



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**“Diseño del Sistema Mecánico del Robot
LUNAbot W6 VJ1.0©”**

Tesis

**Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias
en Ingeniería Mecánica**

Presenta:

Juan Carlos González Tejeida

Asesor:

Doctor en Ingeniería Mecánica Ignacio Juárez Campos

Co-Asesor:

Doctora en Ingeniería Biomédica Lucia Márquez Pérez



Morelia, Michoacán; febrero de 2015

**Diseño del Sistema
Mecánico del Robot
LUNAbot W6 VJ1.0[©]**

AGRADECIMIENTOS

En este proyecto de investigación agradezco a toda mi familia por el apoyo moral brindado para seguir realizándome como profesionista y tener un mejor futuro, así como ser un orgullo para ellos.

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por haberme dado la oportunidad de realizar un posgrado de calidad en benemérita institución.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo económico recibido para poder realizar los estudios de maestría.

También a mis asesores el Dr. Ignacio Juárez Campos y la Dra. Lucia Márquez Pérez, por haber dejado en mis manos un excelente proyecto y por haber confiado en capacidad para desarrollarlo, así como también a mis profesores el M. C. Víctor López Garza, el M. C. Luis Ernesto Ceja Martínez y la Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamontes por todo apoyo brindado durante el periodo de mi estancia en la maestría.

Finalmente, a mis compañeros de posgrado, con los que pase excelentes momentos y a los que espero seguir teniendo como buenos amigos y colegas el resto de mi vida.

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mi madre Margarita Tejeida por el gran apoyo incondicional hacia mí en todo momento, a mi padre Juan González (†) que aunque ya no está conmigo me heredó el gusto por la ingeniería, a mis hermanos Luis y Mónica y a mi sobrina Fernanda.

A todos mis compañeros y amigos, ya que fueron un aliciente para que realizara con éxito esta tesis.

A mi amiga Anayz Vieyra por todo el apoyo incondicional que siempre me ha dado en cada paso en mi vida.

A mis asesores y profesores por los conocimientos y el apoyo que me brindaron para poder concluir este proyecto de investigación en el cual se basa mi tesis.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIAS	ii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLAS	x
RESUMEN	xii
PALABRAS CLAVE	xii
ABSTRACT	xiii
KEYWORDS	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. RESUMEN	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
1.4. HIPÓTESIS	3
1.5. OBJETIVOS	3
1.5.1. Objetivo General	3
1.5.2. Objetivos Específicos	3
1.6. CAPITULADO	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. ROBOTS DE JUGUETE Y DE ENTRETENIMIENTO	8
2.3. MÁQUINAS Y/O ROBOTS CAMINANTES	17
CAPÍTULO 3. CINEMÁTICA DIRECTA DE LA UNIDAD DE PROPULSIÓN	21
3.1. INTRODUCCIÓN	21
3.2. ESLABONAMIENTO Y GRADOS DE LIBERTAD DE LA UNIDAD DE PROPULSIÓN	22
3.3. MODELADO MATEMÁTICO DIRECTO	23
3.3.1. Descripción Matemática	23
3.3.2. Casos Particularidades del MPL	31
CAPÍTULO 4. CINEMÁTICA INVERSA DE LA UNIDAD DE PROPULSIÓN	35
4.1. INTRODUCCIÓN	35
4.2. MODELADO MATEMÁTICO DE VARIABLES DE ARTICULACIÓN EN FUNCIÓN DEL CENTRO DE ROTACIÓN DE LA UNIDAD DE PROPULSIÓN	35
4.3. ESPACIO DE TRABAJO DE UNA UNIDAD DE PROPULSIÓN	39
4.3.1. Espacio de Trabajo de una Unidad de Propulsión en el Desplazamiento Recto	39
4.3.2. Espacio de Trabajo de una Unidad de Propulsión en el Giro	43

4.4.	ESPACIO DE TRABAJO DE LAS UNIDADES DE PROPULSIÓN EN CONJUNTO	46
4.4.1.	Espacio de Trabajo de varias Unidades de Propulsión en el Desplazamiento Recto	46
4.4.2.	Espacio de Trabajo de varias Unidades de Propulsión en el Giro	48
CAPÍTULO 5. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA MÁQUINA CAMINANTE BASADA EN EL MECANISMO DE PEAUCELLIER-LIPKIN.....		50
5.1.	INTRODUCCIÓN	50
5.2.	PRINCIPIO BÁSICO DE DESPLAZAMIENTO DE UNA MÁQUINA CAMINANTE.....	50
5.3.	REDUCCIÓN DE GRADOS DE LIBERTAD DE LA MÁQUINA CAMINANTE LUNAbot W6 VJ1.0®	51
5.4.	DESCRIPCIÓN ESPACIAL DE LAS UNIDADES DE PROPULSIÓN.....	61
5.4.1.	Descripción Espacial en el Desplazamiento Recto	61
5.4.2.	Descripción Espacial en el Giro.....	67
CAPÍTULO 6. GENERACIÓN DE LA TRAYECTORIA DE MOVIMIENTO DEL ROBOT LUNAbot W6 VJ1.0®		74
6.1.	INTRODUCCIÓN	74
6.2.	MÉTODO PARA EL DESPLAZAMIENTO RECTO DEL ROBOT	74
6.2.1.	Desplazamiento hacia Adelante	74
6.2.2.	Desplazamiento hacia Atrás	79
6.3.	MÉTODO PARA EL GIRO SOBRE EL CENTRO GEOMÉTRICO DEL ROBOT	84
6.3.1.	Giro en Sentido Horario.....	84
6.3.2.	Giro en Sentido Antihorario	90
6.4.	MÉTODO PARA DETENER EL ROBOT	96
6.4.1.	Detención en Desplazamiento Recto	96
6.4.2.	Detención en Movimiento Giratorio	99
CAPÍTULO 7. DISEÑO MECÁNICO DEL ROBOT LUNAbot W6 VJ1.0®		104
7.1.	INTRODUCCIÓN	104
7.2.	CRITERIOS DE DISEÑO.....	104
7.2.1.	Ángulo de desmoldeo.....	104
7.2.2.	Espesor de pieza.....	105
7.2.3.	Alojamientos.....	106
7.2.4.	Agujeros.....	107
7.2.5.	Roscas.....	109
7.2.6.	Nervios.....	109
7.2.7.	Radios y esquinas	110
7.2.8.	Evitar zonas sobredimensionadas en las piezas.....	111
7.2.9.	Contrasalidas	112
7.2.10.	Nervios de soporte	113
7.2.11.	Grosor de pared	114

7.3.	DISEÑO CONCEPTUAL	115
7.3.1.	Tipos de Materiales.....	115
7.3.1.1.	Plásticos o Polímeros	115
7.3.1.2.	Aluminio	122
7.3.2.	Selección de Materiales	126
7.3.2.1.	Ácido Poliláctico (PLA).....	127
7.3.2.2.	Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)	130
7.3.2.3.	Aleación de Aluminio 6061-T6	133
7.3.2.4.	Nylon (Poliamidas)	135
7.3.2.5.	Resina de Acetal	138
7.3.2.6.	Caucho (Elastómeros)	140
7.3.3.	Diseño preliminar del LUNAbot W6 VJ1.0®	144
7.3.3.1.	Componentes del Pie	144
7.3.3.2.	Componentes de la Pierna	147
7.3.3.3.	Componentes de la Pelvis	151
7.4.	DISEÑO DE DETALLE	157
7.4.1	Empleo del Método de Elemento Finito (MEF) para el análisis estructural del LUNAbot W6 VJ1.0®	157
7.4.2.	Características morfológicas finales de las piezas que conforman al LUNAbot W6 VJ1.0®	166
CAPÍTULO 8. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA UNIDAD DE PROPULSIÓN.....		171
8.1.	INTRODUCCIÓN	171
8.2.	IMPRESIÓN EN 3D	171
8.3.	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE LA PIERNA Y EL PIE DEL LUNAbot W6 VJ1.0® UTILIZANDO IMPRESIÓN 3D.....	172
8.3.1.	Prototipo del Pie	172
8.3.2.	Prototipo de la Pierna	173
CAPÍTULO 9. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROTORIPO DE LA UNIDAD DE PROPULSIÓN.....		175
9.1.	PRUEBAS.....	175
9.2.	RESULTADOS	175
CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES		177
TRABAJOS FUTUROS		178
REFERENCIAS.....		179
GLOSARIO		184
ANEXOS		186

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1. Chica automatizada sirviendo bebidas de Al-Jazari.	9
Fig. 2.2. Autómata de lavado de manos de Al-Jazari.	9
Fig. 2.3. Autómata pavo real de Al-Jazari.	10
Fig. 2.4. Autómata musical de Al-Jazari.	10
Fig. 2.5. Modelo del caballero mecánico de Leonardo da Vinci.	10
Fig. 2.6. Robot autómata llamado karakuri ningyo.	11
Fig. 2.7. (a) Robot Lilliput, (b) Atomic Robot Man.	12
Fig. 2.8. (a) Robert the Robot, (b) Marvelous Mike, (c) Big Max, (d) Marx Electric Robot.	13
Fig. 2.9. Tipo de mecanismo de pierna Bessonov.	19
Fig. 2.10. (a) Robot ASIMO de Honda, (b) Robot iRobi y TransBot de Yujin Robotics, (c) Robot QRIO de SONY, (d) Robot japonés HRP-4C.	20
Fig. 2.11. Diferentes tipos de robots zoomórficos: (a) Robot Aibo, (b) Robot Bigdog, (c) Robot araña, (d) Robot hexápodo tipo arácnido.	21
Fig. 3.1. Puntos y eslabones que conforman al MPL.	22
Fig. 3.2. Grados de libertad de la unidad de propulsión basados en el MPL.	23
Fig. 3.3. Mecanismo de Peaucellier-Lipkin.	23
Fig. 3.4. (a) Eslabón fijo o base, eslabón de entrada y elemento de salida. (b) Puntos extremos de los eslabones constitutivos.	24
Fig. 3.5. Sistema de coordenadas local (x_0, y_0, z_0) y la definición de los puntos básicos del MPL.	24
Fig. 3.6. Geometría obtenida al variar θ_B en forma positiva.	25
Fig. 3.7. Vector l_{BC} dirigido del punto B al punto C	26
Fig. 3.8. Triángulos formados por los puntos A, B, C y D	26
Fig. 3.9. Triángulos formados por los puntos A, B, C y E	28
Fig. 3.10. Triángulos formados por los puntos A, B, C, F y M	29
Fig. 4.1. Posición del MPL cuando genera un arco cóncavo.	36
Fig. 4.2. Triángulo formado por los puntos Cr, A y F	36
Fig. 4.3. Triángulo formado por los puntos A, D y F	37
Fig. 4.4. Triángulo formado por los puntos A, D y M	37
Fig. 4.5. Triángulo formado por los puntos A, B y C	38
Fig. 4.6. Espacio de trabajo de la unidad de propulsión para el desplazamiento recto.	39
Fig. 4.7. Triángulo formado por los puntos A, B y C	40
Fig. 4.8. Triángulo formado por los puntos A, C y D	40
Fig. 4.9. Triángulo formado por los puntos A, D y M	41
Fig. 4.10. Triángulo formado por los puntos A, F y N	41
Fig. 4.11. Espacio de trabajo de la unidad de propulsión para el giro.	43
Fig. 4.12. Triángulo formado por los puntos A, B y C para el giro.	43
Fig. 4.13. Triángulo formado por los puntos A, C y D para el giro.	44

Fig. 4.14. Triángulo formado por los puntos <i>A</i> , <i>D</i> y <i>M</i> para el giro.	44
Fig. 4.15. Triángulo formado por los puntos <i>A</i> , <i>D</i> y <i>M</i> para el giro.	45
Fig. 4.16. Espacio de trabajo de dos unidades de propulsión para el desplazamiento recto.....	47
Fig. 4.17. Configuración de las unidades de propulsión con $\theta_{Bmáx} = 60^\circ$ y $\theta_{Bmín} = -60^\circ$ para el desplazamiento recto.	47
Fig. 4.18. Espacio de trabajo de dos unidades de propulsión para el giro.	48
Fig. 4.19. Configuración de las unidades de propulsión con $\theta_{Bmáx} = 60^\circ$ y $\theta_{Bmín} = -60^\circ$ para el giro.	49
Fig. 5.1. Máquina caminante basada en el principio básico de desplazamiento	50
Fig. 5.2. Designación de las unidades de propulsión de la máquina caminante LUNAbot W6 VJ1.0®.	52
Fig. 5.3. Orientación de las extremidades de la máquina caminante para que se desplace en línea recta.	53
Fig. 5.4. Orientación de las extremidades de la máquina caminante para que gire en torno a su centro geométrico.....	53
Fig. 5.5. Mecanismo de reconfiguración de unidades de propulsión.....	54
Fig. 5.6. Descripción de la transmisión del movimiento a las correderas dentadas (350) y (351) para las extremidades P1, P3 y P5.	55
Fig. 5.7. Descripción de la transmisión del movimiento de las correderas dentadas (350) y (351) al eslabón G (353) y al eslabón AB (201).....	55
Fig. 5.8. Descripción de la transmisión del movimiento del brazo extensor (352) al eslabón AB (202).	56
Fig. 5.9. Configuración final de los eslabones AB, (201) y (202), de las extremidades P1, P3 y P5 y configuración inicial de los eslabones AB, (201) y (202), de las extremidades P2, P4 y P6, durante el proceso de reconfiguración de desplazamiento en línea recta a giro alrededor del centro geométrico de la máquina caminante.	57
Fig. 5.10. Estado final de los eslabones AB, (201) y (202), de los mecanismos de transmisión logrado cuando las extremidades ya se encuentran reconfiguradas y listas para ejecutar giros alrededor de su centro geométrico.	57
Fig. 5.11. Eslabones AB, (201) y (202), orientados hacia el centro de la máquina caminante.	58
Fig. 5.12. Inicio del proceso de reconfiguración del eslabón BC (206) en la transición de movimiento de línea recta a giro alrededor de su centro geométrico.....	58
Fig. 5.13. Estado final del eslabón BC (206) para ejecutar giros alrededor de su centro geométrico.	59
Fig. 5.14. (a) Eslabón BC (206). (b) Localización del seguidor fijo (205a) en el eslabón BC (206).....	59
Fig. 5.15. Localización de las levas fijas (302a) en el chasis o pelvis (302).	60
Fig. 5.16. Vista superior del estado final de la parte interna de la máquina caminante, correspondiente a su configuración lista para ejecutar giros alrededor de su centro geométrico.	60
Fig. 5.17. Esquema general de los sistemas de coordenadas de cada extremidad y del sistema de coordenadas global.	61

Fig. 5.18. Esquema general de los sistemas de coordenadas de cada extremidad y del sistema de coordenadas global para movimiento recto.....	62
Fig. 5.19. Localización del sistema coordenado de la extremidad 1 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para movimiento recto.	63
Fig. 5.20. Localización del sistema coordenado de la extremidad 2 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para movimiento recto.....	64
Fig. 5.21. Localización del sistema coordenado de la extremidad 3 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para movimiento recto.....	64
Fig. 5.22. Localización del sistema coordenado de la extremidad 4 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para movimiento recto.....	65
Fig. 5.23. Localización del sistema coordenado de la extremidad 5 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para movimiento recto.....	65
Fig. 5.24. Localización del sistema coordenado de la extremidad 6 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para movimiento recto.....	66
Fig. 5.25. Esquema general de los sistemas de coordenadas de cada extremidad y del sistema de coordenadas global para giro en torno al punto O	67
Fig. 5.26. Localización del sistema coordenado de la extremidad 1 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para giro.	68
Fig. 5.27. Localización del sistema coordenado de la extremidad 2 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para giro.	68
Fig. 5.28. Localización del sistema coordenado de la extremidad 3 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para giro.	69
Fig. 5.29. Localización del sistema coordenado de la extremidad 4 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para giro.	70
Fig. 5.30. Localización del sistema coordenado de la extremidad 5 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para giro.	70
Fig. 5.31. Localización del sistema coordenado de la extremidad 6 respecto al sistema de coordenadas global x_o y y_o para giro.	71
 Fig. 7.1. Ejemplo de ángulo de desmoldeo.....	 105
Fig. 7.2. Gráfica con desmoldeo (A) en mm para varios ángulos de desmoldeo (B) en función de la profundidad de la pieza (C).....	105
Fig. 7.3. Transición gradual en espesor de pared.	106
Fig. 7.4. Esquema de cotas de alojamientos.	107
Fig. 7.5. Dimensiones para agujeros ciegos.	107
Fig. 7.6. Diseño de agujeros pasante.	108
Fig. 7.7. Distribución y localización recomendada de los agujeros.....	108
Fig. 7.8. Roscas externas con el eje en la línea de partición.	109
Fig. 7.9. Reglas generales de dimensionado de nervios.	110
Fig. 7.10. Redondeo en esquinas.....	111
Fig. 7.11. Tensiones en esquinas.....	111
Fig. 7.12. Ejemplo de vaciado de pieza.....	112

Fig. 7.13. Diferencias en el diseño de agujeros. Opción izquierda, necesita movimiento lateral del molde, y la opción derecha, presenta una salida en la dirección natural del molde (sin necesidad de mecanismos auxiliares).....	112
Fig. 7.14. Diseño de nervios de soporte.....	113
Fig. 7.15. Diseño de nervios de soporte.....	114
Fig. 7.16. Pasos para la producción actual del PLA.....	128
Fig. 7.17. Composición del ABS.....	131
Fig. 7.18. Reacción de formación de poliamidas o nylon.	135
Fig. 7.19. Estructura del nylon 6	136
Fig. 7.20. Estructura del nylon 66.....	136
Fig. 7.21. Formación del acetal.	139
Fig. 7.22. Ensamble del Pie del LUNAbot®. (a) Vista frontal del pie en la posición apoyada. (b) Vista frontal del pie en la posición levantada. (c) Vista isométrica del pie en la posición apoyada. (d) Vista isométrica del pie en la posición levantada.	147
Fig. 7.23. Ensamble de la Pierna del LUNAbot®. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. (c) Vista isométrica.	151
Fig. 7.24. Ensamble de la Pelvis del LUNAbot®. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. (c) Vista trimétrica.	156
Fig. 7.25. Ensamble global del LUNAbot®. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral. (c) Vista superior. (d) Vista trimétrica.	157
Fig. 7.26. El campo del CAD/CAM visto esquemáticamente [16].	159
Fig. 7.27. (a) Pie y Pierna. (b) Pelvis. (c) LUNAbot W6 VJ1.0®	169
 Fig. 8.1. Piezas impresas y comerciales del prototipo del Pie.....	 173
Fig. 8.2. Ensamble del prototipo del Pie.....	173
Fig. 8.3. Piezas impresas y comerciales del prototipo de la Pierna.....	174
Fig. 8.4. Ensamble del prototipo de la Pierna.	174
Fig. 8.5. Ensamble del Pie con la Pierna.	174
 Fig. 9.1. Posiciones del MPL al aplicar un torque con la mano al perno B. (a) Giro en ángulo positivo. (b) Giro en ángulo negativo.	 176

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Compañías dedicadas al desarrollo de robots de juguete y de entretenimiento.	13
Tabla 3.1. Efecto en el MPL debido a la variación del ángulo de entrada θ_B	24
Tabla 3.2. Coordenadas de los puntos descriptivos del MPL cuando $\theta_B = 60^\circ$	30
Tabla 3.3. Coordenadas de los puntos descriptivos del MPL cuando $\theta_B = 0^\circ$	30
Tabla 3.4. Coordenadas de los puntos descriptivos del MPL cuando $\theta_B = -30^\circ$	31
Tabla 3.5. Posición de los puntos constitutivos del MPL para el Caso I.	31
Tabla 3.6. Posición de los puntos constitutivos del MPL para el Caso II.	32
Tabla 3.7. Posición de los puntos constitutivos del MPL para el Caso III.	33
Tabla 4.1. Espacio de trabajo de una unidad de propulsión para el desplazamiento recto con diferentes valores de θ_B	42
Tabla 4.2. Espacio de trabajo de una unidad de propulsión para el giro con diferentes valores de θ_B	46
Tabla 5.1. Coordenadas de los puntos de las 6 extremidades medidos desde el sistema coordenado global cuando $\theta_B = 60^\circ$ para el movimiento recto.....	66
Tabla 5.2. Coordenadas de los puntos de las 6 extremidades medidos desde el sistema coordenado global cuando $\theta_B = 60^\circ$ para el giro.	72
Tabla 6.1. Metodología para el movimiento en línea recta hacia adelante.....	75
Tabla 6.2. Metodología para el movimiento en línea recta hacia atrás.	79
Tabla 6.3. Metodología para el movimiento de giro en sentido horario.....	84
Tabla 6.4. Metodología para el movimiento de giro en sentido antihorario.	90
Tabla 6.5. Metodología para la detención del robot en el desplazamiento recto.....	97
Tabla 6.6. Metodología para la detención del robot en el movimiento giratorio.....	99
Tabla 7.1. Grosor recomendado para la pared de las piezas plásticas según el tipo de resina.....	114
Tabla 7.2. Termoplásticos (The Society of Plastics Industry).	117
Tabla 7.3. Plásticos termofijos (The Society of Plastics Industry).	120
Tabla 7.4. Grupos de aleaciones de Aluminio	122
Tabla 7.5. Aleaciones de Aluminio y sus usos].	123
Tabla 7.6. Propiedades típicas del aluminio.	124
Tabla 7.7. Composición y propiedades típicas a temperatura ambiente de aleaciones de aluminio forjado.	125
Tabla 7.8. Características generales del PLA amorfo comercial en película, grado inyección de molde, L:D a 96:4, producido por NatureWorks® Co.	128
Tabla 7.9. Segmentos de negocios para productos basados en plásticos y fibras de PLA de Ingeo™ (NatureWorks®).	129

Tabla 7.10. Propiedades cualitativas del ABS.	131
Tabla 7.11. Propiedades cuantitativas del ABS.	132
Tabla 7.12. Cantidad mínima y máxima de elementos presentes en la aleación 6061.	134
Tabla 7.13. Propiedades físicas de la aleación 6061.	134
Tabla 7.14. Propiedades tecnológicas de la aleación 6061.	135
Tabla 7.15. Propiedades de los tipos de Nylomaq (La Paloma compañía de metales S.A de C.V).....	138
Tabla 7.16. Propiedades del Acetal (La Paloma compañía de metales S.A de C.V)	139
Tabla 7.17. Productos de caucho que maneja la empresa PHASA.	141
Tabla 7.18. Componentes que conforman al Pie del LUNAbot®.....	144
Tabla 7.19. Componentes que conforman a la Pierna del LUNAbot®.....	147
Tabla 7.20. Componentes que conforman la Pelvis del LUNAbot®.....	151
Tabla 7.21. Análisis mediante el MEF para la pieza Lb-W6-VJ1-PR204.....	162
Tabla 7.22. Análisis mediante el MEF para la pieza Lb-W6-VJ1-PR205.....	163
Tabla 7.23. Análisis mediante el MEF para la pieza Lb-W6-VJ1-PE101.....	165
Tabla 7.24. Piezas que sufrieron algún cambio en su morfología y piezas nuevas del LUNAbot®.....	166
 Tabla 8.1. Características principales de la impresora 3D utilizada.	 172
 Tabla 9.1. Tiempo total al ascender el Pie del LUNAbot®.....	 175
Tabla 9.2. Tiempo total al descender el Pie del LUNAbot®.....	176

RESUMEN

Este proyecto de investigación trata sobre el **Diseño Mecánico del Robot LUNAbot W6 V1.0[®]**, que es una máquina caminante de 6 extremidades y que utiliza como unidad de propulsión el mecanismo de **Peaucellier-Lipkin**, el cual se considera como un *mecanismo de línea recta exacta*.

Así mismo, describe el principio y metodología de funcionamiento utilizado en las máquinas caminantes clase **LUNAbot[®]**, para realizar movimientos en línea recta y girar alrededor de su centro geométrico.

Finalmente se presenta el prototipo de una unidad de propulsión del robot **LUNAbot W6 V1.0[®]**, fabricada mediante la impresión en 3D la cual es una de las tecnologías más innovadoras en el desarrollo de prototipos.

PALABRAS CLAVE

- LUNAbot W6 VJ1.0[®].
- Mecanismo Peaucellier-Lipkin.
- Máquina caminante.
- Unidad de propulsión.
- Eslabón.
- Pie.
- Pierna.
- Pelvis.

ABSTRACT

This research project is about the **Mechanical Design of the LUNAbot W6 V1.0[®] Robot**, which is a walking robot with 6 legs and uses as propulsion unit the **Peaucellier-Lipkin's** mechanism, which is considered as a straight exact line mechanism.

On the other hand, the principle and operation method used in the **LUNAbot[®]** robot are explained for linear motion and go round about its geometric center.

Finally a prototype of one propulsion unit of the **LUNAbot W6 V1.0[®]** robot is presented; the archetype was manufactured by 3D printing which is one of the technologies most innovative in the development of prototypes.

KEYWORDS

- LUNAbot W6 VJ1.0[®].
- Peaucellier-Lipkin's mechanism.
- Walking robot.
- Propulsion unit.
- Link.
- Foot.
- Leg.
- Pelvis.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. RESUMEN

Este proyecto de investigación trata sobre el **Diseño Mecánico del Robot LUNAbot W6 V1.0®**, que es una máquina caminante de 6 extremidades y, las cuales, se basan en el mecanismo de **Peaucellier-Lipkin** como unidad de propulsión y que es considerado como un *mecanismo de línea recta exacta*, ya que su elemento de salida genera un movimiento recto; aunque, por otra parte, si a dos de sus eslabones constitutivos se les varía su longitud, el elemento de salida podrá generar arcos.

Actualmente se encuentra en desarrollo otra versión de la máquina caminante LUNAbot®, sólo que dicha versión está pensada para utilizarse como un robot de asistencia médica para personas con movilidad reducida o nula y que dependen de algún dispositivo para su traslado. Aunque la versión de asistencia médica ya se está desarrollando, aún es necesario contar con los recursos financieros para su finalización y para el desarrollo de otras versiones. Es por eso que se decidió realizar este proyecto, puesto que el diseño de la máquina que aquí se propone tiene la finalidad de servir como un robot de juguete y/o entretenimiento, ya que es una versión más pequeña que el de asistencia médica.

Por otro lado, se da una breve reseña acerca de los robots de juguete y de entretenimiento que han existido desde la antigüedad hasta la época actual, así como una breve descripción de lo que son las máquinas y/o robots caminantes.

En esta tesis, además, se presentan las particularidades que hacen que el elemento de salida del mecanismo de Peaucellier-Lipkin pueda realizar tanto un movimiento en línea recta como el de giro alrededor de algún punto en específico.

También se describe cuál es el principio de funcionamiento en el que se basan las máquinas caminantes clase LUNAbot®, así como la reducción de grados de libertad de la máquina caminante de asistencia médica a los grados de libertad de la máquina caminante de entretenimiento.

Además, se presenta una metodología de los diferentes movimientos que puede realizar el LUNAbot W6 V1.0®; es decir, las acciones que ha de seguir el robot para poder realizar los movimientos que el usuario desea que realice.

En cuanto a lo que respecta al propio diseño del robot, se muestra el diseño conceptual que engloba una selección de materiales que se desean para la fabricación del robot, una guía de criterios de diseño para la fabricación de piezas plásticas y un diseño preliminar de las piezas que conforman al robot; también se muestra el diseño de detalle de la máquina caminante, es decir, el diseño final que tendrá ésta, el cual surge del diseño preliminar y de la obtención

de un análisis estructural, mediante elemento finito, de las piezas que pueden presentar alguna deformación crítica debido a cargas estáticas y dinámicas por el peso y movimiento del propio robot.

