posición Eje X.....	62
Gráfico 3.2: Relación de Posición Eje Y.....	62
Gráfico 3.3: Relación de Posición Ejes X.....	63
Gráfico 3.4: Relación de Posición Eje Y.....	63
Gráfico 3.5: Incremento de Posición Punto M.....	64
Gráfico 3.6: Incremento de Posición Punto A.....	64
Gráfico 3.7: Espacio de trabajo del pantógrafo.....	65
Gráfico 3.8: Espacio de trabajo final.....	66
Gráfico 5.1: Trayectoria del pie en función del actuador.....	130
Gráfico 6.1: Par vs ciclo (Teórico).....	135
Tabla 6.2: Par en función de la masa.....	136
Gráfico 6.3: Par-Posición vs Tiempo ($\pi/4$).....	139
Gráfico 6.4: Par-Posición vs Ciclo ($\pi/4$).....	140
Gráfico 6.5: Par-Posición vs Tiempo ($3\pi/2$).....	140
Gráfico 6.6: Par-Posición vs Tiempo ($3(\pi/2)$).....	141
Gráfico 6.7: Par-Posición vs Tiempo ($13\pi/4$).....	142
Gráfico 6.8: Par-Posición vs Tiempo ($13\pi/4$).....	143
Gráfico 6.9: Par vs periodo.....	144
Gráfico 6.10: Par máximo vs par mínimo.....	145
Gráfico 6.11: Par vs velocidad.....	146
Gráfico 6.12: Par vs Tiempo ($\pi/4$) sin filtrar.....	148
Gráfico 6.13: Par vs Tiempo ($\pi/4$) filtrado.....	148
Gráfico 6.14: Par vs Ciclo ($\pi/4$).....	149
Gráfico 6.15: Par vs Tiempo ($3\pi/2$) sin filtrar.....	149
Gráfico 6.16: Par vs Tiempo ($3\pi/2$) filtrado.....	150
Gráfico 6.17: Par vs Ciclo ($3\pi/2$).....	150
Gráfico 6.18: Par vs Tiempo ($13\pi/4$) sin filtrar.....	151
Gráfico 6.19: Par vs Tiempo ($13\pi/4$) primer filtrado.....	151
Gráfico 6.20: Par vs Tiempo ($13\pi/4$) segundo filtrado.....	152
Gráfico 6.21: Par vs Ciclo ($13\pi/4$).....	152
Gráfico 6.22: Comparativa en ciclo modelo libre vs modelo colgado ($\pi/4$).....	153
Gráfico 6.23: Comparativa en ciclo modelo libre vs modelo colgado ($3\pi/2$)...	154
Gráfico 6.24: Comparativa en ciclo modelo libre vs modelo colgado ($13\pi/4$).	155



Gráfico 6.25: Comparativa con diferentes masas para la cadera ($\pi/4$)	156
Gráfico 6.26: Comparativa con diferentes masas para la cadera ($3\pi/2$)	156
Gráfico 6.27: Comparativa con diferentes masas para la cadera ($13\pi/4$)	157
Gráfico 6.28: Dos pies en apoyo-Posición inicial.....	161
Gráfico 6.29: Pie dcho levantado e izq apoyado-Posición inicial.....	162
Gráfico 6.30: Pie dcho apoyado e izq levantado- Posición inicial.....	163
Gráfico 6.31: Dos pies en apoyo-Adelantando el actuador izquierdo 5mm....	164
Gráfico 6.32 Pie dcho levantado e izq apoyado-Adelantando el actuador izquierdo 5mm.....	165
Gráfico 6.33: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el actuador izquierdo 5mm.....	166
Gráfico 6.34: Dos pies en apoyo-adelantando el actuador izquierdo 25mm ..	167
Gráfico 6.35: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando el actuador izquierdo 25mm.....	168
Gráfico 6.36-. Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el actuador izquierdo 25mm.....	169
Gráfico 6.37: Dos pies en apoyo-Adelantando el actuador izquierdo 40mm..	170
Gráfico 6.38: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando el actuador izquierdo 40mm.....	171
Gráfico 6.39: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el actuador izquierdo 40mm.....	172
Gráfico 6.40: Dos pies en apoyo- -Atrasando el actuador izquierdo 5mm	173
Gráfico 6.41: Pie dcho levantado e izq apoyado-Atrasando el actuador izquierdo 5mm.....	174
Gráfico 6.42: Pie dcho apoyado e izq levantado--Atrasando el actuador izquierdo 5mm.....	174
Gráfico 6.43: Dos pies en apoyo--Atrasando el actuador izquierdo 25mm	175
Gráfico 6.44: Pie dcho levantado e izq apoyado--Atrasando el actuador izquierdo 25mm.....	176
Gráfico 6.45: Pie dcho apoyado e izq levantado--Atrasando el actuador izquierdo 25mm.....	177
Gráfico 6.46: Dos pies en apoyo--Atrasando el actuador izquierdo 40mm	178
Gráfico 6.47: Pie dcho levantado e izq apoyado--Atrasando el actuador izquierdo 40mm.....	179
Gráfico 6.48: Pie dcho apoyado e izq levantado-Atrasando el actuador izquierdo 40mm.....	180
Gráfico 6.49: Dos pies en apoyo—Adelantando ambos actuadores 5mm	181
Gráfico 6.50: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando ambos actuadores 5mm.....	182



Gráfico 6.51: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando ambos actuadores 5mm.....	183
Gráfico 6.52: Dos pies en apoyo- Adelantando ambos actuadores 25mm.....	184
Gráfico 6.53: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando ambos actuadores 25mm.....	185
Gráfico 6.54: Pie dcho apoyado e izq levantado Adelantando ambos actuadores 25mm	185
Gráfico 6.55: Dos pies en apoyo- Adelantando ambos actuadores 40mm.....	186
Gráfico 6.56: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando ambos actuadores 40mm.....	187
Gráfico 6.57: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando ambos actuadores 40mm.....	188
Gráfico 6.58: Dos pies en apoyo- Atrasando ambos actuadores 5mm	189
Gráfico 6.59: Pie dcho levantado e izq apoyado- Atrasando ambos actuadores 5mm	190
Gráfico 6.60: Pie dcho apoyado e izq levantado- Atrasando ambos actuadores 5mm	190
Gráfico 6.61: Dos pies en apoyo- Atrasando ambos actuadores 25mm	191
Gráfico 6.62: Pie dcho levantado e izq apoyado- Atrasando ambos actuadores 25mm	192
Gráfico 6.63: Pie dcho apoyado e izq levantado- Atrasando ambos actuadores 25mm	192
Gráfico 6.64: Dos pies en apoyo- Atrasando ambos actuadores 40mm	193
Gráfico 6.65: Pie dcho levantado e izq apoyado- Atrasando ambos actuadores 40mm	194
Gráfico 6.66: Pie dcho apoyado e izq levantado- Atrasando ambos actuadores 40mm	195
Gráfico 6.67: Dos pies en apoyo-Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 5mm	196
Gráfico 6.68: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 5mm.....	197
Gráfico 6.69: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 5mm.....	198
Gráfico 6.70: Dos pies en apoyo- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 25mm	199
Gráfico 6.71: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 25mm.....	200
Gráfico 6.72: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 25mm.....	201



Gráfico 6.73: Dos pies en apoyo- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 40mm	202
Gráfico 6.74: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 40mm.....	203
Gráfico 6.75: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 40mm.....	204
Gráfico 6.76: Variación de la posición de uno de los actuadores hacia delante	206
Gráfico 6.77: Variación de la posición de uno de los actuadores hacia atrás.	207
Gráfico 6.78: Variación de la posición de ambos actuadores hacia delante ..	208
Gráfico 6.79: Variación de la posición de ambos actuadores hacia atrás	209
Gráfico 6.80: Variación de la posición de los actuadores simétricamente.....	210



Capítulo I:

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Cuando se habla de robótica es necesario distinguir entre la robótica industrial, centrada en el estudio de robots manipuladores, y la robótica enfocada al diseño de robots móviles con diferentes grados de autonomía. La primera lleva estudiándose desde los años 50 y forma parte actualmente del tejido industrial de los países desarrollados principalmente en cadenas de montaje, fábricas de automóviles, etc.

Las tendencias tecnológicas actuales y futuras muestran un claro enfoque hacia la utilización de todo tipo de robots y dispositivos electrónicos en nuestra vida cotidiana que ayuden al ser humano a desarrollar de una forma más eficaz y con mayores garantías sus actividades. En este sentido, la robótica de servicio es una de las áreas de mayor auge entre las líneas de investigación en campos como la robótica y la automatización. En la actualidad, existen líneas de diseño de robots orientadas a diversas áreas muy diferentes, como pueden ser: asistencia personal, aplicaciones médicas, cadenas de montaje (Figura 1.1) y otras muchas disciplinas.



Figura 1.1: Robots en una cadena de montaje

Otra línea muy importante, de gran desarrollo durante las últimas décadas, ha sido la orientada al diseño de robots humanoides (Figura 1.2), que imiten las conductas humanas. Se pretende que estos robots puedan adaptarse a un entorno doméstico o laboral en situaciones en las que las habilidades humanas se encuentran limitadas, ya sean situaciones de riesgo o de gran precisión exigida, en contraste con las de gran potencia, precisión y fiabilidad que pueden mostrar algunos humanoides.



Figura 1.2: evolución de los robots humanoides.

En esta línea el grupo de investigación *MAQLAB* del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid está trabajando en un proyecto de investigación en el campo de la robótica humanoide, más concretamente se ha desarrollado un robot bípedo que imita el comportamiento humano al caminar.

Uno de los mayores inconvenientes de los robots es su peso y su consumo. En la gran mayoría de ellos el 30% de su peso se debe a los diferentes actuadores, consecuencia del elevado número de grados de libertad y el 25% a los reductores acoplados a ellos. Si se consiguen diseñar nuevos mecanismos y cadenas cinemáticas, manteniendo el mismo número de grados de libertad que un robot humanoide, pero con menor número de actuadores y reductores, es posible reducir drásticamente el peso y el coste del robot. Por supuesto, asociado a este hecho, está la disminución del consumo de energía del robot, ya que la mayor parte de ésta es requerida por los motores. Esta mejora conllevaría una



disminución de sus baterías, con la consiguiente disminución también del peso total del robot.

Para el diseño de los robots se debe intentar seguir ciertas directrices:

El robot bípedo debe ser capaz de realizar la dinámica andante, ser autónomo en cuanto a los actuadores, sensores, procesador y fuente de alimentación. Ha de tener menos actuadores que juntas y ser éstos rotativos además de reducir al mínimo el peso total para tener un bajo consumo de energía. Para el diseño de la pierna del bípedo, en el plano sagital se deben utilizar mecanismos de barras articuladas y la topología del robot debe tener forma antropomórfica.

Y debe cumplir los siguientes requisitos:

El robot debe ser capaz de caminar sobre varias superficies: plano, con inclinación, escaleras, además de ser capaz de ejecutar diferentes tipos de andar. 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 ajustado (condiciones del pie: la forma, la rigidez, amortiguación,...). El robot debe ser capaz de caminar con una velocidad constante. Maximizar la similitud de los robots al andar en comparación con la de los seres humanos. El grado de modularidad en el diseño debe ser alto, para futuras actualizaciones.

La principal ventaja que presenta el diseño de robots pasivos es la reducción drástica de actuadores. Esta reducción es debida a que la dinámica andante es realizada por la disposición de los mecanismos y la combinación de movimientos de los mismos. La reducción de actuadores implica otras ventajas, como la reducción de peso, un control de movimiento más fácil, llevada a cabo mediante técnicas de dinámica pasiva, y la reducción del coste total. Sin embargo y a priori presentará otros inconvenientes frente a los robots humanoides. Estos serán una movilidad más reducida y una mayor dificultad para simular la forma de caminar de los seres humanos.

Todo ello repercute en un diseño de menor coste económico, parámetro fundamental en cualquier tipo de proyecto que le proporciona una gran ventaja respecto al resto de sus homólogos.

Aparte de los bípedos andantes, esta disposición es utilizada también para el diseño de sillas andantes.

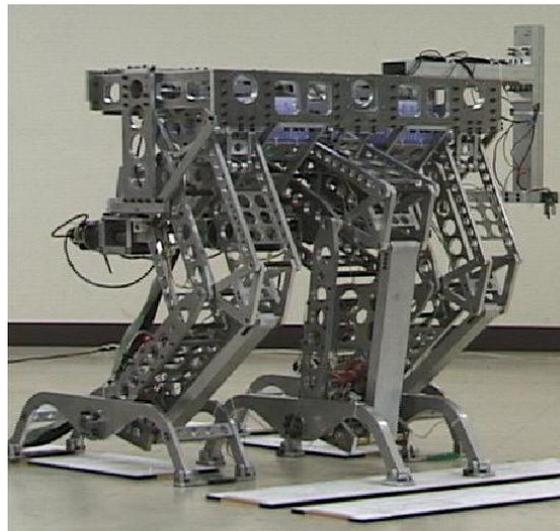


Figura 1.3: Silla andante

La motivación final de la realización del presente proyecto es colaborar en el desarrollo del robot bípedo de la Universidad Carlos III. Formar parte de un proyecto real de ingeniería mecánica y adquirir conocimientos y técnicas científicas aplicadas al campo de la robótica, así como proponer mejoras encaminadas a lograr la resolución de los problemas que se plantean y que afectan directamente al proyecto PASIBOT.

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El desarrollo del robot bípedo “PASIBOT” 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 ha desarrollado un primer modelo de un solo grado de libertad, a través del cual se consigue una configuración muy ligera que reproduce el caminar humano.

Esta característica tan restrictiva de PASIBOT exigió el diseño de un mecanismo que hiciese caminar al robot con el giro de un pequeño motor eléctrico. El robot PASIBOT fue fabricado en el taller de la Universidad según el diseño ideado por sus creadores. Una vez construido, fue probado y se observó que su funcionamiento no se correspondía con el teórico, sino que en fase de apoyo simple vuelca lateralmente

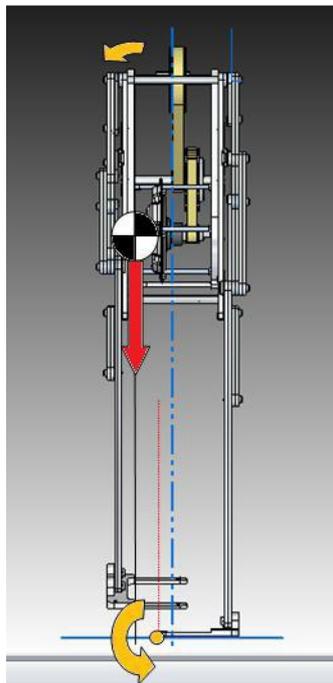


Figura 1.4: Vuelco lateral debido al apoyo simple



El objetivo que se persigue con la realización de este proyecto es el de analizar y optimizar el diseño del robot PASIBOT realizado por el Grupo MAQLAB (Laboratorio de Máquinas) con anterioridad, con el fin de detectar y corregir sus disfunciones y conseguir un funcionamiento del mismo más estable y funcional.

Se pretende analizar el motivo de las inestabilidades del PASIBOT haciendo varios estudios de trayectorias de centros de masa, análisis de movimientos, velocidades y aceleraciones así como evaluación de los pares que se producen en las manivelas.

Teniendo en cuenta la situación actual del proyecto PASIBOT los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Modelar una copia simplificada de PASIBOT utilizando la herramienta informática SOLID EDGE y diseñar un nuevo sistema de estabilización mediante la introducción de un actuador horizontal. Esta réplica virtual permitirá realizar el análisis del robot y de sus mejoras sin necesidad de construir costosos prototipos físicos.
- Definir y concretar las causas del comportamiento inestable del robot para poder trabajar sobre ellas.
- Idear soluciones al problema que se plantea, realizando el diseño y detallando las bases teóricas que avalan estas propuestas.
- Implementación del nuevo modelo en el programa ADAMS, simulación del bípedo con el nuevo estabilizador y realización de un análisis sobre el modelo virtual de PASIBOT para verificar la exactitud y validez de las mejoras propuestas.
- Analizar los resultados obtenidos y extraer conclusiones.
- Por último se redactará la presente memoria documental del proyecto.



1.3. FASES DEL PROYECTO.

En cualquier proyecto de ingeniería hay que definir una serie de fases de desarrollo del mismo. En nuestro caso, al tratarse de un proyecto de innovación, se dispone de mayor libertad a la hora de diseñar ya que no se tienen ninguna restricción previa y queda a criterio de los investigadores la bondad del diseño final.

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. Posteriormente estos datos serán analizados, pudiendo provocar modificaciones en el modelo primario si los resultados obtenidos no son del todo satisfactorios.
- **FASE 3. Implementación final:** Cuando los resultados del modelo virtual modificado son satisfactorios y acorde con los objetivos establecidos se procederá a implementar el modelo real y se someterá a las pruebas oportunas que determinen que se han alcanzado los objetivos previamente establecidos.

El presente proyecto se origina en diseños previos, pero con unas modificaciones que no han sido aún probadas analíticamente. Luego, este proyecto partiría de la FASE 2, implementando dicho modelo en un programa de CAD para ser, posteriormente, simulado y comprobado. Para el objetivo principal, estudio de viabilidad de la implementación de actuadores en el diseño básico del PASIBOT. Se plantearán mejoras en el diseño y se contemplarán otras posibilidades.

Las fases que se seguirán en el presente proyecto serán las siguientes:



Primero se modelará en SOLID EDGE un diseño del PASIBOT básico a partir de una versión con todas las características del mismo (rodamientos, arandelas, etc.) para la posterior exportación e interpretación por parte del programa informático MSC ADAMS 2005; software con el que haremos los diferentes análisis posteriormente. La utilización de esta última herramienta informática conlleva un aprendizaje previo. Éste aprendizaje será expuesto a modo de tutorial para la posterior utilización del mismo por parte de las sucesivas personas que tengan que trabajar con dicha herramienta. Se realizará un estudio a fondo del software MSC.ADAMS 2005, en el módulo View y PostProcessor, que es específico para el diseño y simulación de mecanismos así como la obtención de los resultados tanto numéricos como gráficos. Una vez realizado el estudio se generará un documento a modo de guía básica para el usuario de MSC.ADAMS View y PostProcessor

Se llevarán a cabo diferentes modelados con el fin de obtener finalmente el mejor para realizar los correspondientes análisis, los cuales son el fin de este proyecto. En capítulos posteriores se hará un breve resumen de los modelados llevados a cabo y el resultado final con el modelado definitivo. Éste último estará dotado de un actuador horizontal que será parte del estudio que se realice en este documento.

Por otro lado se analizará la incidencia de la velocidad del motor en relación con la variación de los momentos sufridos en las manivelas en el modelo restringido así como el efecto de la masa en el par producido en las manivelas en el modelo libre.

Finalmente se hará un estudio sobre la influencia del actuador horizontal diseñado sobre la estabilidad del robot en función de su posición.



1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento se encuentra dividido en ocho capítulos, además de los anexos y la bibliografía:

➤ **CAPÍTULO I – MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.**

En este primer capítulo se exponen las motivaciones, objetivos, fases y estructura del proyecto.

➤ **CAPÍTULO II – INTRODUCCIÓN.**

Se expone una breve introducción a la robótica. También se incluye una clasificación de los distintos tipos de robots bípedos activos y pasivos más destacados.

➤ **CAPÍTULO III – PROPUESTAS DE DISEÑO DEL PASIBOT.**

En este capítulo es uno de los más amplios del Proyecto. En él se explican algunas de las claves del diseño del Pasibot por el departamento MAQLAB. Posteriormente se explica todo el trabajo de simplificación del modelado, la exportación a MSC Adams y el montaje final del conjunto en dicho programa. Además se explica la evolución de los modelos a lo largo de este proyecto, el porqué de su estimación o desestimación y el motivo de la elección del modelo final para su estudio

➤ **CAPÍTULO IV – MANUAL DE APRENDIZAJE DE MSC ADAMS.**

En este capítulo se realizará una breve descripción del software de diseño y simulación MSC.ADAMS, más concretamente del módulo View. Se proseguirá con la elaboración de un manual de uso que ayudará a comprender la dinámica de diseño utilizada en las simulaciones, así como la elaboración de un tutorial para el aprendizaje en la importación de datos y obtención de resultados. También se explicarán algunas utilidades importantes en el uso del programa como son las ventanas “comand navigator” y “database navigator”. La elaboración de este manual está pensado también para que asista a futuros usuarios del software, así como a los trabajos futuros basados en el presente proyecto.



➤ **CAPÍTULO V – ESTUDIO DE FUNCIONALIDAD EN ADAMS Y DISEÑO DEL NUEVO ACTUADOR**

En este capítulo se trata el principal objetivo del Proyecto, que es el estudio del modelo original en Adams y propuesta de una modificación para optimizarlo. Esta mejora es un nuevo actuador para la modificación del centro de gravedad del robot.

➤ **CAPÍTULO VI – 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 VII – CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.**

En este capítulo se obtienen las conclusiones que se han alcanzado con el desarrollo del Proyecto y se exponen trabajos futuros relacionados con la optimización del prototipo.

➤ **CAPÍTULO VIII – BIBLIOGRAFÍA.**

En este último capítulo se recogen las referencias bibliográficas empleadas.

➤ **ANEXOS**



Capítulo II:

INTRODUCCIÓN



2.1. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA

Robot

La palabra robot tiene su origen en la palabra eslava “robota” referida al trabajo realizado de manera forzada. Esta palabra fue utilizada por primera vez en 1921 en la obra teatral “Rossum’s Universal Robot” escrita por Karen Capek. Posteriormente aparecería en el argumento del filme alemán Metrópolis de Thea von Harbou y Fritz Lang en 1926.

En la década de los años cuarenta el bielorruso nacionalizado estadounidense Isaac Asimov, fue el pionero en utilizar la palabra robot aplicada al campo científico de construcción y programación de los mismos. Aunque sin lugar a dudas este científico es famoso por enunciar sus leyes de la robótica. En el año 1942 en su obra “Rundaround” establece las tres leyes de la robótica:

1. *Un robot no puede perjudicar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.*
2. *Un robot a de obedecer las órdenes recibidas de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.*
3. *Un robot debe proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera o la segunda ley.*

Antecedentes

Desde hace siglos el ser humano ha intentado recrear de forma artificial las conductas humanas. Ya en el antiguo Egipto y Grecia se tiene constancia de artilugios muy simples pero que ya introducían el concepto de mecanismo móvil que se utilizaban para fascinar a los fieles del reino.

Pero el primer antecedente de lo que se considera un mecanismo autómatas y precedente del desarrollo de la robótica se tiene con el telar mecánico de Joseph Marie Jacquard.

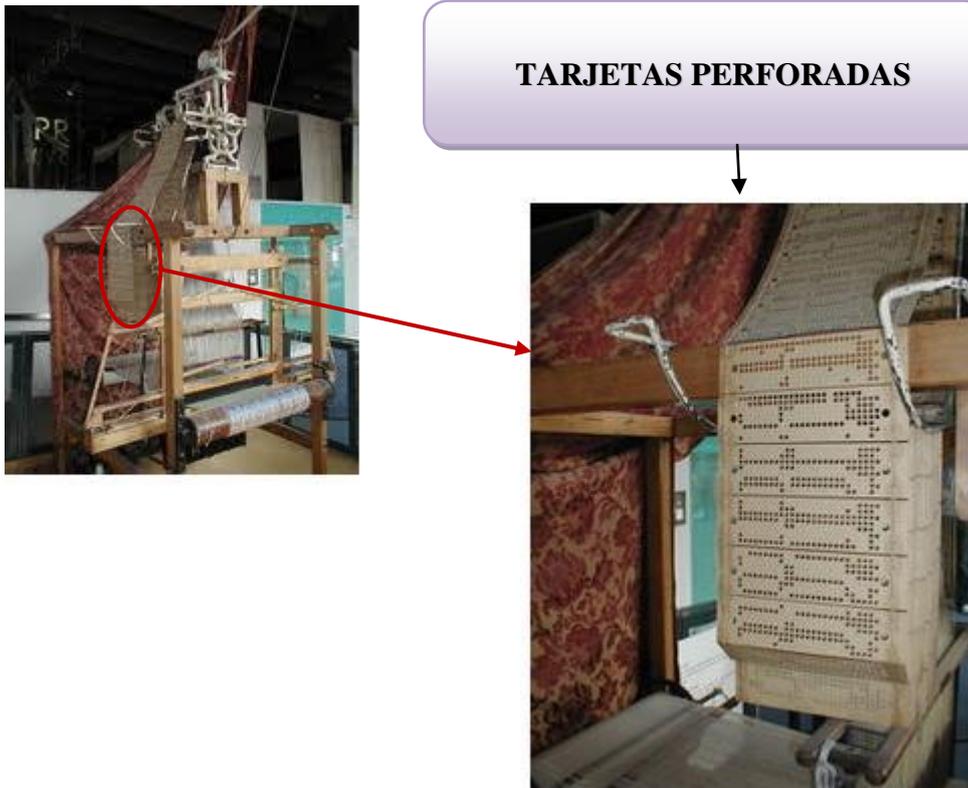


Figura 2.1: Telar mecánico de Jacquard

Este primer invento se vio apoyado por la Revolución Industrial de finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, en el cual los aparatos mecánicos sufrieron un gran impulso. En esta época cabe destacar el torno mecánico de Babbitt (1892) y sobretodo unos muñecos mecánicos muy ingeniosos de dos o más posiciones que golpeaban campanas accionados por medio de mecanismos de relojería “Jaquemarts” (Figura 2.2) que actualmente siguen funcionando y también muñecos a tamaño real contruidos por Jacques de Vaucansos imitando acciones humanas, entre las que destacan la música y la escritura.



Figura 2.2: Jaquemarts

Robótica actual y futura

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. Actualmente no existe ningún sector industrial que opere sin la ayuda de algún tipo de dispositivo mecánico. Las tareas que desempeñan son muy variadas, si bien todas ellas se enmarcan dentro de alguna de las siguientes funciones: tareas peligrosas, difíciles, de gran precisión, repetitivas, de gran esfuerzo requerido, etc.

En otras aplicaciones, los robots son utilizados en aquellos lugares donde el ser humano no puede llegar, bien sea por sus limitaciones físicas o por otros motivos. Se trata de tareas como: exploración espacial de otros planetas, manipulación y limpieza de productos tóxicos, localización de personas, manipulación de productos radiactivos, etc.

Pero sin duda una de las aplicaciones más claras y comúnmente conocida por todos es la de cadenas de montaje. En este campo los robots son la fuente predominante y el principal activo. Los más utilizados en este caso son los robots articulados que imitan el movimiento del brazo humano. La industria que ha apostado claramente por este tipo de producción en serie, es la industria automovilística. En ella numerosos son los robots utilizados que realizan todo tipo de operaciones, tanto pintado, como soldado, atornillado, lijado, etc. (Figura 2.3)



Figura 2.3: Robot articulado

Otro de los campos de aplicación actualmente en gran desarrollo es el de la medicina. Cada vez se está introduciendo más el uso de aparatos mecánicos y electrónicos para mejorar sobre todo la precisión en las acciones realizadas en situaciones en las que se requiere gran precisión y exactitud (Figura 2.4). Además de todo esto se están diseñando robots microscópicos que puedan ser introducidos en el cuerpo humano

a modo de exploradores que puedan viajar libremente por cualquier parte del cuerpo. Esto supone toda una revolución en el tratamiento de algunos tipos de enfermedades, ya que no es necesario más que una pequeña incisión para introducir el nanorobot

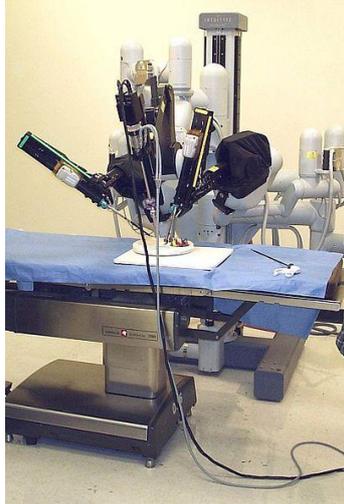


Figura 2.4: Robot médico

Finalmente otro sector muy importante donde los robots tienen y tendrán un protagonismo fundamental es en las exploraciones espaciales a otros planetas. Debido a las duras condiciones de los viajes espaciales y las estrictas condiciones ambientales de los planetas, los robots se presentan como la única alternativa viable hoy en día para realizar este tipo de misiones. Así se puede poner como ejemplo el robot explorador que la NASA y la Agencia Espacial Europea enviaron al planeta Marte el “Spirit”. Actualmente se están mejorando el diseño de este tipo de robots basados en las experiencias pasadas para tratar de hacerlos más eficaces y útiles.



Figura 2.5: Robot explorador SPIRIT



2.2. CLASIFICACIÓN, TIPOS DE ROBOTS Y FUNDAMENTOS DE LA MARCHA BÍPEDA.

Los robots se pueden clasificar en base a numerosos criterios. Dos de los criterios más utilizados son:

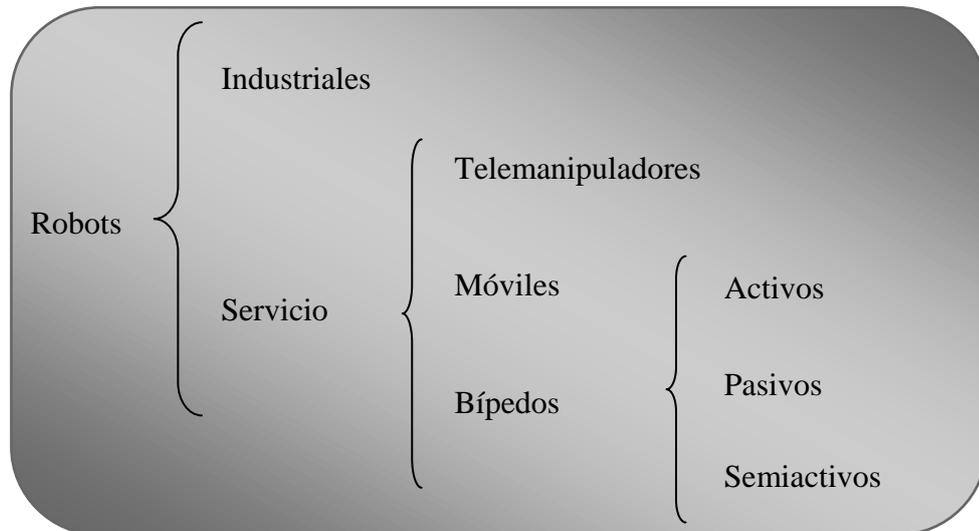
2.2.1. Clasificación por generaciones

- 1ª Generación: Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.
- 2ª Generación: Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.
- 3ª Generación: Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee capacidad para la planificación automática de tareas.

2.2.2. Clasificación por prestaciones

- Tipo A: Manipulador con control manual o telemando.
- Tipo B: Manipulador automático con ciclos preajustados, regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
- Tipo C: Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.
- Tipo D: Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

Aunque la clasificación más relevante para el presente proyecto es la siguiente:



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

2.2.3. Fundamentos de la marcha bípeda

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. Esto para los seres humanos no es del todo imprescindible ya que cuando corremos hay momentos en los que tenemos ambos pies en el aire.

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:

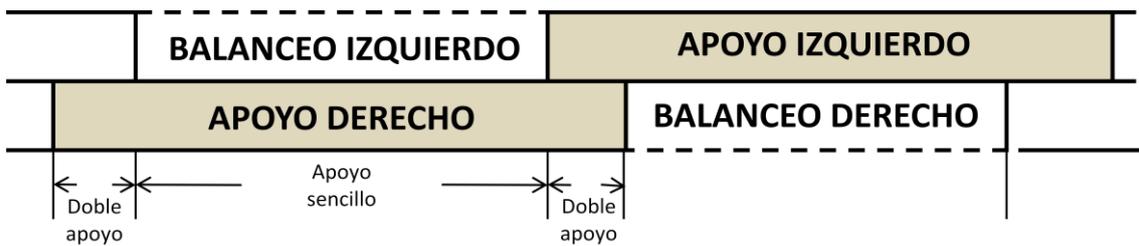
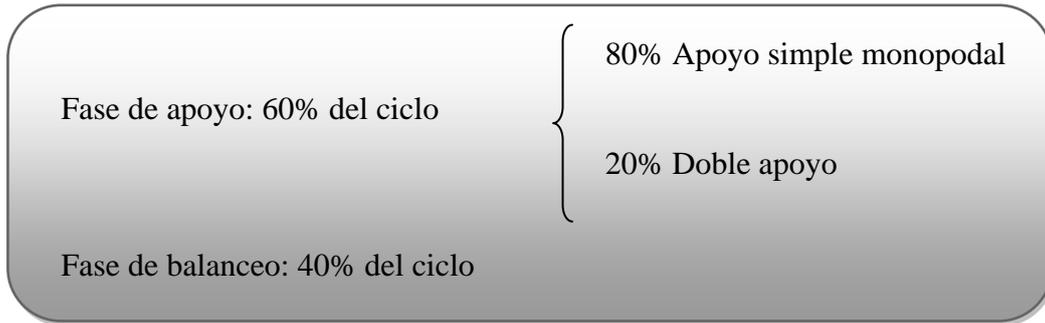


Figura 2.6: Ciclo de la marcha

Con el aumento de la velocidad de la marcha hay un aumento relativo en el tiempo gastado en la fase de balanceo, y con la disminución de la velocidad una relativa disminución. La duración del doble apoyo disminuye cuando se aumenta la velocidad de la marcha.

La caminata comienza con los dos pies extendidos y sobre el suelo. Al estar ambos pies apoyados el equilibrio del robot en este instante es perfecto por lo que el equilibrio no es significativo. Esta fase es la que se ha nombrado como doble apoyo.

El gran problema comienza al levantar uno de los pies para realizar el avance ya que la tendencia es caer hacia ese lado y hacia delante o hacia atrás, dependiendo del estado dinámico del robot en ese instante. Esta fase se conoce como apoyo monopodal o simple del pie que está en contacto con el suelo y fase de balanceo del otro.

El medio ciclo se completa cuando los dos pies vuelven a estar en el suelo y nos encontramos de nuevo en fase de doble apoyo.

El otro medio ciclo es idéntico, solamente que el pie que se levanta es el que anteriormente servía de apoyo y viceversa.

2.2.4. Robots Industriales

Los robots industriales son los utilizados en todo tipo de industrias: automóvil, embalaje, siderurgia, y cualquier fábrica que emplee cadenas de montaje en general. Estos robots suelen ser brazos mecánicos que desempeñan tareas repetitivas en la mayoría de los casos, que podrían llegar a ser monótonas y por lo tanto peligrosas para el hombre. Además también pueden desempeñar otro tipo de tareas como: tareas peligrosas, tareas que requieran grandes esfuerzos, nocivas para la salud,

El primer robot industrial “Unimat” es lanzado al mercado en el año 1963 por la empresa estadounidense Unimation. Se trata de un robot sencillo que es instalado una de las fábricas de General Motors, para realizar trabajos sucios, pesados y peligrosos.

En Europa la firma sueca ASEA (Alabama State Employees Association), actualmente conocida como ABB (ASEA Brown Boveri) lanza al mercado en el año 1972 el primer robot con accionamiento totalmente eléctrico, el IRb6.



Figura 2.7: Robot IRb6

2.2.5. Robots de servicio

Una de las primeras definiciones de robot de servicio la dio el IPA (Fraunhofer Institute for Produktionstechnik und Automatisierung), que establece que un robot de servicio es: “un dispositivo móvil programable, que desarrolla servicios de manera total o parcialmente automática; entendiendo por servicios a

aquellas tareas que no sirven directamente a la industria de *fabricación de bienes, sino a la realización de servicios a las personas o a los equipos*”.

En la práctica, las actuales y potenciales aplicaciones no industriales de los robots son tan variadas y diferentes, que es difícil encontrar una definición suficientemente amplia y concreta. Tratando no obstante de establecer una primera división en estas aplicaciones no industriales de los robots, la IFR (International Federation of Robotics) ha propuesto clasificarlas en:

- Aplicaciones de servicios a humanos: (personal, protección, entretenimiento,...).
- Aplicaciones de servicios a equipos: (mantenimiento, reparación, limpieza,...).
- Otras funciones autónomas: (vigilancia, transporte, adquisición de datos, inspección, etc.).

Los robots de servicio se pueden clasificar en tres grandes grupos como se indicó anteriormente. Estos grupos son:

1.- Telemanipuladores.

Son dispositivos robóticos con brazos manipuladores, sensores y cierto grado de movilidad, controlados remotamente por un operador humano de manera directa o a través de un ordenador.

En 1948 R.C. Goertz del Argonne National Laboratory, desarrolló, con el objetivo de manipular elementos radioactivos sin riesgo para el operador, el primer telemanipulador. Éste consistía en un dispositivo mecánico maestro-esclavo.

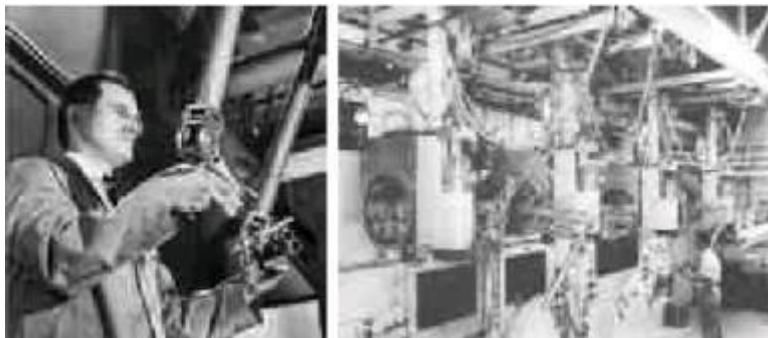


Figura 2.8: Telemanipuladores de Goertz

Otro de los pioneros en el campo de la telemanipulación fue Ralph Mosher, ingeniero que trabajó en la empresa General Electric. En el año 1958 Mosher desarrolló un dispositivo denominado Handy-Man, consistente en dos brazos mecánicos teleoperados mediante un maestro del tipo denominado exoesqueleto. Este nuevo tipo de robots revolucionó el mundo de la robótica tal y como se conocía hasta entonces. Junto a la industria nuclear, a lo largo de los años sesenta la industria submarina comenzó a interesarse por el uso de los telemanipuladores. A este interés se sumó la industria espacial en los años setenta.



Figura 2.9: Handy-Man de Mosher

2.- Móviles.

Son robots con gran capacidad de desplazamiento dotados de un sistema locomotor tipo rodante. Pueden seguir una trayectoria marcada por el teleoperador o pueden guiarse a través de la información que perciben a través de sus sensores adaptándose al entorno que le rodea. Existe una gran variedad de modos de moverse sobre una superficie sólida, entre las que destacan: las ruedas, las cadenas y las patas.

3.- Bípedos.

Son un tipo peculiar de robots móviles. Para su desplazamiento utilizan dos piernas. Se pueden clasificar en:



- **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.

2.3. HISTORIA DE LOS ROBOTS BÍPEDOS

A lo largo de los años siempre se ha intentado, mediante el uso de artilugios, imitar el movimiento humano en la forma de caminar. Con la aparición de los robots humanoides este interés aumentó, ya que en un principio la única aplicación eran juguetes. Aunque la inmensa mayoría de las soluciones propuestas para los bípedos fue un diseño de pierna similar al humano donde fémur, tibia y pie eran eslabones con juntas (cadera, rodilla y tobillo) accionadas por motores, hubo unos pocos investigadores que apostaron por emular el movimiento de otra forma. Esta forma consistía en la emulación del paso con la combinación de mecanismos clásicos, consiguiendo que el desplazamiento de ciertas juntas fuera el resultado de la dinámica del mecanismo.

El presente proyecto aborda el diseño de un robot bípedo que imite el caminar humano. Por lo tanto vamos a explicar más en profundidad cual ha sido la evolución de este tipo de robots a lo largo de la historia. Para ello utilizaremos la clasificación anterior.

Inicialmente se optó por un diseño en el cual se imitara la pierna humana donde cada una de las juntas de sus articulaciones: pie, tibia, peroné, fémur, cadera, estuviera accionada por un motor diferente. Con esta configuración se conseguía el movimiento del robot mediante la dinámica del mecanismo.

Hoy en día el diseño de robots humanoides es una de las líneas de investigación más importantes en el campo de la robótica. Se han desarrollado distintos tipos de humanoides que se detallarán a continuación que presentan características particulares dependiendo del modelo.

En cuanto a los países que participan en esta carrera, sin lugar a dudas Japón es el que ha hecho más progresos en este campo al igual que en muchos otros campos de la robótica. Los prototipos más novedosos y conocidos han sido desarrollados en Japón. En el resto del mundo son menos los prototipos desarrollados hasta la fecha. En España cabe destacar los robots *Rh-0* y *Rh-1*.

2.3.1. Robots bípedos pasivos

Los robots dinámicos pasivos fueron inventados y desarrollados por el ingeniero aeronáutico Tad McGeer entre 1988 y 1992. Para ello McGeer se inspiró en unos cálculos realizados una década antes por Tom McMahon en la Universidad de Harvard ayudado por un alumno suyo Simon Mochon. McMahon

A partir de los trabajos de McGeer y sus ayudantes no se ha avanzado en demasía en el campo de la robótica pasiva, si bien cabe destacar algunos modelos relevantes a lo largo de la historia.

El primer modelo que destacó fue el modelo de Martin Wisse, realizado en la Universidad de Cornell en el año 1998, con la ayuda de Andy Ruina. Wisse continuó desarrollando y evolucionando el modelo de McGeer, hasta alcanzar un andador pasivo dinámico 3D con rodillas, basado en simulaciones en 2D.



Figura 2.10: Robot bípedo pasivo de McGeer

Tras este avance, algunas universidades han conseguido diseñar otros robots bípedos pasivos que imiten en caminar humano, mejorando el modelo de Wisse-Ruina. Tres equipos de investigación de las universidades de Cornell, Delft (Holanda) y el MIT han logrado construir robots cuyos pasos y movimiento se parecen a la forma de andar de los humanos. Fueron presentados en febrero del año 2005 en la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS), y los tres se basan en el mismo principio: suponen una extensión de varios años de investigación en robots cuyo sistema de movimiento tengan un diseño dinámico pasivo.

Robot Ranger de la Universidad de Cornell

El Robot Ranger desarrollado por Andy Ruina en la Universidad de Cornell es el más pesado de todos los modelos. Sus piernas miden un metro de largo (incluyendo tobillos, rodillas y caderas) sólo es capaz de caminar hacia delante y pesa 26 libras. Además consta de dos brazos, una barra corta en el lugar del torso, una caja plana por cabeza que aloja un pequeño microcontrolador, algo de electrónica y programación muy sencilla (ya que gran parte del problema de los controles se soluciona a través del diseño mecánico del robot) y un par de baterías a cada lado. Se balanceaba como una persona con muletas, pero no se cayó. Anduvo un kilómetro en círculos por la pista de atletismo de la Universidad de Cornell. Un logro sin precedentes.



Figura 2.11: Robot Ranger.

Robots Toddlers del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts)

Los robots del MIT son conocidos como los “Toddlers”, son los más sofisticados ya que pueden caminar en otras direcciones, pesan unas cinco libras y miden 43 centímetros de alto. El Toddler también muestra un sistema de aprendizaje nuevo, que permite que el robot se adapte de forma continua al terreno sobre el que se mueve. Estos nuevos avances en robótica podrían transformar los actuales sistemas de diseño y control de robots, y podrían ser aplicados al desarrollo de prótesis robóticas.

El robot del MIT utiliza un programa de aprendizaje que aprovecha dicho diseño y permite que el robot se enseñe a sí mismo a andar en menos de 20 minutos. Precisamente su apodo, "Toddler" (el término inglés para un niño pequeño que empieza a andar) se deriva de su capacidad de aprender a andar y la forma en la que lo hace.

Este modelo de robot es uno de los primeros robots en utilizar un programa de aprendizaje y es el primero en andar sin tener información previamente implantada en sus controles. Además el sistema de aprendizaje permite que el robot se mueva con eficacia por una variedad de superficies y, en el futuro, podría permitir que se muevan por terreno muy rocoso. Esto se debe a que el programa funciona con tanta velocidad que el robot puede adaptarse de forma continua al tipo de terreno.

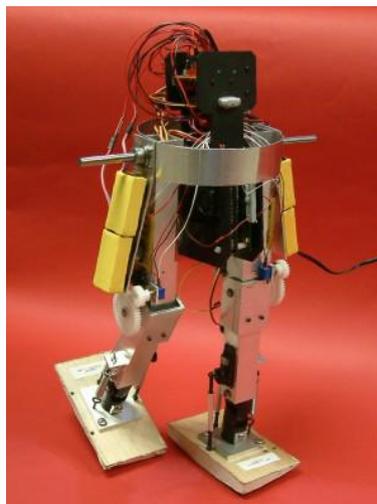


Figura 2.12: Robot Toddler del MIT

Robot Denise de la Universidad de Delft

Por último tenemos al robot holandés Denise, con 16 libras de peso y 1.5 metros de largo. Sólo camina hacia delante y su programación es muy sencilla, debido a que gran parte del problema de los controles se soluciona a través del diseño mecánico del robot. Su funcionamiento y diseño es parecido al del robot Ranger.



Figura 2.13: Robot Denise

2.3.2. Robots bípedos activos

El campo de la robótica bípeda activa (humanoides), si ha tenido una mayor investigación y un mayor desarrollo. Los robots humanoides actuales están formados por un alto número actuadores, utilizados para controlar el elevado número de grados de libertad que poseen. Un criterio destacado sobre la estabilidad es el criterio del Punto de Momento Cero (ZMP) de Vukobratovic. El punto de momento cero es un concepto muy importante en la resolución del movimiento de un robot bípedo, como es el caso de los humanoides [20].

Mantener la estabilidad dinámica no es tarea fácil, ya que el torso del robot tiene más masa e inercia que las piernas, las cuales tienen que soportar todo el peso. El punto de momento cero es aquél en el que la componente tangencial del momento resultante de la inercia, la fuerza de la gravedad y las fuerzas externas es cero. El concepto del momento cero implica el cálculo de las ecuaciones del momento angular, para garantizar que las trayectorias de las articulaciones respetan la estabilidad. Se establece una región de estabilidad, y mientras dicho punto se encuentre dentro de ella no habrá ningún problema. Dependiendo de dónde esté este punto, la estabilidad será mayor o menor.

Cronológicamente muchos investigadores y universidades han sido los que han fabricado diferentes tipos de humanoides mejorando a cada paso los progresos anteriores. En cuanto a los países participantes en este desarrollo cabe destacar sobre todo a Japón que sin duda es el pionero de los mejores diseños en el campo de la robótica.

Estos son algunos de los modelos más destacados a lo largo de la historia:

1. ELEKTRO (1939)

El robot ELEKTRO fue presentado en la feria mundial de 1939 en Nueva York. Podía caminar por comando de voz, hablar (usando un tocadiscos de 78-rpm), podía fumar, inflar globos, y mover la cabeza y los brazos.

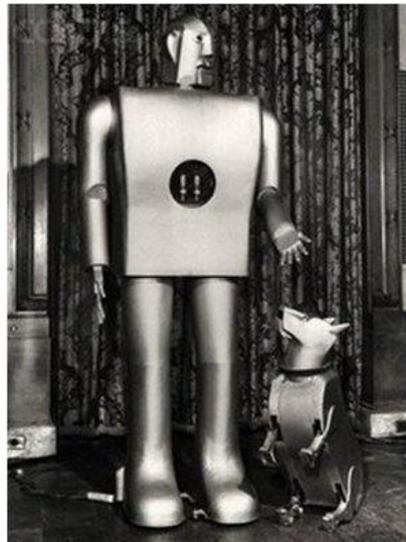


Figura 2.14: Robot ELEKTRO

2. WABOT-1 (1973)

El WABOT-1, creado por parte de cuatro laboratorios del departamento de Ciencia e Ingeniería de la Universidad de Waseda, fue el primer robot antropomorfo a escala desarrollado en el mundo. Consistía en un sistema de control de extremidades, un sistema de visión y un sistema de conversación. El Wabot-1 fue capaz de comunicarse con una persona en japonés, medir distancias y direcciones de objetos usando receptores externos, oídos y ojos artificiales, y una boca artificial. Caminó con sus miembros inferiores y fue capaz de agarrar y transportar objetos con las manos usando sensores táctiles. Se estimaba que el Wabot-1 tenía la facultad de un niño de un año y medio.



Figura 2.15: WABOT-1

3. WABOT-2 (1984)

En el año 1980 los laboratorios que participaron en el proyecto WABOT1 se volvieron a unir de nuevo para iniciar el proyecto WABOT-2. Era capaz de realizar, así como las actividades artísticas, tocar el piano requeriría habilidades humanas como la inteligencia y la destreza. Por lo tanto el WABOT-2 se define como un “robot especialista”, en lugar de un robot versátil como lo fue el WABOT-1.



Figura 2.16: WABOT-2

4. E0 (1986)

El E0 fue el primer intento de Honda de crear un robot humanoide que anduviera. Este robot era capaz de andar en línea recta poniendo una pierna después de la otra, sin embargo andaba muy despacio necesitando de cinco segundos entre cada paso.

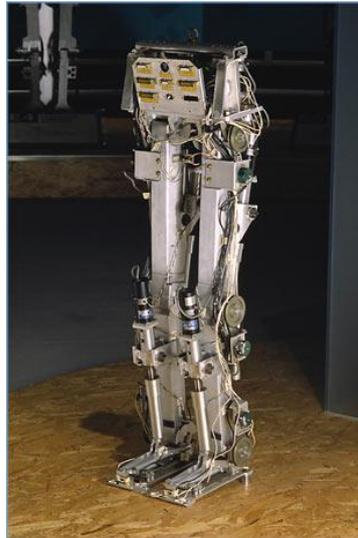


Figura 2.17: E0

5. E1, E2, E3 (1987 - 1991)

El E1 es un prototipo que andaba en un paso estático a 0,25 Km/h con una cierta distinción entre el movimiento de las dos piernas.

El E2 de Honda tuvo el primer movimiento dinámico a 1,2 Km/h, imitando la manera de andar de los humanos.

El E3 logró una velocidad de 3 Km/h sobre superficies planas, pero todavía era necesario realizar el siguiente avance: lograr un paso rápido y estable sobre cualquier tipo de superficie sin que esto implicara la caída del robot. La investigación en los robots de la primera serie E empezó en 1986 y finalizó cinco años después.

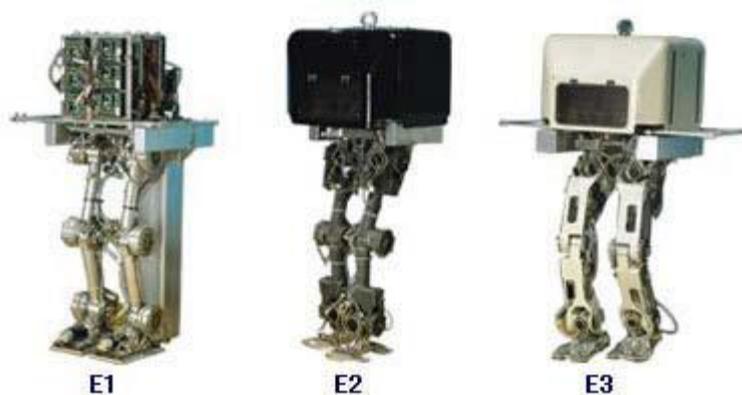


Figura 2.18: E1, E2, E3

6. Shadow Walker (1988)

El Shadow Walker fue desarrollado en Reino Unido por el fabricante de robots Shadow Robot Co. Ltd., mide 160 cm, tiene 12 grados de libertad y en su torso están las válvulas de control, electrónica e interfaces con el computador. Su propósito es el de ayudar con la investigación y desarrollo para nuevos diseños y técnicas sobre equilibrio y locomoción humana.



Figura 2.19: Shadow Walker

7. E4, E5, E6 (1991 - 1993)

Entre 1991 y 1993, y una vez que ya se había logrado que los robots fueran capaces de simular la forma de andar humana y caminaran a una velocidad similar, Honda desarrolló la tecnología necesaria para que además pudieran controlar el balanceo de su cuerpo y tuvieran la habilidad de avanzar sobre pisos en los que hubiera obstáculos simples.

El E4 fue un prototipo experimental más ligero que sus predecesores que era capaz de desplazarse a 4,7 Km/h, la velocidad que alcanzamos los humanos cuando caminamos a paso ligero. Honda incrementó la longitud de la rodilla a 40 cm para simular la rápida velocidad del paso humano a 4,7 Km/h.

El E5 no introdujo mejoras sustanciales en la forma de desplazarse pero se convirtió en todo un hito al ser el primer modelo autónomo de la compañía japonesa.

Hubo que esperar hasta el E6 para que Honda consiguiera por primera vez que un robot fuera capaz de controlar los balanceos de su cuerpo, cualidad que le permitía subir y bajar escaleras y caminar sobre obstáculos. Consiguió control autónomo del equilibrio en situaciones en las que el robot subía y bajaba escaleras, rampas o evitaba obstáculos. El siguiente paso una vez logrado esto es unir las piernas al resto del cuerpo y crear un robot humanoide.



Figura 2.20: E4, E5, E6

8. P1, P2, P3 (1993 - 1997)

En 1993 los prototipos de la firma japonesa ya eran capaces de caminar de manera autónoma y de sortear obstáculos simples, por lo que el siguiente objetivo de Honda fue crear robots con aspecto humanoide. Fue entre 1993 y 1997, en una nueva generación que estuvo formada por los modelos P1, P2 y P3.

El P1 fue el primer prototipo con forma humana de Honda. Con una altura de 1,915 m y un peso de 175 Kg, el P1 se convirtió en el primer desarrollo que además de piernas tenía tronco, brazos y una cabeza. Eso supuso un salto cualitativo muy importante, ya que este robot no sólo caminaba, sino que además podía encender y apagar interruptores, agarrar los pomos de las puertas e incluso llevar objetos gracias a sus extremidades superiores. La investigación sobre el P1 comenzó en 1993 y finalizó cuatro años después.

El P2 mejoró mucho desde el punto de vista estético, al mostrar un aspecto humanoide mucho más verosímil que su predecesor, pero sobre todo destacó por ser el primero en no necesitar cables para caminar, subir y bajar escaleras o empujar objetos. El P2 fue el primer robot humanoide bípedo autorregulable del mundo. Su torso contiene un computador, motores, la batería, una radio inalámbrica y otros controles necesarios para permitir el control inalámbrico.

Gracias al uso de la tecnología wireless, este robot de 1,82 m de altura y 210 Kg de peso incorporaba en su espalda una mochila con un ordenador, un motor, una batería y una radio que se encargaban de hacer funcionar al conjunto.

El P3 fue el primer robot humanoide bípedo, imitador de la forma de andar humana, completamente independiente. Fue finalizado en 1997. La altura y peso del P3 se redujeron considerablemente gracias al cambio de los materiales empleados así como el hecho de descentralizar el sistema de control. Su pequeño tamaño lo hace mejor adaptado a los entornos de trabajo humanos.

Con un aspecto más liviano, desenfadado y atractivo, el P3 fue el robot que introdujo la estética ASIMO. Con 1,60 m de altura y 130 Kg, se convirtió en el primer modelo completamente independiente de la serie y permitió a Honda presentar al gran público un prototipo visualmente muy atractivo con el que atrajo la atención de millones de personas.

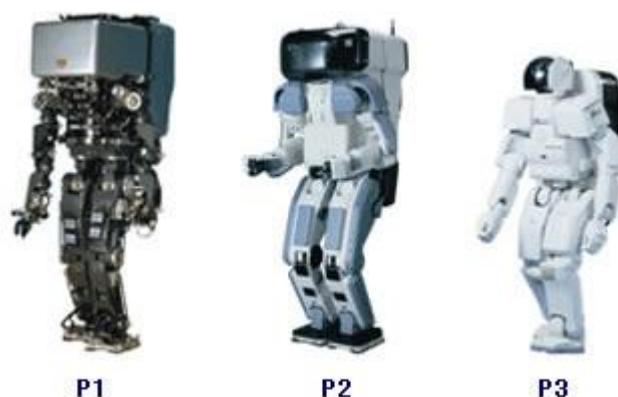


Figura 2.21: P1, P2, P3

9. Hadaly-2 (1997)

Hadaly-2 fue diseñado por la Universidad de Waseda, mide 270m de altura, pesa 150kg y tiene 53 grados de libertad. Puede reconocer su entorno gracias a su

visión, es capaz de conversar debido a su capacidad para generar voz así como reconocerla y se puede comunicar de una manera no sólo vocal sino física. Además, dispone de un imponente sistema motriz, desplazando sus 2,7 metros de altura gracias a sus ruedas.

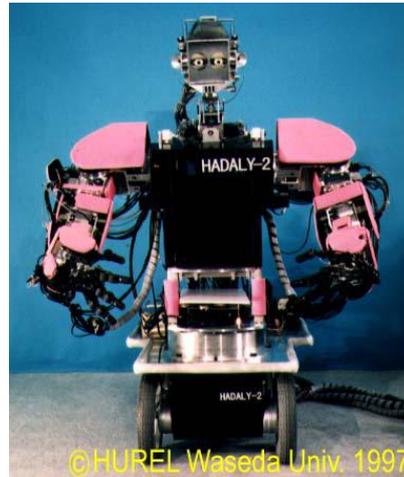


Figura 2.22: Hadaly-2

9. HRP-1S (1998)

El HRP-1S es similar en forma y tamaño al Honda P3, con 160 cm de altura y 130 kg de peso. Fue el primer robot públicamente demostrado de las series HRP (Humanoid Robotics Projects). Además de la habilidad de andar, posee una sofisticada coordinación de las extremidades superiores lo que le permite utilizar herramientas humanas e incluso operar maquinaria pesada.



Figura 2.23: HRP-1S

10. SDR-3X (2000)

En Noviembre del año 2000 Sony presentó el SDR-3X. Gracias a la sincronización de movimientos de las 24 uniones de su cuerpo, este robot puede realizar movimientos básicos tales como andar, cambiar de dirección, levantarse, mantener el equilibrio sobre una pierna, golpear una pelota o incluso bailar. El SDR-3X utiliza dos procesadores RISC para “pensar” y controlar el movimiento. Mide 50.8 cm de altura y pesa 7 kg.



Figura 2.24: SDR-3X

11. ASIMO (2000)

En el año 2000 Honda presentó la primera versión del popular ASIMO, un robot que medía sólo 1,2 m de altura y había rebajado su peso hasta los 52 Kg. Era capaz de caminar a 1,6 Km/h, podía permanecer en funcionamiento durante 30 minutos seguidos y sus baterías necesitaban de 4 horas para recargarse por completo.

El nombre ASIMO proviene de Advanced Step in Innovative MObility, es pronunciado "ashimo" en japonés y significa "piernas también". Este menudo robot es el resultado de catorce años de investigación por parte de Honda en la mecánica de la locomoción bípeda.



Figura 2.25: ASIMO

El ASIMO X2 presentado en el año 2002 posee un avanzado sistema de reconocimiento facial añadido a sus capacidades de reconocimiento por voz y gestos. Este avance es el resultado de la colaboración en la investigación con científicos en el Instituto de Robótica CMU.

En Diciembre de 2004 Honda introdujo una nueva versión de ASIMO que además de mejorarlo en su diseño exterior, y aumentar su autonomía, también permitía que ASIMO corriera a 3 Km/h. Otro importante añadido fue la incorporación de pulgares opuestos en sus manos pudiendo así coger objetos además de sentir la fuerza ejercida cuando una persona cogía su mano. Todo esto añadido a la capacidad de ASIMO de navegar en su entorno sin tener que repetidamente reconstruir un mapa interno, distinguir gente de obstáculos, y su habilidad para reconocer voces, caras, y gestos permitieron que ASIMO se acercara mucho a una posible viabilidad comercial.

Los modelos anteriores de ASIMO existen como una muestra de la impresionante capacidad de Honda es sus avances en robótica en esta última década pero no tienen gran utilidad aparte de en presentaciones de entretenimiento o investigación.

En el año 2005 Honda presentó un nuevo ASIMO. Con el mismo tamaño que el prototipo del 2004, pero capaz de caminar a 2,7 Km/h (1,6 Km/h en caso de llevar un objeto de 1 Kg) y correr a 6 Km/h en línea recta y 5 Km/h en círculos. Se crea para aplicaciones profesionales tales como repartir café, entregar mensajes, empujar carritos, etc.

En el año 2007 se consiguió que trabajara en equipo con otros robots como él y que pueda moverse cómodamente entre personas.

Por todo esto es obvio que ASIMO no es un juguete, está desarrollado para ser un ayudante para los humanos. Es decir, para trabajar en casa, ayudar a los ancianos, empujar a personas postradas en silla de ruedas, etc. Por último comentar que la altura de ASIMO es tal que permita establecer una comunicación cara a cara con una persona sentada en una silla, además de poder hacer su trabajo sin parecer demasiado grande y amenazante.

12. H6 (2001) [23]

En el año 2001 la Universidad de Tokio presentó el modelo H6. Se trata de un humanoide de 137 cm de altura y 55 kg de peso, con 35 grados de libertad. Dispone de motores DC para impulsar sus articulaciones, de un PC equipado con dos procesadores y un sistema operativo RT-Linux. Además dispone de Ethernet para la conexión a la red inalámbrica. Es totalmente autónomo y se puede manejar sin ningún tipo de cables externos.



Figura 2.26: H6

13. SDR- 4X (2002)

El SDR-4X, además del reconocimiento de imágenes, sonido, tecnologías de síntesis de sonido, comunicación y movimiento, la tecnología de control basada en memoria está incluida en este robot para enriquecer la comunicación con los humanos. Este robot puede reconocer a una persona gracias a un procesamiento de imagen de su cara capturadas por Universidad Carlos III de Madrid las cámaras a

color, así como la procedencia de un sonido gracias a los siete micrófonos situados en el interior de su cabeza. El hecho de poseer integrada tecnología Wireless en entornos LAN, le permite sincronizar información con un PC de manera remota, con lo cual puede ir actualizando sus capacidades de reconocimiento vocal gracias a la posibilidad de ir añadiendo nuevo vocabulario a su memoria.



Figura 2.27: SDR-4X

14. HRP-2P (2002)

El prototipo HRP-2, alias P-Chan, fue el primer robot de tamaño humano capaz de tumbarse y levantarse de nuevo. Esto lo logra gracias a un torso flexible, análogo a lo visto en los nuevos modelos de ASIMO.



Figura 2.28: HRP-2P

15. HRP-2 (2003)

El HRP-2 incorpora un nuevo sistema de visión 3D llamado VVV (Visión Volumétrica Versátil) que sustituye a la configuración típica de una única cámara en la cabeza por cuatro a color y de precisión. Este hecho no sólo mejora la visión del robot, si no que le permite ver con mucho mayor grado de detalle y ampliar su campo de visión. Además del sistema VVV, se incorporó un sistema láser de medida de distancias lo que permite al HRP-2 construirse un mapa bidimensional en comparación con el Universidad Carlos III de Madrid de la entrada del sistema VVV, pudiendo así rápidamente evitar obstáculos incluso cuándo éstos han sido movidos.



Figura 2.29: HRP-2

16. QRIO (2003)

En septiembre de 2003 Sony presentó a QRIO, el ápice de su proyecto SDR. Este robot incluye una red wireless, capacidad para lanzar pelotas, reconocimiento de cara y voz, visión estereoscópica, la capacidad para evitar obstáculos, dedos independientes totalmente funcionales y mapeo visual. La mayor virtud de QRIO es su extremadamente avanzado sistema de equilibrio que le permite andar por terrenos inestables o tambaleantes. Además si QRIO se cae responde poniendo los brazos para amortiguar la caída tal como lo haría un humano.



Figura 2.30: QRIO

17. Partner (2005)

El PARTNER es capaz de tocar la trompeta, ya que tiene la capacidad de mover sus labios como los de un ser humano. Tiene una estatura de 1.80m de altura, esto le permite cargar a una persona de un lugar a otro que fue el motivo de su creación para ayudar a las personas de la 3ª edad.

Además de todos estos diseños, cabe destacar dos modelos desarrollados por el departamento de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid el Rh-0 y el Rh-1, bajo la financiación de la CICYT (Centro de Investigación Científica y Tecnológica) y dirigidos ambos proyectos por el profesor Carlos Balaguer [24].

Ambos modelos Rh (Robot humanoide) son muy parecidos, con la salvedad del año de fabricación y la incorporación de una carcasa protectora en el modelo Rh-1 que su predecesor el Rh-0 no incorporaba.



Figura 2.31: Partner

18. Rh-1 (2007)

El robot Rh-1 es el segundo robot que hay en Europa, mide menos de un metro y medio y pesa unos 52 kilos. Puede caminar erguido como cualquier ser humano, o cooperar en labores sencillas con personas u otros autómatas. Sus posibles aplicaciones son extensas. Puede interactuar con humanos en multitud de tareas sencillas.

Su sistema de visión artificial y la telemetría láser le permiten analizar el entorno y desplazarse por el mismo.

Esta versión tiene una autonomía de 30 minutos gracias a sus baterías, que alimentan las dos computadoras que RH1 esconde en su interior y que le evitan depender de una unidad de proceso externa.



Figura 2.32: Rh-1

19. MechaDroid Type C3. (2008)

Dicho robot está fabricado y diseñado para trabajar en la recepción de un hotel u otro lugar público. Lo ha desarrollado la firma japonesa "Japan Business Design". Sabe cómo atender a los clientes de un complejo hotelero, de forma que él mismo administra la información sobre las habitaciones, salones y servicios del recinto. Además, puede almacenar la información acerca de sus entradas y salidas. Por otra parte, el robot incorpora un sistema de reconocimiento de caras, que como ocurre con los sistemas de publicidad inteligente, hace que identifique el tipo de persona que quiere alojarse en el hotel para ofrecerle opciones a su gusto.



Figura 2.33: MechaDroid Type C3

20.- NIT Humanoide (2009)

El NIT Humanoide es un robot bípedo del tamaño de un alumno de primaria desarrollado por el Nippon Institute of Technology, en colaboración con Harada.

El robot humanoide se ha diseñado con fines educativos y su tamaño es lo suficientemente alto para que pueda interactuar con su entorno de una manera significativa. Este robot se exhibirá en las escuelas de primaria y secundaria, y su objetivo es mejorar el aprendizaje de los estudiantes mediante la sensibilización sobre el conocimiento de la tecnología de los robots bípedos y su conexión con las matemáticas y la física.

El NIT tiene 125 centímetros de alto y pesa 15 kilogramos, dispone de unos 21 grados de libertad de movimiento y está alimentado por una batería de iones de litio. Está equipado con los sensores habituales: cámaras, acelerómetros, sensores de giro, sensores de detección de obstáculos, sensores de distancia y sensores piezoeléctricos. Además puede ser controlado a través del PC o del mando a distancia.

Además de las capacidades básicas mencionadas, el NIT Humanoide puede servir como una especie de asistente del maestro, ya que lleva incorporado un proyector que le permite mostrar diagramas en una pizarra, que podría ser difícil de explicar en palabras. El Robot se puede programar con el Microsoft Robotics Studio Developer, que los estudiantes han estado usando para probar los algoritmos de control para el eNuvo Robot Walk, una versión de robot anterior.



Figura 2.34: NIT Humanoide

En esta gama de Robots Bipedos de poco peso y bajo coste, el profesor Ceccarelli y su equipo del Laboratory of Robotics and Mechatronic (LARM) [12], han estado trabajando de una manera continuada en esta línea, primero con el robot bípedo EP-WaR II [13] y últimamente con los diseños de las piernas del humanoide low-cost CALUMA [14]. Con esta premisa en el Grupo MAQLAB y RoboticsLab pertenecientes a la Universidad Carlos III de Madrid, se crea el Pasibot.

El Pasibot es bípedo de un grado de libertad, capaz de emular el movimiento del paso humano, basándose en la combinación y adaptación de mecanismos clásicos: Chebyshev, pantógrafo y sistema de estabilización [15][16].

Con el fin de conocer detalladamente el comportamiento cinemático del Pasibot y de proporcionar los parámetros cinemáticos a los sistemas de control, es necesario desarrollar un modelo paramétrico de la cinemática del bípedo completo, en función del único motor que posee.

El dominio del comportamiento cinemático permitirá realizar variaciones dimensionales en función de las trayectorias y desplazamientos deseados, además permitirá observar la evolución de los parámetros cinemáticos en función el tiempo y de las velocidades de entrada. Posibilitando la detección de mejoras necesarias en el sistema.



Capítulo III:

PROPUESTAS DE DISEÑO DEL PASIBOT



3.1. DISEÑO INICIAL. MODELO ANALÍTICO BASE.

El diseño de la pierna ha seguido la línea de emulación del movimiento mediante la disposición de mecanismos clásicos para intentar reducir al máximo los grados de libertad y con ellos la necesidad de actuadores, cumpliendo con las especificaciones mencionadas en el capítulo I:

- El robot bípedo debe ser capaz de realizar la dinámica andante.
- El coste debe de ser bajo.
- El robot debe tener menos actuadores que juntas.
- El robot debe utilizar actuadores rotativos.
- Para el diseño de la pierna del bípedo, en el plano sagital se deben utilizar mecanismos de barras articuladas.

Además de las premisas anteriores, debe cumplir que con un solo grado de libertad, un movimiento rotatorio, sea capaz de generar todo un ciclo completo de movimiento de la pierna, con un periodo de apoyo y otro de vuelo. Además, el movimiento de la pierna debe cumplir con dos requisitos fundamentales: que el tiempo de de vuelo de la pierna debe ser inferior al tiempo de apoyo, aunque el recorrido de la pierna en vuelo es mayor al de apoyo, y que el recorrido de la pierna en el periodo de apoyo sea lo más lineal posible y con velocidad constante.

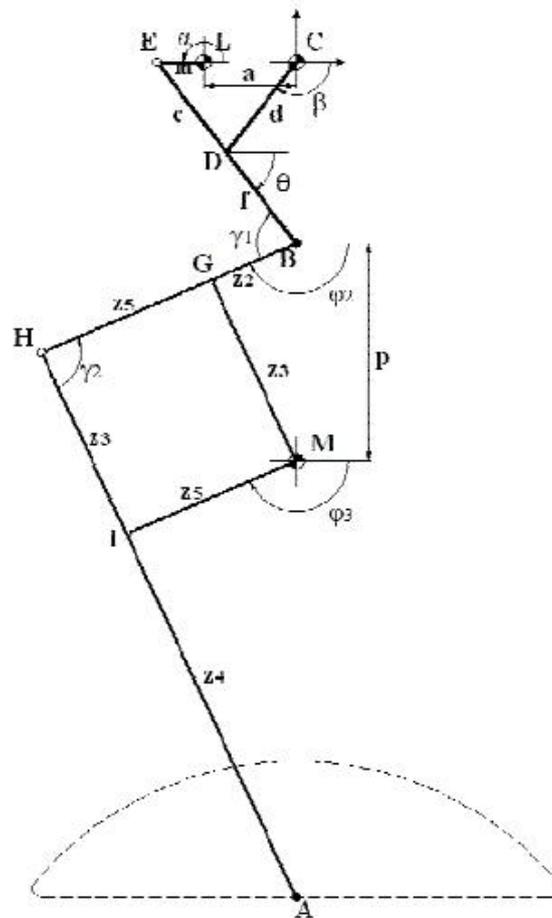


Figura 3.1: Diseño Inicial.

El mecanismo propuesto es la pierna que se muestra esquemáticamente en la Figura 3.2. En particular, su diseño mecánico se ha basado en la utilización de un Chebyshev de cuatro barras articuladas, y un mecanismo pantógrafo. El mecanismo de Chebyshev también es conocido en la terminología anglosajona como Mecanismo de Línea Recta de Hoekens. En este tipo de mecanismo, el movimiento de la pierna se puede realizar mediante 1 DOF (1 Degrees Of Freedom, Grados De Libertad). La pierna ha sido diseñada considerando las premisas de compacidad, modularidad, ligereza y reducción del número de DOF como objetivos básicos para lograr la operación dinámica de caminar. Se va a considerar una rotación completa en el punto L, que resulta en una adecuada trayectoria del punto B. Por otra parte, la trayectoria del punto B, se verá trasladada al punto A mediante el pantógrafo.

3.2. DISEÑO MODIFICADO.

El diseño de la pierna propuesto a estudio parte del diseño anterior. La principal diferencia radica en la inversión de la posición del pantógrafo según la línea trazada por los puntos BMA. La posición final se muestra a continuación en la figura 3.2. Además, el pantógrafo es mayor proporcionalmente al modelo inicial para dar mayor esbeltez a la pierna. La notación es la misma, con el consiguiente cambio de posición de los puntos. Esta notación será seguida en el resto del proyecto:

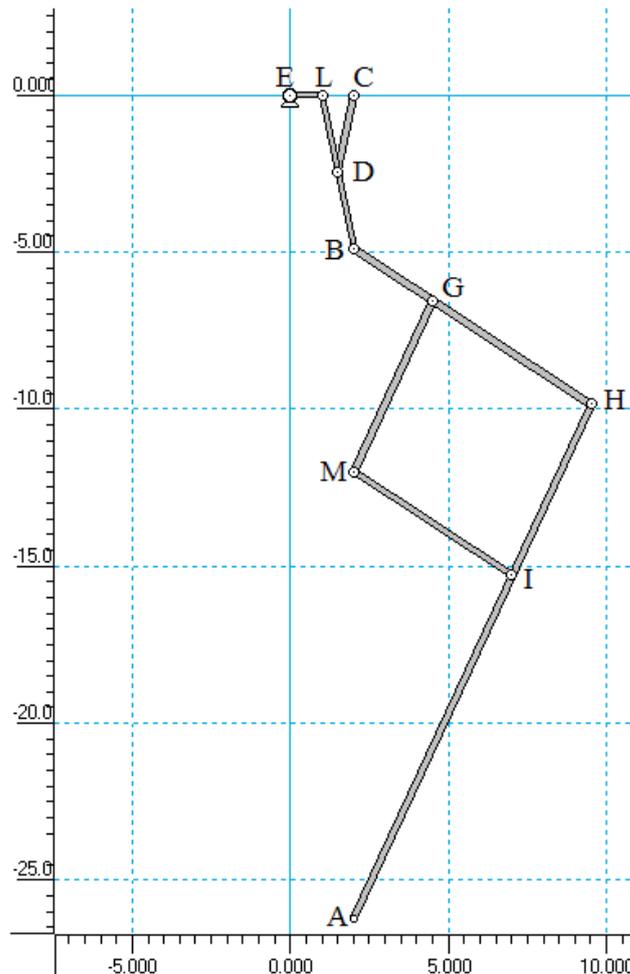


Figura 3.2: Diseño Básico Final.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO DE LA PIERNA.

La pierna está compuesta por la combinación de dos mecanismos, un Chebyshev y un Pantógrafo. Su funcionamiento se muestra a continuación.

3.3.1. Mecanismo de línea recta de chebyshev

El Mecanismo de Línea Recta de Chebyshev, o de Hoekens, es una manivela balancín de Grashof, cuya virtud principal es la de describir una línea prácticamente recta en una parte de su trayectoria. Se caracteriza además por poseer una velocidad casi constante en toda la parte central de su movimiento de línea recta.

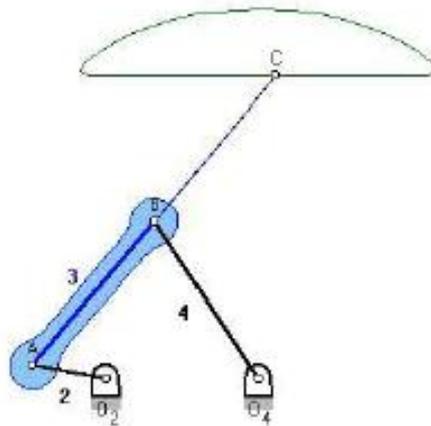
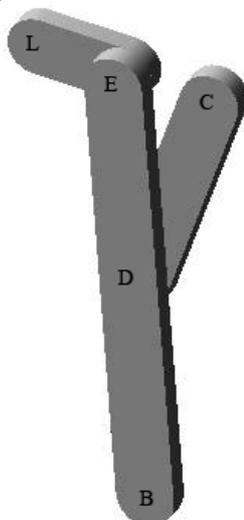


Figura 3.3: Mecanismo Chebyshev

Las proporciones de la manivela-balancín, o mecanismo de Chebyshev son:



$$\overline{LC} = 2 \cdot \overline{LE}$$

$$\overline{CD} = 2 \cdot \overline{LE}$$

$$\overline{EB} = 5 \cdot \overline{LE}$$

Figura 3.4: Notación del Chebyshev.

3.3.2. Pantógrafo.

El pantógrafo es un cuadrilátero articulado que sirve para dibujar una figura homotética a una dada.

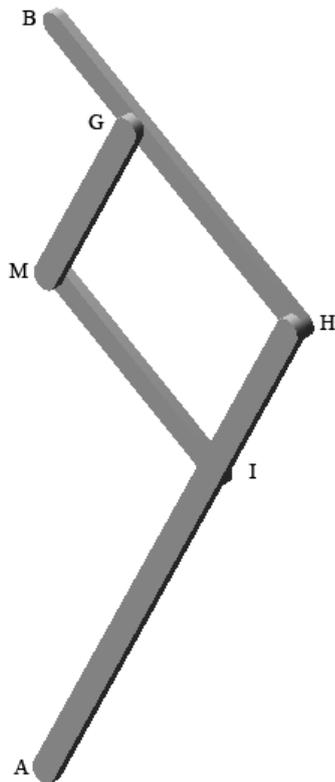


Figura 3.5: Notación del Pantógrafo

Las características más importantes son que los puntos A, M y B siempre están lineados y el mecanismo puede ser amplificador o reductor, además de inversor, en función del punto que se fije (A, M y B).

Si se fija el punto A y se mueve M se producirá una ampliación directa del movimiento reflejada en el punto B, y por el contrario, si se mueve el punto B se producirá una reducción directa del movimiento en el punto M.

Si lo que se quiere es invertir el movimiento, se fijará el punto M. Si se da movimiento en el punto B se producirá una reducción inversa del movimiento en A, y si por el contrario se da el movimiento en A, en el punto B se verá

reproducido amplificado e invertido. Éste último caso es el aplicado en el mecanismo.

Las características del pantógrafo vienen establecidas por las siguientes proporciones:

$$\frac{\overline{BG}}{\overline{BM}} = \frac{\overline{BH}}{\overline{HA}} \Rightarrow \frac{90\text{mm}}{180\text{mm}} = \frac{270\text{mm}}{540\text{mm}} = \frac{1}{2}$$

Como se puede apreciar, los triángulos \overline{BGM} y \overline{BHA} son semejantes, por lo que se cumple que los puntos B, M y A están alineados siempre.

La razón de homotecia del pantógrafo, es decir, su relación de amplificación-inversión es la siguiente:

$$\frac{\overline{BH}}{\overline{BG}} = \frac{270mm}{90mm} = 3$$

La razón de proporción del pantógrafo es 3:1.

3.3.3 Acción conjunta de ambos mecanismos.

El mecanismo en conjunto queda de la siguiente manera:

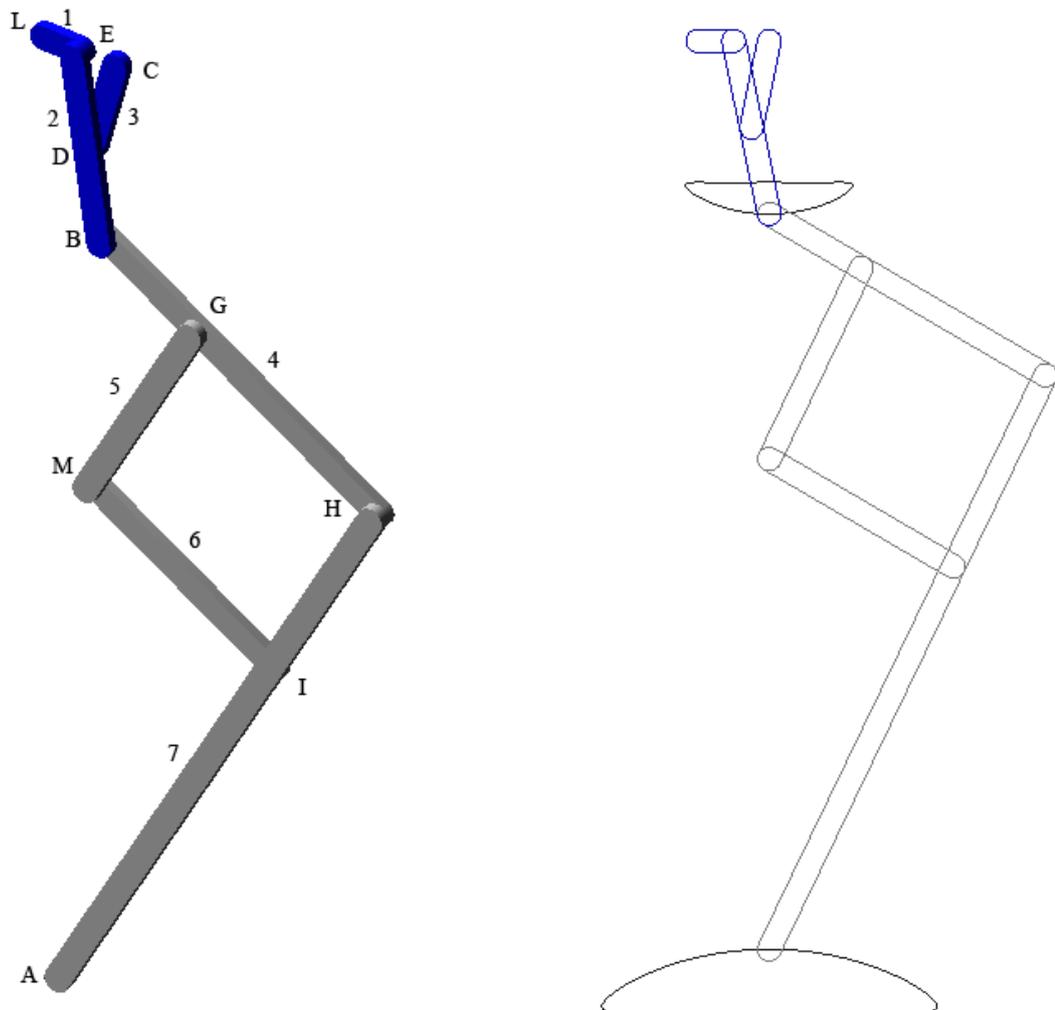


Figura 3.6: Notación utilizada y trayectorias

En el mecanismo de la pierna aparece representado en azul el mecanismo de Chebyshev y en gris plata el Pantógrafo. El Chebyshev genera la trayectoria en el punto B a partir del movimiento rotatorio de la manivela 1 en el punto L, y el pantógrafo la reproduce ampliada e invertida en el punto A. La numeración de los eslabones de la figura 3.6 va a ser la que se tenga en cuenta a partir de ahora. En ella se puede apreciar la trayectoria del Chebyshev y la trayectoria ampliada e invertida del pantógrafo.

3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO MODIFICADO EN MSC.ADAMS.

3.4.1. Modelo fibrilar.

A partir del diseño realizado del modelo de pierna implementado en el programa de diseño en 2-D Working Model, se procedió a su reproducción en el programa de simulación MSC.ADAMS 2005, utilizando la aplicación View, indicada para el diseño y simulación de movimientos de mecanismos.

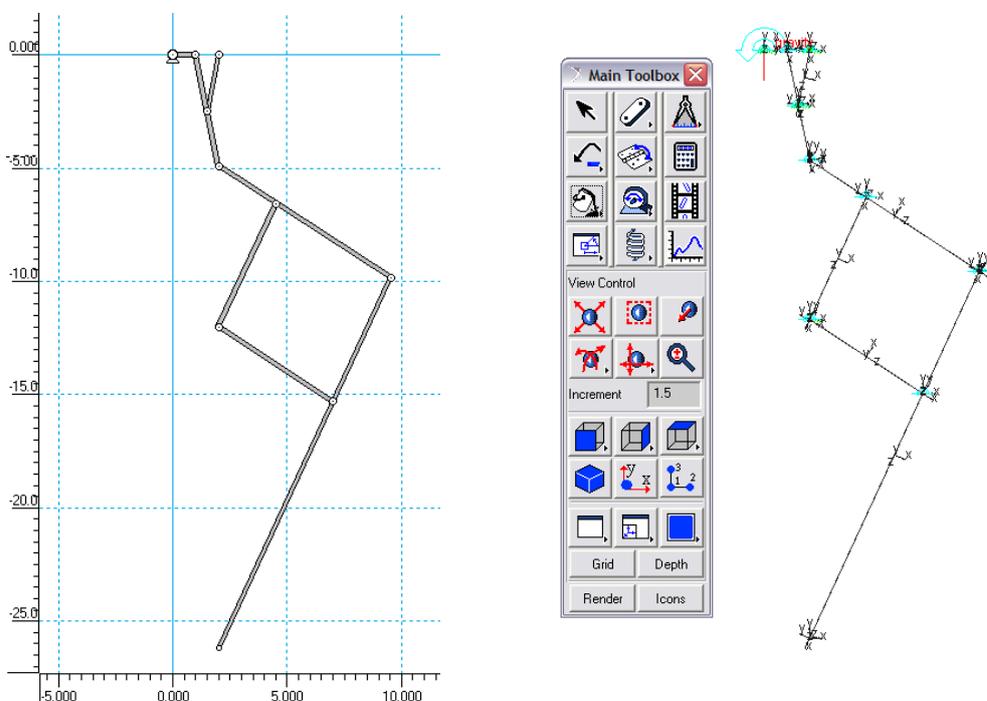
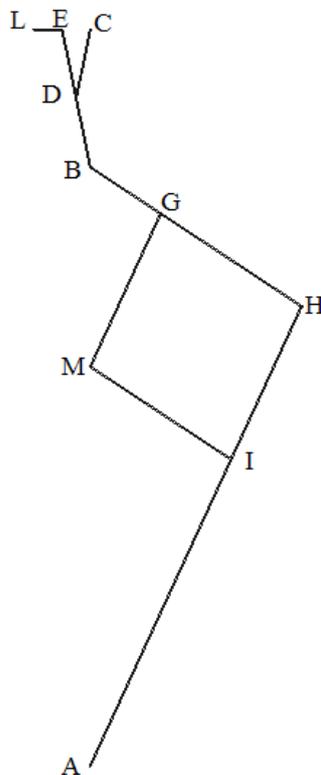


Figura 3.7: Modelo FIBRILAR implementado en Working Model y en MSC.ADAMS.

Para ello primero se realizó la toma de medidas de los eslabones que comprenden el mecanismo así como de la situación en coordenadas cartesianas de la situación de todos los elementos. Para la recreación del modelo en ADAMS se generó una serie de puntos en coordenadas cartesianas, y a partir de los mismos se crearon los eslabones pertenecientes al mecanismo. Para el diseño de los mismos en un primer lugar sólo se les asignó espesor y anchura, la longitud quedaba establecida al crear los eslabones a partir de los puntos iniciales. Los eslabones fueron unidos con pares cinemáticos de rotación y los eslabones 1, 3, 5 y 6 se unieron con juntas de rotación al suelo ("Ground") para fijar su posición. Por último se dio movimiento rotatorio de velocidad angular constante de 30°/s a la manivela de entrada 1 para simular la actuación de un motor rotativo.

En la figura 3.7 se puede ver el diseño inicial en Working Model y su reproducción en MSC.ADAMS. Este diseño fue el utilizado para las primeras simulaciones de movimiento en MSC.ADAMS, y debido al escaso espesor de los eslabones se lo denominó DISEÑO FIBRILAR.

Las características dimensionales aparecen a continuación:



Eslabón 1: Manivela:

$$\overline{LE} = 100mm$$

Eslabón 2: Biela:

$$\overline{EB} = 500mm \quad \overline{ED} = 250mm$$

Eslabón 3: Balancín:

$$\overline{CD} = 250mm$$

Eslabón 4: Fémur:

$$\overline{BH} = 900mm \quad \overline{BG} = 300mm \quad \overline{GH} = 600mm$$

Eslabón 5: Tendón Superior:

$$\overline{GM} = 600mm$$

Eslabón 6: Tendón Inferior:

$$\overline{MI} = 600mm$$

Eslabón 7: Tibia:

$$\overline{HA} = 1800mm \quad \overline{HI} = 600mm \quad \overline{IA} = 1200mm$$

Figura 3.8: Modelo FIBRILAR.



El espesor de todos los eslabones es de 50mm y su profundidad de 50mm.

Los puntos L, C y M están fijos al suelo (“ground” en el programa) con pares cinemáticos de rotación.

El material utilizado para las simulaciones es acero de las siguientes características:

DENSIDAD:	$7.801 \cdot 10^{-6} \text{ Kg} / \text{mm}^3$
MODULO DE YOUNG:	$2.07 \cdot 10^5 \text{ N} / \text{mm}^2$
COEFICIENTE DE POISSON:	0.29

El modelo FIBRIAR 1 simuló de forma satisfactoria el movimiento de la pierna, correspondiendo éste al movimiento ya obtenido anteriormente en el programa Working Modelo, y permitió además comprobar las posibilidades del programa MSC.ADAMS en cuanto simulación de movimientos y en la toma de medidas (posición, velocidades, aceleraciones, pares de rotación, etc.) pero presentaba algunos problemas, como la ligera variación de la longitud de algunos eslabones durante el movimiento, debido posiblemente a que la longitud no fue establecida inicialmente o la situación incorrecta, aunque por un margen mínimo, a la junta G de los eslabones 4 y 5.

En siguiente modelo, FIBRILAR 2, fue construido de forma similar al anterior, pero en este caso se estableció la longitud de los eslabones antes de posicionarlos y se corrigió el error de posición de la junta G. La velocidad fue modificada a 20º/s. En este modelo se corrieron los problemas anteriores de variación de longitudes de los eslabones durante las simulaciones.

El modelo FIBRILAR 2 fue el utilizado los primeros diseños de los actuadores y sus simulaciones para estudiar el comportamiento de la pierna.

3.4.2. Modelo gamba.

El siguiente modelo que se implementó partió del modelo PASIBOT (figura 3.8), propuesta de diseño del grupo de investigación MAQLAB, de la Universidad Carlos III de Madrid, y especialmente del profesor D. Jesús Meneses. Este modelo, parte del modelo inicial, añade un duplicado de los eslabones fémur y tibia,

pudiéndose de este modo colocarle un pie y se utiliza un dispositivo en la cadera para que el pie entre recto durante el contacto con el suelo.

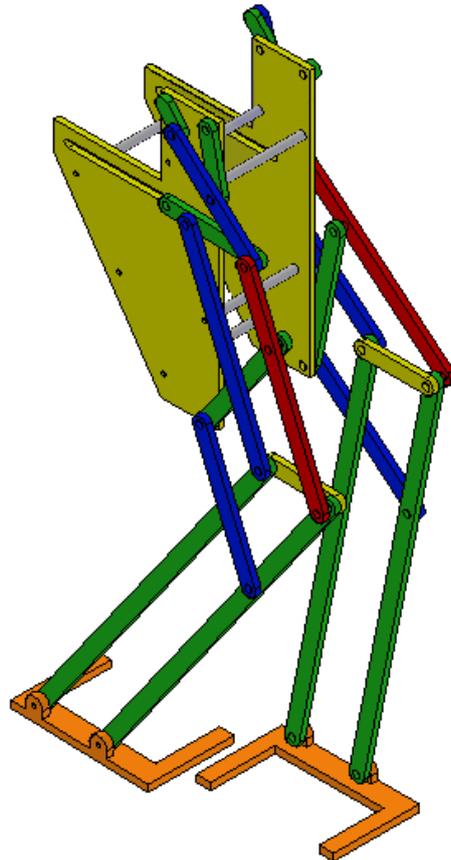


Figura 3.9: Modelo de PASIBOT en SolidWorks.

A este diseño se le eliminó ese duplicado, así como todos los componentes innecesarios (Cadera, rodilla, estabilizador y pie) para llegar al diseño elemental. Este diseño elemental será el llamado GAMBIA (pierna en italiano).

Del modelo PASIBOT implementado en SolidWorks se tomó las medidas de los eslabones y la posición, a partir de la pieza de la cadera, de los puntos fijos L, C y M. El modelo se implementó en Working Model para la toma de coordenadas de los todos los puntos, y con ellos se implementó el modelo GAMBIA en MSC.ADAMS.

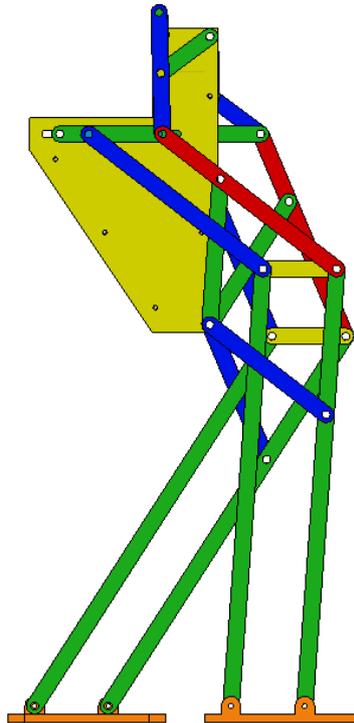


Figura 3.10: Modelo de PASIBOT. Vista lateral.

La implementación en Working Model, así como las características del modelo se exponen a continuación. Véase la reducción de medidas con respecto al modelo FIBRILAR. Las unidades de la figura 3.11 están en mm.

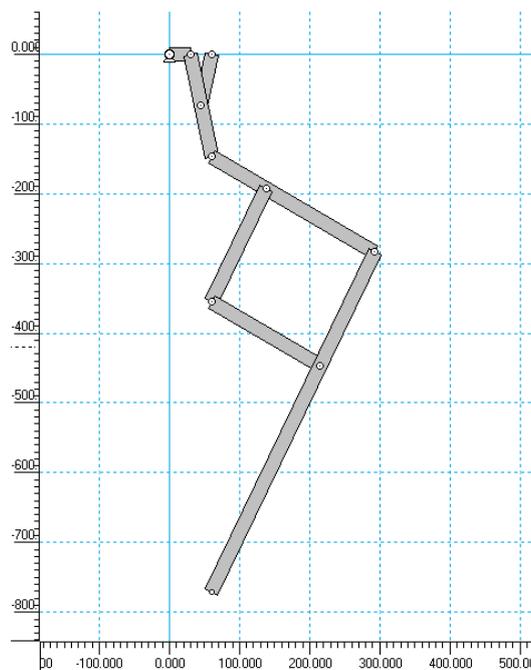


Figura 3.11: Modelo GAMBA en Working Model.



CARACTERÍSTICAS DEL MECANISMO GAMBA:

Las medidas de los eslabones que forman el mecanismo son las siguientes:

➤ MECANISMO DE CHEBYSHEV:

- Eslabón 1 – Manivela → $\overline{LE} = 30mm$
- Eslabón 2 – Biela → $\overline{EB} = 150mm$ $\overline{ED} = 75mm$
- Eslabón 3 – Balancín → $\overline{CD} = 75mm$

➤ PANTÓGRAFO:

- Eslabón 4 – Fémur → $\overline{BH} = 270mm$ $\overline{BG} = 90mm$ $\overline{GH} = 180mm$
- Eslabón 5 – Tendón superior → $\overline{GM} = 180mm$
- Eslabón 6 – Tendón inferior → $\overline{MI} = 180mm$
- Eslabón 7 – Tibia → $\overline{HA} = 540mm$ $\overline{HI} = 180mm$ $\overline{IA} = 360mm$

Todos los eslabones tienen 20mm de ancho y 8mm de profundidad.

El material utilizado para las simulaciones es acero de las siguientes características:

DENSIDAD:	$7.801 \cdot 10^{-6} Kg / mm^3$
MODULO DE YOUNG:	$2.07 \cdot 10^5 N / mm^2$
COEFICIENTE DE POISSON:	0.29

Los puntos L, C, y M están unidos con pares cinemáticos de rodadura a un soporte fijo (“Ground”), y los puntos E, D, B, G, M, H, I son pares cinemáticos de rodadura utilizados para unir los eslabones.

La velocidad angular de la manivela 1 aplicada en el punto A es de 2π rad/s (360°/s).

Una vez implementado en MSC.ADAMS queda de la siguiente forma:

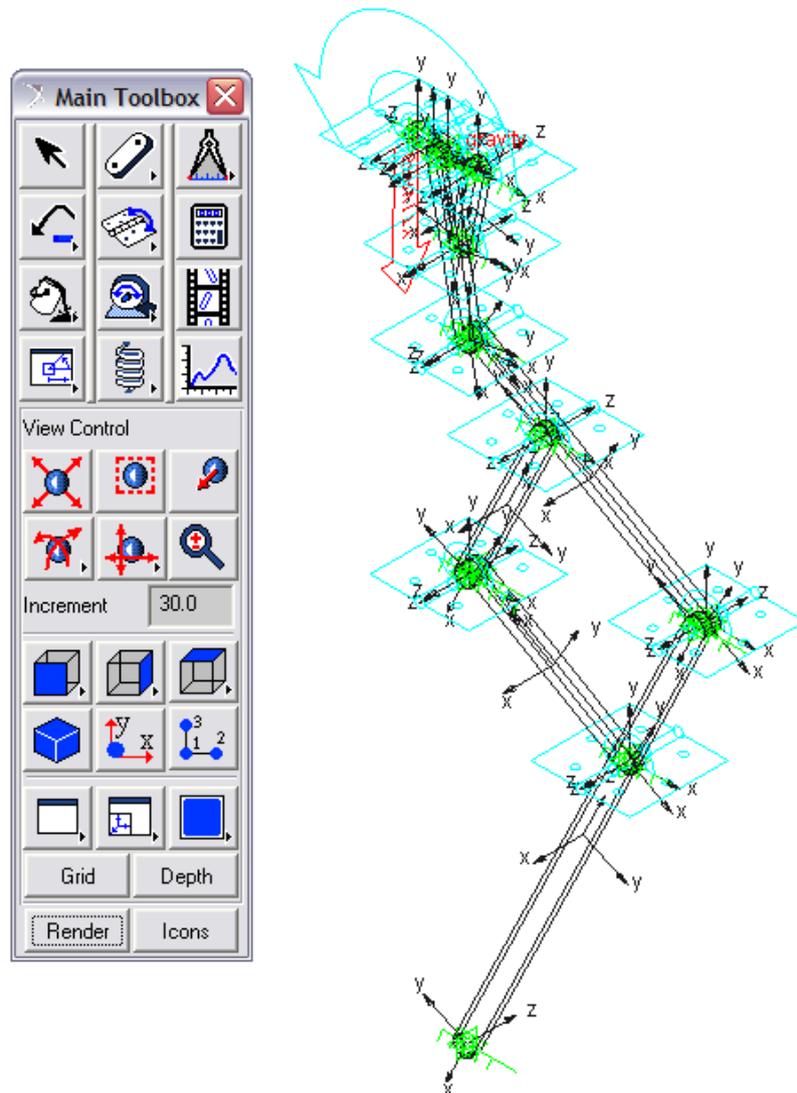


Figura 3.12: Modelo GAMBA implementado en MSC.ADAMS.

El modelo GAMBA será el utilizado para la toma de medidas de los ángulos γ_1 y γ_2 , y la posición, velocidad y aceleración del punto A en un ciclo completo de movimiento de la pierna.

3.5. ACTUADORES EN EL PANTÓGRAFO. MODELO TEÓRICO.

3.5.1. Diseño teórico de los actuadores.

Durante el diseño del mecanismo básico de la pierna se comprobó que al variar la posición del punto M respecto al resto del mecanismo se producía una variación de posición de la trayectoria del punto A y una trayectoria diferente en el punto H. Estos ensayos que iban encaminados en un principio a un intento de centrar el centro de masas del sistema respecto a la trayectoria del punto A, desembocaron en un estudio para dar habilidades a la pierna.

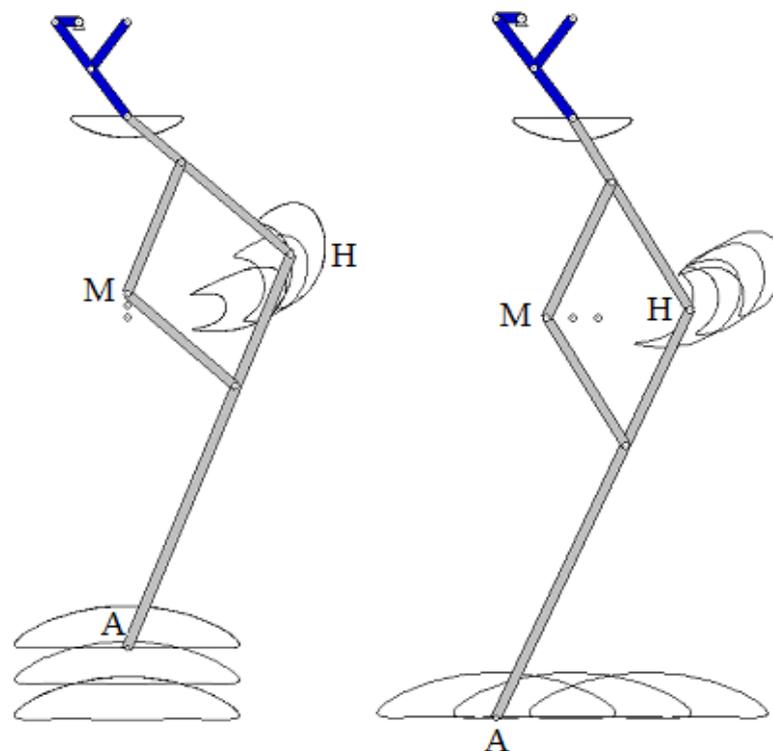


Figura 3.13: Trayectorias generadas por variación de la Posición del Punto M.

La variación es debida al reposicionamiento del punto fijo del pantógrafo M. Teniendo en cuenta que por definición los puntos B, M y A están siempre alineados, varía la trayectoria del punto A, y por consiguiente del punto H.

Esta variación de trayectoria planteó la posibilidad de que, si se añadía un actuador que modificara la posición del punto M se podrían dar habilidades nuevas a la pierna. Dicha suposición se basa en que al dar movilidad al punto M se añaden Grados De Libertad al sistema, y si se realiza una variación dinámica de la posición del punto M durante el ciclo de movimiento de la pierna, la trayectoria del

punto A variará describiendo trayectorias alternativas. Estas trayectorias alternativas podrían ser utilizadas para variar la posición y longitud de la zancada, sortear obstáculos y ser utilizadas para subir y/o bajar escalones.

El punto M solo modificará su posición de forma vertical y horizontal, es decir, según los Ejes Cartesianos X e Y, por lo que se están añadiendo únicamente 2 GDL al sistema, aunque se produzca una combinación de ambos.

El problema surgido ahora es la forma de implementar uno o varios actuadores que permitan controlar los 2 GDL del punto M. La solución propuesta es una combinación de un actuador lineal según el eje X y sobre él montado un actuador rotativo, de forma que por combinación de sus movimientos se permita el control de la posición del punto M. Los actuadores están colocados sobre el punto P, como muestra la figura 3.14.

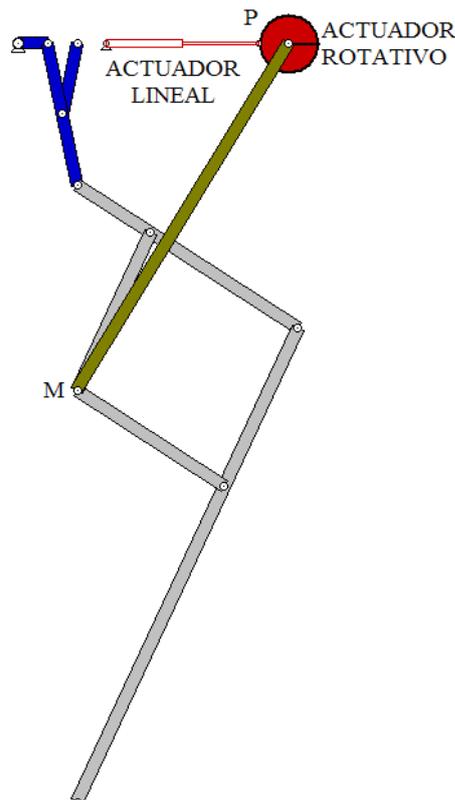


Figura 3.14: Diseño de Actuador.

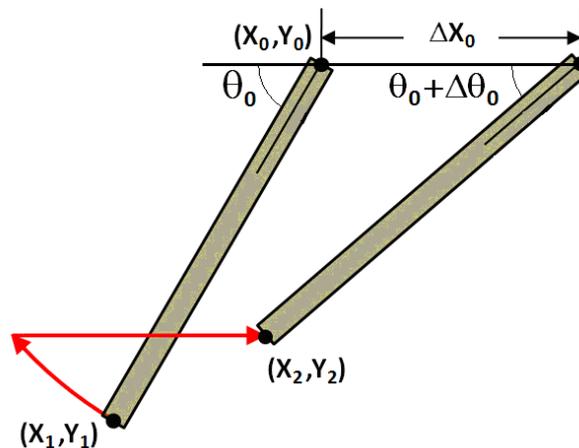


Figura 3.15: Diagrama de movimiento del actuador.

Las ecuaciones de movimiento del actuador para controlar la posición del punto M son:

$$X_2 - X_1 = X_0 \pm \Delta X_0 \pm L [\cos(\theta_0) - \cos(\theta_0 \pm \Delta\theta_0)]$$

$$Y_2 - Y_1 = Y_0 \pm L [\sin(\theta_0) - \sin(\theta_0 \pm \Delta\theta_0)]$$

3.5.2. Relación de posiciones del pantógrafo.

En este apartado se llevará a cabo un estudio de la posición relativa entre los puntos M y A, debido a que los actuadores impondrán movimiento en el punto M generando una variación de la posición que se verá reflejada en el punto A, modificando el movimiento de la pierna.

En principio, debido a las características del Pantógrafo, si se mantiene fijo el punto B y se varía la posición del punto M, se comportará como un amplificador directo de movimiento de relación 3:1, siguiendo la relación de homotecia hallada anteriormente entre los puntos A y M. Lo que se va a comprobar en este estudio es si al variar la posición del punto M el punto A varía en la misma proporción dada, manteniendo la homotecia.

Para el análisis se tomó el modelo de la pierna GAMBA y se utilizó el programa Working Model, debido a la velocidad de diseño y a la posibilidad de variar la ubicación de los elementos de una manera directa y sencilla. Para el estudio la manivela, o eslabón 1, se colocó a 180° en vez de a 0° para que el punto A estuviese situado en la parte central del periodo de apoyo de la pierna. Esto es

debido a que cuando más susceptible es la pierna a una variación de su comportamiento durante una simulación de movimiento real es durante la fase de apoyo. La pierna queda de la manera reflejada en la figura 3.16, con el eslabón 1 señalado en rojo.

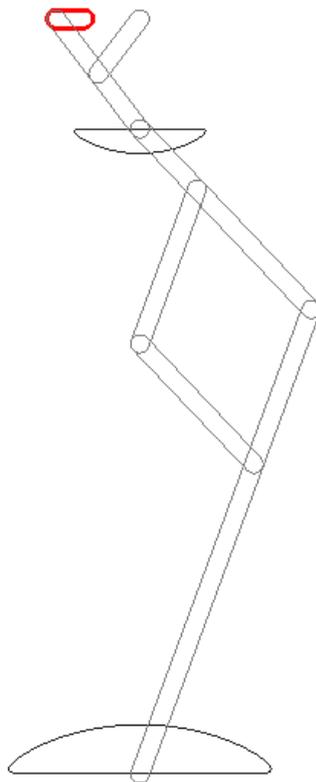


Figura 3.16: Modelo GAMBA con Manivela 1 a 180°

Una vez colocado la manivela a 180° , se procedió a variar la posición del punto M, estudiando la posición del punto A. Los resultados se exponen a continuación:

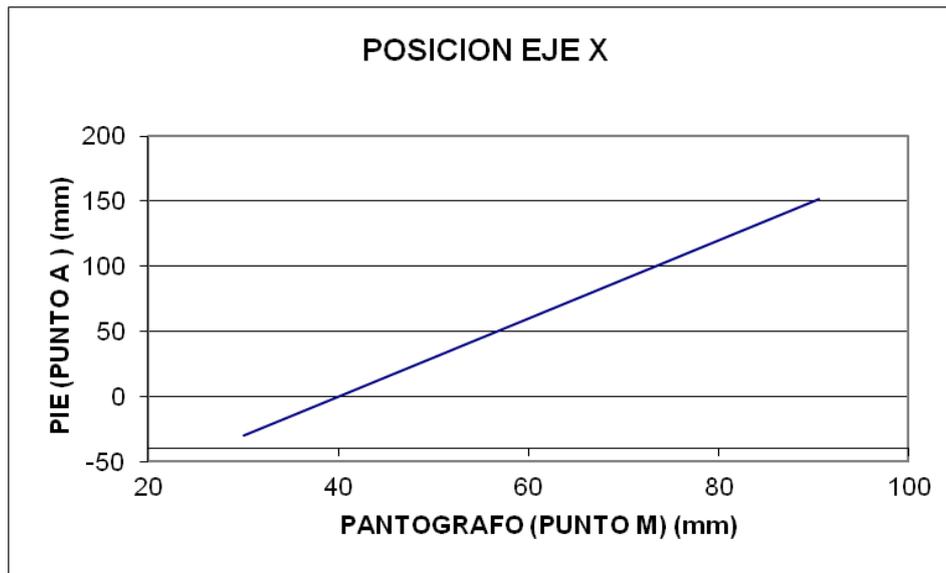


Gráfico 3.1: Relación de Posición Eje X

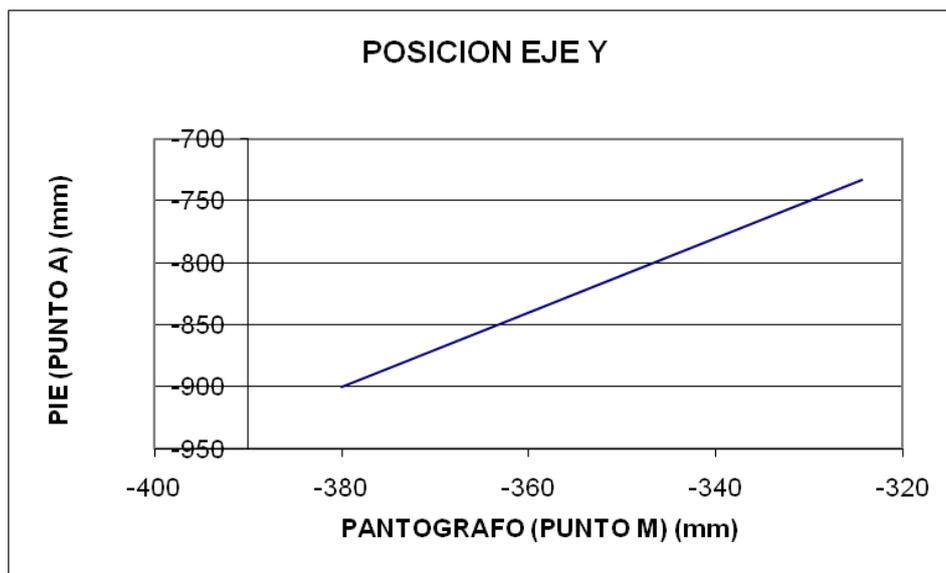


Gráfico 3.2: Relación de Posición Eje Y

La relación entre las posiciones de los puntos M y A quedan perfectamente definidas para los desplazamientos en dirección de los ejes X e Y, pudiéndose apreciar que la pendiente de las rectas es 3, es decir, que la relación de de amplificación del pantógrafo sigue siendo de 3:1.

A continuación se muestran los incrementos de posición anteriores:

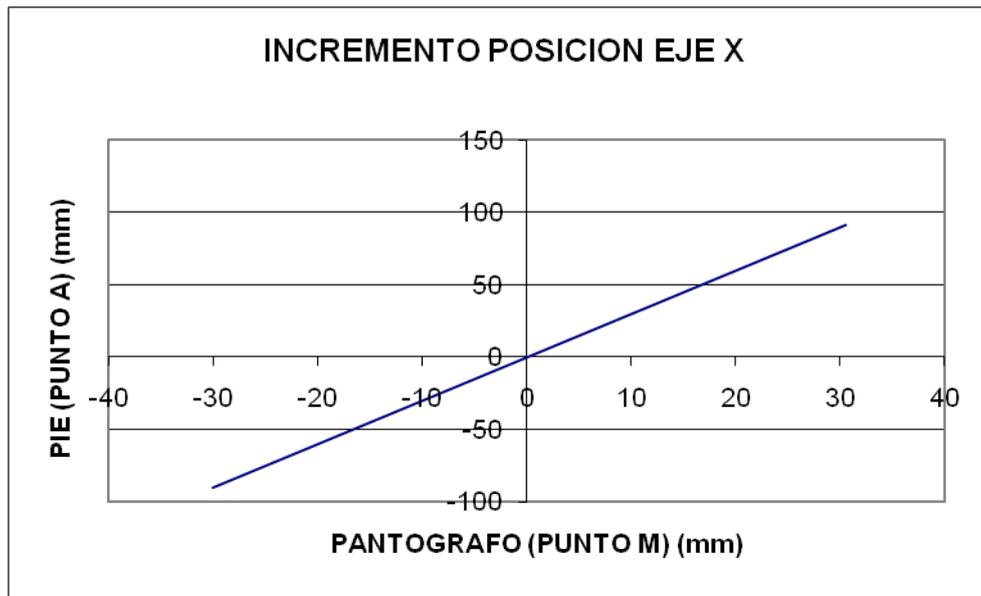


Gráfico 3.3: Relación de Posición Ejes X

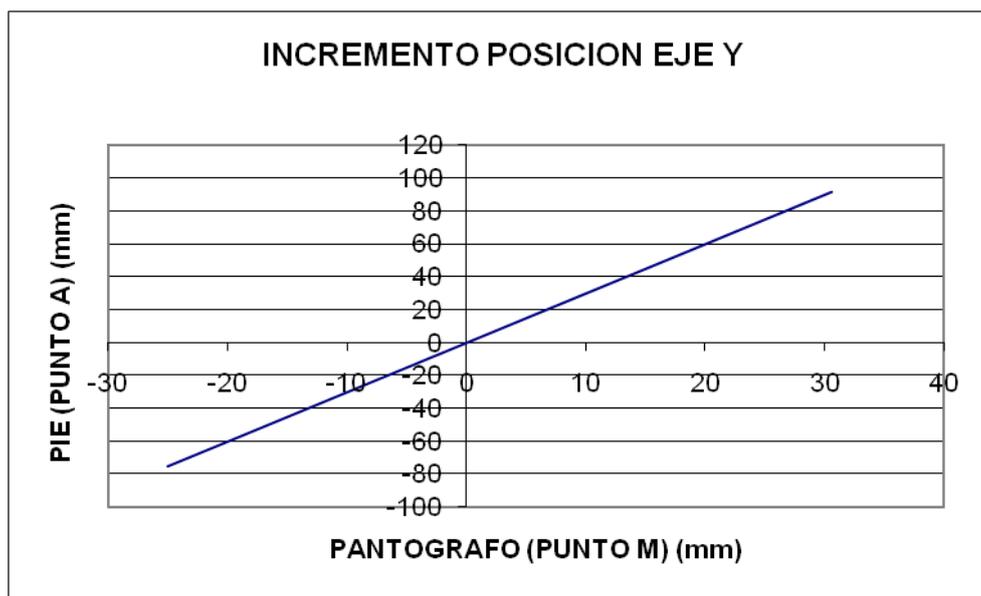


Gráfico 3.4: Relación de Posición Eje Y.

En este caso, gráfico 3.5 se puede apreciar mejor la relación entre la variación de movimiento de los puntos M y A. Obviamente se sigue manteniendo la relación de amplificación de 3:1.

Para finalizar el ensayo, se realizará un incremento de la posición del punto M en dirección distinta a la de los ejes X e Y para observar el comportamiento del punto A.

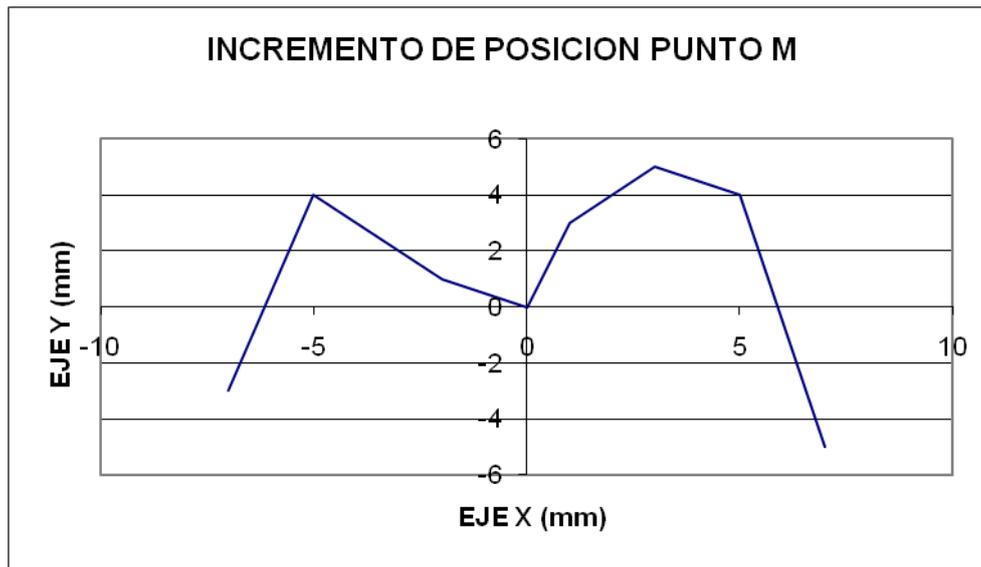


Gráfico 3.5: Incremento de Posición Punto M.

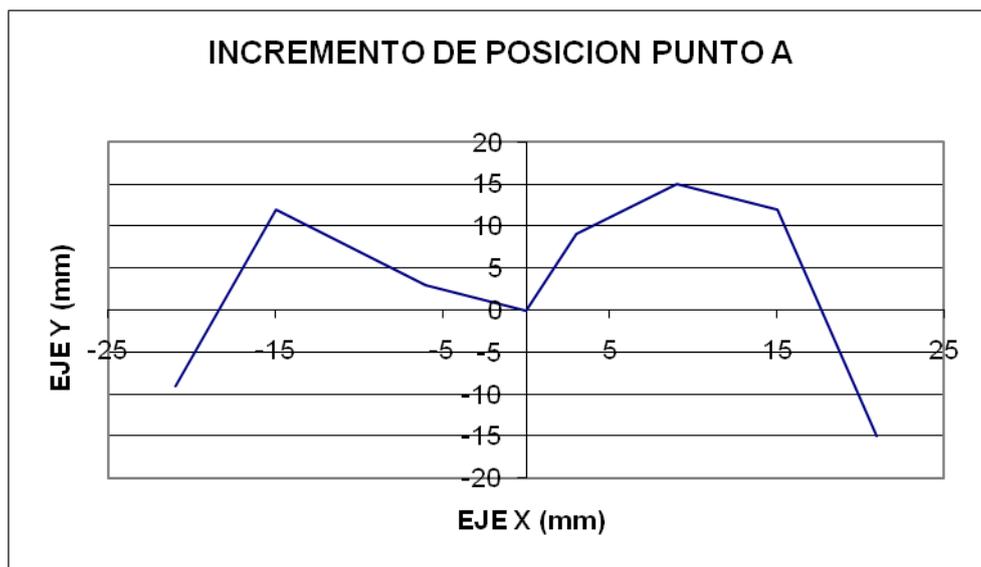


Gráfico 3.6: Incremento de Posición Punto A.

En lo gráficos 3.5 y 3.6 se ve que las curvas son semejantes, y que la relación de amplificación del pantógrafo se cumple. Además se puede extraer una conclusión muy importante de este último estudio, y es la independencia de movimientos entre los ejes cartesianos, es decir, se pueden combinar movimientos en distintas direcciones del plano sin que haya interferencia entre ellos. Esto es importantísimo, ya que permitirá la combinación de movimientos de los actuadores sobre el punto M en direcciones diferentes a los ejes X e Y, obteniendo un movimiento predecible y preciso del punto A.

3.5.3. Espacio de trabajo del pantógrafo.

Se define como espacio de trabajo del Pantógrafo la región del espacio en la cual se puede situar el punto fijo del pantógrafo (punto M) y éste se sigue comportando de una manera satisfactoria. Este estudio es primordial debido a que en función de sus resultados se podrán establecer los límites de los actuadores.

Para analizar el espacio de trabajo se tomó el modelo de la pierna GAMBAA y se utilizó el programa Working Model, debido a la velocidad de diseño y a la posibilidad de variar la ubicación de los elementos de una manera directa y sencilla. Para el estudio se procedió a la variación de la situación del punto M y la observación del comportamiento del modelo mediante la simulación del movimiento. El espacio de trabajo, en coordenadas cartesianas del plano X-Y queda definido de la siguiente manera:

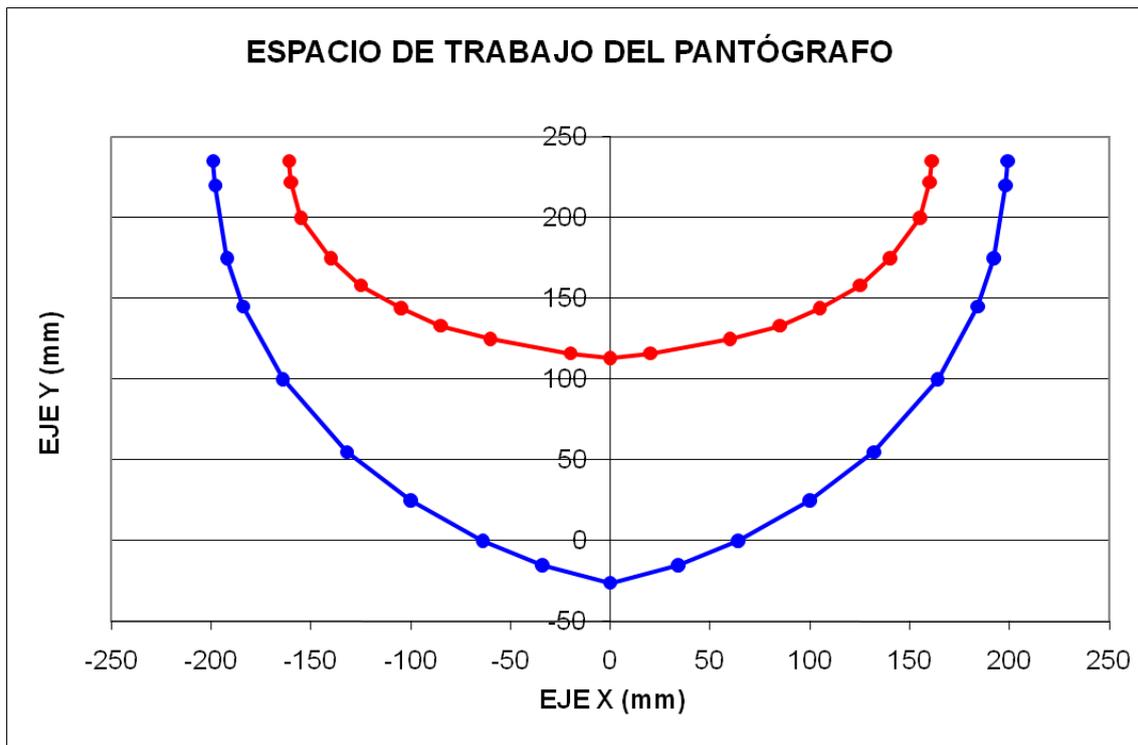


Gráfico 3.7: Espacio de trabajo del pantógrafo.

El origen del espacio, (0,0)mm, está situado en el punto M del pantógrafo. La serie roja de datos es la parte superior del espacio de trabajo, mientras que la azul es la inferior, quedando el espacio delimitado entre ambas. El espacio no está cerrado por la parte superior y a ambos lados, y esto es debido a que cuando el

punto M se sitúa por encima de estos puntos la trayectoria recta del punto A está situada por encima de la trayectoria recta del Chebyshev, y esto desde el punto de vista de la funcionalidad no tiene sentido. Los tres puntos más significativos, por la proximidad a M son:

- (0, -26) Límite inferior del espacio de trabajo.
- (-64, 0) Límite lateral a la izquierda del punto M.
- (64, 0) Límite lateral a la derecha del punto M.

Hay regiones del espacio de trabajo que no se pueden utilizar, ya que generarían una gran inestabilidad en el modelo. Teniendo en cuenta además el coeficiente de amplificación del pantógrafo, que es de 3:1, se puede delimitar un espacio de trabajo final más pequeño que cumplirá con las premisas de funcionalidad.

El espacio final, en coordenadas globales con el origen en el punto L, es el siguiente, reflejado en la figura 3.8:

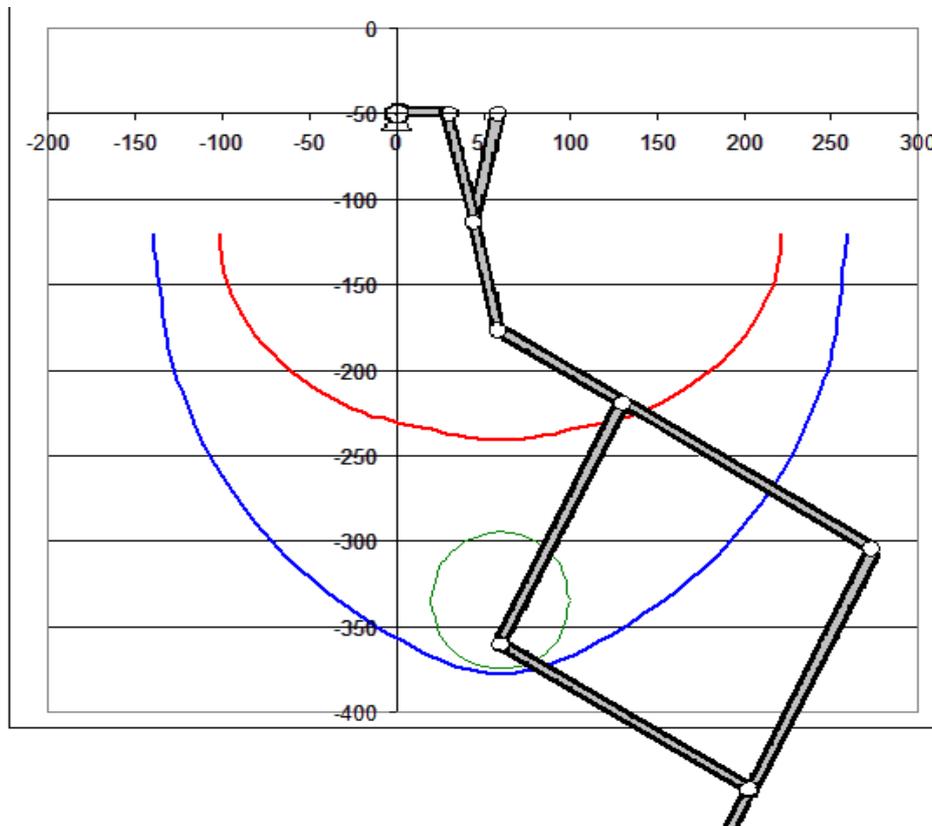


Gráfico 3.8: Espacio de trabajo final.



Se ha establecido una circunferencia de 40mm de radio como espacio de trabajo final (circunferencia verde). Se ha colocado de tal manera que el centro queda lo suficientemente elevado como para que quede dentro del espacio de trabajo establecido.

Las coordenadas del centro del espacio de trabajo final son las siguientes:

$$(X', Y') = (60, -334.73)$$

y la ecuación utilizada para hallar las coordenadas del espacio de trabajo final

$$(X - X')^2 + (Y - Y')^2 = R^2$$

particularizada para este caso:

$$(X - (60))^2 + (Y - (-334.73))^2 = 40^2$$
$$Y = -334.73 \pm \sqrt{40^2 - (X - 60)^2}$$

A partir de la ecuación anterior, los puntos que generan la curva en coordenadas globales son:

X	Y
20	-334,73
25	-315,37
30	-308,27
40	-300,09
50	-296
60	-294,73
70	-296
80	-300,09
90	-308,27
95	-315,37
100	-334,73

X	Y
20	-334,73
25	-354,09
30	-361,19
40	-369,37
50	-373,46
60	-374,73
70	-373,46
80	-369,37
90	-361,19
95	-354,09
100	-334,73

Nótese que para cada coordenada X, a excepción de X=20mm y X=100mm, existen dos soluciones o coordenadas Y, una superior y otra inferior.

3.6.- EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS

Durante el desarrollo del presente proyecto, se han ido implementando y simulando varios modelos en función de los objetivos que se pretendían conseguir en este proyecto. A continuación se realizará una breve exposición de la evolución de los modelos, descripción de sus características y el porqué de su elección o desestimación. Además se comentará brevemente la operativa a seguir en la simplificación del modelo ya construido para su implementación en MSC Adams para su posterior estudio.

3.6.1. Desarrollo en el diseño del Pasibot.

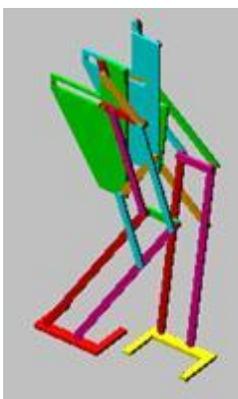
MODELO INICIAL



En un principio, al comienzo de este proyecto se empezó a usar el modelo simplificado que se muestra en la figura 3.17. Este modelo fue creado totalmente desde MSC Adams. Se aprecia cómo es un modelo sumamente simplificado, ya que no se aprecian juntas entre ambas caderas sino que son meras restricciones analíticas las que se le aplican para simplificar el modelado del mismo

Figura 3.17: Modelo inicial

PASO CAMBIADO



Debido a la inestabilidad del modelo anterior se decidió hacer una simulación arrancando con el paso cambiado. Cosa que posteriormente observaremos como es una condición muy importante para el devenir de la simulación. Comprobaremos como el inicio de la marcha es fundamental en las inestabilidades del modelo haciendo que se provoquen picos de fuerzas, aceleraciones y momentos que hacen que el modelo se comporte de un modo totalmente diferente

Figura 3.18: Modelo con paso cambiado

PAREJA ANDANTE:

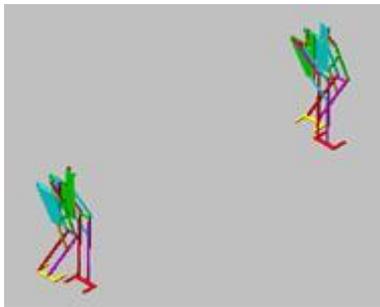


Figura 3.19: Pareja

Esta simulación fue creada para comprobar cómo el caso descrito anteriormente de que el inicio del movimiento es un momento crítico en el devenir del movimiento del robot. Se observó que el inicio con una pierna u otra implica una serie de picos de aceleraciones, inercias y apoyos que hacen que el movimiento del Pasibot vaya en una dirección u otra.

Si empezamos con el pie izquierdo apoyado, el Pasibot tiende a caminar hacia la izquierda y si empezamos el movimiento con el pie derecho apoyado, el Pasibot tiende a caminar hacia la derecha. Esto conllevará el estudio del porqué de esta situación que se explicará en capítulos posteriores.

VARIANTE CON TALADROS PARA MEJOR ENSAMBLE EN ADAMS

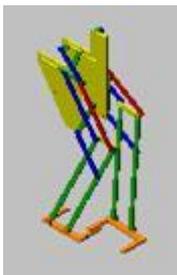


Figura 3.20:
Variante con taladros

Después de realizar varios estudios con el modelo básico inicial se empezaron a realizar modificaciones en el mismo con distintos fines. En un primer lugar se optó por incluirle en las juntas unos taladros que simplificaban sustancialmente la dificultad de implementar el robot en el software de análisis MSC Adams, ya que

las juntas a definir son mucho más fáciles de implementar con unos taladros simulando el lugar donde tendrá la rotación cada uno de los eslabones en vez de definir markers como en un principio se hizo para poder aplicar un giro entre eslabones.

MODELO CON RIGIDIZADORES ENTRE LA CADERA



Figura 3.21: Rigidizadores
en la cadera

Con el objetivo de diseñar un modelo más realista se introdujeron unas barras entre las caderas que rigidizasen el sistema, ya que, aunque para la simulación era válido el modelo anterior, la fabricación del Pasibot haría imponer este tipo de diseño.

Además se hicieron las pertinentes simulaciones para ver el comportamiento del nuevo modelo, el cual no fue muy diferente a los modelos anteriores, ya que lo único que

estábamos generando es ese momento era un modelo con otra estructura visual pero una mínima introducción de peso debido a estos rigidizadores.

PASIBOT CARENADO

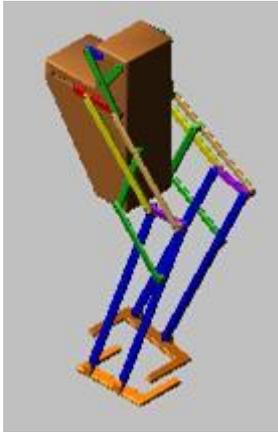


Figura 3.22:
Carenado

Pensando en la evolución del Pasibot, el siguiente paso del diseño fue hacer una cadera más refinada y carenada para encerrar los mecanismos internos que llevará en el modelo real, ya que deberían estar protegidos de humedades y polvo. No obstante en las simulaciones que se hicieron con el mismo se observó una estabilidad incluso algo mejor que los anteriores, pero al no ser objeto de estudio el posible carenado del Pasibot, se desechó para seguir con los diseños más enfocados a darle habilidades que a proteger sus mecanismos internos.

ÚLTIMO MODELO



Figura 3.23: Modelo
sin actuador

Este modelo fue la consecución del modelo con rigidizadores, con la diferencia de que en este caso la parte de la cadera está más acorde con la realidad ya que incluye ciertos elementos pertenecientes a la transmisión que en el estudio dinámico han de tenerse en cuenta debido a la variación del cdm respecto al modelo anterior.

MODELO CON PIES EN DOBLE T



Figura 3.24: Pies en doble T

En este caso la modificación que se hizo en el modelo fue la sustitución de los pies en “U” por los pies en doble T dado que se veía en las simulaciones que el modelo era un tanto inestable en el eje z (lateralmente). La modificación no fue satisfactoria porque aunque por un lado el apoyo lateral mejoraba, la inclusión de masa que suponían las dobles T hacía que el cdm se distanciase demasiado del eje de simetría del modelo haciéndolo aun más inestable.

MODELO CON PIES EN CUADRADO



Figura 3.25: Pies en cuadrado

La siguiente variación para intentar hacer el modelo más estable fue la de hacer los pies en forma de cuadrado con un vaciado para aligerarlo de peso. El resultado no fue todo lo satisfactorio que se podría pensar, pero sí se mejoró la estabilidad lateral, que era el objetivo que se perseguía. No obstante se decidió seguir con el modelo con los pies en forma de “U” debido a que en los ensayos siguientes era necesaria esa forma para poder hacer que los pies se intercalasen para el alargamiento y acortamiento de la zancada.

MODELO CON DESLIZADERA INFERIOR



Figura 3.26: Modelo con actuador

Actualmente se está desarrollando un nuevo modelo con una deslizadera en el punto que era fijo en los modelos anteriores, con lo que conseguimos un acortamiento y alargamiento de la zancada además de una posibilidad de control de la trayectoria y del balanceo longitudinal del Pasibot que estudiaremos en capítulos posteriores.

3.6.1.1.- Pasos realizados en la simplificación.

El modelo final anteriormente descrito fue fruto de una simplificación respecto al un modelo diseñado en solid edge en el cual se representaban todas las piezas del modelo con sus respectivas juntas, motores, correas, etc.

En nuestro caso los únicos elementos que nos interesan para la simulación en MSC Adams son los llamados eslabones ya que cualquier elemento que se incluyese entre los mismos no hacía sino entorpecer la simulación a la hora de la importación en MSC Adams. Por tanto, se decidió simplificar este modelo, el cual tenía las dimensiones que se querían ensayar, para su posterior estudio.

En un primer momento el Pasibot descrito, tenía un total de 193 elementos, de los cuales se simplificaron a 30. En las figuras 3.27 y 3.28 se pueden apreciar el modelo inicial y el que finalmente se diseñó para su posterior estudio.



Figura 3.27: Modelo completo

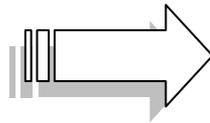


Figura 3.28: Modelo simplificado



Capítulo IV:

MANUAL DE APRENDIZAJE DE MSC ADAMS

4.1. INTRODUCCIÓN.

En el siguiente manual se va a proceder a explicar el funcionamiento del programa de simulación MSC.ADAMS 2005 View, la interfaz, las posibilidades de diseño, de simulación, animación y obtención de resultados, todo ello acompañado de un ejemplo explicativo de la construcción del PASIBOT.

El programa MSC.ADAMS View es un programa de simulación en tres dimensiones orientado hacia la simulación de mecanismos. Su mayor virtud es, una vez simulado el modelo, la obtención directa de todo tipo de resultados, de una manera directa y muy fiable.

Una vez iniciado el programa MSC.ADAMS view, aparecerá el siguiente menú de inicio:

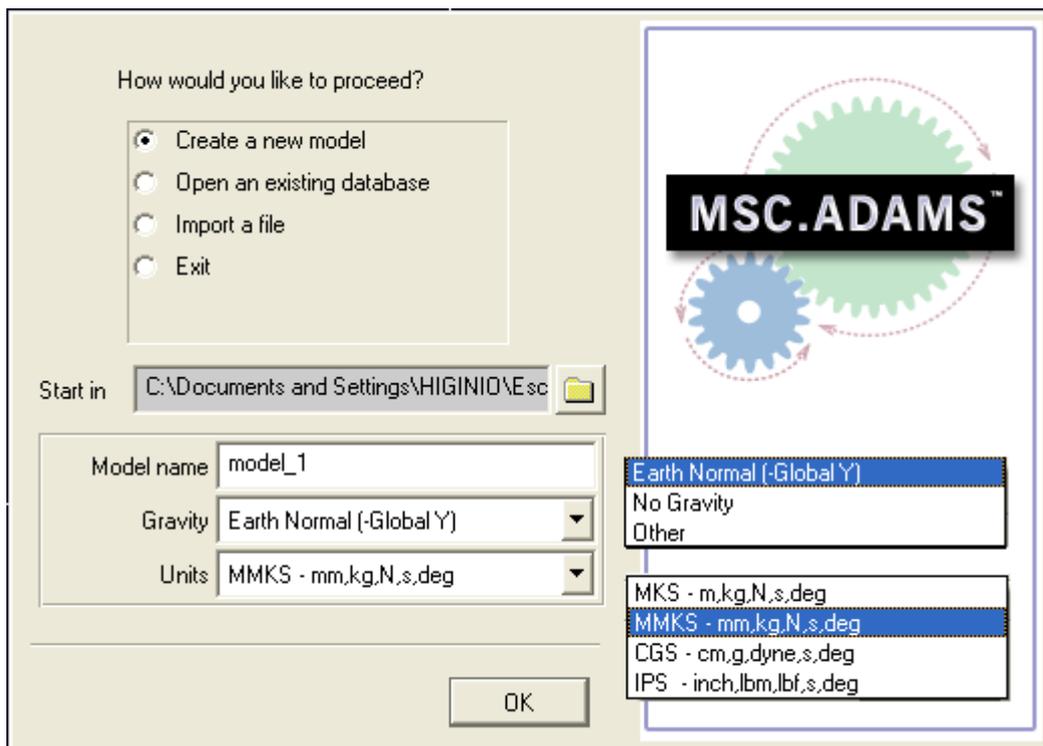


Figura 4.1: Menú de inicio

En ella se podrá definir iniciar un nuevo modelo, abrir una base de datos ya existente, es decir, abrir un modelo guardado anteriormente, importar un archivo o salir del programa. Además se podrá definir la carpeta en la cual se guardarán por defecto las bases de datos creadas. Se podrá también definir el nombre del archivo, si se desea dar gravedad, por defecto la de la Tierra, así como el sistema

de unidades, muy importante para diseñar y para la obtención de resultados, MMKS por defecto.