Por último, se presenta el prototipo de una unidad de propulsión del robot, fabricada por medio de una de las tecnologías que empieza a tener auge en estos tiempos y que es la impresión en 3D, así como un par de pruebas que se realizaron a dicha unidad.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema, principalmente, se desprende del desarrollo de un sistema robótico múltipodo, el cual está pensado y diseñado para servir como un robot de asistencia médica y/o de servicio, para facilitar la movilidad tanto de adultos mayores como de personas con problemas de motricidad reducida o nula de su cuerpo o extremidades, debido a alguna enfermedad o accidente y que, por lo tanto, presentan dificultades para desplazarse en terrenos tanto regulares como irregulares. Por desgracia no existen los lugares suficientes en el país en donde se tome en cuenta los problemas a los que se enfrentan las personas con capacidades diferentes al momento de querer desplazarse.

Para poder realizar el sistema robótico múltipodo, al cual se le ha nombrado *LUNAbot W6 VX1.0*®, es indispensable tener los recursos económicos necesarios para su desarrollo completo y hasta el momento se cuenta apenas con una pequeña parte de estos recursos. Por esta razón, se ha decidido realizar una versión más pequeña del robot múltipodo mencionado anteriormente, la versión será de juguete y/o entretenimiento, y que servirá para adquirir una parte importante de los recursos económicos que se necesitan para continuar con su desarrollo. Además, el proyecto de la versión pequeña del robot múltipodo, está pensado para brindar entretenimiento tanto a los pequeños del hogar como a aquellas personas adultas que les gusta manipular un sistema robótico aun siendo éste un juguete.

Otro punto importante que hay que mencionar es que hasta la fecha no se tiene información alguna de que el mecanismo en el que estos robots basan su sistema de propulsión se utilice en el sistema mecánico de algún robot; es decir, que al **Mecanismo de Peaucellier-Lipkin (MPL)** no se le ha dado, aún, alguna aplicación extensa dentro del campo de la robótica.

Por lo tanto, con el diseño y desarrollo del proyecto, el cual se ha nombrado *LUNAbot W6 VJ1.0*®, se podrán obtener los recursos necesarios para el desarrollo de los otros robots múltipodos, tanto de asistencia médica como de servicio, que basan alguna parte de su arquitectura en el MPL, además de asentar algunas bases en cuanto a su aplicación dentro de la robótica.

1.3. JUSTIFICACIÓN

A continuación se muestran los diferentes factores que justifican el desarrollo de este proyecto:

- a) Hasta el momento no se ha encontrado información alguna de que el Mecanismo de Peaucellier-Lipkin se esté utilizando extensamente como sistema de locomoción para un vehículo robótico; ya sea para el transporte de personas con movilidad reducida o nula, para entretenimiento o para algún otro uso.
- b) Se requiere generar los recursos económicos para el financiamiento de las otras versiones del robot que son para servicio y/o asistencia médica para personas con movilidad reducida o nula.
- c) Generar conocimiento científico relacionado con la utilización del Mecanismo de Peaucellier-Lipkin dentro del campo de la robótica.

1.4. HIPÓTESIS

Se puede diseñar el sistema mecánico del robot *LUNAbot W6 VJ1.0*®, implementando el mecanismo de Peaucellier-Lipkin como sistema de propulsión, que pueda desplazarse en línea recta y/o realizar giros alrededor de su centro geométrico y tenga la capacidad de moverse en terrenos regulares e irregulares.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

Diseñar el sistema mecánico del robot *LUNAbot W6 VJ1.0*®, implementando el mecanismo de Peaucellier-Lipkin como sistema de locomoción, que pueda desplazarse en línea recta y/o realizar giros para alcanzar orientaciones y posiciones específicas, con la capacidad de moverse en terrenos regulares e irregulares.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Realizar un diseño conceptual de las diferentes partes que conforman el robot (pie, pierna y pelvis), teniendo presente la reducción de la cantidad de motores con el fin de abaratar costos de producción y prolongar su autonomía.
- Desarrollar las metodologías de movimiento del robot.
- Determinar la resistencia mecánica de varias partes que integran al robot mediante el análisis de elemento finito.
- Realizar algún cambio en la morfología de las piezas que conforman al robot o tipo de material seleccionado dependiendo de los resultados del análisis de elemento finito.

- Realizar el diseño de detalle del sistema mecánico del robot.

1.6. CAPITULADO

CAPÍTULO 1. (Introducción) presenta un breve resumen del proyecto de investigación desarrollado esta tesis. También se describen: el problema a resolver, la justificación, la hipótesis y los objetivos que se plantearon para resolver el problema de investigación.

CAPÍTULO 2. (Marco teórico) se da una pequeña reseña histórica de los robots de juguete y de entretenimiento, al igual que una breve descripción de lo que son las máquinas y/o robots caminantes. Posteriormente se describe brevemente la máquina caminante *LUNAbot W6 VJ1.0*®, así como las particularidades que tienen sus extremidades compuestas por el mecanismo de línea recta llamado *Peaucellier-Lipkin*.

CAPÍTULO 3. (Cinemática directa de la unidad de propulsión) presenta todo lo referente a la cinemática directa de la unidad de propulsión en base a los eslabones que conforman al *Mecanismo de Peaucellier-Lipkin*, así como el número de grados de libertad con que cuenta este mecanismo. También se presenta el modelo matemático del propio mecanismo para la generación de líneas rectas y arcos alrededor de algún punto.

CAPÍTULO 4. (Cinemática directa de la unidad de propulsión) explica el procedimiento matemático que se realizó para conocer las dimensiones que se requieren en las variables de la articulación en función del centro de rotación que, en este caso, será el propio centro geométrico del robot. Por otro lado, se aborda el tema del espacio de trabajo que genera una unidad de propulsión en conjunto con otras unidades, tanto en un desplazamiento recto como en el giro alrededor del centro geométrico del robot.

CAPÍTULO 5. (Principio de funcionamiento de una máquina caminante basada en el mecanismo de Peaucellier-Lipkin) se aborda lo referente al principio básico de desplazamiento que puede generar una máquina caminante multi-patas; de cómo se logra disminuir los grados de libertad de la máquina caminante nombrada *LUNAbot W6 VX1.0*® a los grados de libertad con que cuenta la máquina caminante *LUNAbot W6 VJ1.0*® y el cual es tema de esta investigación. Finalmente, se explica la descripción espacial de las unidades de propulsión que conforman al *LUNAbot W6 VJ1.0*®.

CAPÍTULO 6. (Generación de la trayectoria de movimiento del robot LUNAbot W6 VJ1.0®) se detalla la metodología de trayectoria que deben seguir las extremidades del *LUNAbot W6 VJ1.0*® para que éste pueda desplazarse tanto en línea recta hacia adelante y hacia atrás, como para realizar giros hacia la derecha o izquierda sobre su propio centro geométrico.

CAPÍTULO 7. (Diseño mecánico del robot LUNAbot W6 VJ1.0®) explica todo lo concerniente al diseño conceptual y de detalle del robot *LUNAbot W6 VJ1.0*®. Cabe

mencionar que la máquina caminante se divide en 3 partes principales a las cuales se les ha nombrado como *Pie*, *Pierna* y *Pelvis*.

CAPÍTULO 8. (Construcción del prototipo de una unidad de propulsión) presenta los prototipos del Pie y la Pierna del *LUNAbot W6 VJ1.0*® impresos en 3D en ácido Poliláctico (PLA).

CAPÍTULO 9. (Pruebas y resultados del prototipo de la unidad de propulsión) muestra las pruebas realizadas a los prototipos del Pie y la Pierna del *LUNAbot W6 VJ1.0*®, así como los resultados obtenidos de dichas pruebas.

CAPÍTULO 10. (Conclusiones) se presentan las conclusiones a las que se llegaron después de haber sido realizado este proyecto de investigación, así como los trabajos a futuro que se pueden realizar.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

En estos momentos se encuentra en desarrollo un robot caminante al cual se le ha denominado **LUNAbot W6 VX1.0®**, cuya característica principal es que sus elementos de locomoción o extremidades están basados en el *mecanismo de línea recta exacta* llamado **Mecanismo de Peaucellier-Lipkin (MPL)**. Como se demostrará posteriormente, se podrá observar claramente que el elemento de salida de este mecanismo puede, además de trazar líneas rectas exactas, también puede trazar arcos circulares exactos. Para poder lograr esto se necesita variar la relación de longitudes de dos de sus eslabones constitutivos. Esta cualidad permite que el robot caminante de la clase **LUNAbot®** pueda desplazarse en línea recta simplemente con el accionamiento de una de las varias articulaciones independientes de cada extremidad. Para lograr los giros, las extremidades tienen la capacidad de reconfigurarse a una topología distinta debido a las características metamórficas del mecanismo que provocan alteraciones de los elementos del eslabonamiento, en este caso la relación de longitud de dos de sus elementos. Una vez que se ha logrado ese cambio de topología, el robot caminante puede girar hasta lograr la orientación deseada y, de la misma manera en que lo hace para el desplazamiento en línea recta, el giro lo hace empleando sólo dos de los actuadores por extremidad, lo cual le ofrece una cualidad que la distingue de prácticamente cualquier otro robot caminante distinto a la clase **LUNAbot®**. Las extremidades de otros robots caminantes, normalmente tienen 3 grados de libertad para posicionar su pie o tienen 6 grados de libertad para posicionarlo y orientarlo; por lo tanto, requieren controlar coordinadamente todas sus articulaciones para lograr esa meta, haciendo que su control sea muy complejo. En el caso de los robots y/o máquinas clase **LUNAbot®**, esta tarea la realizan de manera muy simple y, como consecuencia inmediata, muy económica.

Los robots y/o máquinas de la clase **LUNAbot®** son dispositivos caminantes bípedos, tetrápodos, hexápodos o de más piernas, las cuales, para su desplazamiento lineal o de giro, siempre buscan un punto focal de rotación y, en función de éste, adaptan la topología de sus extremidades gracias a su cualidad metamórfica.

Los robots y/o máquinas caminantes clase **LUNAbot®** se pueden presentar en diferentes versiones que van desde juguetes y robots de entretenimiento hasta robots de servicio y asistencia médica. La diferencia se presenta desde su tamaño, el número de actuadores, la precisión con que realizan sus movimientos, el sistema de control y otras tantas características que demanden las diferentes aplicaciones.

En este proyecto se desarrollará el Diseño del Sistema Mecánico para la máquina caminante **LUNAbot®** hexápoda (**W6**) en versión de juguete (**VJ1.0**), ya que sólo se cuenta con el diseño de la versión **VX1.0**, que es un robot hexápodo eléctrico creado con fines

experimentales para transportar una sola persona. Cabe mencionar que se ha optado por realizar este tipo de robot caminante de juguete o entretenimiento para poder obtener el recurso económico necesario para desarrollar las otras versiones de la clase *LUNAbot*®.

Por último, se puede hacer mención de que esta clase de máquinas y/o robots caminantes aún no tiene precedente alguno en su tipo de arquitectura; es decir, aún el **MPL** no se ha utilizado ampliamente en el campo de la robótica.

2.2. ROBOTS DE JUGUETE Y DE ENTRETENIMIENTO

Históricamente, se cree que los juguetes mecanizados originales tienen sus antecedentes en la antigua Grecia.

Se dice que Al-Jazari, un inventor e ingeniero árabe, creó el primer autómatas humanoide conocido. Al-Jazari vivió dentro de la segunda mitad del Siglo XII y principios del Siglo XIII en Al-Jazira (nombre tradicional árabe para lo que era el norte de Mesopotamia y que hoy en día es el noroeste de Iraq y el noreste de Siria) y sirvió como ingeniero en el Palacio Artuklu, residencia de la rama Diyarbakir de la dinastía turca Artuqí.

Cinco meses antes de su muerte en el año de 1206, Al-Jazari logró terminar su famoso libro *“El libro del conocimiento de dispositivos mecánicos ingeniosos”*, el cual describe a detalle 50 dispositivos y que se agrupan en seis categorías:

- 1) Diez relojes de agua y velas.
- 2) Diez vasos y figuras adaptados para las sesiones de bebida.
- 3) Diez cántaros y lavabos para la flebotomía (incisión practicada en las venas) y el lavado antes de las oraciones.
- 4) Diez fuentes que cambian su forma alternadamente, y máquinas para la flauta perpetua.
- 5) Cinco máquinas para elevar agua.
- 6) Cinco dispositivos misceláneos.

Cada dispositivo está descrito en un fácil y simple árabe entendible, y cada uno de ellos está acompañado de un dibujo general. Para los mecanismos complicados el autor hizo dibujos detallados para los componentes del mecanismo para los subconjuntos, de manera que la operación de éstos pueda ser entendible. En el libro se presentan un total de 174 dibujos.

Los autómatas que incluye el libro de Al-Jazari son:

- 1) Una chica automatizada sirviendo bebidas.
- 2) El movimiento de un pavo real automatizado impulsado por energía hidráulica.
- 3) Unas puertas automáticas, las cuales eran impulsadas por energía hidráulica.

- 4) Otros varios autómatas, incluyendo máquinas automáticas, dispositivos de mesa y autómatas potenciados por agua.

El autómata humanoide de la chica que podía servir agua, té o bebidas, mostrado en la fig. 2.1, es muy interesante. Según el diseño de Al-Jazari, la bebida se almacena en un tanque con un depósito por donde la bebida gotea dentro de un balde y, después de 7 minutos, en una copa, tras lo cual la chica aparece fuera de una puerta automática sirviendo la bebida.



Fig. 2.1. Chica automatizada sirviendo bebidas de Al-Jazari [38].

Al-Jazari también describió un autómata para lavado de manos (fig. 2.2), incorporando un mecanismo de chorro de agua. Este mecanismo cuenta con una chica autómata de pie con un recipiente lleno de agua, cuando el usuario tira de la palanca, el agua dreña y la chica vuelve a llenar el lavabo.



Fig. 2.2. Autómata de lavado de manos de Al-Jazari [38].

La fuente de pavo real de Al-Jazari (fig. 2.3) fue un dispositivo de lavado de manos más sofisticado que el de la chica autómata, presentando un autómata humanoide, como si fuera un sirviente, el cual ofrece jabón y toallas. Tirando de una clavija de contacto en la cola del pavo real libera agua del pico y, como el agua sucia del lavabo llena una base que está hueca, un flotador sube y acciona una articulación, lo que hace que una figura de en forma de un sirviente aparezca desde atrás de una puerta bajo el pavo real ofreciendo jabón. Cuando se utiliza más agua, un segundo flotador viaja a un nivel superior y provoca la aparición de una segunda figura de sirviente, esta vez con una toalla.



Fig. 2.3. Autómata pavo real de Al-Jazari [38].

Otro dispositivo que Al-Jazari también describió fue un autómata musical (fig. 2.4), el cual constaba de un bote con cuatro músicos autómatas, el bote flotaba en un lago con la intención de entretener a los invitados en las fiestas reales. El mecanismo presentaba una caja de ritmos programable con clavijas (levas), que golpeaban pequeñas palancas las cuales operaban la percusión. El tambor podía estar hecho para interpretar diferentes ritmos y diferentes patrones de percusión si las clavijas se movían alrededor. Los autómatas eran una “*banda de robots*,” los cuales realizaban más de cincuenta acciones faciales y corporales durante cada selección musical [38].



Fig. 2.4. Autómata musical de Al-Jazari [38].

Posteriormente, Leonardo da Vinci, alrededor del año 1495, diseñó una versión de un autómata mecanizado conocido como el “caballero mecánico” (fig. 2.5). Sus dibujos detallados muestran a un humanoide que podía mover sus brazos y su cabeza y tenía la habilidad de sentarse. Nadie conoce si alguna vez creó prototipos físicos de dicho caballero.

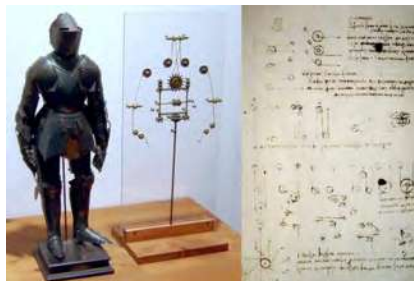


Fig. 2.5. Modelo del caballero mecánico de Leonardo da Vinci [40].

En los años de 1800's, el artesano japonés Hisashige Tanaka crea un juguete mecánico muy complejo para dicha época. Su creación era capaz de escribir, disparar flechas y servir el té. Un ejemplo de este tipo de autómata eran los denominados “*Karakuri ningyo*” (fig 2.6).



Fig. 2.6. Robot autómatas llamado karakuri ningyo [41].

Las fábricas japonesas de juguetes de hojalata comenzaron a hacer robots de juguete cerca del final del Siglo XIX. Los fabricantes alemanes ya estaban vendiendo robots de juguete en ese momento, y los fabricantes japoneses querían tomar parte de ese mercado. Ellos simplificaron los diseños alemanes, y cerca del fin de la Primera Guerra Mundial, se hicieron cargo de dicho mercado.

En 1921 se introdujo, por primera vez, la palabra “robot” por el escritor checo Karel Čapek. Ésta se deriva de la palabra checa “robota” que significa “labor” o “trabajo” y la cual fue utilizada para describir personas artificiales [39].

Desde antes de la Segunda Guerra Mundial, estos juguetes ganaron popularidad rápidamente debido a su simplicidad a pesar de que, generalmente, eran de baja calidad, y aunque durante la guerra su producción se detuvo completamente, su demanda siguió después de que ésta terminó.

Antes de la Segunda Guerra Mundial los juguetes eran hechos en Japón, pero éstos eran generalmente simples y de baja calidad. Antes de la guerra, Alemania fue el mayor fabricante de juguetes del mundo, seguido por EE.UU. Obviamente durante la guerra, virtualmente toda la fabricación de juguetes en Japón y Alemania se detuvo. Esto casi sucede en los EE.UU. pero compañías como Marx y Gilbert convencieron al gobierno de Washington para permitir que los juguetes se siguieran haciendo, por lo que en un sentido de normalidad podrían seguir estando al frente de la producción a nivel mundial. Después de la guerra, el Plan Marshall y otros planes afines fueron establecidos para reconstruir la industria europea y japonesa. Después de la guerra, el General MacArthur fue comisionado para la rehabilitación de la industria japonesa.

La idea fue dar a Japón toda la baja rentabilidad, la mano de obra y las industrias que fabricaban pequeños artículos que ya no eran tan atractivos para los EE.UU. Para no afectar drásticamente a la industria de EE.UU., artículos como cámaras baratas, radios portátiles y juguetes fueron hechos por Japón. Las empresas estadounidenses que hicieron estos artículos antes de la guerra, ahora podrían comercializar estos productos importados y obtener más ganancias que si lo hubieran hecho ellos mismos. Los importadores estadounidenses de juguetes como Marx, Rosco, Cragstan y Megos empezaron vendiendo juguetes fabricados por Masudaya, Nomura, Daiya, Yoshiya, Yonezawa y Horikawa.

Los primeros juguetes japoneses eran de fricción o de cuerda de reloj, de hojalata y sus diseños estaban basados en muchos juguetes populares americanos y alemanes de antes de la guerra. Los japoneses con casi un entusiasmo religioso al éxito, rápidamente empezaron a perfeccionar sus diseños para competir en contra de los demás fabricantes. Para atraer al mercado de juguetes más grande del mundo, los EE.UU., estos fabricantes de armamento antiguo pronto añadieron acciones únicas, litografía en estaño y la energía de las baterías a sus creaciones. A mediados de los 50's, Japón ganó la guerra de los juguetes y surgió como el fabricante número uno en el mundo, eclipsando a EE.UU. y Alemania.

El primer robot de juguete de Japón se cree que es una caja amarilla de cuerda llamada **Robot Lilliput** (fig.2.7.a). Aunque muchos coleccionistas creen que este robot es de finales de los años 30's, los expertos están empezando a atribuirlo a mediados de los años 40's, después de la guerra. El siguiente robot japonés en hacer su aparición fue el **Atomic Robot Man** (fig.2.7.b), a finales de los años 40's. La fecha de nacimiento de este segundo robot es definitivamente desconocida, desde que fue dado como un artículo promocional en la convención de Ciencia Ficción de Nueva York en 1950. La caja del Atomic Robot Man mostraba una escena irónica del robot marchando a través de una ciudad diezmada y con una nube atómica en forma de hongo.



Fig. 2.7. (a) Robot Lilliput [25], (b) Atomic Robot Man [26].

Mientras que los juguetes japoneses comenzaron a aparecer en los EE.UU. poco después de la guerra, la mayoría de los primeros robots eran en realidad americanos. El primero en aparecer en el *Sears Christmas Book* fue el operado por manivela **Robert the Robot** en 1954. Pronto llegaron, **Marvelous Mike**, **The Robot Dog**, **Z-Man**, **Big Max** y **Marx Electric Robot**, todos americanos (fig.2.8). Japón estaba a punto de dar rienda suelta a su arma secreta, en 1955 juguetes que funcionaban con baterías empezaron a llegar desde Japón.





(d)

Fig. 2.8. (a) *Robert the Robot* [27], (b) *Marvelous Mike* [28], (c) *Big Max* [29], (d) *Marx Electric Robot* [30].

La compañía japonesa Horikawa fue la que tuvo más ventas de los diferentes tipos de robots de juguete entre las décadas de los 50's a los 80's, desde robots con mecanismo de cuerda hasta robots que funcionaban con baterías [22].

Muchos de estos diseños clásicos inspiraron los diseños de hoy que incluyen los robots de LEGO, los robots espaciales, los robots transformables y muchos otros más [39].

La importancia de los robots autónomos en la sociedad moderna ha sido confirmada por la gran atención dedicada a ellos en los programas estratégicos de investigación recientemente desarrollados en EE.UU. y en Europa, el primero por el Consorcio de la Comunidad Computacional (Computing Community Consortium) y por la Asociación de Investigación Computacional (Computing Research Association) como *Una Guía para la Robótica Estadounidense de Internet a la Robótica*, y el último por la Plataforma Tecnológica de Robótica Europea (European Robotics Technology Platform) como un conjunto de *Visiones Robóticas al 2020 y más allá*. De hecho, el desarrollo de robots autónomos sofisticados, especialmente las amplias áreas de servicio y entretenimiento, desafía varias cuestiones de investigación básica relacionadas a su movilidad, interactividad y capacidades de coordinación. Para encontrar soluciones eficientes a esas cuestiones se requiere un profundo conocimiento de las raíces de las tecnologías de información y comunicación, y de la relevancia de los estudios en inteligencia artificial para ellos [1].

Durante los últimos años, el campo emergente de la Robótica de Entretenimiento ha sido el foco de muchas actividades de investigación. Esto no es sorpresa, puesto que los robots de entretenimiento deben ser capaces de exhibir comportamientos muy complejos en términos de movimientos primitivos, capacidades de interacción verbal y no-verbal de Humano-Robot y Robot-Robot, así como habilidades avanzadas en la detección y percepción en el mundo real [2].

En la actualidad existen bastantes compañías dedicadas al desarrollo y fabricación de robots de juguete así como de entretenimiento. En la tabla 2.1 se muestran las diferentes compañías en el mundo dedicadas a este rubro.

Tabla 2.1. *Compañías dedicadas al desarrollo de robots de juguete y de entretenimiento [23]. (Continúa.)*

COMPAÑÍA	LUGAR DE ORIGEN	DESCRIPCIÓN
----------	-----------------	-------------

AlSoy Robotics	España	Empresa fabricante del robot personal <i>AlSoy1</i> .
Bossa Nova Robotics	EE.UU.	Robot teledirigido <i>Prime-8</i> con un concepto propio de caminante bípedo.
Cye	EE.UU.	Robot móvil al que se pueden acoplar distintos elementos (aspirador, mesa, cámara) y realizar distintas funciones.
FUJISOFT	Japón	Fabricante del robot humanoide <i>PALRO</i> con capacidad de reconocimiento de caras, objetos y lugares y comunicación hablada con el usuario.

Tabla 2.1. Compañías dedicadas al desarrollo de robots de juguete y de entretenimiento [23]. (Continuación)

COMPAÑÍA	LUGAR DE ORIGEN	DESCRIPCIÓN
HEXBUG	EE.UU.	Fabricante de criaturas microrobóticas como <i>Nano</i> , <i>Ant</i> , <i>Crab</i> , <i>Inchworm</i> , <i>Original</i> .
Innvo Labs	Hong Kong	Fabricante del pequeño robot mascota dinosaurio <i>Pleo</i> .
Kyosho	Japón	Creador del robot humanoide atleta <i>MANOI</i> .
Modular Robotics	EE.UU.	Spin-off de la Carnegie Mellon Univ., han desarrollado los Cubelets, cubos con distintas funciones (sensorial, actuador, alimentación...) que permiten crear robots con comportamiento sencillo pero sin necesidad de programación. Es un sistema orientado a la educación de los más pequeños.
Mitsubishi Heavy Industries	Japón	Fabricante del robot <i>Wakamaru</i> .
NEC	Japón	Creador de <i>PaPeRo</i> , un pequeño robot con un elevado número de capacidades (la última, diferenciar tipos de vino: le llaman el wine-bot).
Robo-Garage	Japón	<i>Ropid</i> , <i>FT</i> , <i>neon</i> , <i>chroino</i> , <i>magdan</i> ,..., los robots humanoides de Tomotaka Takahashi, de la Univ. de Kyoto.
Robonica	EE.UU.	Fabricantes del robot teledirigido y/o reactivo multisensorial de dos ruedas <i>Roboni-i</i> .
SEGA Toys	Japón	Fabricantes de pequeños robots de juguete <i>C-Bot</i> y <i>W-Bot</i> , y también el perrito <i>idog</i> y el pez <i>ifish</i> .
Speecys Corp.	Japón	Robots humanoides para entretenimiento.
Tmsuk	Japón	Robots tipo perro de seguridad <i>Banryu</i> .
Vstone	Japón	Robots humanoides como <i>Robovie X</i> , <i>Robovie-R2</i> y <i>Robovie-R3</i> entre otros.
WowWee	Hong Kong	Una amplia gama de robots de juguete con cierta capacidad de programación como <i>Roboscooper</i> , <i>Roborover</i> , <i>Robosapien</i> , <i>Roboraptor</i> , <i>Robopet</i> , <i>Femisapien</i> .
Yujin Robot	Corea	Robots para el hogar <i>irobi</i> con varias funcionalidades.
ZMP	Japón	Robots humanoides como <i>Pino</i> , <i>nuvo</i> y <i>e-nuvo</i> , el

		robot musical <i>Miuro</i> y el pequeño <i>RoboCar</i> .
Arrick Robotics	EE.UU.	Robots móviles <i>ARobot</i> y <i>Trilobot</i> .
Balbots.com	EE.UU.	Robots <i>Balbot</i> móviles de solo dos ruedas que se mantienen verticales.
Bluebotics	Suiza	Robot móvil de entretenimiento <i>Gilberto</i> y otras plataformas.
Dajin Robot	Corea	Robots humanoides <i>Lucy III</i> , <i>cuadrúpedos</i> y <i>hexápodos</i> .
DFRobot	China	Kits de robots móviles basados principalmente en <i>Arduino</i> .