4.2. CONTROLES BÁSICOS.

Si se inicia un modelo nuevo, aparecerá el espacio de trabajo, con la barra de tareas básica (figura 4.3):

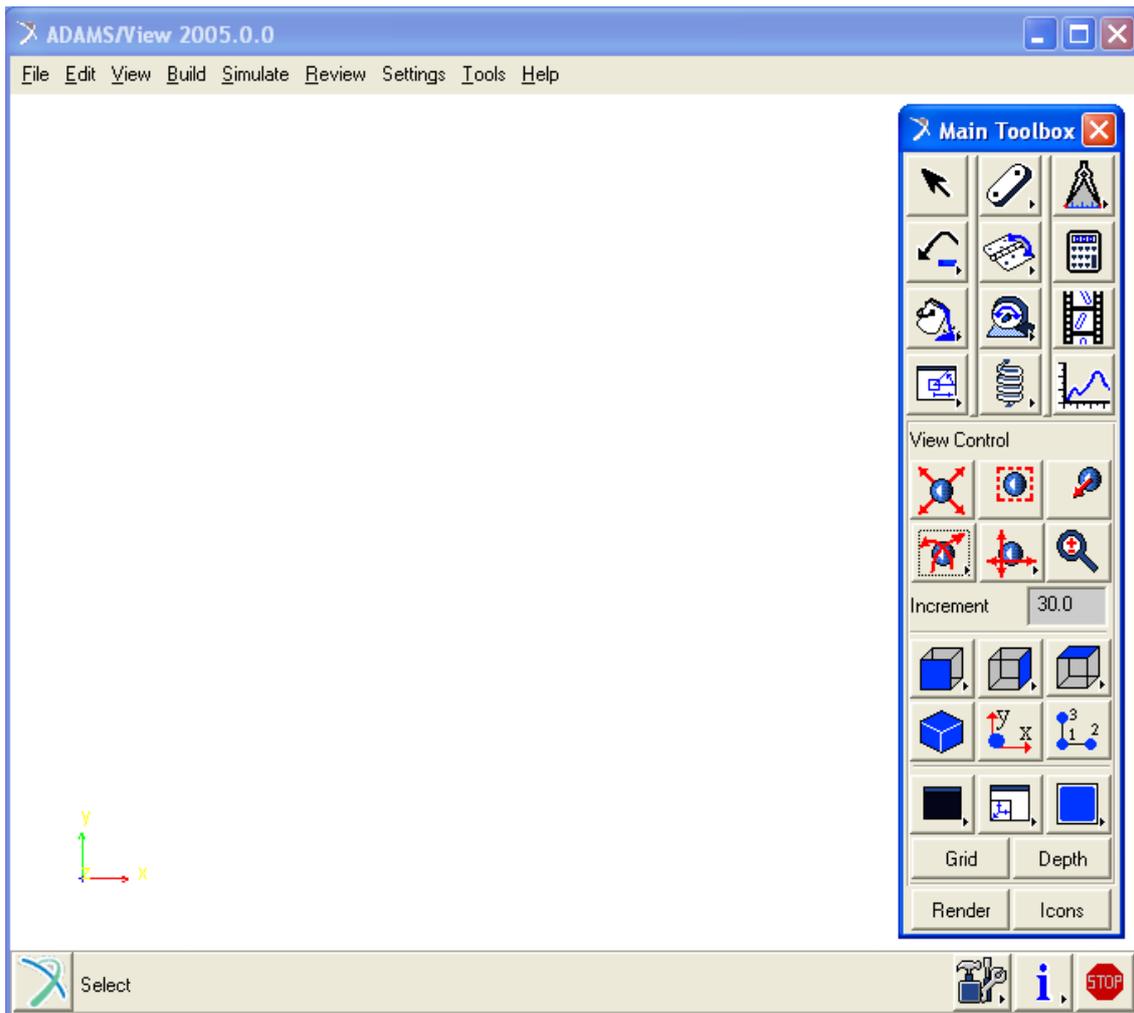


Figura 4.2: Espacio de trabajo y barra de tareas.

En la parte superior aparecen las opciones clásicas de FILE, para guardar, cargar, exportar, etc.; SETTINGS, donde se podrán configurar las unidades de trabajo, modificar la gravedad, la malla para diseñar y otras opciones y HELP, donde se podrán hacer consultas de sobre dudas. En EDIT, VIEW, BUILD, SIMULATE, REVIEW y TOOLS se podrán acceder a ellos de una forma básica a través de la barra de tareas ó del botón derecho del ratón.

El espacio de trabajo por defecto está situado en el plano X-Y, en $Z=0$, con el eje Z saliendo del plano de trabajo. La gravedad sigue la dirección del eje Y en sentido negativo.

A continuación se procederá a explicar la barra de tareas con sus funciones elementales:

Ésta es la barra de tareas que aparece por defecto,

que es la misma que si se pulsa el cursor:



Las opciones para generar diferentes vistas del modelo son:



Con las primeras opciones, de izquierda a derecha y de arriba a abajo se puede encuadrar, dar zoom a una determinada zona, moverse a un punto determinado, girar o rotar en el plano, desplazarse en el plano y dar zoom. Hay que aclarar que los iconos con una flecha en la parte inferior derecha son desplegables con más opciones. Si hacemos doble clic sobre cualquiera de ellas, tendremos un uso múltiple de cada una de las opciones hasta que pinchemos sobre el botón derecho, lo cual hará que deje de estar activo el botón.

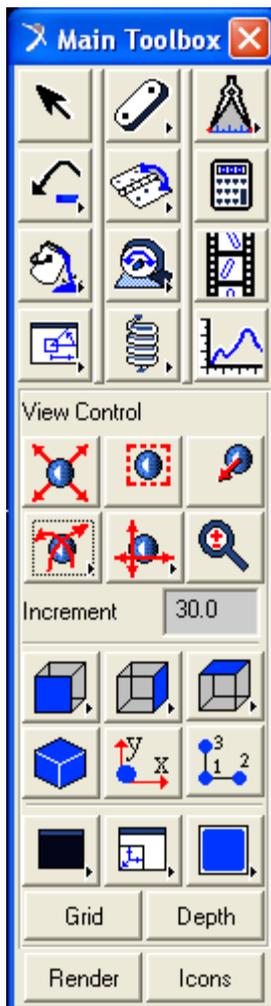
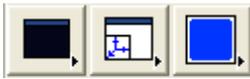


Figura 4.3: Barra de tareas

Con las segundas se podrá variar el plano de trabajo, frontal o posterior, izquierda o derecha, superior o inferior o en isométrico. Además se podrá situar el plano de trabajo en un cuerpo según sus ejes X-Y ó alinear el plano por tres puntos.



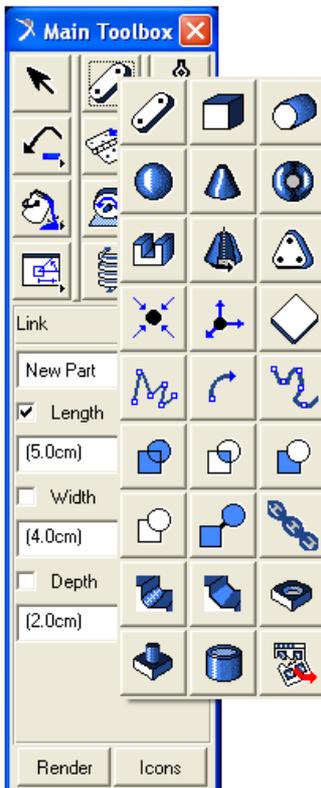
Con estos tres iconos se podrá modificar el color del fondo de trabajo, dividir la pantalla o dar más opciones.

Por último, con los cuatro últimos iconos se podrán realizar las siguientes funciones:

- GRID: Se activa o desactiva la malla de trabajo.
- DEPTH: Se cambia la perspectiva de la profundidad.
- RENDER: Se renderizan los elementos.
- ICONS: Rehacen visibles o no los iconos en los elementos.

4.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.

Para diseñar los elementos se utilizara el siguiente desplegable:



Las operaciones que se muestran a continuación son las básicas para el diseño en MSC.ADAMS View. Se dividirán en cuatro grupos, y se explicaran los más importantes. En primer lugar están las operaciones de diseño y construcción (puntos, líneas y marcadores). En segundo lugar las operaciones básicas de diseño de sólidos rígidos; en tercer lugar las operaciones booleanas para combinar piezas y por último las operaciones para modificar piezas. Hay que destacar, que existe un menú de diseño que se puede dejar fijo si

se pulsa el icono



Figura 4.4: Barra de tareas de diseño.

siendo el menú siguiente:

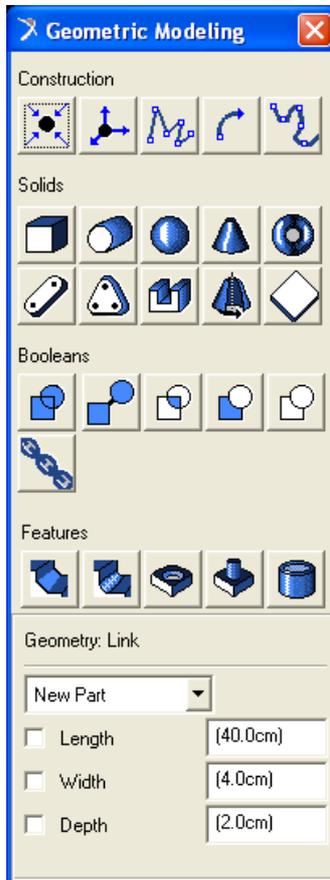


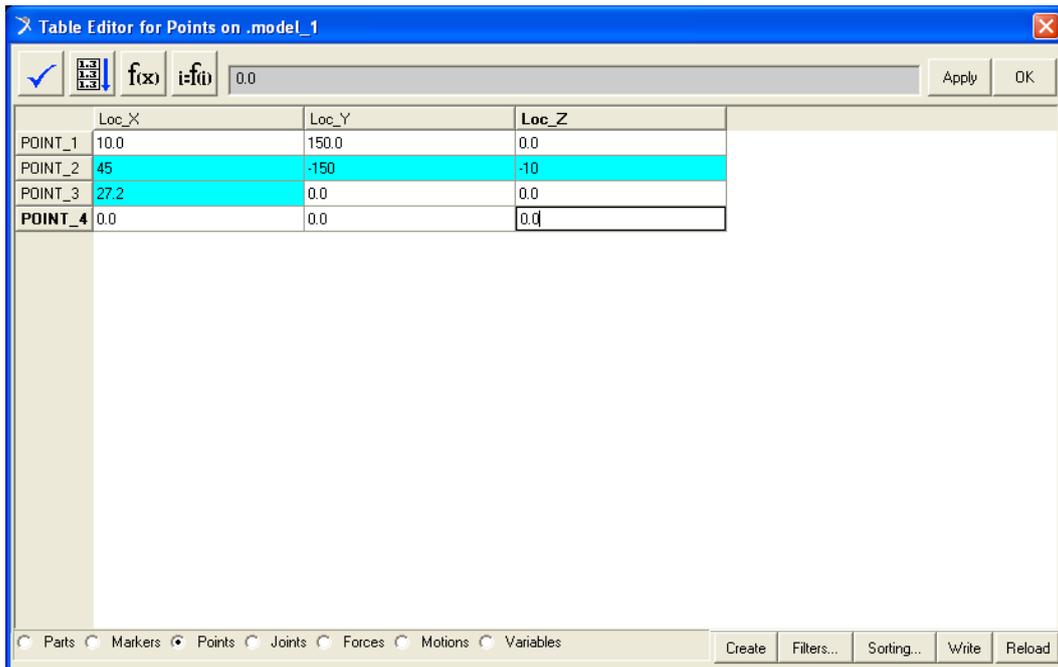
Figura 4.5: Menú de diseño

A la hora de diseñar hay que tener en cuenta que por defecto se hará en el plano X-Y con $Z=0$ y que posiblemente la malla estará activada. Esto implica que si se quiere diseñar directamente sobre el plano de trabajo todos los elementos estarán situados sobre los puntos de la malla, con el grado de imprecisión que puede implicar. Por ello, conviene



utilizar los puntos para definir la situación de los elementos. Los puntos, por defecto se añadirán al suelo, no a las piezas.

Se puede editar una tabla con los puntos en coordenadas cartesianas si se utiliza POINT TABLE. Para generar una tabla de puntos primero se crearán (CREATE) los puntos, luego se modificarán las coordenadas (coordenadas en azul) y por último se dará a APPLY para que surjan efecto los cambios. Siempre se podrán modificar o añadir más puntos en el momento que se desee.



	Loc_X	Loc_Y	Loc_Z
POINT_1	10.0	150.0	0.0
POINT_2	45	-150	-10
POINT_3	27.2	0.0	0.0
POINT_4	0.0	0.0	0.0

Figura 4.6: Editor de Puntos “Point Table”.

Los puntos aparecen representados en la figura 4.7:

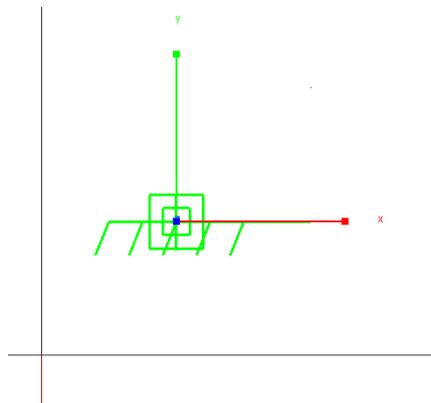


Figura 4.7: Punto añadido al suelo “Ground”.

A continuación se explicarán los marcadores (MARKERS). Los marcadores son puntos de referencia que aparecen en las piezas, normalmente en su centro de masas (Marker: cm) y en sus puntos más significativos, como sus extremos. Son utilizados principalmente para dar posición a una pieza nueva respecto de otra que ya existe, para realizar medidas, para posicionar juntas, motores y para desplazar o rotar piezas utilizándolos como referencia.

Se pueden añadir marcadores utilizando el siguiente icono:



Los marcadores por defecto se añaden al suelo, porque si se quieren añadir a piezas primero se debe cambiar en el desplegable de “Add to Ground” a “Add to Part”.

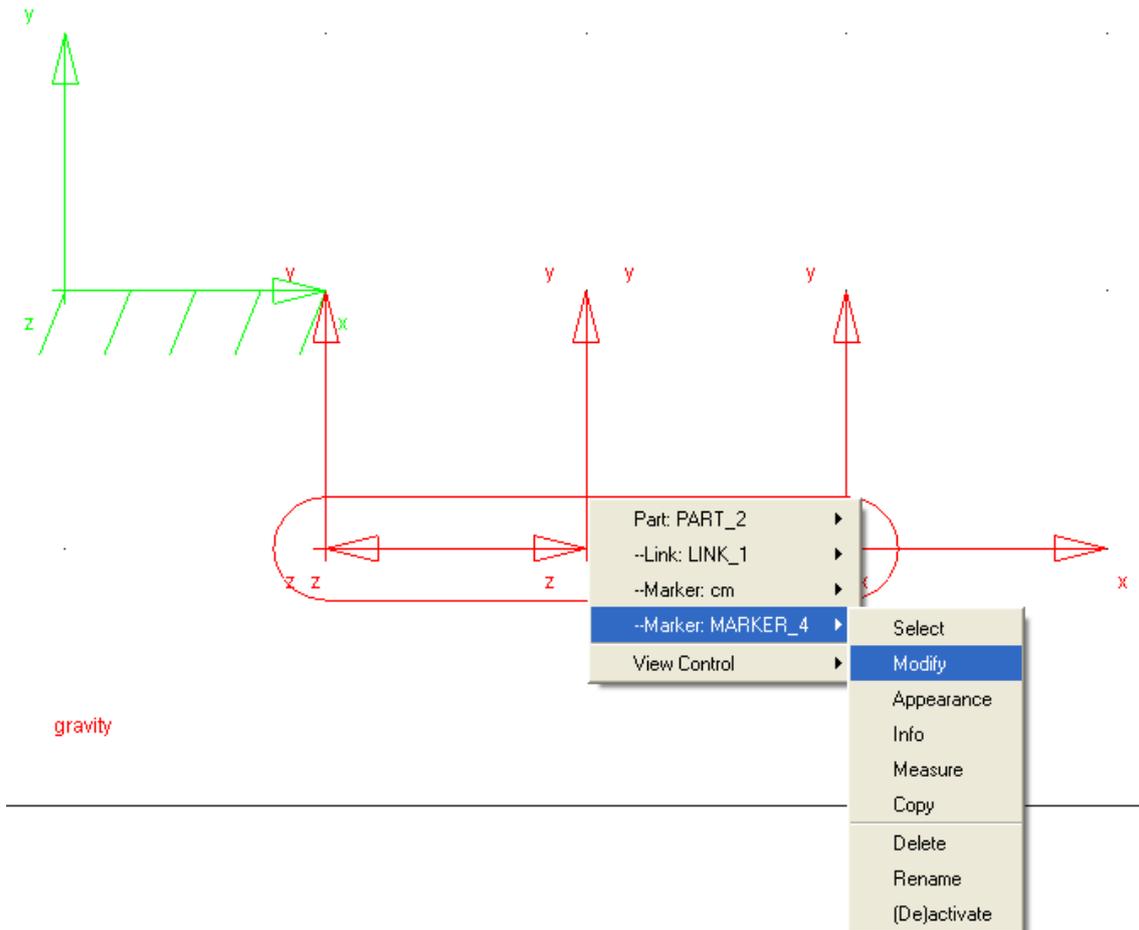
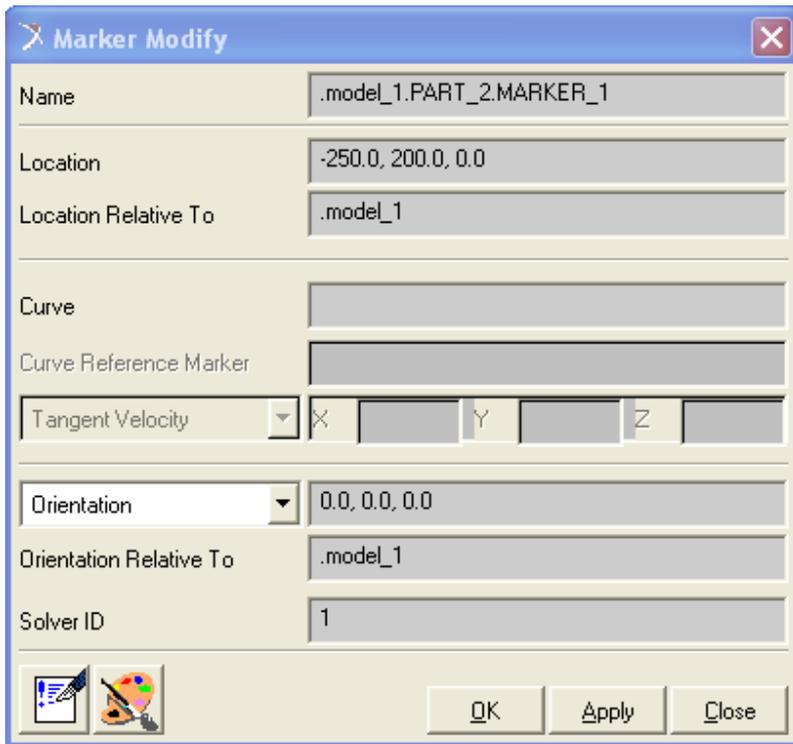


Figura 4.8: MARKERS.

En la figura 4.8 aparecen un marcador en el suelo (verde) y un eslabón con sus tres markers más representativos. También se aprovechará a explicar cómo modificarlos. Si se pincha con el botón derecho en una zona del espacio de trabajo, aparecerá un desplegable con los elementos más cercanos, en éste caso PART_2 (elemento 2). Dentro de PART_2 aparece LINK_1, refiriéndose al eslabón y MARKER_4, el cuál ha sido añadido previamente. En MARKER_4 si se pincha en modificar (modify) aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



Donde se podrá reubicar dando las nuevas coordenadas ó el giro respecto a los ejes que se quiera. Reseñar que las coordenadas son GLOBALES, no locales respecto al elemento.

Figura 4.9: Cuadro de diálogo de MARKERS

Por último se explicará brevemente las líneas:



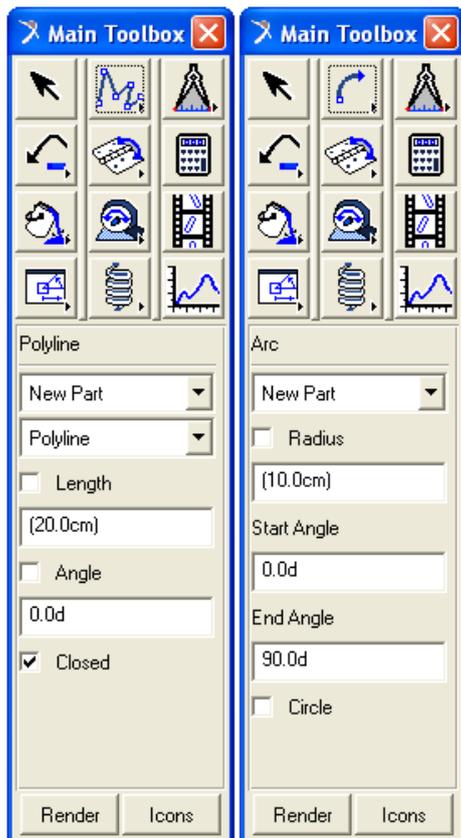


Figura 4.10: Tipos de líneas.

Las líneas carecen de masa, y se pueden utilizar, por ejemplo, para generar posteriormente extrusiones. La primera se utiliza para líneas rectas, la segunda para generar arcos y la tercera para líneas curvas. Se generará la línea dándole la forma que se desee utilizando el botón izquierdo del ratón, finalizando la operación pulsando el botón derecho. Una aplicación importante, y que también se utiliza en otros muchos elementos y piezas, es la posibilidad de preestablecer las dimensiones.

4.3.1. Diseño de sólidos.

Los sólidos que podemos diseñar son los siguientes:



Como en el caso de las líneas, se podrán preestablecer las dimensiones de los sólidos. En caso de que no se pueda establecer la orientación durante el diseño del sólido, ésta será siempre perpendicular a la malla y situada sobre ella en el caso de que esté activada, y perpendicular a la vista del espacio de trabajo en el caso de que esté desactivada.

Se explicarán a continuación:



PARALELEPÍPEDO: Primero se dimensiona la base y se extruye (profundidad “deep”). Se extruye sólo en una dirección.



CILINDRO: Se dimensiona de perfil y se le da la orientación deseada. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



ESFERA: Se define el centro. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



CONO: Se dimensiona de perfil. Es recomendable predefinir sus dimensiones. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



TOROIDE: Se define el centro. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



ESLABÓN: Se define su longitud entre centros de redondeo de los extremos. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



PLACA: Tiene las esquinas redondeadas. Se define su forma mediante una línea con el botón izquierdo del ratón, cuando se desee finalizar se pulsará el botón derecho. La placa se define entre los centros de redondeo de las esquinas. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



EXTRUSIÓN: Se define la forma mediante una línea ya creada o definiéndola con el ratón. Se extruye sólo en una dirección, por lo que debe ser definida.



SOLIDO DE REVOLUCIÓN: Se define el eje de revolución y el perfil de revolución. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



PLACA: Se define como el paralelepípedo, pero ni se extruye ni tiene masa.

4.3.2. Operaciones booleanas.

Las operaciones booleanas se utilizan para combinar sólidos rígidos. A continuación se explicarán las más importantes:



UNIR: Fusiona dos sólidos de manera que se transforma en uno sólo. Las dimensiones de los sólidos que lo componen no se pueden modificar.



PEGAR: Une dos sólidos manteniendo las posiciones uno respecto de otro. Las dimensiones de los sólidos sí se pueden modificar.



INTERSECTAR: Al aplicar esta función el sólido resultante es la intersección de los dos sólidos definidos.



CORTAR: El sólido elegido en primer lugar es cortado por el elegido en segundo lugar, desapareciendo entonces el segundo sólido.

4.3.3. Modificación de sólidos.

Las operaciones siguientes sirven para modificar sólidos rígidos:



CHAFLÁN: Genera un chaflán de 45° con la anchura especificada. Se eligen las aristas con el botón izquierdo del ratón y se finaliza la operación con el derecho.



REDONDEO: Genera un redondeo con el radio especificado. Se eligen las aristas con el botón izquierdo del ratón y se finaliza la operación con el derecho.



AGUJERO: Genera un agujero de radio y profundidad especificada en la cara elegida en sentido perpendicular a la misma.



MACHO: Genera un macho a modo de tornillo de radio y longitud especificada en la cara elegida en sentido perpendicular a la misma.



VACIADO: Genera un vaciado en las caras seleccionadas con una anchura de pared especificada.

Los sólidos diseñados por defecto no tendrán contacto entre sí, lo cuál es beneficioso a la hora de diseñar en 2-D, ya que no existirá interferencia entre las piezas.

4.3.4. Modificación de las especificaciones iniciales de los sólidos.

Los sólidos diseñados pueden ser modificados normalmente tanto en posición como en dimensiones, pero como se pueda hacer depende de cómo haya sido diseñado.

La posición y las dimensiones pueden ser modificada de de dos maneras, en función de si han sido referidos a puntos o no:

Si han sido añadidos a puntos la posición y las dimensiones deberán ser modificadas reubicando los puntos mediante “Point Table” como ya se explico anteriormente.

Si no han sido referido a puntos la posición y las dimensiones se modifican de las siguientes maneras.

4.3.5. Posición.

La posición se puede modificar pinchando dos veces con el botón izquierdo del ratón o con el desplegable del botón derecho indicando la parte (PART) y Modify (figura 4.11):

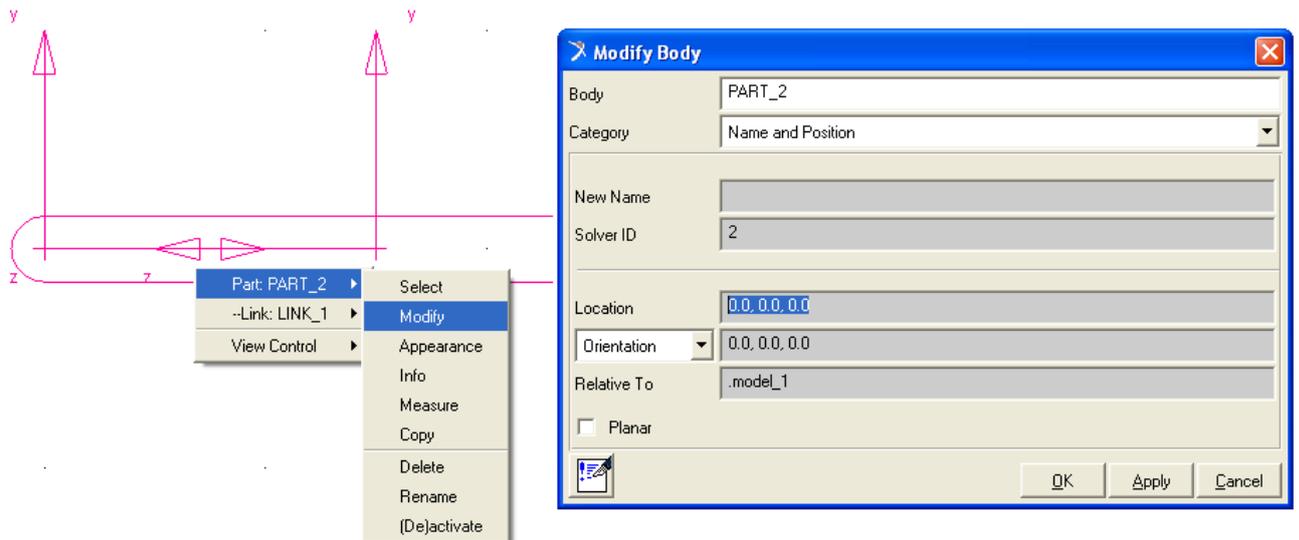


Figura 4.11: Modificación de dimensiones.

en “Category” se indica “Name and Position”y se posiciona el centro de masas de la pieza en “Location” teniendo en cuenta de que son coordenadas LOCALES. Además se podrá variar la orientación del sólido en “Orientation”.

Otra forma es utilizando los siguientes iconos:

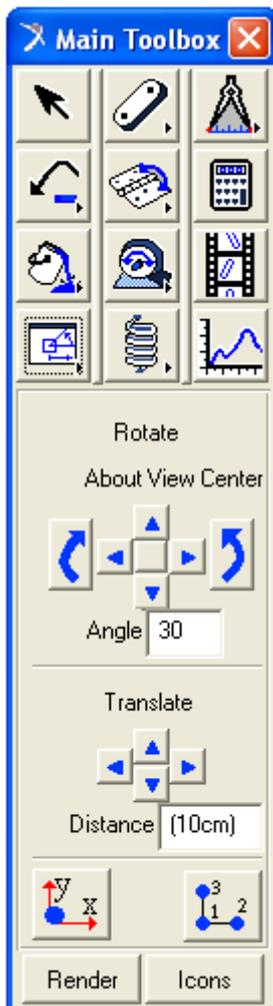
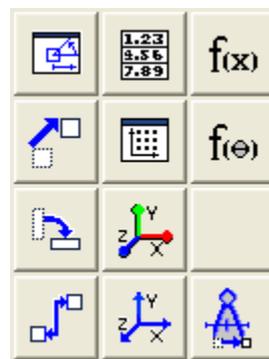


Figura 4.12: Posición de los sólidos

Si se pincha  en la barra de tareas se transforma en la que aparece a la izquierda. Si se selecciona directamente el sólido que queremos con el cursor se podrá modificar su posición con las opciones que aparecen en la imagen.

Si se abre el desplegable del icono anterior aparecen las siguientes opciones:



De las opciones anteriores destacan las siguientes:



TRASLACIÓN: Traslada un sólido desde una posición a otra. Es conveniente utilizar los MARKERS.



ROTACIÓN: Gira un sólido un ángulo prefijado según un eje especificado. Es conveniente utilizar los MARKERS.



ALINEACIÓN: Alinea la cara elegida de un sólido respecto a otra cara seleccionada de otro.

4.3.6. Dimensiones.

Se modifican con el desplegable del botón derecho e indicando dentro de PART el sólido:

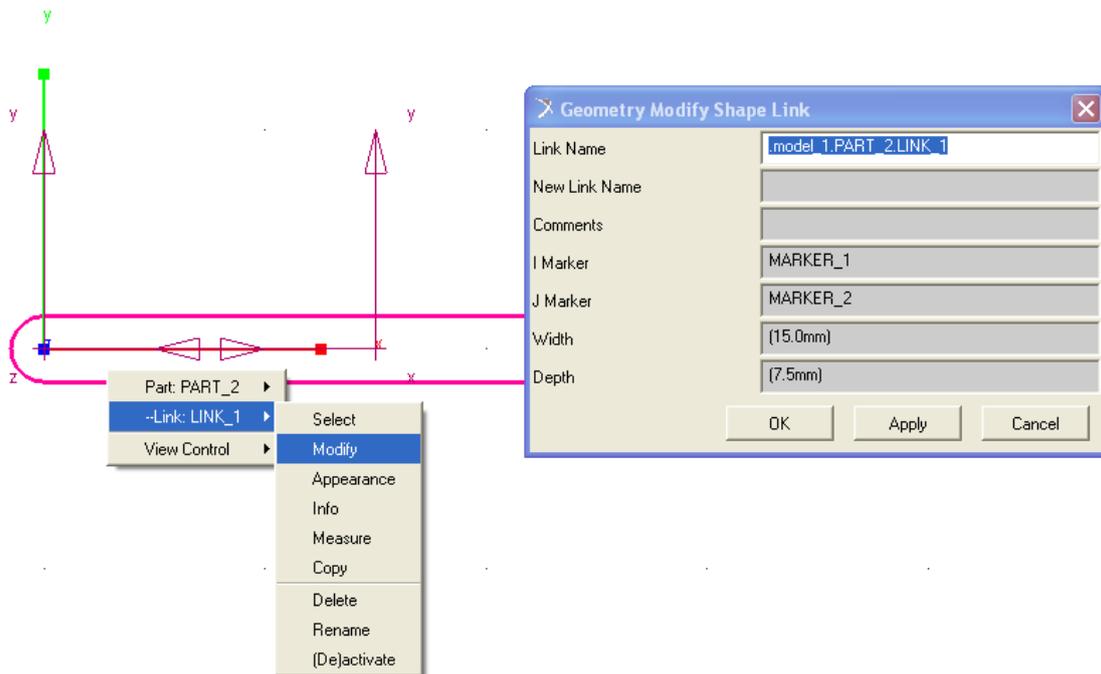


Figura 4.13: Modificación de dimensiones

En ocasiones no se pueden modificar todas las dimensiones, por lo que se eliminará el sólido y se dimensionará de nuevo. Para eliminar un sólido se puede realizar seleccionándolo y pulsando “Ctrl + X” ó con el desplegable del botón derecho y en “Delete”. Si se quieren eliminar varios sólidos se pueden seleccionar utilizando la tecla Ctrl y seleccionándolos con el ratón y utilizando “Delete” del menú “Edit”

Los colores de los sólidos pueden ser modificados utilizando el icono

desplegable

Durante el diseño siempre se podrá deshacer una operación errónea con el



4.3.7. Diseño de juntas, actuadores y fuerzas.

Una vez diseñados los sólidos y determinado su posición se procederá a aplicar las juntas y restricciones de movimiento para que el mecanismo se comporte como se desee.

4.3.7.1. Juntas.

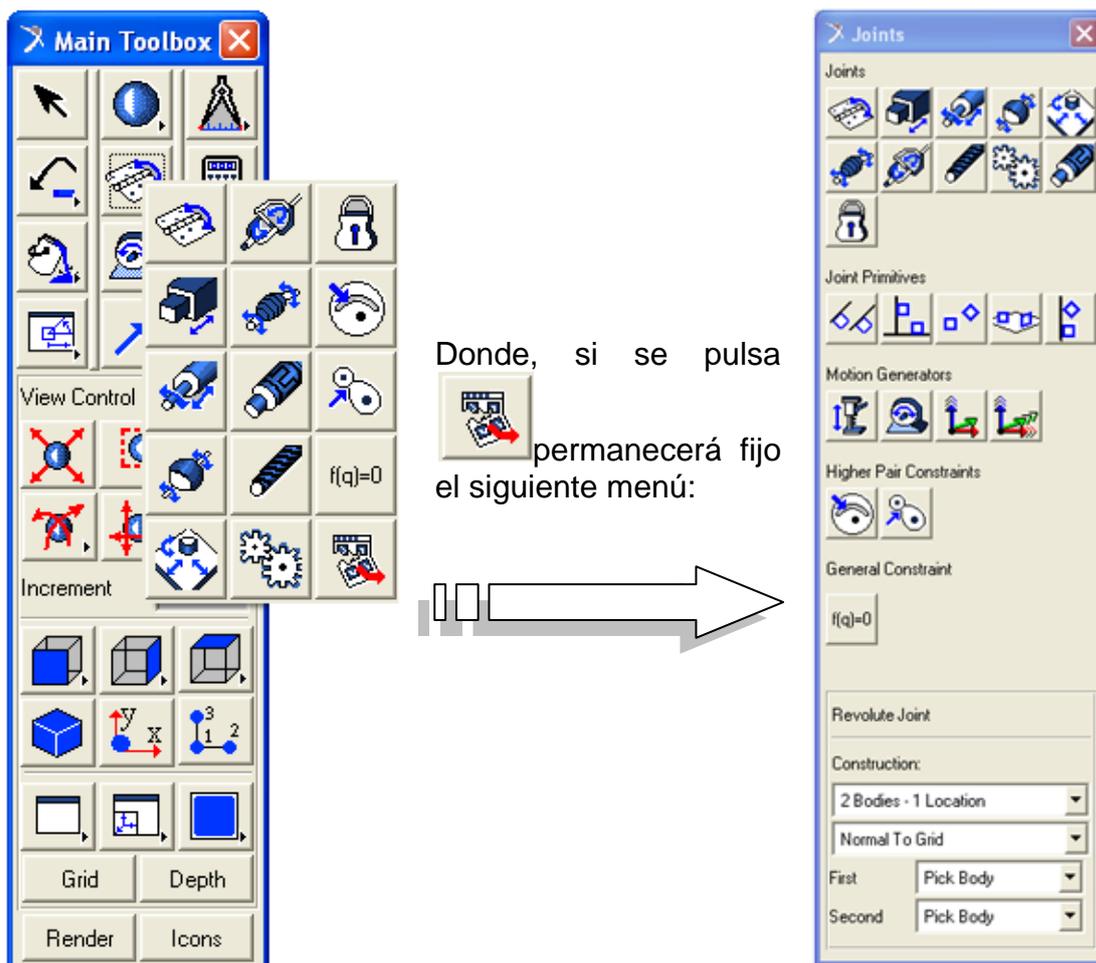


Figura 4.14: Diseño de Juntas

En la barra de tareas se dispone de las siguientes opciones:

Para el diseño de juntas en principio se dejará el menú de construcción tal y como viene por defecto, es decir, dos cuerpos y una localización. La manera de situarlas es elegir con el ratón los sólidos, o un sólido y el suelo (uno a uno) y por último la localización. En ocasiones, debido al número de sólidos, markers, puntos, etc., que hay en una determinada zona se hace difícil elegir lo que se desea, por lo que en esos casos, una vez elegida la junta se pulsará con el botón derecho en la zona donde se quiere situar y aparecerá un cuadro de diálogo como el de la página siguiente:

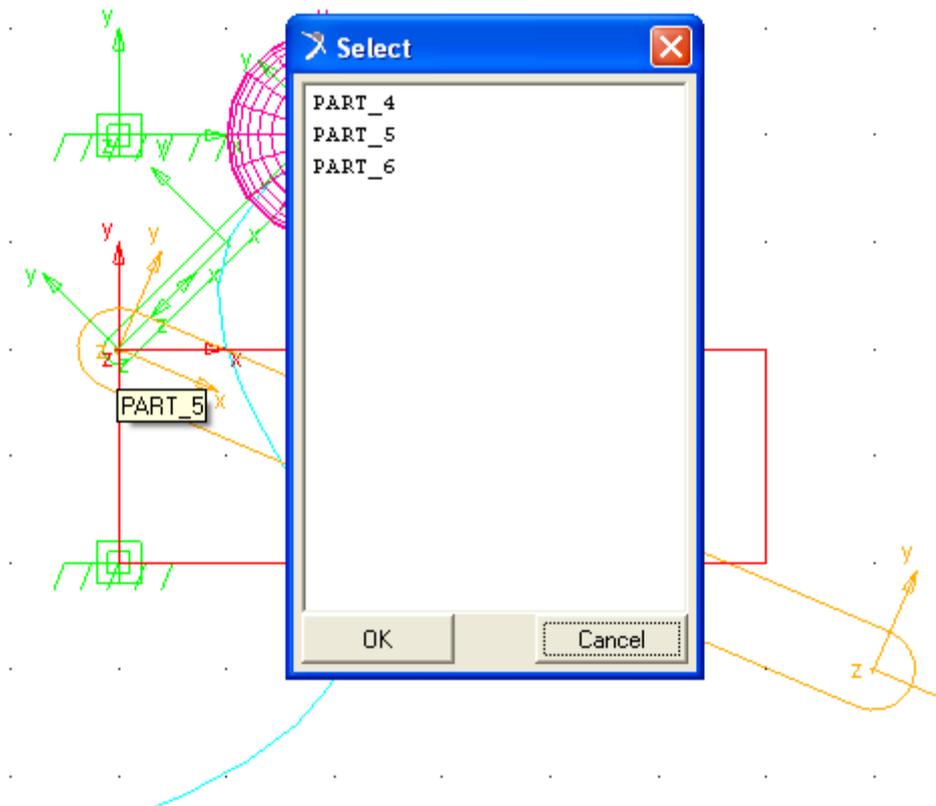


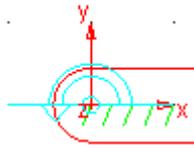
Figura 4.15: Selección de Elementos

donde se podrá seleccionar los sólidos ó elementos de diseño si procediese.

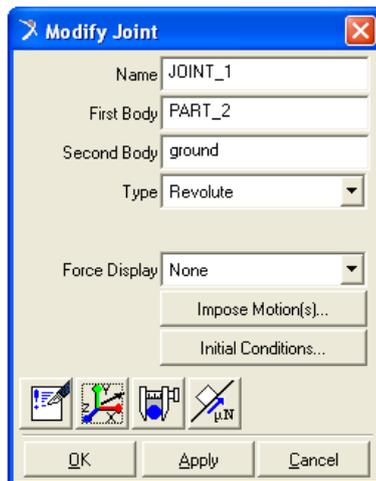
De todas las juntas y restricciones se destacan las siguientes:



JUNTA DE ROTACIÓN:



Restringe el totalmente el movimiento de traslación y la rotación en dos direcciones, permitiendo por tanto la rotación en una sola dirección. La dirección de rotación es, por defecto, normal a la malla, si está activada, o perpendicular a la vista seleccionada en ese momento si está desactivada. Si se desea modificar pulsaremos con el botón derecho en modificar y aparecerá el siguiente menú:



En este menú se podrá redefinir los sólidos que componen la junta, el tipo de junta, si deseamos aplicar una fuerza, realizar medidas, desplazar o girarla o incluso darle fuerza de rozamiento.

Figura 4.16: Menú de modificación de juntas.

Los menús de desplazamientos y de fuerzas de rozamiento son:

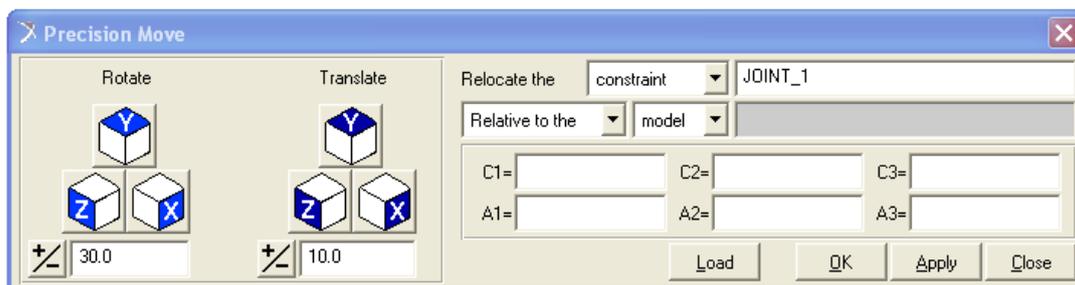


Figura 4.17: Menú de movimientos de precisión de juntas

La principal aplicación de éste menú es la posibilidad de girar juntas en las tres direcciones del plano cuando la dirección especificada no es válida para el diseño.

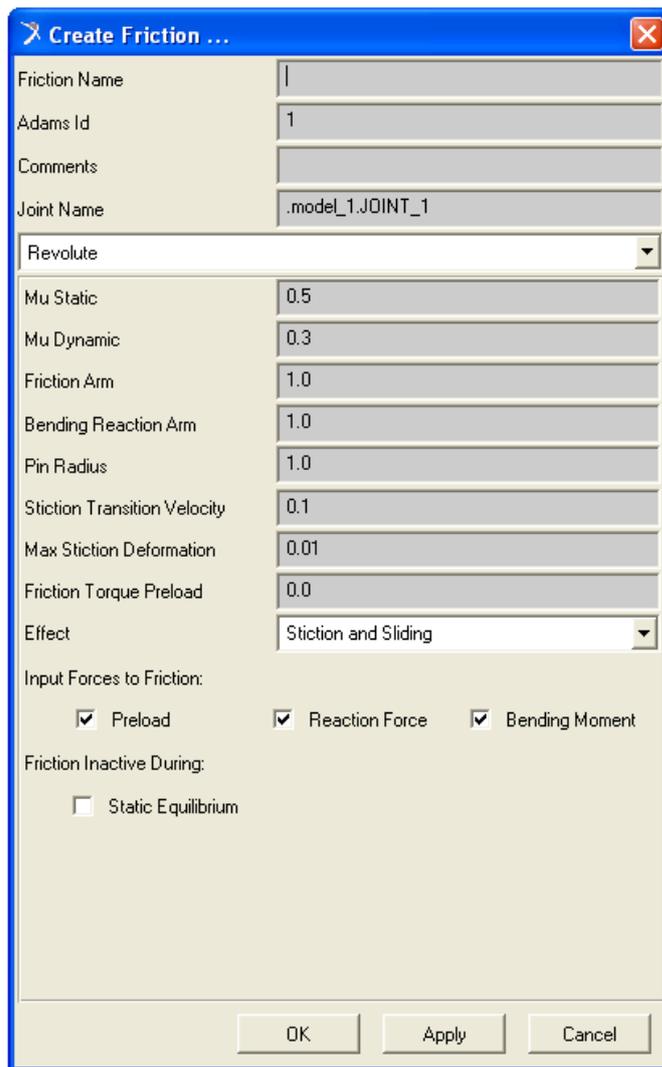


Figura 4.18: Definición de juntas

Por defecto las juntas son ideales, no tienen rozamiento, pero éste se puede definir de la forma que se desee.



JUNTA DE TRASLACIÓN:

Restringe el movimiento de tal manera que sólo se permite la traslación en una dirección. La dirección de movimiento, una vez seleccionados los sólidos (o el suelo) debe ser especificada. Los menús son iguales que el caso anterior.



JUNTA FIJA:

Restringe el movimiento de tal manera que anula todos los grados de libertad de un sólido respecto de otro o de un sólido respecto al suelo.

Es importante entender que a la hora de diseñar juntas los sólidos no tienen por qué estar en contacto. La junta si ha sido diseñada correctamente no necesita que las piezas estén físicamente en contacto.

4.3.7.2. Actuadores.

Los actuadores generan movimiento en los sólidos rígidos. Son los siguientes:



MOTOR LINEAL:

Se debe aplicar en una junta de traslación ó cilíndrica. Genera movimiento lineal en una dirección que debemos especificar. La velocidad debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



MOTOR ROTATIVO:

Se debe aplicar en una junta de rotación ó esférica. Gen era movimiento angular en la dirección de la junta. La velocidad angular debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



ACTUADOR LINEAL DE UNA DIRECCIÓN:

Se especifica por defecto entre dos sólidos, o un sólido y el suelo, y con una dirección. La velocidad debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



ACTUADOR:

Se especifica entre dos sólidos y la localización. Una vez situada aparece un cuadro de diálogo (figura 4.19) en el que se define el movimiento del actuador.

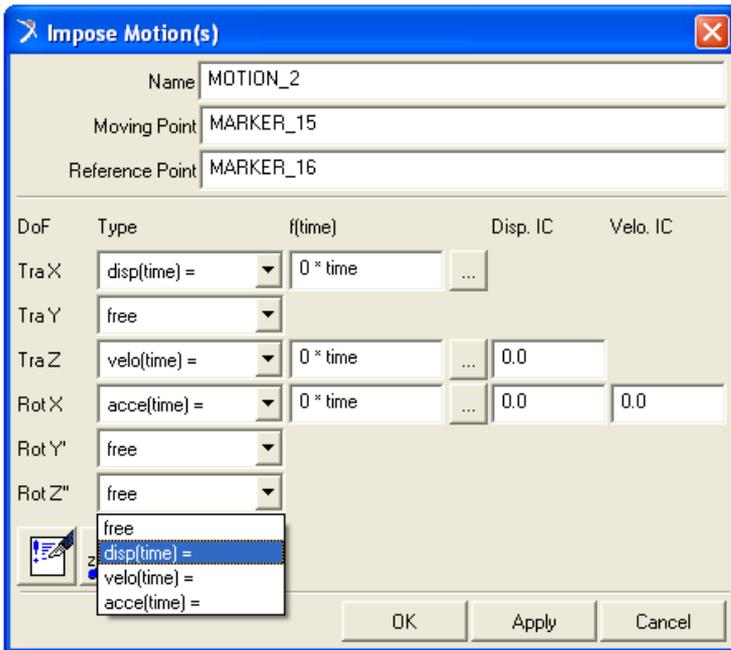


Figura 4.19: Cuadro de Diálogo de actuadores

En ocasiones hay que especificar que los actuadores solo generen movimiento durante un intervalo de tiempo. Esto se puede definir de la siguiente manera:

Lo primero que hay que hacer es pinchar en el actuador y modificarlo:

En el menú del actuador se puede ver dónde está aplicada, el tipo, la dirección, la función de movimiento y si esta es de desplazamiento, velocidad ó aceleración. Por defecto son de traslación, y dependen del tiempo. Si se desea

En él se podrá especificar el movimiento de los 6 grados de libertad, si son libres, si tienen aceleración, etc.

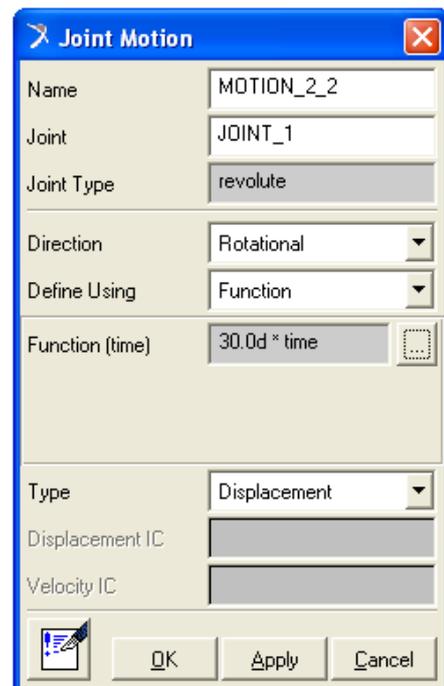


Figura 4.20: Menú de Juntas.

modificar la función para variar el movimiento se puede hacer directamente en el cuadro o pinchar en 

Apareciendo el constructor de funciones de la siguiente página:

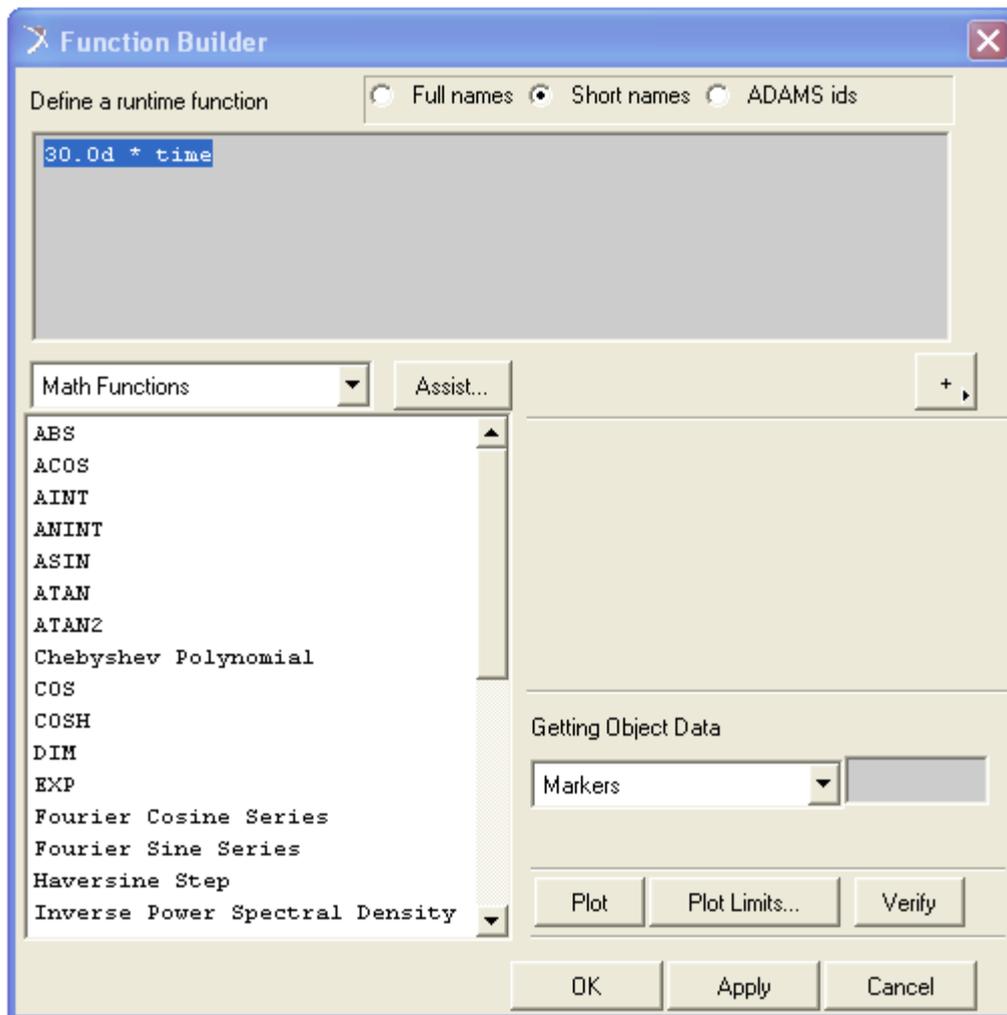


Figura 4.21: Constructor de funciones.

En el constructor de funciones (figura 4.21) se puede ver la función “30.0d * time” donde “d” se refiere a los grados y “time” al tiempo. Si se quiere definir para que el motor solo actúe en un intervalo se utilizará la función “IF”:

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

Ejemplo: si se desea que sólo actúe la función de desplazamiento “360d*time” en el intervalo (2 , 5.5) se escribirá:

$$\text{if}(\text{time}-2:0,0, 360\text{d}*(\text{time}-2)) - \text{if}(\text{time}-5.5:0,0, 360\text{d}*(\text{time}-5.5))$$

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

3.2.7.2. Fuerzas.

Además de los actuadores, podemos aplicar fuerzas a los sólidos para que se comporten también de una determinada forma. Las fuerzas se aplicarán con el siguiente desplegable:



Figura 4.22: Menú de Fuerzas

Se comentará brevemente los más comunes:



Genera una fuerza lineal en un cuerpo en una dirección indicada.



Genera un par de giro en un cuerpo en una dirección dada.



Genera una fuerza de amortiguamiento lineal entre dos sólidos



Genera un par de amortiguamiento entre dos sólidos.



Genera una fuerza extraordinaria, como la gravedad, pero en la dirección que se desee



Una aplicación importantísima es la capacidad de dar contacto:

El contacto se genera entre dos sólidos con el cuadro de diálogo siguiente (figura 4.23):

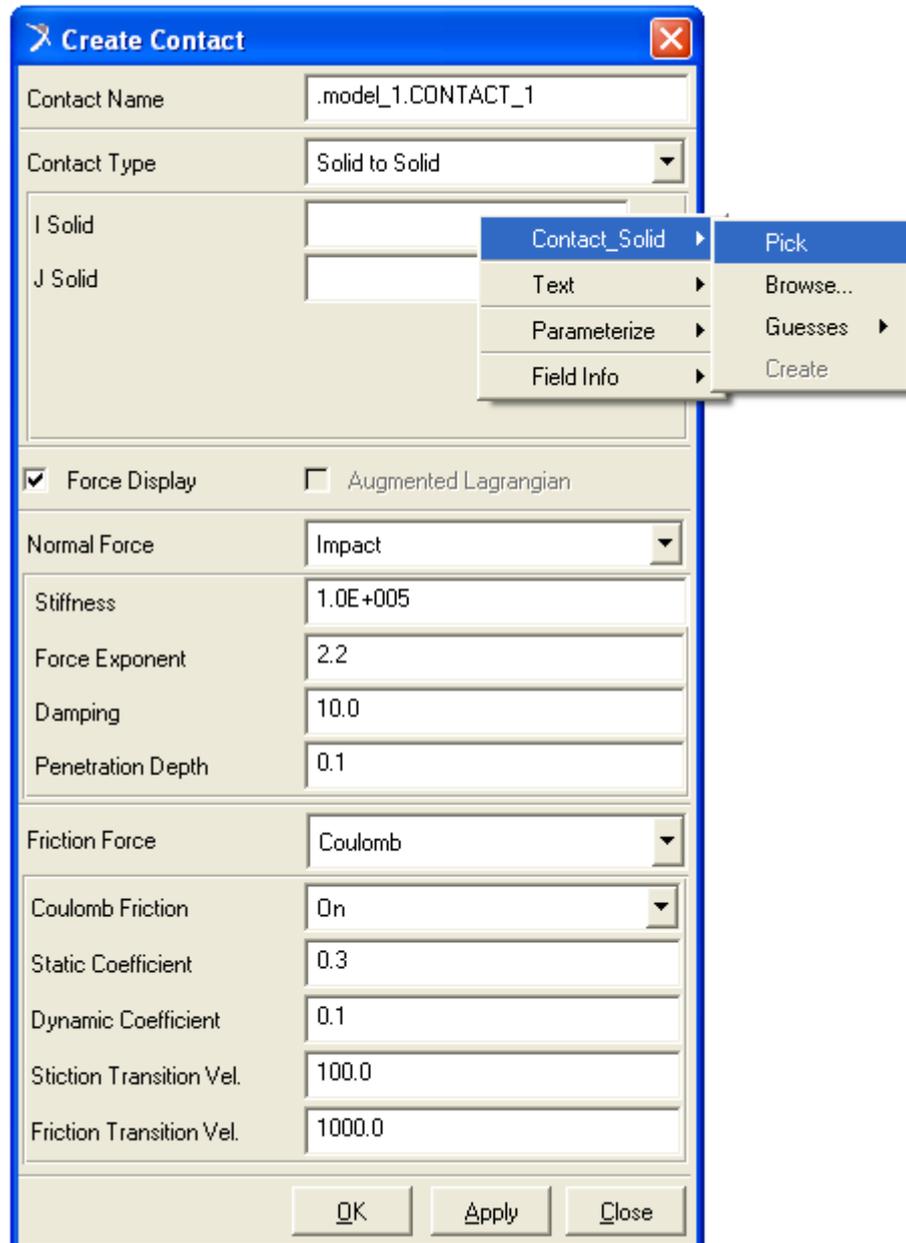


Figura 4.23: Menú de Contactos

Con el botón derecho, siguiendo la imagen de ejemplo, se seleccionará los sólidos en “I solid” y “J solid” que queremos que tengan contacto.

Además se podrá definir el tipo de contacto y si se desea fuerza de rozamiento.

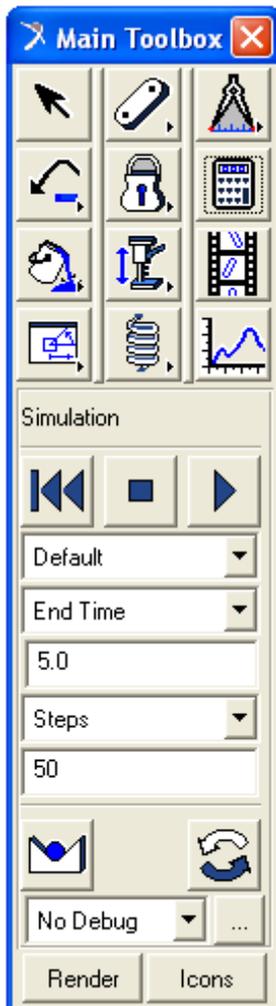


Figura 4.24: Menú de simulación

4.4. SIMULACIÓN DEL MODELO.

Una vez diseñado el modelo se procede a simularlo. Para ello se utiliza el siguiente icono,  transformándose la barra de tareas en la que aparece a continuación:

Antes de simular conviene comprobar el equilibrio estático para ver si se ajusta a lo esperado. El equilibrio se comprueba con 

Para simular se define el tiempo (duración) y los pasos de la simulación. Para una simulación corta y relativamente fiable con unos 100 pasos por segundo basta. Si se quiere refinar se introducirán entre 500 y 1000 pasos por segundo.

Durante la simulación se aprecian los posibles errores de diseño, de forma que el mecanismo se comporte de forma inesperada o que surjan errores en la simulación y ésta se detenga. Si esto sucede hay que estudiar los posibles errores, resolverlos y volver a simular de nuevo.

Los iconos que tenemos en la simulación son los siguientes:



Sirve para iniciar la simulación



Sirve para detener la simulación en un momento dado.



Sirve para reiniciar las condiciones iniciales de la simulación. Es imprescindible pulsarlo para volver a simular.



Repite la última simulación realizada.

4.5. ANIMACIÓN DEL MODELO.

Una vez simulado el modelo se puede

visualizar con

Quedando la barra de tareas de la manera siguiente:

Con los iconos que aparecen se puede reproducir la animación, parar, reproducir en sentido inverso y reiniciar. Además, si se marca la pestaña “loop” la animación se reiniciará automática e indefinidamente cuando ésta acabe. Si se quiere dar más opciones se puede pulsar visualizando entonces el siguiente menú:

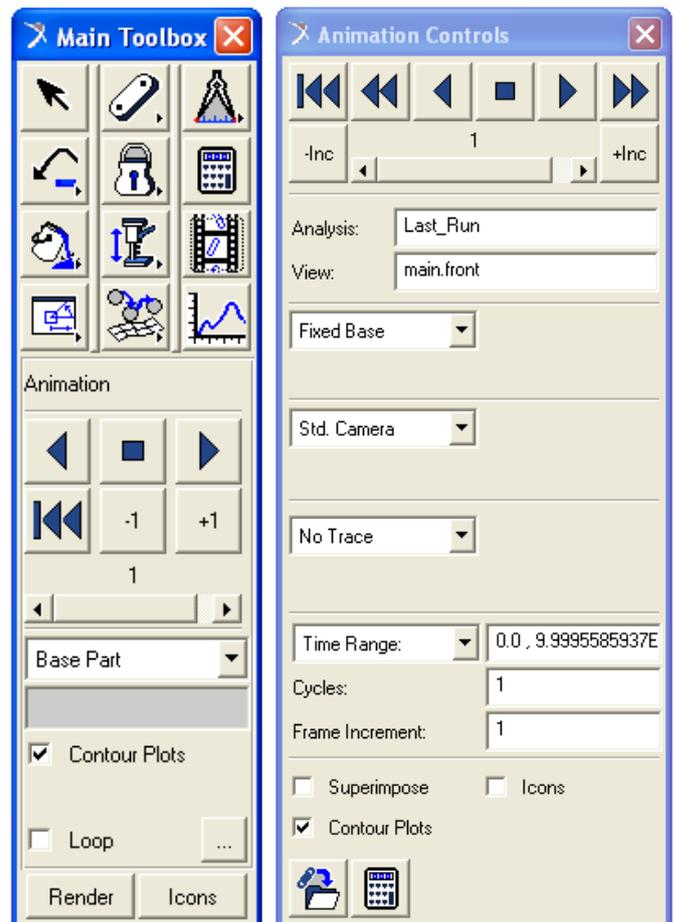


Figura 4.25: Menú de Animación.

Aquí se podrá utilizar una cámara móvil que siga uno de los sólidos o markers, generar una traza que describa el movimiento de un marker, variar el rango del tiempo de reproducción o aumentar la velocidad de reproducción usando “frame increment” con un valor entero mayor que uno.

4.6. TOMA DE MEDIDAS.

Para la toma de medidas es imprescindible haber primero simulado.

De una manera elemental se pueden medir ángulos, desplazamientos, velocidades y aceleraciones lineales entre dos sólidos utilizando los iconos que se muestran a la izquierda, apareciendo en el espacio de trabajo un diagrama como el que se muestra continuación:

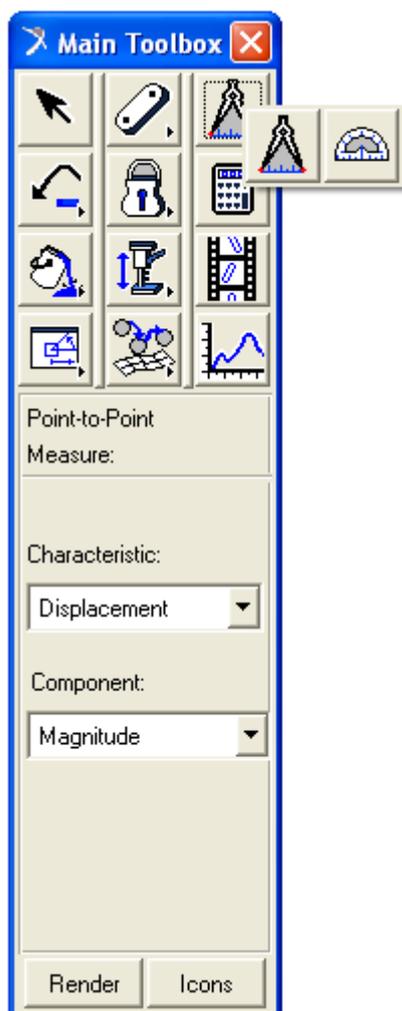


Figura 4.26: Barra de herramientas de medidas.

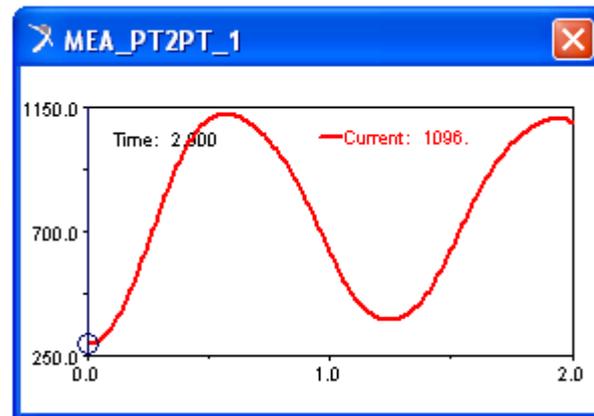


Figura 4.27: Medidas

Otra forma de obtener medidas es utilizar los markers y las juntas para medir directamente sobre ellos. Para ello se seleccionará el marker o la junta, y con el botón derecho se seleccionará "Measure", mediante el cual se podrá obtener, según el sistema de coordenadas (cartesiano, cilíndrico o esférico) multitud de medidas de diferentes parámetros, como desplazamientos, posición respecto a diferentes ejes, velocidades, aceleraciones, fuerzas, pares de giro, etc.

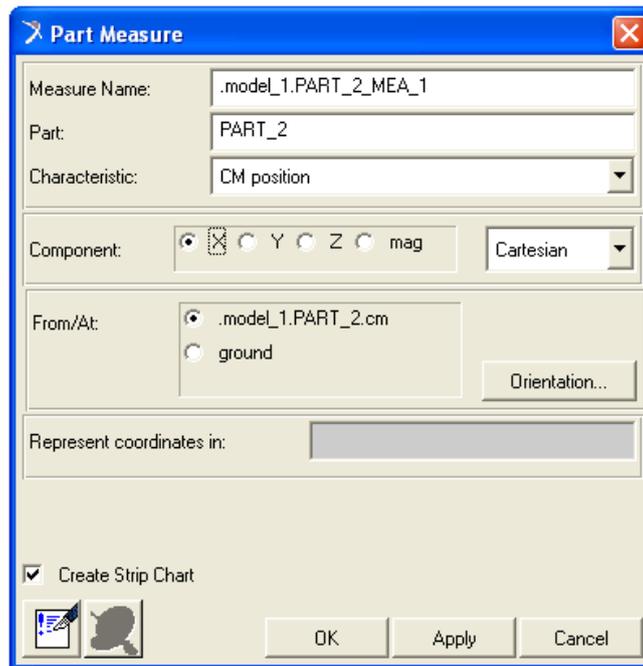


Figura 4.28: Medidas de elementos

4.7. POSTPROCESADOR.

Para finalizar esta guía y antes de los ejemplos prácticos se explicará brevemente el postprocesador de datos y como exportar los mismos.

El postprocesador es una herramienta de ADAMS:MSC llamada “ADAMS Postprocessor” que permite un estudio detallado de los resultados que se han obtenido mediante las simulaciones. Además permite visualizar también animaciones para su posterior exportación.

Se puede acceder a él mediante el acceso directo o directamente desde



ADAMS -
PostProcessor

ADAMS View de una manera más cómoda siguiendo los pasos siguientes:

Cuando se toma una medida de cualquier tipo se pulsará sobre ella con el botón derecho y se seleccionará “Transfer To Full Plot” de la siguiente forma:

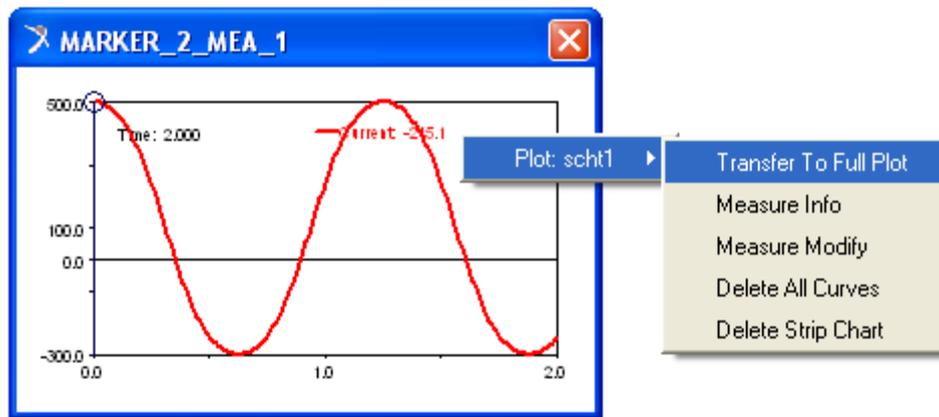


Figura 4.29: Paso de medidas al POSTPROCESADOR.

Una vez hecho se abrirá el postprocesador automáticamente. Todo lo que se guarde de esta forma a partir de ahora quedará guardado en la misma base de datos que estemos utilizando de manera que siempre que esté la base de datos abierta en la que la cual se esté trabajando se podrá acceder directamente al postprocesador pinchando en el siguiente icono  de la

barra de tareas:



y de la misma forma se podrá volver a ADAMS View con:

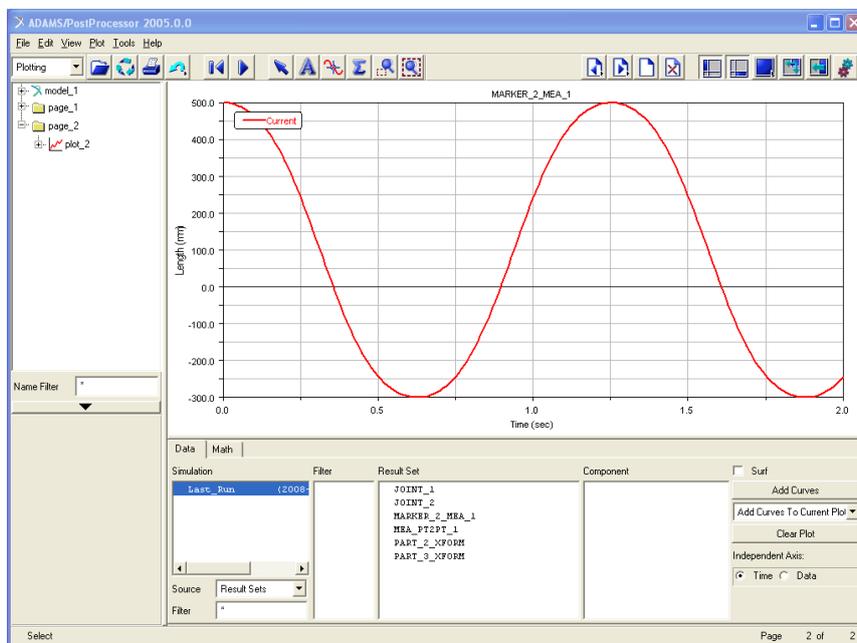


Figura 4.30: Postprocesador.