Tabla 2.1. Compañías dedicadas al desarrollo de robots de juguete y de entretenimiento [23]. (Continuación)

COMPAÑÍA	LUGAR DE ORIGEN	DESCRIPCIÓN
Dr. Robot	EE.UU.	Fabricantes de <i>SPUTNIK</i> , <i>SCOUT</i> , <i>X80</i> y más robots y componentes adicionales.
Fischertechnik	EE.UU.	Fabricante de juegos de construcción, dispone de varios kits de robótica para el montaje y programación de robots de todo tipo.
GeStream Technology	Taiwan	Su producto principal es el robot humanoide <i>BeRobot</i> , según indican el de menor tamaño del mercado.
Hanson RoboKind	EE.UU.	Desarrolla cabezas robóticas con capacidad de mostrar expresiones para su incorporación en robots humanoides.
Hitec	Japón	Fabricante del robot humanoide <i>Robonova-I</i> .
Inex	Tailandia	Dispone de un variado conjunto de kits de robótica incluso para los más niños, basados además en distintas familias de microcontroladores (Stamp, PIC, 68HC11, 8051...).
Kondo	Japón	Fabricante de servos y de robots humanoides, como la serie <i>KHR</i> , y otros con patas basados en la utilización de servos.
K-Team	Suiza	<i>Kephra</i> , <i>Hemisson</i> y <i>Koala</i> . Robots orientados a la investigación.
KumoTek	EE.UU.	Una línea de producto de sus robots de servicios son los robots humanoides <i>KT-X</i> , realizados en colaboración con Vstone.
LEGO Mindstorms	Dinamarca	<i>Robotic Invention System 2.0</i> , para montar robots mediante piezas Lego y con toda la electrónica y entorno de programación necesarios.
Lynxmotion	EE.UU.	Robots bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, móviles. Un amplio catálogo de kits y componentes.
MechRC	Japón	Fabricante del robot humanoide programable <i>MechRC</i> .
MiniRobots	España	Desarrolladores del pequeño robot móvil <i>Moway</i> , orientado a la educación.
MobileRobots	EE.UU.	<i>AmigoBot</i> , <i>ARCSinside</i> , <i>LaserPlans</i> , <i>MobileEyes</i> ,

		<i>MobileSim</i> , <i>PatrolBot</i> , <i>PeopleBot</i> , <i>PowerBot</i> , <i>Seekur</i> y <i>SetNetGo</i> . Robots móviles de alto nivel más orientados a la investigación y desarrollo de nuevas aplicaciones de robots de servicios.
OWI Robotics	EE.UU.	Kits de robots para los más pequeños. Deben montarse pero no son programables. Quizás los más interesantes sean los brazos manipuladores con pinza como <i>Robotic Arm Edge</i> y robots teledirigidos oruga como <i>Kabuti Mosho</i> .

Tabla 2.1. Compañías dedicadas al desarrollo de robots de juguete y de entretenimiento [23]. (Continuación)

COMPAÑÍA	LUGAR DE ORIGEN	DESCRIPCIÓN
Parallax	EE.UU.	Robots móviles (<i>Scribble</i> , <i>BoeBot</i> , <i>SumBot</i>) y robots con patas (<i>Toddler</i> , <i>QuadCrawler</i> y <i>HexCrawler</i>) basados todos en el BasicStamp. También muchos componentes (sensores, actuadores, comunicaciones, etc...) para la construcción de robots.
POb Technology	Francia	Diversas plataformas de robots móviles con diversas opciones de sensores (incluyendo cámara), y con entorno software para su programación.
Pololu	EE.UU.	Distribuidor de Kits de robots móviles y también partes mecánicas y electrónicas para diseños propios, dispone del modelo propio <i>Pololu 3pi</i> .
Robhatah	Singapur	Robots bípedos humanoides <i>Genus</i> y <i>Manus</i> , robots móviles jugadores de fútbol <i>Robot Soccer</i> , y el kit de robótica móvil <i>Revobot</i> .
Roboblock	Corea	Dispone de kits de robots con patas (humanoides y hexápodos) basados en servos, y también robots móviles tipo sigue-líneas.
Robobrothers	EE.UU.	Su principal producto es el robot humanoide <i>RoboPhilo</i> del tipo accionado por servos.
Robobuilder	Corea	Los kits robobuilder permiten la construcción y programación de una amplia variedad de robots móviles y principalmente con patas, al estar basados en el uso motores de tipo servo.
Robotis	Corea	Dispone de los kits de robótica <i>Biolid</i> para construir distintos tipos de robots (con patas principalmente) basados en la utilización de servos y piezas polivalentes, y del robot humanoide programable <i>DARwIn-OP</i> . La línea <i>OLLO</i> está orientada a los más pequeños.
Speecys Corp.	Japón	Fabricante de los robots humanoides programables <i>SPC-101C</i> , <i>SPC-001</i> y <i>SPC-003</i> .

2.3. MÁQUINAS Y/O ROBOTS CAMINANTES

El robot caminante es uno de los temas de investigación más apasionado y fascinante de los científicos e ingenieros. Hay diferentes tipos de robots disponibles en base a la morfología, funciones, aplicaciones y locomoción. Cada tipo tiene sus propios modelos estáticos y dinámicos. Ha habido una gran cantidad de interés en los robots con piernas debido, principalmente, a sus ventajas para hacer frente a ciertos tipos de terrenos cuando se compara con los robots con ruedas. Esencialmente, la flexibilidad de las piernas de los animales y los humanos con multi-eslabones provee de una ventaja convincente al subir escaleras, por ejemplo. Se puede decir que los robots bípedos están en casa en un entorno humano. Pero son los más difíciles y desafiantes para desarrollar y construir. Existen muchos factores que contribuyen a esto. Sin embargo, uno de los factores importantes es la dificultad de balancear el peso del robot durante el caminar, correr, patear y otras tareas similares. No obstante, los avances recientes en tecnología, especialmente la electrónica ofrece relativa facilidad en la construcción de los robots bípedos. Existen robots caminantes bípedos populares disponibles, notablemente *ASIMO* de Honda y *QRIO* de Sony (ver fig. 2.1 (a) y (c)). Un robot bípedo sencillo llamado *Clyon* fue desarrollado por la Universidad de Florida [3].

Recientemente las investigaciones en robótica se enfocan hacia el desarrollo de máquinas caminantes, debido a que en algunas aplicaciones se requiere de una considerable movilidad, sobre todo cuando se tiene la necesidad de locomoción en terrenos irregulares. Los robots con patas permiten una coordinación de movimientos para aislar las irregularidades del terreno. Así mismo, se busca desarrollar máquinas que requieran poca intervención humana o la disminución de algunas restricciones no deseadas en las mismas [4].

Es por eso que en algunos casos el proceso para el diseño de un robot (p. e. longitud de la pierna o pata, localidad de la masa, tamaño y otros parámetros estructurales) ha sido delegado hacia la imitación de estructuras del ambiente natural, especialmente para máquinas caminantes donde las estructuras presentan poca simplicidad, pero un amplio margen de adaptabilidad [5].

Desde tiempos remotos el hombre ha sido tentado en imaginar, concebir y realizar máquinas, las cuales puedan imitar los patrones de la naturaleza. Nació incluso la creencia de que las personas construían modelos mecánicos de forma similar a otros seres, teniendo una mejor oportunidad para descubrir los secretos de la vida. La manera de caminar de los animales, la forma en que las aves vuelan, siempre han sido y probablemente seguirán siendo la fuente de inspiración y las tareas de la investigación científica. Los animales utilizan sus patas para caminar y moverse libremente con una facilidad sustancial en comparación con lo que el robot hecho por el hombre puede hacer. La locomoción de los animales es superior a la del robot con ruedas u orugas, tanto energéticamente y operacionalmente

hablando, así como desde el punto de vista de su estabilidad, cualquiera que sea el terreno sobre el cual ocurre el movimiento.

Los robots caminantes protegen el medio ambiente de una buena manera, ya que su contacto con el terreno es discreto, lo que disminuye considerablemente el área sometida a trituración; el peso del robot puede ser distribuido óptimamente sobre toda su superficie inclinada, mediante el control de las fuerzas.

Al igual que los robots de ruedas o de oruga, el robot caminante es un sistema mecatrónico, su uso práctico requiere tanto de la vigilancia asistida por computadora como del control exhaustivo de los sistemas de movimiento. La principal característica del robot caminante es el hecho de que el movimiento no se ve tan drásticamente afectado, como en los otros dos tipos, debido a la configuración del terreno. Diversas aplicaciones que requieren movimientos en un terreno natural e irregular hicieron que el movimiento por medio de patas o pies sea cada vez más atractiva.

Las principales características que justifican la superioridad del robot caminante en comparación con los de ruedas o de orugas son:

- La capacidad de moverse en terrenos semiestructurados.
- La habilidad de pasar por encima de obstáculos determinados por el cambio en su altura (orografía del terreno).
- La posibilidad de cambiar la configuración del sistema de desplazamiento del robot.
- El contacto de los pies con el terreno es discontinuo (que se lleva a cabo sólo en la fase inclinada), cuando un pie tiene la oportunidad de seleccionar el punto de contacto, mientras desciende por el terreno, dependiendo de la superficie de éste último.
- La posibilidad de moverse en un terreno blando, que a veces es más difícil para el robot de ruedas o el robot de oruga.
- La suspensión activa del robot se lleva a cabo estableciendo los sensores de proximidad y fuerza en la parte más externa de los pies, permitiendo el movimiento en un terreno desigual en circunstancias estables.
- El consumo específico de energía es menor con el movimiento en terrenos irregulares naturales contra otros tipos de robots móviles.
- La mejor conservación del terreno, en el que el robot se mueve, especialmente en caso de que se haga uso de él en las actividades agrícolas o forestales.

Algunos de los componentes más significativos de un robot caminante son los mecanismos del sistema de desplazamiento. Estos mecanismos pueden tener tres o más grados de libertad y están contruidos de modo que el extremo inferior del último elemento, denominado P (ver fig. 2.9), siga cualquier trayectoria del espacio de trabajo. Por lo tanto, el punto P se debe obtener a través de una trayectoria adecuada con respecto a la plataforma de robot. Esta trayectoria corresponde al tipo de marcha para el desplazamiento. Algunos de

estos mecanismos tienen una estructura simple y uno o dos grados de libertad, de modo que la forma de la trayectoria del punto P puede tener muy pocos ajustes. Estos sistemas de desplazamiento pueden ser comandados y controlados utilizando equipos sencillos. La utilización de mecanismos con una estructura complicada, con muchas formas de ajuste, capaces de asegurar que los desplazamientos del robot se den en diversas condiciones, implica la existencia de un equipo de control muy elaborado.

Generalmente, los mecanismos para el sistema de desplazamiento, pueden dividirse en dos categorías:

- Uniones planas, con el bastidor que puede girar alrededor de un eje vertical fijo en la plataforma de la máquina caminante.
- Uniones espaciales.

Las uniones planas tienen comúnmente dos grados de libertad y pueden ser muy simples, consistiendo de dos eslabones, o con una estructura muy complicada. En todo esto, el extremo inferior del último eslabón de la pierna puede superar cualquier trayectoria espacial en el espacio de trabajo.

En la figura 2.9 se muestra el mecanismo de pierna Bessonov, con 9 elementos y 11 pares. Éste es un mecanismo triple cerrado con 2 grados de libertad [6].

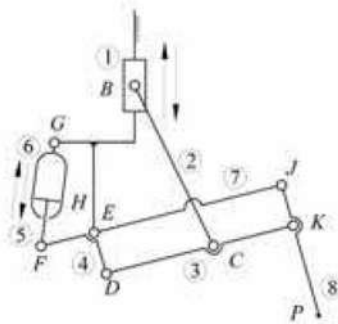


Fig. 2.9. Tipo de mecanismo de pierna Bessonov [6].

Bo Jin, Cheng Chen y Wei Li mencionan, en uno de sus artículos, que una máquina caminante multi-patas, cuando se compara con una de locomoción de ruedas o de orugas, es ampliamente reconocida como uno de los vehículos de transporte más efectivos y eficientes, especialmente en terrenos complejos y semiestructurados. El robot hexápodo, un tipo de máquina caminante con piernas, generalmente tiene un desempeño superior caminando, en comparación con los de menos patas en términos del método de control de menor complejidad, una estabilidad estática más grande y velocidades más rápidas caminando.

Por lo tanto, numerosas investigaciones han sido conducidas en este campo y varios robots hexápodos caminantes han sido desarrollados en los últimos 30 años, incluyendo el vehículo

de suspensión adaptativa (ASV por sus siglas en inglés) mejor conocido como SILO-6 y la máquina caminante Plustech [7].

Entre los robots caminantes se cuenta con la siguiente clasificación:

a) Androides. Son robots que intentan reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento cinemático del ser humano. Actualmente los androides son todavía dispositivos muy poco evolucionados y sin utilidad práctica, y destinados, fundamentalmente, al estudio y experimentación. Uno de los aspectos más complejos de estos robots, y sobre el que se centra la mayoría de los trabajos, es el de la locomoción bípeda. En este caso, el principal problema es controlar dinámicamente y coordinadamente en el tiempo real el proceso y mantener simultáneamente el equilibrio del robot [24].

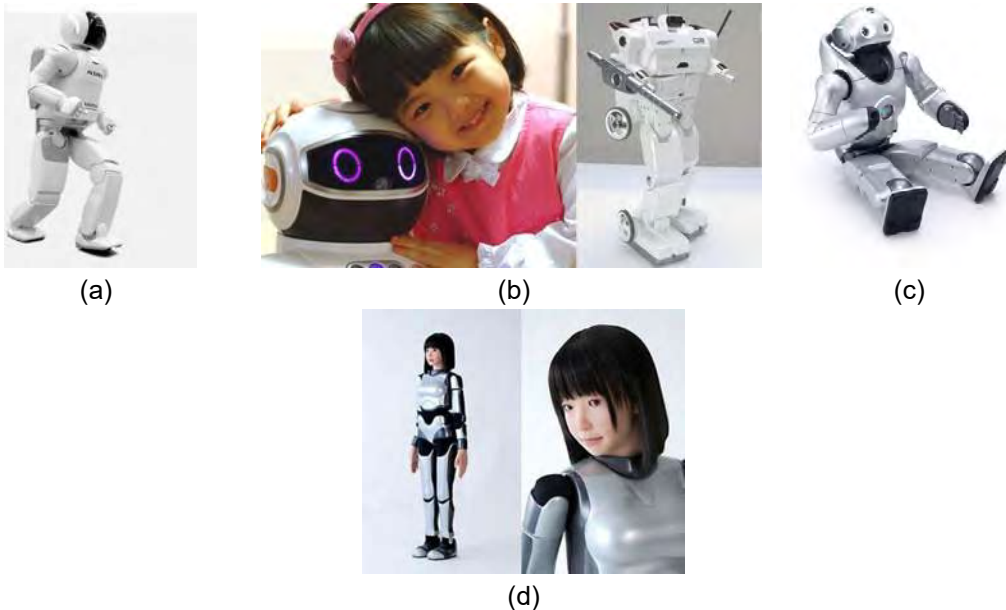


Fig. 2.10. (a) Robot ASIMO de Honda [31], (b) Robot iRobi y TransBot de Yujin Robotics [32], (c) Robot QRIO de SONY [33], (d) Robot japonés HRP-4C [34].

b) Zoomórficos. Se caracterizan por imitar el sistema de locomoción de algunos seres vivos. Se encuentran en pleno desarrollo y se utilizan para desplazarse sobre superficies accidentadas y con numerosos obstáculos. Su aplicación práctica tiene bastante interés en la exploración de otros planetas así como el estudio de volcanes, y entornos de difícil acceso. [36].



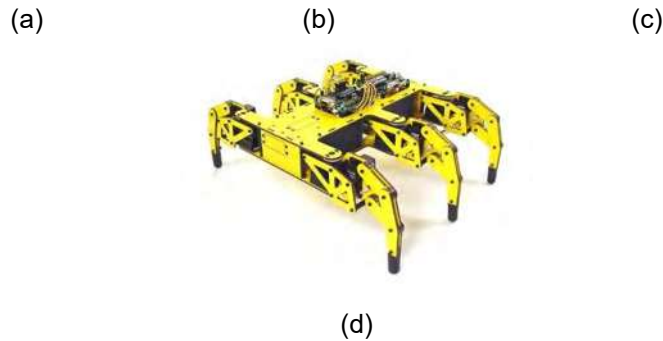


Fig. 2.11. *Diferentes tipos de robots zoomórficos: (a) Robot Aibo [35], (b) Robot Bigdog [35], (c) Robot araña [36], (d) Robot hexápodo tipo arácnido [37].*

Actualmente, este tipo de robots siguen constantemente en desarrollo y se augura que sigan mejorando sus capacidades tanto mecánicas como de control en los próximos años.

CAPÍTULO 3. CINEMÁTICA DIRECTA DE LA UNIDAD DE PROPULSIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

Las máquinas caminantes clase LUNAbot®, en sus diferentes versiones y aplicaciones, basan su principio de desplazamiento en el movimiento generado por el mecanismo de **Peaucellier-Lipkin**. Este movimiento puede ser una recta o un arco perfecto obtenido a partir de la reconfiguración de dicho mecanismo mediante la modificación de las longitudes de algunos de sus eslabones constitutivos. Las cualidades básicas sobresalientes de esta máquina caminante comparadas con otras caminantes, es su habilidad para desplazarse en línea recta o hacer giros para cambiar la dirección de desplazamiento. Esto se logra sólo con 3 actuadores por extremidad. En otras máquinas caminantes normalmente se requiere más de 3 por extremidad para la misma tarea.

El MPL se clasifica dentro de un grupo de mecanismos denominados de “*línea recta*”. Algunos ejemplos son el mecanismo de Chebyshev, el de Watt, etc. Sin embargo, su cualidad principal es que uno de sus elementos, el denominado de salida, produce una recta perfecta. Sin embargo, como se mostrará más adelante, también produce arcos perfectos. De estas habilidades es que se conciben las máquinas caminantes clase LUNAbot®.

El MPL fue desarrollado por un oficial de milicia francés llamado Charles Nicolas Peaucellier y por un matemático lituano llamado Yom Tov Lipman Lipkin, en 1864. Peaucellier y Lipkin descubrieron que con ayuda de este mecanismo de 8 barras podían generar, para ciertas condiciones de relaciones de eslabonamientos, un movimiento, consecuente en un punto del mecanismo, cuya trayectoria era exactamente recta a partir de un movimiento circular.

3.2. ESLABONAMIENTO Y GRADOS DE LIBERTAD DE LA UNIDAD DE PROPULSIÓN

La unidad de propulsión compuesta por el MPL consta de **8 elementos o eslabones binarios**, los cuales se han definido como *eslabón AB*, *eslabón AD*, *eslabón AE*, *eslabón BC*, *eslabón CD*, *eslabón CE*, *eslabón DF* y *eslabón EF*, debido a la nomenclatura de los puntos con que se conectan, tal como se puede apreciar en la fig. 3.1.

Una de las particularidades en cuanto a la geometría del MPL es que los eslabones *AB* y *BC* tienen la misma longitud, aunque, como se verá más adelante, dicha longitud se puede variar para poder generar arcos; los eslabones *AD* y *AE* presentan la misma longitud entre ellos, así como los eslabones *CD*, *CE*, *DF* y *EF* presentan, también, la misma longitud entre ellos.

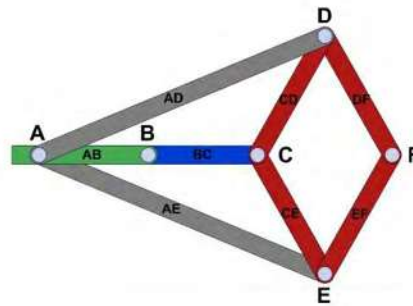
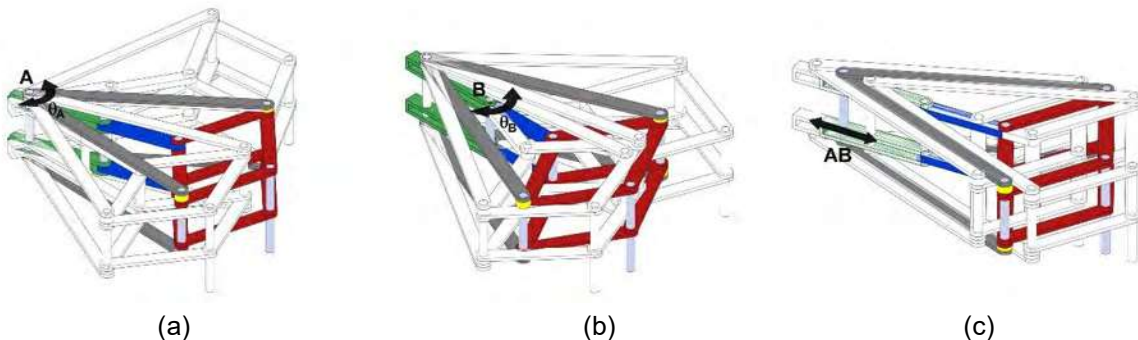


Fig. 3.1. Puntos y eslabones que conforman al MPL

Por otra parte, la unidad de propulsión cuenta con **5 grados de libertad**, los cuales son:

- Giro en torno al punto *A*.
- Giro en torno al punto *B*.
- Variación de la longitud del eslabón *AB*.
- Variación de la longitud del eslabón *BC*.
- El movimiento ascendente y descendente del pie que se encuentra en el punto *F*.

La fig. 3.2 muestra los grados de libertad descritos en los incisos anteriores.



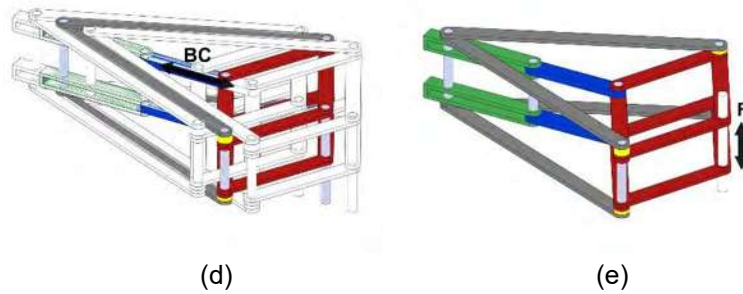


Fig. 3.2. Grados de libertad de la unidad de propulsión basados en el MPL.

Cabe mencionar que para este proyecto, la unidad de propulsión sólo cuenta con 4 grados de libertad; tres de ellos corresponden a los incisos a), b) y e), el cuarto es una combinación de los incisos c) y d) donde el eslabón AB disminuye su longitud y el eslabón BC aumenta su longitud, simultáneamente.

3.3. MODELADO MATEMÁTICO DIRECTO

3.3.1. Descripción Matemática

En la fig.3.3 se observa una representación gráfica del MPL.

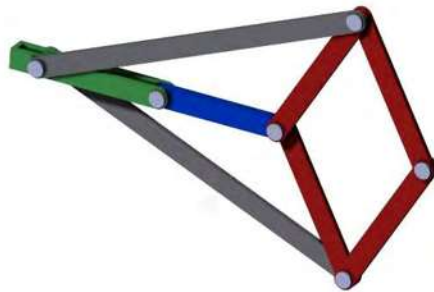


Fig. 3.3. Mecanismo de Peaucellier-Lipkin

El MPL está constituido de 8 eslabones binarios, fig. 3.4 (a), cuyos extremos son los puntos A, B, C, D, E y F , fig. 3.4 (b), coincidentes en un mismo plano, o al menos los eslabones constitutivos son suficientemente delgados como para considerar que todos están en el mismo plano.

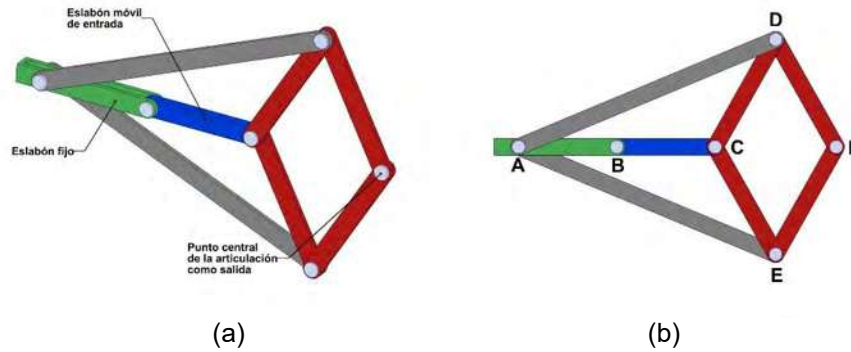


Fig. 3.4. (a) Eslabón fijo o base, eslabón de entrada y elemento de salida. (b) Puntos extremos de los eslabones constitutivos.

Al eslabón base del MPL lo definen los puntos A y B , fig. 3.4 (a) y (b). El eslabón móvil de entrada está formado por los puntos B y C , y su accionamiento, mediante θ_B . La fig. 3.5 muestra una variación de la posición del punto F referida a un sistema de coordenadas local ($\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0$) coincidente con el punto B . La tabla 3.1 muestra tres posiciones del MPL cuando existe una variación en el ángulo de entrada θ_B .

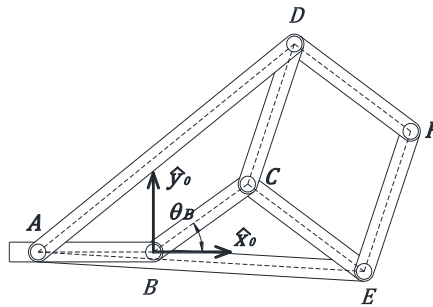


Fig. 3.5. Sistema de coordenadas local ($\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0$) y la definición de los puntos básicos del MPL.

Tabla 3.1. Efecto en el MPL debido a la variación del ángulo de entrada θ_B .

Posición con θ_B positivo	Posición inicial, $\theta_B = 0$	Posición con θ_B negativo

Se puede decir, entonces, que la posición del punto F está en función del ángulo de entrada θ_B , es decir:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(\theta_B) \\ f_2(\theta_B) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Tomando como base la posición del MPL cuando θ_B es positivo, se genera una geometría tal como se aprecia en la fig. 3.6. Al unir los puntos A y C , se forman dos triángulos: el primero se forma uniendo los puntos A, B y C , y el segundo uniendo los puntos A, C y D .

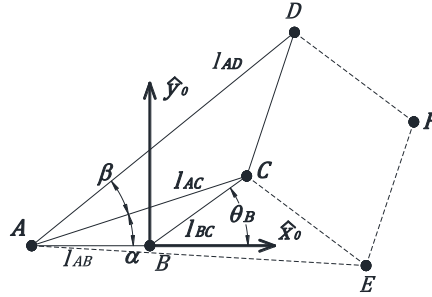


Fig. 3.6. Geometría obtenida al variar θ_B en forma positiva.

A continuación, se procede a determinar las coordenadas de cada uno de los puntos constitutivos del MPL, con referencia al sistema coordenado local ($\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0$).

Punto A

La coordenada A_x , tomando como base la fig. 3.6, se obtiene mediante la Ec. (3.2), siendo l_{AB} la longitud entre el punto A y el punto B .

$$A_x = -l_{AB} \quad (3.2)$$

La coordenada A_y , se expresa mediante la Ec. (3.3).

$$A_y = 0 \quad (3.3)$$

La coordenada A_z , es nula, ya que el MPL es coincidente con el plano formado por $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$.

Por lo tanto, el punto A queda establecido mediante la Ec. (3.4).

$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_{AB} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Punto B

Con base en la fig. 3.6, se puede observar que el punto B del MPL es coincidente con el origen del sistema coordenado local ($\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0$); por lo tanto, el punto B queda establecido mediante la Ec. (3.5).

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Punto C

Utilizando como referencia la fig. 3.7, se observa que las coordenadas C_x , C_y y C_z se obtienen mediante la proyección del vector $\vec{l}_{BC}$ que va del punto B al punto C. Esto conlleva a tener como resultado la Ec. (3.6).