Para exportar datos se seleccionará en “File” la opción “Export”, “Table”. Entonces aparecerá el siguiente cuadro, donde se definirá el nombre del archivo y la serie de datos que se desea exportar. Para ello, tal y como se muestra, a continuación se pincha directamente sobre el gráfico.

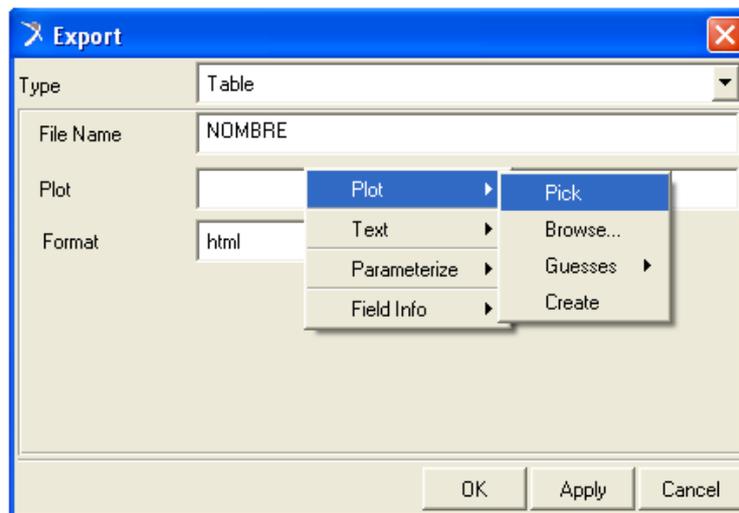


Figura 4.31: Exportación de datos y archivos.

Es importante antes de aceptar, haber elegido una carpeta de destino, que será en principio la que se definió al iniciar el nuevo modelo. Si no se conoce se elegirá en “File”, “Select Directory”.

Para cargar animaciones, se pulsará con el botón derecho en cualquier parte de la gráfica y se seleccionará “Load Animation”, cargándose automáticamente la animación.

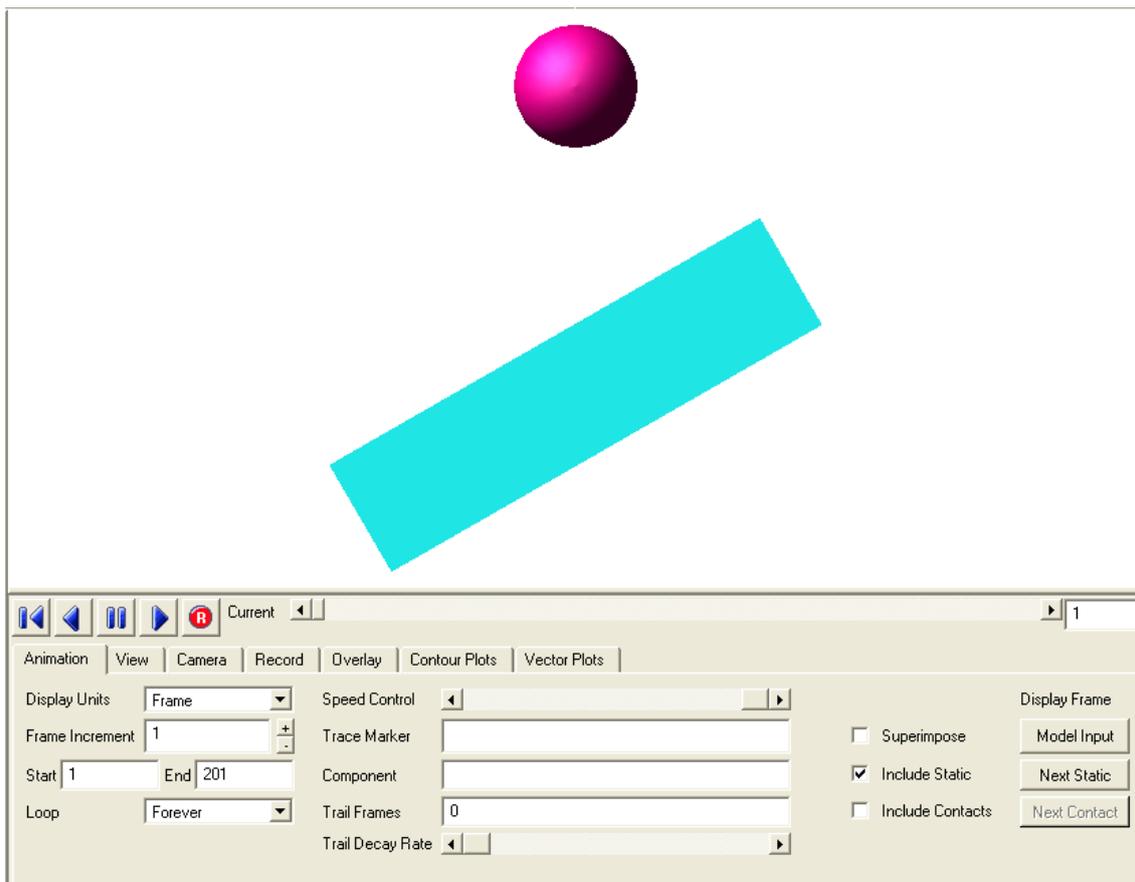


Figura 4.32: Carga y visualización de animaciones en el Postprocesador

Ahora se podrá reproducir, con el cuadro que se muestra, cambiar la cámara, la vista, la calidad y grabar vídeos para su exportación, lo que se hará de la siguiente forma:

Primero, en "File Name" se seleccionará el nombre de la animación y se definirá la calidad de la misma.

Se pulsará el icono de grabar  y posteriormente, el play 

El archivo se grabará en la carpeta seleccionada por defecto en formato AVI.

4.8. EJEMPLO.

En este apartado se llevará a cabo un pequeño tutorial explicativo de la manera de proceder que se ha llevado a cabo con el Pasibot. En el caso que nos ocupa, hemos procedido al diseño del mismo mediante el programa Solid Edge. Posteriormente hemos guardado el modelo en un formato compatible con el MSC Adams. Dicho formato es el “parasolid” ya que si lo importamos como “igs” obtendremos una sola pieza después en Adams. Conociendo por tanto las premisas a la importación de los datos, procederemos a explicar los pasos más importantes llevados a cabo.

4.8.1. Importación.

En la primera ventana que nos aparece cuando abrimos MSC Adams veremos varias opciones. En el caso que nos ocupa pincharemos en “Import a file” para recuperar el diseño que hemos hecho previamente en Solid Edge. Podemos elegir directamente el directorio en el que tenemos guardado el diseño y como consecuencia el directorio sobre el que grabaremos nuestros datos después de la importación.



Figura 4.33: Ventana de inicio

Una vez que elegimos el directorio en el cual queremos guardar los datos, cuando pinchamos en OK aparecerá la siguiente ventana (Figura 4.34) en la cual elegiremos el tipo de archivo que vamos a importar. En este caso será del tipo Parasolid, ya que es el formato que detecta los ensamblajes de Solid Edge como partes diferenciadas.

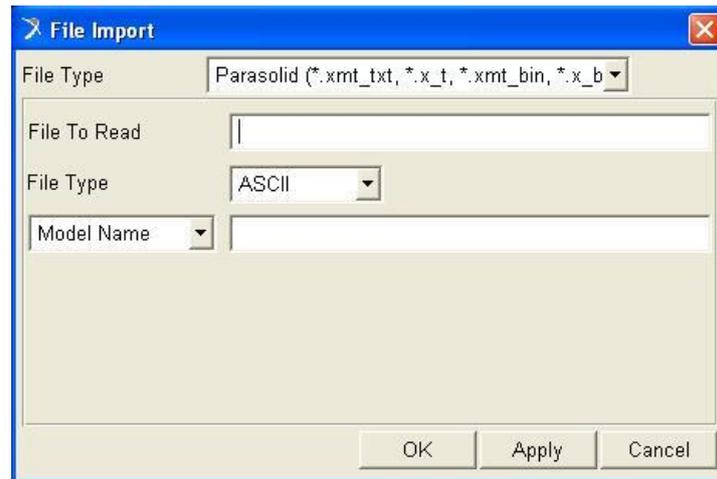


Figura 4.34: Tipo de archivo a importar

Una vez escogido el tipo de archivo a importar procederemos a la búsqueda del archivo de simulación de Solid Edge. Para ello pincharemos con el botón derecho sobre el recuadro en blanco que aparece a la derecha de “File to Read” y haciendo clic posteriormente en Browse abriremos el archivo como cualquier otro programa que funcione bajo entorno Windows.

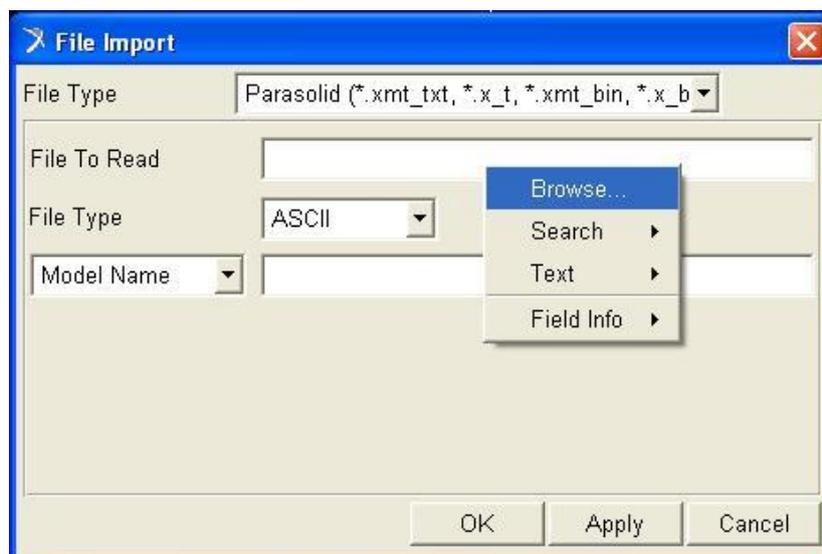


Figura 4.35: Buscar archivo a importar

Posteriormente de la misma manera procederemos a crear el nombre del modelo. Pulsando con el botón derecho del ratón sobre “create” abriremos una ventana nueva donde el programa nos dará la opción de poner el nombre que queramos al modelo.

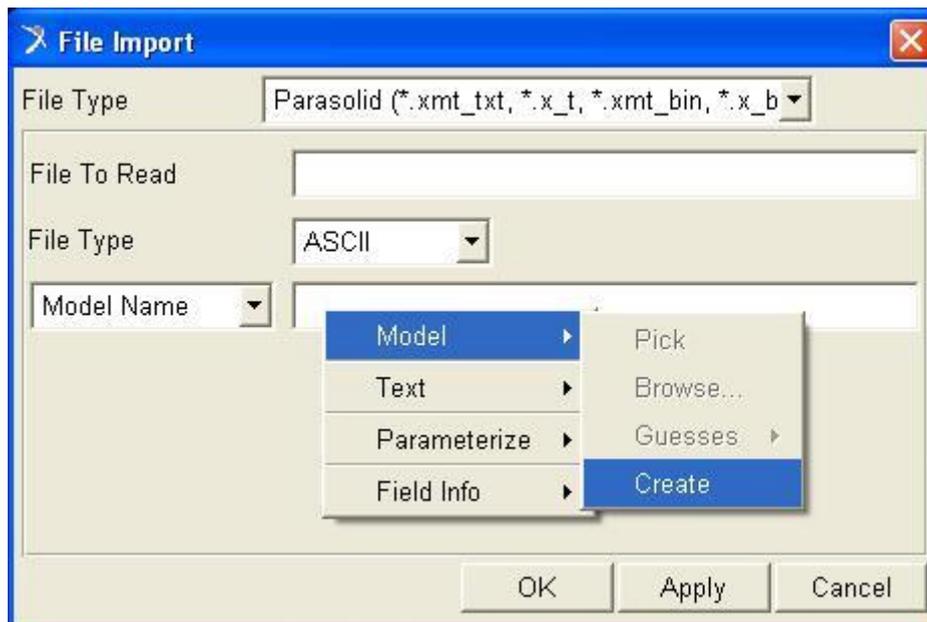


Figura 4.36: Creación del modelo

El límite de palabras es indefinido pero no podremos dar espacios. Tendremos que separar las palabras mediante guiones como podemos apreciar en la Figura 4.37

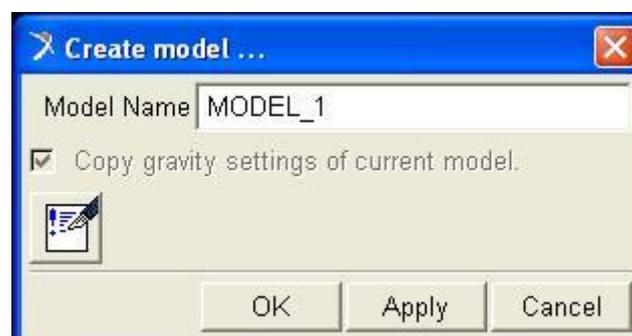


Figura 4.37: Cambio de nombre para el modelo

4.8.2. Posicionado.

Una vez hemos dado el nombre al modelo pinchamos en OK en las dos ventanas anteriores y a posteriori aparecerá el modelo creado en Solid Edge. En este caso nos encontramos con el primer inconveniente. Vemos que los ejes en los que se diseña no son los mismos que para MSC Adams. Por tanto tendremos que posicionar el modelo en la orientación que a nosotros nos venga mejor.

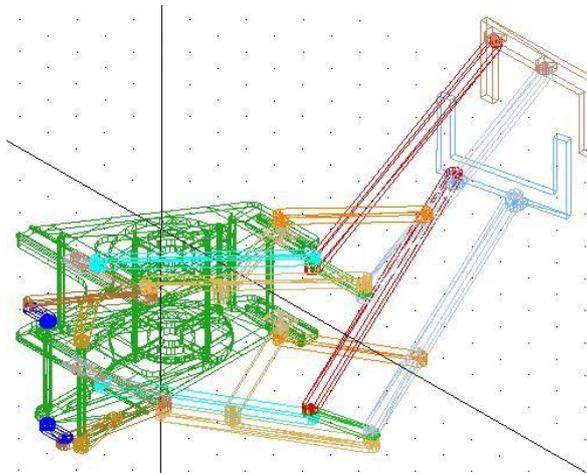


Figura 4.38: Modelo sin renderizar

Para mejorar la visibilidad por parte del usuario de los modelos haremos clic en el icono para renderizar el modelo.

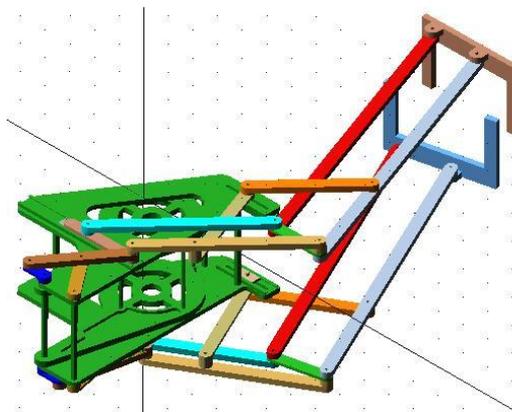


Figura 4.39: Modelo renderizado

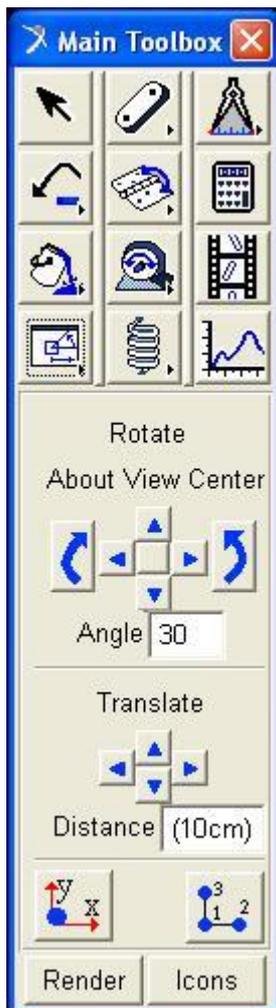


Figura 4.40: Giro del modelo

Como hemos explicado, procederemos a posicionar el robot como nosotros queremos. Primero pondremos una vista frontal del robot para ponerlo de pie. Después seleccionaremos el modelo completo

pulsando en el icono  y arrastrando.

Posteriormente pulsaremos sobre  y aparecerá la barra de herramientas mostrada a la izquierda. En el recuadro de “Angle” pondremos 90 y pulsaremos



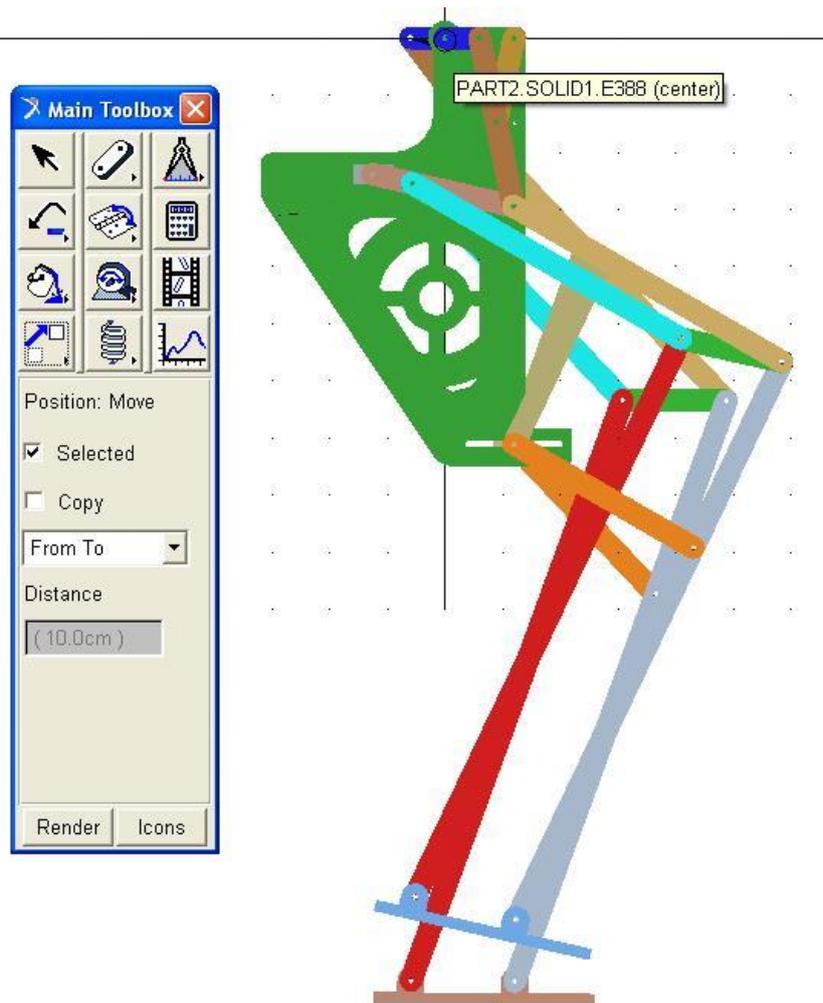


Figura 4.41: Traslación del modelo

Finalmente procederemos a poner el Pasibot con el punto de rotación de la manivela en el origen de coordenadas. Para esto pondremos la vista lateral del robot y lo seleccionaremos igual que antes. En este caso desplegaremos el

menú de desplazamientos y seleccionaremos , pinchando en selected aparecerán en ciertos puntos unos círculos y saldrá un texto explicativo de qué estamos pinchando. Seleccionaremos el centro del agujero deseado y finalmente en el centro de la malla. De este modo ya tendremos posicionado el robot.

Otro método que tenemos para seleccionar el modelo es el mostrado en la Figura 4.42. Pulsaremos en el recuadro de “Object Name” y acabaremos clicando en MODEL_1. A continuación pulsamos sobre “Add” y ya tendremos seleccionado todo.

Éste método de selección es muy útil si quieres mover todo el modelo cuando queremos ver un zoom del robot y moverlo manteniendo ese zoom.

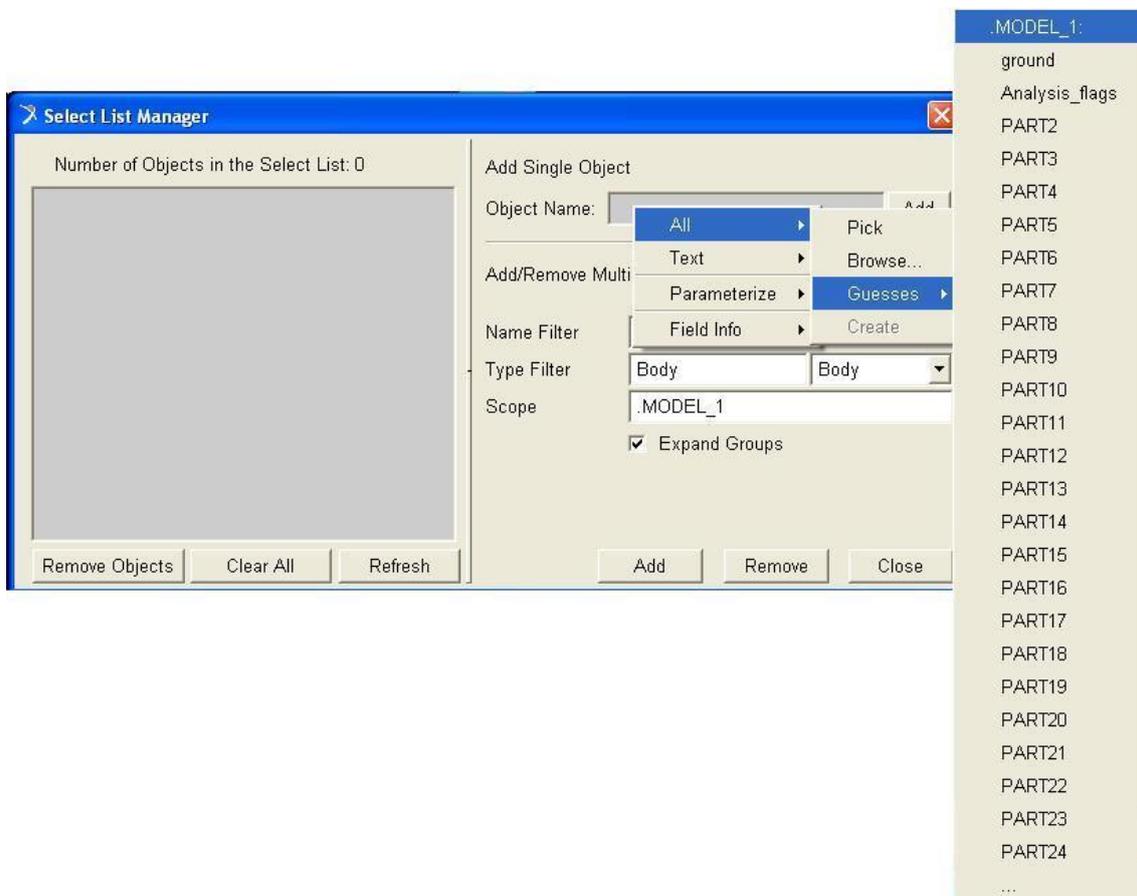


Figura 4.42: Multiselección

4.8.3. Cambio de propiedades.

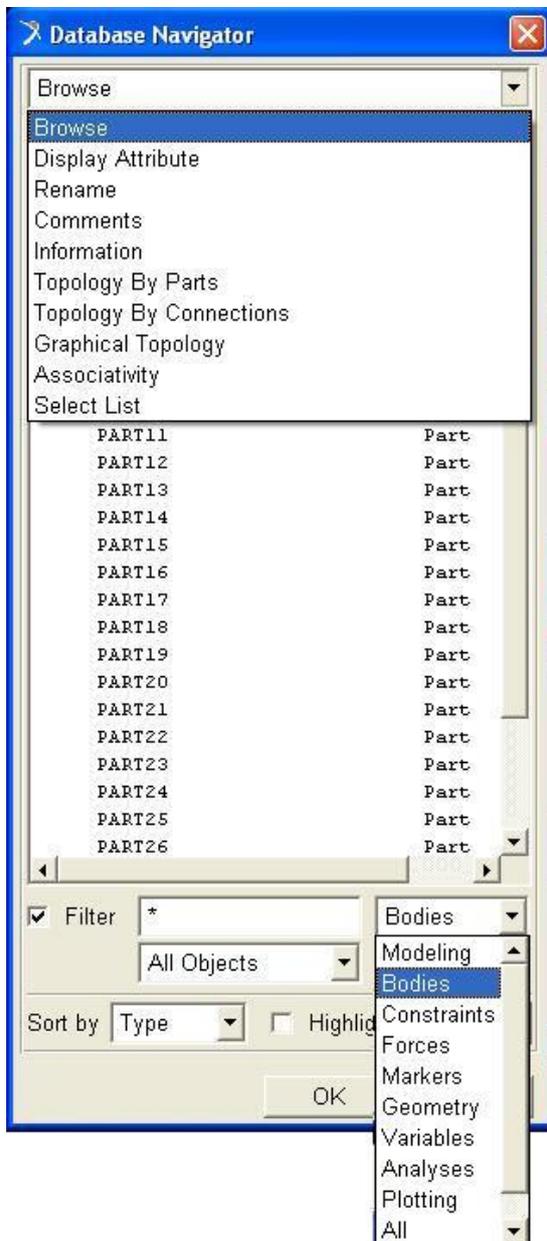


Figura 4.43: Database Navigator

Ahora procederemos al cambio de ciertas propiedades del robot como son el nombre de los elementos y su material ya que el MSC Adams no reconoce estos datos importados desde Solid Edge. La operativa a seguir será la siguiente:

Pinchando en el menú del programa sobre Tools/Database Navigator veremos la ventana mostrada a la izquierda. Vemos una serie de opciones de las cuales escogeremos “Browse” y “Bodies” A partir de ahora, haciendo doble clic sobre cada una de las partes aparecerá la ventana mostrada en la Figura 4.43

Cada vez que hagamos doble clic sobre cada una de las partes aparecerá la ventana de información de la Figura 4.44. En ella pulsaremos sobre Modify de manera que aparecerá la ventana de la Figura 4.45

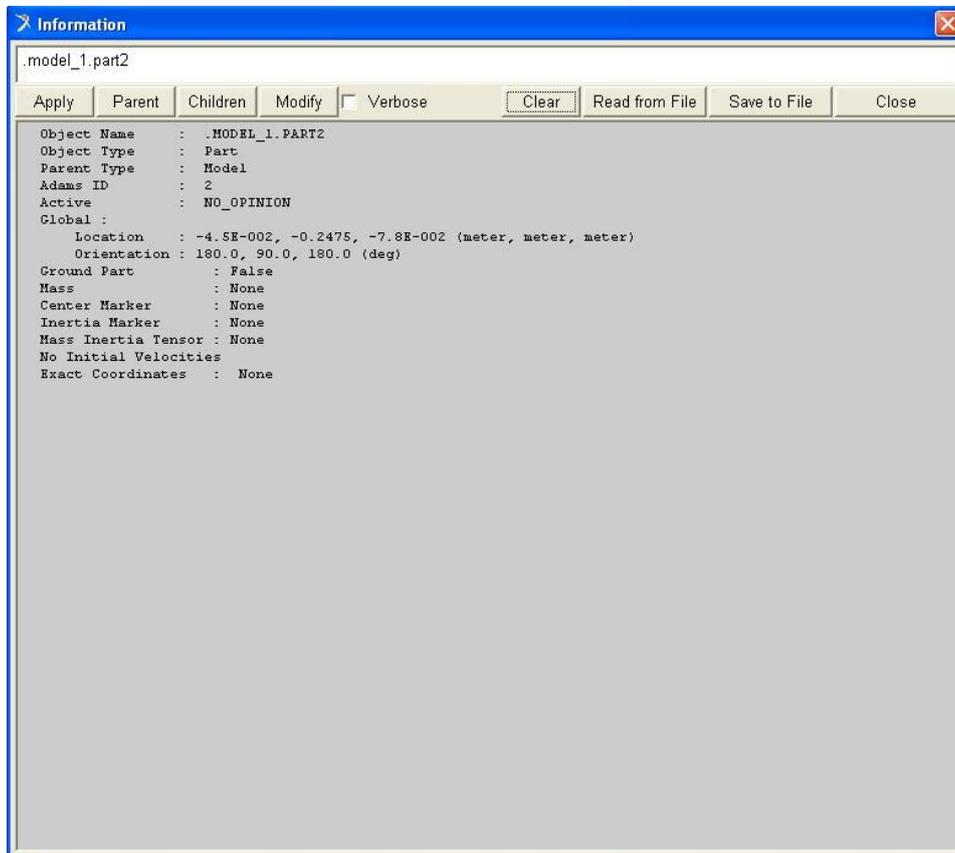


Figura 4.44: Ventana de información

En ella seleccionaremos “Name and Position” y aparecerá la ventana de la Figura 4.46

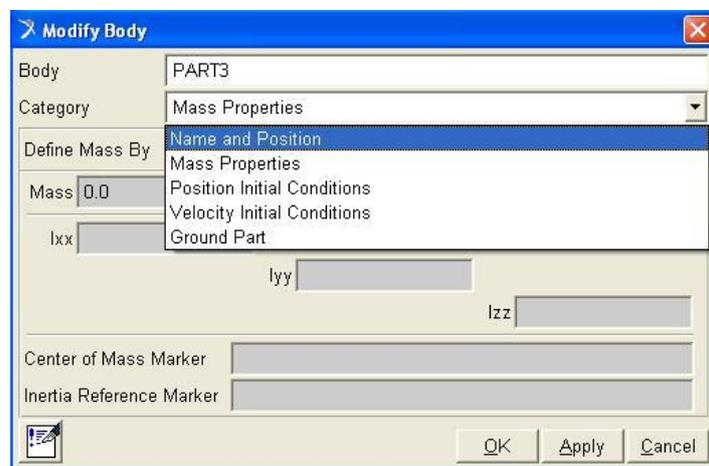


Figura 4.45: Modificación del elemento

En ella pincharemos sobre el cuadro de “New Name” y pondremos el nombre que queramos poniendo guiones en vez de espacios. Pulsaremos en “Apply” y ya tendremos el nombre cambiado.

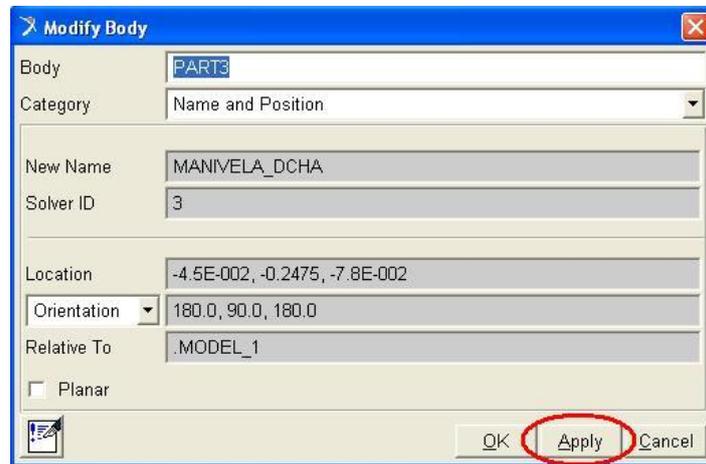


Figura 4.46: Cambio de nombre

Posteriormente pincharemos sobre “Mass Properties” en el cuadro de “Category” y finalmente en “aluminum” para introducir todos los parámetros necesarios directamente mediante el tipo de material.

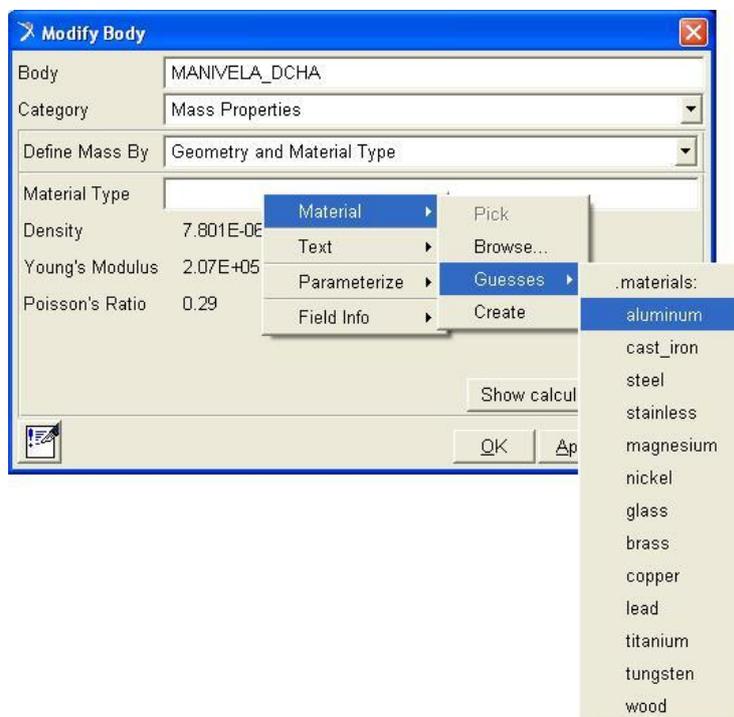


Figura 4.47: Selección de material

Otro método para cambiar rápidamente los nombres sería desde la “Database Navigator” solo que ahora en vez de pinchar en “Browse” pincharemos en “Rename” abriéndose ahora a la derecha un cuadro sobre el que escribiremos los nombres. Así pinchando sobre “Apply” cada vez que pongamos un nombre, realizaremos este paso mucho más rápido.

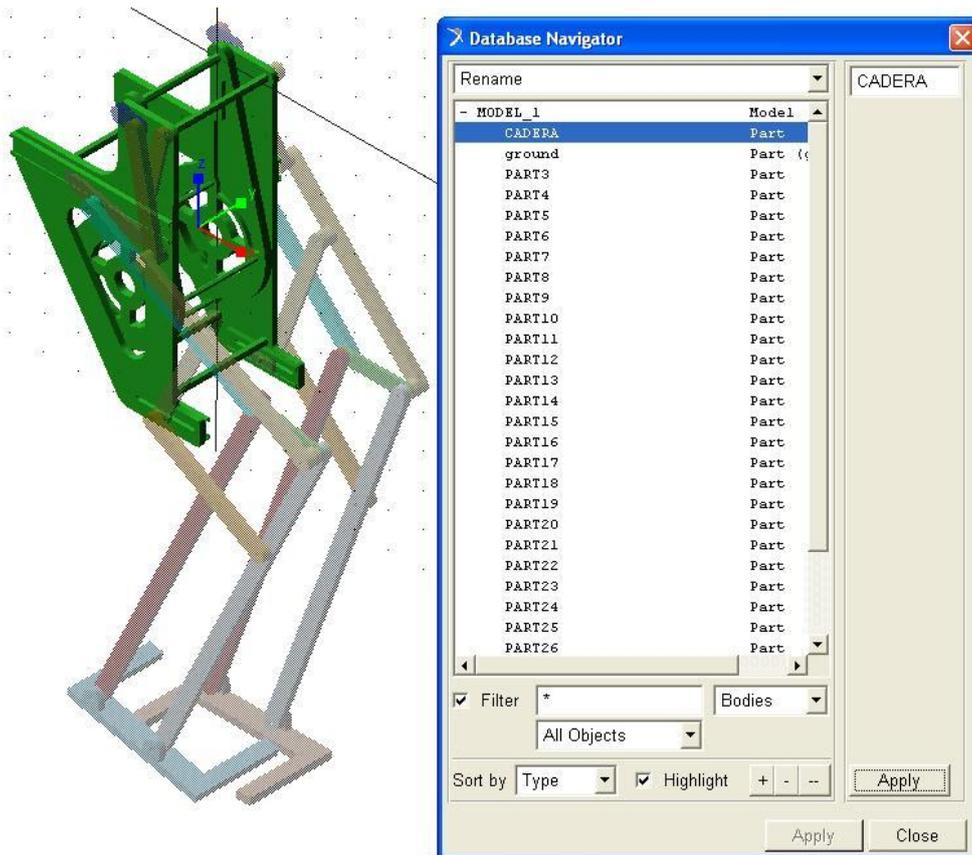


Figura 4.48: Cambio de nombre múltiple

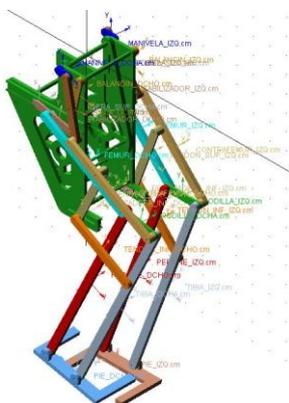


Figura 4.49: Markers CDM

A continuación se muestra una pequeña imagen del cambio producido en la vista del robot después de añadir todas las propiedades. Ahora aparecerán varios markers en la posición del cdm de cada una de las barras posicionándolo en cada momento.

4.8.4. Implementación de juntas.

Ahora procederemos a la implementación de las juntas. A diferencia de en los casos explicados durante el tutorial, en este caso no tenemos markers para aplicar las juntas. Por tanto tenemos que introducir las juntas seleccionando en “First Body” y en “Second Body” Pick Body. De esta manera aparecerán los ejes de los agujeros que unirían cada parte. Si no encontramos la localización exacta podemos pinchar sobre el botón derecho cuando tengamos el ratón cerca del centro que queremos seleccionar y aparecerá una ventana con diferentes opciones de la cual escogeremos la adecuada. Empezaremos con la junta de revolución ya conocida.

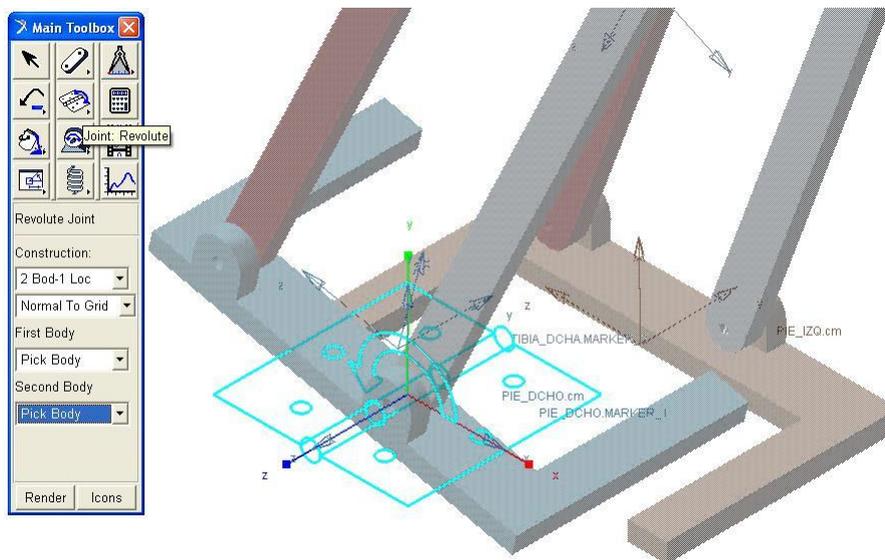


Figura 4.50: Junta de revolución

Para la deslizaderas utilizaremos la junta “Point Curve” seleccionando “Edge” de esta manera podremos elegir una esquina de la deslizadera y posteriormente la línea sobre la que discurrirá su movimiento. Haremos esto al menos en 3 puntos de la deslizadera para asegurarnos que la deslizadera 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.

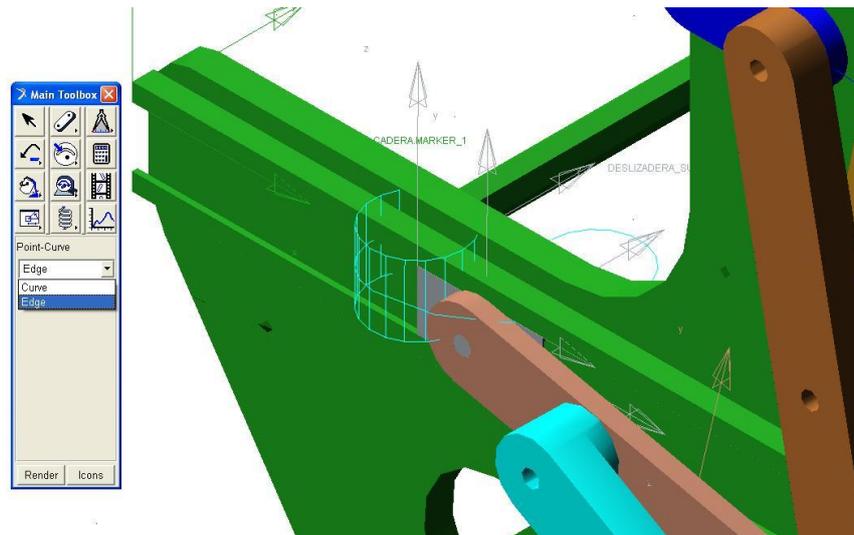


Figura 4.51: Junta "Point Curve"

Para lograr que ambas manivelas se muevan solidarias al eje que las debería unir (en este caso no existe físicamente) aplicaremos una Junta de fijación simplemente seleccionando ambas después de elegir dicha junta de la barra de herramientas de las juntas.

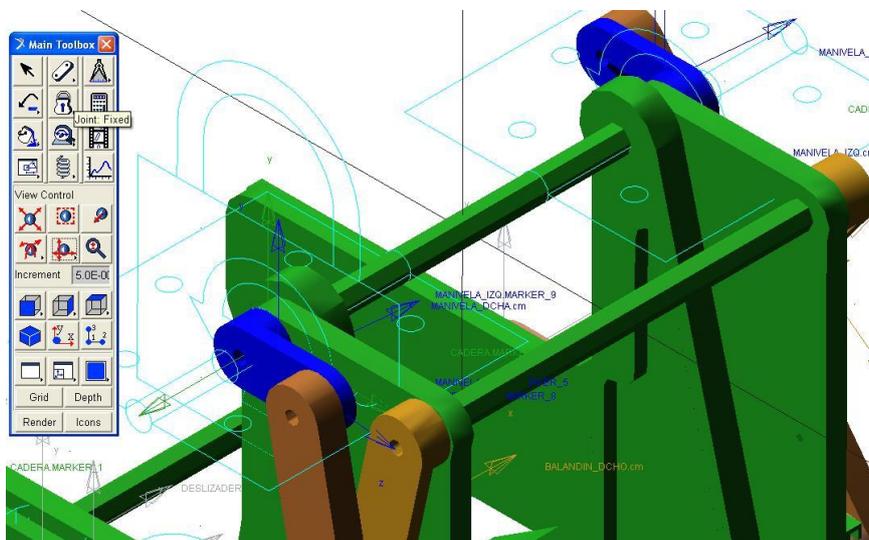


Figura 4.52: Junta de Fijación

Finalmente añadiremos una junta extra a la deslizadera inferior debido a que para la implementación posterior del motor lineal que hará las veces de actuador, nos será necesaria.

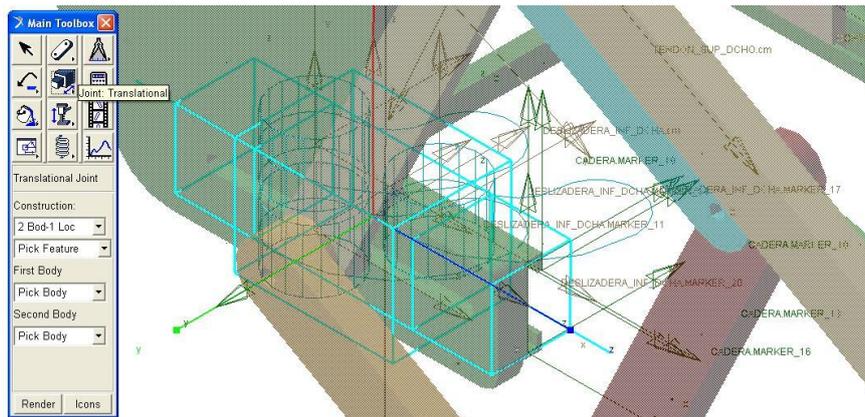


Figura 4.53: Junta de traslación

4.8.5. Implementación de motores.

En este momento aplicaremos los motores necesarios. Primero el motor rotativo.

Necesitamos tener una junta de rotación para aplicarlo, así que lo aplicaremos sobre la misma junta de rotación creada para el movimiento de la manivela derecha respecto a la cadera.



Figura 4.54: Implementación del motor rotativo

Del mismo modo actuaremos para la inclusión del motor lineal que implementaremos sobre la deslizadera inferior. Este es el motivo por el cual hemos tenido que incluir la junta de traslación en este punto. Para aplicar el motor sobre la misma.

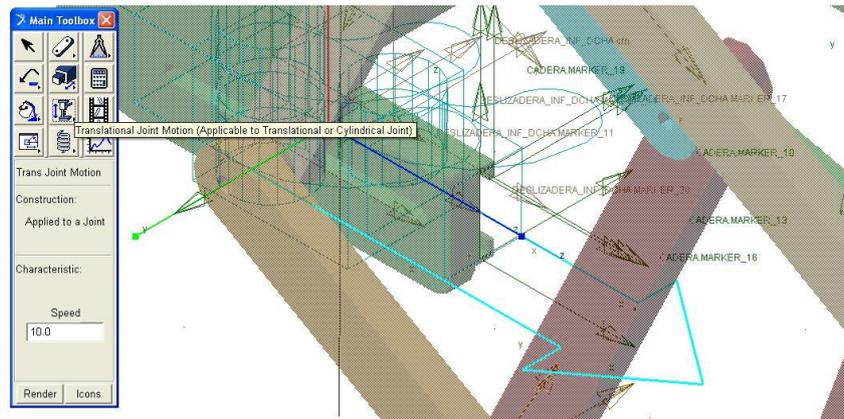


Figura 4.55: Implementación del motor lineal

4.8.6. Implementación del suelo.

Para implementar el suelo, simplemente crearemos un bloque como se ha explicado durante el tutorial. Cogemos la punta del pie en la posición más baja para que después no haya problemas de interferencias. Pulsaremos sobre la punta delantera en este caso y el punto final donde creamos conveniente.

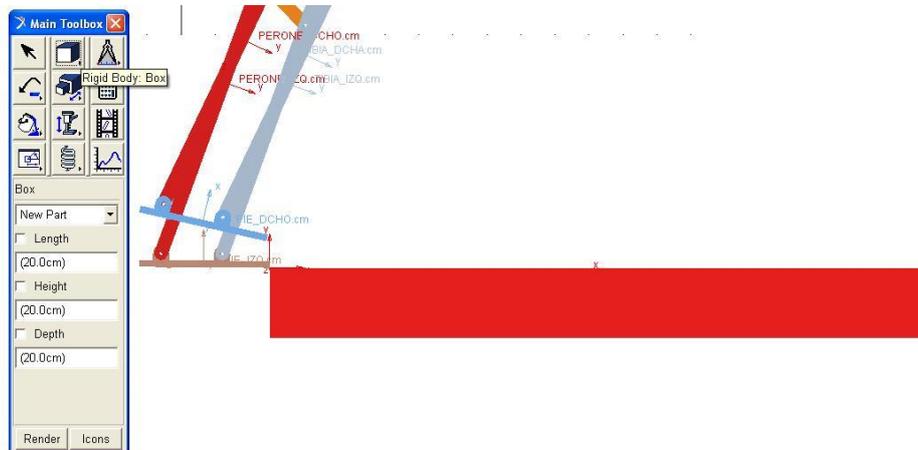


Figura 4.56: Implementación del suelo

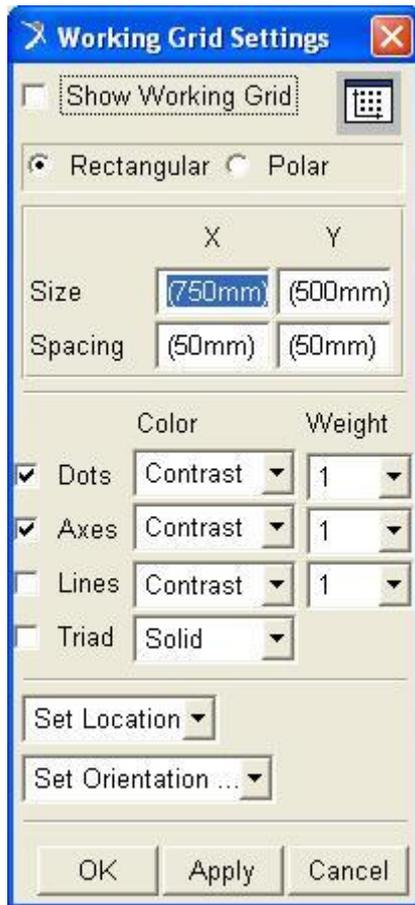


Figura 4.57: Propiedades de la malla

Posteriormente, para poder agrandar el suelo en dirección normal a la malla podremos activarla como se explicó en el tutorial o en el menú “Settings/Working grid...” Ahí desactivaremos la malla y podremos agrandar el suelo lo que queramos y en la dirección que nos convenga simplemente arrastrando desde el punto que aparece cuando seleccionamos el suelo como puntualizamos sobre la Figura 4.58

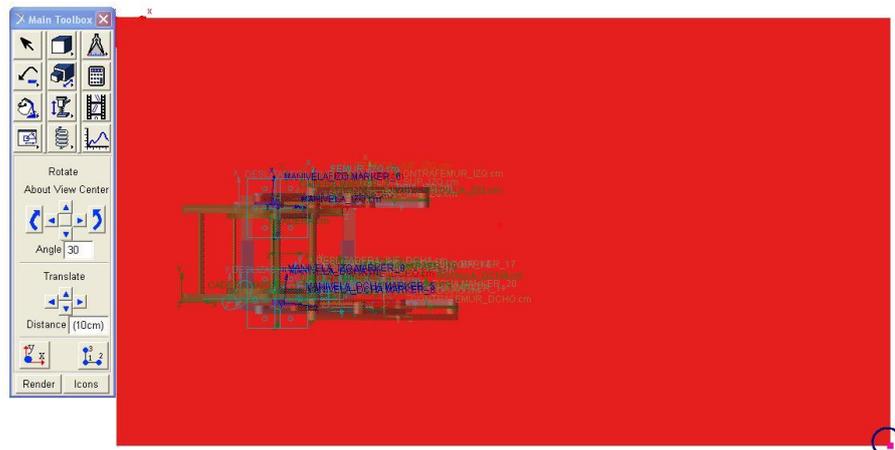


Figura 4.58: Redimensionado del suelo

4.8.7. Implementación de contactos.

Ahora procederemos a la creación de los contactos. En la barra de herramientas pincharemos sobre el icono señalado en la Figura 4.59. Posteriormente aparecerá la ventana “Create Contact” en la que hemos de elegir las partes que intervienen en el contacto. Esto lo haremos pinchando con el botón derecho del ratón y seleccionando “Browse” para escoger el elemento de la Database Navigator. La otra manera de hacer esto es pinchar en “Guesses” o en “Pick”. Si lo hacemos en el primero de los dos, veremos una lista de la cual hemos de escoger el elemento en cuestión. Si seleccionamos Pick lo pincharemos directamente sobre el modelo.

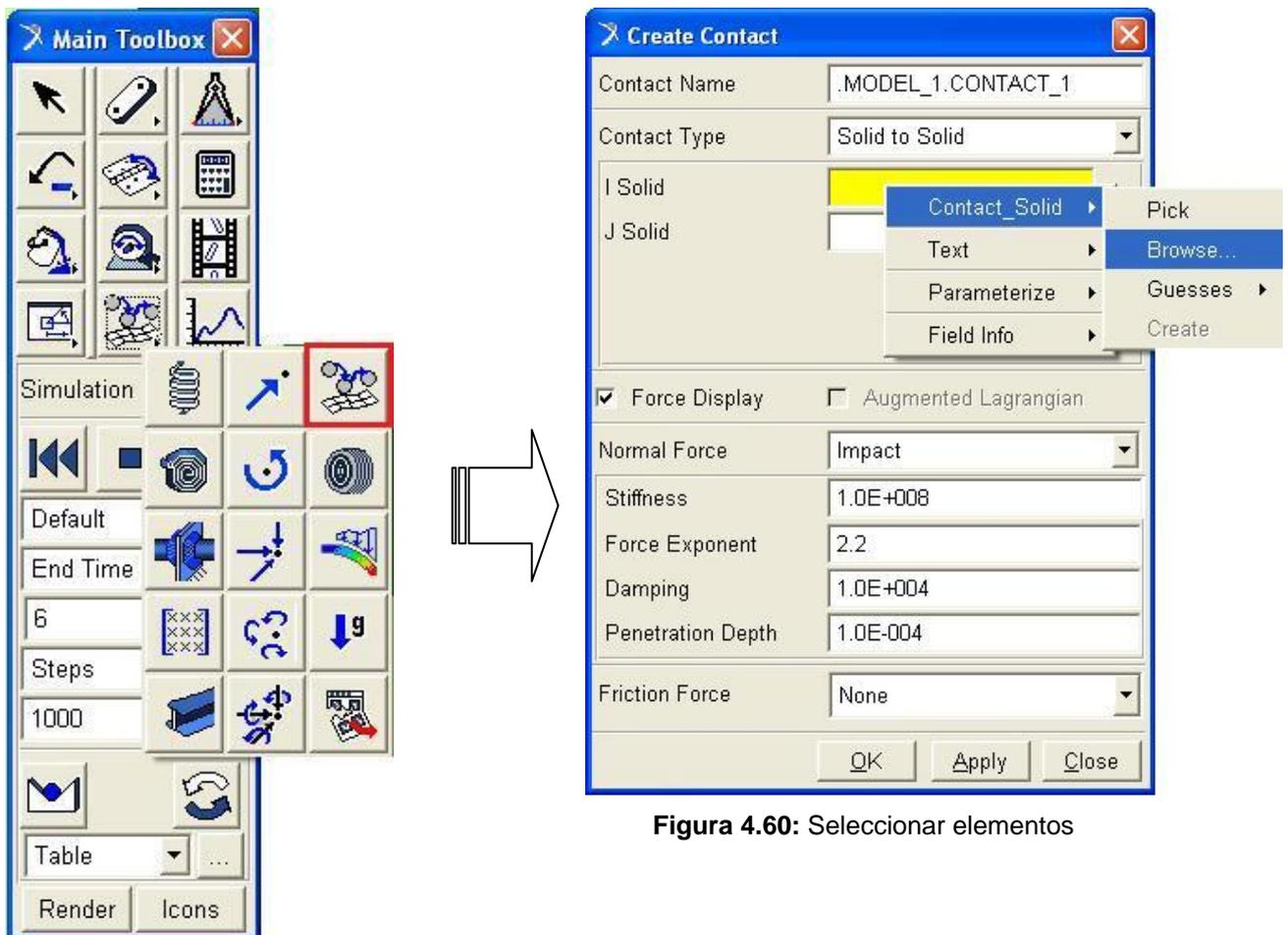


Figura 4.59: Añadir contacto

Figura 4.60: Seleccionar elementos

Por otro lado seleccionaremos “Coulomb” en “Friction Force” para que haya rozamientos entre el suelo y los pies.

Al igual que en casos anteriores, si escogemos “Pick” podríamos tener problemas a la hora de saber qué elemento es el que estamos pinchando. Por lo tanto, si acercamos el ratón a un punto en el que haya varios elementos y hacemos click con el botón derecho, aparecerá una ventana en la cual podremos elegir la parte que nos conviene en cada caso.



Figura 4.61: Selección de partes

4.8.8. Implementación de funciones.

En este apartado se realizará una breve explicación de cómo se pueden generar funciones y se expondrá la función necesaria para la obtención del centro de masas global del sistema.

Seleccionaremos en el menú la siguiente secuencia “Build/Measure/Computed/New” de manera que aparecerá la ventana de la Figura 4.62. En ella podemos ver que en el apartado “Getting Object Data” podemos elegir entre una serie de valores. En nuestro caso utilizaremos 2. El primer valor que elegiremos será “Parts” y haciendo click derecho sobre el recuadro contiguo seleccionar de manera idéntica a cualquier menú de este tipo cada una de las partes que nos interesen. Una vez hecho esto, pincharemos sobre “Get Data Owned” de manera que aparecerá la ventana mostrada en la Figura 4.63.

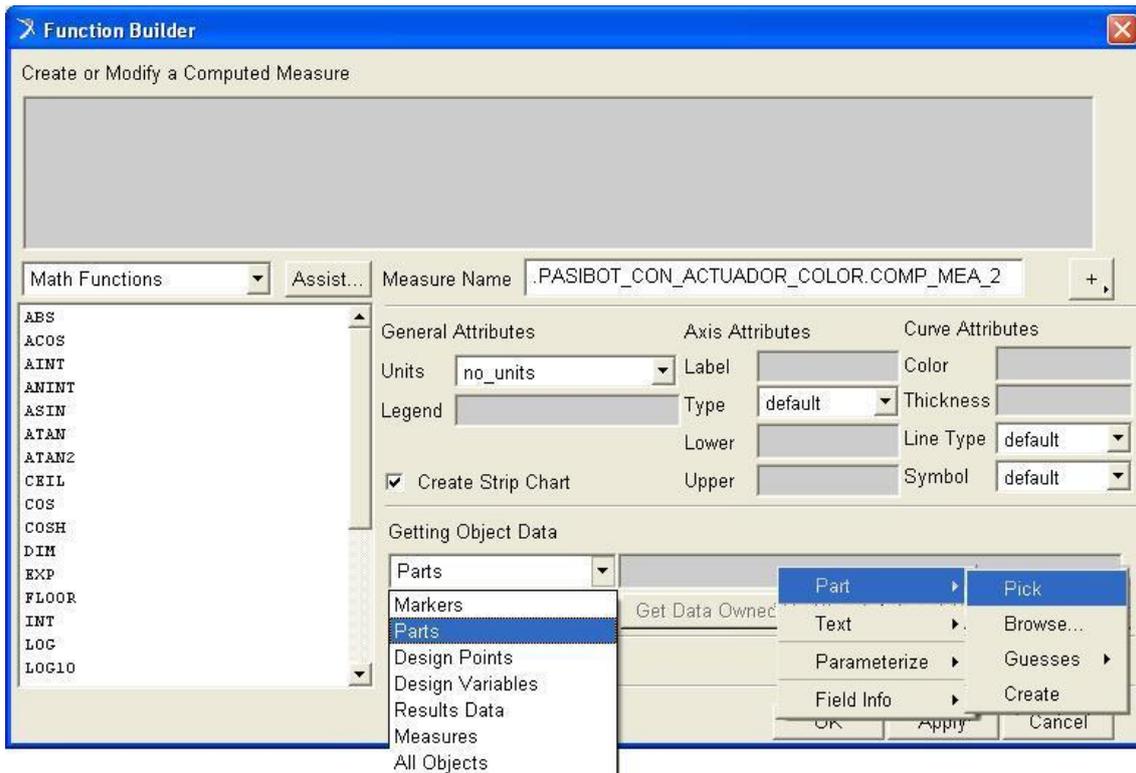


Figura 4.62: Constructor de funciones

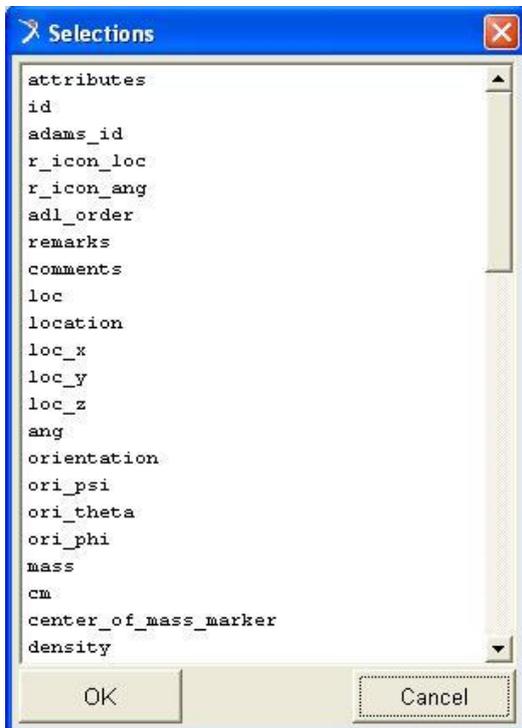


Figura 4.63: Ventana de selección

En esta figura seleccionaremos en nuestro caso “mass” lo cual nos dará la masa del elemento en cuestión. Por otro lado, si seleccionamos “Measures” en vez de “Parts” podremos incluir toda medida que queramos en la ecuación mediante el botón “Insert Object Name”



A continuación se muestra un ejemplo de cálculo del centro de masas del sistema mediante la ecuación general según el eje X del movimiento:

$$\begin{aligned} & (\text{BALANCIN_DCHO.mass} * \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.BALANCIN_DCHO_CDM_X} + \\ & \text{BALANCIN_IZQ.mass} * \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.BALANCIN_IZQ_CDM_X} + \text{BIELA_DCHA.mass} \\ & * \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.BIELA_DCHA_CDM_X} + \text{BIELA_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.BIELA_IZQ_CDM_X} + \text{CADERA.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.CADERA_CDM_X_CADERA} + \text{CONTRAFEMUR_DCHO.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.CONTRAFEMUR_DCHO_CDM_X} + \text{CONTRAFEMUR_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.CONTRAFEMUR_IZQ_CDM_X} + \text{ESTABILIZADOR_DCHO.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.ESTABILIZADOR_DCHO_CDM_X} + \text{ESTABILIZADOR_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.ESTABILIZADOR_IZQ_CDM_X} + \text{FEMUR_DCHO.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.FEMUR_DCHO_CDM_X} + \text{FEMUR_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.FEMUR_IZQ_CDM_X} + \text{MANIVELA_DCHA.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.MANIVELA_DCHA_CDM_X} + \text{MANIVELA_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.MANIVELA_IZQ_CDM_X} + \text{PERONE_DCHO.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.PERONE_DCHO_CDM_X} + \text{PERONE_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.PERONE_IZQ_CDM_X} + \text{PIE_DCHO.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.PIE_DCHO_CDM_X} + \text{PIE_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.PIE_IZQ_CDM_X} + \text{RODILLA_DCHA.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.RODILLA_DCHA_CDM_X} + \text{RODILLA_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.RODILLA_IZQ_CDM_X} + \text{TENDON_INF_DCHO.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.TENDON_INF_DCHO_CDM_X} + \text{TENDON_INF_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.TENDON_INF_IZQ_CDM_X} + \text{TENDON_SUP_DCHO.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.TENDON_SUP_DCHO_CDM_X} + \text{TENDON_SUP_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.TENDON_SUP_IZQ_CDM_X} + \text{TIBIA_DCHA.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.TIBIA_DCHA_CDM_X} + \text{TIBIA_IZQ.mass} * \\ & \text{.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.TIBIA_IZQ_CDM_X}) / (\text{BALANCIN_DCHO.mass} + \\ & \text{BALANCIN_IZQ.mass} + \text{BIELA_DCHA.mass} + \text{BIELA_IZQ.mass} + \text{CADERA.mass} + \\ & \text{CONTRAFEMUR_DCHO.mass} + \text{CONTRAFEMUR_IZQ.mass} + \text{ESTABILIZADOR_DCHO.mass} + \\ & \text{ESTABILIZADOR_IZQ.mass} + \text{FEMUR_DCHO.mass} + \text{FEMUR_IZQ.mass} + \text{MANIVELA_DCHA.mass} + \\ & \text{MANIVELA_IZQ.mass} + \text{PERONE_DCHO.mass} + \text{PERONE_IZQ.mass} + \text{PIE_DCHO.mass} + \\ & \text{PIE_IZQ.mass} + \text{RODILLA_DCHA.mass} + \text{RODILLA_IZQ.mass} + \text{TENDON_INF_DCHO.mass} + \\ & \text{TENDON_INF_IZQ.mass} + \text{TENDON_SUP_DCHO.mass} + \text{TENDON_SUP_IZQ.mass} + \text{TIBIA_DCHA.mass} + \\ & \text{TIBIA_IZQ.mass}) \end{aligned}$$



Capítulo V:

ESTUDIO DE FUNCIONALIDAD EN ADAMS Y DISEÑO DEL NUEVO ACTUADOR



5.1. ESTUDIO DE FUNCIONALIDAD DEL PASIBOT EN ADAMS

Se hizo un estudio del modelo de Pasibot 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. Las más importantes son las siguientes:

La primera de las razones de que acabase perdiendo el equilibrio, era la mala posición del centro de gravedad. En primer lugar a la hora de levantar el pie trasero para efectuar el paso, éste acababa inclinándose hacia atrás quedando solo en contacto con el talón de su pie de apoyo, lo que producía el desequilibrio del mismo y su posterior desviación respecto de la trayectoria a seguir. Este fenómeno se puede apreciar en la imagen adjunta abajo, en la cual vemos como el centro de gravedad del robot está retrasado respecto a la posición del pie que permanecerá apoyado en el suelo mientras el pie posterior inicia el paso. Como se explicó anteriormente este hecho provoca que el robot tienda a desplazarse hacia atrás debido al momento de vuelco que genera la mala posición del centro de gravedad unido a la pérdida de equilibrio del bípedo al no tener los dos pies apoyados en el suelo.

De la misma manera, en la segunda etapa del paso, cuando el bípedo se encontraba apoyado en un solo pie y el opuesto se encontraba en posición adelantada, acababa perdiendo la estabilidad antes de apoyar el pie delantero, haciendo que el pie de apoyo se levantase ligeramente por la zona del talón. Esto suponía que en el momento del contacto con el suelo, el pie adelantado entrase inclinado en lugar de apoyar completamente su superficie. Este fenómeno se aprecia en la segunda imagen, en la que el centro de gravedad ligeramente adelantado provoca que tiende a volcar el Pasibot hacia delante.

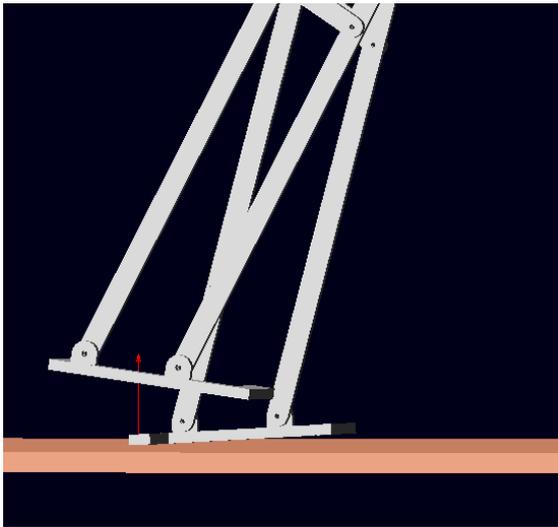


Figura 5.1: Pie pivotando en el talón al inicio del paso

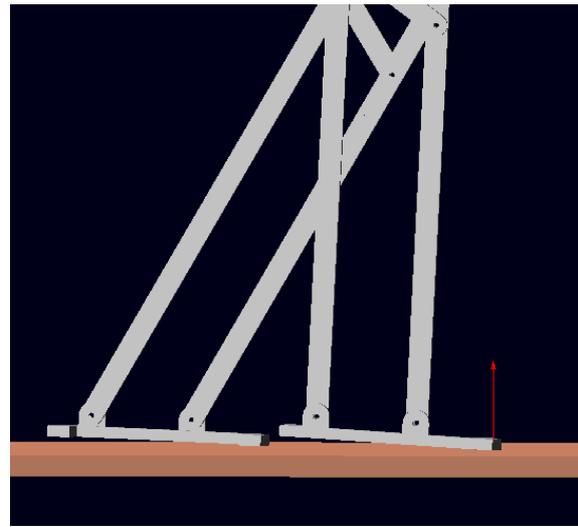


Figura 5.2: Pie pivotando en la punta al inicio del paso

5.2. MODIFICACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL PASIBOT

Una vez detectada una mala posición del centro de gravedad en el modelo original del Pasibot y que este hecho repercutía en la estabilidad del mismo, se ha realizado un estudio para una nueva orientación del centro de gravedad.

Realizando diversas pruebas como ya hemos expuesto en capítulos anteriores, se llegó a la conclusión de que se le podían dar al Pasibot habilidades mediante un actuador en su parte inferior para no comprometer en demasía la estabilidad del robot. Este hecho fue el desencadenante para realizar un estudio de la posición del CDM en la dirección longitudinal, para ver como podríamos utilizar dicha habilidad del estabilizador para el control del equilibrio del Pasibot.

Sabiendo que la actuación en sentido longitudinal del actuador correspondía a un incremento o acortamiento de la zancada. Se propuso en el desarrollo de este proyecto la posibilidad de utilizar esa función para actuar sobre el equilibrio del robot alargando o acortando el paso.

Durante el diseño se hicieron varias versiones de cadera satisfaciendo las premisas la siguiente que a continuación expongo.

Se le dotó de una prolongación en su parte inferior de una deslizadera por la cual podríamos actuar. Ésta tiene una longitud de 80 mm lo cual es la



Figura 5.3: Cadera nueva

máxima posición que puede alcanzar el actuador para que el modo de caminar sea funcional. 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.

5.3. ACTUACIONES SOBRE LA TRAYECTORIA DEL PASIBOT

Como hemos visto, la posibilidad que ofrece el nuevo actuador son múltiples. Las que son objetivo de este proyecto son las habilidades que nos permiten el control de la estabilidad del Pasibot mediante la variación de la posición del CDM en el sentido longitudinal de la marcha, pero además de eso se podría llegar a implementar una secuenciación de movimientos entre actuadores tal que se podrían llegar a implementar trayectorias curvilíneas con dicho mecanismo, ya que teniendo en cuenta los rozamientos de los pies y el pivotamiento sobre los mismos, hemos observado que es posible mediante el acortamiento de uno de los recorridos del paso y el alargamiento del otro hacer variaciones controladas en la dirección del Pasibot.

En la gráfica mostrada a continuación podemos observar las diferentes trayectorias que podemos conseguir en el pie del Pasibot con la actuación sobre uno de los actuadores. Vemos como si situamos el actuador en su posición más retrasada posible (POS 40 mm) la trayectoria que seguiría el pie

sería la más atrasada de todas, la trayectoria marcada en rojo correspondería a la posición neutra del actuador o posición del Pasibot original. Finalmente observamos la posición delantera más extrema (POS -40 mm) en la que el robot adelanta al máximo posible el paso.

Teniendo en cuenta la posibilidad de actuación continua sobre el actuador podríamos afirmar que cualquier combinación de las mostradas en la gráfica sería posible, de tal forma que podríamos cambiarla en función de la estabilidad o inestabilidad del Pasibot durante el movimiento del mismo.