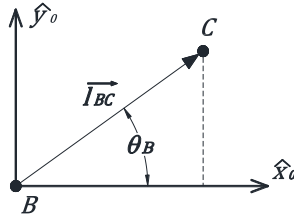


Fig. 3.7. Vector $\vec{l}_{BC}$ dirigido del punto B al punto C.

$$\begin{pmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{BC} \cos \theta_B \\ l_{BC} \sin \theta_B \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Punto D

Para obtener las coordenadas D_x y D_y (D_z es nula), expresadas en las Ecs. (3.7) y (3.8), es necesario determinar de los ángulos α y β , tal como se muestra en la fig. 3.8.

$$D_x = l_{AD} \cos(\alpha + \beta) - l_{AB} \quad (3.7)$$

$$D_y = l_{AD} \sin(\alpha + \beta) \quad (3.8)$$

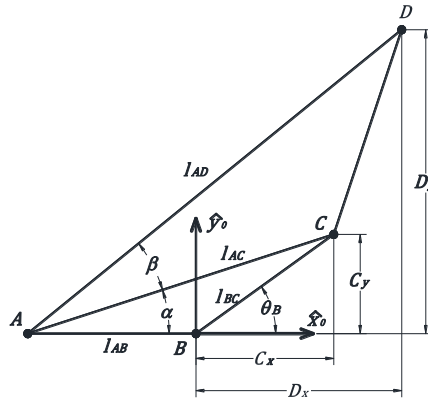


Fig. 3.8. Triángulos formados por los puntos A, B, C y D.

Para α :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{C_y}{l_{AB} + C_x} \right) \quad (3.9)$$

Sustituyendo en la Ec. (3.9) las coordenadas del punto C , Ec. (3.6), se tiene:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{l_{BC} \sin \theta_B}{l_{AB} + l_{BC} \cos \theta_B} \right) \quad (3.10)$$

Para β , si se aplica la ley de los cosenos al triángulo formado por los puntos A, C y D , se obtiene:

$$l_{CD}^2 = l_{AD}^2 + l_{AC}^2 - 2 l_{AD} l_{AC} \cos \beta \quad (3.11)$$

La longitud l_{AC} , se obtiene mediante la Ec. (3.12).

$$l_{AC} = \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2} \quad (3.12)$$

Al sustituir la Ec. (3.12) en la Ec. (3.11) y despejando β , se obtiene:

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{l_{AD}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CD}^2}{2 l_{AD} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right) \quad (3.13)$$

Si se sustituyen las Ecs. (3.10) y (3.13) en las Ecs. (3.7) y (3.8), respectivamente, se podrán obtener las coordenadas D_x y D_y .

$$D_x = l_{AD} \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{l_{BC} \sin \theta_B}{l_{AB} + l_{BC} \cos \theta_B} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{l_{AD}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CD}^2}{2 l_{AD} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right) \right] - l_{AB} \quad (3.14)$$

$$D_y = l_{AD} \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{l_{BC} \sin \theta_B}{l_{AB} + l_{BC} \cos \theta_B} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{l_{AD}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CD}^2}{2 l_{AD} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right) \right] \quad (3.15)$$

Por lo tanto, las coordenadas del punto D , respecto al sistema coordenado local $(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0)$, se expresan como:

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{AD} \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{l_{BC} \sin \theta_B}{l_{AB} + l_{BC} \cos \theta_B} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{l_{AD}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CD}^2}{2 l_{AD} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right) \right] - l_{AB} \\ l_{AD} \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{l_{BC} \sin \theta_B}{l_{AB} + l_{BC} \cos \theta_B} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{l_{AD}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CD}^2}{2 l_{AD} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right) \right] \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Punto E

Usando la fig. 3.9 como referencia, se pueden definir las coordenadas E_x y E_y (E_z es nula), expresadas en las Ecs. (3.17) y (3.18). Sin embargo, es necesario obtener los valores de los ángulos λ y ρ .

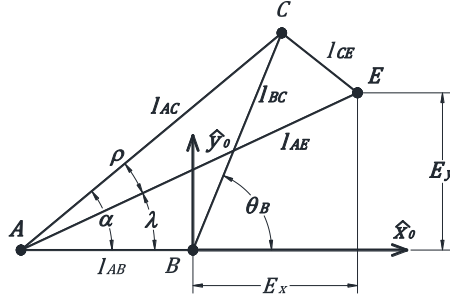


Fig. 3.9. Triángulos formados por los puntos A, B, C y E.

$$E_x = l_{AE} \cos \lambda - l_{AB} \quad (3.17)$$

$$E_y = l_{AE} \sin \lambda \quad (3.18)$$

Para determinar λ , se tiene:

$$\lambda = \alpha - \rho \quad (3.19)$$

Para obtener ρ , se recurre a la ley de los cosenos y se aplica al triángulo formado por los puntos A, C y E.

$$l_{CE}^2 = l_{AE}^2 + l_{AC}^2 - 2 l_{AE} l_{AC} \cos \rho \quad (3.20)$$

Sustituyendo la Ec. (3.12) en la Ec. (3.20), y despejando ρ , se obtiene:

$$\rho = \cos^{-1} \left[\frac{l_{AE}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CE}^2}{2 l_{AE} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right] \quad (3.21)$$

Al sustituir la Ec. (3.21) en la Ec. (3.19), se tiene:

$$\lambda = \alpha - \cos^{-1} \left[\frac{l_{AE}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CE}^2}{2 l_{AE} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right] \quad (3.22)$$

Si se sustituye la Ec. (3.22) en las Ecs. (3.17) y (3.18) se obtienen las coordenadas E_x y E_y , respectivamente.

$$E_x = l_{AE} \cos \left[\alpha - \cos^{-1} \left(\frac{l_{AE}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CE}^2}{2 l_{AE} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right) \right] - l_{AB} \quad (3.23)$$

$$E_y = l_{AE} \sin \left[\alpha - \cos^{-1} \left(\frac{l_{AE}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CE}^2}{2 l_{AE} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right) \right] \quad (3.24)$$

Por lo consiguiente, las coordenadas del punto E , respecto al sistema coordenado local $(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0)$, se expresan como:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{AE} \cos \left[\alpha - \cos^{-1} \left(\frac{l_{AE}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CE}^2}{2 l_{AE} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right) \right] - l_{AB} \\ l_{AE} \sin \left[\alpha - \cos^{-1} \left(\frac{l_{AE}^2 + C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2 - l_{CE}^2}{2 l_{AE} \sqrt{C_y^2 + (l_{AB} + C_x)^2}} \right) \right] \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Punto F

Finalmente, para poder obtener las coordenadas F_x y F_y (F_z es nula como en los otros casos), se hace uso de la fig. 3.10.

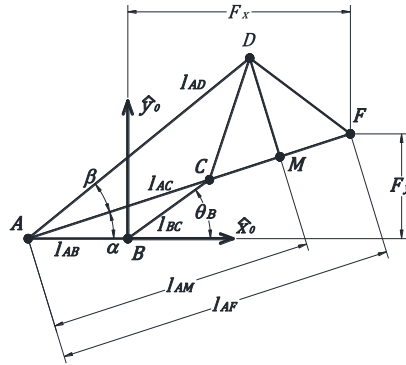


Fig. 3.10. Triángulos formados por los puntos A, B, C, F y M .

De la fig. 3.10 se deduce que:

$$F_x = l_{AF} \cos \alpha - l_{AB} \quad (3.26)$$

$$F_y = l_{AF} \sin \alpha \quad (3.27)$$

La longitud l_{AF} se obtiene de la Ec. (3.28).

$$l_{AF} = 2l_{AM} - l_{AC} \quad (3.28)$$

Para determinar l_{AM} , se aplica el teorema de Pitágoras al triángulo formado por los puntos A, D y M .

$$l_{AM} = l_{AD} \cos \alpha \quad (3.29)$$

Sustituyendo la Ec. (3.29) en la Ec. (3.28) se obtiene la Ec. (3.30)

$$l_{AF} = 2l_{AD} \cos \alpha - l_{AC} \quad (3.30)$$

Al sustituir la Ec. (3.30) en las Ecs. (3.26) y (3.27), se establecen las coordenadas F_x y F_y .

$$F_x = (2l_{AD} \cos \alpha - l_{AC}) \cos \alpha - l_{AB} \quad (3.31)$$

$$F_y = (2l_{AD} \cos \alpha - l_{AC}) \sin \alpha \quad (3.32)$$

Por lo tanto, las coordenadas del punto F , respecto al sistema coordenado local ($\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0$), se expresan como:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (2l_{AD} \cos \alpha - l_{AC}) \cos \alpha - l_{AB} \\ (2l_{AD} \cos \alpha - l_{AC}) \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

Ahora, por otro lado, en las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 se presentan los puntos, sus respectivas coordenadas y un esquema de la posición del MPL cuando: (a) $\theta_B = 60^\circ$, (b) $\theta_B = 0^\circ$ y (c) $\theta_B = -30^\circ$, respectivamente. Para la obtención de los puntos, se tienen las siguientes condiciones:

$$l_{AB} = l_{BC} = 6 \text{ unidades de longitud}$$

$$l_{AD} = l_{AE} = 17 \text{ unidades de longitud}$$

$$l_{CD} = l_{CE} = l_{DF} = l_{EF} = 7.5 \text{ unidades de longitud}$$

Tabla 3.2. Coordenadas de los puntos descriptivos del MPL cuando $\theta_B = 60^\circ$.

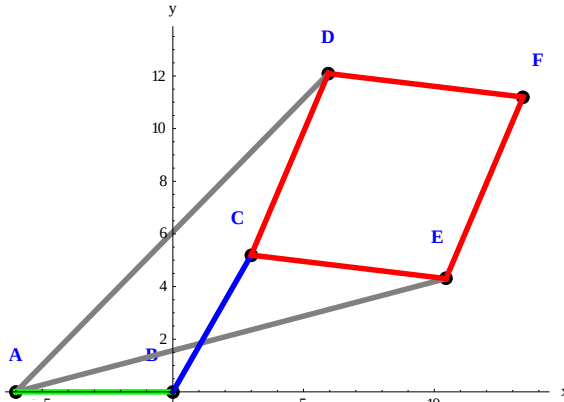
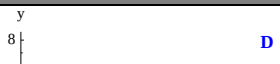
Punto	Coordenadas (unidades de longitud)	Posición del MPL
A	(-6, 0, 0)	
B	(0, 0, 0)	
C	(3, 5.1961, 0)	
D	(5.9493, 12.0919, 0)	
E	(10.4466, 4.3024, 0)	
F	(13.3958, 11.1982, 0)	

Tabla 3.3. Coordenadas de los puntos descriptivos del MPL cuando $\theta_B = 0^\circ$.

Punto	Coordenadas (unidades de longitud)	Posición del MPL
A	(-6, 0, 0)	

B	(0, 0, 0)
C	(6, 0, 0)
D	(9.6979, 6.5250, 0)
E	(9.6979, -6.5250, 0)
F	(13.3958, 0, 0)

Tabla 3.4. Coordenadas de los puntos descriptivos del MPL cuando $\theta_B = -30^\circ$.

Punto	Coordenadas (unidades de longitud)	Posición del MPL
A	(-6, 0, 0)	
B	(0, 0, 0)	
C	(5.1961, -3, 0)	
D	(10.8964, 1.8742, 0)	
E	(7.6956, -10.0713, 0)	
F	(13.3958, -5.1971, 0)	

3.3.2. Casos Particularidades del MPL

El punto F presenta ciertos casos particulares dentro del MPL. Estos casos dependerán de la relación de longitud entre l_{AB} y l_{BC} correspondientes a los eslabones AB y BC . Dichos casos se muestran a continuación.

Caso I

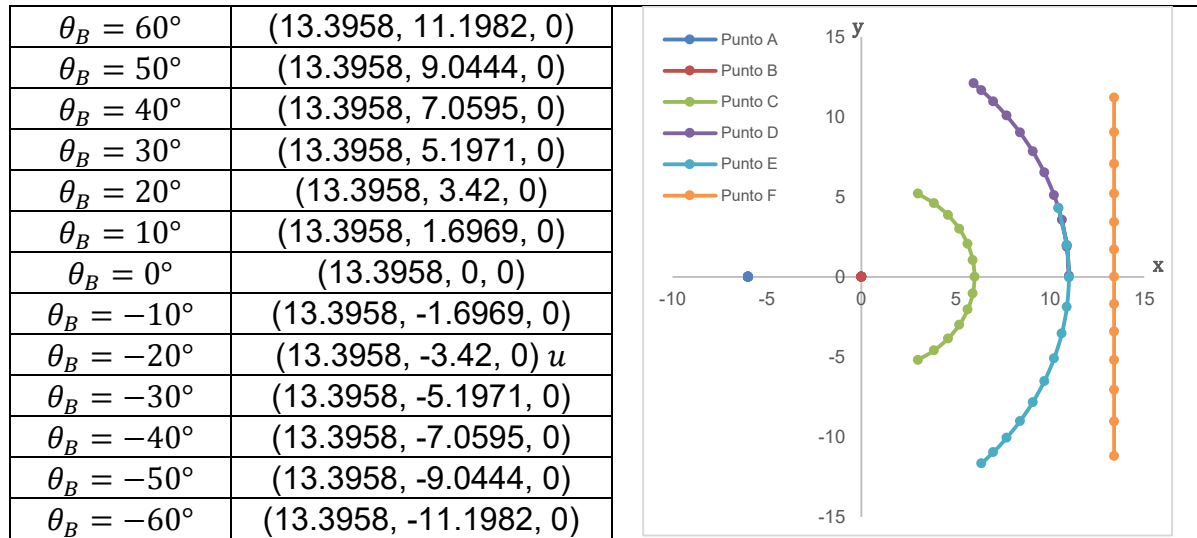
Si $l_{AB} = l_{BC}$, $l_{AD} = l_{AE}$ y $l_{CD} = l_{CE} = l_{EF} = l_{DF}$, el punto F seguirá una **trayectoria recta**.

La tabla 3.5 muestra las coordenadas en las que se encuentra el punto F al hacer variar el ángulo de entrada θ_B de 60° a -60° , también muestra un esquema de la posición en que se encuentran todos los puntos. Las longitudes de los eslabones son:

$$\begin{aligned}
 l_{AB} &= l_{BC} = 6 \text{ unidades de longitud} \\
 l_{AD} &= l_{AE} = 17 \text{ unidades de longitud} \\
 l_{CD} &= l_{CE} = l_{DF} = l_{EF} = 7.5 \text{ unidades de longitud}
 \end{aligned}$$

Tabla 3.5. Posición de los puntos constitutivos del MPL para el Caso I.

Ángulo de Entrada	Punto F (unidades de longitud)	Posición de los puntos constitutivos del MPL
-------------------	-----------------------------------	--



Caso II

Si $l_{AB} < l_{BC}$, $l_{AD} = l_{AE}$ y $l_{CD} = l_{CE} = l_{EF} = l_{DF}$, el punto F seguirá una **trayectoria circular** con centro a la **izquierda** del punto F .

La tabla 3.6 muestra las coordenadas en las que se encuentra el punto F al hacer variar el ángulo de entrada θ_B de 60° a -60° , para el Caso II. También muestra un esquema de la posición en que se encuentran todos los puntos. Las longitudes de los eslabones son:

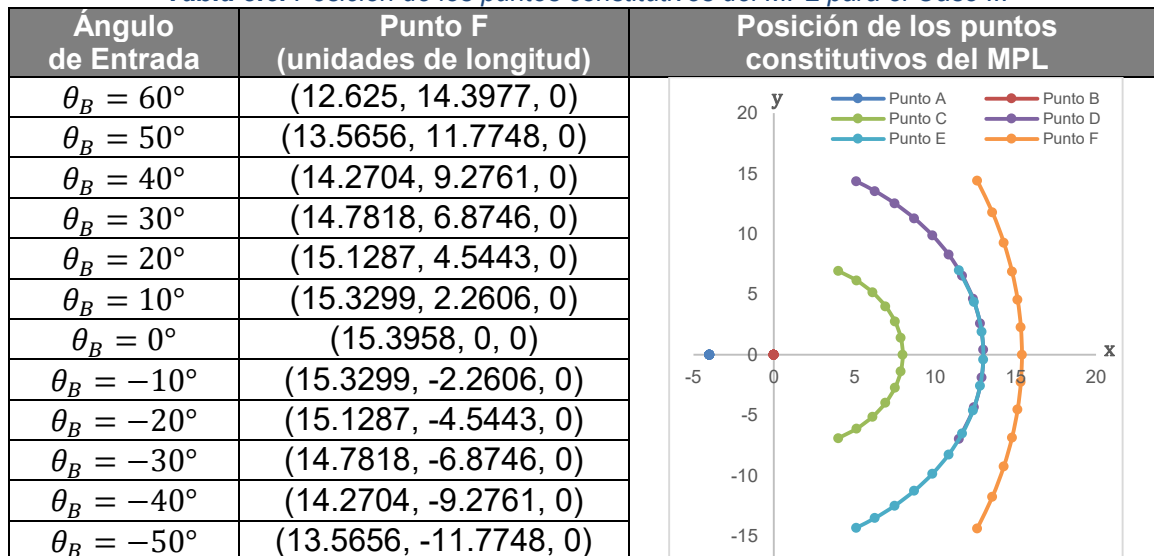
$l_{AB} = 4$ unidades de longitud

$l_{BC} = 8$ unidades de longitud

$l_{AD} = l_{AE} = 17$ unidades de longitud

$l_{CD} = l_{CE} = l_{DF} = l_{EF} = 7.5$ unidades de longitud

Tabla 3.6. Posición de los puntos constitutivos del MPL para el Caso II.



$\theta_B = -60^\circ$	(12.625, -14.3977, 0)	
------------------------	-----------------------	--

Caso III

Si $l_{AB} > l_{BC}$, $l_{AD} = l_{AE}$ y $l_{CD} = l_{CE} = l_{EF} = l_{DF}$, el punto F seguirá una **trayectoria circular** con centro a la **derecha** del punto F .

La tabla 3.7 muestra las coordenadas en las que se encuentra el punto F al hacer variar el ángulo de entrada θ_B de 60° a -60° , para el Caso III. También muestra un esquema de la posición en que se encuentran todos los puntos. Las longitudes de los eslabones son:

$l_{AB} = 8$ unidades de longitud

$l_{BC} = 4$ unidades de longitud

$l_{AD} = l_{AE} = 17$ unidades de longitud

$l_{CD} = l_{CE} = l_{DF} = l_{EF} = 7.5$ unidades de longitud

Tabla 3.7. Posición de los puntos constitutivos del MPL para el Caso III.

Ángulo de Entrada	Punto F (unidades de longitud)	Posición de los puntos constitutivos del MPL
$\theta_B = 60^\circ$	(12.7812, 7.1988, 0)	
$\theta_B = 50^\circ$	(12.3109, 5.8874, 0)	
$\theta_B = 40^\circ$	(11.9585, 4.6381, 0)	
$\theta_B = 30^\circ$	(11.7028, 3.4373, 0)	
$\theta_B = 20^\circ$	(11.5294, 2.2722, 0)	
$\theta_B = 10^\circ$	(11.4288, 1.1303, 0)	
$\theta_B = 0^\circ$	(11.3958, 0, 0)	
$\theta_B = -10^\circ$	(11.4288, -1.1303, 0)	
$\theta_B = -20^\circ$	(11.5294, -2.2722, 0)	
$\theta_B = -30^\circ$	(11.7028, -3.4373, 0)	
$\theta_B = -40^\circ$	(11.9585, -4.6381, 0)	
$\theta_B = -50^\circ$	(12.3109, -5.8874, 0)	
$\theta_B = -60^\circ$	(12.7812, -7.1988, 0)	

Por otra parte, cabe mencionar que este proyecto de investigación, únicamente se basará en los casos I y II mencionados.

CAPÍTULO 4. CINEMÁTICA INVERSA DE LA UNIDAD DE PROPULSIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se aborda lo referente al procedimiento matemático realizado para poder determinar las dimensiones necesarias de las variables de la unidad de propulsión en función del centro de rotación, que en este caso, será el propio centro geométrico del robot. Además se muestra la descripción del espacio de trabajo que genera una sola unidad de propulsión, así como el espacio de trabajo de varias unidades de propulsión en conjunto, tanto para el desplazamiento recto como para el giro alrededor del centro geométrico del robot.

4.2. MODELADO MATEMÁTICO DE VARIABLES DE ARTICULACIÓN EN FUNCIÓN DEL CENTRO DE ROTACIÓN DE LA UNIDAD DE PROPULSIÓN

En este apartado se explica, como se dijo anteriormente, el procedimiento matemático para conocer las longitudes que tomarán las variables de articulación de la unidad de propulsión del robot para que éste pueda girar sobre su propio centro.

La fig. 4.1 muestra el esquema de la posición en la que se encuentra el mecanismo para trazar un arco cóncavo y que sirve para el cálculo del modelo matemático de la unidad de propulsión del robot.

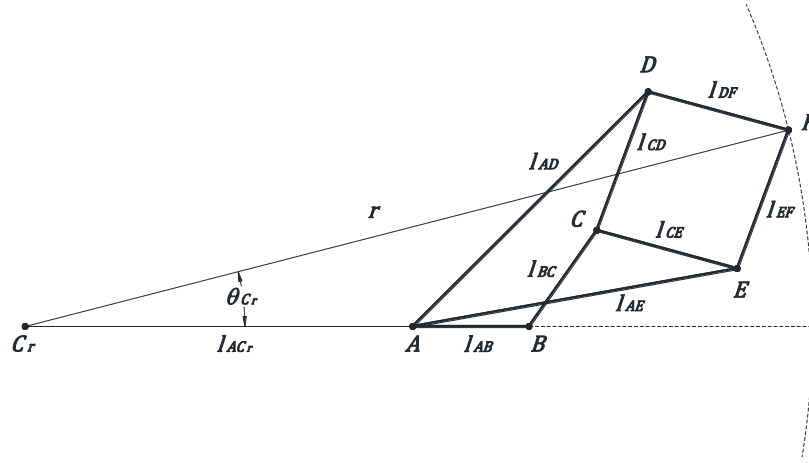


Fig. 4.1. Posición del MPL cuando genera un arco cóncavo.

Para poder calcular los valores de l_{AB} y l_{BC} que son las incógnitas, se hace uso, como primer paso, de la ayuda del triángulo que se forma entre los puntos C_r , A y F, tal como se muestra en el fig. 4.2.

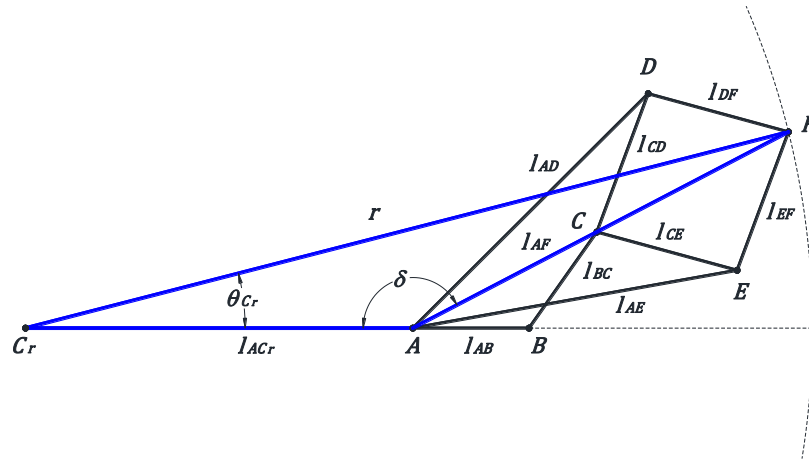


Fig. 4.2. Triángulo formado por los puntos C_r , A y F.

Del triángulo formado en la figura anterior se puede deducir lo siguiente.

De la ley de cosenos, se tiene que:

$$l_{AF} = \sqrt{r^2 + l_{AC_r}^2 - 2rl_{AC_r} \cos \theta_{C_r}} \quad (4.1)$$

Ahora, volviendo a aplicar la ley de cosenos, se obtiene:

$$r^2 = l_{AC_r}^2 + l_{AF}^2 - 2l_{AC_r}l_{AF} \cos \delta \quad (4.2)$$

Despejando δ de la Ec. (4.2)

$$\delta = \cos^{-1} \left[\frac{l_{AC_r}^2 + l_{AF}^2 - r^2}{2l_{AC_r}l_{AF}} \right] \quad (4.3)$$

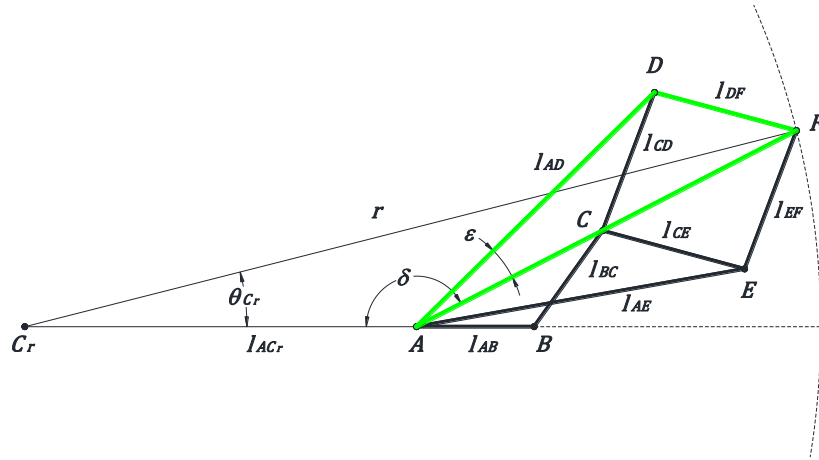


Fig. 4.3. Triángulo formado por los puntos A, D y F.

Por otro lado, de la fig. 4.3, del triángulo formado por los puntos A, D y F, y aplicando de nuevo la ley de cosenos, se tiene:

$$l_{DF}^2 = l_{AD}^2 + l_{AF}^2 - 2l_{AD}l_{AF} \cos \varepsilon \quad (4.4)$$

Despejando ε , se tiene:

$$\varepsilon = \cos^{-1} \left(\frac{l_{AD}^2 + l_{AF}^2 - l_{DF}^2}{2l_{AD}l_{AF}} \right) \quad (4.5)$$

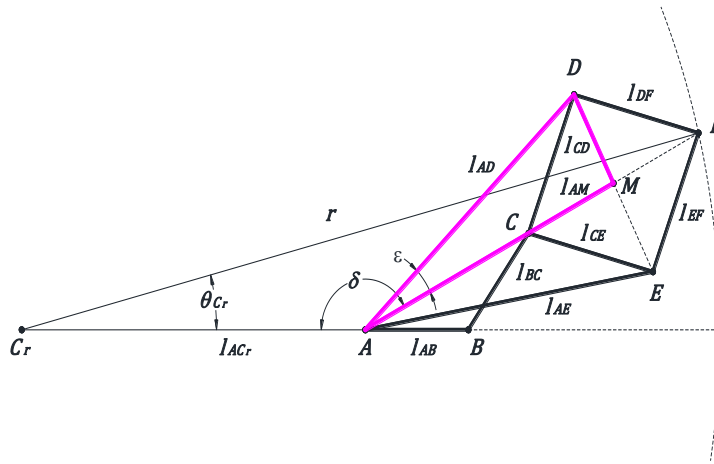


Fig. 4.4. Triángulo formado por los puntos A, D y M.

Ahora, del triángulo rectángulo que se muestra en la fig. 4.4, por el teorema de Pitágoras, se obtiene:

$$\cos \varepsilon = \frac{l_{AM}}{l_{AD}} \quad (4.6)$$

Despejando l_{AM} , de la Ec. (4.6):

$$l_{AM} = l_{AD} \cos \varepsilon \quad (4.7)$$

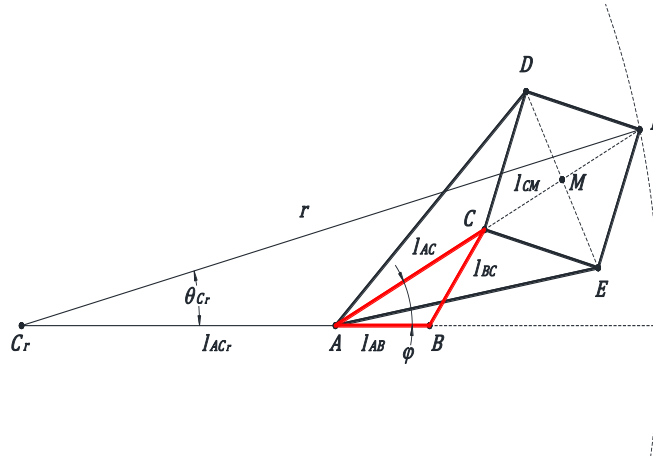


Fig. 4.5. Triángulo formado por los puntos A, B y C.

Del triángulo que se forma por los puntos A, B y C (fig. 4.5), y realizando el álgebra necesario, se obtiene

$$l_{AC} = 2l_{AM} - l_{AF} \quad (4.8)$$

$$\varphi = 180 - \delta \quad (4.9)$$

Ahora, para el cálculo de l_{AB} y l_{BC} , de la ley de cosenos, se tiene

$$l_{BC}^2 = l_{AB}^2 + l_{AC}^2 - 2l_{AB}l_{AC} \cos \varphi \quad (4.10)$$

Además, se sabe que, por la geometría del mecanismo:

$$l_{AB} + l_{BC} = cte \Rightarrow l_{AB} = cte - l_{BC} \quad (4.11)$$

Sustituyendo la Ec. (4.11) en la Ec. (4.10) y haciendo el álgebra necesario, se obtiene

$$l_{BC} = \frac{cte^2 + l_{AC}^2 - 2 cte l_{AC} \cos \varphi}{2(cte - 2 l_{AC} \cos \varphi)} \quad (4.12)$$

Como situación particular se cuenta con los siguientes datos:

$$r = 427.69 \text{ mm}$$

$$l_{AD} = l_{AE} = 170 \text{ mm}$$

$$l_{CD} = l_{CE} = l_{DF} = l_{EF} = 75 \text{ mm}$$

$$l_{AC_r} = 235 \text{ mm}$$

$$l_{AB} + l_{BC} = cte = 120 \text{ mm}$$

$$\theta_{C_r} = 0.01^\circ$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores para obtener los valores de l_{AB} y l_{BC} , se obtiene lo siguiente.

$$l_{AB} = 39.7278 \text{ mm}$$

$$l_{BC} = 80.2722 \text{ mm}$$

Por consiguiente, las dimensiones que deben de tener los eslabones l_{AB} y l_{BC} para que el robot pueda girar en un círculo con radio $r = 427.69 \text{ mm}$, son

$$l_{AB} = 40 \text{ mm}$$

$$l_{BC} = 80 \text{ mm}$$

4.3. ESPACIO DE TRABAJO DE UNA UNIDAD DE PROPULSIÓN

4.3.1. Espacio de Trabajo de una Unidad de Propulsión en el Desplazamiento Recto

El espacio de trabajo que genera solamente una unidad de propulsión del robot dentro del desplazamiento recto del mismo, es la distancia máxima en que el punto o elemento de salida (punto F) del MPL puede desplazarse, cuando los eslabones l_{AB} y l_{BC} tienen las mismas dimensiones. Esto se logra variando el ángulo θ_B ; es decir, obteniendo un $\theta_B^{\text{máx}}$ y un $\theta_B^{\text{mín}}$, tal y como se puede apreciar en la fig. 4.6.

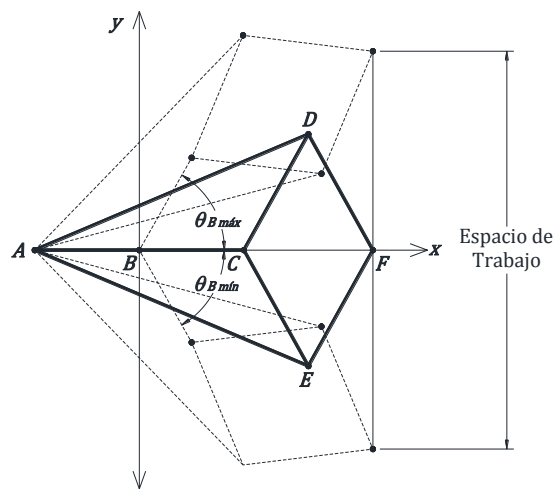


Fig. 4.6. Espacio de trabajo de la unidad de propulsión para el desplazamiento recto.

Para saber cuál es la distancia máxima a la que el punto F puede desplazarse dependiendo el valor de $\theta_B^{\text{máx}}$ o $\theta_B^{\text{mín}}$, se parte de lo siguiente.

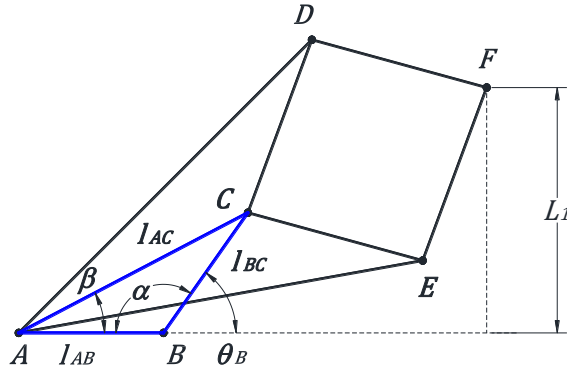


Fig. 4.7. Triángulo formado por los puntos A, B y C.

Del triángulo formado por los puntos A, B y C de la fig. 4.7, se deduce lo siguiente.

$$180 = \alpha + \theta_B \quad (4.13)$$

$$\Rightarrow \alpha = 180 - \theta_B \quad (4.14)$$

De la ley de cosenos, se tiene.

$$l_{AC} = \sqrt{l_{AB}^2 + l_{BC}^2 - 2l_{AB}l_{BC} \cos \alpha} \quad (4.15)$$

$$l_{BC}^2 = l_{AB}^2 + l_{AC}^2 - 2l_{AB}l_{AC} \cos \beta \quad (4.16)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{l_{AB}^2 + l_{AC}^2 - l_{BC}^2}{2l_{AB}l_{AC}} \right) \quad (4.17)$$

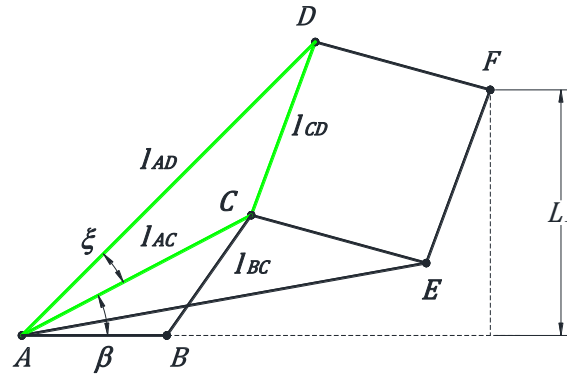


Fig. 4.8. Triángulo formado por los puntos A, C y D.

Por otro lado, del triángulo formado por los puntos A, C y D de la fig. 4.8, de la ley de cosenos, se tiene:

$$l_{CD}^2 = l_{AC}^2 + l_{AD}^2 - 2l_{AC}l_{AD} \cos \xi \quad (4.18)$$

$$\xi = \cos^{-1} \left(\frac{l_{AC}^2 + l_{AD}^2 - l_{CD}^2}{2l_{AC}l_{AD}} \right) \quad (4.19)$$

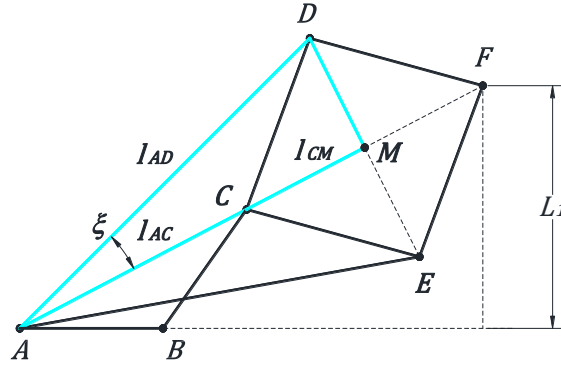


Fig. 4.9. Triángulo formado por los puntos A, D y M.

Ahora, del triángulo rectángulo formado por los puntos A, D y M de la fig. 4.9, aplicando el teorema de Pitágoras, se obtiene:

$$\cos \xi = \frac{l_{AC} + l_{CM}}{l_{AD}} \quad (4.20)$$

$$l_{CM} = l_{AD} \cos \xi - l_{AC} \quad (4.21)$$

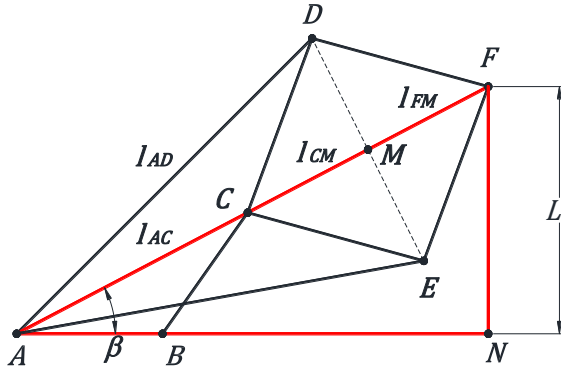


Fig. 4.10. Triángulo formado por los puntos A, F y N.

Por último, del triángulo rectángulo formado por los puntos A, F y N de la fig. 4.10, aplicando el teorema de Pitágoras, se tiene:

$$\sin \beta = \frac{l_{AC} + l_{CM} + l_{FM}}{l_1} \quad (4.22)$$

$$\sin \beta = \frac{l_{AC} + 2l_{CM}}{l_1} \quad (4.23)$$

$$L_1 = (l_{AC} + 2l_{CM}) \sin \beta \quad (4.24)$$

Además, de la fig. 4.6, se puede observar que:

$$\text{Espacio de Trabajo} = ET = 2L_1 \quad (4.25)$$

También, se observa que $\theta_{B \text{ máx}}$ y $\theta_{B \text{ mín}}$ tienen la misma magnitud pero $\theta_{B \text{ máx}}$ se mide en sentido antihorario y $\theta_{B \text{ mín}}$ en sentido horario; por lo tanto.

$$\theta_{B \text{ máx}} = +\theta_B \quad (4.26)$$

$$\theta_{B \text{ mín}} = -\theta_B \quad (4.27)$$

Ahora, como caso particular se cuenta con los siguientes datos:

$$l_{AB} = l_{BC} = 60 \text{ mm}$$

$$l_{AD} = l_{AE} = 170 \text{ mm}$$

$$l_{CD} = l_{CE} = l_{DF} = l_{EF} = 75 \text{ mm}$$

$$60^\circ \leq \theta_B \leq 60$$

La tabla 4.1 muestra el espacio de trabajo del punto F de la unidad de propulsión haciendo variar el ángulo θ_B .

Tabla 4.1. Espacio de trabajo de una unidad de propulsión para el desplazamiento recto con diferentes valores de θ_B .

θ_B	Coordenadas Punto F	Espacio de Trabajo (mm)
60°	(133.96, 111.98, 0)	223.96
50°	(133.96, 90.44, 0)	180.88
40°	(133.96, 70.595, 0)	141.19
30°	(133.96, 51.97, 0)	103.94
20°	(133.96, 34.20, 0)	68.40
10°	(133.96, 16.97, 0)	33.94
0	(133.96, 0, 0)	0
-10°	(133.96, -16.97, 0)	33.94
-20°	(133.96, -34.20, 0)	68.40
-30°	(133.96, -51.97, 0)	103.94
-40°	(133.96, -70.595, 0)	141.19
-50°	(133.96, -90.44, 0)	180.88
-60°	(133.96, -111.98, 0)	223.96

Cabe mencionar que sólo se eligieron valores de θ_B entre +60° y -60° debido a que con valores mayores a estos, el rombo que generan los puntos C , D , E y F en el MPL sufre una deformación geométrica severa haciendo que el mecanismo pueda tener fallos en su funcionamiento.

Por lo tanto, los valores máximo y mínimo que θ_B puede tomar y sustituyendo en las Ecs. (4.27) y (4.28) respectivamente, así como el espacio de trabajo son

$$\boxed{\theta_{B \text{ máx}} = +60^\circ} \quad , \quad \boxed{\theta_{B \text{ mín}} = -60^\circ} \quad \text{y} \quad \boxed{ET = 223.96 \text{ mm}}$$

4.3.2. Espacio de Trabajo de una Unidad de Propulsión en el Giro

El espacio de trabajo que genera solamente una unidad de propulsión dentro del giro del robot, como en el desplazamiento recto, es la distancia máxima en que el punto o elemento de salida (punto F) del MPL puede desplazarse, cuando $l_{AB} < l_{BC}$. Esto se logra variando el ángulo θ_B ; es decir, obteniendo un $\theta_B \text{ máx}$ y un $\theta_B \text{ mín}$, tal y como se puede apreciar en la fig. 4.11.

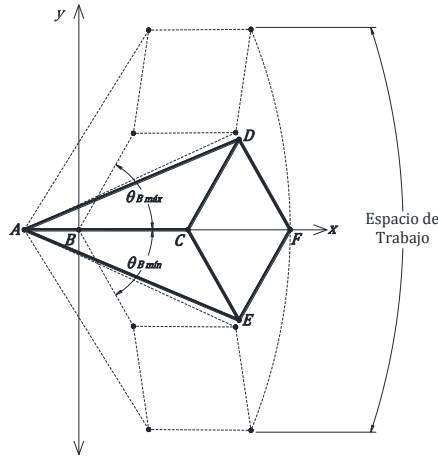


Fig. 4.11. Espacio de trabajo de la unidad de propulsión para el giro.

Para saber cuál es la distancia máxima a la que el punto F puede desplazarse dependiendo el valor de $\theta_B \text{ máx}$ o $\theta_B \text{ mín}$, se parte de lo siguiente.

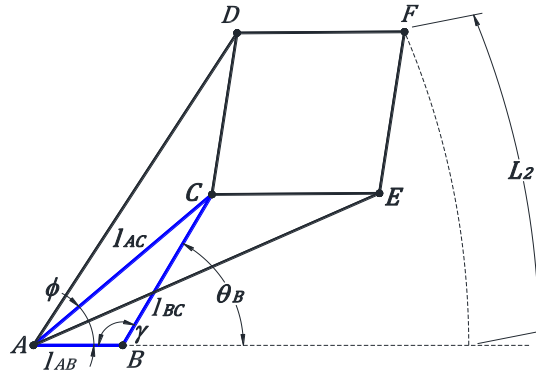


Fig. 4.12. Triángulo formado por los puntos A, B y C para el giro.

Del triángulo formado en la fig. 4.12, se deduce que:

$$180 = \gamma + \theta_B \quad (4.28)$$

$$\Rightarrow \gamma = 180 - \theta_B \quad (4.29)$$

De la Ley de Cosenos, se tiene.

$$l_{AC} = \sqrt{l_{AB}^2 + l_{BC}^2 - 2l_{AB}l_{BC} \cos \gamma} \quad (4.30)$$

$$l_{BC}^2 = l_{AB}^2 + l_{AC}^2 - 2l_{AB}l_{AC} \cos \phi \quad (4.31)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{l_{AB}^2 + l_{AC}^2 - l_{BC}^2}{2l_{AB}l_{AC}} \right) \quad (4.32)$$

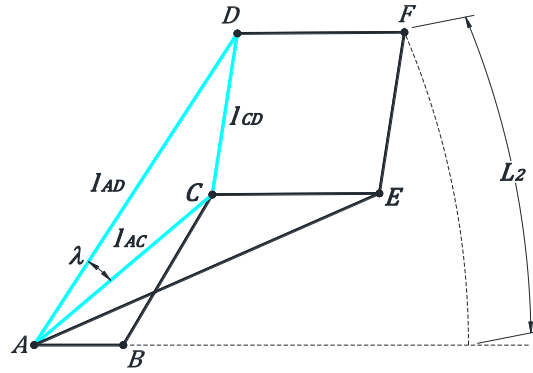


Fig. 4.13. Triángulo formado por los puntos A, C y D para el giro.

Del triángulo que se forma en la fig. 4.13, de la Ley de Cosenos, se tiene.

$$l_{CD}^2 = l_{AC}^2 + l_{AD}^2 - 2l_{AC}l_{AD} \cos \lambda \quad (4.33)$$

$$\lambda = \cos^{-1} \left(\frac{l_{AC}^2 + l_{AD}^2 - l_{CD}^2}{2l_{AC}l_{AD}} \right) \quad (4.34)$$

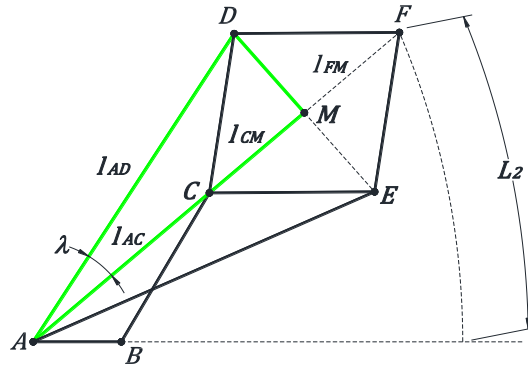


Fig. 4.14. Triángulo formado por los puntos A, D y M para el giro.

Del triángulo rectángulo que se forma en la fig. 4.14, del Teorema de Pitágoras, se tiene.

$$\cos \lambda = \frac{l_{AC} + l_{CM}}{l_{AD}} \quad (4.35)$$

$$l_{CM} = l_{AD} \cos \lambda - l_{AC} \quad (4.36)$$

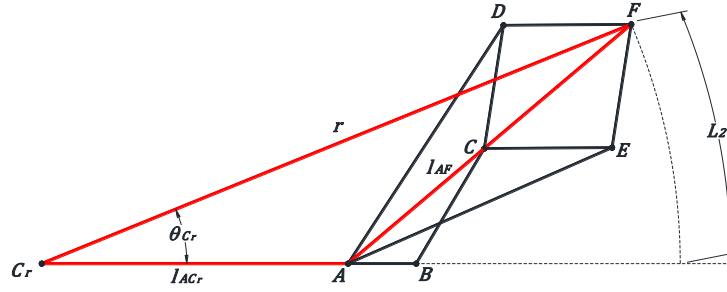


Fig. 4.15. Triángulo formado por los puntos A, D y M para el giro.

Ahora, del triángulo de las figuras 4.14 y 4.15, se deduce lo siguiente.

$$l_{AF} = l_{AC} + l_{CM} + l_{FM} \quad (4.37)$$

$$l_{AF} = l_{AC} + 2l_{CM} \quad (4.38)$$

De la Ley de Cosenos.

$$l_{AF}^2 = r^2 + l_{ACr}^2 - 2rl_{ACr} \cos \theta_{Cr} \quad (4.39)$$

$$\theta_{Cr} = \cos^{-1} \left(\frac{r^2 + l_{ACr}^2 - l_{AF}^2}{2rl_{ACr}} \right) \quad (4.40)$$

Por otro lado, para conocer el valor del arco L_1 , se hace uso de la ecuación para el cálculo de la longitud de arco.

$$L_2 = \theta_{Cr} \cdot r \quad (4.41)$$

Además, de la fig. 4.11 se observa que:

$$\text{Espacio de Trabajo} = ET = 2L_2 \quad (4.42)$$

Como en el apartado anterior 4.3.1, $\theta_{B \text{ máx}}$ y $\theta_{B \text{ mín}}$ tienen la misma magnitud pero $\theta_{B \text{ máx}}$ se mide en sentido antihorario y $\theta_{B \text{ mín}}$ en sentido horario; por lo tanto.

$$\theta_{B \text{ máx}} = +\theta_B \quad (4.43)$$

$$\theta_{B \text{ mín}} = -\theta_B \quad (4.44)$$

Ahora, como caso particular se cuenta con los siguientes datos:

$$l_{AB} = 40 \text{ mm}$$

$$l_{BC} = 80 \text{ mm}$$

$$l_{AD} = l_{AE} = 170 \text{ mm}$$

$$l_{CD} = l_{CE} = l_{DF} = l_{EF} = 75 \text{ mm}$$

$$r = 427.69 \text{ mm}$$

$$l_{ACr} = 235 \text{ mm}$$

$$60^\circ \leq \theta_B \leq 60$$

La tabla 4.2 muestra el espacio de trabajo del punto F de la unidad de propulsión haciendo variar el ángulo θ_B .

Tabla 4.2. Espacio de trabajo de una unidad de propulsión para el giro con diferentes valores de θ_B .

θ_B	Coordenadas Punto F	Espacio de Trabajo (mm)
60°	(126.25, 143.98, 0)	287.39
50°	(135.66, 117.75, 0)	235.81
40°	(142.70, 92.76, 0)	188.40
30°	(147.82, 68.75, 0)	144.77
20°	(151.29, 45.44, 0)	105.48
10°	(153.30, 22.61, 0)	73.72
0	(153.96, 0, 0)	0
-10°	(133.96, -22.61, 0)	73.72
-20°	(133.96, -45.44, 0)	105.48
-30°	(133.96, -68.75, 0)	144.77
-40°	(133.96, -92.76, 0)	188.40
-50°	(133.96, -117.75, 0)	235.81
-60°	(133.96, -143.98, 0)	287.39

También en este caso sólo se eligieron valores de θ_B entre +60° y -60° debido a que con valores mayores a estos, el rombo que generan los puntos C, D, E y F en el MPL sufre una deformación geométrica severa haciendo que el mecanismo pueda tener fallos en su funcionamiento.

Por lo tanto, los valores máximo y mínimo que θ_B puede tomar y sustituyendo en las Ecs. (4.43) y (4.44), respectivamente, así como el espacio de trabajo son:

$$\theta_{B \text{ máx}} = +60^\circ, \quad \theta_{B \text{ mín}} = -60^\circ \quad \text{y} \quad ET = 287.39 \text{ mm}$$

4.4. ESPACIO DE TRABAJO DE LAS UNIDADES DE PROPULSIÓN EN CONJUNTO

4.4.1. Espacio de Trabajo de varias Unidades de Propulsión en el Desplazamiento Recto

El espacio de trabajo que generan dos o más unidades de propulsión del robot dentro del desplazamiento recto del mismo, es la distancia máxima en que el punto o elemento de salida (punto F) del MPL de una unidad puede desplazarse sin que algún elemento, de dicha unidad, interfiera con algún elemento de la otra unidad, cuando los eslabones l_{AB} y l_{BC} tienen las mismas dimensiones. Como en los otros casos, esto se logra variando el ángulo θ_B ; es decir, obteniendo un $\theta_{B \text{ máx}}$ y un $\theta_{B \text{ mín}}$, tal y como se puede apreciar en la fig. 4.16.

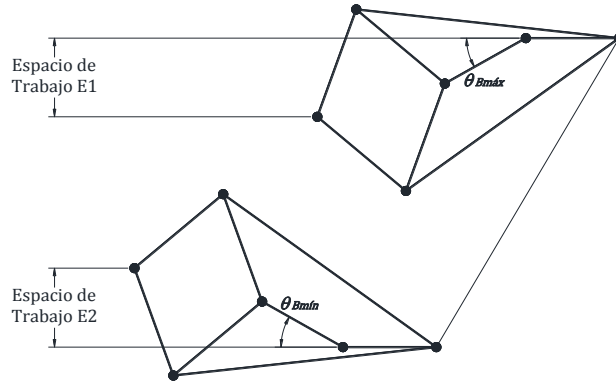


Fig. 4.16. Espacio de trabajo de dos unidades de propulsión para el desplazamiento recto.

Si el ángulo θ_B toma los valores de $\theta_{Bmáx} = 60^\circ$ y $\theta_{Bmín} = -60^\circ$, que son los valores máximo y mínimo, calculados en el apartado 4.3.1 para desplazamiento recto, el arreglo de las 2 unidades de propulsión queda como se muestra en la fig. 4.17.

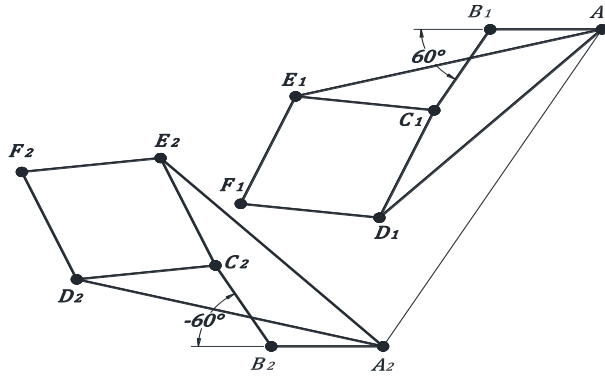


Fig. 4.17. Configuración de las unidades de propulsión con $\theta_{Bmáx} = 60^\circ$ y $\theta_{Bmín} = -60^\circ$ para el desplazamiento recto.

Como se puede apreciar en la fig. 4.17, cuando θ_B toma los valores de $\theta_{Bmáx} = 60^\circ$ y $\theta_{Bmín} = -60^\circ$, ningún punto o elemento de la primer unidad de propulsión interfieren con algún punto o elemento de la otra unidad. Entonces, el espacio de trabajo de la unidad de propulsión 1 será igual al espacio de trabajo de la unidad de propulsión 2.

Por lo tanto, utilizando la Ec. (4.24), se tiene:

$$\text{Espacio de Trabajo } E_1 = ET_1 = (l_{AC1} + 2l_{CM1}) \sin \beta \quad (4.45)$$

$$\text{Espacio de Trabajo } E_2 = ET_2 = (l_{AC2} + 2l_{CM2}) \sin \beta \quad (4.46)$$

Por consiguiente, el espacio de trabajo de las unidades de propulsión será

$$ET_1 = ET_2 = 111.98 \text{ mm}$$

4.4.2. Espacio de Trabajo de varias Unidades de Propulsión en el Giro

Al igual que como se explicó en el apartado anterior, el espacio de trabajo que generan dos o más unidades de propulsión del robot dentro del giro respecto al centro geométrico, es la distancia máxima en que el punto o elemento de salida (punto F) del MPL de una unidad puede desplazarse sin que algún elemento de ésta interfiera con algún elemento de la otra unidad, cuando $l_{AB} < l_{BC}$. Como en los otros casos, esto se logra variando el ángulo θ_B ; es decir, obteniendo un $\theta_{B \text{ máx}}$ y un $\theta_{B \text{ mín}}$, tal y como se puede apreciar en la fig. 4.18.