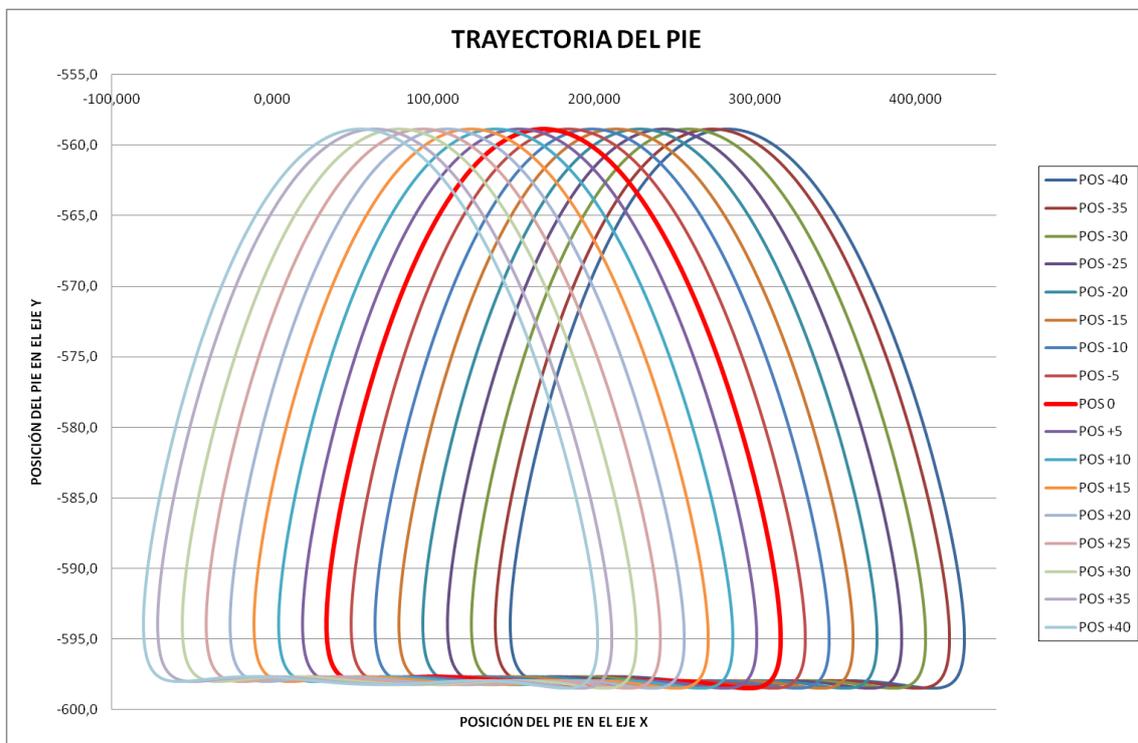


Gráfico 5.1: Trayectoria del pie en función del actuador

Por otro lado, en la siguiente gráfica podemos observar las diferentes posiciones máximas y mínimas que podría adoptar el pie.

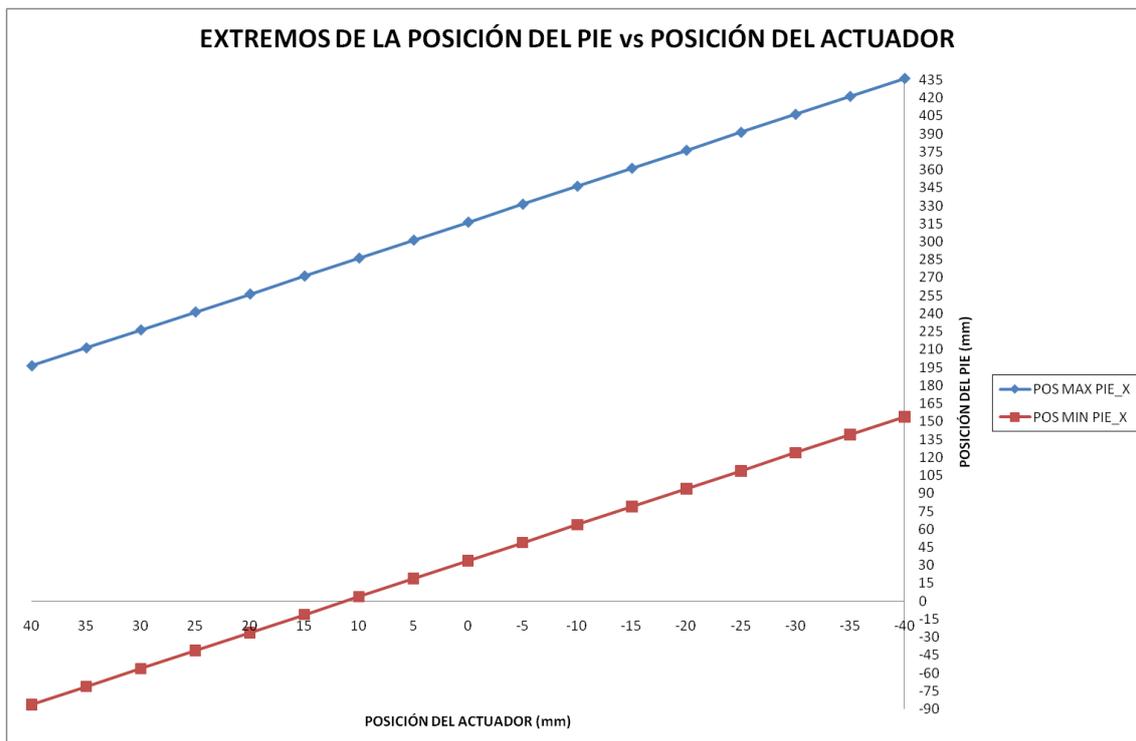


Gráfico 5.2: Extremos del pie VS posición del actuador

En ella podemos apreciar las posiciones estudiadas en este proyecto. En azul tenemos los puntos máximos en función de las posiciones probadas más adelantadas y en rojo tenemos los puntos mínimos en función de las posiciones probadas más atrasadas. Esto es, cualquier variación de uno u otro actuador tendría como posibles combinaciones todos los puntos de las líneas azul y roja.

Como podemos observar, la máxima zancada que podríamos 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 Pasibot.

Esto, combinado con la actuación sobre la otra pierna, da una infinidad de posibles posiciones para controlar la posición del CDM como es el objetivo.

5.4. COMPARACIÓN DE LAS PIEZAS MODIFICADAS.

En las imágenes expuestas a continuación, podemos observar el cambio realizado sobre la cadera del Pasibot para poder dotarle de estas nuevas habilidades.

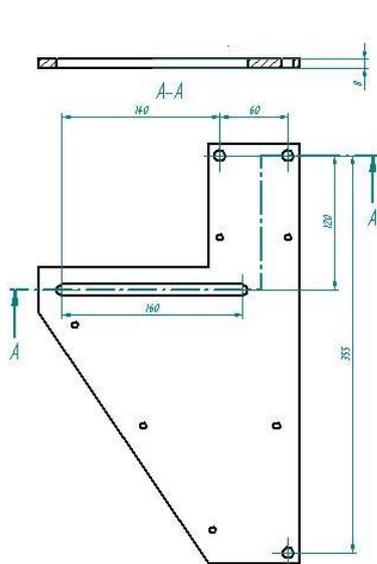


Figura 5.4: Cadera antigua

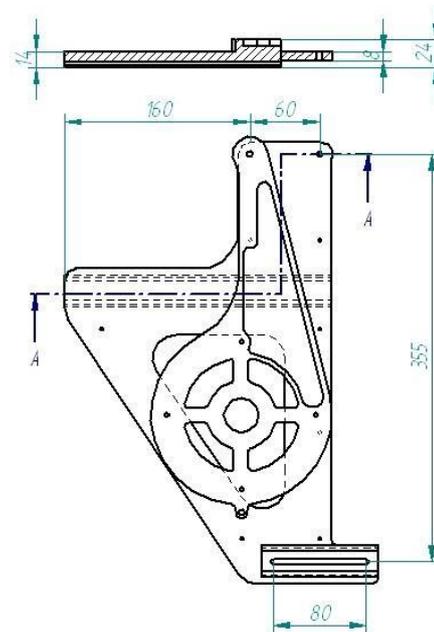


Figura 5.5: Cadera nueva

La deslizadera que observamos en la parte inferior es sobre la que se desplaza el actuador. Su recorrido, como se ha dicho anteriormente es de 80 mm que es el máximo posible por la forma en la que fue concebido el modelo. Además podemos observar que se le dotó de una deslizadera para el estabilizador a modo de deslizadera igual que la inferior y que recorriera el cuerpo completo de la cadera. Esta concepción de diseño hace que sea más fácil la construcción del Pasibot así como sus posibles posteriores modificaciones.

Para hacer el modelo más realista, se implementaron las partes sobre las que irá sujeta la transmisión. Se omitieron las demás partes ya que no eran relevantes para el estudio a realizar y complicaban de manera sustancial la importación del modelo y posterior restricción de acción del mismo en el programa de simulación Adams.

5.5. OTRAS INFLUENCIAS SOBRE LA ESTABILIDAD.

Posteriormente se llevaron a cabo otra serie de estudios relacionados con la estabilidad del Pasibot. Éstos atienden fundamentalmente a la influencia de la velocidad y los pares provocados por el motor que da vida a este robot.



Se hicieron varias simulaciones para hacer este tipo de comprobaciones que describiremos más en detalle en el próximo capítulo. En ellas observaremos como a medida que aumenta la velocidad del motor, aumentan los pares máximos y los mínimos, siendo estos últimos momentos en los que el motor está ofreciendo un exceso de par que el robot debido a su composición de mecanismos no demanda. Esto será el desencadenante de uno de los problemas de estabilidad que tiene el Pasibot.



Capítulo VI:

ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1. ESTUDIO DEL PAR EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD.

Para realizar el estudio del par en función de la velocidad del motor que alimenta al Pasibot, se llevaron a cabo ciertos cálculos teóricos ofreciendo las gráficas que a continuación se muestran.

A partir de dichas gráficas se empezaron a simular con el modelo implementado en Admas, para observar la diferencia entre los datos puramente experimentales y los simulados. Primero con el robot colgado, es decir, de tal forma que nos ofreciera unos datos lo más limpios posibles de inestabilidades y por tanto lo más cercano a los datos teóricos.

Por un lado se hizo un estudio de la variación del par en el motor en función de varias velocidades.

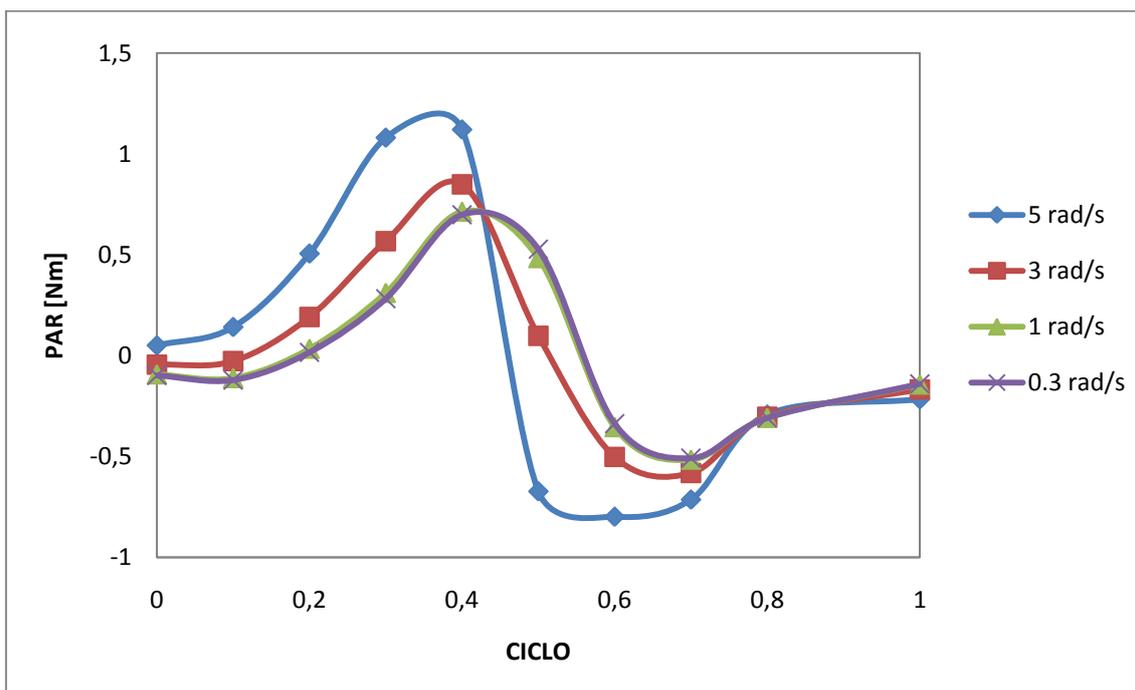


Gráfico 6.1: Par vs ciclo (Teórico)

Por otro lado se hizo el mismo estudio pero dejando el motor girar a 0,3 rad/seg y variando la masa en la cadera.

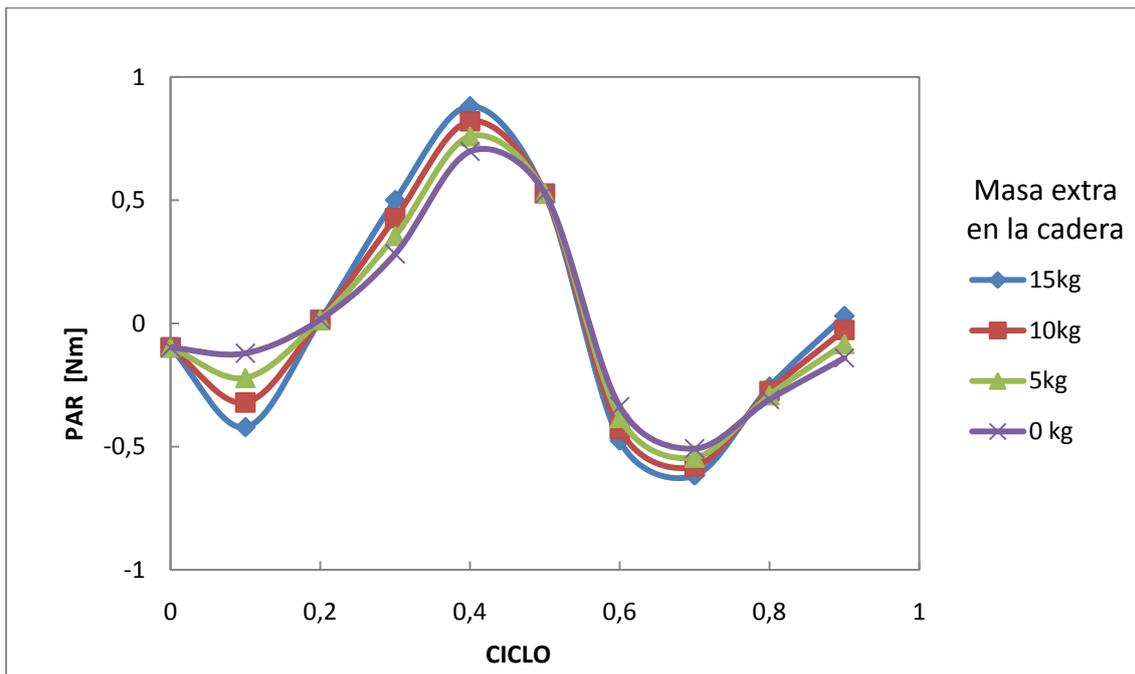


Tabla 6.2: Par en función de la masa

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. No obstante, en este proyecto se hará el cálculo con las sobrecargas en la cadera con el modelo caminando, de forma que observaremos más detenidamente el efecto que tiene dejar el modelo libre.

En este proyecto se realizará una comparación con las gráficas anteriormente descritas aumentando su rango de análisis y yendo un paso más allá en el devenir del proyecto realizando las simulaciones pertinentes para tener en cuenta los diferentes aspectos que no es posible definir con exactitud en un modelo teórico. En la simulación tendremos en cuenta rozamientos entre el Pasibot y el suelo, situación que no se da en el caso teórico.

A continuación expondremos los resultados obtenidos en la simulación y los compararemos a estos teóricos de los que hemos hablado.

Para cada una de las situaciones expondremos 3 de los 13 casos simulados y los comentaremos. La evolución completa de las gráficas será incluida en los anexos.



6.1.1. Modelo colgado.

Tanto para el modelo colgado como para el modelo libre, llevaremos a estudio la progresión de los datos a las velocidades de $\pi/4$, $3\pi/2$ y $13\pi/4$.

Para cada una de las velocidades expondremos 2 gráficas. La primera con un intervalo de tiempo suficiente para cada velocidad de modo que veamos hasta el tercer paso del robot. Esto es debido a que, habiendo hecho un estudio preliminar de la evolución de los datos obtenidos, hemos visto que a partir del tercer paso, los datos se estabilizan pudiendo considerarse ya un estado estacionario del Pasibot y siendo así posible el estudio de los resultados de un modo fiable para una situación estacionaria del robot.

Se muestran en un primer gráfico los 3 primeros pasos para ver la evolución del robot y cómo se van estabilizando las mediciones. No es algo representativo en el caso del modelo colgado porque, como ya hemos dicho anteriormente, es el modelo más libre de ruido e inestabilidades que provoquen un estudio erróneo de los parámetros a medir.

En color azul observamos la posición del pie del robot en el eje Y, que además está representada numéricamente en el eje de ordenadas del lado derecho del gráfico. Estas coordenadas del pie están referidas a un sistema de coordenadas centrado en la manivela del robot. Siendo por tanto el valor siempre negativo e ilustrando en qué posición, respecto del eje sobre el que estamos actuando mediante el motor, se encuentra el pie del robot en relación al par originado en dicho punto de la manivela.

Por otro lado, en color rojo, podemos observar la variación del par en el punto en el que actuamos con el motor sobre la manivela. Observamos cómo se producen las demandas y los excesos de par en dicho punto. Justamente antes de que el pie del Pasibot se encuentre en su punto más alto, observamos que llegamos al pico de demanda de par por parte del robot. Esto nos 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 observamos una caída en la demanda de par muy



acusada llegando incluso a valores negativos antes de llegar el pie al suelo, con lo cual podemos 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 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 y como podemos observar, en este Pasibot se mantiene esa característica. La de poder dejar de alimentar el modelo y que por sí mismo pudiera seguir caminando por la inercia del mismo. Vemos además un hecho característico en todas las mediciones, aunque se hace menos evidente cuando imponemos mayor velocidad en el motor. Y es que durante el movimiento en el que 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. Veremos este hecho paso a paso en las gráficas que mostraremos a continuación.

También podemos observar que el pico de demanda de par es mucho mayor que el de exceso de energía aunque también en este caso estos valores máximos y mínimos se hacen cada vez más semejantes a medida que aumentamos la velocidad del motor. El valor numérico lo veremos al final de este punto.

-Velocidad de $\pi/4$ (Rad/seg) frente al tiempo para 3 pasos.

En primer lugar mostraremos las gráficas para la velocidad mínima a la que se han realizado las simulaciones. Vemos, como hemos dicho antes, una anticipación del máximo del par frente a la posición según el eje Y del pie. Posteriormente vemos la caída de par hasta que se hace negativo, manteniéndose en negativo hasta la demanda de par que se produce otra vez en el momento de la elevación de la pierna. Observaremos estos momentos mejor en el modelo libre, ya que veremos un impacto en el momento de

contacto con el suelo que nos hace más ilustrativa la situación del pie en cada momento del paso.

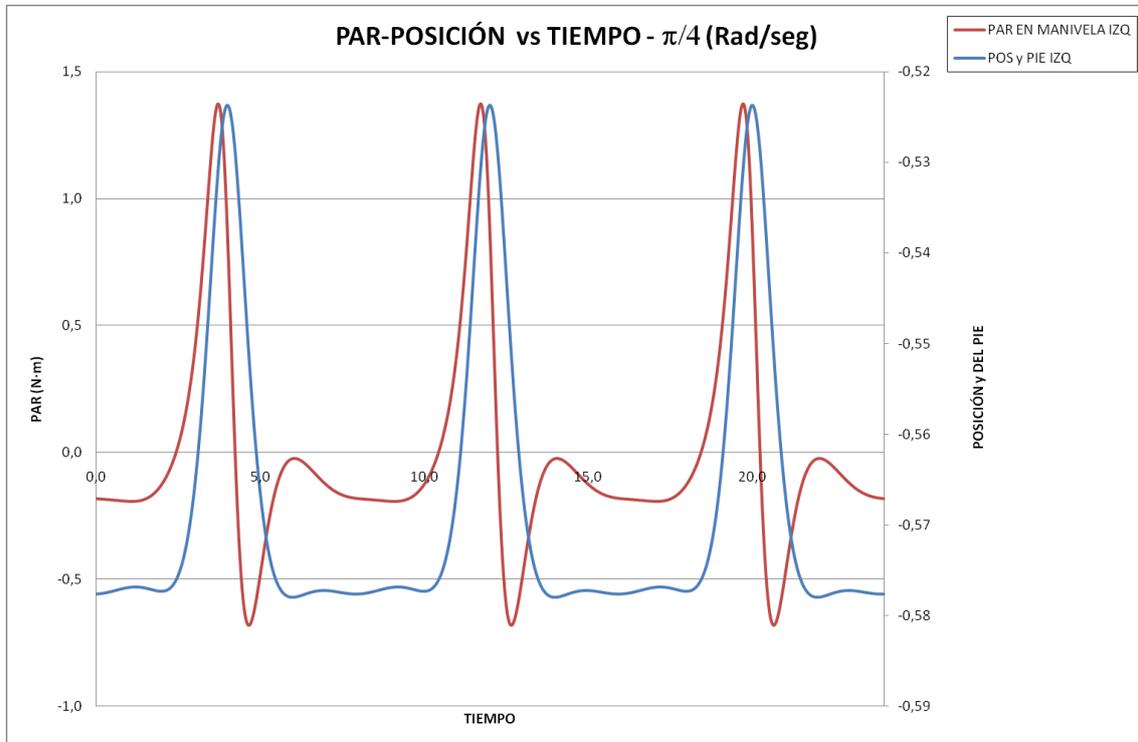


Gráfico 6.3: Par-Posición vs Tiempo ($\pi/4$)

-Velocidad de $\pi/4$ (Rad/seg) frente al periodo

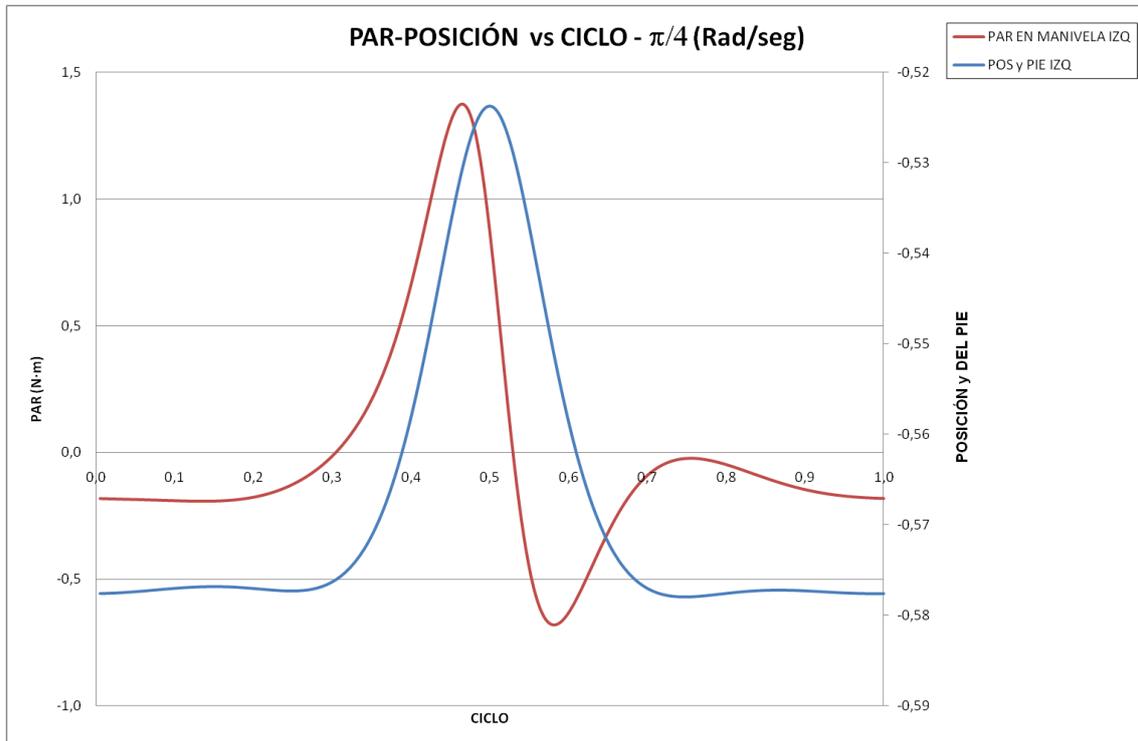


Gráfico 6.4: Par-Posición vs Ciclo ($\pi/4$)

-Velocidad de $3\pi/2$ (Rad/seg) frente al tiempo para 3 pasos.

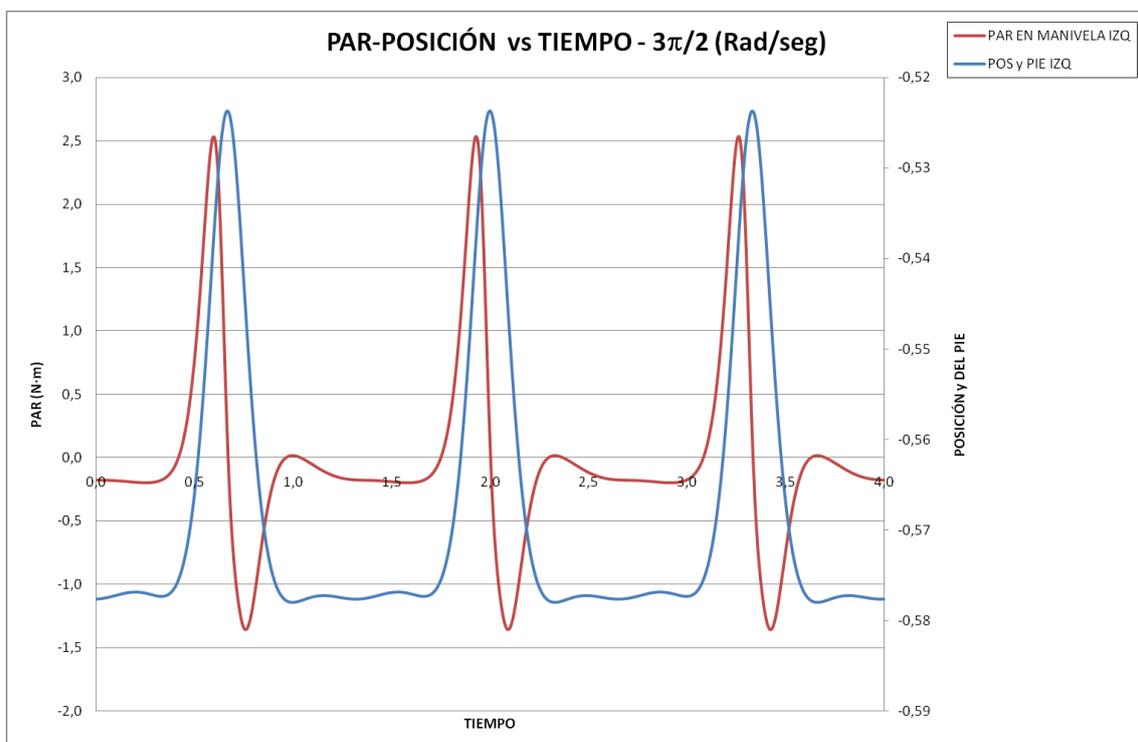


Gráfico 6.5: Par-Posición vs Tiempo ($3\pi/2$)

-Velocidad de $3\pi/2$ (Rad/seg) frente al periodo

Para este caso, podemos observar 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.

No obstante, se aprecia un punto en el que al ser tan brusca la frenada que produce la pierna sobre el motor, el Pasibot llega a un punto en el que está cerca de demandar energía al motor en el momento de iniciar el recorrido del pie hacia atrás. Esto es debido a que al ser ésta una simulación a mayor velocidad que la comentada anteriormente, 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.

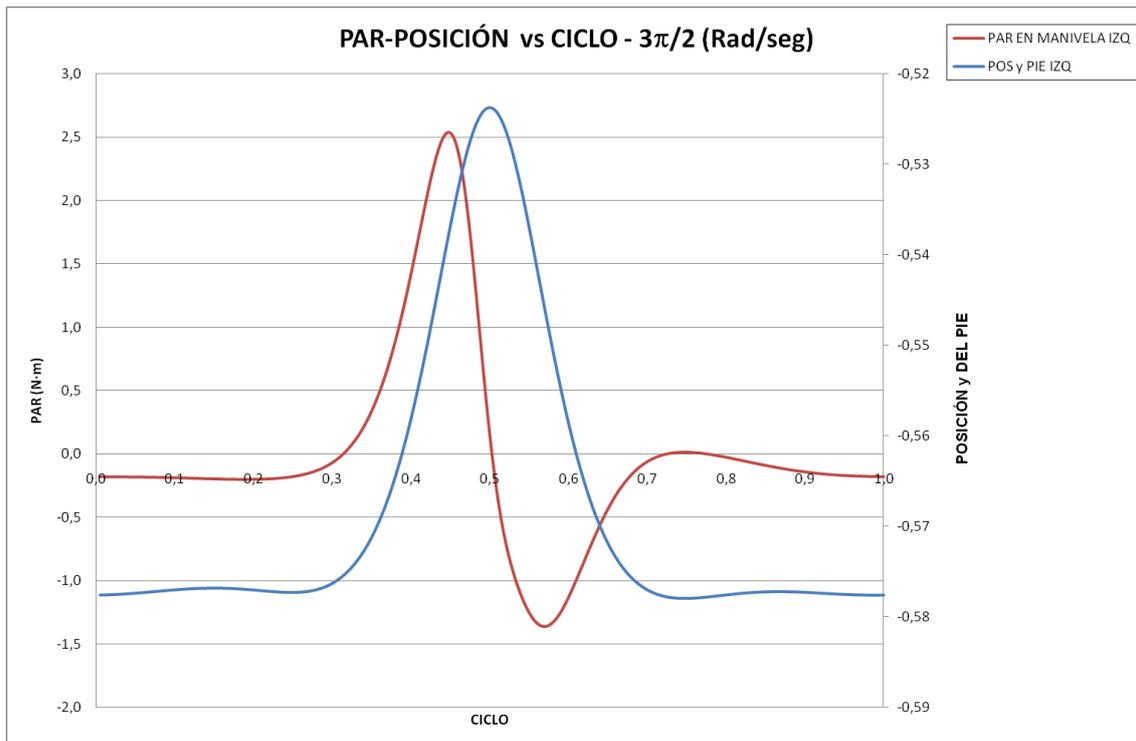


Gráfico 6.6: Par-Posición vs Tiempo $3(\pi/2)$

-Velocidad de $13\pi/4$ (Rad/seg) frente al tiempo para 3 pasos.

Para esta última velocidad simulada, vemos que al igual que en los demás casos, se adelanta la demanda máxima de par a la posición más alta del pie.

La diferencia en este caso es que vemos que ya es demasiado alta la velocidad como para que la recuperación sea lo suficientemente suave como

para no demandar energía al motor. Vemos por tanto un punto, en el momento de apoyo del pie, que sobrepasa los valores negativos indicándonos que el motor necesita aplicarle un par positivo a la pierna para que el robot pueda seguir su camino. De no ser así, el robot no podría seguir andando por medio de su propia inercia como ocurría en los otros casos.

En resumen, hemos observado que a la velocidad de $3\pi/2$ se produce el punto máximo en el cual el Pasibot puede realizar el recorrido de apoyo del pie sin necesidad de energía por parte del motor y en consecuencia caminando mediante su propia inercia, que es lo que se pretende con este tipo de diseños.

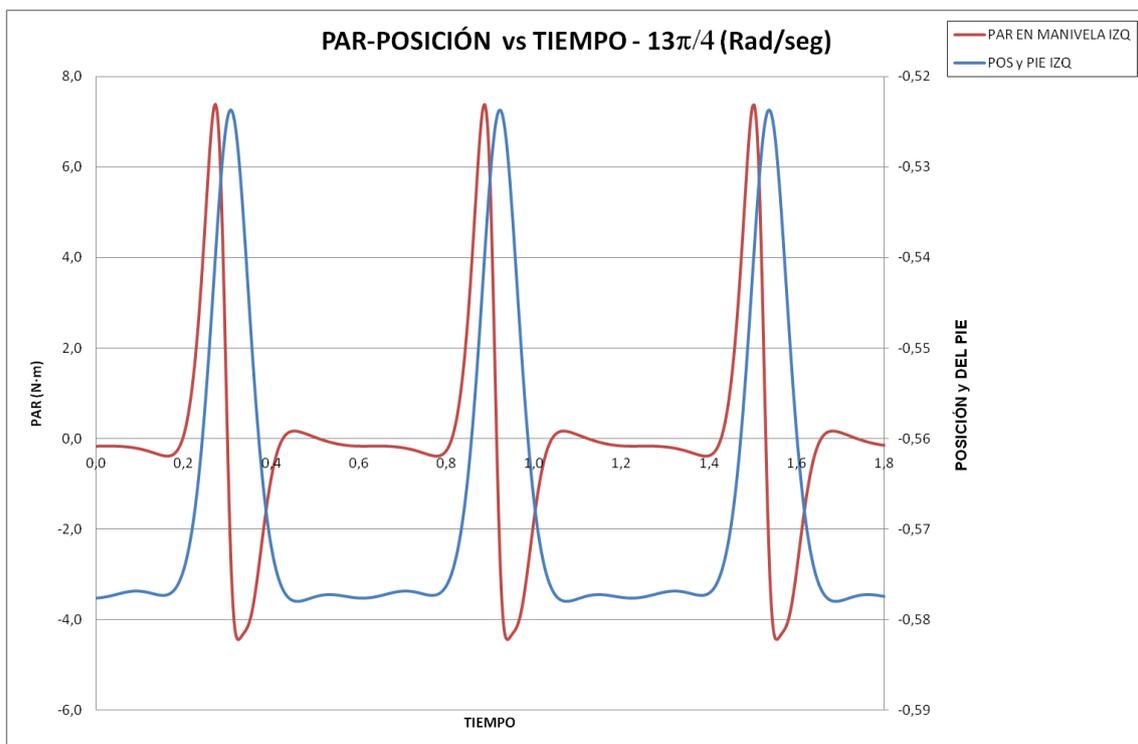


Gráfico 6.7: Par-Posición vs Tiempo ($13\pi/4$)

-Velocidad de $13\pi/4$ (Rad/seg) frente al periodo

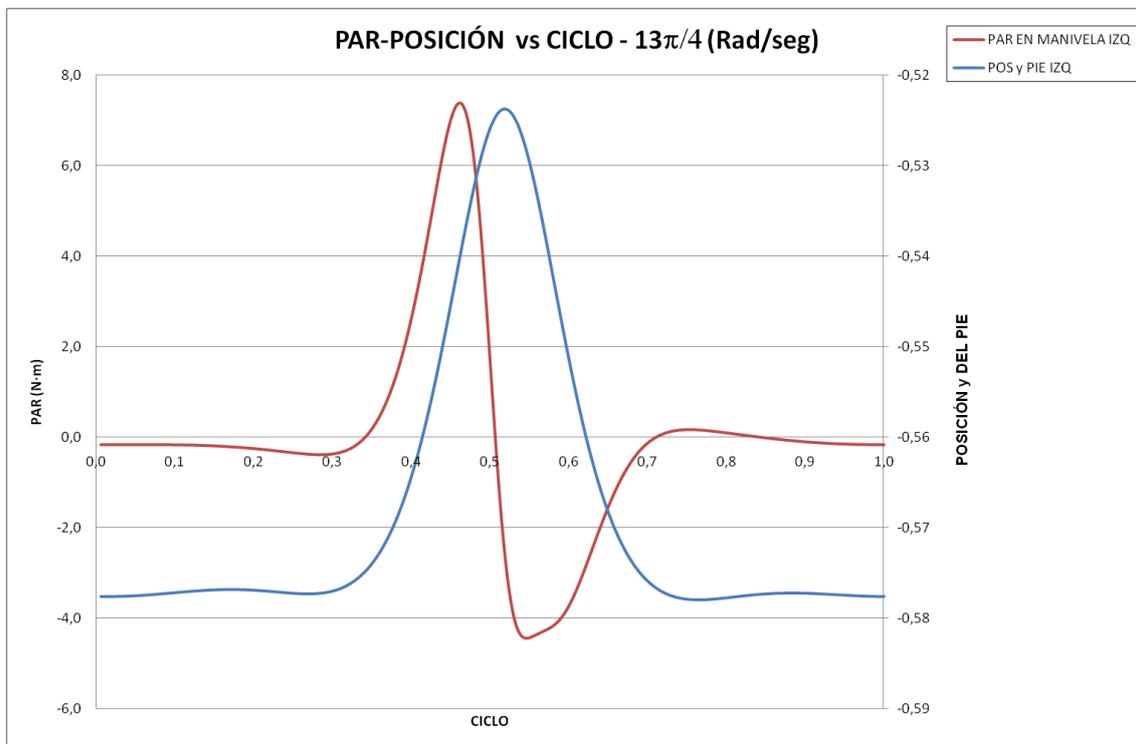


Gráfico 6.8: Par-Posición vs Tiempo ($13\pi/4$)

Finalmente, podemos observar una variación de todos los rangos estudiados pero enfocados de forma diferente. Por un lado tenemos la inclusión de todos los valores del par que se dan en un periodo para cada una de las velocidades simuladas. Después podemos hacer un repaso de cómo varían los máximos y los mínimos entre sí y finalmente podemos ver la variación de los máximos por un lado y los mínimos por otro, en función de las velocidades.

En las siguientes páginas llevaremos a cabo una breve explicación de todas estas formas de ver las variaciones descritas.

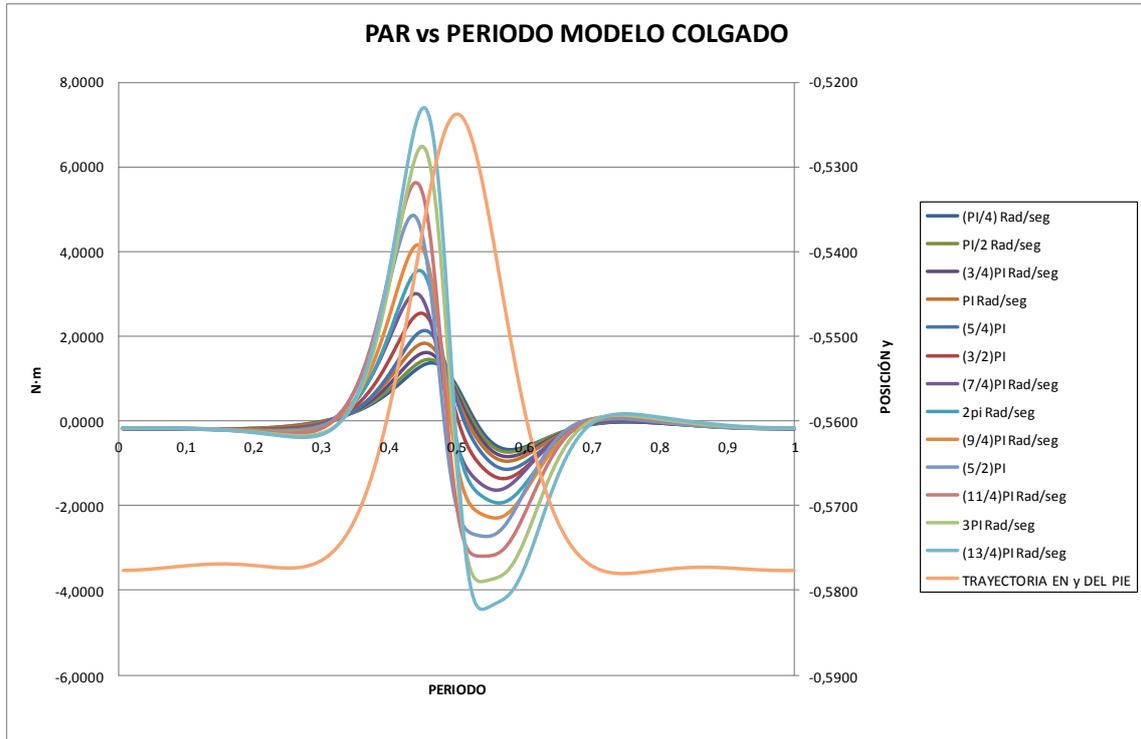


Gráfico 6.9: Par vs periodo

A continuación veremos dos gráficas que nos darán una idea de la variación de los picos de par en función de las velocidades impuestas por el motor. La primera nos da una idea de cómo varían entre sí los puntos máximos y mínimos en la cual vemos que la vemos que la relación entre los máximos y los mínimos es lineal, siendo el valor máximo $\frac{1}{-0,6099} = -1,6$ veces el menor.

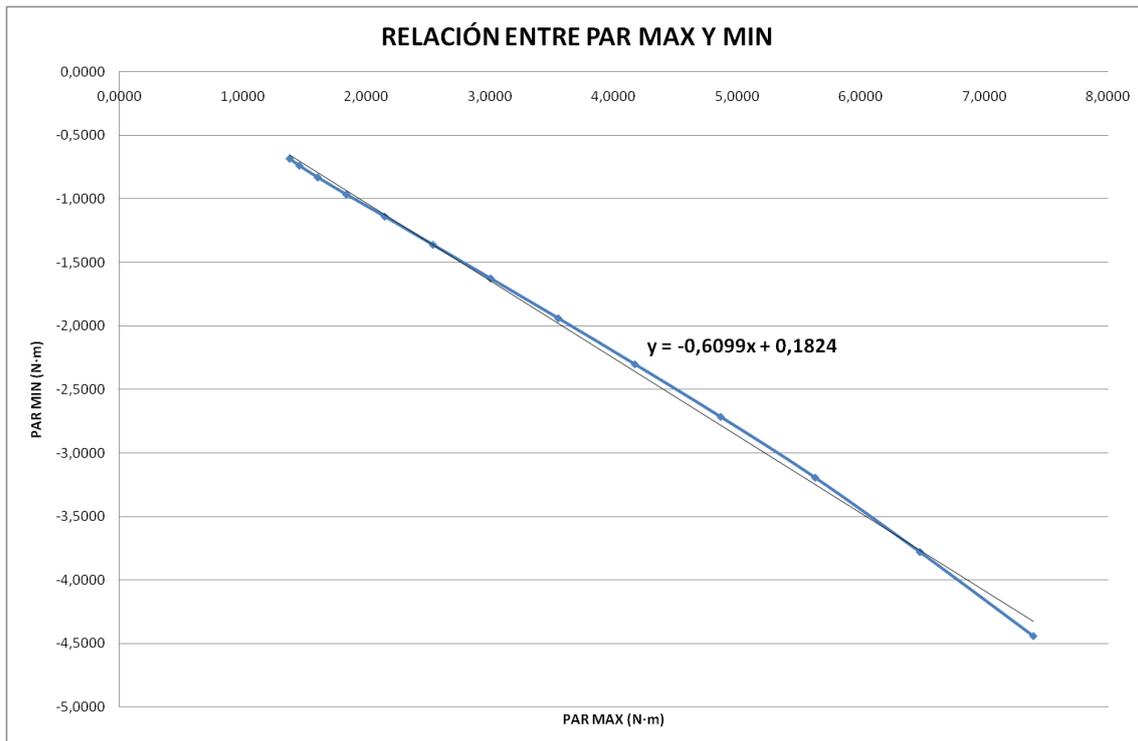


Gráfico 6.10: Par máximo vs par mínimo

En cambio, si hacemos otro estudio de variaciones de máximos y mínimos en función de las velocidades, podemos observar cómo las variaciones de los máximos y de los mínimos no obedece a una secuencia lineal sino exponencial en el caso de los máximos y a la inversa en el caso de los mínimos.

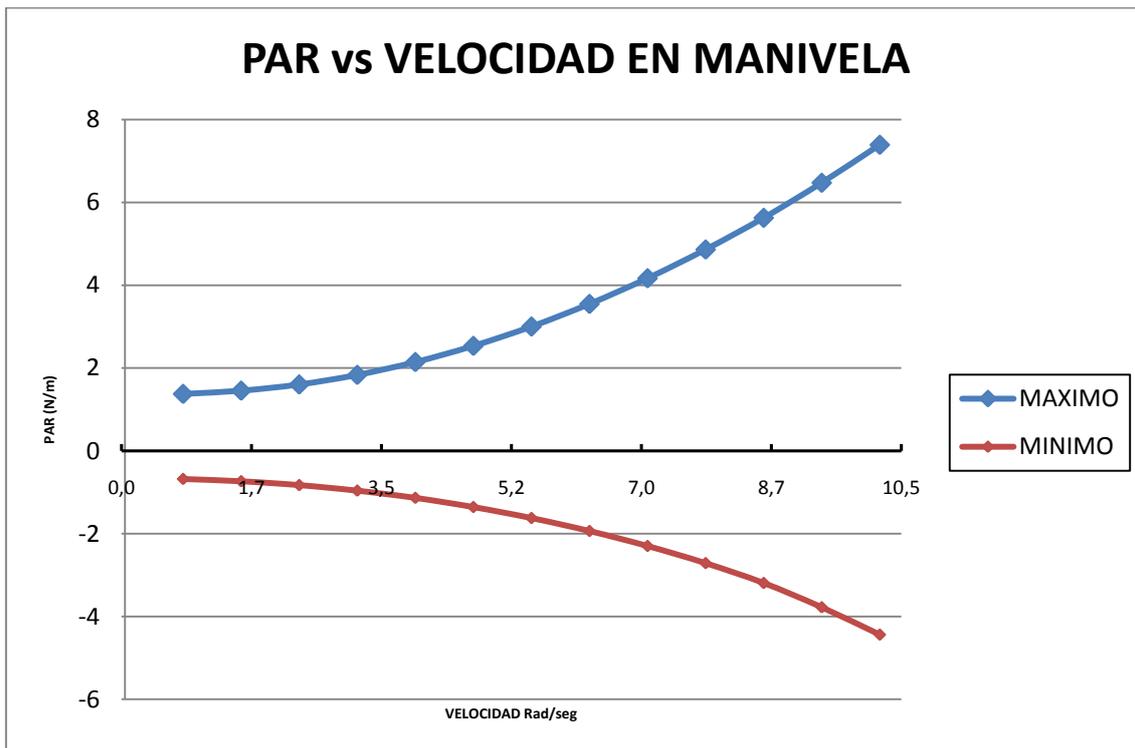


Gráfico 6.11: Par vs velocidad

6.1.2. Modelo libre.

Una vez descrita la evolución del modelo libre para cada $\pi/4$ (Rad/seg) entraremos más en detalle haciendo un estudio del modelo libre para los mismos parámetros que en el caso del modelo colgado. Iremos simulando el modelo en MSC Adams para cada $\pi/4$ (Rad/seg) pero en este caso observaremos ciertas diferencias. La primera que nos podemos encontrar es que debido al contacto con el suelo, la evolución del 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, podemos observar cómo aparecen unos picos, los cuales están filtrados, 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 en el momento en el que entra el pie en contacto con el suelo, aparecen ciertas inestabilidades debido al contacto con el suelo. Los picos de los que hablamos, 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 en el contacto con el suelo existen fuerzas de rozamiento, coeficientes de restitución de los materiales, amortiguaciones, etc.

La operativa a seguir en este apartado fue compleja, ya que fue necesario un proceso de filtrado de datos para poder hacer una comparación lógica de los resultados. Una vez ubicados estos picos de inestabilidad, se anotaron los lugares donde se producían y se llevó el proceso de filtrado hasta que los datos realmente comparativos se pudieron observar. Éste proceso fue llevado a cabo para cada una de las velocidades simuladas obteniendo 2 e incluso 3 gráficos para cada velocidad, en función de los procesos de filtrado más finos o más burdos.

Otro punto en el que se hizo necesario un proceso de filtrado fue en el momento inicial del caminar del robot, ya que como sabemos, los motores que se simulan en Adams son comparables a motores eléctricos, los cuales nos 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. Pero esto se escapa del alcance de dicho proyecto y se tendrá en cuenta en proyectos de otros compañeros.

En las gráficas que se muestran a continuación podemos observar como el aumento de la velocidad en el motor provoca cada vez más inestabilidades, llegando al punto de velocidad $13\pi/4$ (Rad/seg) en el cual se observan tantas inestabilidades y una evolución tan diferente a la teórica, que se decidió que a partir de ese momento el robot presenta tantas irregularidades que se haría imposible el equilibrio del mismo de ninguna manera y por tanto cualquier tipo de estudio a partir de ellas sería un esfuerzo en vano.

-Velocidad de $\pi/4$ (Rad/seg) frente al tiempo sin filtrar.

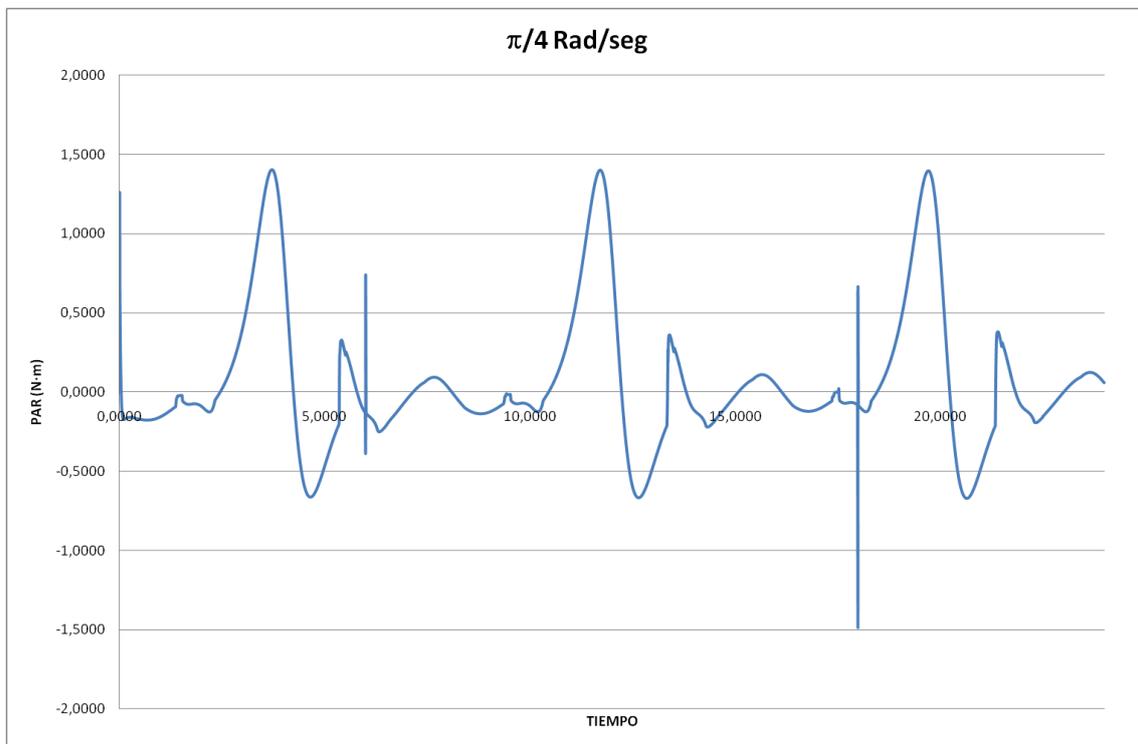


Gráfico 6.12: Par vs Tiempo ($\pi/4$) sin filtrar

-Velocidad de $\pi/4$ (Rad/seg) frente al tiempo filtrado

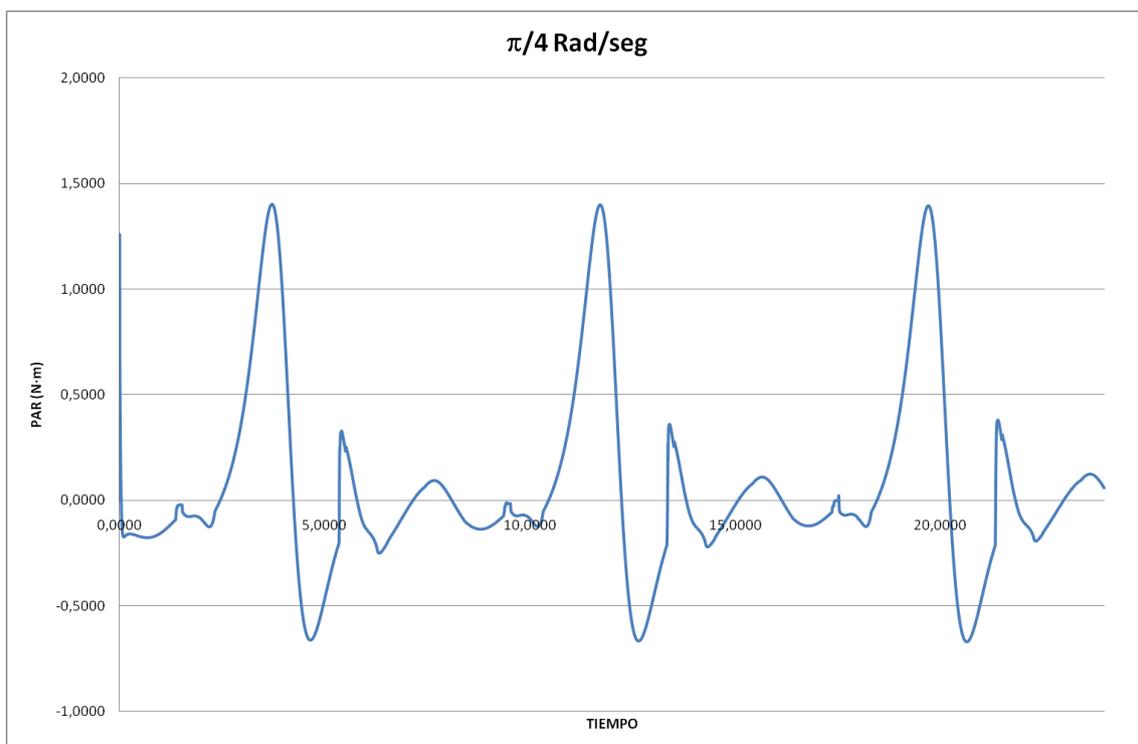


Gráfico 6.13: Par vs Tiempo ($\pi/4$) filtrado

-Velocidad de $\pi/4$ (Rad/seg) frente al periodo

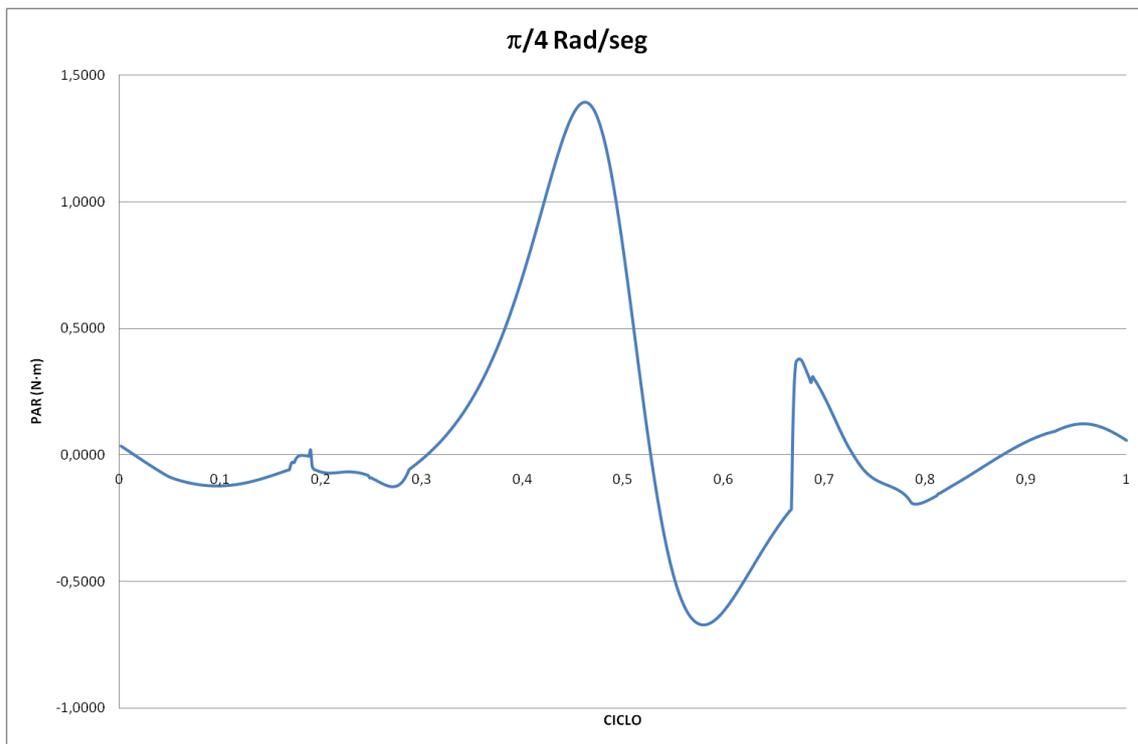


Gráfico 6.14: Par vs Ciclo ($\pi/4$)

-Velocidad de $3\pi/2$ (Rad/seg) frente al tiempo sin filtrar

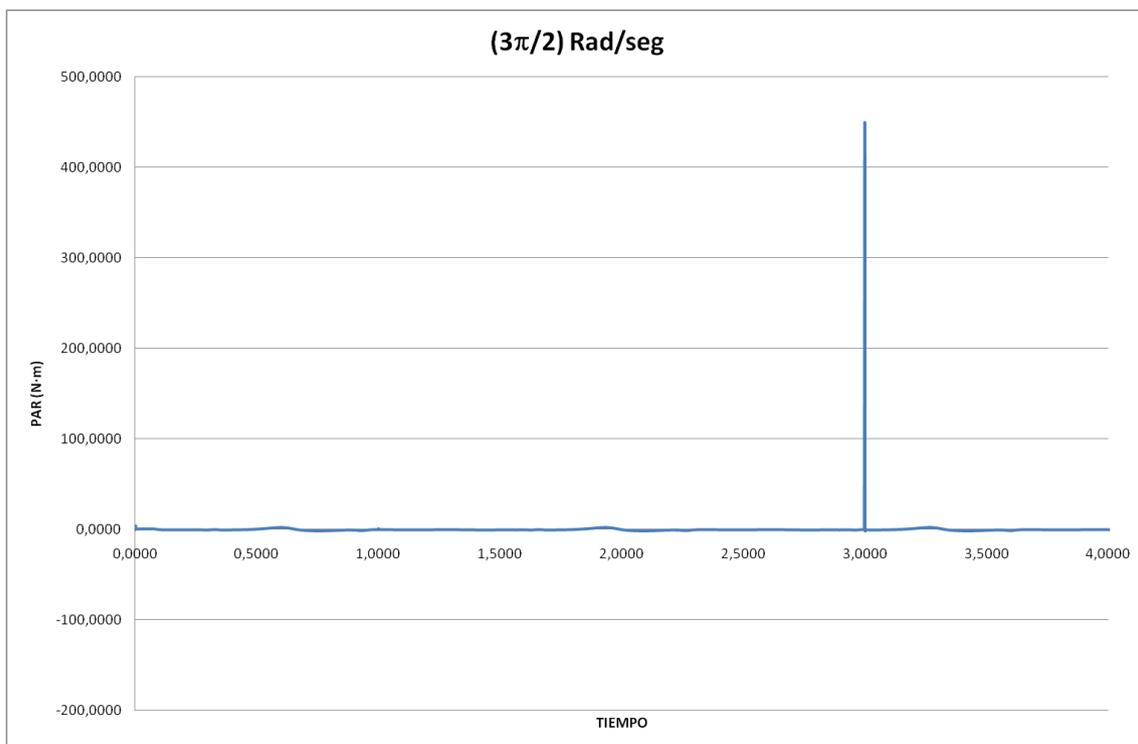


Gráfico 6.15: Par vs Tiempo ($3\pi/2$) sin filtrar

-Velocidad de $3\pi/2$ (Rad/seg) frente al tiempo filtrado

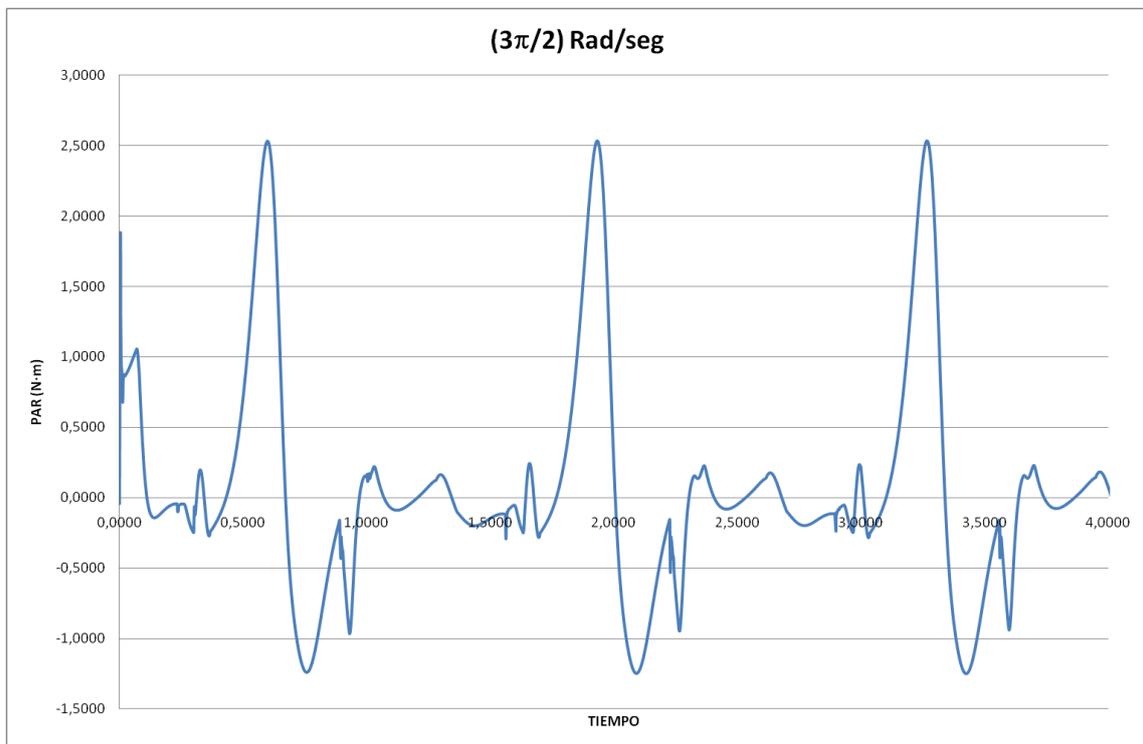


Gráfico 6.16: Par vs Tiempo ($3\pi/2$) filtrado

-Velocidad de $3\pi/2$ (Rad/seg) frente al periodo

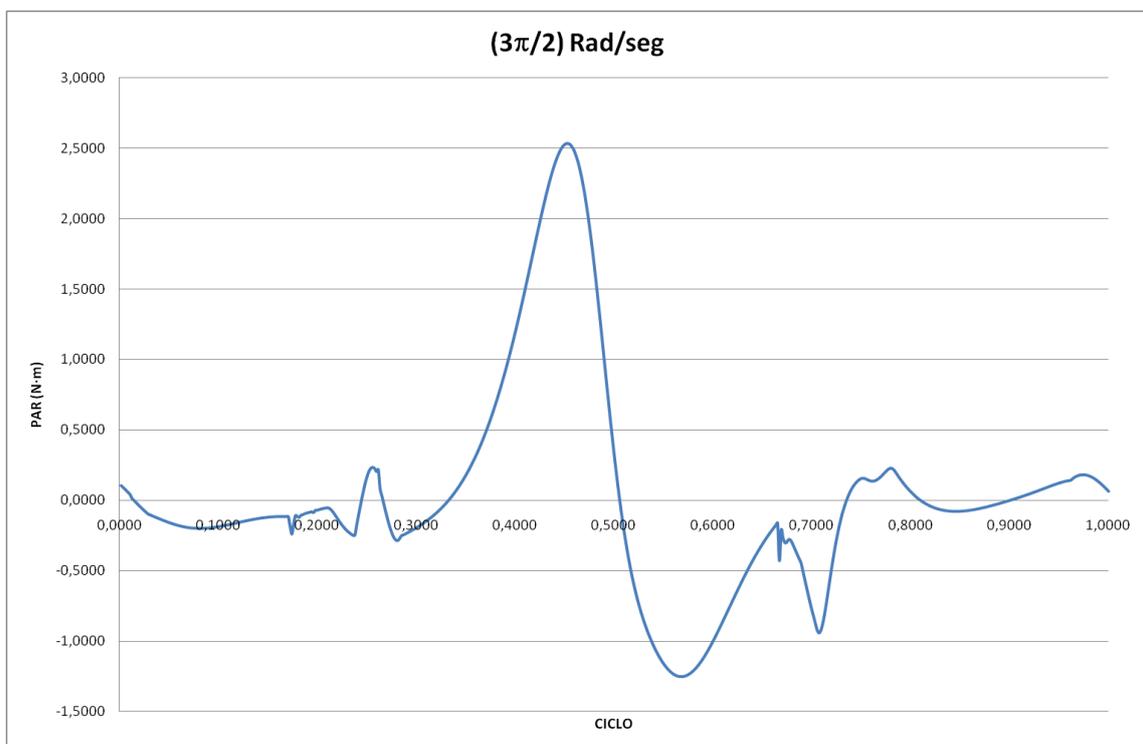


Gráfico 6.17: Par vs Ciclo ($3\pi/2$)

-Velocidad de $13\pi/4$ (Rad/seg) frente al tiempo sin filtrar

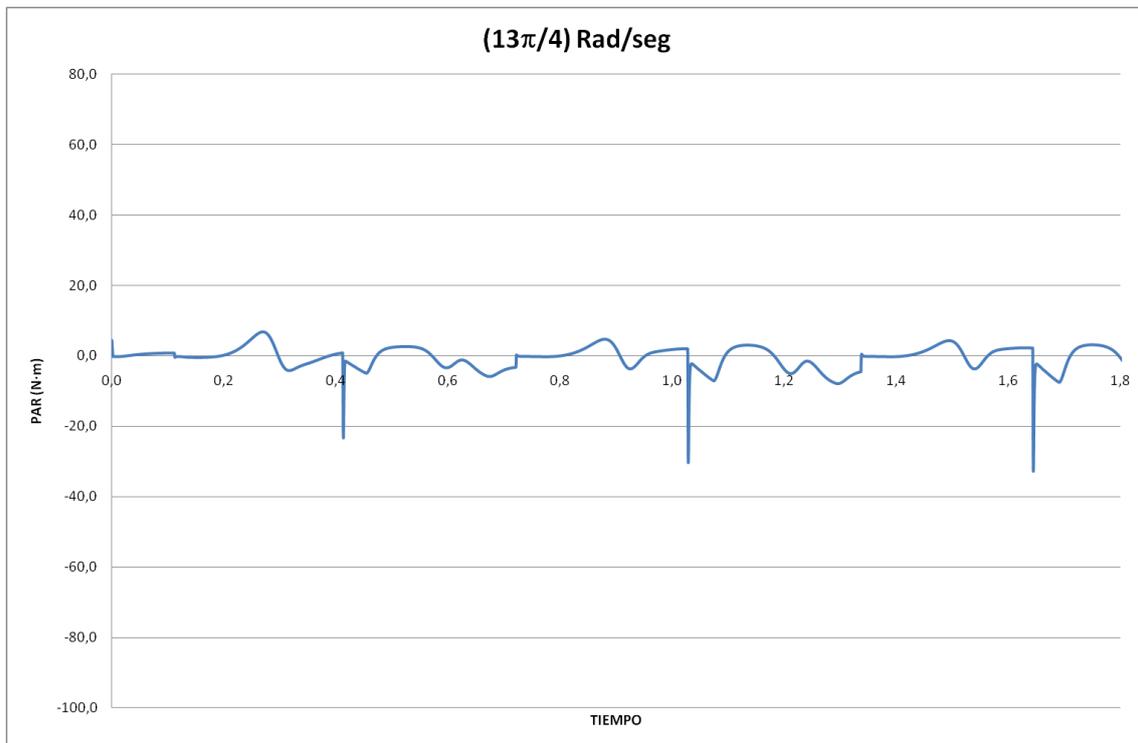


Gráfico 6.18: Par vs Tiempo ($13\pi/4$) sin filtrar

-Velocidad de $13\pi/4$ (Rad/seg) frente al tiempo filtrado

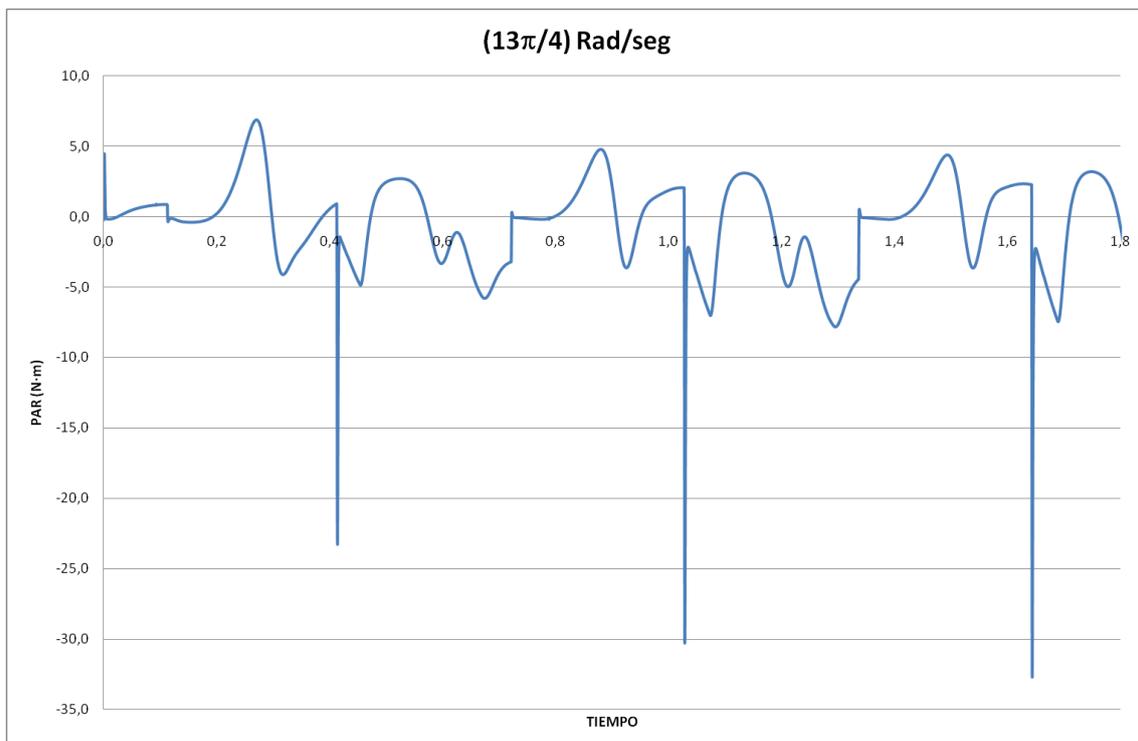


Gráfico 6.19: Par vs Tiempo ($13\pi/4$) primer filtrado

-Velocidad de $13\pi/4$ (Rad/seg) frente al tiempo 2º filtrado

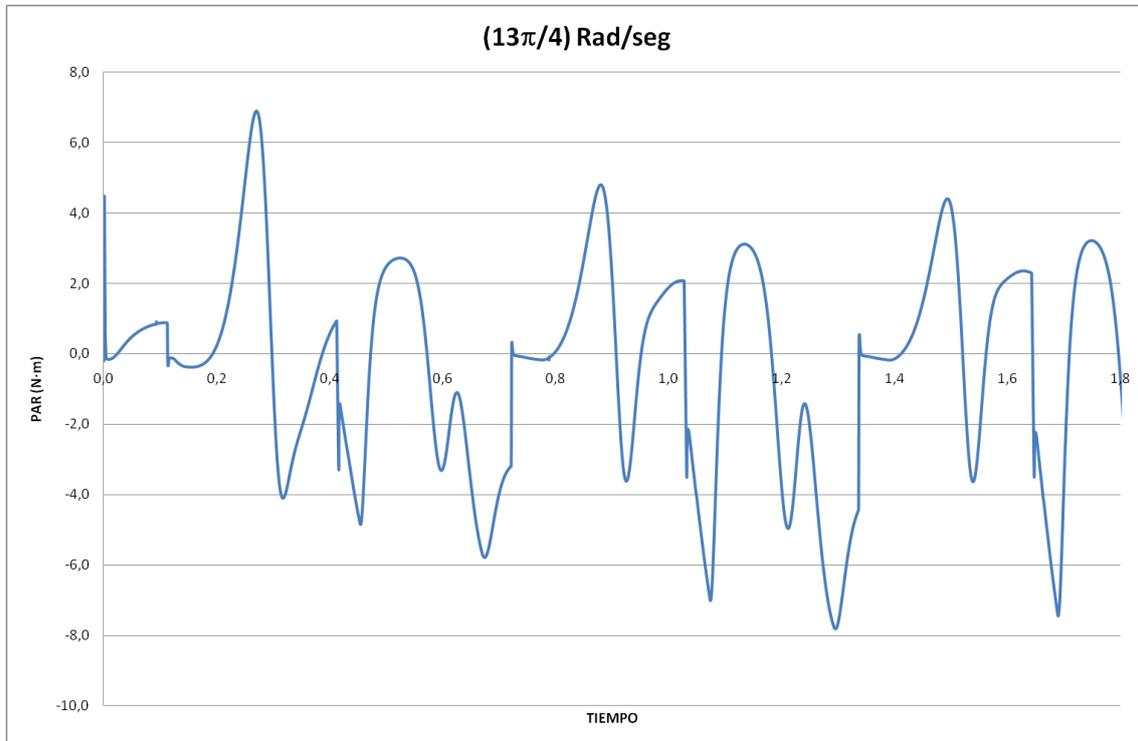


Gráfico 6.20: Par vs Tiempo ($13\pi/4$) segundo filtrado

-Velocidad de $13\pi/4$ (Rad/seg) frente al periodo

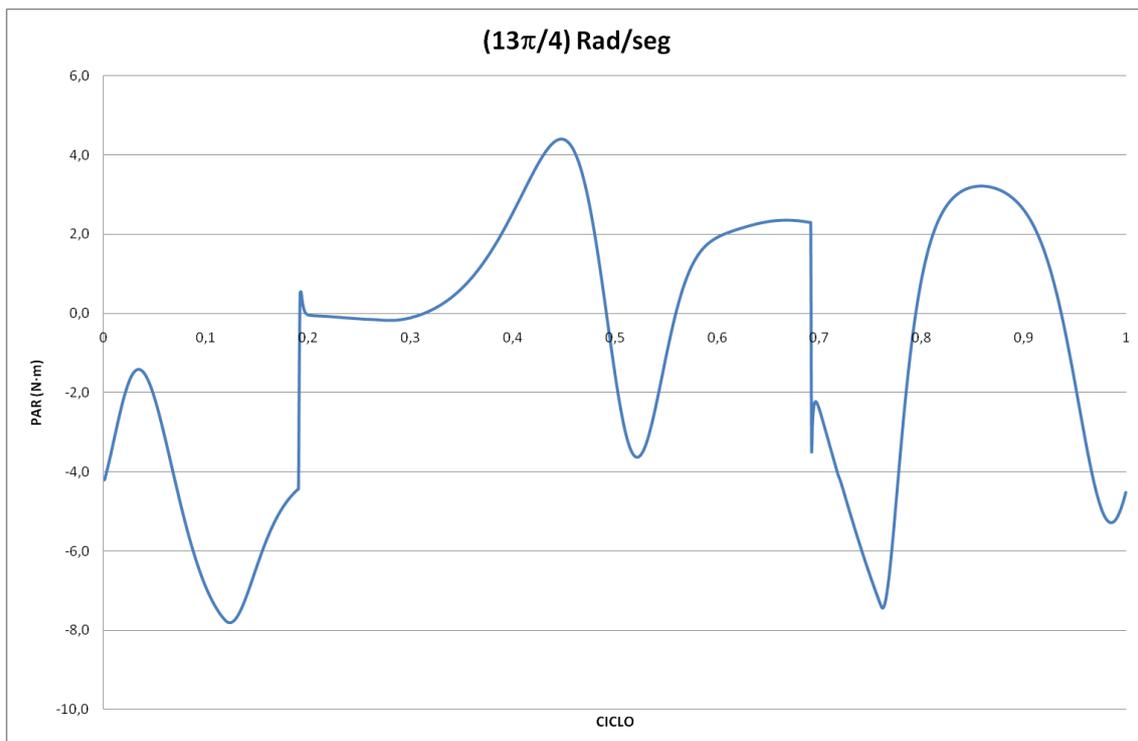


Gráfico 6.21: Par vs Ciclo ($13\pi/4$)

6.1.3. Comparativas modelo libre-modelo colgado.

Durante este punto procederemos a la comparación entre los dos puntos anteriores. Se ha codificado en color azul la evolución del par para un periodo del paso del robot y en rojo la misma evolución pero para el modelo libre.