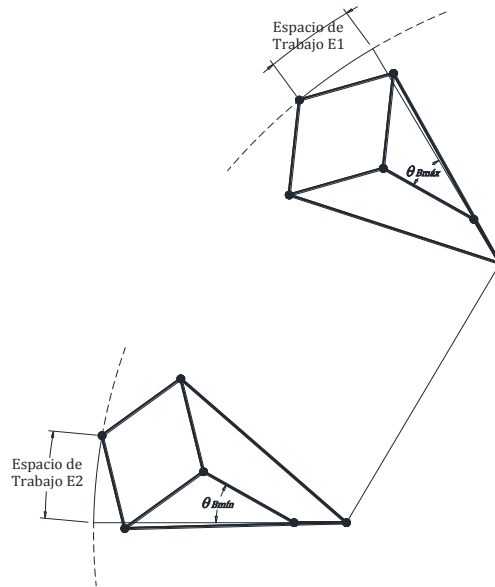


Fig. 4.18. Espacio de trabajo de dos unidades de propulsión para el giro.

Si el ángulo θ_B toma los valores de $\theta_{B \text{ máx}} = 60^\circ$ y $\theta_{B \text{ mín}} = -60^\circ$, que son los valores máximo y mínimo, calculados en el apartado 4.3.2 para el giro, el arreglo de las 2 unidades de propulsión queda como se muestra en la fig. 4.17.

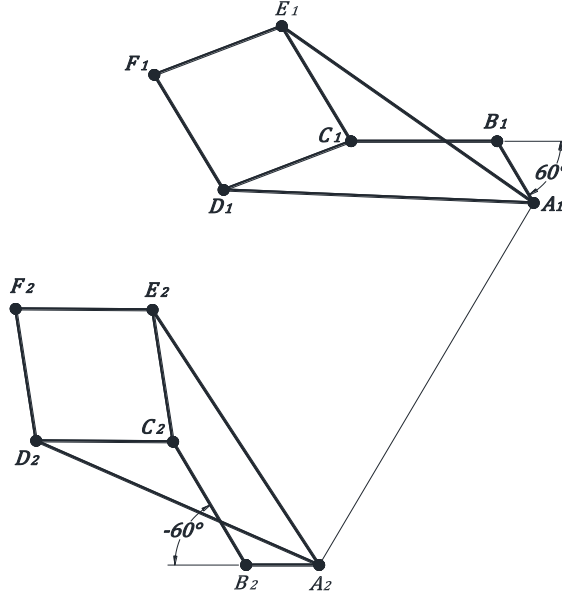


Fig. 4.19. Configuración de las unidades de propulsión con $\theta_{B\text{máx}} = 60^\circ$ y $\theta_{B\text{mín}} = -60^\circ$ para el giro.

Como se puede apreciar en la fig. 4.17, cuando θ_B toma los valores de $\theta_{B\text{máx}} = 60^\circ$ y $\theta_{B\text{mín}} = -60^\circ$, ningún punto o elemento de la primer unidad de propulsión interfieren con algún punto o elemento de la otra unidad. Entonces, el espacio de trabajo de la unidad de propulsión 1 será igual al espacio de trabajo de la unidad de propulsión 2.

Por lo tanto, utilizando la Ec. (4.41), se tiene:

$$\text{Espacio de Trabajo } E_1 = ET_1 = \theta_{C_r} \cdot r \quad (4.47)$$

$$\text{Espacio de Trabajo } E_2 = ET_2 = \theta_{C_r} \cdot r \quad (4.48)$$

Por consiguiente, el espacio de trabajo de las unidades de propulsión será

$$ET_1 = ET_2 = 111.98 \text{ mm}$$

CAPÍTULO 5. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA MÁQUINA CAMINANTE BASADA EN EL MECANISMO DE PEAUCELLIER-LIPKIN

5.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo explica el Principio Básico de Desplazamiento que genera una máquina caminante multi-patas.

Además, se indica cómo se logra disminuir los grados de libertad de la máquina caminante nombrada *LUNAbot W6 VX1.0*® (que se encuentra en desarrollo), a los grados de libertad con que cuenta la máquina caminante *LUNAbot W6 VJ1.0*® y que es tema de esta investigación.

Por último se expone la descripción espacial de las unidades de propulsión que conforman al *LUNAbot W6 VJ1.0*®.

5.2. PRINCIPIO BÁSICO DE DESPLAZAMIENTO DE UNA MÁQUINA CAMINANTE

Tal como se menciona en la solicitud de patente no. MX/a/2014/012577 y folio MX/E/2014/074558, toda máquina caminante (010) (fig. 5.1) debe desplazarse sobre el terreno en torno a un eje instantáneo de rotación que pasa por el punto **CR**, gracias a sus unidades de propulsión (020), esto es conocido como el **Principio Básico de Desplazamiento** de una máquina caminante. La unidad de propulsión (020) vincula al cuerpo del artefacto caminante con el espacio circundante, de esta manera, un extremo de la unidad de propulsión estará unido al cuerpo, mientras que el otro, llamado pie, puede hacer contacto directo con el terreno o estar en vuelo acorde al proceso de desplazamiento discreto de la caminata paso a paso.

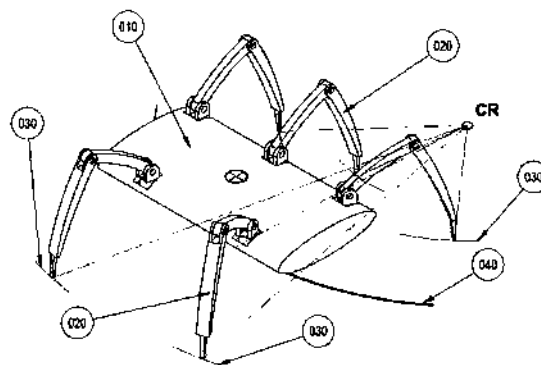


Fig. 5.1. Máquina caminante basada en el principio básico de desplazamiento (Cortesía de Diego Núñez) [20].

Para que una máquina caminante se desplace, cada una de sus unidades de propulsión (020) debe trazar su propio arco circular concéntrico y paralelo (030) al arco circular (040) descrito por la máquina caminante. También es cierto que una de las trayectorias que puede seguir es la línea recta, la cual se logra cuando el centro de rotación instantáneo **CR** se encuentra en el infinito. En este caso, el radio de giro es tan grande, comparado con las dimensiones del artefacto, que la circunferencia parece una línea recta. De esta manera, la ruta seguida por la máquina caminante depende de la localidad del punto **CR**, y sus unidades de propulsión deben ajustarse a tal condición para lograrlo [20].

5.3. REDUCCIÓN DE GRADOS DE LIBERTAD DE LA MÁQUINA CAMINANTE LUNAbot W6 VJ1.0[©]

Esta sección se basa en la solicitud de patente no. MX/a/2015/000727 y no. de folio MX/E/2015/003683, en la cual se explica que la máquina caminante hexápoda que ya se encuentra en desarrollo y a la cual se le ha nombrado, hasta el momento, como *LUNAbot W6 VX1.0[©]* consta de 5 grados de libertad por extremidad, todos movidos por actuadores eléctricos.

Para el caso de dicha máquina caminante hexápoda, el que contengan en total 30 grados de libertad implica, por lo tanto, 30 motores, lo que ocasiona varios problemas, entre ellos se tiene un alto consumo energético, provocando una disminución en su autonomía. También se tiene un costo elevado de fabricación debido a que los servomotores para robots ostentan precios elevados. Al mismo tiempo, el control se incrementa y se vuelve más difícil con la cantidad de actuadores. Es importante mencionar que el peso de la máquina es excesivo por el número de motores y la cantidad de baterías necesarias para almacenar y proporcionar la energía de operación requerida.

Estos inconvenientes mencionados son las razones que o al proyecto del **LUNAbot W6 VJ1.0[©]**, el cual tiene como propósito reducir la cantidad de motores. Por tal motivo, el desarrollo de esta máquina caminante mínima que reduce de 30 actuadores a sólo 14, **consta de un total de 14 grados de libertad**. La reducción se logra mediante la ayuda de mecanismos de transmisión de movimiento que mueven grupos grandes de articulaciones, reconfigurando de forma simultánea varias unidades de propulsión. Es importante mencionar que el adjetivo de máquina caminante *mínima* proviene, entonces, de la disminución mayúscula de actuadores necesarios para que la máquina caminante pueda realizar las funciones básicas, como son desplazamiento en (a) línea recta y (b) giro en torno a su centro geométrico, sacrificando la versatilidad de su movilidad excluyendo giros alrededor de ejes que no cruzan el centro geométrico de la máquina caminante.

La reducción de motores implica el empleo de mecanismos de transmisión que permitan que las unidades de propulsión se reconfiguren del estado específico para movilidad en línea

recta al estado específico para movilidad de giro alrededor del centro geométrico de la máquina caminante hexápoda.

Cuando el número de articulaciones es mayor que el número de motores, entonces se tiene una reducción del número de éstos últimos. Sin embargo, las articulaciones que antes eran grados de libertad, es decir, tenían movilidad independiente, ahora, con la reducción de motores, se tornan dependientes.

Esta simplificación en el número de motores sacrifica la plena movilidad de la máquina en cuanto al giro en torno a centros de rotación que no coincidan con el centro geométrico del robot. De esta manera, se mantiene únicamente su capacidad de desplazamiento en línea recta y el giro alrededor de su centro.

A continuación, se describe cómo funciona el mecanismo que reconfigura las unidades de propulsión o extremidades para así poder reducir de 30 grados de libertad a sólo 14.

1. Como se muestra en la fig. 5.2, se aprecia una vista superior de las partes principales de la máquina caminante LUNAbot W6 VJ1.0®, en donde se observa el orden de sus unidades de propulsión. Considerando que tiene un frente, comenzando desde su lado izquierdo y siguiendo un sentido antihorario, sus extremidades se designan como $P1, P2, P3, P4, P5$ y $P6$.

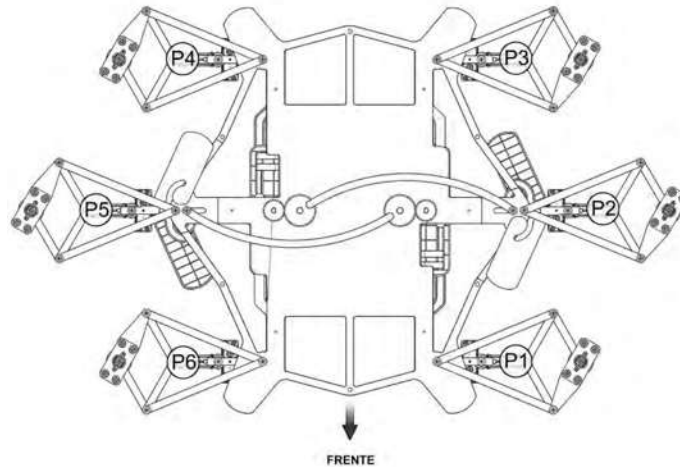


Fig. 5.2. Designación de las unidades de propulsión de la máquina caminante LUNAbot W6 VJ1.0® [21].

2. Las extremidades orientadas, como se muestran en la fig. 5.3, capacitan a la máquina caminante para que pueda desplazarse en línea recta, ya sea hacia adelante o hacia atrás. En tal situación, las longitudes de los eslabones AB y BC son iguales, correspondiendo al caso en el que $l_{AB} = l_{BC}$. Así, los pies de las extremidades siguen una línea recta.

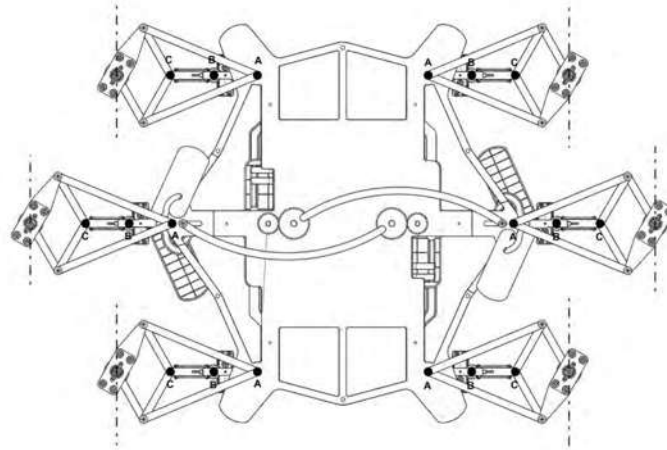


Fig. 5.3. Orientación de las extremidades de la máquina caminante para que se desplace en línea recta [21].

3. Para el caso en que se quiera girar en torno a un eje vertical que pasa por el centro geométrico O , las extremidades deben configurarse para que correspondan al caso en el que $l_{AB} < l_{BC}$, esto es, que las unidades de propulsión estén adaptadas para que su pie siga una trayectoria de arco circular cóncavo con centro coincidente en el centro geométrico de la máquina caminante. Por lo tanto, la longitud del eslabón AB debe ser menor a la longitud del eslabón BC . Dicha configuración se aprecia en la figura 5.4.

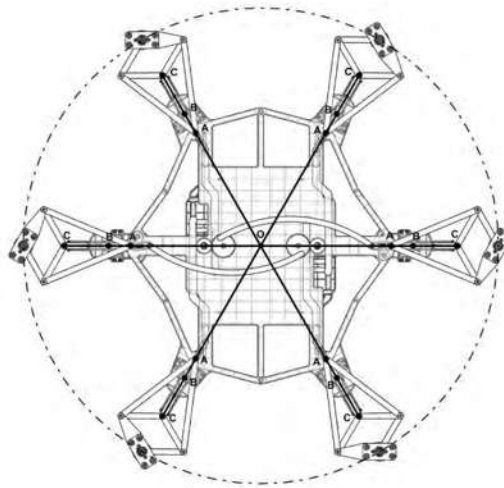


Fig. 5.4. Orientación de las extremidades de la máquina caminante para que gire en torno a su centro geométrico [21].

4. Para lograr configurar la máquina caminante de su estado con capacidad de moverse en línea recta (fig. 5.3) a su estado con capacidad de moverse en círculo con centro en el centro geométrico de la máquina caminante (fig.5.4), tres extremidades deben primero permanecer apoyadas en el terreno (suponiendo que éstas son $P2$, $P4$ y $P6$) las restantes ($P1$, $P3$ y $P5$) elevan sus pies y se configuran de tal manera que las líneas OA y AB sean colineales. Al mismo tiempo, los eslabones AB , así como los eslabones BC de

las extremidades, cuyos pies se elevaron, deben sufrir un cambio de dimensión. El eslabón AB debe contraerse, mientras que el BC debe extenderse. Esta contracción y extensión es única, de tal manera que los pies de las extremidades puedan girar alrededor del centro geométrico de la máquina cuando da un paso. Sin embargo, es necesario precisar que la suma de las longitudes de los eslabones AB y BC siempre es constante. En el caso del estado que capacita a la máquina caminante en línea recta, la longitud del eslabón AB es la misma que la del eslabón BC . En tanto que en su estado para girar en círculo, la cantidad en que se contrajo la longitud del eslabón AB es la misma en la que se extendió el eslabón BC .

5. Suponiendo que el primer conjunto de piernas o unidades de propulsión que se desea reconfigurar, en consideración de la transición del estado para movimiento en línea recta al estado para movimiento en círculo, está formado por las extremidades $P1, P3$ y $P5$, entonces, para orientar los eslabones AB de tal manera que sean paralelos a las líneas OA , se hace uso del mecanismo que se muestra en la figura 5.5.

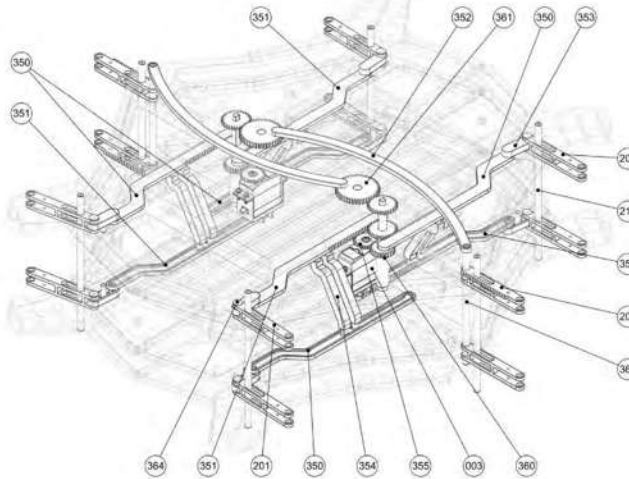


Fig. 5.5. Mecanismo de reconfiguración de unidades de propulsión [21].

6. Tal como se aprecia en el detalle A1 de la figura 5.6, el giro del eje del servomotor (003) en sentido antihorario hace rotar al tren de engranes (360) (integrado por las piezas (356), (357), (358) y (359)), lo que implica que las correderas dentadas (350) y (351) se desplacen acortando su longitud.

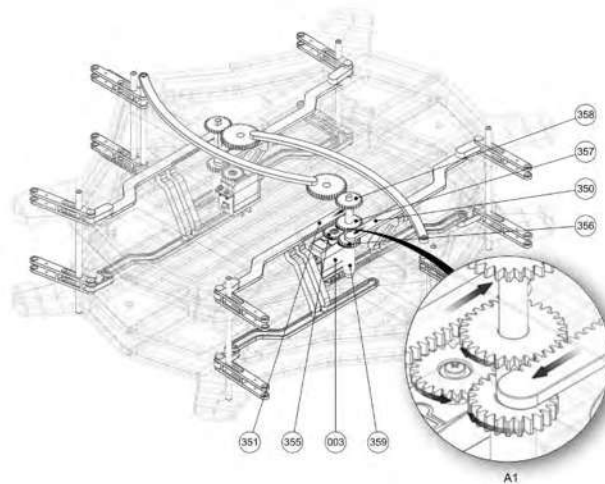


Fig. 5.6. Descripción de la transmisión del movimiento a las correderas dentadas (350) y (351) para las extremidades P1, P3 y P5 [21].

7. El efecto de las correderas dentadas (350) y (351) sobre los demás elementos se observa en los detalles A2 y A3 de la figura 5.7, en donde los eslabones AB (201) de las piernas $P1$ y $P3$ giran y acortan su longitud debido a la presencia de las ranuras que contienen éstos; de esta manera, las piernas $P1$ y $P3$ se orientan hacia el centro geométrico, punto O , de la máquina caminante. De manera simultánea, los eslabones AB (201) acortan su longitud en la magnitud correcta para que la desigualdad $l_{AB} < l_{BC}$ cumpla con las especificaciones de que los pies de las piernas $P1$ y $P3$ tracen un círculo, cuyo centro sea el centro geométrico de la máquina caminante, punto O .

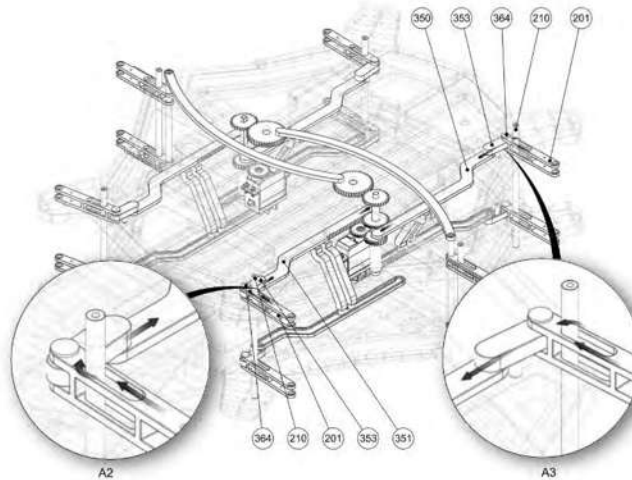


Fig. 5.7. Descripción de la transmisión del movimiento de las correderas dentadas (350) y (351) al eslabón G (353) y al eslabón AB (201) [21].

8. Hasta este momento sólo se ha explicado la orientación y la definición correcta de las longitudes de los eslabones AB (201) correspondientes a las piernas $P1$ y $P3$. Resta explicar lo propio para la pierna $P5$. El eslabón AB (202) de la pierna $P5$ ya se encuentra orientado hacia el centro geométrico de la máquina caminante. Sólo falta acortar su

longitud para que su pie trace un arco circular con respecto al centro de la máquina. Las longitudes de los eslabones AB (201) de las piernas $P1$ y $P3$ deben ser iguales a la longitud del eslabón AB (202) de la pierna $P5$. Para acortar la longitud del eslabón AB (202) de la pierna $P5$, se hace uso del engrane (361), el cual es girado por el engrane (358) del tren de engranes (360). El giro del engrane (361) resulta en el movimiento del extensor (352) que tira del eslabón AB (202), mediante el perno G (363), acortándolo gracias a la ranura que éste posee y que hace que se desplace teniendo como guía al perno A (210) de la pierna $P5$. Esta explicación se observa en los detalles A4 y A5 de la figura 5.8.

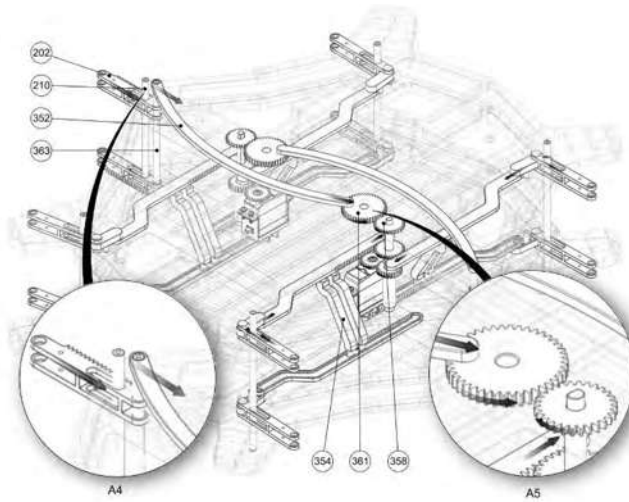


Fig. 5.8. Descripción de la transmisión del movimiento del brazo extensor (352) al eslabón AB (202) [21].

9. Es importante mencionar que los eslabones AB (201) de las piernas $P1$ y $P3$, así como el AB (202) de la pierna $P5$ se encuentran duplicados, esto es, que se presentan tanto en la parte superior como la parte inferior, como se puede verificar en las figuras de la 5.5 a la 5.8. Para vincular los elementos de la parte superior con la parte inferior se emplean los postes de conexión (354), los cuales se unen solidariamente a las correderas (350) y (351) de la parte inferior de las piernas $P1$ y $P3$, respectivamente. El eslabón AB (202) de la parte inferior de la pierna $P5$ se conecta con el perno (363), el cual, al ser jalado por el extensor (352), recibe el mismo movimiento del eslabón AB (202) de la parte superior. El resultado de la reconfiguración de los eslabones AB (201) y (202) correspondiente a las piernas $P1$, $P3$ y $P5$ se indica en la figura 5.9.

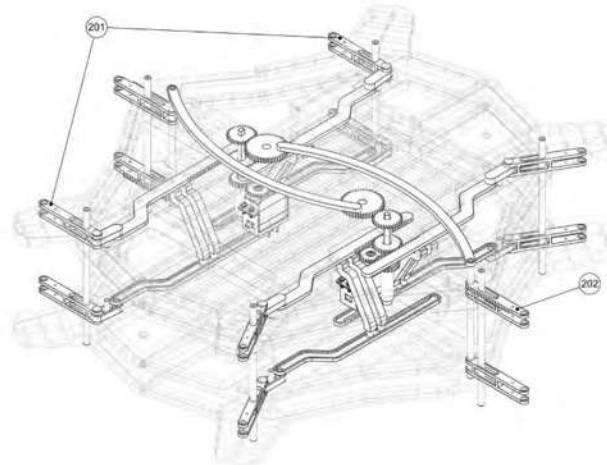


Fig. 5.9. Configuración final de los eslabones AB, (201) y (202), de las extremidades P1, P3 y P5 y configuración inicial de los eslabones AB, (201) y (202), de las extremidades P2, P4 y P6, durante el proceso de reconfiguración de desplazamiento en línea recta a giro alrededor del centro geométrico de la máquina caminante [21].

10. La metodología anterior, indicada para la reconfiguración de las unidades de propulsión P1, P3 y P5, es la misma para reconfigurar los eslabones AB (201) (inferiores y superiores), de las piernas P2 y P4, así como los eslabones AB (202) (inferior y superior) de la pierna P6. El resultado de la reconfiguración final de los eslabones AB de todas las piernas se aprecia en las figuras 5.10 y 5.11.

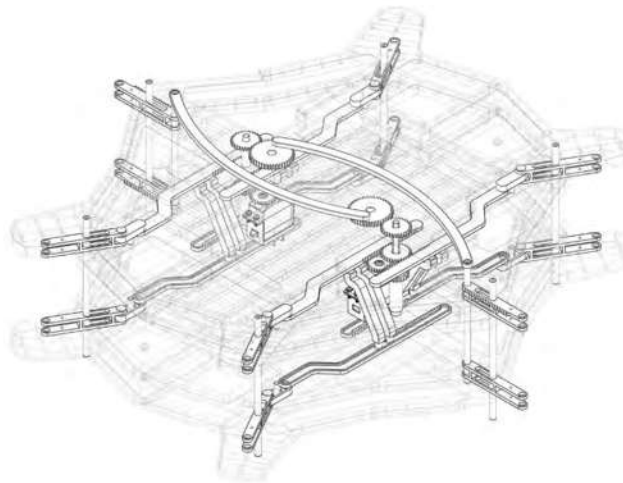


Fig. 5.10. Estado final de los eslabones AB, (201) y (202), de los mecanismos de transmisión logrado cuando las extremidades ya se encuentran reconfiguradas y listas para ejecutar giros alrededor de su centro geométrico [21].

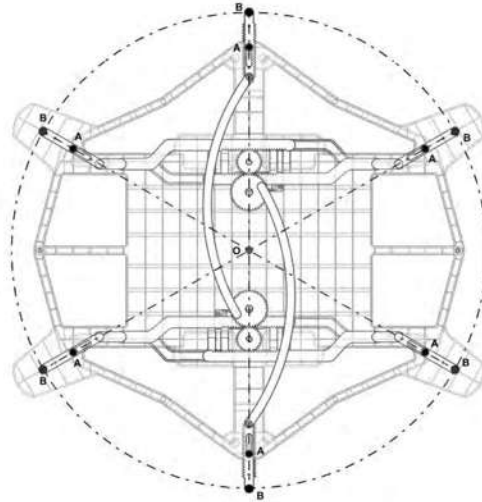


Fig. 5.11. Eslabones AB, (201) y (202), orientados hacia el centro de la máquina caminante [21].

11. La anterior descripción sólo explica cómo se han reconfigurado los eslabones AB de todas las unidades de propulsión; sin embargo, no se ha explicado cómo se reconfiguran los eslabones BC de las extremidades, lo cual se lleva a cabo de manera simultánea con la reconfiguración de los eslabones AB. Para la explicación de la modificación de los eslabones BC, se recurre primeramente a la fig. 5.12, correspondiente a la extremidad P2. En la mencionada figura se tienen indicados el eslabón AB (202), la leva móvil (309) y el engrane (362). Al momento en que el eslabón AB (202), el cual está dotado de una cremallera, reduce su distancia, tal y como se explicó anteriormente, transmite su movimiento al engrane (362), haciéndolo girar en sentido antihorario. Éste a su vez hace girar la leva móvil (309), tal y como se aprecia en el detalle B2 de la figura 5.12.

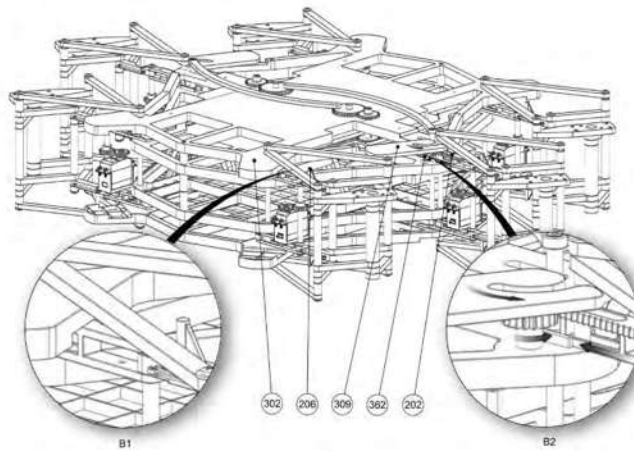


Fig. 5.12. Inicio del proceso de reconfiguración del eslabón BC (206) en la transición de movimiento de línea recta a giro alrededor de su centro geométrico [21].

12. En la fig. 5.13 se muestra en el detalle B4 cómo la leva móvil (309) ha alcanzado su posición final. En tal detalle se observa que la leva móvil (309) ha empujado al seguidor

fijo (205a) de la pieza (205) constitutiva del eslabón BC (206) (figs. 5.14). Para que se extienda, a partir de la posición original de equilibrio, se requiere empujar al seguidor (205a). Es precisamente la oreja leva (309) la encargada de empujar al seguidor (205a), tal como se observa en la fig. 5.13.

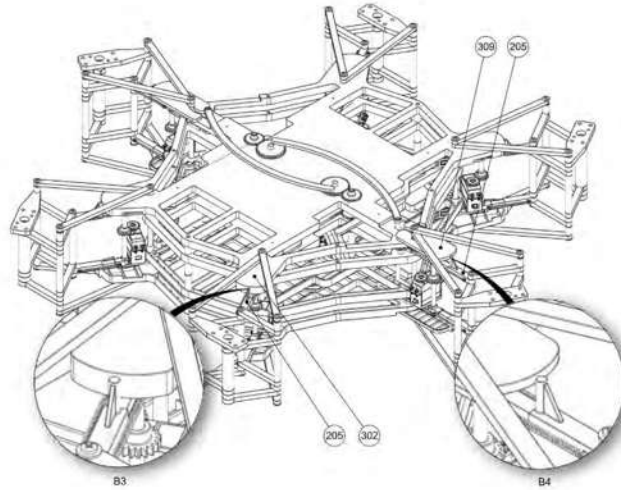


Fig. 5.13. Estado final del eslabón BC (206) para ejecutar giros alrededor de su centro geométrico [21].

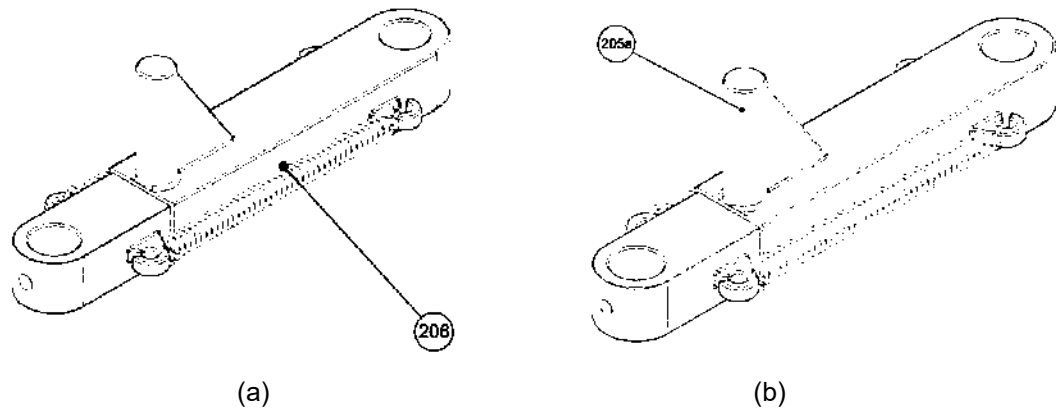


Fig. 5.14. (a) Eslabón BC (206). (b) Localización del seguidor fijo (205a) en el eslabón BC (206) [21].

13. Para explicar la modificación de las longitudes de los eslabones BC (206) de las piernas $P1, P3, P4$ y $P6$, se recurre a las figs. 5.12 y 5.13, específicamente al detalle B1 de la fig. 5.12 y al B3 de la fig. 5.13. Allí se observa que el seguidor (205a) alcanza la cúspide de la leva (302a) que forma parte de la pieza (302). La leva constitutiva (302a) se aprecia en la fig. 5.15. Cuando el eslabón AB (201) se orienta para que la máquina realice movimiento circular alrededor del punto O , como se explicó anteriormente, el eslabón BC (206) pasa de su longitud más corta, correspondiendo al hecho de que aún el seguidor (205a) no toca la leva (302a), detalle B1 de la fig. 5.12, a su longitud extendida cuando llega a la cúspide de la leva (302a), detalle B3, fig. 5.13.

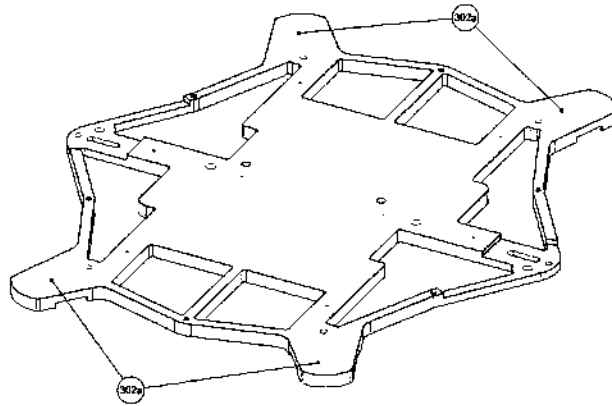


Fig. 5.15. Localización de las levas fijas (302a) en el chasis o pelvis (302) [21].

14. Una vez logradas las longitudes correctas de los eslabones AB y BC de todas las piernas, la máquina caminante habrá alcanzado el estado presentado en la fig. 5.16. Se visualiza que todas las piernas están orientadas hacia el centro geométrico de la máquina caminante, punto O , y que las longitudes de los eslabones AB son más cortas que las correspondientes a los eslabones BC [21].

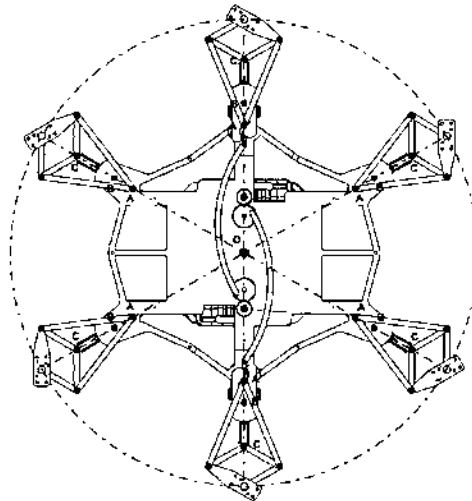


Fig. 5.16. Vista superior del estado final de la parte interna de la máquina caminante, correspondiente a su configuración lista para ejecutar giros alrededor de su centro geométrico [21].

5.4. DESCRIPCIÓN ESPACIAL DE LAS UNIDADES DE PROPULSIÓN

En este apartado lo que se obtendrá son las coordenadas de cada uno de los puntos de cada unidad de propulsión con respecto al centro geométrico O de la máquina caminante. Esto se logra al realizar una *transformación homogénea*; es decir, medir la localización de los puntos A, B, C, D, E y F de cada extremidad respecto al sistema de coordenadas de éstas ($\hat{x}_1, \hat{y}_1; \hat{x}_2, \hat{y}_2; \hat{x}_3, \hat{y}_3; \hat{x}_4, \hat{y}_4; \hat{x}_5, \hat{y}_5; \hat{x}_6, \hat{y}_6$), a medir su localización con respecto a un sistema global de coordenadas $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$, tal como se puede apreciar en la fig. 5.17.

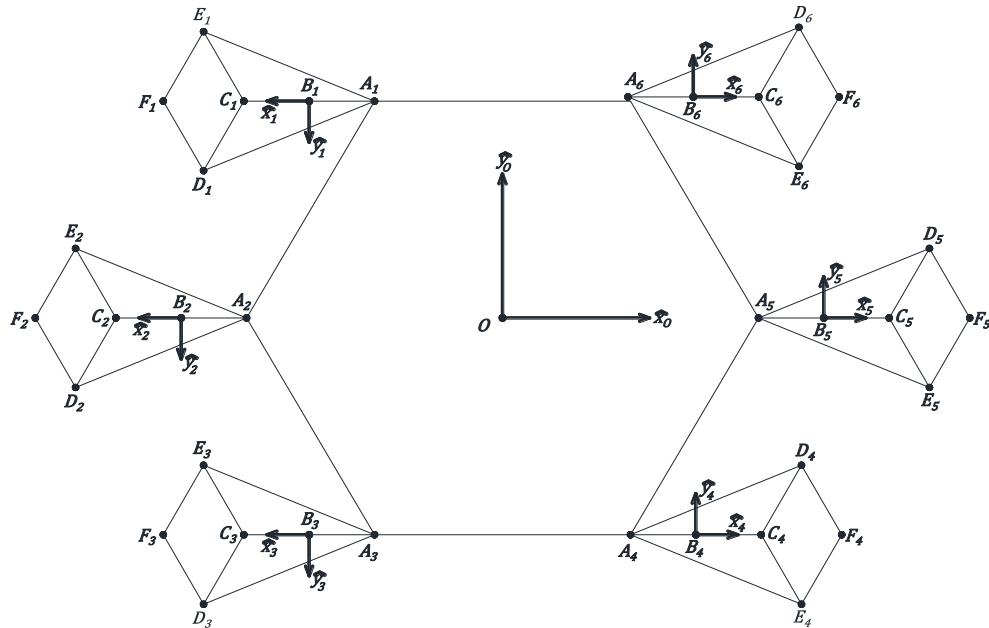


Fig. 5.17. Esquema general de los sistemas de coordenadas de cada extremidad y del sistema de coordenadas global.

A continuación se muestra la localización que tendrán los puntos de cada una de las unidades de propulsión, tanto para el movimiento recto como para el giro en torno al centro geométrico del robot.

5.4.1. Descripción Espacial en el Desplazamiento Recto

La fig. 5.18 muestra el esquema general de cómo se encuentran orientados los puntos de cada extremidad con respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para el desplazamiento recto.

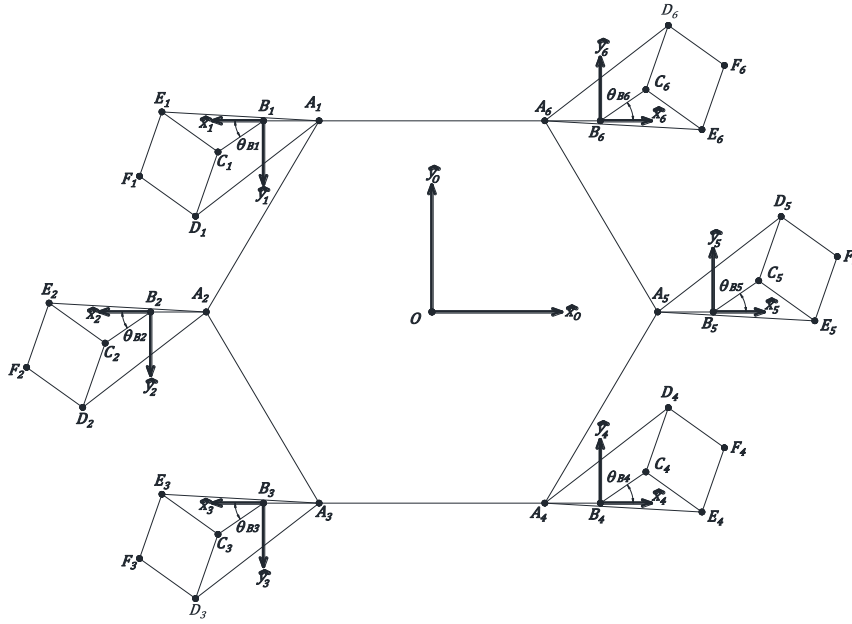


Fig. 5.18. Esquema general de los sistemas de coordenadas de cada extremidad y del sistema de coordenadas global para movimiento recto.

Partiendo de la ecuación de la transformación homogénea, se tiene

$${}^0T_H = \begin{bmatrix} Rot(\hat{z}, \phi)_H & {}^0\bar{B}_H \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Donde

$$Rot(\hat{z}, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$${}^0\bar{B}_H = \begin{bmatrix} {}^0B_x \\ {}^0B_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

ϕ = Giro de los ejes $\hat{x}$ y $\hat{y}$ en torno al eje $\hat{z}_0$ del sistema coordinado global

Sustituyendo las Ecs. (5.2) y (5.3), se obtiene la Ec. (5.4), que es la ecuación general para poder determinar localización del sistema coordinado de la extremidad con respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$.

$${}^0T_H = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & {}^0B_x \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & {}^0B_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Ahora, para poder obtener las coordenadas de cada punto de una extremidad en particular al sistema coordenado global $\hat{x}_O$ y $\hat{y}_O$, se tiene que

$${}^0E_H = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & {}^0B_x \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & {}^0B_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^pA_x & {}^pB_x & {}^pC_x & {}^pD_x & {}^pE_x & {}^pF_x \\ {}^pA_y & {}^pB_y & {}^pC_y & {}^pD_y & {}^pE_y & {}^pF_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & {}^0B_x \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & {}^0B_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^pA_x & {}^pB_x & {}^pC_x & {}^pD_x & {}^pE_x & {}^pF_x \\ {}^pA_y & {}^pB_y & {}^pC_y & {}^pD_y & {}^pE_y & {}^pF_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Por otro lado, para determinar la localización del sistema coordenado de la *extremidad 1* se hace uso de la fig. 5.19

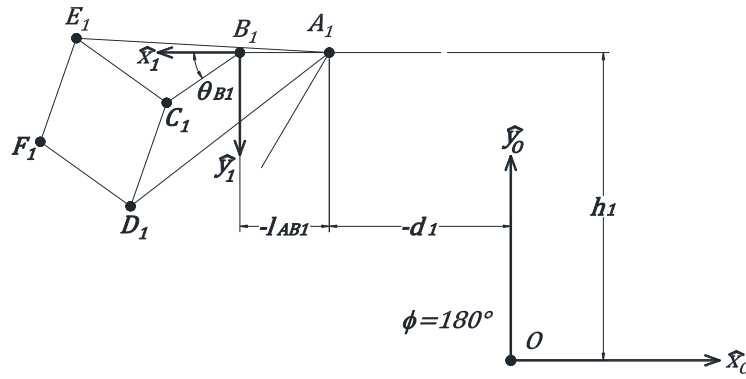


Fig. 5.19. Localización del sistema coordenado de la *extremidad 1* respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_O$ y $\hat{y}_O$ para movimiento recto.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -d_1 - l_{AB1} \\ 0 & -1 & 0 & h_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1A_x & {}^1B_x & {}^1C_x & {}^1D_x & {}^1E_x & {}^1F_x \\ {}^1A_y & {}^1B_y & {}^1C_y & {}^1D_y & {}^1E_y & {}^1F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_1 \quad (5.7)$$

Para la *extremidad 2* se hace uso de la fig. 5.20.

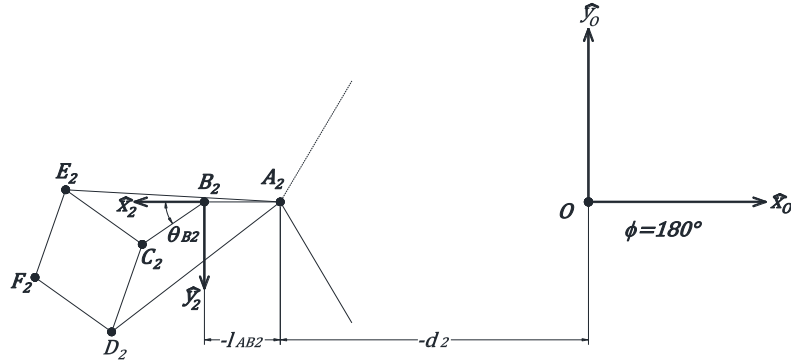


Fig. 5.20. Localización del sistema coordinado de la extremidad 2 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para movimiento recto.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -d_2 - l_{AB2} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^2A_x & {}^2B_x & {}^2C_x & {}^2D_x & {}^2E_x & {}^2F_x \\ {}^2A_y & {}^2B_y & {}^2C_y & {}^2D_y & {}^2E_y & {}^2F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_2 \quad (5.8)$$

Para la *extremidad 3* se hace uso de la fig. 5.21.

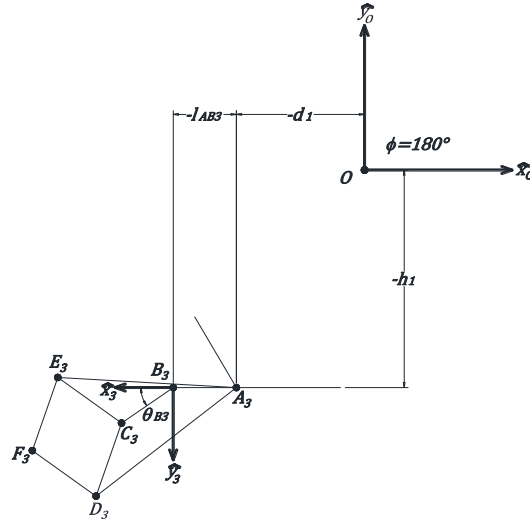


Fig. 5.21. Localización del sistema coordinado de la extremidad 3 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para movimiento recto.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -d_1 - l_{AB3} \\ 0 & -1 & 0 & -h_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^3A_x & {}^3B_x & {}^3C_x & {}^3D_x & {}^3E_x & {}^3F_x \\ {}^3A_y & {}^3B_y & {}^3C_y & {}^3D_y & {}^3E_y & {}^3F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_3 \quad (5.9)$$

Para la *extremidad 4* se hace uso de la fig. 5.22.

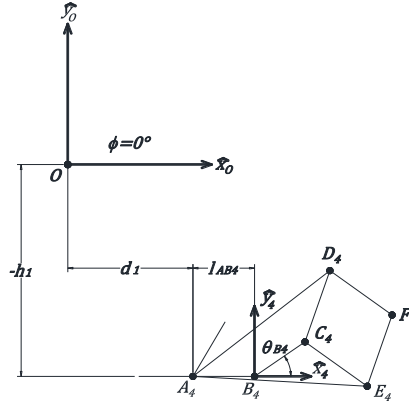


Fig. 5.22. Localización del sistema coordinado de la extremidad 4 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para movimiento recto.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_1 + l_{AB4} \\ 0 & 1 & 0 & -h_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^4A_x & {}^4B_x & {}^4C_x & {}^4D_x & {}^4E_x & {}^4F_x \\ {}^4A_y & {}^4B_y & {}^4C_y & {}^4D_y & {}^4E_y & {}^4F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_4 \quad (5.10)$$

Para la *extremidad 5* se hace uso de la fig. 5.23.

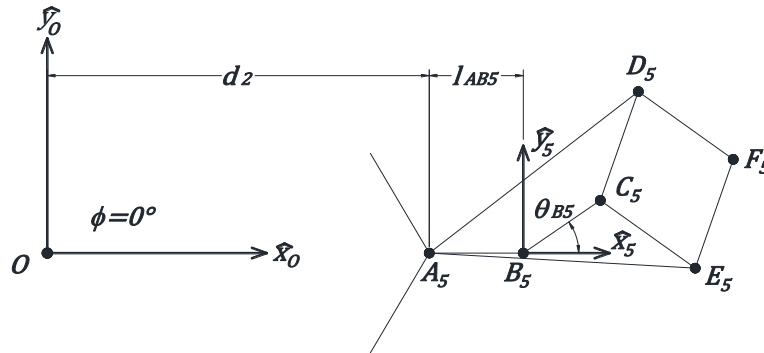


Fig. 5.23. Localización del sistema coordinado de la extremidad 5 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para movimiento recto.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_2 + l_{AB5} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^5A_x & {}^5B_x & {}^5C_x & {}^5D_x & {}^5E_x & {}^5F_x \\ {}^5A_y & {}^5B_y & {}^5C_y & {}^5D_y & {}^5E_y & {}^5F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_5 \quad (5.11)$$

Por último, para la *extremidad 6* se hace uso de la fig. 5.24.

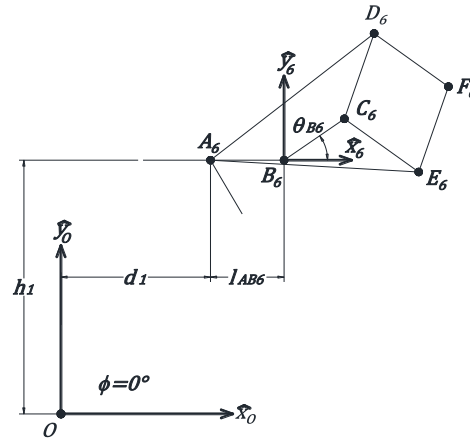


Fig. 5.24. Localización del sistema coordenado de la extremidad 6 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para movimiento recto.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_1 + l_{AB6} \\ 0 & 1 & 0 & h_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^6A_x & {}^6B_x & {}^6C_x & {}^6D_x & {}^6E_x & {}^6F_x \\ {}^6A_y & {}^6B_y & {}^6C_y & {}^6D_y & {}^6E_y & {}^6F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_6 \quad (5.12)$$

Ahora, como caso particular, se puede obtener las coordenadas de los puntos de cada extremidad cuando $\theta_B = 60^\circ$, $d_1 = 12.186$ unidades de longitud, $d_2 = 24.372$ unidades de longitud, $h_1 = 21.107$ unidades de longitud, y se aplican las ecuaciones y las longitudes propuestas de los eslabones que aparecen en la sección 3.3. Por lo tanto, las coordenadas de los puntos se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Coordenadas de los puntos de las 6 extremidades medidos desde el sistema coordenado global cuando $\theta_B = 60^\circ$ para el movimiento recto. (Continúa)

Extremidad	Coordenadas (unidades de longitud)					
i	A_i	B_i	C_i	D_i	E_i	F_i
1	$\begin{pmatrix} -12.186 \\ 21.107 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -18.186 \\ 21.107 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -21.186 \\ 15.9108 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -24.1353 \\ 9.0151 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -28.6326 \\ 16.8046 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -31.5818 \\ 9.9088 \\ 0 \end{pmatrix}$
2	$\begin{pmatrix} -24.372 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -30.372 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -33.372 \\ -5.1961 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -36.3213 \\ -12.0919 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -40.8186 \\ -4.3024 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -43.7678 \\ -11.1982 \\ 0 \end{pmatrix}$
3	$\begin{pmatrix} -12.186 \\ -21.107 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -18.186 \\ -21.107 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -21.186 \\ -26.3032 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -24.1353 \\ -33.1989 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -28.6326 \\ -25.4094 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -31.5818 \\ -32.3052 \\ 0 \end{pmatrix}$
4	$\begin{pmatrix} 12.186 \\ -21.107 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 18.186 \\ -21.107 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 21.186 \\ -15.9108 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 24.1353 \\ -9.0151 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 28.6326 \\ -16.8046 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 31.5818 \\ -9.9088 \\ 0 \end{pmatrix}$

5	$\begin{pmatrix} 24.372 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 30.372 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 33.372 \\ 5.1961 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 36.3213 \\ 12.0919 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 40.8186 \\ 4.3024 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 43.7678 \\ 11.1982 \\ 0 \end{pmatrix}$
6	$\begin{pmatrix} 12.186 \\ 21.107 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 18.186 \\ 21.107 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 21.186 \\ 26.3032 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 24.1353 \\ 33.1989 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 28.6326 \\ 25.4094 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 31.5818 \\ 32.3052 \\ 0 \end{pmatrix}$

5.4.2. Descripción Espacial en el Giro

La fig. 5.25 muestra el esquema general de cómo se encuentran orientados los puntos de cada extremidad con respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para el giro en torno al punto O .

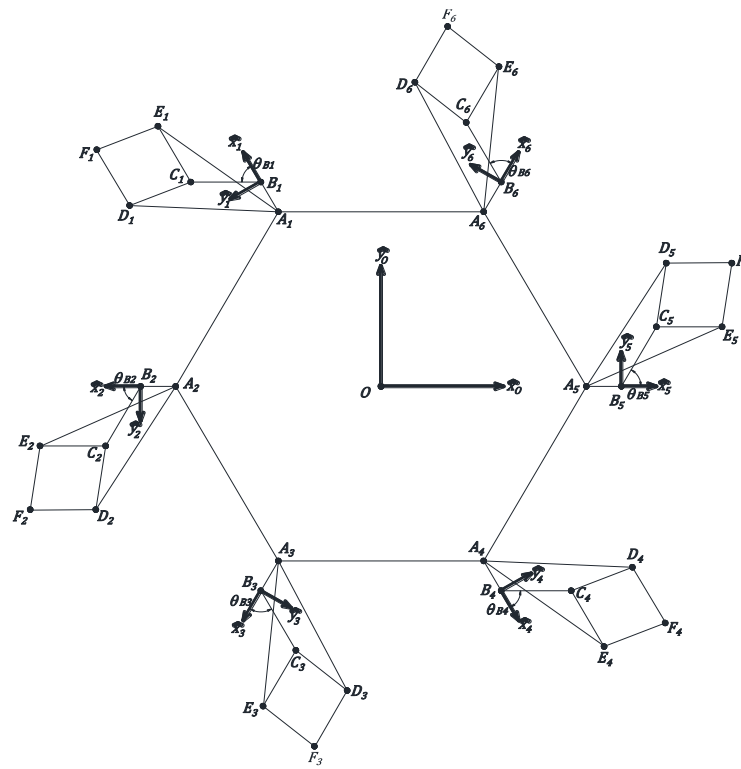


Fig. 5.25. Esquema general de los sistemas de coordenadas de cada extremidad y del sistema de coordenadas global para giro en torno al punto O .

Para determinar la localización del sistema coordenado de la *extremidad 1* se hace uso de la fig. 5.26.

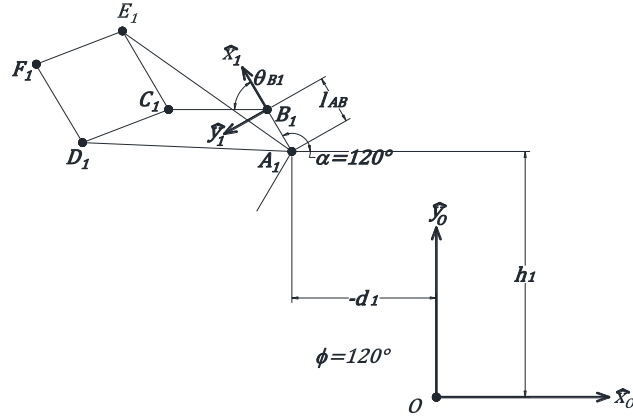


Fig. 5.26. Localización del sistema coordenado de la extremidad 1 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para giro.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} -0.5 & -0.866 & 0 & -d_1 + l_{AB1} \cos \alpha \\ 0.866 & -0.5 & 0 & h_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1A_x & {}^1B_x & {}^1C_x & {}^1D_x & {}^1E_x & {}^1F_x \\ {}^1A_y & {}^1B_y & {}^1C_y & {}^1D_y & {}^1E_y & {}^1F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_1 \quad (5.13)$$

Para la *extremidad 2* se hace uso de la fig. 5.27.