Observamos que en ambos modelos la parte en vuelo del pie es idéntica tanto para un modelo libre como colgado, esto es debido a que no hay una diferencia que pueda influir en esta parte del movimiento. En cambio, en el momento en el que el pie del robot entra en contacto con el suelo, podemos ver una serie de picos en toda la evolución de las velocidades que nos da una idea de lo mucho que puede llegar a afectar un contacto en la transmisión del par en la manivela. Por tanto, para hacer andar al robot en libertad, deberíamos tener en cuenta un tipo de transmisión que absorba este tipo de irregularidades del movimiento.

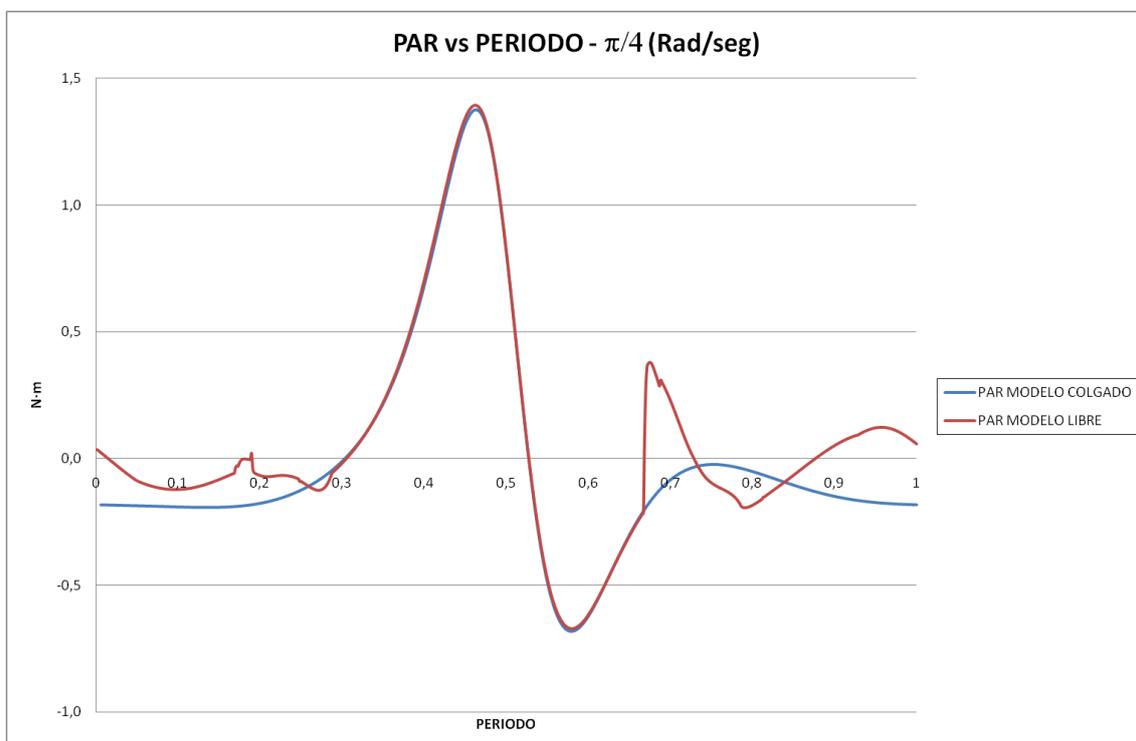


Gráfico 6.22: Comparativa en ciclo modelo libre vs modelo colgado ($\pi/4$)

Si continuamos observando el comportamiento del robot para las siguientes velocidades, veremos como la parte de contacto con el suelo se hace cada vez más irregular. Esto es debido a que al aumentar la velocidad los rozamientos con el suelo y los deslizamientos se acrecientan y lo hacen hasta el punto de que en el modelo para el que hemos tomado las últimas medidas, las irregularidades son tales, que se parecen en muy poco al modelo libre, siendo el modelo muy inestable para esta última velocidad.

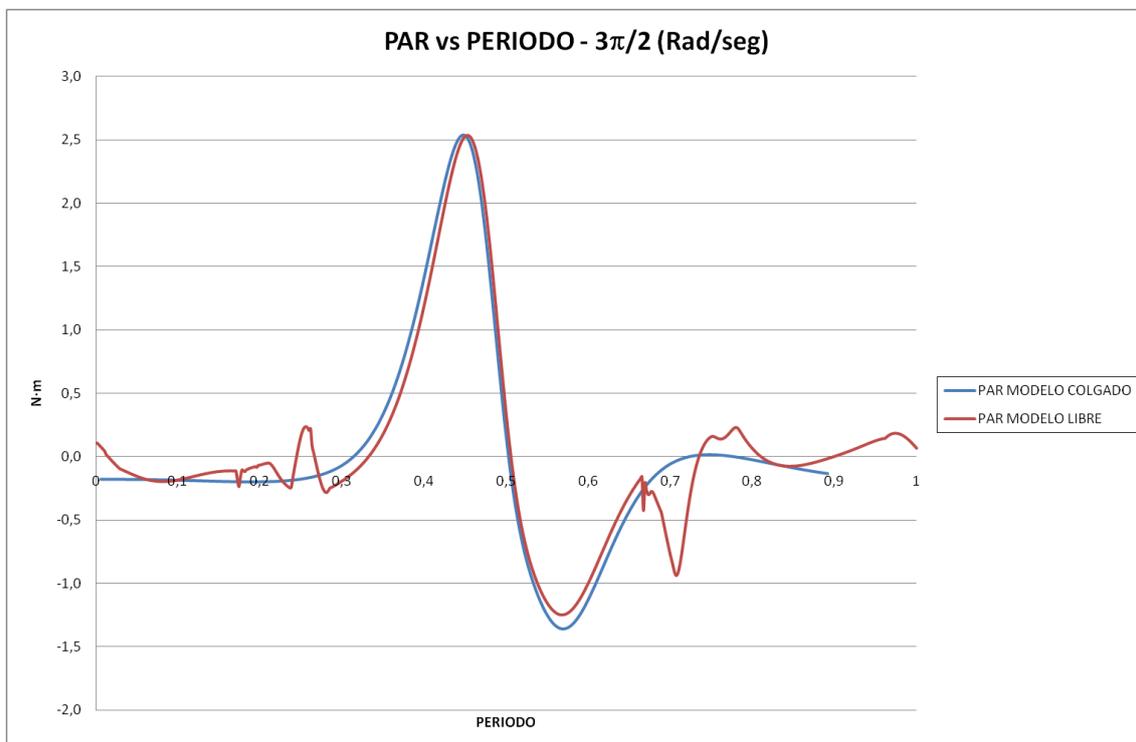


Gráfico 6.23: Comparativa en ciclo modelo libre vs modelo colgado ($3\pi/2$)

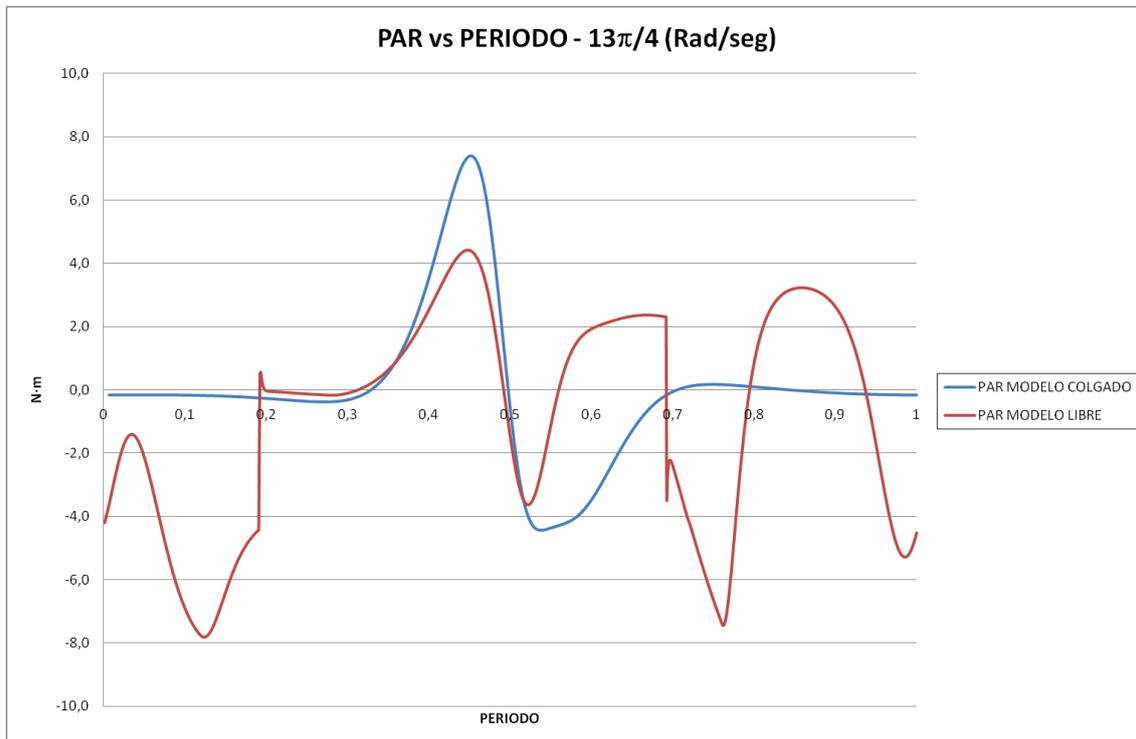


Gráfico 6.24: Comparativa en ciclo modelo libre vs modelo colgado ($13\pi/4$)

6.1.4. Comportamiento con variación de masa en la cadera.

Para completar el análisis comparativo respecto al modelo teórico que se expuso en las primeras líneas de este capítulo, se llevó a cabo la simulación para el mismo rango de velocidades que hasta ahora se ha descrito en el presente proyecto, pero con una variación de masa en la cadera del Pasibot. Las diferentes masas de cadera que se simularon fueron para 0, 5, 10 y 15 Kg.

Evidentemente igual que en el caso del modelo libre, se tuvo que hacer un filtrado de los datos para quitar las inestabilidades que no nos permitían ver con claridad la evolución de los datos.

Como ya podíamos intuir en el modelo teórico, el momento del vuelo del pie es muy parecido por no decir idéntico para cada una de las masas simuladas. En cambio el lugar donde las inestabilidades se hacen patentes vemos como para las masas mayores, consecuentemente las inercias también lo son, haciendo que en el momento de entrada en contacto del pie con el suelo el impacto sea de mayor calibre.

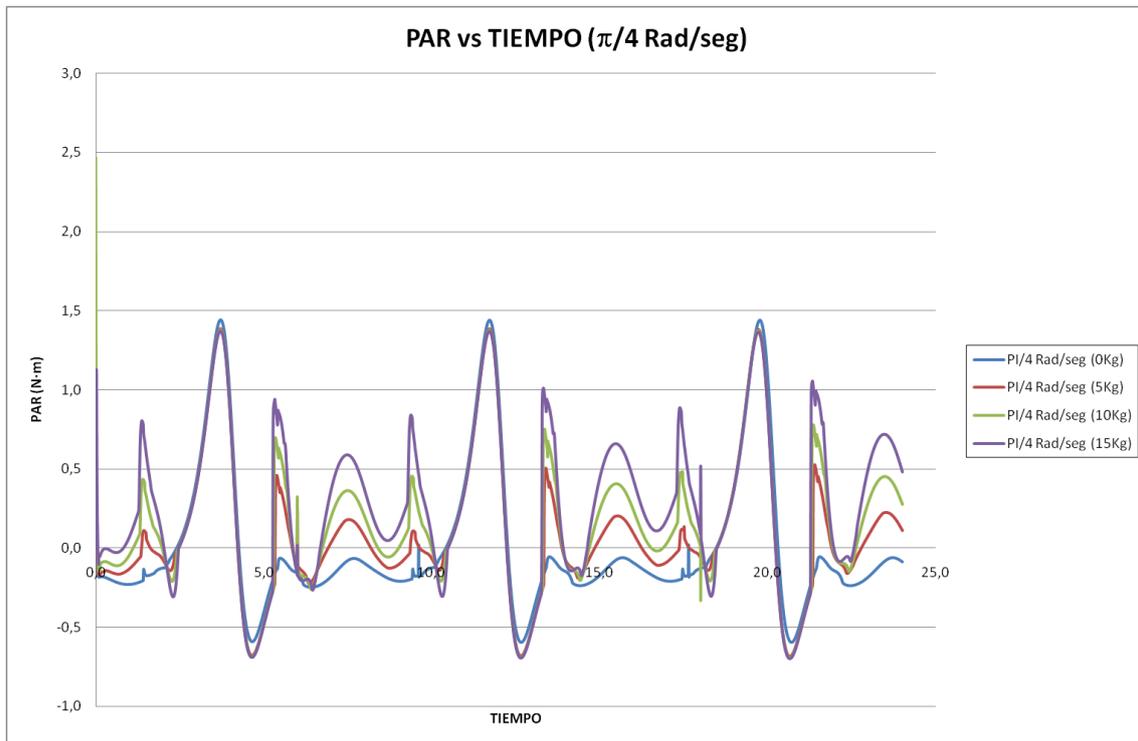


Gráfico 6.25: Comparativa con diferentes masas para la cadera ($\pi/4$)

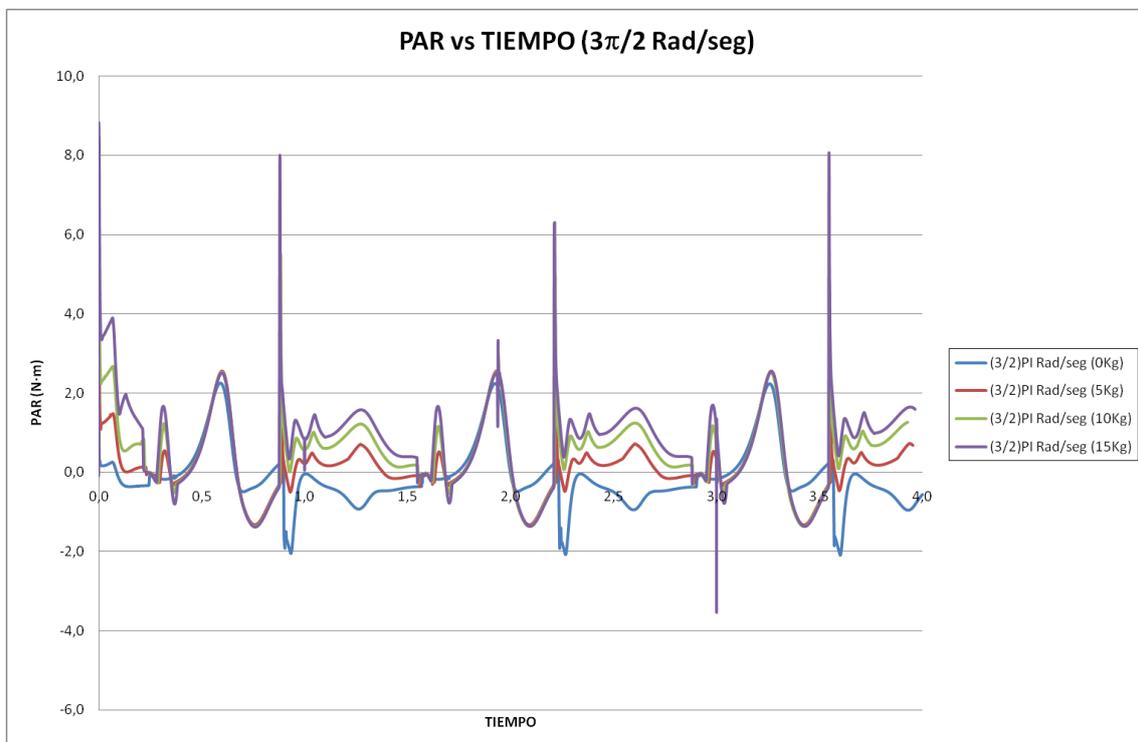


Gráfico 6.26: Comparativa con diferentes masas para la cadera ($3\pi/2$)

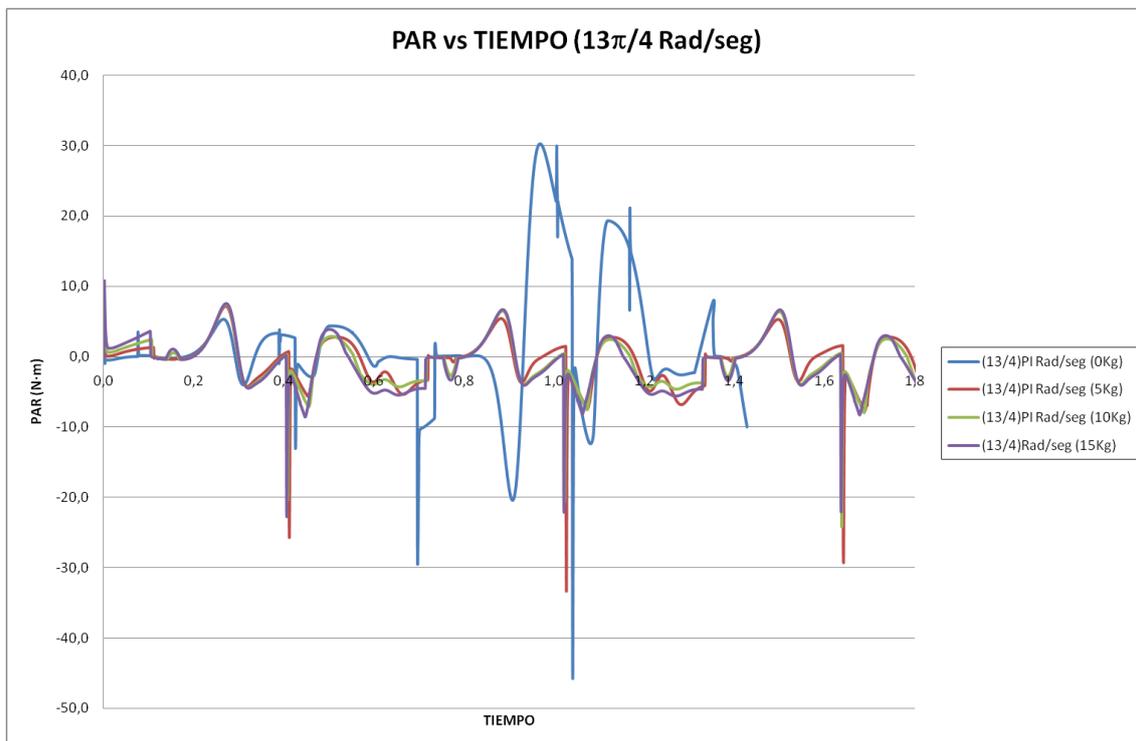


Gráfico 6.27: Comparativa con diferentes masas para la cadera ($13\pi/4$)

6.2. ESTUDIO DEL CDM.

Para la correcta explicación de las gráficas que posteriormente mostraremos, a continuación tenemos la nomenclatura que seguiremos de aquí en adelante para nombrar los diferentes elementos sobre los que tomaremos las medidas.

Se realizará un estudio del cdm del Pasibot así como su respectiva estabilidad en función del mismo para varios intervalos de posición de la deslizadera inferior (actuador lineal). Los intervalos que se han tomado para tener un rango de datos aceptable han sido tomados de 5 en 5 mm desde 0mm hasta 40 mm, que como hemos visto en el capítulo 3 es el límite físico hasta el cual podemos llegar debido a la colisión de los mecanismos entre sí.

Comenzaremos haciendo una breve descripción de cómo se organizarán los datos que se mostrarán en las próximas líneas. En primer lugar hemos de explicar el código de colores para la mejor comprensión de los gráficos. Se han tomado los colores azulados para las partes izquierdas del robot y los colores

anaranjados para las partes derechas del mismo, asimismo se representa en color rojo la posición del cdm global del sistema para cada instante de tiempo.

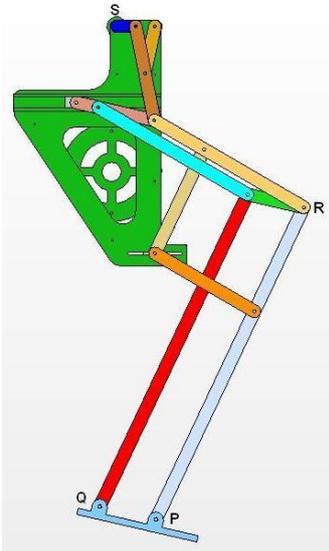


Figura 6.1: Denominación de puntos

Por un lado, en la parte superior de los gráficos tenemos las posiciones de los pies del robot según el eje X de su movimiento, así como la posición según el eje X del cdm global del sistema. Por otro lado, en la parte inferior de los gráficos observaremos la posición de los pies según el eje Y.

Así pues como ya hemos comentado anteriormente y para hacer una recopilación de toda esta información, representaremos la posición del pie derecho en el eje X en la parte superior y en color anaranjado. Del mismo modo, representaremos la posición del pie izquierdo según el eje X de su movimiento en la parte superior de los gráficos, pero en este caso en color azulado. Operaremos de la misma manera para la parte inferior de los gráficos, siendo las curvas anaranjadas la que representa la posición del pie derecho según el eje Y de su movimiento y las curvas de color azulado la que representa la posición del pie izquierdo según el eje Y de su movimiento.

Por otro lado, observaremos que existen unas líneas verticales discontinuas cada cierto intervalo de tiempo. Éstas nos dan una idea del momento susceptible de estudio en cada uno de los casos, haciendo la observación de los gráficos más sencilla e identificable para cada momento del paso del robot.

La evolución que se llevará a cabo para la explicación del comportamiento del cdm del sistema con respecto a la pisada del robot se realizará en bloques de 3 gráficas para cada una de las situaciones. En primer lugar observaremos que tenemos la situación en la que los dos pies del robot están en el momento de doble apoyo. Las líneas verticales anteriormente



mencionadas nos van a indicar precisamente ese momento que buscamos y lo haremos coincidir con las posiciones según el eje X de cada uno de los pies. A continuación veremos el lugar donde queda el cdm global con respecto a la pisada del robot para cada posición del cdm y evaluaremos si en ese momento el robot es estable o sufre algún tipo de inestabilidad, la cual no tiene porqué desencadenar una caída del robot, ya que como explicaremos en las líneas escritas a continuación, podemos utilizar esos balanceos que se producirían en el momento en el que el cdm se viese desplazado fuera de la pisada para influir sobre el equilibrio del robot en momentos de arrancada, frenada o incluso giro. Por otro lado, observaremos el comportamiento de los mismos parámetros pero para instantes de paso diferentes. Primero evaluaremos las diferentes situaciones producidas levantando el pie derecho y después haremos lo mismo pero con el pie izquierdo. Se hace esa diferenciación de las mediciones ya que, aunque el robot es simétrico, la forma en la que actuaremos sobre las deslizaderas no lo será y por tanto los resultados de ambas partes serán diferentes salvo en los momentos en los que actuemos sobre las dos deslizaderas de la misma manera. En ese caso tendremos los mismos resultados pero desfasados 180°.

En los gráficos mostrados a continuación se representarán en el eje de ordenadas la posición, en milímetros, de las partes cuya nomenclatura se expone al principio de este punto. La parte superior será en dirección X y la parte inferior en dirección Y. En el eje de abscisas se representa el tiempo, en segundos, de simulación llevada a cabo. Se han tomado los tiempos referidos a 2 pasos porque, a diferencia del estudio del par, en este caso que nos ocupa, la diferencia entre masas y posiciones relativas entre eslabones no varía en ninguno de los casos, más aun sabiendo que el modelo no se encuentra libre sino colgado por la cadera.

La velocidad de simulación escogida fue de π Rad/seg ya que se observó, durante el desarrollo del proyecto y con sus sucesivas simulaciones, que el comportamiento más estable por parte del robot se producía precisamente en ese rango de velocidades. Por otro lado, tampoco sería un



dato que durante este estudio influya ya que no se comprueba la estabilidad del modelo libre sino que el Pasibot está colgado de forma que sólo nos interesan los valores de situación de los puntos que nos interesan y de su variación respecto al cdm global. El estudio de la estabilidad del robot se dejará como uno de los trabajos futuros en los que se desarrollen más a fondo los datos que aquí se muestran, implementando las trayectorias como veremos que es posible realizar.

Finalmente, antes de entrar en el detalle de las gráficas individualmente, hemos de decir que las medidas mostradas a continuación no tienen en consideración los contactos con el suelo (rozamientos, deslizamientos, etc.) ni ningún tipo de impacto o inestabilidades que añadan ruido a nuestras simulaciones. Para evitar todo este tipo de eventos y poder hacer un estudio primario con las variables que nos ocupan hicimos las simulaciones con el Pasibot colgado, es decir, con una restricción total en la cadera.

6.2.1. Posición inicial.

En este primer caso en el que las deslizaderas están en su posición neutra vemos como para el primer gráfico con la situación de los dos pies en apoyo, las barras verticales nos hacen ver que la posición en el sentido X del cdm está siempre dentro de la pisada del robot. Por tanto, podemos decir que, según la posición del cdm, en este caso el robot es completamente estable en la dirección longitudinal del movimiento. Podemos ver que en la parte estrecha entre barras discontinuas verticales, las posiciones de los pies están cerca de sus extremos en su movimiento (uno por delante y otro por detrás), por tanto, el cdm queda encerrado por la línea azul oscuro y la línea naranja oscuro. En cambio hay un momento crítico en esta parte del caminar y es el punto en el que se cruzan ambos pies, en el que sólo nos queda como zona estable la longitud del pie. Por tanto esto nos hace comprender cómo la longitud del pie es un dato realmente fundamental en la estabilidad del robot no solo por la cantidad de superficie de apoyo sino también por la cantidad de masa que tiene que levantar en el momento del vuelo. Por este motivo encontrar una solución de compromiso entre la estabilidad durante el apoyo y durante el vuelo hace de

este estudio una pieza clave en el desarrollo y optimización de los componentes del Pasibot en su estabilidad.

El motivo de que los valores según el eje X de cada uno de los pies sea alternativamente positivo y negativo es debido a que los resultados se expresan en un sistema de coordenadas fijado en el centro de robot según el eje Z y en el origen del movimiento, es decir, en el lugar en el que el motor del Pasibot aplica su energía. El eje sobre el que gira la manivela respecto a la cadera. Además, por el mismo motivo, el cdm global está desplazado en el sentido X del orden de 100 mm.

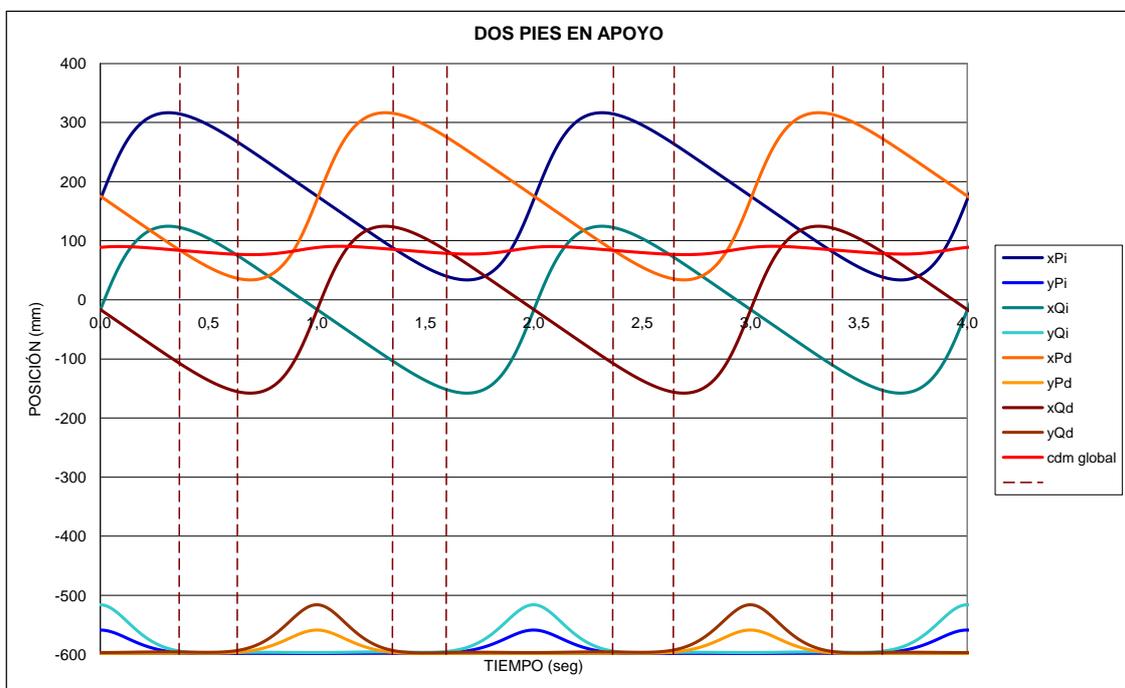


Gráfico 6.28: Dos pies en apoyo-Posición inicial

A continuación veremos otros dos gráficos, que nos mostrarán la misma situación en los dos casos debido a que, como ya hemos comentado anteriormente, en este caso todo el movimiento del robot es totalmente simétrico, por tanto los datos obtenidos también lo serán. Aun así, hemos preferido dejar las dos simulaciones ya que posteriormente sí obtendremos datos diferenciadores entre un lado y otro. De esta manera intentaremos hacer más comprensible el desarrollo de los datos acontecidos durante este proyecto.

Los casos que nos ocupan en estos momentos son las secuencias del paso en las que el robot tiene una pierna en el suelo y la otra en vuelo. En el primero de los casos estudiaremos el momento en el que la pierna derecha está apoyada y la izquierda en vuelo. Podemos ver como en dicho momento, las líneas verticales siguen englobando, al igual que lo hacían en el caso de los dos pies en el suelo, el cdm global del sistema dentro de la pisada del robot, que en este caso será la longitud del pie. Las líneas azules de la parte superior nos están indicando los extremos del pie izquierdo. La que está más arriba será el punto más avanzado del pie y la que está por debajo, el punto más retrasado.

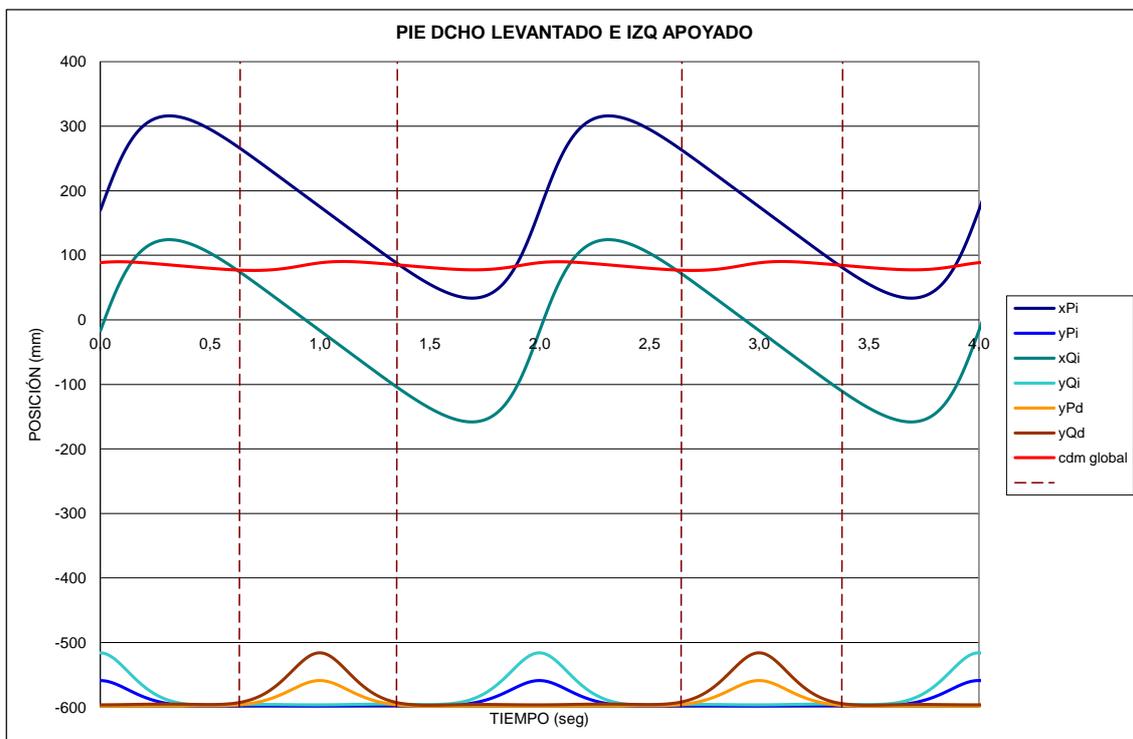


Gráfico 6.29: Pie dcho levantado e izq apoyado-Posición inicial

Posteriormente veremos la misma situación pero para el pie derecho que, como cabe esperar al ser un estado totalmente simétrico, tenemos el mismo dibujo que para el pie izquierdo.

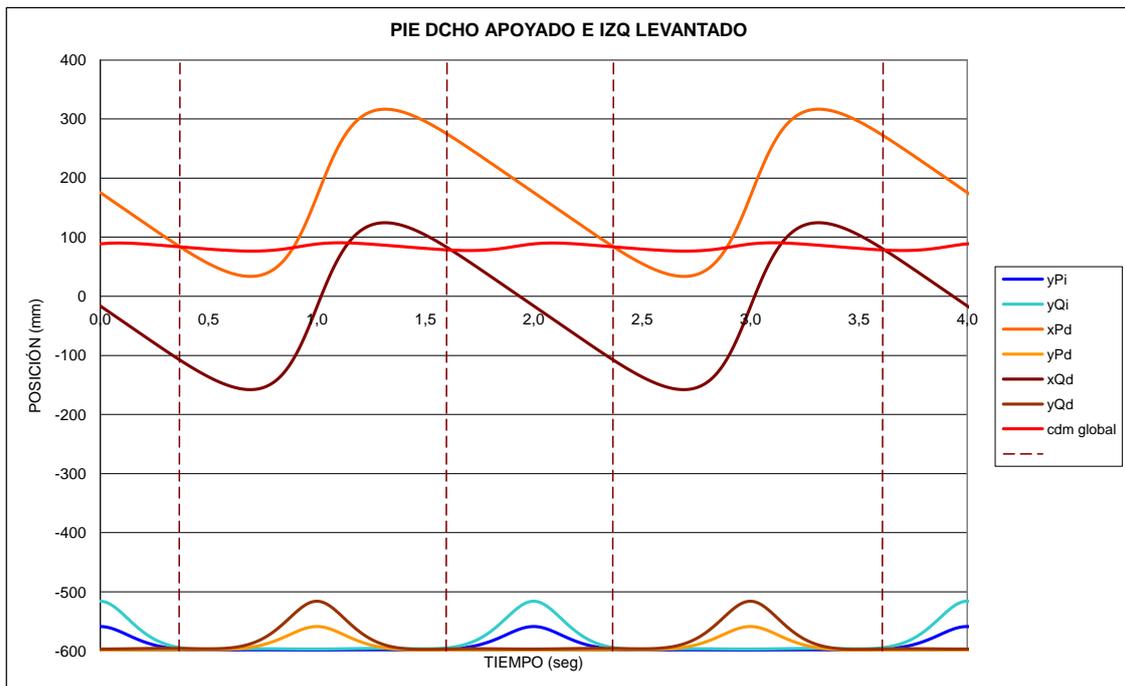


Gráfico 6.30: Pie dcho apoyado e izq levantado- Posición inicial

6.2.2. Adelantando uno de los actuadores.

Después de ver la situación para el modelo en el estado inicial, procederemos al estudio del mismo adelantando uno de los actuadores. En este caso será el actuador izquierdo, manteniendo el actuador del lado derecho en su origen. De esta manera observaremos como ya empiezan a cambiar las mediciones y no como en el estado simétrico anterior.

Haremos un estudio reducido en el presente documento, ya que introducir todas las gráficas obtenidas en la simulación sería inviable. Se han tenido en cuenta 3 posiciones para cada una de las situaciones figurando las demás en el anexo E. De aquí en adelante se procederá de la misma manera.

IZQUIERDA -5 DERECHA 0

Adelantando 5 mm el actuador izquierdo y dejando el actuador derecho en su origen obtenemos unos datos aun muy similares a los iniciales, pero en la segunda gráfica de este bloque ya podemos apreciar las primeras diferencias. Vemos que la curva azul oscuro cae más hacia la derecha en el punto en el que la equivalente del modelo inicial tocaba con la línea vertical y con la curva del cdm global. Por tanto podemos decir que estamos aumentando el rango en el cual puede moverse el cdm del sistema. Y consecuentemente aumentando la estabilidad del robot por dos razones. La primera es que en el momento en el que ya está el pie apoyado, el cdm queda aun dentro de los extremos del pie y la segunda es que debido a las inercias del mismo en el momento de entrada del pie en el suelo, es preferible tener margen por la parte delantera del robot para que en el momento del impacto, el balanceo que se produce del Pasibot hacia delante, lo absorbe la posición adelantada del pie haciendo del robot un mecanismo más estable.

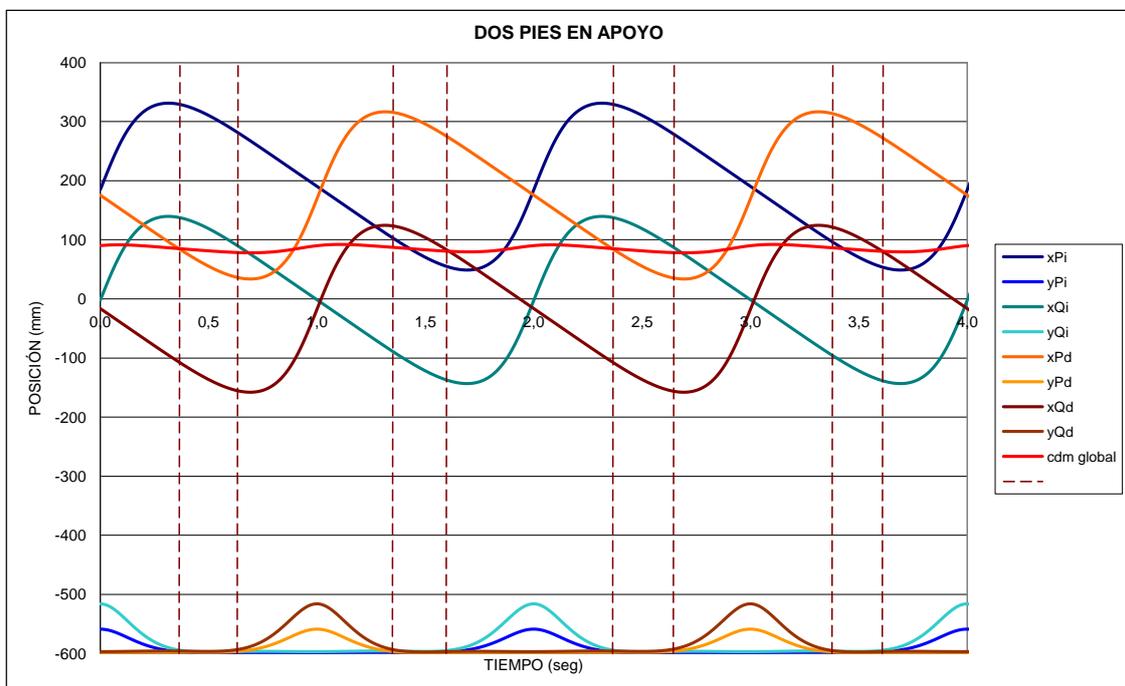


Gráfico 6.31: Dos pies en apoyo-Adelantando el actuador izquierdo 5mm

Vemos esta situación en el gráfico en el cual el pie derecho está levantado y el izquierdo apoyado, ya que adelantando el actuador izquierdo, aumentamos la zancada por la parte delantera de la pisada del pie izquierdo.

Un dato que se observa sucesivamente en este estudio es que la posición según el eje Y del movimiento del robot, se mantiene constante, de modo que si alargamos la zancada por la parte delantera como ocurre en este caso, la velocidad a la cual el robot da el paso es mayor. Esto se podría observar si obtuviésemos las variaciones de posición y velocidad de la rodilla donde podríamos observar este hecho. No es cometido de este proyecto de fin de carrera y por tanto no entraremos en el detalle cinemático de los eslabones, pero es algo que se ha comprobado en otros proyectos en el que sí se estudiaban estas variables.

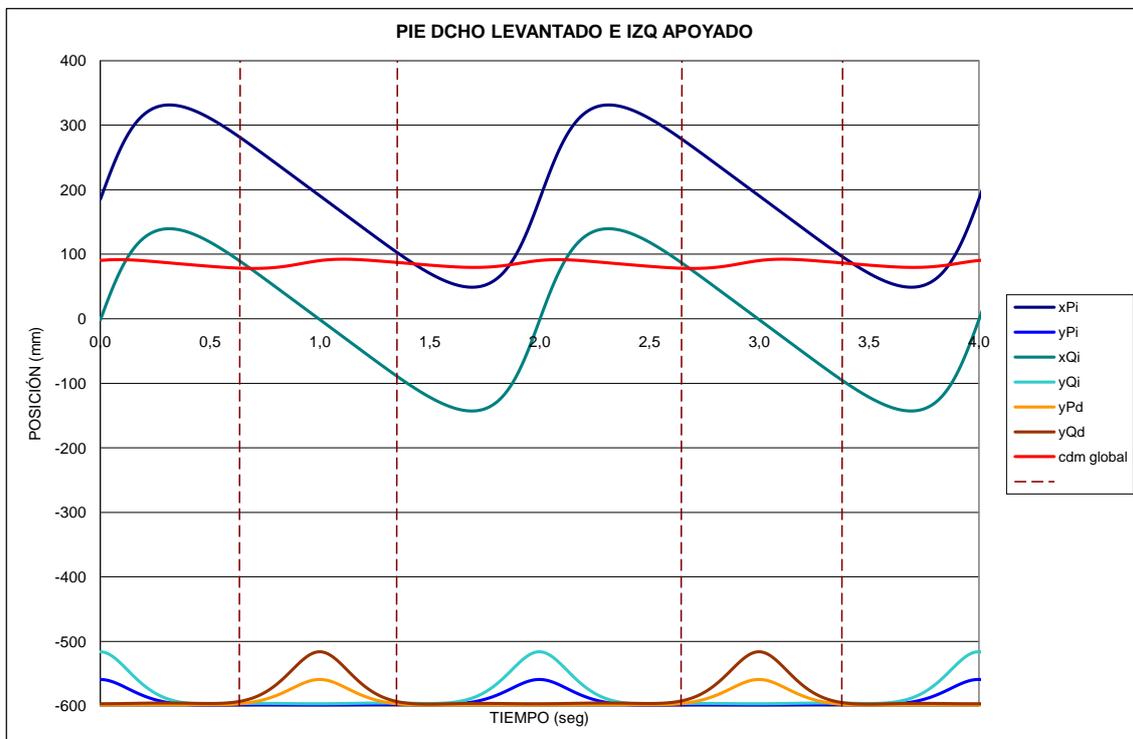


Gráfico 6.32 Pie dcho levantado e izq apoyado-Adelantando el actuador izquierdo 5mm

Por otro lado, en el gráfico siguiente, vemos que el pie derecho sigue manteniendo su trayectoria, encerrando el cdm global del sistema entre sus puntos extremos durante el movimiento de vuelo del pie izquierdo. Por tanto en el momento de vuelo del pie izquierdo, el pie derecho mantiene la misma estabilidad que en el caso inicial.

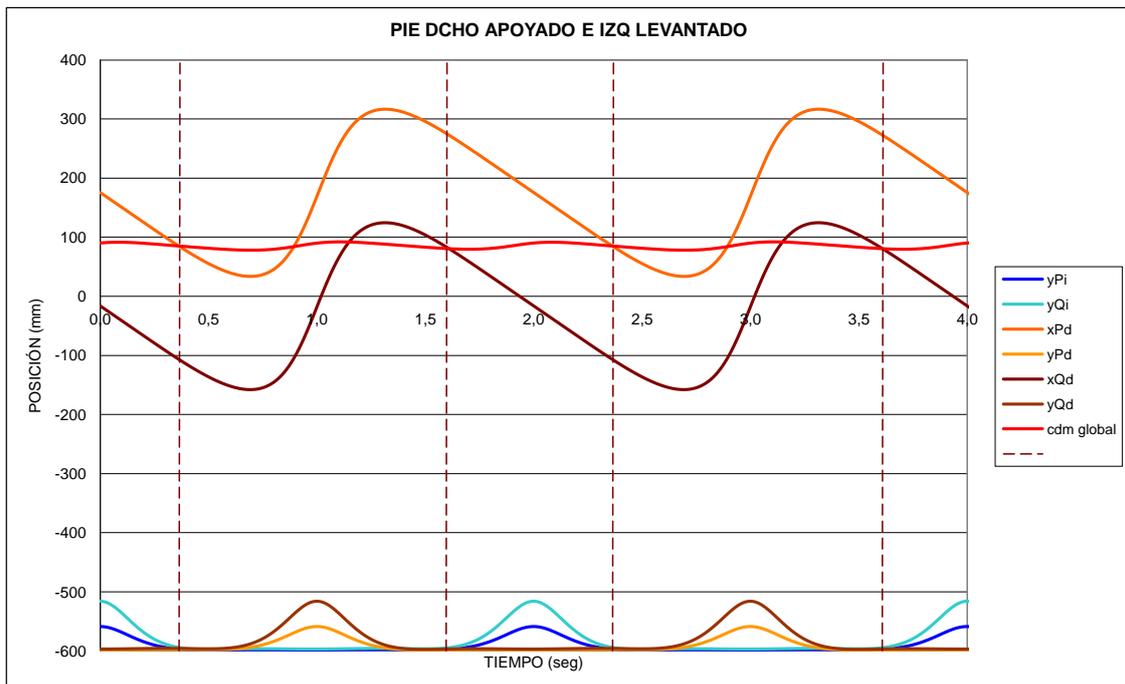


Gráfico 6.33: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el actuador izquierdo 5mm

IZQUIERDA -25 DERECHA 0

Para esta situación, como podemos ver, en el momento en el que están los dos pies apoyados no hay ningún problema, el cdm del sistema sigue estando comprendido entre los puntos extremos de los pies derecho e izquierdo.

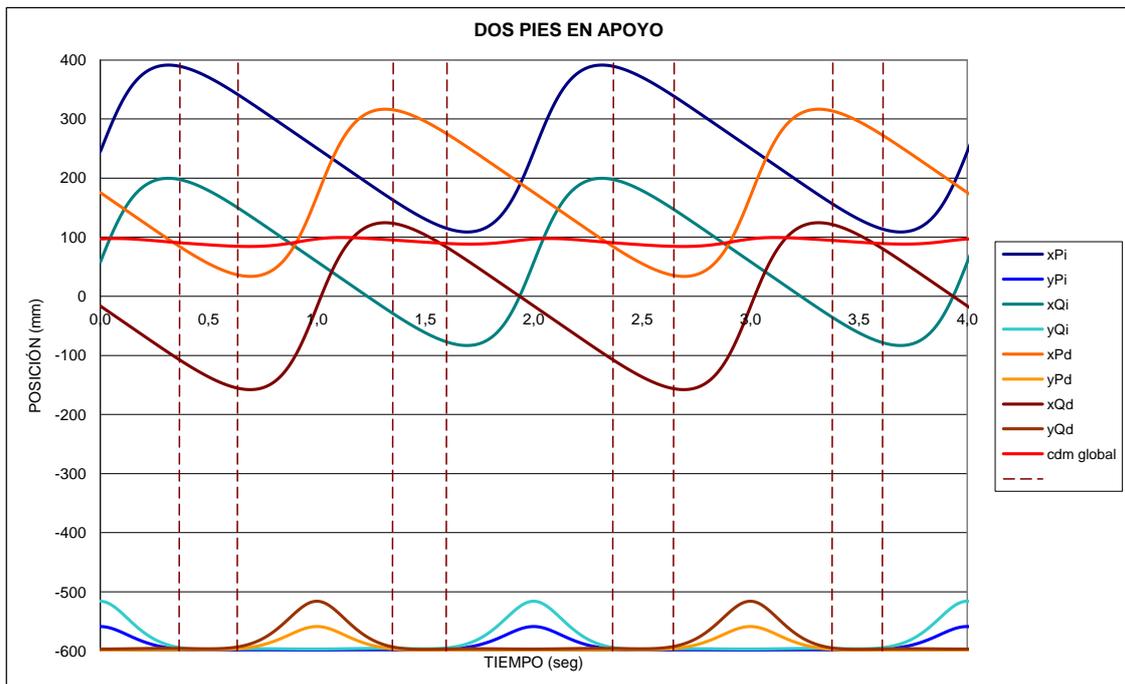


Gráfico 6.34: Dos pies en apoyo-adelantando el actuador izquierdo 25mm

Para el siguiente gráfico, en el cual se muestra la posición del pie izquierdo habiendo modificado la posición de su actuador hacia delante, vemos que el cdm global del sistema se sale de los extremos del pie izquierdo en el momento de su apoyo por la parte trasera. Por tanto, podemos afirmar que tanto a velocidades bajas en las cuales tengamos un balanceo hacia atrás del robot acusado, como puede ser en el arranque del mismo, éste volcará hacia atrás. Sólo sería posible esta situación del actuador en el caso en el que la velocidad del robot fuese lo suficientemente elevada como para que la inercia del mismo absorbiese la inestabilidad causada por la desviación del cdm respecto a la pisada o bien en un momento de frenada en el que la inercia actuará haciendo inclinar el robot hacia delante. En este último caso vemos que no hay ningún problema ya que el cdm se queda siempre por detrás del extremo delantero del pie. Eso sí tendríamos que actuar sobre el pie que vaya a estar más adelantado en el momento de la parada o bien actuar sobre los dos pies en el momento en que cada uno esté en sus posiciones más adelantadas.

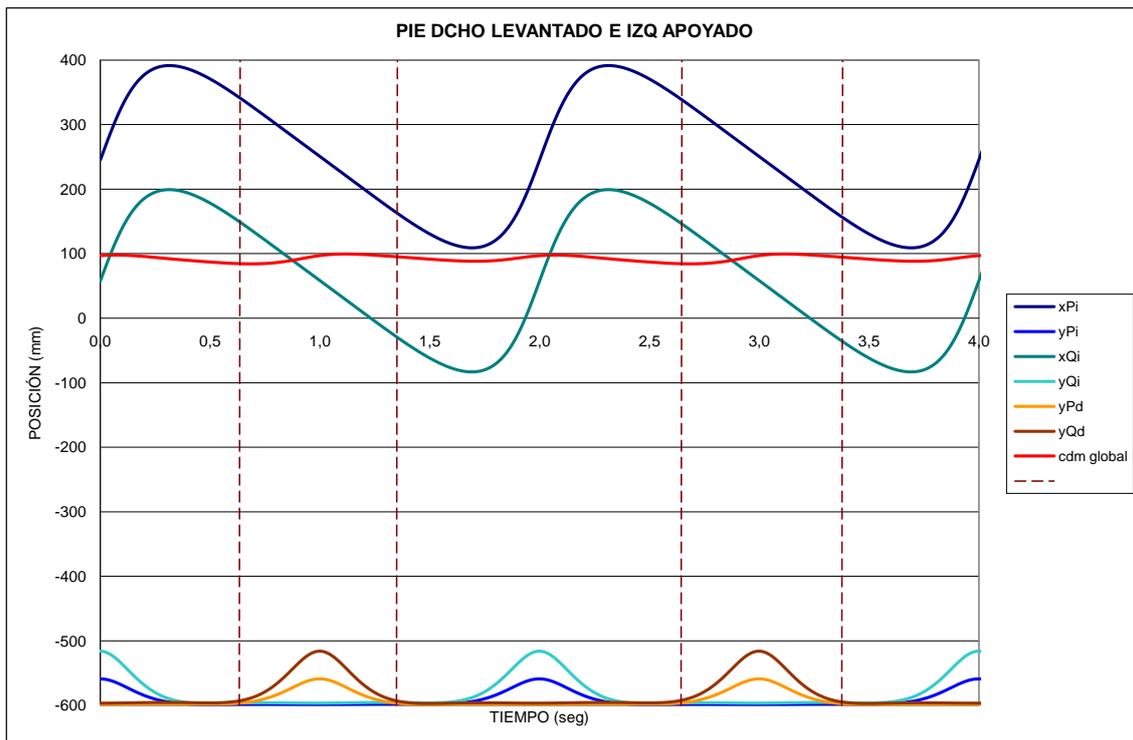


Gráfico 6.35: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando el actuador izquierdo 25mm

Lo comentado en el párrafo anterior podemos verlo en el siguiente gráfico en el que vemos que, al no haberse actuado sobre el mismo, la posición del cdm no varía como en el caso del pie izquierdo, por tanto si en el momento de la frenada del robot, diésemos el paso con el pie derecho, el robot se caería.

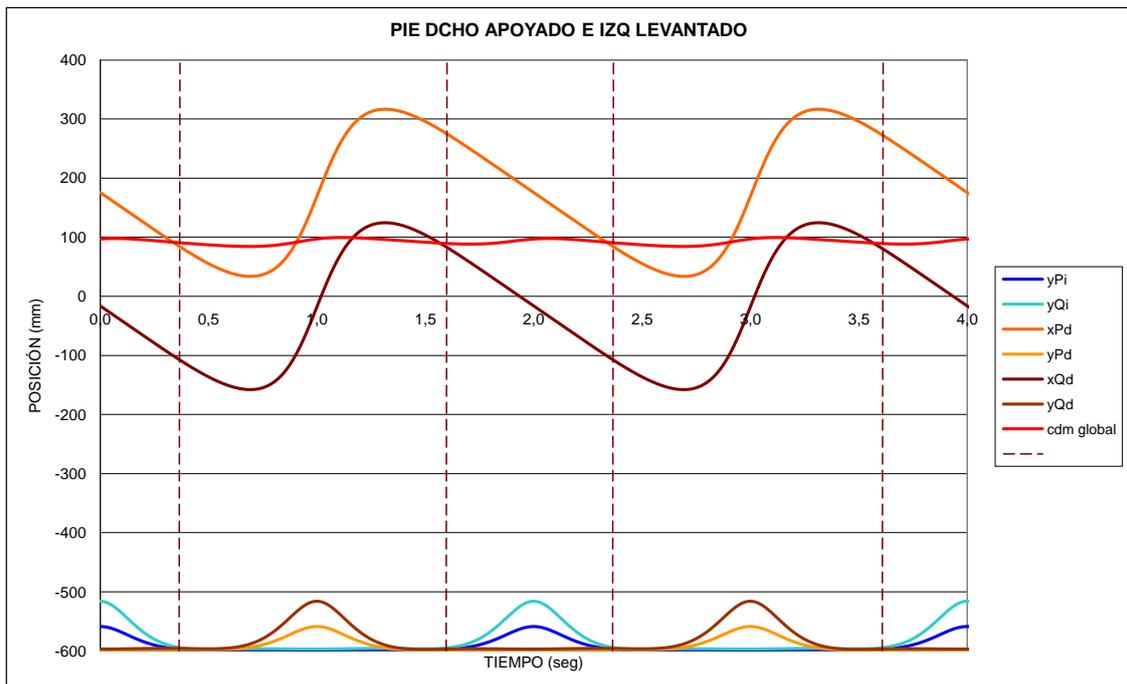


Gráfico 6.36-. Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el actuador izquierdo 25mm

IZQUIERDA -40 DERECHA 0

Al igual que en los casos anteriores, la estabilidad en el momento en el que los dos pies están en el suelo no se ve afectada. Ya que hay un rango muy amplio entre los dos pies para que el robot tenga apoyo suficiente.

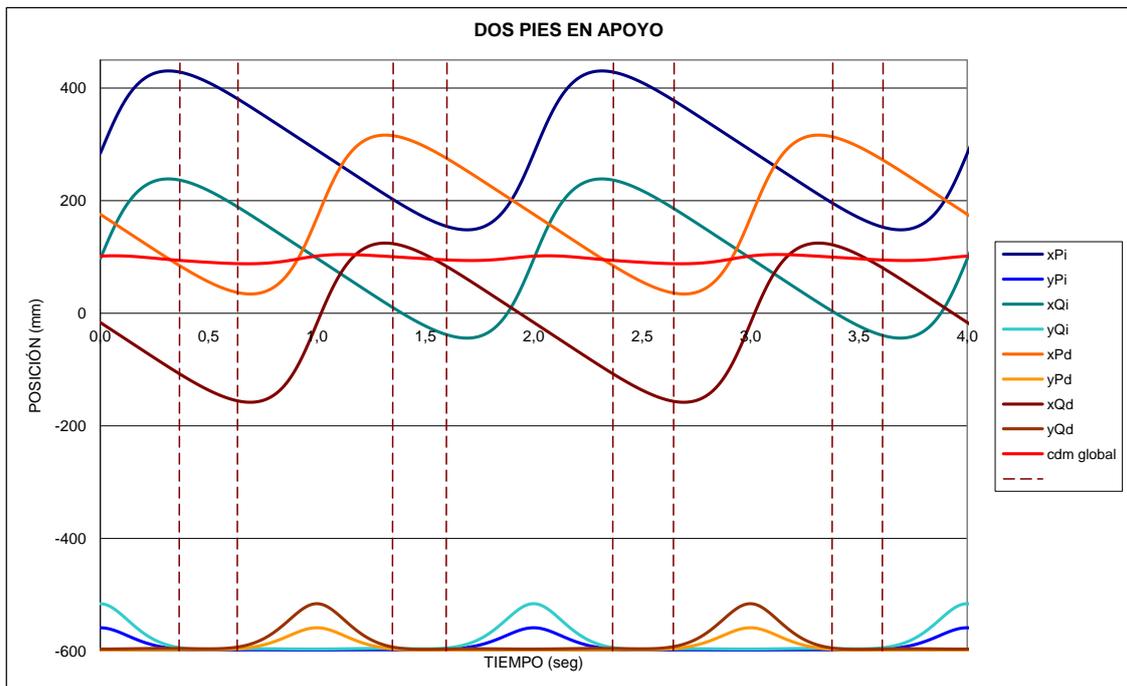


Gráfico 6.37: Dos pies en apoyo-Adelantando el actuador izquierdo 40mm

El problema en este caso es el momento en el que el pie derecho está en vuelo, ya que como vemos, hasta que el pie derecho no está en su punto más alto, el cdm se sale fuera de la zona de pisada del pie izquierdo, por tanto, al estar el pie izquierdo tan adelantado, provoca una inestabilidad en el robot haciendo que éste vuelque hacia atrás, ya que hace que el balanceo sea excesivo y caiga hacia atrás al no tener apoyo suficiente.

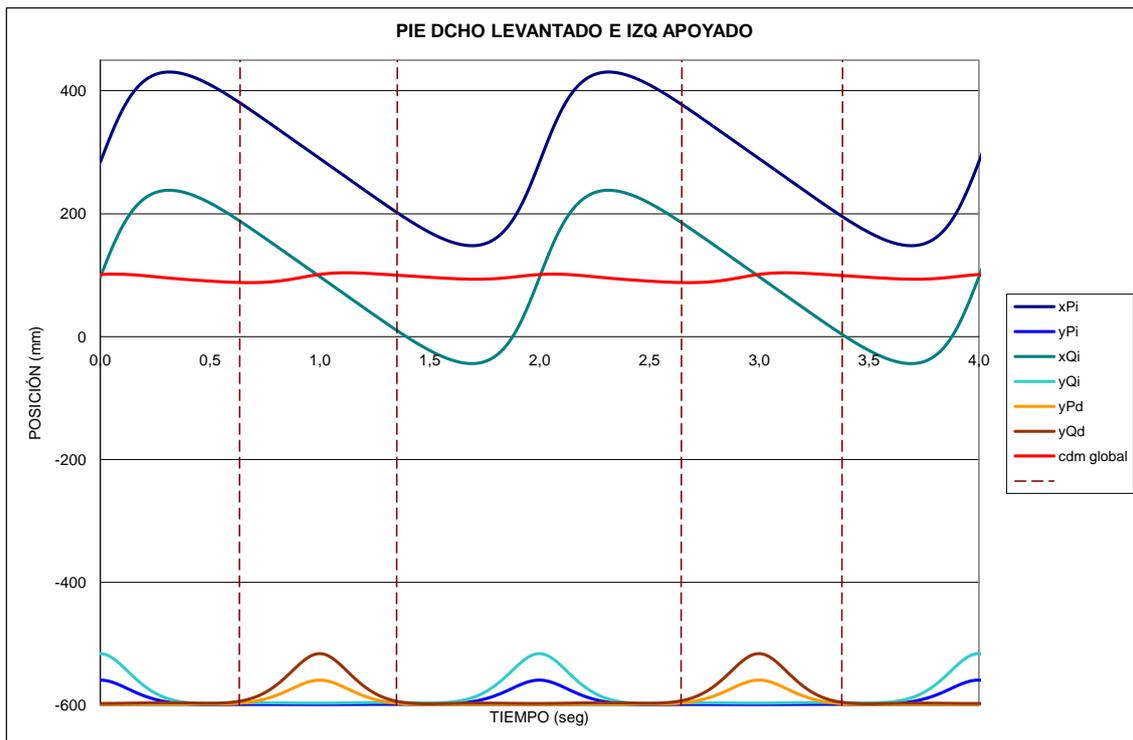


Gráfico 6.38: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando el actuador izquierdo 40mm

En cuanto al gráfico en el que el pie derecho está apoyado y el izquierdo en vuelo, se ve comprometido incluso el momento en el que el pie derecho se encuentra apoyado, ya que la variación extrema del pie izquierdo hace que el cdm también se desvíe hacia delante haciendo que el cdm sobresalga por la parte delantera de la pisada comprometiendo la estabilidad del Pasibot y haciéndole cabecear hacia delante.

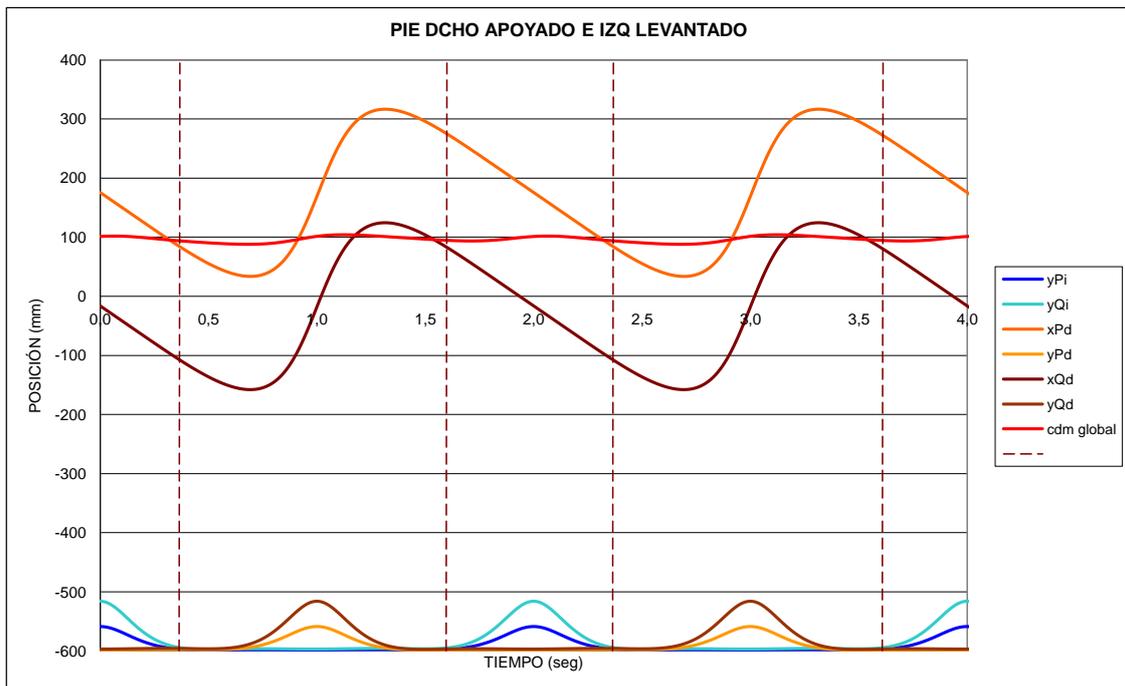


Gráfico 6.39: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el actuador izquierdo 40mm

6.2.3. Atrasando uno de los actuadores.

IZQUIERDA 5 DERECHA 0

Como cabría esperar los datos obtenidos para estos tres casos que a continuación se muestran, van a ser los opuestos a los primeros.

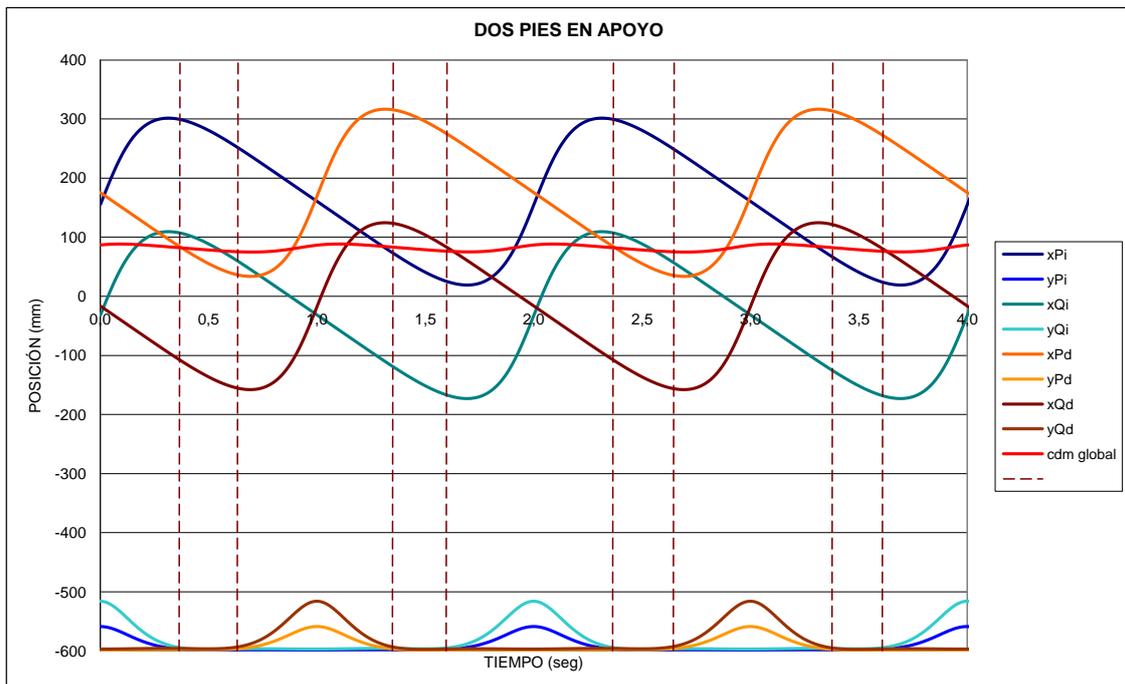


Gráfico 6.40: Dos pies en apoyo- -Atrasando el actuador izquierdo 5mm

Podemos ver que ahora en vez de quedar el cdm por detrás en su parte más avanzada del pie sobre el que se actúa, en este caso la posición extrema del pie queda por detrás en el momento de la entrada y el punto extremo del pie por la parte de atrás queda por detrás. Por todo esto, lo que antes podía servirnos para la frenada del robot, ahora podría servirnos para la arrancada, ya que el balanceo del robot lo podríamos corregir mediante el atraso del actuador o actuadores correspondientes y aumentar el rango en el que se puede mover el cdm del sistema sin comprometer la estabilidad del robot por la zona de atrás.

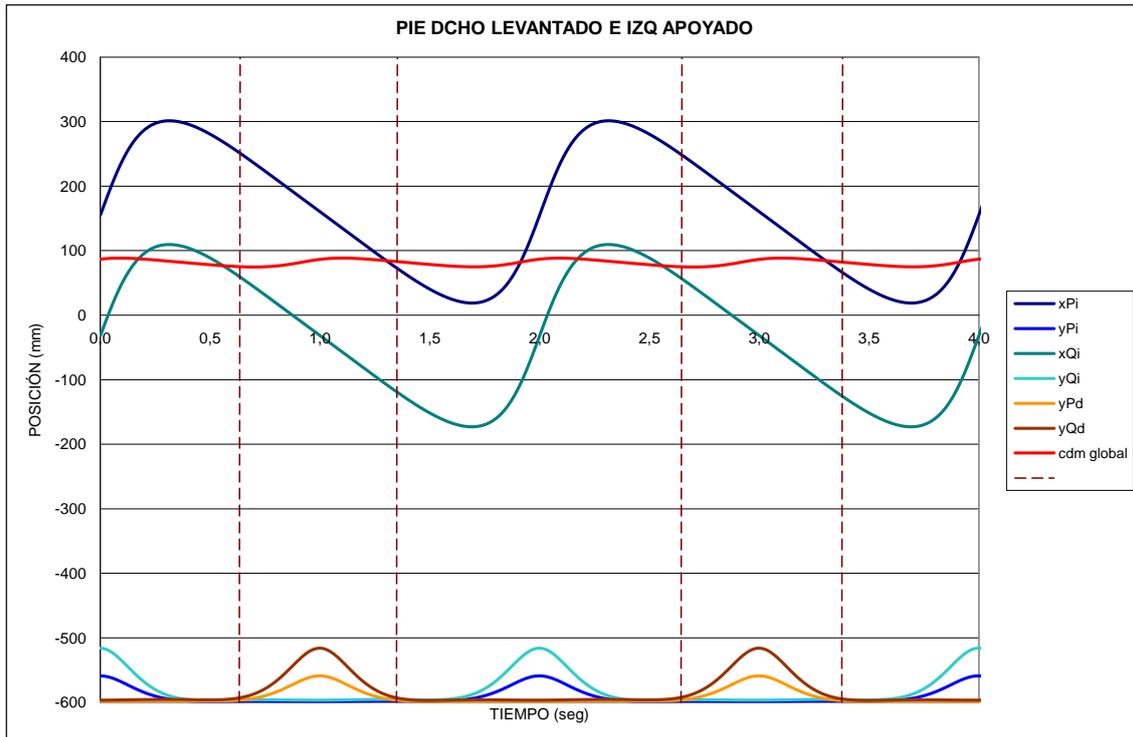


Gráfico 6.41: Pie dcho levantado e izq apoyado--Atrasando el actuador izquierdo 5mm

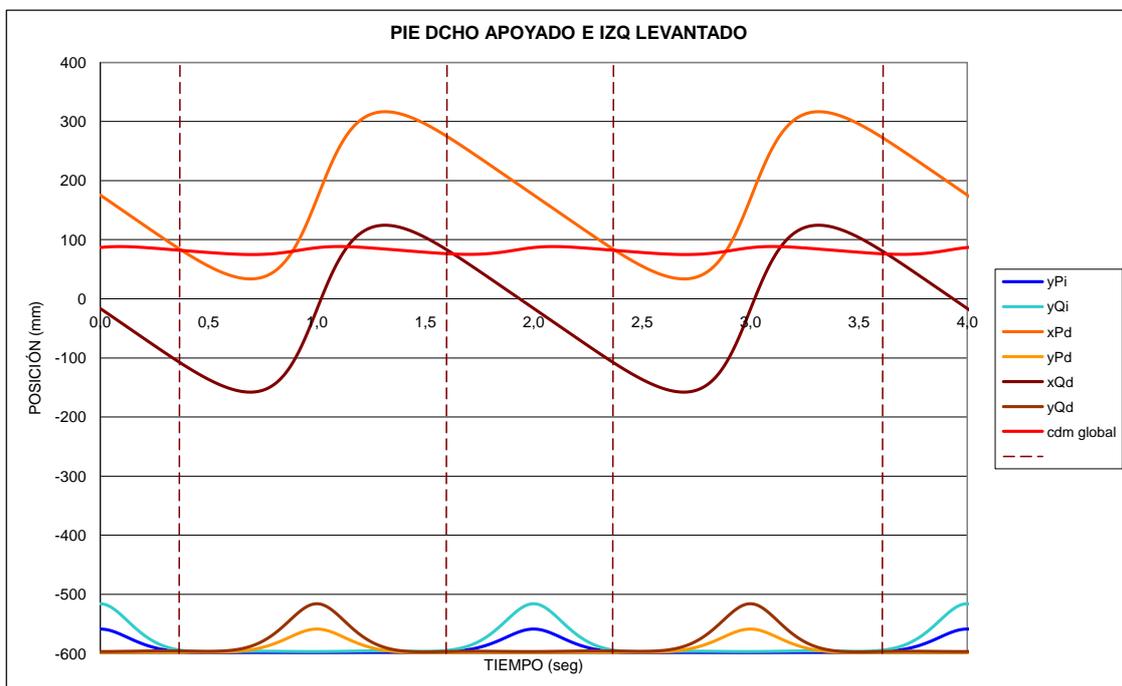


Gráfico 6.42: Pie dcho apoyado e izq levantado--Atrasando el actuador izquierdo 5mm

IZQUIERDA 25 DERECHA 0

Para el siguiente gráfico, en el cual se muestra la posición del pie izquierdo habiendo modificado la posición de su actuador hacia atrás, vemos que el cdm global del sistema se sale de los extremos del pie izquierdo en el momento de su apoyo por la parte delantera. Por tanto, podemos afirmar que tanto a velocidades bajas en las cuales tengamos un balanceo hacia atrás del robot acusado, como puede ser en el arranque del mismo, éste ganará en estabilidad a medida que actuemos de esta manera. En este último caso vemos que no hay ningún problema ya que el cdm se queda siempre por detrás del extremo trasero del pie. Eso sí tendríamos que actuar sobre el pie que vaya a estar más atrasado en el momento del arranque o bien actuar sobre los dos pies en el momento en que cada uno esté en sus posiciones más atrasadas.

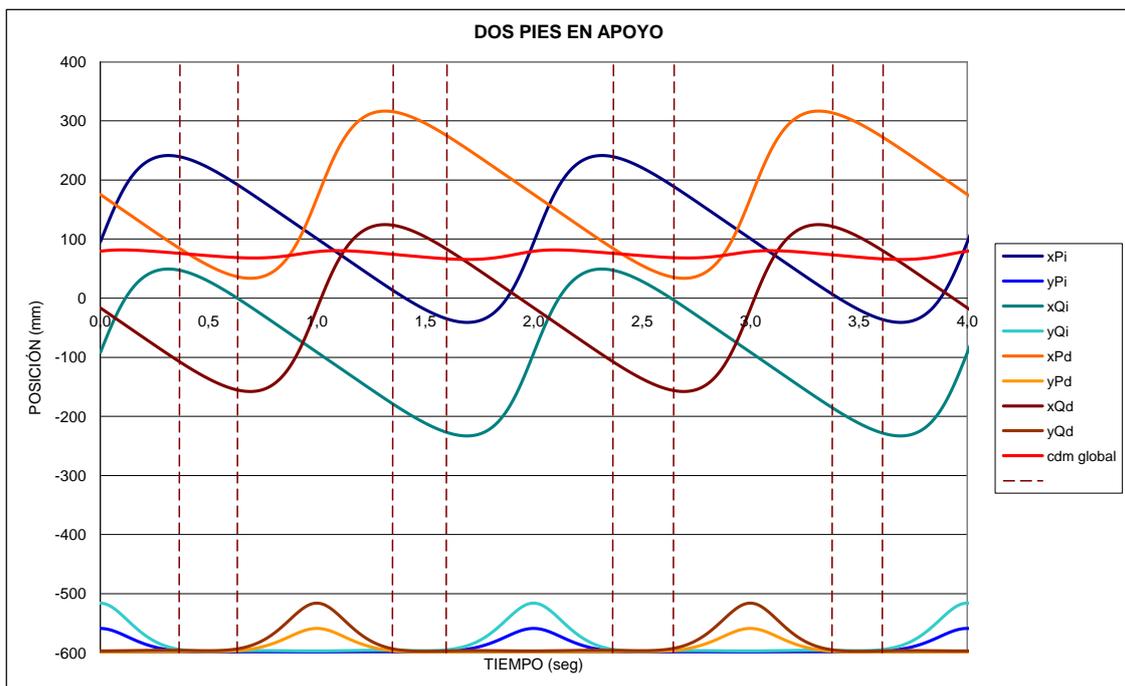


Gráfico 6.43: Dos pies en apoyo--Atrasando el actuador izquierdo 25mm

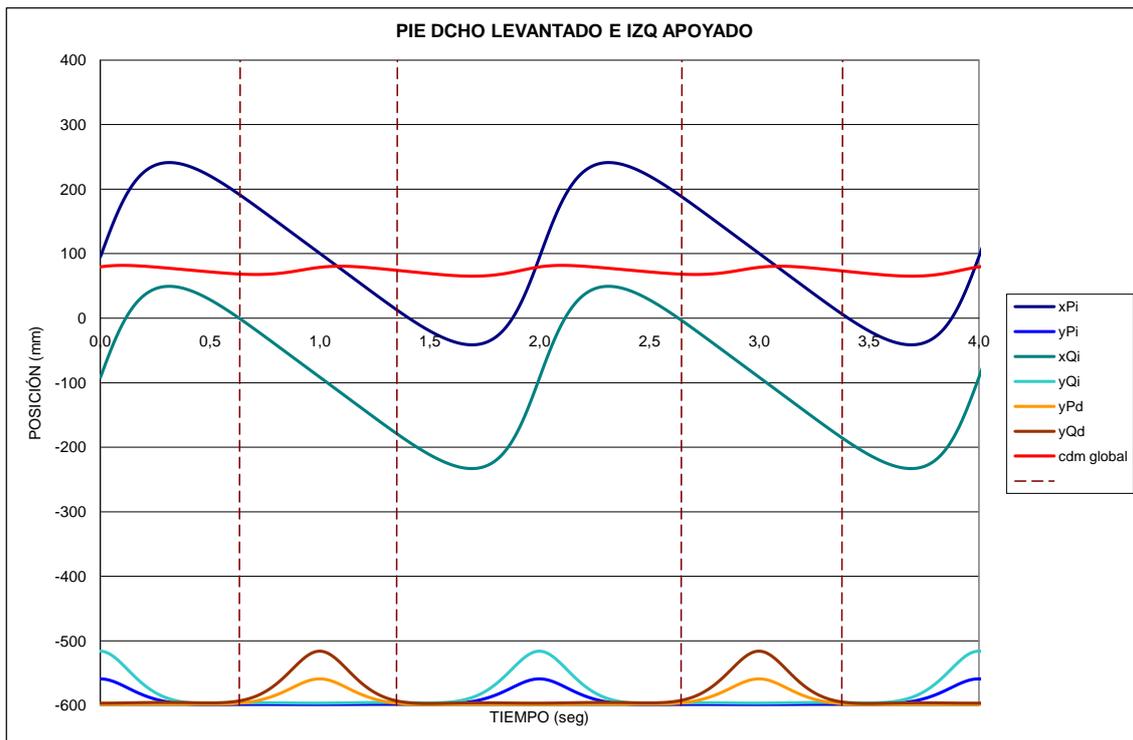


Gráfico 6.44: Pie dcho levantado e izq apoyado--Atrasando el actuador izquierdo 25mm

Lo comentado en el párrafo anterior podemos verlo en el siguiente gráfico en el que vemos que, al no haberse actuado sobre el mismo, la posición del cdm no varía como en el caso del pie izquierdo, por tanto si en el momento de la frenada del robot, diésemos el paso con el pie derecho, el robot se caería.

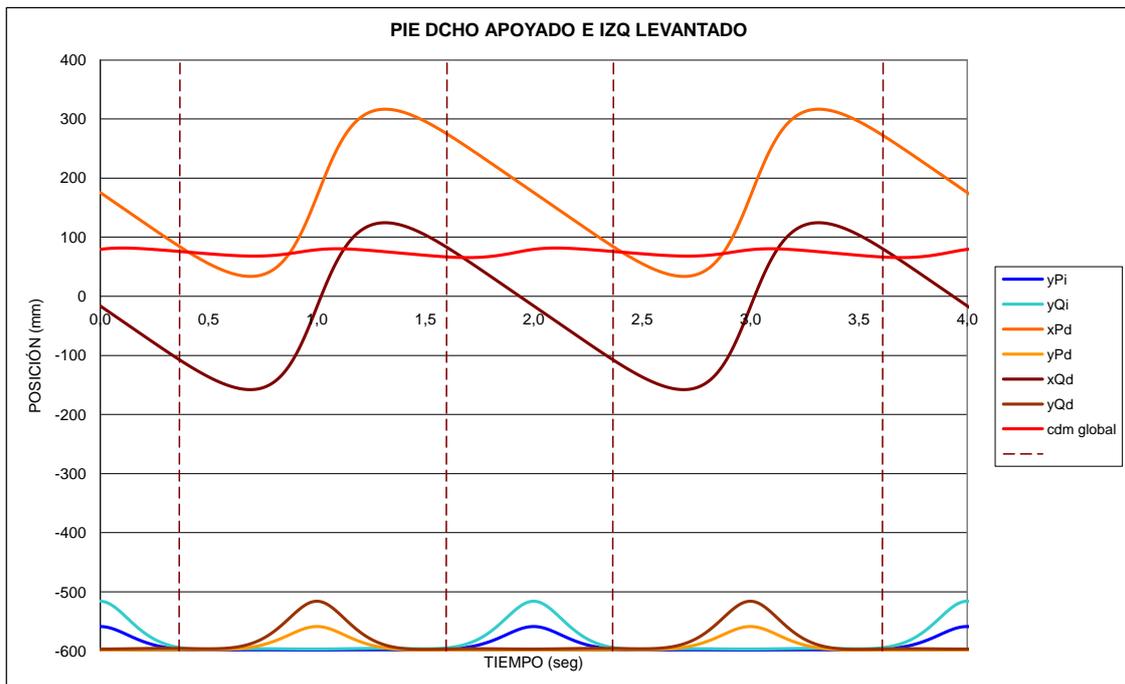


Gráfico 6.45: Pie dcho apoyado e izq levantado--Atrasando el actuador izquierdo 25mm

IZQUIERDA 40 DERECHA 0

Al igual que en los casos anteriores, la estabilidad en el momento en el que los dos pies están en el suelo no se ve afectada. Ya que hay un rango muy amplio entre los dos pies para que el robot tenga apoyo suficiente.

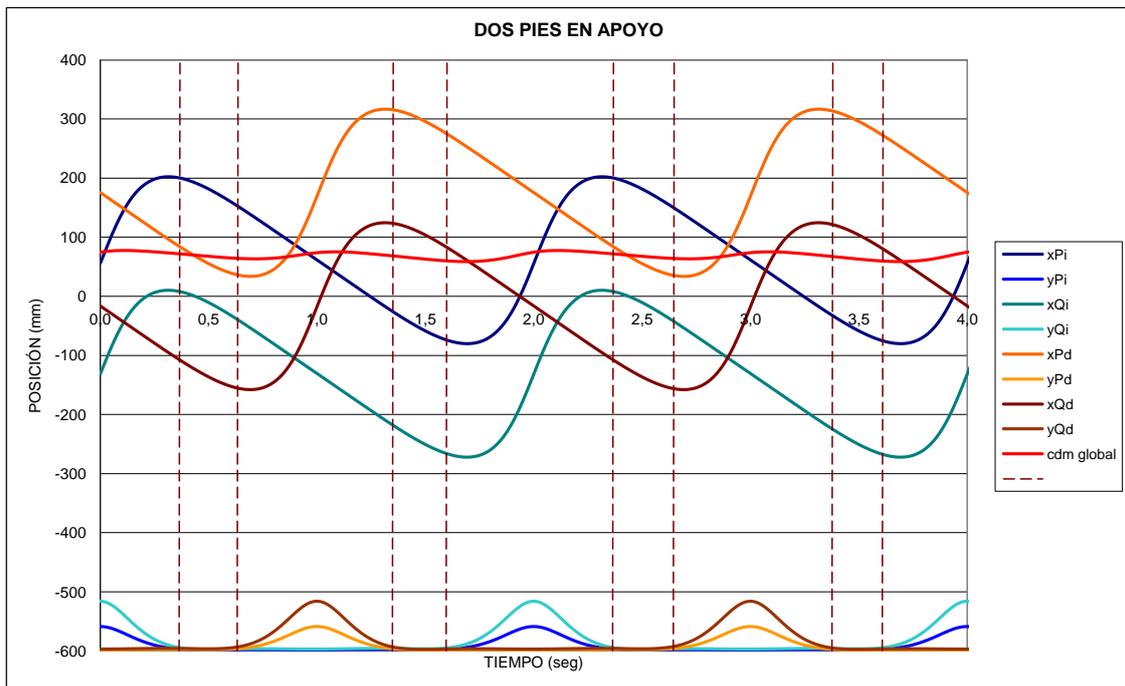


Gráfico 6.46: Dos pies en apoyo--Atrasando el actuador izquierdo 40mm

Al igual que cuando actuábamos hacia delante, el problema en este caso es el momento en el que el pie derecho está en vuelo, ya que como vemos, hasta que el pie derecho no está en su punto más alto, el cdm se sale fuera de la zona de pisada del pie izquierdo, por tanto, al estar el pie izquierdo tan adelantado, provoca una inestabilidad en el robot haciendo que éste vuelque hacia delante, ya que hace que el balanceo sea excesivo y caiga hacia delante al no tener apoyo suficiente.

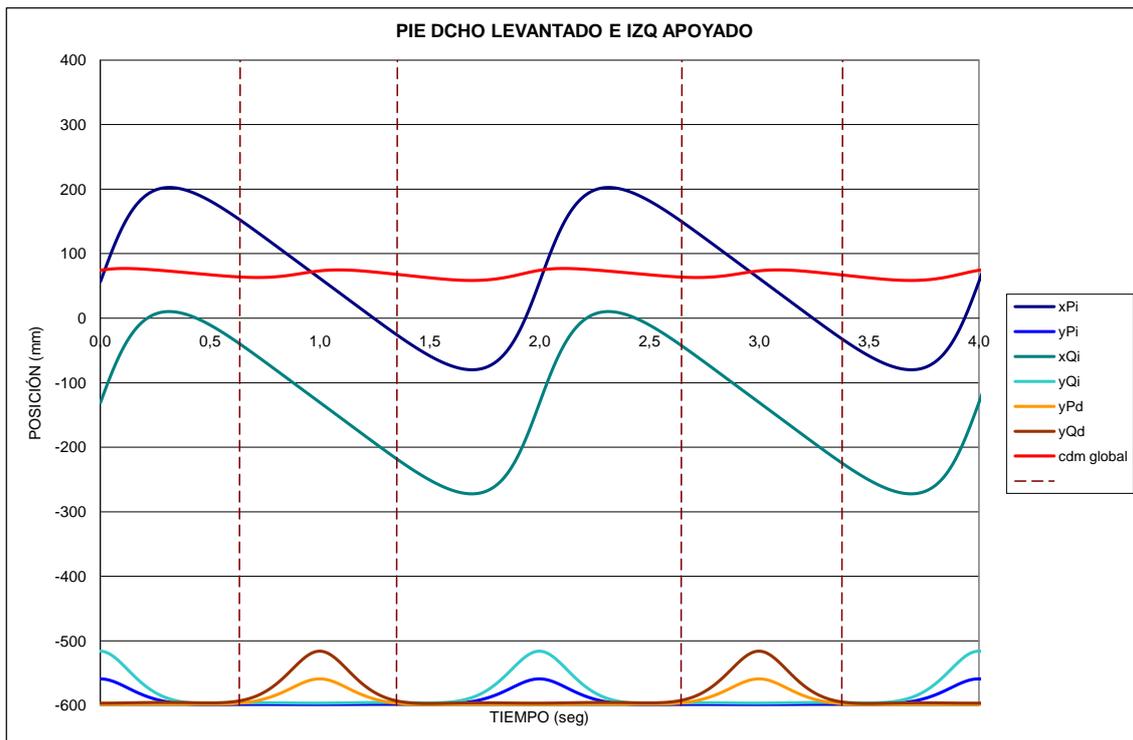


Gráfico 6.47: Pie dcho levantado e izq apoyado--Atrasando el actuador izquierdo 40mm

En cuanto al gráfico en el que el pie derecho está apoyado y el izquierdo en vuelo, se ve comprometido incluso el momento en el que el pie derecho se encuentra apoyado, ya que la variación extrema del pie izquierdo hace que el cdm también se desvíe hacia delante haciendo que el cdm sobresalga por la parte delantera de la pisada comprometiendo la estabilidad del Pasibot y haciéndole cabecear hacia delante.

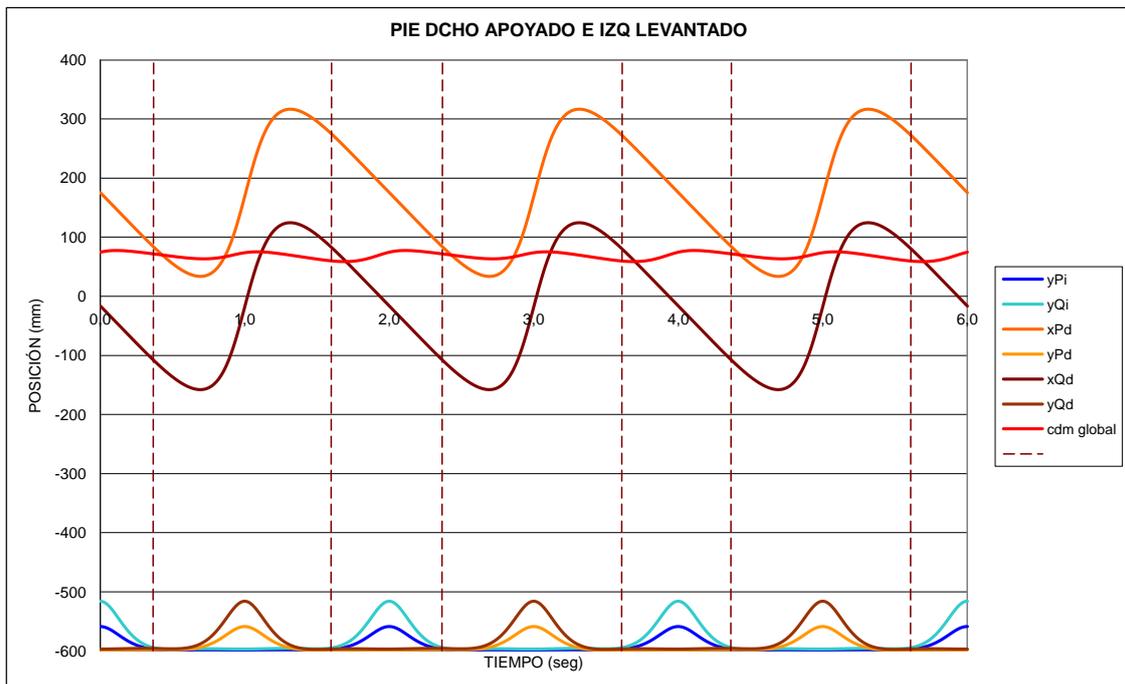


Gráfico 6.48: Pie dcho apoyado e izq levantado-Atrasando el actuador izquierdo 40mm

6.2.4. Adelantando ambos actuadores.

A continuación haremos el estudio para movimientos simétricos en los actuadores, primero moveremos los dos actuadores hacia delante y posteriormente moveremos los dos actuadores hacia atrás. De esta manera y retomando los datos de las evoluciones anteriormente citadas, podremos llegar a las conclusiones de cómo podemos actuar sobre el robot para influir en la estabilidad del mismo.

La operativa a seguir será la misma que en los casos anteriores. Hemos cogido una población reducida de datos entre -40 y 40 mm de desplazamiento de los actuadores cogidos de 5 en 5 mm, de los cuales sólo representaremos los de -40, -25, -5, 5, 25 y 40 mm. El resto de las gráficas, al igual que en los casos anteriores, se expondrán en el ANEXO E.

DERECHA -5 IZQUIERDA -5

En los casos que nos interesan ahora veremos que los 2 últimos gráficos de cada caso son simétricos. Estos se expondrán de todas formas debido a la mejor comprensión de los datos si los mostramos por partes y no como en el primero de los gráficos en los cuales están representados todos los datos, haciendo la lectura del mismo más complicada. No obstante sabemos que, evidentemente, al actuar sobre los dos actuadores simétricamente, el resultado que obtendremos para una y otra pierna van a ser los mismos.

En la primera gráfica veremos, como en los casos anteriores, que el momento en el que ambos pies están en el suelo no hay ningún problema en la estabilidad del robot ya que el cdm queda perfectamente encerrado entre las posiciones de apoyo del robot.

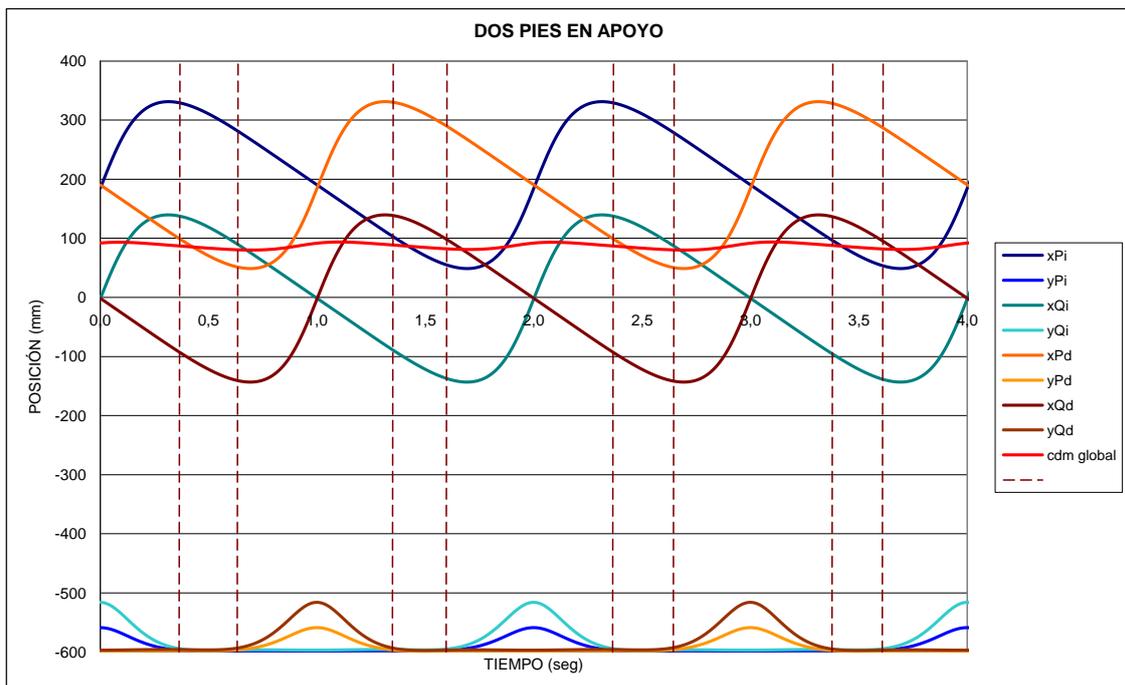


Gráfico 6.49: Dos pies en apoyo—Adelantando ambos actuadores 5mm

Aislando la posición de las piernas izquierda y derecha obtenemos los 2 gráficos expuestos a continuación. En el primero vemos el momento en el que el pie izquierdo está apoyado y el derecho en vuelo. Si nos vamos ahora a la parte superior del gráfico vemos que el cdm queda por detrás del pie más atrasado ya que hemos cambiado la posición del actuador izquierdo haciendo

que el robot alargue el paso por la zona delantera de la pisada. Por tanto, conseguimos ganar estabilidad en casos de frenada, ya que aunque por inercias el centro de masa varíe hacia delante, tendremos espacio suficiente como para absorber esa variación dentro del apoyo del robot haciéndole ganar estabilidad en ese caso. Al igual que veíamos en los casos anteriores de adelanto del actuador, la parte trasera de la pisada sigue ocupando la misma posición.

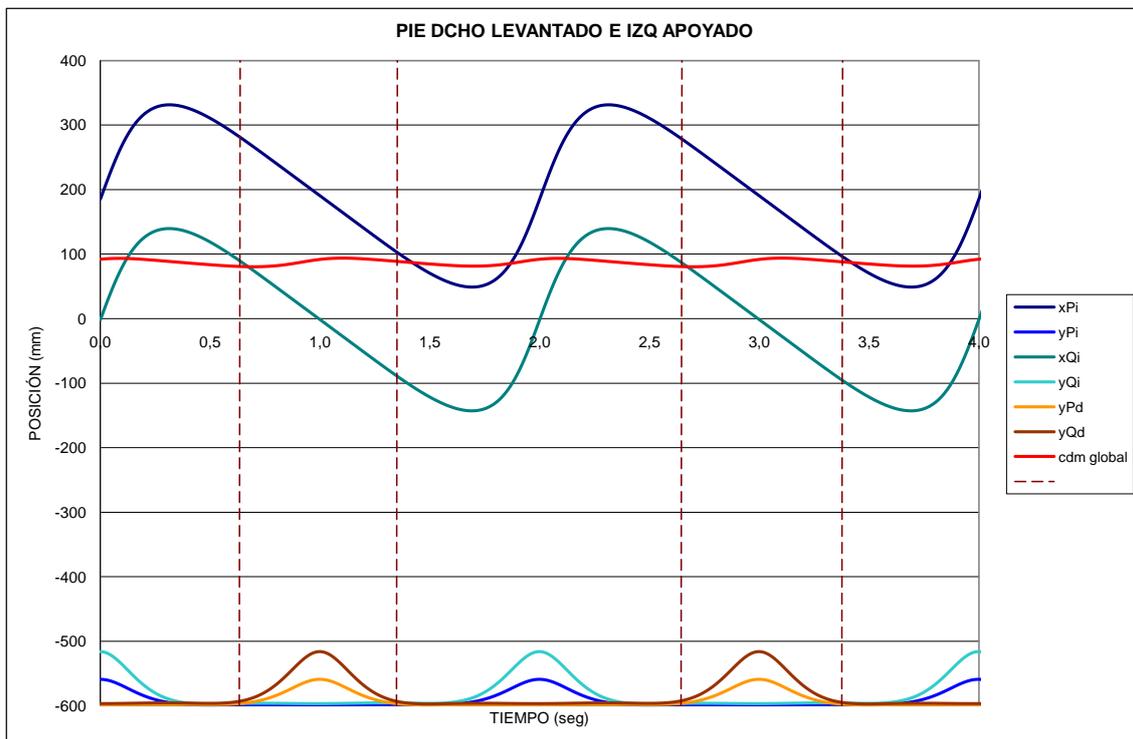


Gráfico 6.50: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando ambos actuadores 5mm

Como podemos observar, el comportamiento por parte de la otra pierna es totalmente simétrico, por tanto, es totalmente extrapolable el comentario anterior pero con el otro lado del Pasibot.

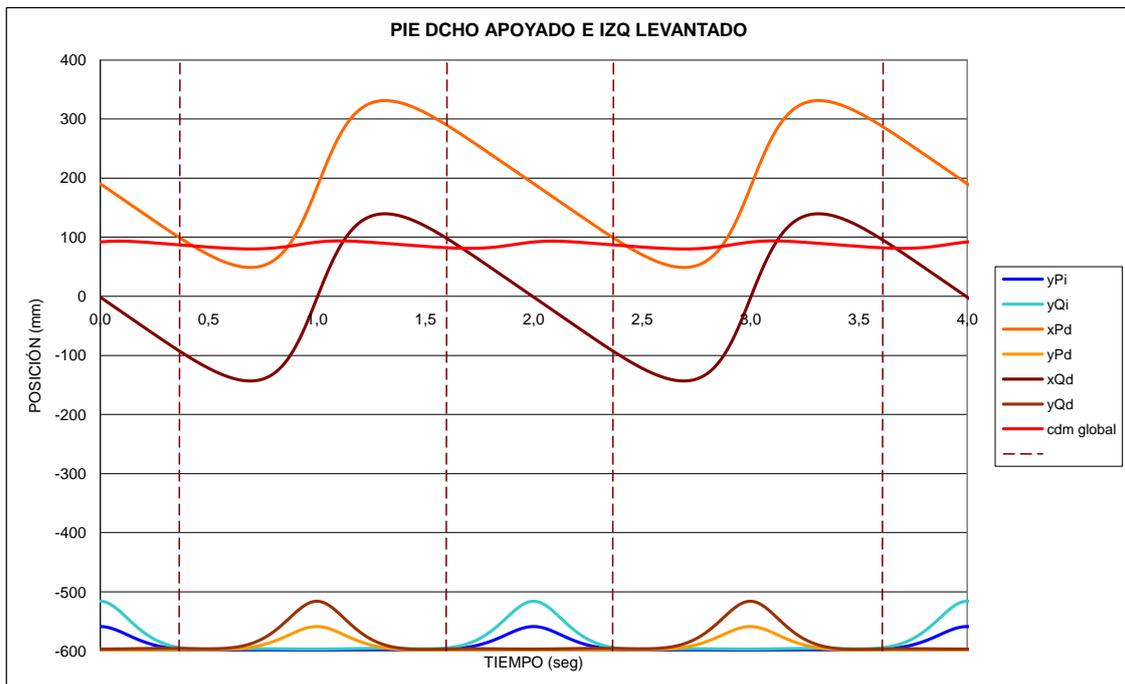


Gráfico 6.51: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando ambos actuadores 5mm

DERECHA -25 IZQUIERDA -25

En el caso actual vemos que la estabilidad con los dos pies apoyados se garantiza por un margen mucho menor que en los casos anteriores. Podemos apreciar que en el momento en el que la pierna izquierda está en su posición más atrasada, el cdm queda un poco por detrás de la parte delantera del pie, quedando por tanto el pie izquierdo encargado de proporcionar equilibrio al robot ya que el cdm en dicha posición queda solamente dentro de la pisada del pie izquierdo. Exactamente igual pasa en el caso opuesto, es decir, el robot es mantenido en equilibrio siempre por parte del pie más retrasado de los dos en el movimiento. Por tanto en este caso en el que ambos actuadores están desplazados 25 mm hacia delante respecto a la posición inicial, los pies que quedan por delante en el momento del doble apoyo no influyen en el equilibrio del robot.

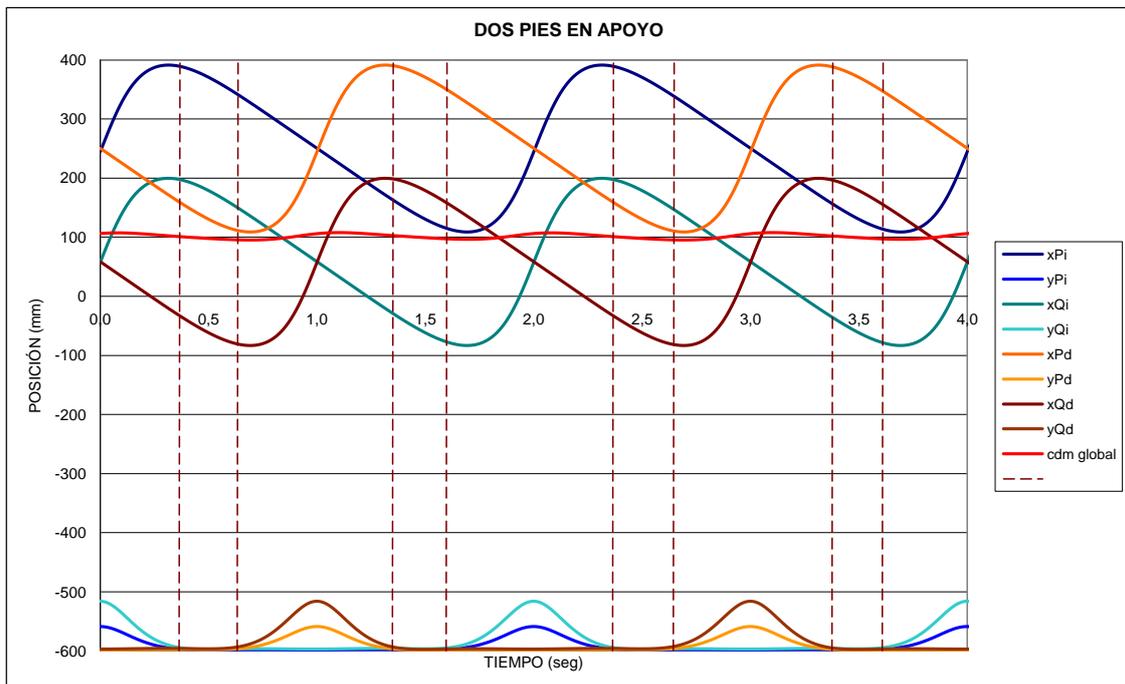


Gráfico 6.52: Dos pies en apoyo- Adelantando ambos actuadores 25mm

En la gráfica siguiente podemos observar que la punta delantera del pie izquierdo nunca va más atrás de la posición del cdm. Esto hace que el Pasibot tienda a balancearse hacia delante, ya que en el momento del vuelo del pie izquierdo, éste sobresale por la parte delantera respecto al cdm. Además observamos que en el momento en el que levanta el pie derecho, el cdm sobresale por la parte trasera del pie que está apoyado haciendo que el robot se balancee hacia atrás produciendo una posible caída.

Queda claro que esta posición del actuador sería conveniente para un movimiento de frenada ya que no hay problema en que el robot balancee hacia delante absorbiendo la inercia del robot, pero en el caso en el que robot esté en el momento de arrancada, la posición de los actuadores haría que éste cayese hacia atrás.

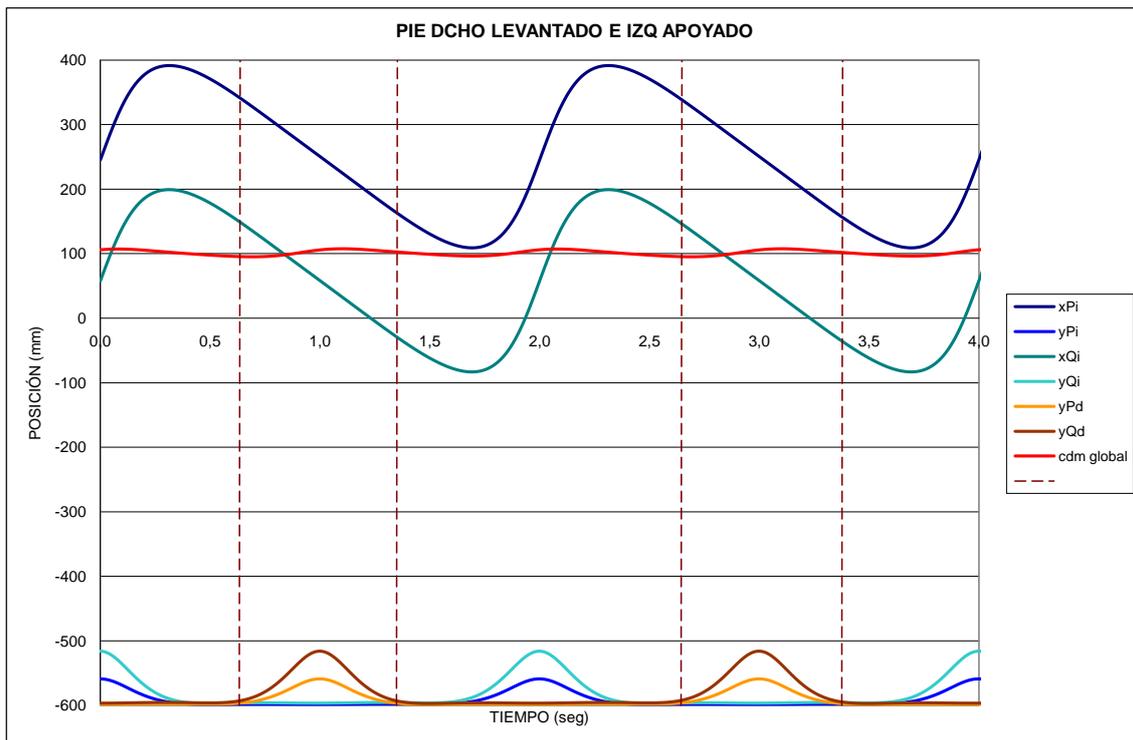


Gráfico 6.53: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando ambos actuadores 25mm

Los mismos comentarios anteriores serían válidos para el momento de vuelo del pie izquierdo.

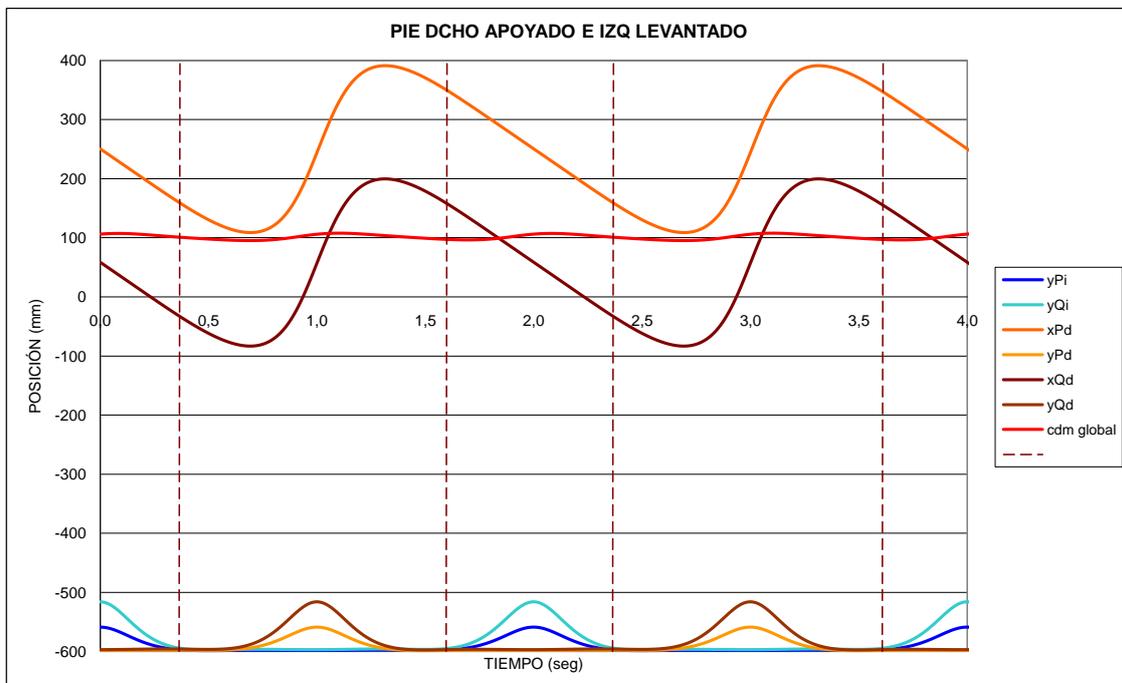


Gráfico 6.54: Pie dcho apoyado e izq levantado Adelantando ambos actuadores 25mm

DERECHA -40 IZQUIERDA -40

Al igual que en el caso anterior vemos que la estabilidad con los dos pies apoyados se garantiza por un margen mucho menor que en los casos anteriores. Igualmente observamos que durante el movimiento de apoyo de los pies, el único que hace que el robot mantenga el equilibrio es el más retrasado de los dos.

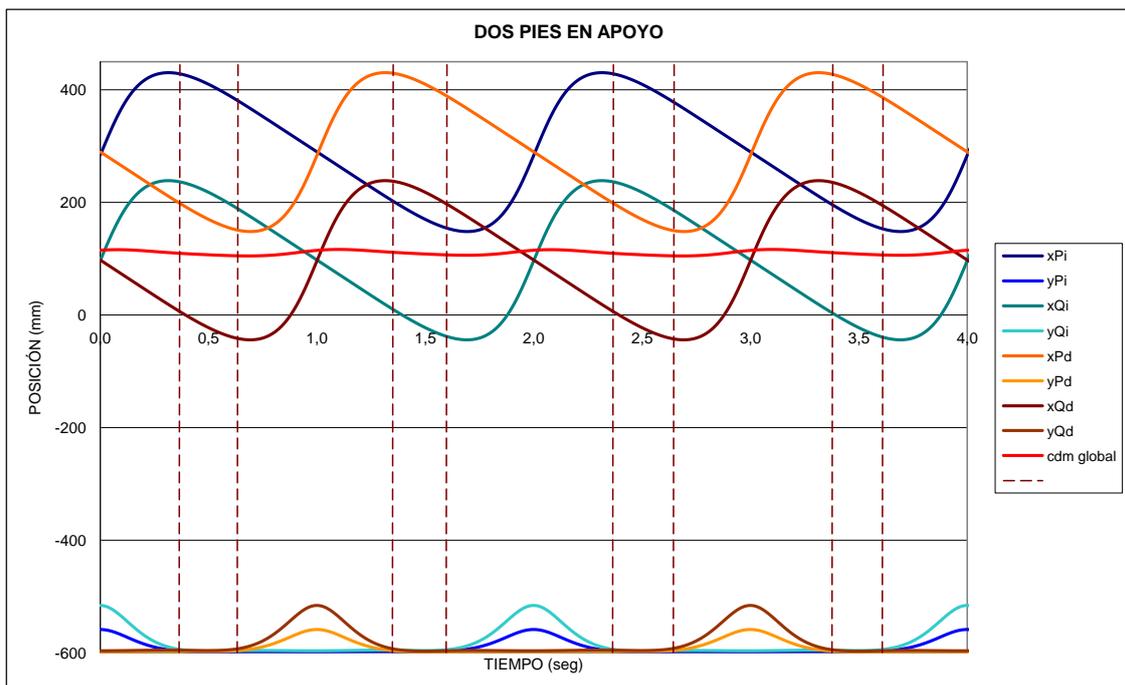


Gráfico 6.55: Dos pies en apoyo- Adelantando ambos actuadores 40mm

En la gráfica siguiente podemos observar, al igual que en el caso anterior, que la punta delantera del pie izquierdo nunca va más atrás de la posición del cdm. Esto hace que el Pasibot tienda a balancearse hacia delante, ya que en el momento del vuelo del pie izquierdo, éste sobresale por la parte delantera respecto al cdm. Además observamos que en el momento en el que levanta el pie derecho, el cdm sobresale por la parte trasera del pie que está apoyado haciendo que el robot se balancee hacia atrás produciendo una posible caída.

Al igual que en otros casos en los que hemos hecho avanzar o retroceder el actuador hasta su posición máxima, vemos que el robot no va a ser lo suficientemente estable como para continuar una marcha continuada con

esta posición de los actuadores. Esto lo vemos en las 2 gráficas siguientes, en las que podemos apreciar que durante el momento de apoyo del pie izquierdo, éste se sale de la zona sobre la que caería el cdm haciendo que el robot bascule hacia atrás produciéndose la caída irremediablemente.

Sólo sería posible esta disposición de los actuadores en un movimiento de frenada. Movimiento en el que la inercia del robot induciría al cdm a desplazarse hacia delante, quedando este encerrado entre los pies o en la longitud de uno de ellos debido a que en ningún momento el cdm sobrepasaría la punta delantera del pie apoyado en cada caso.

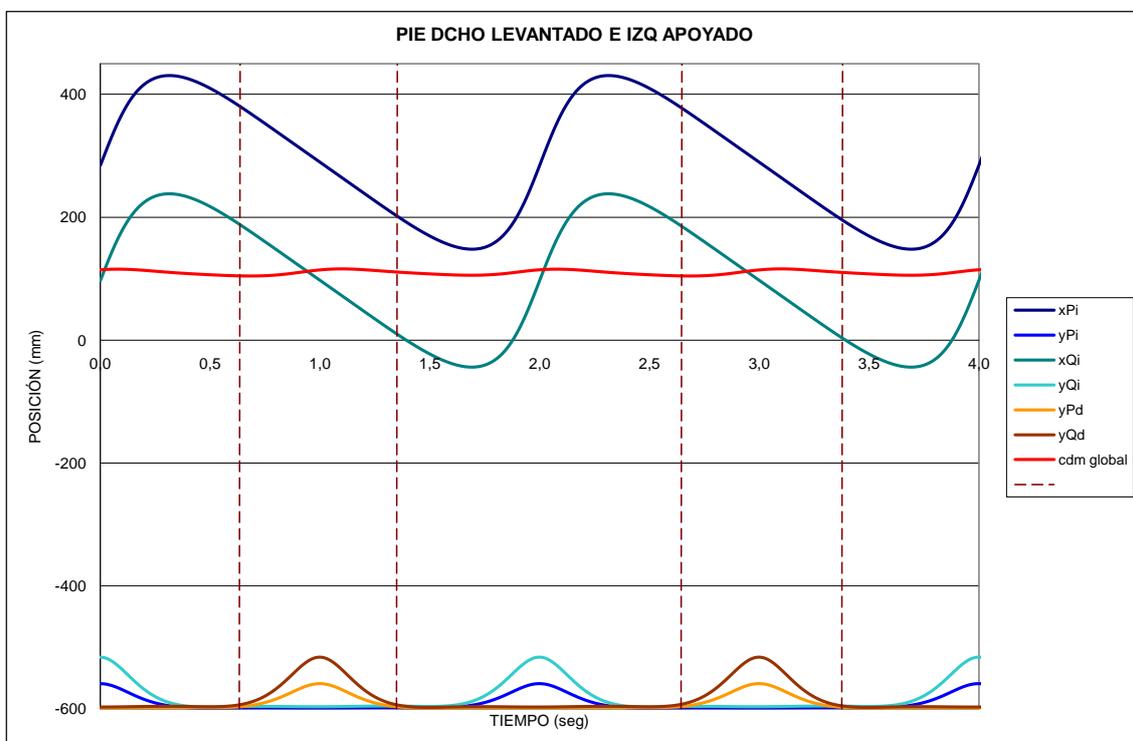


Gráfico 6.56: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando ambos actuadores 40mm

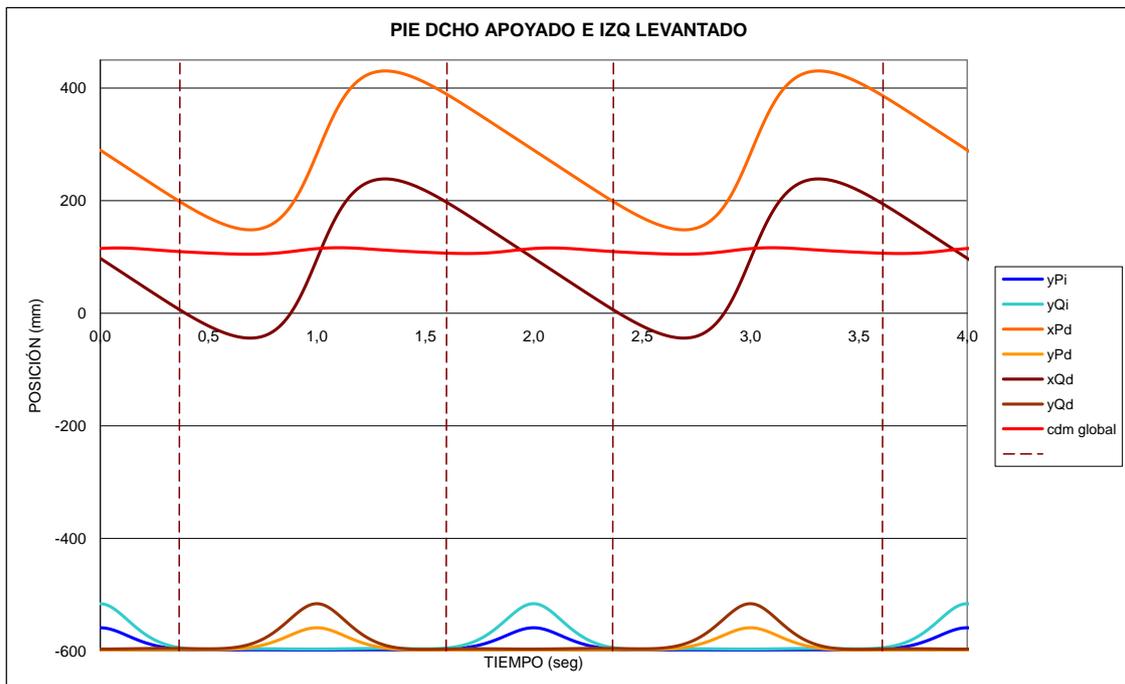


Gráfico 6.57: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando ambos actuadores 40mm

6.2.5. Atrasando ambos actuadores.

En este caso que ahora nos ocupa, realizaremos los mismos movimientos que en el caso en el que adelantábamos ambos actuadores simétricamente. En este caso encontraremos que los resultados serán opuestos a los anteriores, haciendo que éste sea estable en movimientos de arrancada en vez de serlo en la frenada.

De igual manera, veremos que los 2 últimos gráficos de cada uno de los casos serán simétricos pero en el sentido opuesto a como variaban anteriormente. Esto es debido a la actuación simétrica que realizaremos sobre ambos actuadores.

DERECHA 5 IZQUIERDA 5

En la primera gráfica veremos, como en los casos anteriores, que el momento en el que ambos pies están en el suelo no hay ningún problema en la estabilidad del robot ya que el cdm queda perfectamente encerrado entre las posiciones de apoyo del robot.

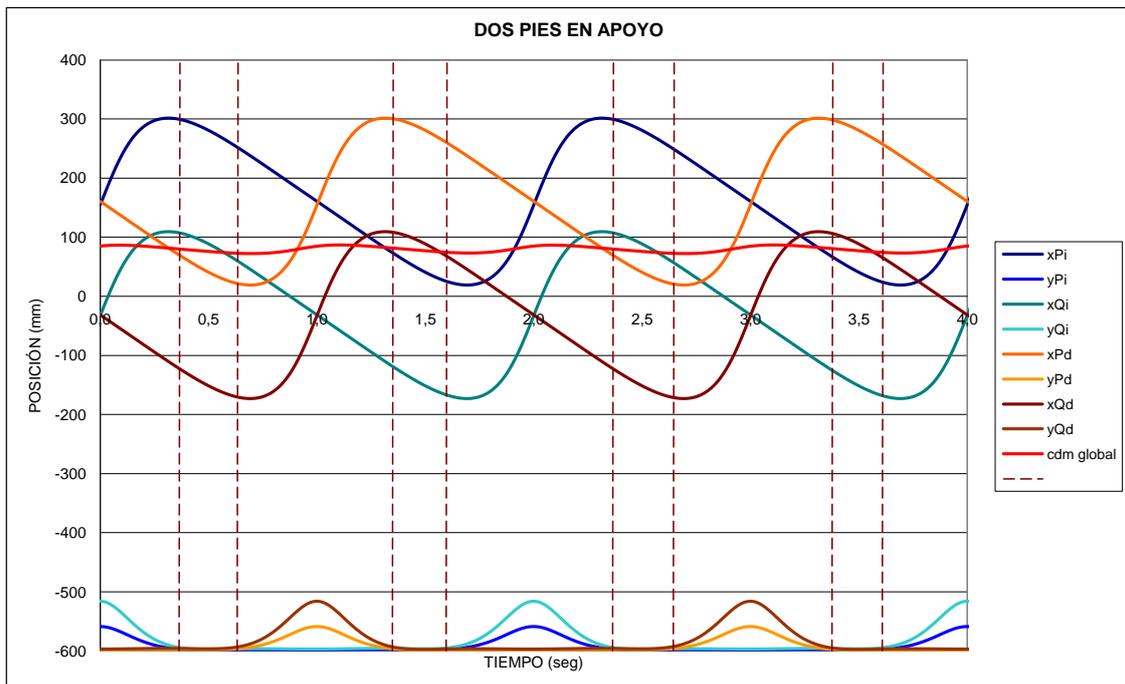


Gráfico 6.58: Dos pies en apoyo- Atrasando ambos actuadores 5mm

Aislando la posición de las piernas izquierda y derecha obtenemos los 2 gráficos expuestos a continuación. En el primero vemos el momento en el que el pie izquierdo está apoyado y el derecho en vuelo. Si nos vamos ahora a la parte superior del gráfico vemos que el cdm queda por delante del pie más atrasado ya que hemos cambiado la posición del actuador izquierdo haciendo que el robot alargue el paso por la zona trasera de la pisada. Por tanto, conseguimos ganar estabilidad en casos de arrancada, ya que aunque por inercias el centro de masa varíe hacia atrás, tendremos espacio suficiente como para absorber esa variación dentro del apoyo del robot haciéndole ganar estabilidad en ese caso.

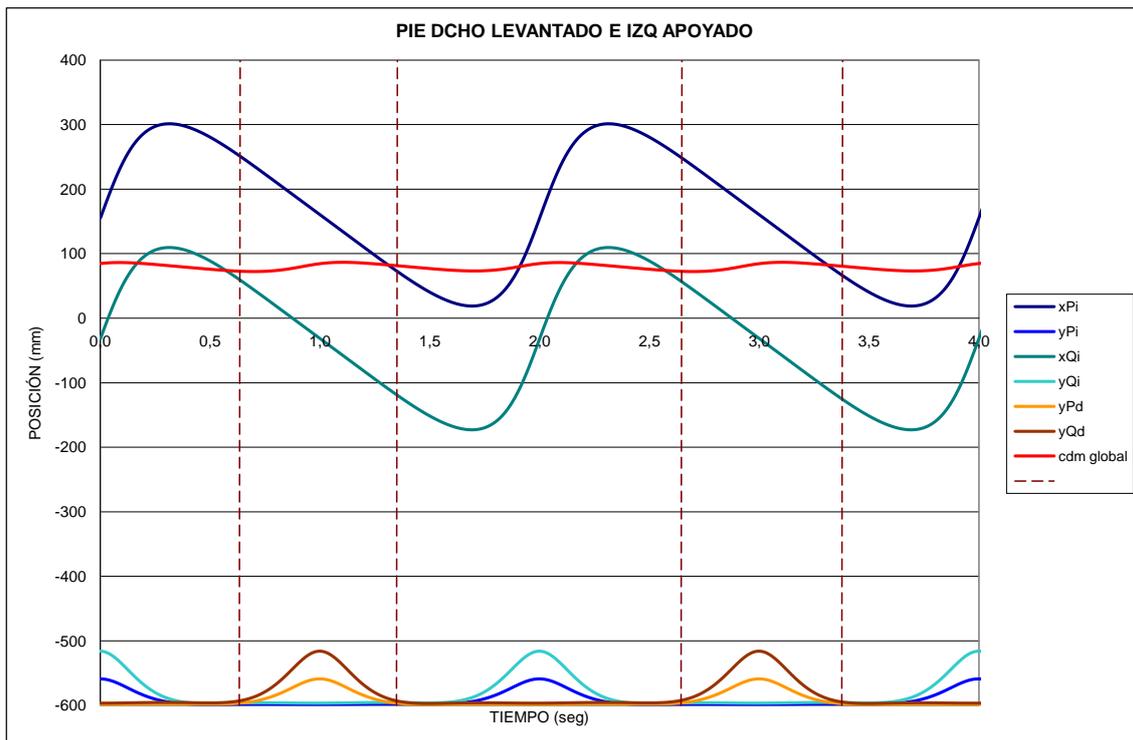


Gráfico 6.59: Pie dcho levantado e izq apoyado- Atrasando ambos actuadores 5mm

Como podemos observar, el comportamiento por parte de la otra pierna es totalmente simétrico, por tanto, es totalmente extrapolable el comentario anterior pero con el otro lado del Pasibot.

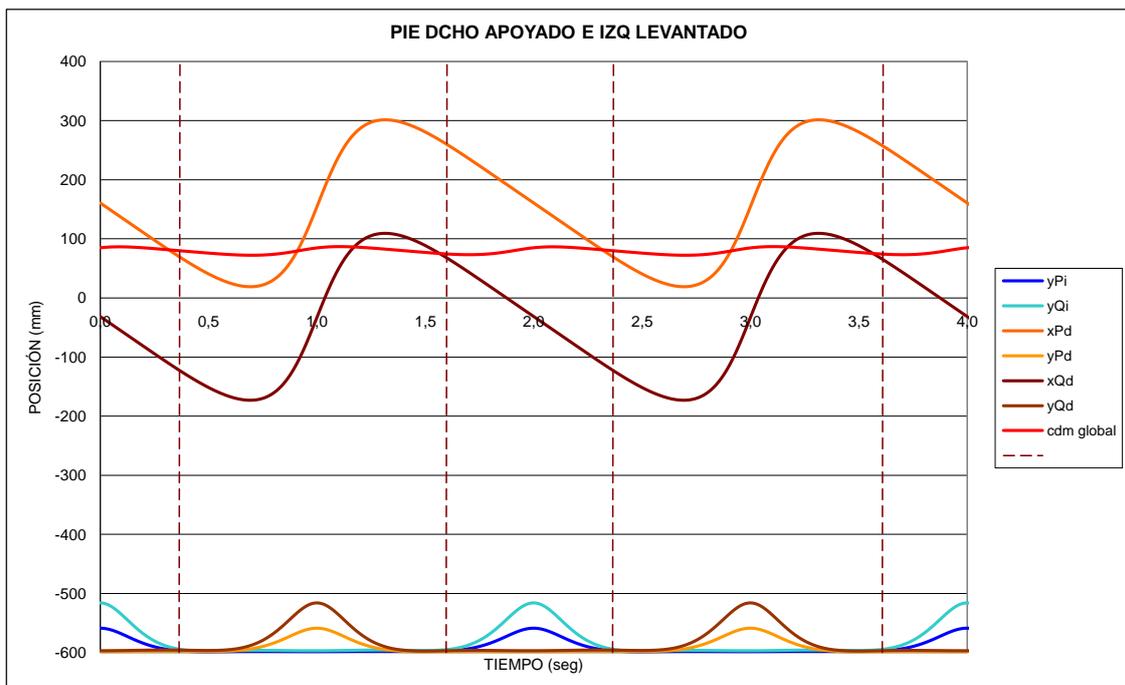


Gráfico 6.60: Pie dcho apoyado e izq levantado- Atrasando ambos actuadores 5mm

DERECHA 25 IZQUIERDA 25

En este caso vemos que el pie que va por delante en la pisada es el que se va a encargar de mantener el equilibrio del robot. Siempre que el pie hace contacto con el suelo, después del periodo de vuelo, el cdm cae en las inmediaciones de este pie saliéndose por completo de la zona de influencia del pie más retrasado. Por tanto, podemos afirmar que el pie más retrasado en el momento del doble apoyo será el encargado de mantener el equilibrio del robot.

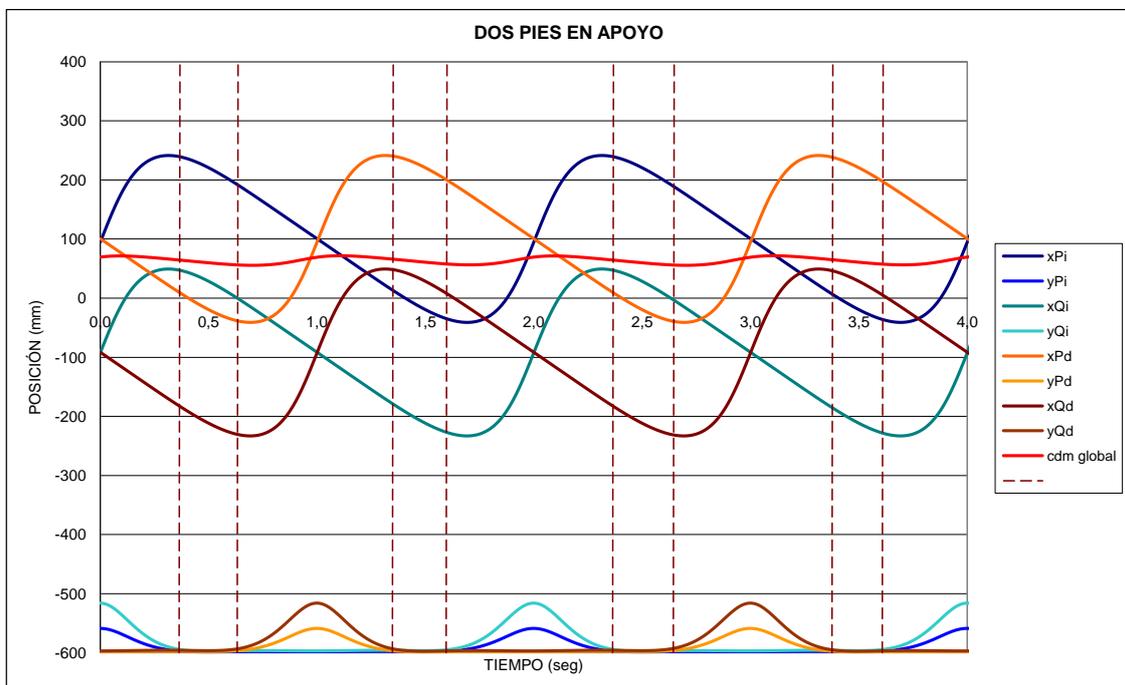


Gráfico 6.61: Dos pies en apoyo- Atrasando ambos actuadores 25mm

Haciendo ahora un repaso para cada uno de los momentos en los que tenemos uno de los pies en vuelo y el otro en el suelo veremos que en los dos casos se produce una inestabilidad en el momento en el que el pie que permanece en el suelo está terminando esa parte de su ciclo. De hecho observamos que poco más delante de la mitad de su ciclo de pisada el cdm se sale de la huella del pie haciendo que el Pasibot balancee hacia adelante debido al adelanto que hay del cdm global del sistema con respecto a la punta delantera del pie.

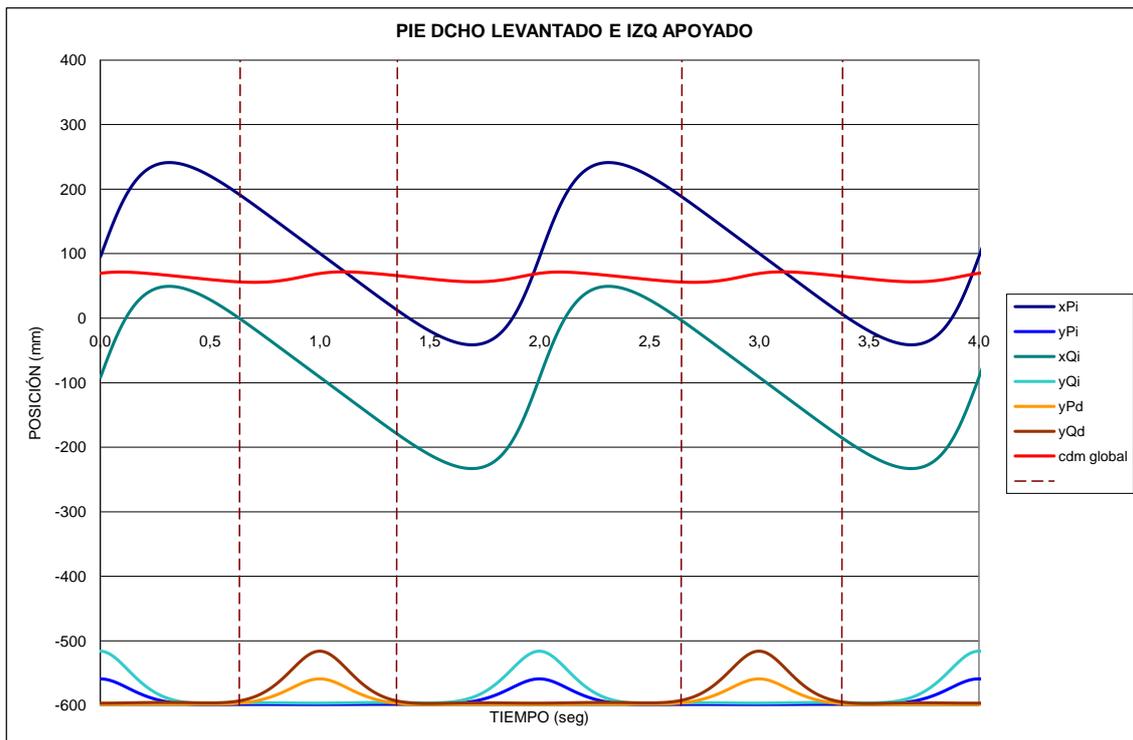


Gráfico 6.62: Pie dcho levantado e izq apoyado- Atrasando ambos actuadores 25mm

El mismo efecto descrito anteriormente será extrapolable al gráfico expuesto a continuación.

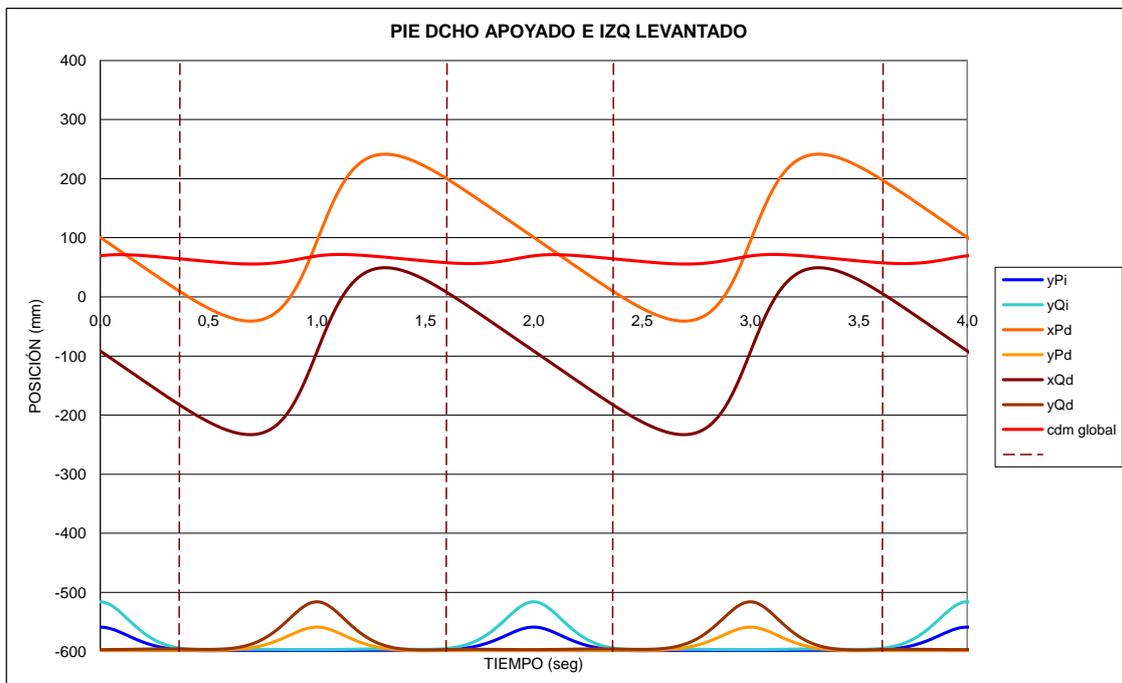


Gráfico 6.63: Pie dcho apoyado e izq levantado- Atrasando ambos actuadores 25mm

DERECHA 40 IZQUIERDA 40

En esta posición extrema vemos que, al igual que en el resto de casos, el equilibrio del robot está asegurado en el momento de pisada de los dos pies quedando la posición del cdm proyectada sobre la pisada del pie que queda más adelantado.

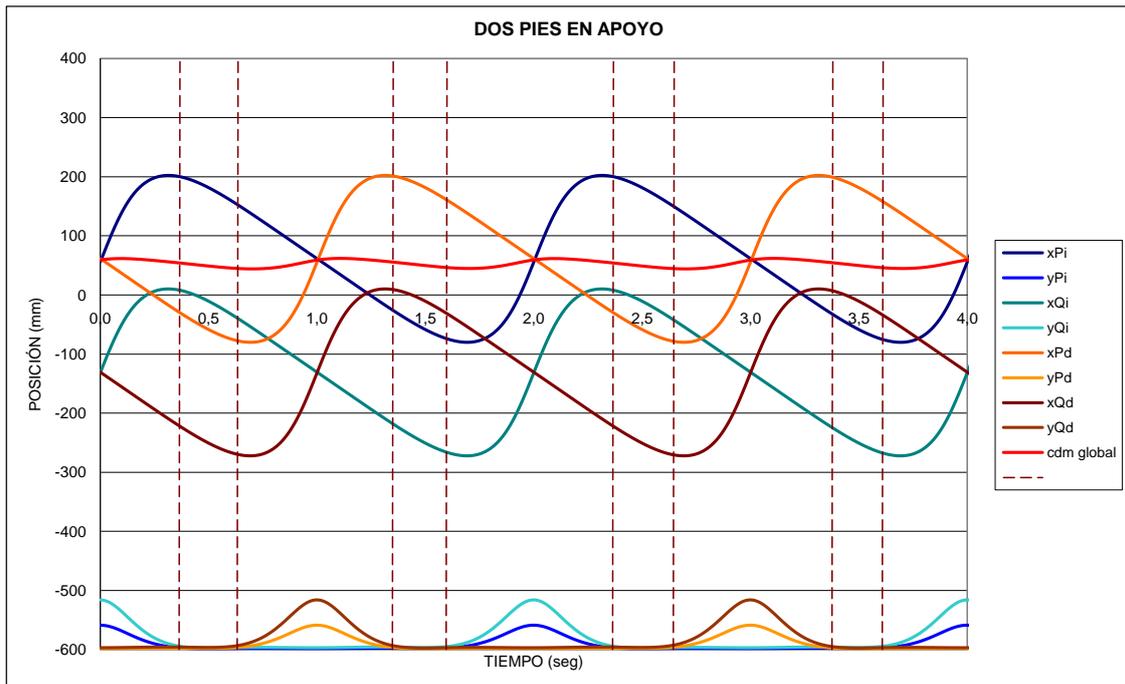


Gráfico 6.64: Dos pies en apoyo- Atrasando ambos actuadores 40mm

En la gráfica siguiente podemos observar que la punta trasera del pie izquierdo siempre se queda por detrás del cdm. Esto hace que el Pasibot tienda a balancearse hacia atrás, ya que en el momento del vuelo del pie izquierdo éste sobresale por la parte trasera respecto a la proyección del cdm global.

Además observamos que en el momento en el que está a punto de apoyar el pie derecho, el cdm sobresale por la parte delantera del pie que está apoyado haciendo que el robot se balancee hacia delante produciendo una posible caída.

Al igual que en otros casos en los que hemos hecho avanzar o retroceder el actuador hasta su posición máxima, vemos que el robot no va a

ser lo suficientemente estable como para continuar una marcha continuada con esta posición de los actuadores. Esto lo vemos en las 2 gráficas siguientes, en las que podemos apreciar que durante el momento de apoyo del pie izquierdo, éste se sale de la zona sobre la que caería el cdm haciendo que el robot bascule hacia delante produciéndose la caída irremediablemente.

Sólo sería posible esta disposición de los actuadores en un movimiento de arrancada. Movimiento en el que la inercia del robot induciría al cdm a desplazarse hacia atrás, quedando éste encerrado entre los pies o en la longitud de uno de ellos debido a que en ningún momento el cdm sobrepasaría la punta trasera del pie apoyado en cada caso.

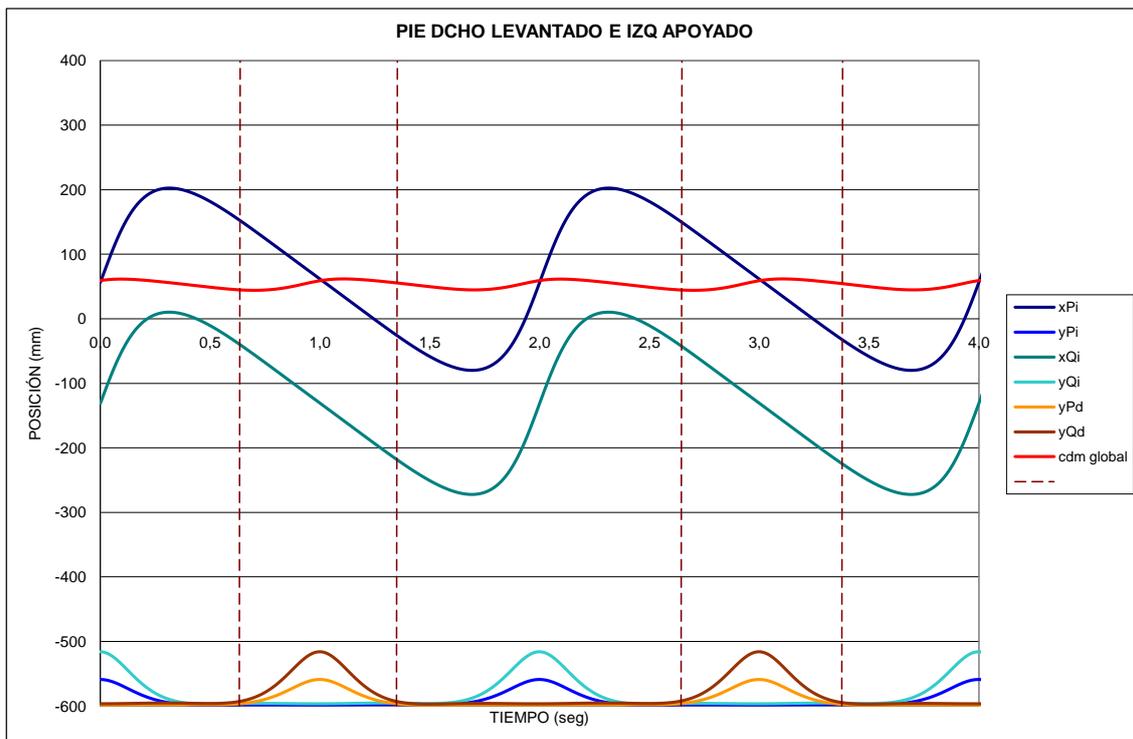


Gráfico 6.65: Pie dcho levantado e izq apoyado- Atrasando ambos actuadores 40mm

Del mismo modo ocurriría con la otra gráfica pero en este caso para el pie contrario.

Podemos afirmar que la inestabilidad producida uniendo el momento de vuelo y el de pisada harían que el robot balancease hacia delante y hacia atrás en cada uno de los momentos provocando la segura caída del modelo.

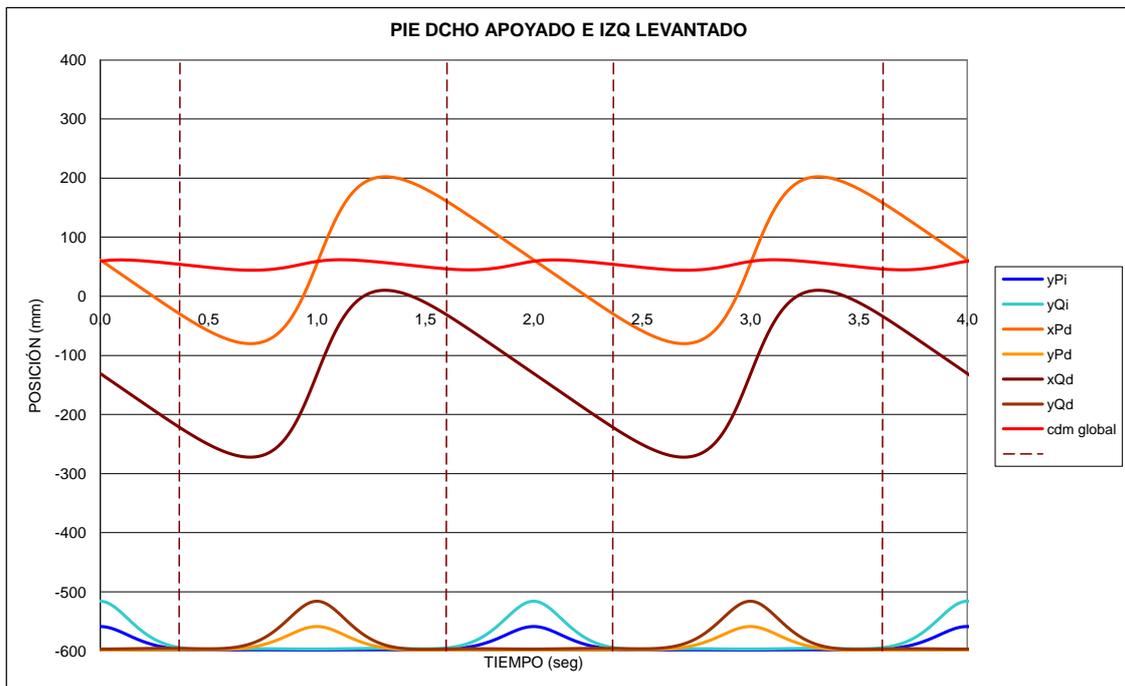


Gráfico 6.66: Pie dcho apoyado e izq levantado- Atrasando ambos actuadores 40mm

6.2.6. Adelantando uno y atrasando otro simétricamente.

Finalmente estudiaremos el caso más drástico del movimiento de los actuadores. Momentos en los cuales el Pasibot será más inestable que en las configuraciones anteriores debido a los balanceos que se puedan llegar a producir en los diferentes movimientos de vuelo y de pisada de cada uno de los pies. No obstante, si se consiguiese dominar la variación del $cdm\ global$ del sistema de manera adecuada, podría ser ésta la mejor manera de actuar sobre el robot para conseguir realizar trayectorias curvilíneas, ya que el adelantar una pierna y atrasar otra simétricamente provocaría el giro del robot.

También conseguiríamos este propósito con el movimiento de uno sólo de los actuadores, pero en este caso que nos ocupa podríamos llegar a realizar esos giros en un espacio mucho menor que en los demás casos.

DERECHA 5 IZQUIERDA -5

A diferencia de los casos anteriores vemos que al mover cada uno de los actuadores en sentidos diferentes, vemos que la zona de apoyo queda ensanchado haciendo que la estabilidad en la parte del ciclo de doble apoyo, el

Pasibot sea más estable que en ninguno de los casos al estar lo más centrado posible el cdm y ampliado el rango de pisada del robot.

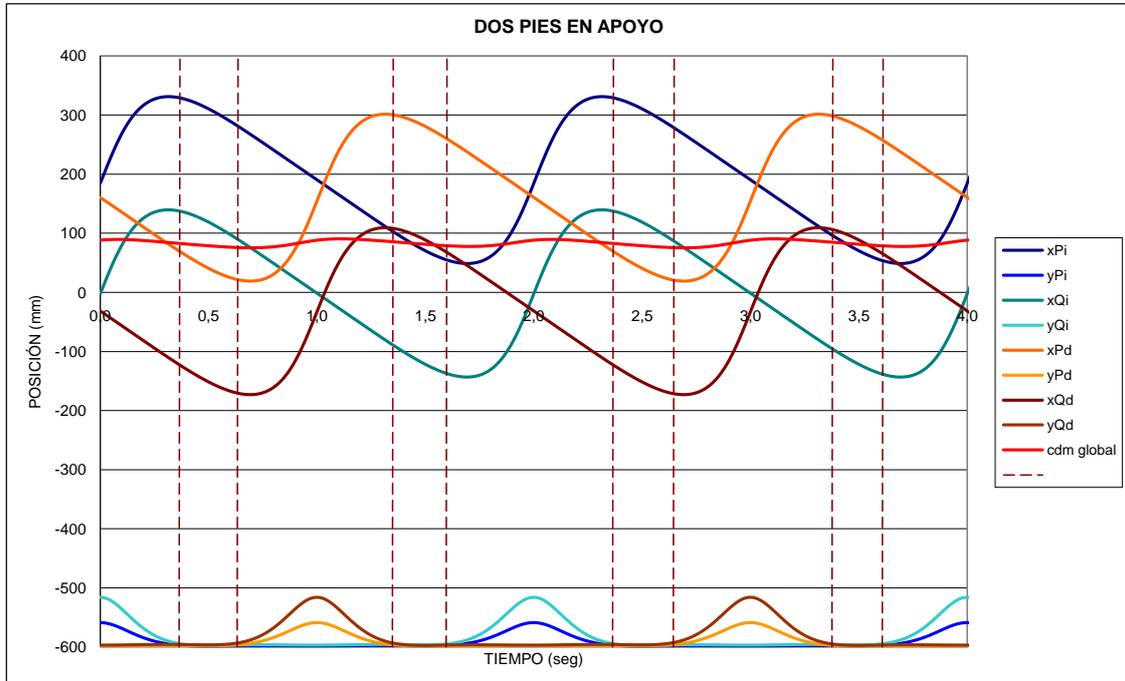


Gráfico 6.67: Dos pies en apoyo-Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 5mm

Si analizamos los pasos por separado vemos que la actuación es la misma que en los primeros casos estudiados anteriormente. En el primer caso vemos que se ha actuado sobre la pierna izquierda hacia delante haciendo que el cdm quede por detrás de la punta delantera del pie izquierdo en el momento en el que el pie está en su posición más retrasada, haciendo por tanto el robot más estable ante las frenadas.

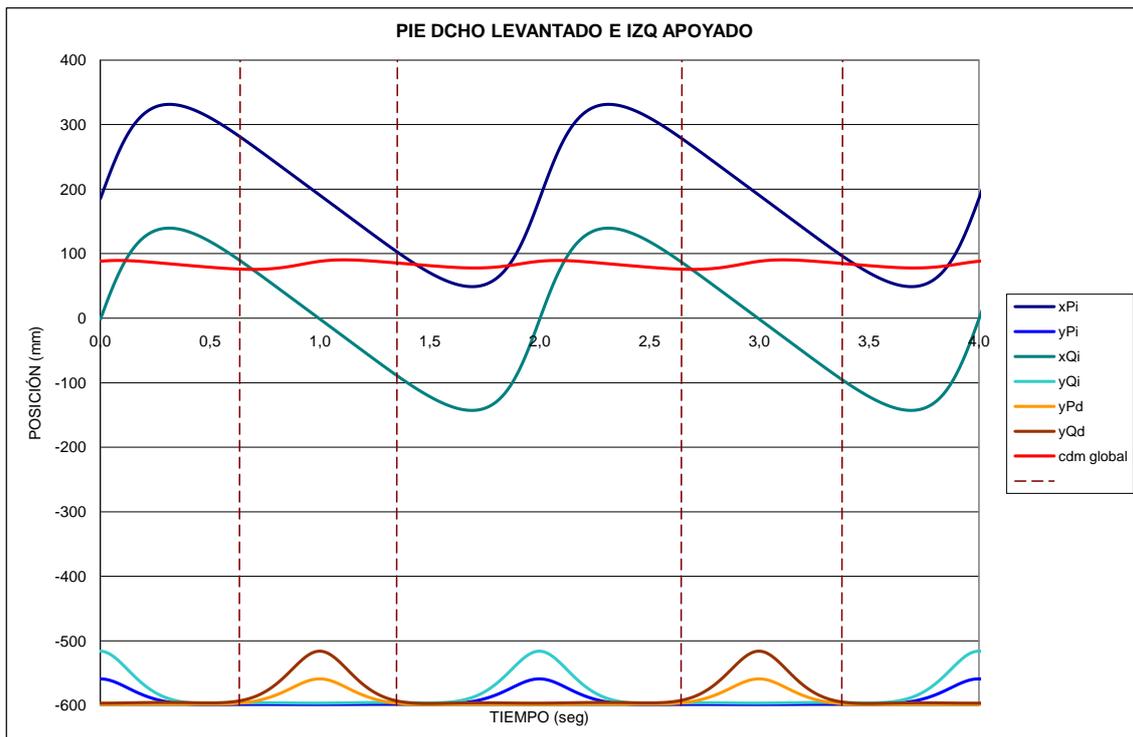


Gráfico 6.68: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 5mm

En el caso en el que tenemos el pie izquierdo en vuelo vemos el efecto contrario. El cdm del sistema queda por delante de la punta delantera del pie derecho haciendo que el robot balancee hacia delante. No obstante, como ocurre en el resto de casos, el momento en el que el cdm adelanta a la punta delantera del pie se produce en un momento cercano a la parte de subida del pie, por lo tanto es incluso preferible que el robot tenga el cdm desplazado hacia delante como así ocurre para evitar balanceos hacia atrás en el momento en el que sólo la pierna más adelantada está en contacto con el suelo.

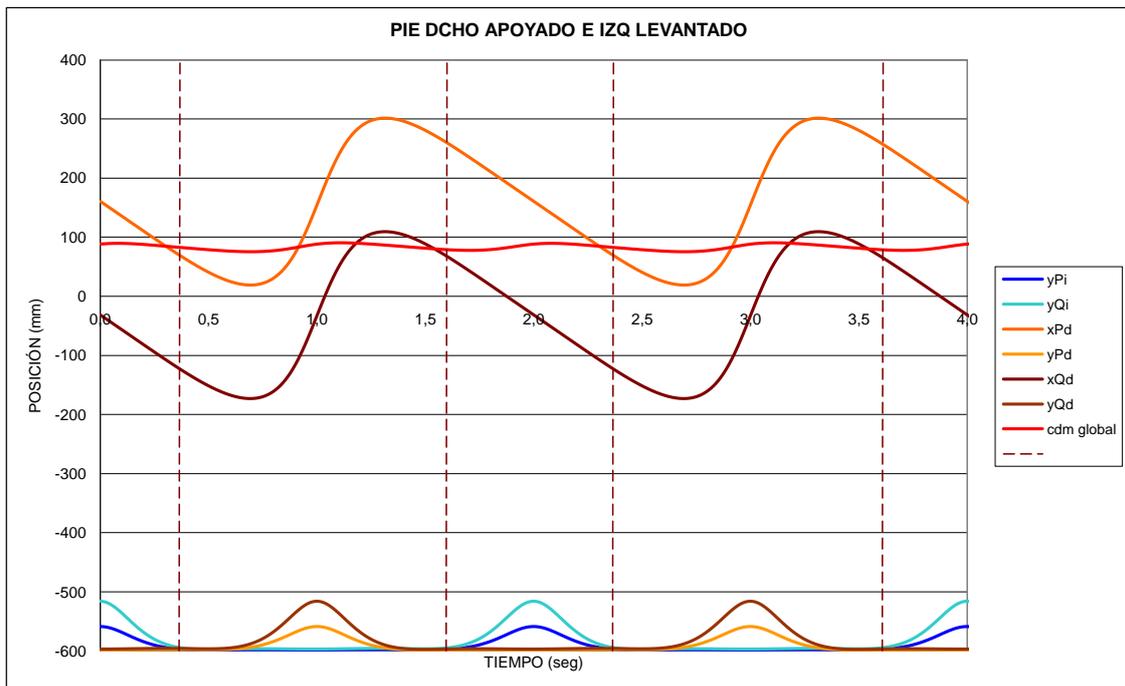


Gráfico 6.69: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 5mm

DERECHA 25 IZQUIERDA -25

Al igual que en el caso anterior, vemos que en el momento de la doble pisada el $cdm\ global$ del sistema queda encerrado entre los pies derecho e izquierdo pero no en la longitud de los mismos como ocurría en los casos del estudio anterior en el que atrasábamos o adelantábamos ambos pies simultáneamente. Por tanto podemos decir que para el momento en el que ambos pies están en el suelo, la configuración de los actuadores de manera que estén desplazados simétricamente uno hacia delante y el otro hacia atrás, es la más estable de todas.

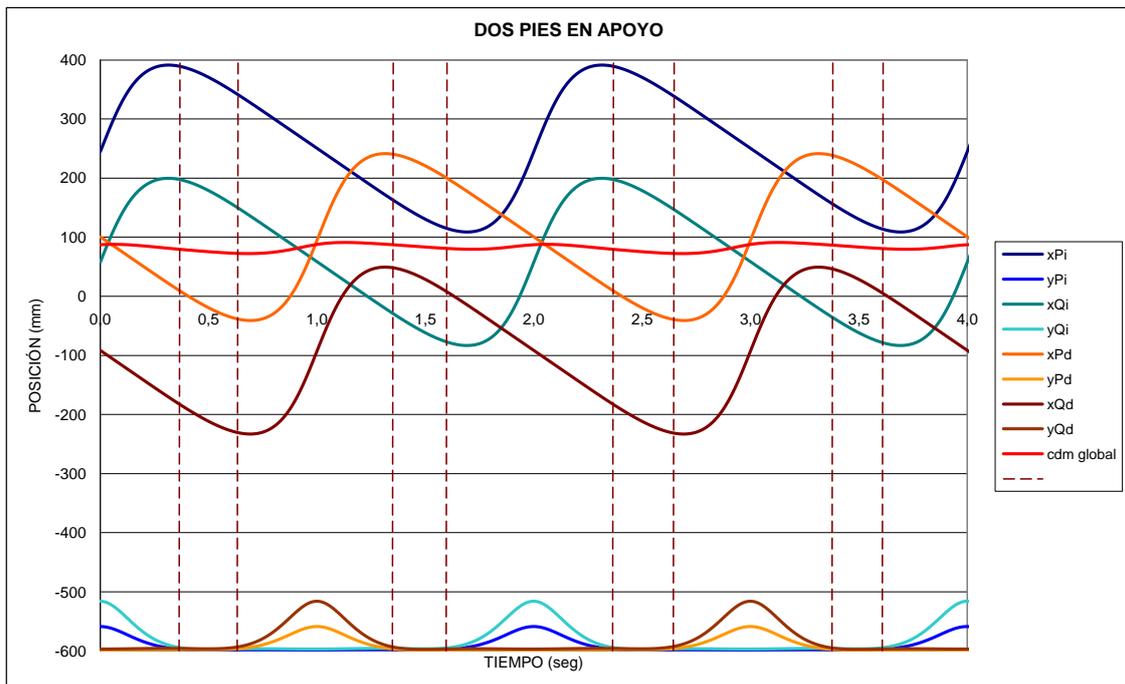


Gráfico 6.70: Dos pies en apoyo- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 25mm

En cambio si analizamos los momentos en los que una de las piernas está en vuelo y la otra permanece en el suelo, vemos que se producen 2 hechos extremos. En el primero vemos que el cdm queda retrasado respecto a la posición del pie izquierdo cuando éste está en el suelo haciendo que el robot balancee hacia atrás. Además vemos que este hecho se produce en el momento en el que el pie izquierdo que permanece en el suelo es cuando más apoyo habrá en la zona trasera del pie. Por lo tanto, sabemos que en esta configuración el robot será muy inestable para un movimiento de arrancada e incluso en un movimiento estacionario. No obstante, podría ser útil en un movimiento de frenada ya que la inercia del sistema se encargaría de hacer desplazar el cdm hacia delante haciendo que el robot fuese más estable.

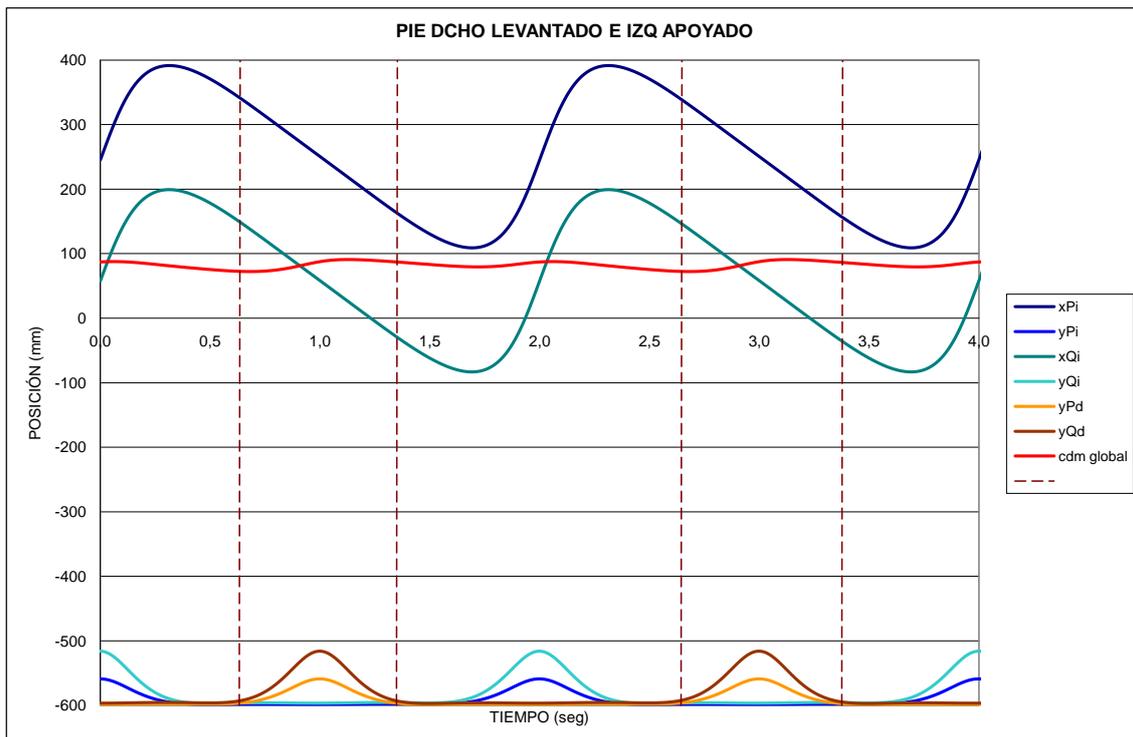


Gráfico 6.71: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 25mm

Por otro lado observamos el efecto contrario sobre la otra pierna. Vemos que en el momento en el que el pie izquierdo está en el aire, el derecho está retrasado con respecto al cdm global del sistema haciendo que el robot balancee hacia delante. Este método de actuación haría que el robot no balancease hacia atrás pero viendo que el momento en el que el cdm del sistema adelanta a la posición de la punta delantera del pie derecho, sabemos que el robot balanceará hacia delante haciendo que en el momento en el que el pie izquierdo vaya a realizar su apoyo, el robot estará tan inclinado hacia delante que el pie impactará contra el suelo haciendo que el robot pueda caer.

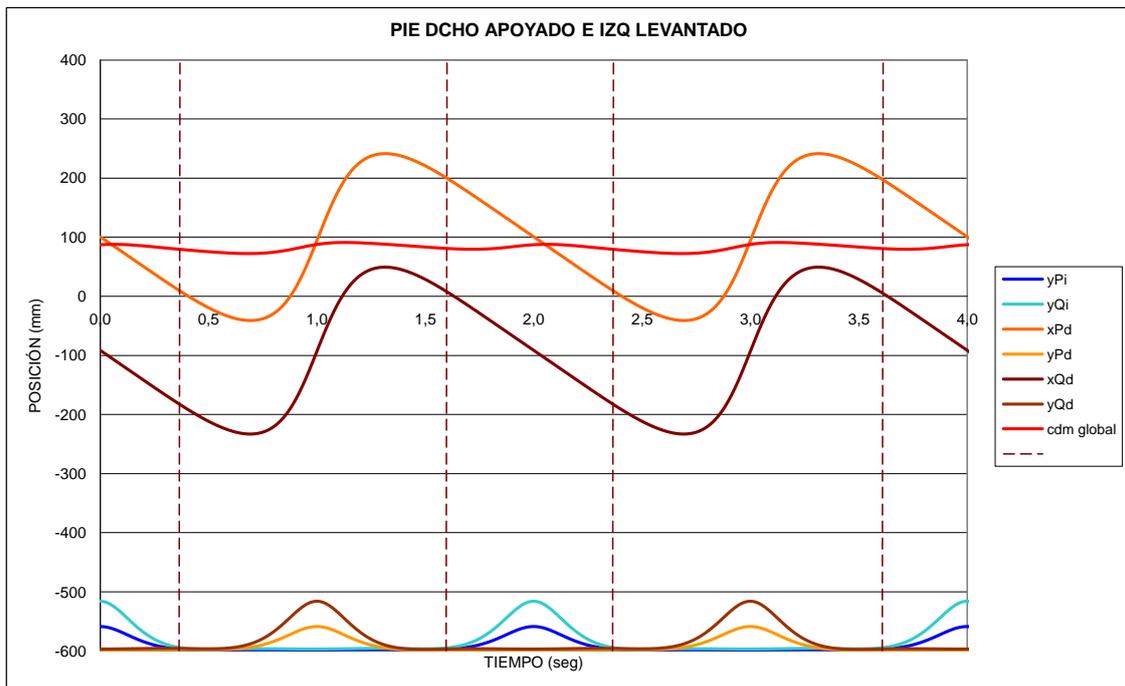


Gráfico 6.72: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 25mm

DERECHA 40 IZQUIERDA -40

Finalmente simulamos la posición más extrema de todas. Como era esperado, para el momento del doble apoyo, el robot es el momento en el que es más estable longitudinalmente ya que el cdm queda encerrado entre dos posiciones muy alejadas.

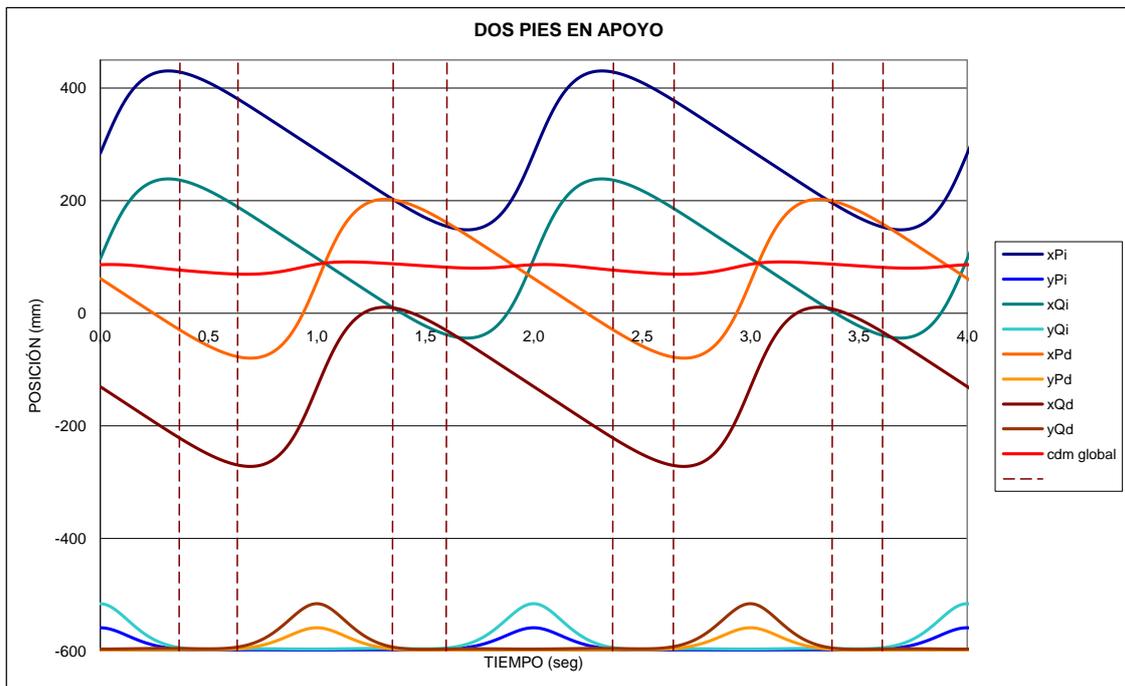


Gráfico 6.73: Dos pies en apoyo- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 40mm

En cambio, como hemos visto en otros apartados el momento en el que actuamos independientemente sobre cada una de las piernas vemos que la manera extrema de actuación implicaría una segura caída del robot ya que en el primero de los gráficos vemos que el cdm queda por detrás de la pisada del pie derecho cuando el izquierdo está en su momento de vuelo.

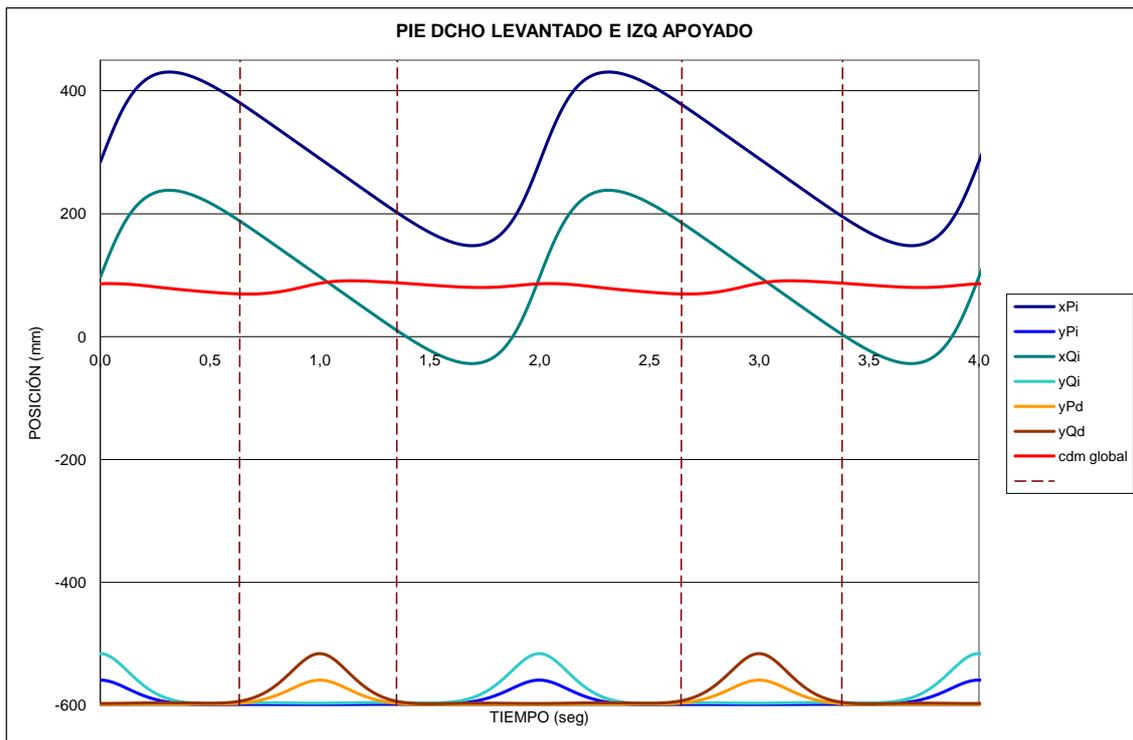


Gráfico 6.74: Pie dcho levantado e izq apoyado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 40mm

Junto con el caso descrito en el gráfico anterior, vemos en el que sucede a estas líneas el efecto contrario. Por tanto si unimos el balanceo hacia atrás que provoca el adelanto del actuador izquierdo con el balanceo hacia delante provocado por el atraso del actuador derecho, obtendremos una situación de balanceos e impactos que producirán la caída irremediable del Pasibot.

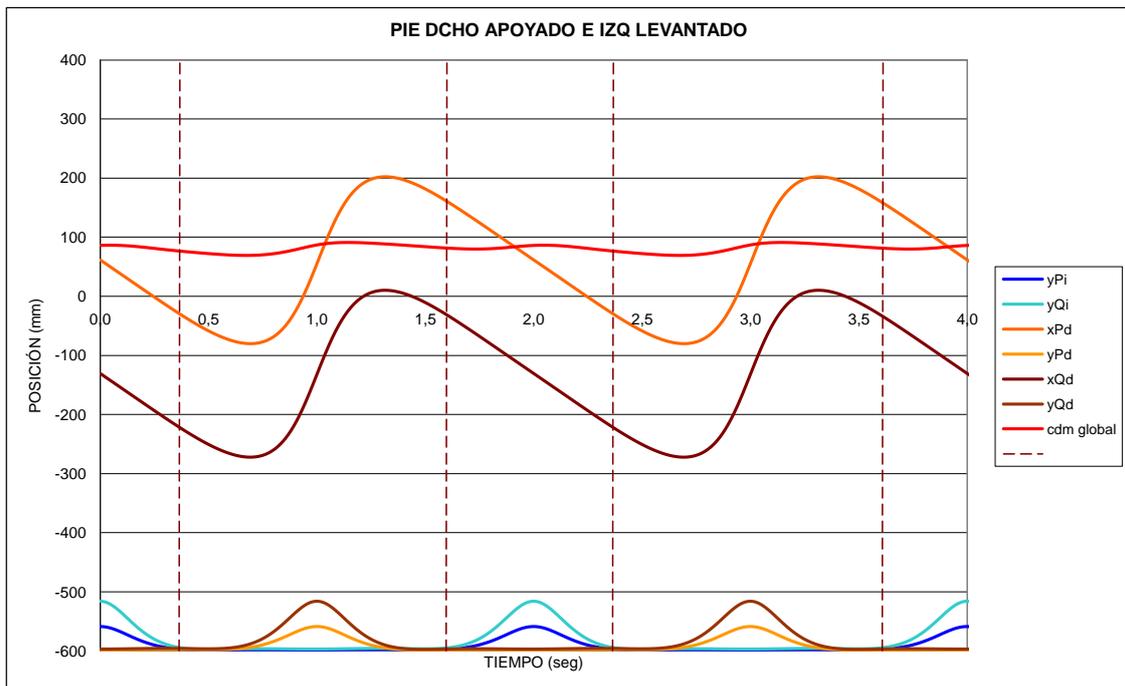


Gráfico 6.75: Pie dcho apoyado e izq levantado- Adelantando el izquierdo y atrasando el derecho 40mm

6.2.7. Variación del CDM global del sistema según el eje x en función de la posición del actuador.

Aunque en todos los casos descritos anteriormente veíamos que el cdm apenas variaba, esto es debido a la escala que imponía la variación de la posición de los pies frente a la variación de este cdm . En los gráficos siguientes observamos con mayor definición la variación producida por los cdm en función de las diferentes posiciones del cdm . Observaremos los límites a los que podemos llegar mediante las 5 posibles variaciones que podemos realizar sobre cada modelo.

Se mostrará en color rojo y de manera más acentuada, para cada uno de los casos, la trayectoria según el eje X del movimiento del cdm global del sistema.

6.2.7.1. Variando la posición de uno de los actuadores hacia delante.

En este primer caso vemos que el cdm global del sistema tiene como límites en su proyección en dirección X entre 77,59 y 104,34 mm. Podemos observar también que el momento en el que avanza un pie o el otro, los puntos



que alcanza el cdm son diferentes. El punto más adelantado del cdm global se produce en el momento en el que el pie izquierdo está en su punto medio del vuelo. Es decir, en su punto más alto de su trayectoria. Este momento es el instante en el que ambos pies tienen la misma posición según el eje X de su movimiento. Si observamos el mismo punto pero en el momento en el que el pie derecho está en su punto más alto de su movimiento, podemos ver que el cdm se desplaza de manera menos significativa hacia delante. Esto es debido a que en el momento en el que el pie derecho se encuentra en su punto más alto, el pie izquierdo no está en la misma posición que en el caso opuesto (en el que el pie izquierdo está en vuelo y el derecho en el suelo) sino que se encuentra en una posición mucho más atrasada que en el otro caso. Por tanto el cdm no se desplaza de la misma manera hacia delante sino que queda un poco por detrás.

Si ahora nos fijamos en el momento en el que los pies están en su punto más atrasado vemos otro fenómeno. En el momento en el que el pie derecho está en dicho punto, el cdm global no se desplaza tanto hacia atrás como ocurre en el caso contrario. Esto es lógico, ya que como sabemos el punto más retrasado del pie derecho estará más adelantado que el punto más atrasado del pie izquierdo en el momento en el que éste se encuentra en su posición más atrasada de su movimiento.

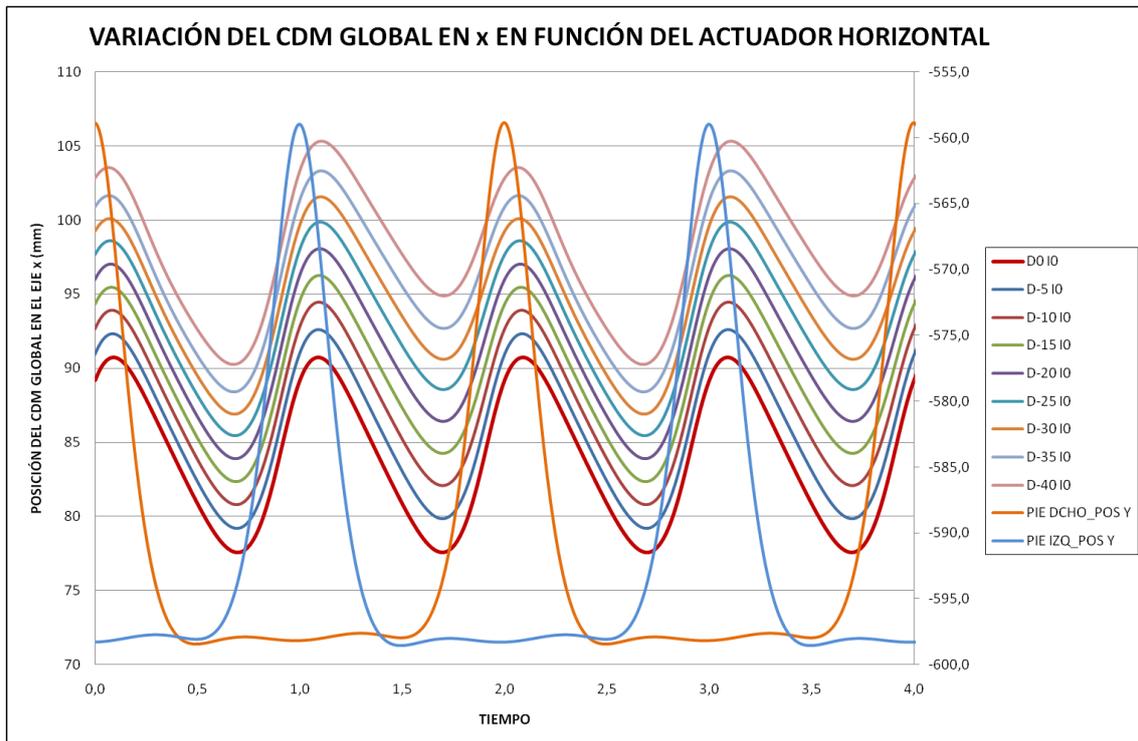


Gráfico 6.76: Variación de la posición de uno de los actuadores hacia delante

6.2.7.2. Variando la posición de uno de los actuadores hacia atrás.

En este segundo caso vemos que el cdm global del sistema tiene como límites en su proyección en dirección X entre 58,80 y 90,73 mm. En este caso vemos que en el punto en el que los pies se encuentran en su posición más retrasada de su movimiento, el cdm se desplaza en mayor medida en el caso en el que se produce esta posición para el pie derecho. Es evidente, ya que al atrasar el actuador, atrasamos la zancada del pie derecho por la parte trasera de su movimiento mientras que el otro pie no está actuado y por tanto su posición más retrasada está más adelantada que en el caso del pie derecho. Para los puntos máximos de la posición según el eje X del movimiento del cdm global del sistema ocurre algo semejante al caso anterior y es que al estar actuado, el punto máximo que se alcanza cuando el pie derecho se encuentra en su posición más elevada está más adelantado porque se producen en el momento en el que ambos pies están en una posición más adelantada en relación a cuando se produce el hecho contrario. En dicho momento en el cual el pie izquierdo se encuentra en su posición más elevada, el pie derecho no está en el mismo lugar que en el caso opuesto sino que está prácticamente en

su punto más retrasado haciendo que el cdm se desplace en menor medida hacia delante que en el caso contrario.

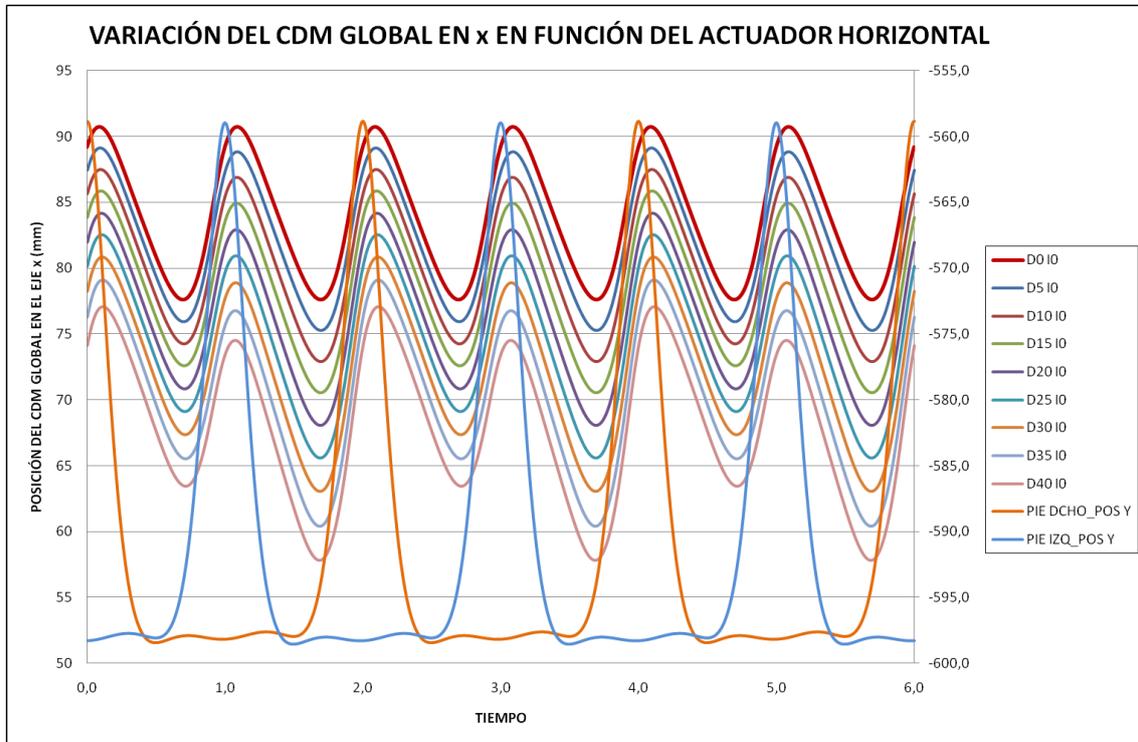


Gráfico 6.77: Variación de la posición de uno de los actuadores hacia atrás.

6.2.7.3. Variando la posición de ambos actuadores hacia delante.

En este tercer caso vemos que el cdm global del sistema tiene como límites en su proyección en dirección X entre 77,59 y 116,05 mm. Tanto en este caso como en el siguiente, vemos que la única variación que se produce es un desplazamiento en la trayectoria del cdm según el eje X del movimiento. En todos los casos los puntos máximos y mínimos se producen para el movimiento de ambos pies de la misma manera pero hacia delante respecto a la posición original de los actuadores.

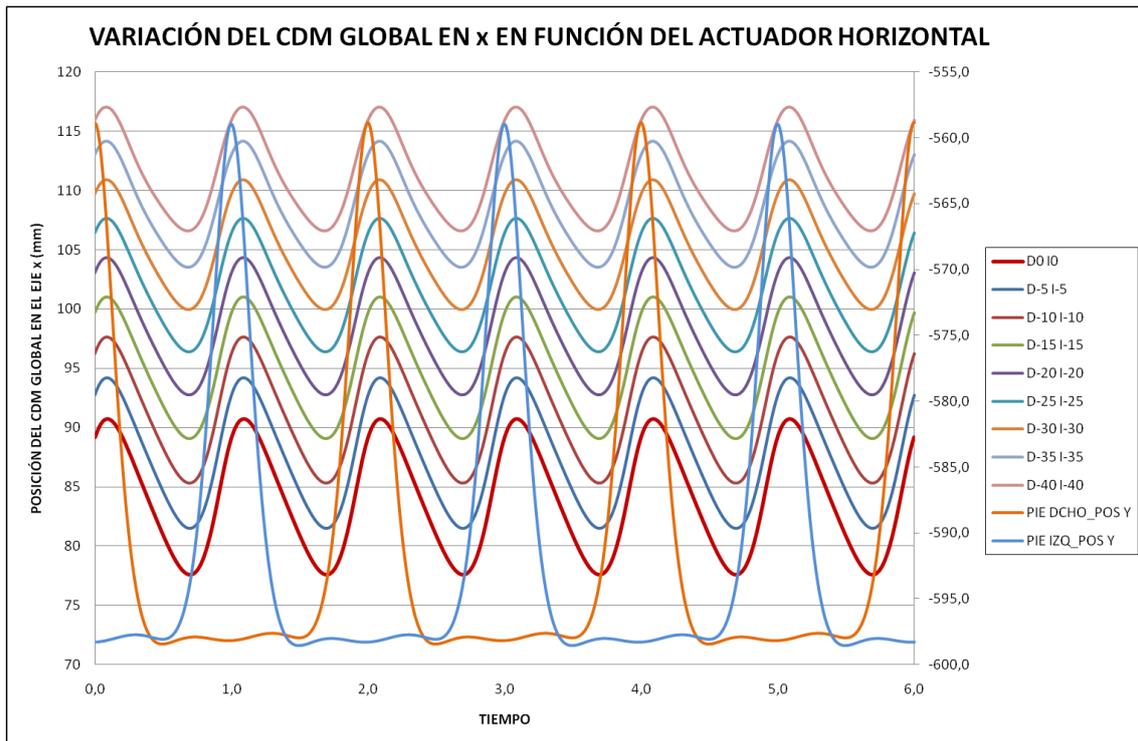


Gráfico 6.78: Variación de la posición de ambos actuadores hacia delante

6.2.7.4. Variando la posición de ambos actuadores hacia atrás.

En este cuarto caso vemos que el cdm global del sistema tiene como límites en su proyección en dirección X entre 45,70 y 90,74 mm. Al igual que en el caso anterior. La variación que observamos de la trayectoria según el eje X del cdm global del sistema se produce de manera que el desplazamiento se produce para ambos pies de la misma forma pero en este caso hacia atrás respecto a la trayectoria producida cuando el modelo está en su posición original.

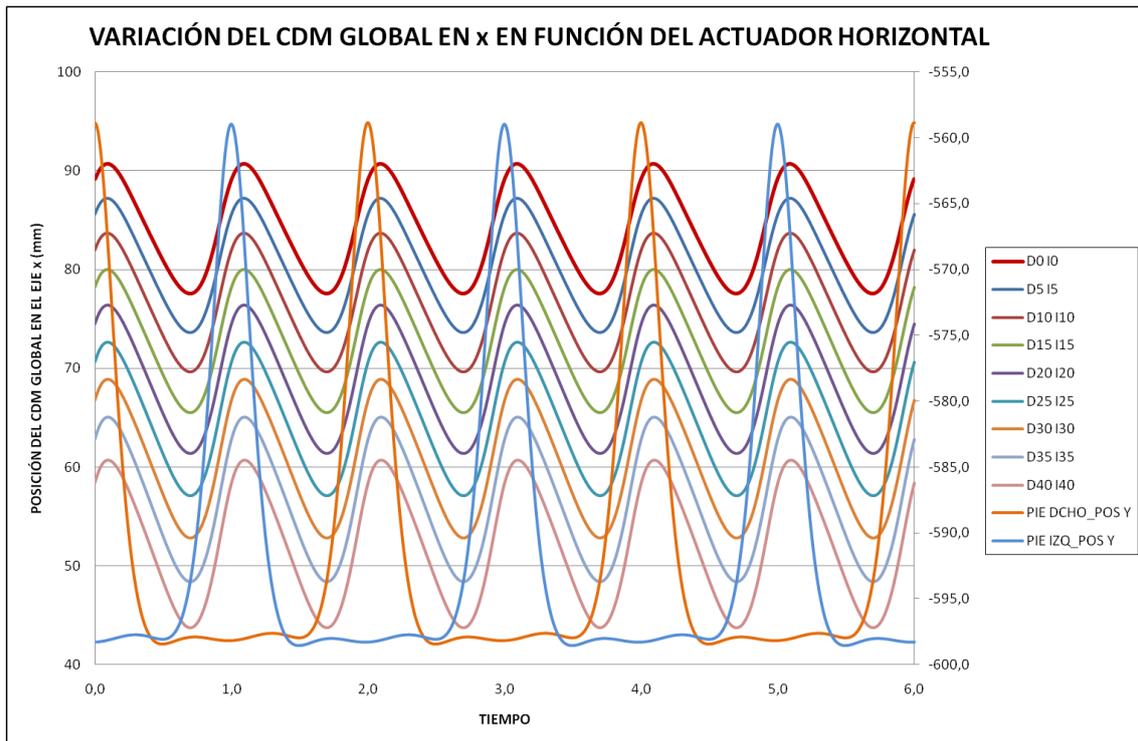


Gráfico 6.79: Variación de la posición de ambos actuadores hacia atrás

6.2.7.5. Variando la posición de los actuadores simétricamente.

En este quinto caso vemos que el cdm global del sistema tiene como límites en su proyección en dirección X entre 70,42 y 91,80 mm. Este último caso es el más completo de todos. Comenzaremos explicando la diferencia de posición del cdm en el momento en el que cada uno de los pies está en su posición más elevada respectivamente. En el momento en el que el pie derecho está en su punto más alto vemos que el cdm global del sistema se encuentra en una posición más adelantada que en el caso opuesto. Esto es debido a que el momento en el que se produce este hecho, es aquel en el que ambos pies se encuentra en una posición semejante según el eje X del movimiento. Sin embargo, el momento en el que el pie izquierdo se encuentra en el punto más alto, tenemos que el pie derecho se encuentra en su posición más retrasada. Por tanto, como vemos en el gráfico 6.80 el cdm queda desplazado en menor medida hacia delante según el eje X del movimiento. Si ahora nos fijamos en el punto más retrasado que cada uno de los pies ocupa durante el movimiento veremos que el cdm queda desplazado hacia atrás en mayor medida en el caso en el que el pie derecho está en su posición más

retrasada. Este hecho es más sencillo de observar ya que como sabemos, el actuador derecho está posicionado en su punto más retrasado y el izquierdo en el punto más adelantado, no obstante, la diferencia entre la posición del cdm en estos puntos es muy diferente. Esto es debido a que el momento en el que el pie izquierdo alcanza su punto más retrasado en su movimiento, el pie derecho está en una posición muy cercana al mismo y en una posición muy adelantada respecto a la posición más atrasada en la que acaba su movimiento el pie derecho. Por tanto, el cdm queda mucho más adelantado en este momento que en el instante en el cual el pie derecho se encuentra en su posición más retrasada, momento en el cual el pie izquierdo se encuentra adelantado pero es favorecido este balance del cdm por el resto del conjunto.

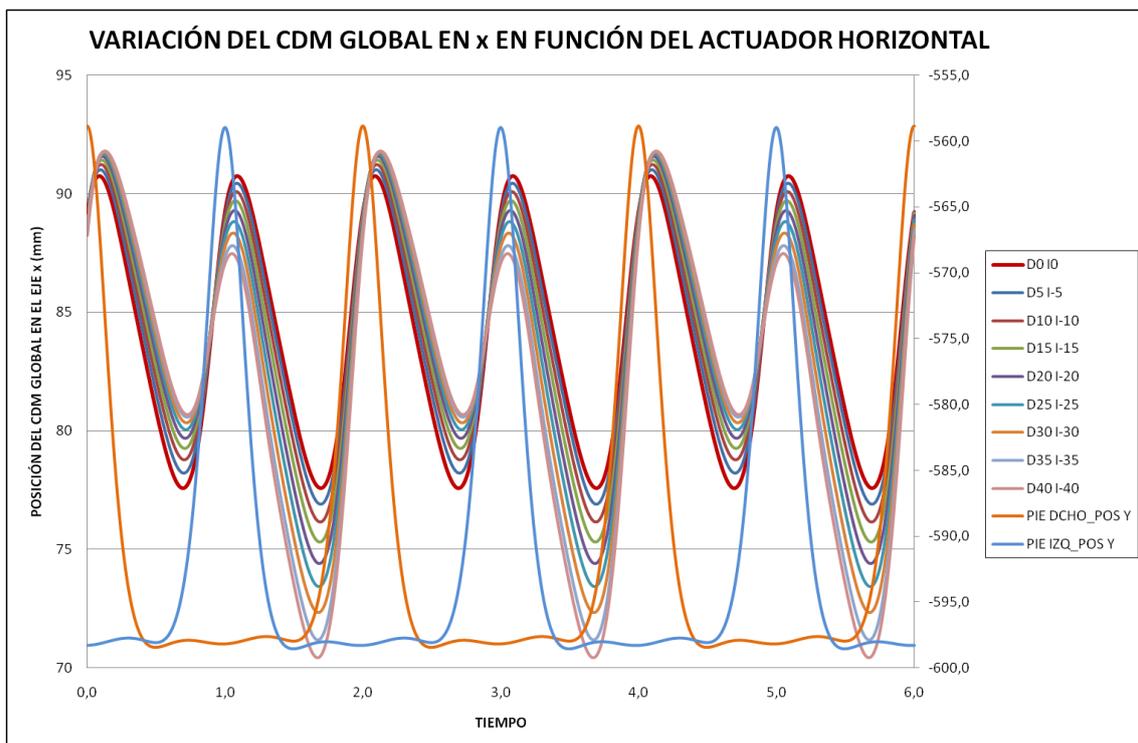


Gráfico 6.80: Variación de la posición de los actuadores simétricamente



Capítulo VII:

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS



7.1. CONCLUSIONES

Al final del presente proyecto se puede concluir afirmando que se han alcanzado con éxito todos y cada uno de los objetivos propuestos al comienzo del mismo.

Se ha conseguido cumplir satisfactoriamente el objetivo principal. Se ha realizado el diseño y análisis de un nuevo actuador que forma parte del robot bípedo PASIBOT, capaz de implementar diferentes trayectorias. Con ello se ha conseguido hacer un estudio de la estabilidad del robot frente a las variaciones de longitud en el paso variando la posición de este actuador.

Utilizando el programa Solid Edge, se ha diseñado el nuevo actuador, localizado en la parte inferior de la cadera del robot PASIBOT y se ha verificado su funcionalidad dentro del conjunto.

- Se comprobó que no había interferencias entre las nuevas piezas simplificadas y el resto del conjunto y que se movía de forma correcta.
- Posteriormente, con el programa MSC. Adams se comprobó la estabilidad del PASIBOT con el nuevo mecanismo, obteniendo resultados muy positivos: se observó que se podía evitar el balanceo hacia delante o hacia atrás actuando sobre dicho elemento y se vio que se podían implementar diferentes trayectorias con la mera variación de uno o de los dos actuadores de los que el robot dispone.
- Se observó también que con la variación de uno o ambos actuadores podíamos implementar diferentes trayectorias teniendo en cuenta por otro lado las inestabilidades producidas debido a esa variación haciendo que el Pasibot se mantuviese en pie.

Por otro lado se observaron las diferentes gráficas que obtuvimos 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 nos hizo 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 nos mostraron 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 menester para otras velocidades. Por tanto, se obtuvo el rango de velocidades válido para que el Pasibot pueda realizar un movimiento como nosotros deseábamos. Un movimiento pasivo.

Por tanto, podemos resumir en que encontramos el rango de velocidades para las cuales el Pasibot puede realizar su movimiento pasivo y además fuimos capaces de modificar su cdm de tal forma que pudiésemos influir sobre la estabilidad del robot y sobre la trayectoria.



7.2. TRABAJOS FUTUROS

Una vez concluido nuestro trabajo, podemos aconsejar que se sigan las siguientes vías de desarrollo para continuar con la mejora del Pasibot:

- - Obtención de datos cruzados entre la posición del cdm y las velocidades y aceleraciones incurridas al variar la posición del actuador.

Aprovechando el modelo modificado, lo más inmediato sería realizar un análisis cinemático del robot PASIBOT, utilizando el programa MSC. Adams ® para proseguir más a fondo con el estudio de estabilidad del robot ya que tanto las velocidades como las aceleraciones son variables muy importante en la estabilidad del robot.

- - Implementación de trayectorias.

Se propone la posibilidad de implementar diferentes trayectorias con la herramienta MSC Adams de tal forma que se compruebe sobre un modelo libre la posibilidad de realizar estas modificaciones en la trayectoria por medio del actuador implementado en este proyecto.

- - Modificación de las posiciones de los actuadores mediante ecuaciones suaves y en el momento adecuado para no provocar inestabilidad.

En línea con la propuesta anterior para la modificación de la trayectoria, se propone la utilización de funciones complejas para actuar en momentos precisos del paso y mediante funciones suaves que eviten inercias indebidas.

- - Estudio del cdm con las inercias que aparezcan al variar la velocidad (para diferentes velocidades y para diferentes momentos de arrancadas y frenadas)

Se propone realizar un estudio de las inercias que aparezcan debido a la variación infringida sobre los actuadores para verificar la estabilidad del sistema para cada una de las posiciones descritas en este proyecto.



Capítulo VIII:

BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Pons, Jose L. “Wearable Robots Biomechatronic Exoskeletons”. Ed. Wiley, Inglaterra, 2008.
- [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] López Aláez, Saray. “Estudio cinemático de la pierna de un robot bípedo”, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2009.
- [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] Corral Abad, Eduardo. “Análisis mecánico del robot bípedo Pasibot”, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Año 2008.
- [6] Di Rienzo, Alessandro. “Analisi numerica e sperimentale del meccanismo di una gamba per robot mobili”, Tesi Di Laurea, Università degli Studi di Cassino. Cassino (Italia). 2005.
- [7] A. de Lamadrid; A. de Corral. “Cinemática y Dinámica de Máquinas”. Sección de Publicaciones de la ETSIII de la UPM. Madrid, 1969.
- [8] Barrientos, Antonio. Peñín, Luis Felipe. Balaguer, Carlos. Aracil, Rafael. “Fundamentos de la robótica”. Ed. McGraw Hill, España 2007.
- [9] Castejón Sisamón, Cristina. “Análisis cinemático de máquinas y mecanismos”, Apuntes de la asignatura Teoría de Máquinas, Universidad Carlos III de Madrid. España 2008.
- [10] C. Tavolieri, E. Ottaviano, M. Ceccarelli “Design and Problems of a New Leg-Wheel Walking Robot”, 10th CLAWAR International Conference on Climbing and Walking Robots, Singapore (2007).



- [11] C. Tavolieri, E. Ottaviano, M. Ceccarelli, A. Di Rienzo, Analysis and Design of a 1-DOF Leg for Walking Machines, Proceedings of RAAD'06, CD Proceedings. Balantonfured, (2006).
- [12] J.E. Shigley. J.J. Uicker . "Teoría de máquinas y mecanismos". Ed. McGraw Hill, México 1988
- [13] Higinio Rubio, Jesús Meneses, Cristina Castejón, Alberto Jardón, Antonio Giménez, Juan Carlos García Prada. "Pradamechanical design of walking robot Pasibot, Parametric model and gait analysis".
- [14] J. Meneses, C. Castejón, E. Corral, H. Rubio, J.C. García-Prada. "A study of feasibility for a linkable-based "PASIBOT" biped robot"
- [15] G. Figliolini, "Walking programming for an electropneumatic biped robot," Mechatronics, vol. 9, Dec. 1999, pp. 941-964.
- [16] N. Rodriguez, G. Carbone, and M. Ceccarelli, I, "Design Evolution of Low-cost Humanoid Robot CALUMA," 12th IFToMM wordl Congress, 2007.
- [17] J. Meneses, H. Rubio, C. Castejón, E. Ottaviano, and M. Ceccarelli, "Modelo cinemático del robot bípedo 'Pasibot'," IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica., Las Palmas de Gran Canaria. España: 2009, p. 8.
- [18] H. Rubio, J. Meneses, C. Castejon, A. Jardon, A. Giménez, and J.C. García-prada, "Mechanical Desing of walking robot Pasibot. Parametric model and gait analysis.," 12th International Conference on climbing and walking robots.CLAWAR 2009, Istambul. Turkey: 2009, pp. 1-9.
- [19] M.E. Escobar., H. Rubio., J.C. García-Prada., and M. Ceccarelli., "Sistema de Estabilizacion del Robot Pasibot.," XVIII Congreso Nacional de Ingenieria Mecanica, Ciudad Real. España: 2010, p. 8.
- [20] V. Espantoso, "Diseño y analisis de un nuevo sistema de estabilización para el bipedo Pasibot.," 2010.



Direcciones WEB:

- [1] CICYT (Centro de Investigación Científica y Tecnológica)
<http://cicyt.spol.edu.ec>
- [2] Grupo de investigación MAQLAB, Universidad Carlos III de Madrid.
www.maqlab.uc3m.es
- [3] Manual de MSC.ADAMS.
http://www.kxcad.net/MS_C_Software
- [4] Tutorial de MSC.ADAMS.
<http://www.desing.uwaterloo.ca>
- [5] Guía MSC.ADAMS.
<http://www.mscsoftware.com>
- [6] Wikipedia.
<http://es.wikipedia.org>
- [7] Tutorial Working Models 2D.
<http://wwwdesing-simulation.com>
- [8] Robots Bipedos.
<http://www.jvmbots.com>
- [9] Historia de los Robots.
<http://www.monografias.com>
- [10] Facultad de ingeniería, UASLP.
<http://www.ingenieria.uaslp.mx>
- [11] Software informático ADDLINK.
www.addlink.es

ANEXO A: MEDIDAS DE PIEZAS DE MODELO PASIBOT.

En el presente anexo se incluye el despiece acotado del modelo PASIBOT.