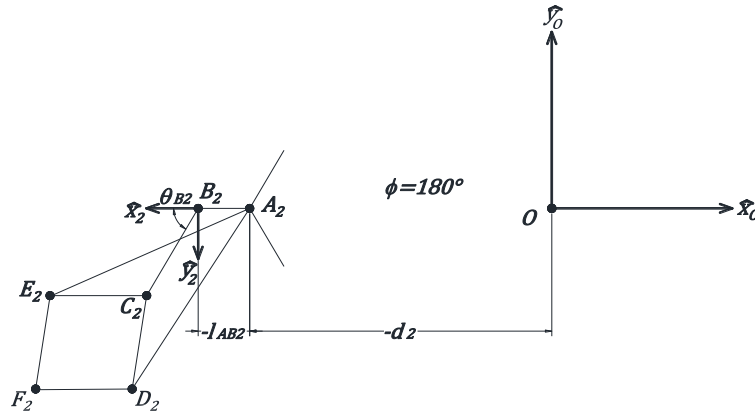


Fig. 5.27. Localización del sistema coordenado de la extremidad 2 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para giro.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -d_2 - l_{AB2} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^2A_x & {}^2B_x & {}^2C_x & {}^2D_x & {}^2E_x & {}^2F_x \\ {}^2A_y & {}^2B_y & {}^2C_y & {}^2D_y & {}^2E_y & {}^2F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_2 \quad (5.14)$$

Para la *extremidad 3* se hace uso de la fig. 5.28.

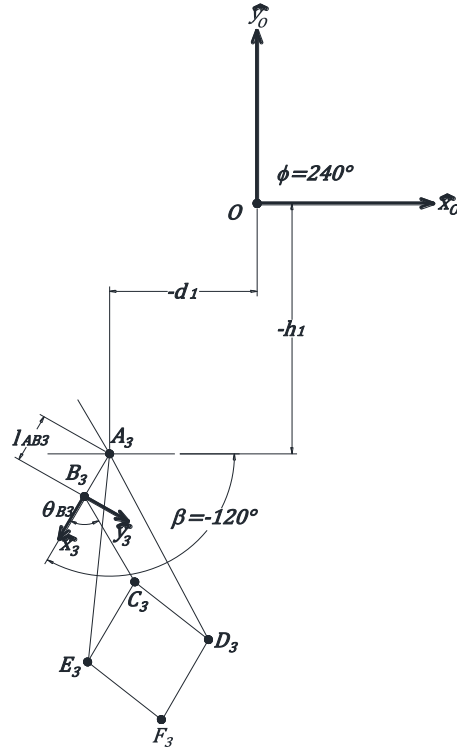


Fig. 5.28. Localización del sistema coordenado de la extremidad 3 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para giro.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_3 = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.866 & 0 & -d_1 + l_{AB3} \cos \beta \\ -0.866 & -0.5 & 0 & -h_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^3A_x & {}^3B_x & {}^3C_x & {}^3D_x & {}^3E_x & {}^3F_x \\ {}^3A_y & {}^3B_y & {}^3C_y & {}^3D_y & {}^3E_y & {}^3F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_3 \quad (5.15)$$

Para la *extremidad 4* se hace uso de la fig. 5.29.

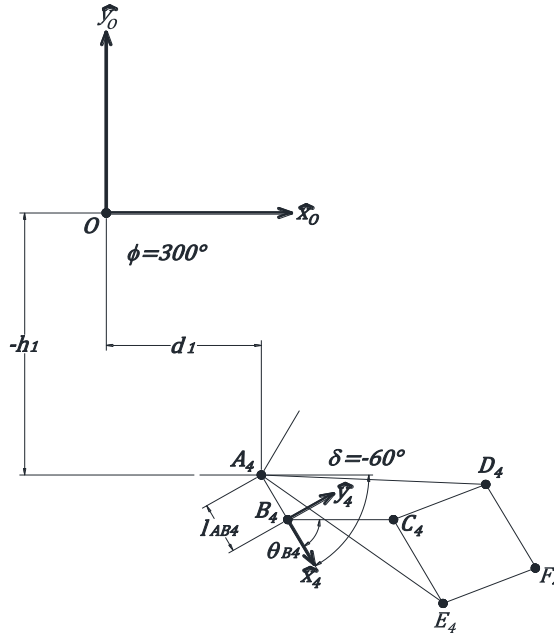


Fig. 5.29. Localización del sistema coordenado de la extremidad 4 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para giro.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.866 & 0 & d_1 + l_{AB4} \cos \delta \\ -0.866 & 0.5 & 0 & -h_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^4A_x & {}^4B_x & {}^4C_x & {}^4D_x & {}^4E_x & {}^4F_x \\ {}^4A_y & {}^4B_y & {}^4C_y & {}^4D_y & {}^4E_y & {}^4F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_4 \quad (5.16)$$

Para la *extremidad 5* se hace uso de la fig. 5.30.

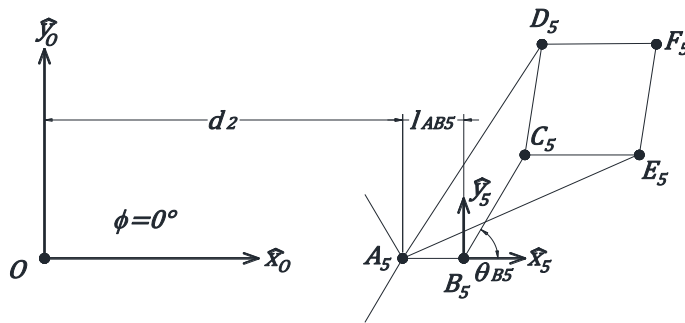


Fig. 5.30. Localización del sistema coordenado de la extremidad 5 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para giro.

Aplicando la Ec. (5.6), se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_2 + l_{AB5} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^5A_x & {}^5B_x & {}^5C_x & {}^5D_x & {}^5E_x & {}^5F_x \\ {}^5A_y & {}^5B_y & {}^5C_y & {}^5D_y & {}^5E_y & {}^5F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_5 \quad (5.17)$$

Por último, para la *extremidad 6* se hace uso de la fig. 5.31.

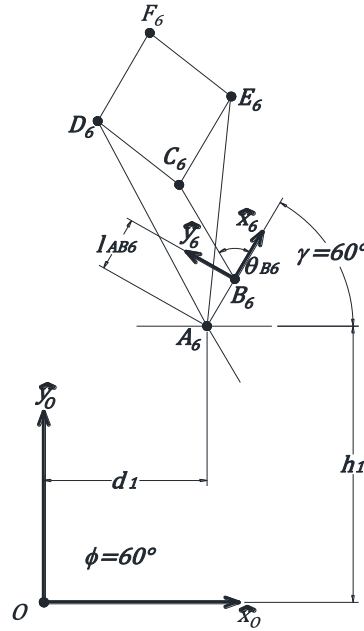


Fig. 5.31. Localización del sistema coordinado de la extremidad 6 respecto al sistema de coordenadas global $\hat{x}_0$ y $\hat{y}_0$ para giro.

Aplicando la Ec. 5.6, se tiene

$$\begin{bmatrix} {}^0A_x & {}^0B_x & {}^0C_x & {}^0D_x & {}^0E_x & {}^0F_x \\ {}^0A_y & {}^0B_y & {}^0C_y & {}^0D_y & {}^0E_y & {}^0F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_6 = \begin{bmatrix} 0.5 & -0.866 & 0 & d_1 + l_{AB6} \cos \gamma \\ 0.866 & 0.5 & 0 & h_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^6A_x & {}^6B_x & {}^6C_x & {}^6D_x & {}^6E_x & {}^6F_x \\ {}^6A_y & {}^6B_y & {}^6C_y & {}^6D_y & {}^6E_y & {}^6F_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_6 \quad (5.18)$$

Ahora, como caso particular, se puede obtener las coordenadas de los puntos de cada extremidad cuando $\theta_B = 60^\circ$, $d_1 = 11.726$ unidades de longitud, $d_2 = 23.451$ unidades de longitud, $h_1 = 20.309$ unidades de longitud, y se aplican las ecuaciones establecidas y las longitudes propuestas de los eslabones que aparecen en la sección 3.3. Por lo tanto, las coordenadas de los puntos se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Coordenadas de los puntos de las 6 extremidades medidos desde el sistema coordenado global cuando $\theta_B = 60^\circ$ para el giro.

Extremidad	Coordenadas (unidades de longitud)					
i	A_i	B_i	C_i	D_i	E_i	F_i
1	$\begin{pmatrix} -11.726 \\ 16.845 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -13.726 \\ 20.309 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -21.7258 \\ 20.309 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -28.7099 \\ 17.5758 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -25.5228 \\ 26.7766 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -32.5069 \\ 24.0434 \\ 0 \end{pmatrix}$
2	$\begin{pmatrix} -23.451 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -27.451 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -31.451 \\ -6.9282 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -32.5762 \\ -14.3433 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -38.9508 \\ -6.9826 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -40.076 \\ -14.3977 \\ 0 \end{pmatrix}$
3	$\begin{pmatrix} -11.726 \\ -16.845 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -13.726 \\ -20.309 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -9.7262 \\ -27.2371 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -3.8673 \\ -31.9191 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -13.429 \\ -33.7591 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -7.5701 \\ -38.4411 \\ 0 \end{pmatrix}$
4	$\begin{pmatrix} 11.726 \\ -16.845 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 13.726 \\ -20.309 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 21.7258 \\ -20.3089 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 28.7099 \\ -17.5758 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 25.5228 \\ -26.7766 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 32.5069 \\ -24.0434 \\ 0 \end{pmatrix}$
5	$\begin{pmatrix} 23.451 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 27.451 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 31.451 \\ 6.9282 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 32.5762 \\ 14.3433 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 38.9508 \\ 6.9826 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 40.076 \\ 14.3977 \\ 0 \end{pmatrix}$
6	$\begin{pmatrix} 11.726 \\ 16.845 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 13.726 \\ 20.309 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 9.7262 \\ 27.2371 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.8673 \\ 31.9191 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 13.429 \\ 33.7591 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 7.5701 \\ 38.4411 \\ 0 \end{pmatrix}$

CAPÍTULO 6. GENERACIÓN DE LA TRAYECTORIA DE MOVIMIENTO DEL ROBOT LUNAbot W6 VJ1.0[©]

6.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo aborda la metodología de trayectoria que deben seguir las extremidades del LUNAbot W6 VJ1.0[©] para que éste pueda desplazarse tanto en línea recta hacia adelante y hacia atrás, como para realizar giros hacia la derecha o izquierda sobre su propio centro geométrico.

6.2. MÉTODO PARA EL DESPLAZAMIENTO RECTO DEL ROBOT

Este método permite desplazar el robot LUNAbot W6 VJ1.0[©] en una trayectoria recta, esto se logra al tener en todas las extremidades la longitud de L_{AB} y L_{BC} iguales, para cada una de las seis patas; el desplazamiento con una trayectoria recta se realiza, para este caso, con 2 diferentes configuraciones. Este desplazamiento se puede realizar en los siguientes casos:

- a) Desplazamiento hacia adelante.
- b) Desplazamiento hacia atrás.

A continuación se describen dichos casos.

6.2.1. Desplazamiento hacia Adelante

En la tabla 6.1, se muestran y se describen los pasos que se deben seguir para poder lograr el desplazamiento recto hacia adelante.

La nomenclatura que se presentan en las figuras de las tablas es la siguiente:

-  Actuador activado
-  Actuador desactivado
-  Actuador sube
-  Actuador baja
-  Actuador gira en sentido antihorario (positivo)
-  Actuador gira en sentido horario (negativo)

Tabla 6.1. Metodología para el movimiento en línea recta hacia adelante. (Continúa)

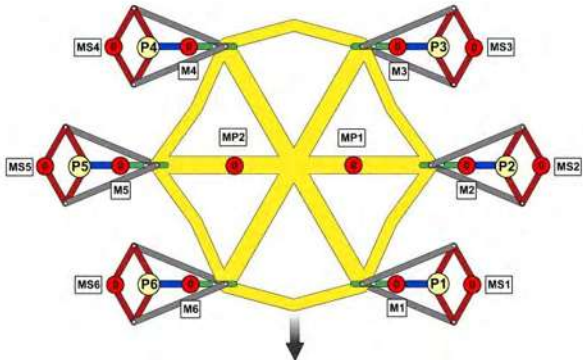
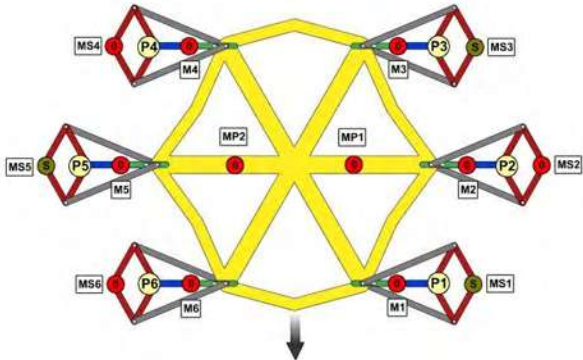
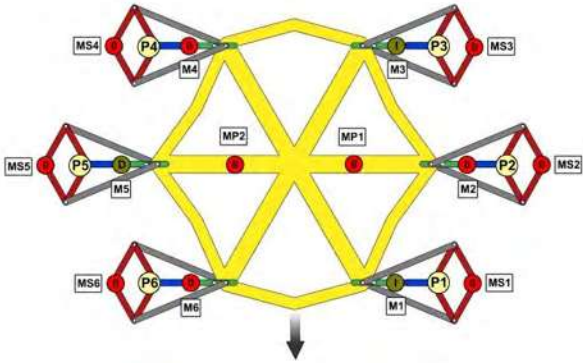
PROCEDIMIENTO DE DESPLAZAMIENTO RECTO-ADELANTE		
El robot LUNAbot W6 VJ1.0 puede presentar cualquier postura en cada una de sus extremidades.		
PASO 1		
Acción 1	Todos los pies deben de estar apoyados en el terreno.	
PASO 2		
Acción 2	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 3	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 4	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 3		
Acción 5	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B mín$, activando el motor M1 .	
Acción 6	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B mín$, activando el motor M3 .	
Acción 7	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B máx$, activando el motor M5 .	

Tabla 6.1. Metodología para el movimiento en línea recta hacia adelante. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE DESPLAZAMIENTO RECTO-ADELANTE		
PASO 4		
Acción 8	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 9	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 10	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 5		
Acción 11	Subir pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 12	Subir pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 13	Subir pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 6		
Acción 14	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M1 .	
Acción 15	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M2 .	
Acción 16	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M3 .	
Acción 17	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M4 .	
Acción 18	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M5 .	
Acción 19	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M6 .	

Tabla 6.1. Metodología para el movimiento en línea recta hacia adelante. (Continuación)

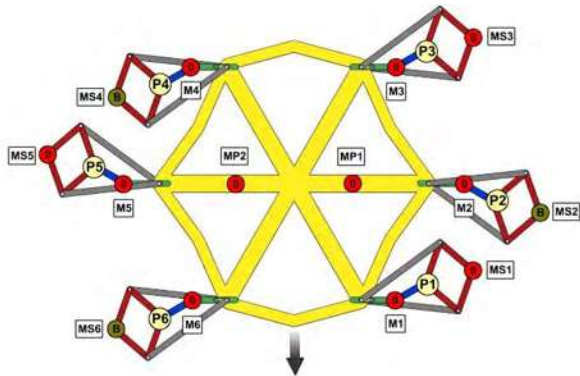
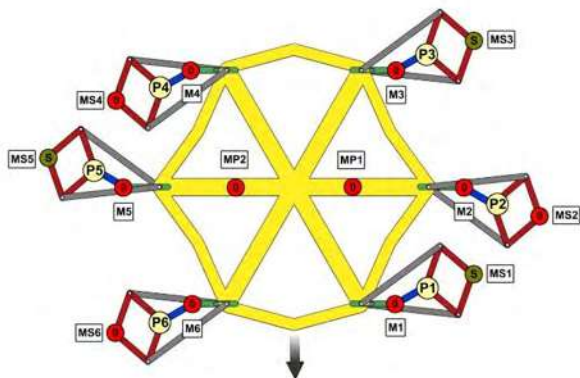
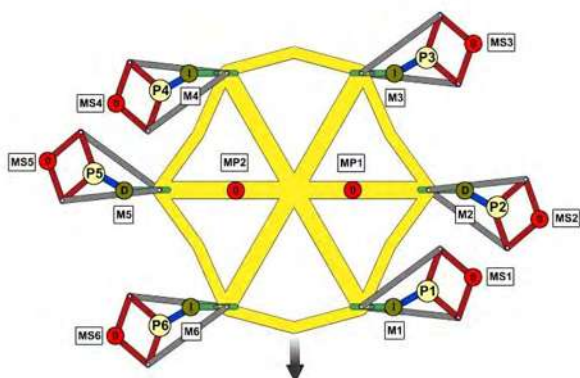
PROCEDIMIENTO DE DESPLAZAMIENTO RECTO-ADELANTE		
PASO 7		
Acción 20	Bajar pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 21	Bajar pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 22	Bajar pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 8		
Acción 23	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 24	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 25	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 9		
Acción 26	Girar la pierna P1 hasta $\theta_{B \text{ mín}}$, activando el motor M1 .	
Acción 27	Girar la pierna P2 hasta $\theta_{B \text{ máx}}$, activando el motor M2 .	
Acción 28	Girar la pierna P3 hasta $\theta_{B \text{ mín}}$, activando el motor M3 .	
Acción 29	Girar la pierna P4 hasta $\theta_{B \text{ mín}}$, activando el motor M4 .	
Acción 30	Girar la pierna P5 hasta $\theta_{B \text{ máx}}$, activando el motor M5 .	
Acción 31	Girar la pierna P6 hasta $\theta_{B \text{ mín}}$, activando el motor M6 .	

Tabla 6.1. Metodología para el movimiento en línea recta hacia adelante. (Continuación)

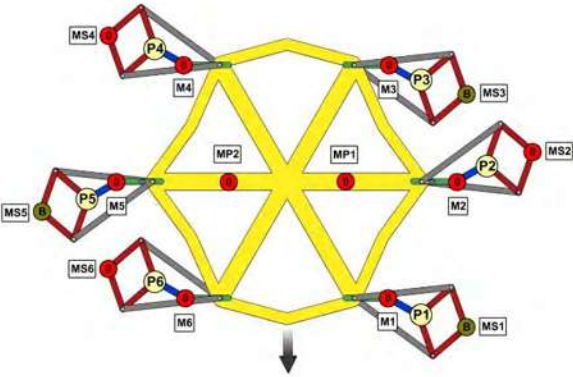
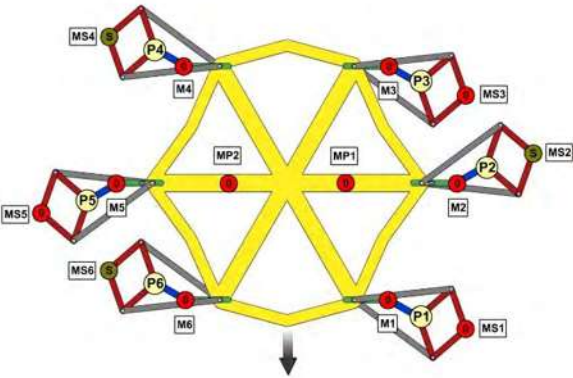
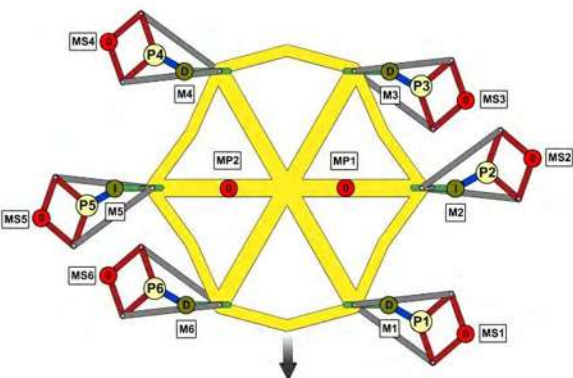
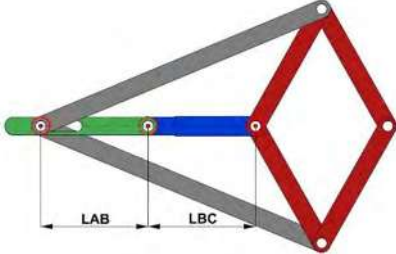
PROCEDIMIENTO DE DESPLAZAMIENTO RECTO-ADELANTE		
PASO 10		
Acción 32	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 33	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 34	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 11		
Acción 35	Subir pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 36	Subir pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 37	Subir pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 12		
Acción 38	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M1 .	
Acción 39	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M2 .	
Acción 40	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M3 .	
Acción 41	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M4 .	
Acción 42	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M5 .	
Acción 43	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M6 .	

Tabla 6.1. Metodología para el movimiento en línea recta hacia adelante. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE DESPLAZAMIENTO RECTO-ADELANTE	
PASO 13	
A partir de este paso se repite la metodología del paso 7 al paso 12.	
OBSERVACIÓN	
En todos los pasos se debe verificar que en todas las extremidades se cumpla que: $L_{AB} = L_{BC}$	
	

6.2.2. Desplazamiento hacia Atrás

Ahora, se mostrará cuál es la metodología o pasos que se debe seguir para que el robot pueda realizar un movimiento recto hacia atrás.

En la tabla 6.2, se muestran y se describen los pasos que se deben seguir para poder lograr el desplazamiento mencionado en el párrafo anterior.

Tabla 6.2. Metodología para el movimiento en línea recta hacia atrás. (Continúa)

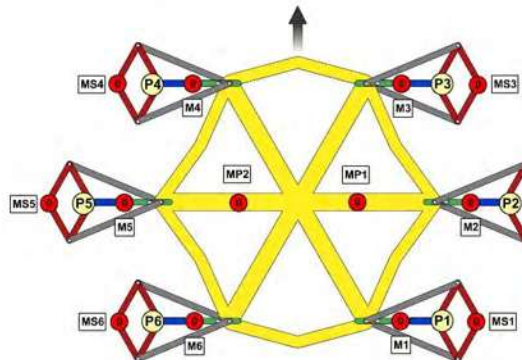
PROCEDIMIENTO DE DESPLAZAMIENTO RECTO-ATRÁS		
El robot LUNAbot W6 VJ1.0 puede presentar cualquier postura en cada una de sus extremidades.		
PASO 1		
Acción 1	Todos los pies deben de estar apoyados en el terreno.	

Tabla 6.2. Metodología para el movimiento en línea recta hacia atrás. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE DESPLAZAMIENTO RECTO-ATRÁS		
PASO 2		
Acción 2	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 3	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 4	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 3		
Acción 5	Girar la pierna P1 hasta $\theta_{B\text{ máx}}$, activando el motor M1 .	
Acción 6	Girar la pierna P3 hasta $\theta_{B\text{ máx}}$, activando el motor M3 .	
Acción 7	Girar la pierna P5 hasta $\theta_{B\text{ mín}}$, activando el motor M5 .	
PASO 4		
Acción 8	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 9	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 10	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	

Tabla 6.2. Metodología para el movimiento en línea recta hacia atrás. (Continuación)

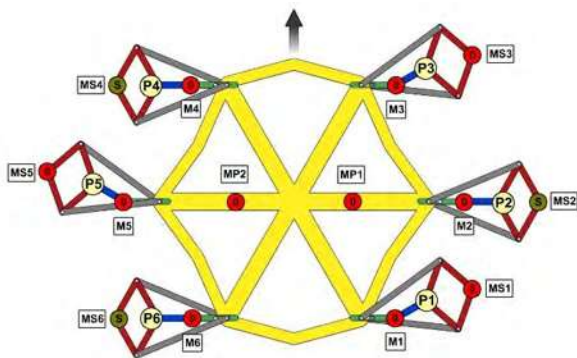
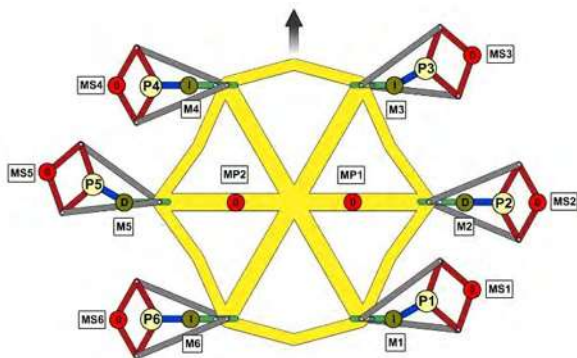
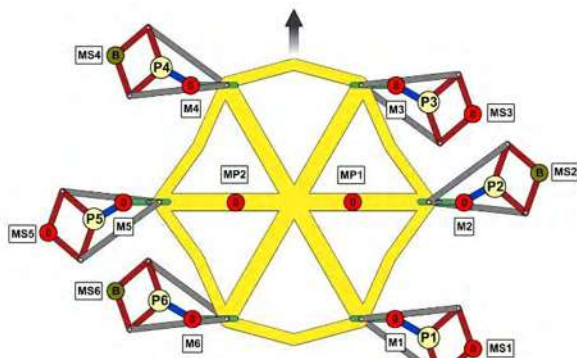
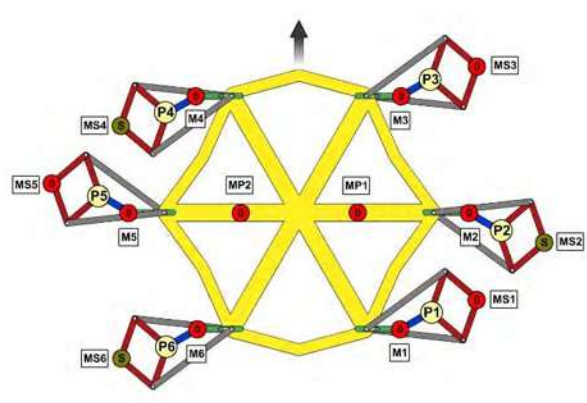
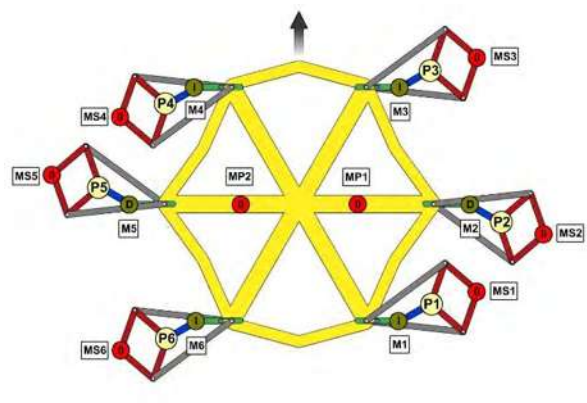
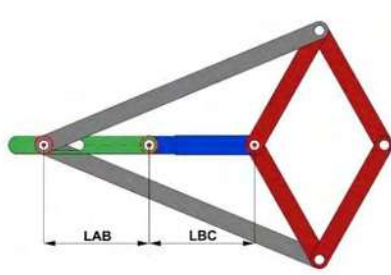
PROCEDIMIENTO DE DESPLAZAMIENTO RECTO-ATRÁS		
PASO 5		
Acción 11	Subir pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 12	Subir pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 13	Subir pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 6		
Acción 14	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M1 .	
Acción 15	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M2 .	
Acción 16	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M3 .	
Acción 17	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M4 .	
Acción 18	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M5 .	
Acción 19	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M6 .	
PASO 7		
Acción 20	Bajar pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 21	Bajar pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 22	Bajar pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	

Tabla 6.2. Metodología para el movimiento en línea recta hacia atrás. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE DESPLAZAMIENTO RECTO-ATRÁS		
PASO 8		
Acción 23	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 24	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 25	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 9		
Acción 26	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M1 .	
Acción 27	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M2 .	
Acción 28	Girar la pierna P3 en hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M3 .	
Acción 29	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M4 .	
Acción 30	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M5 .	
Acción 31	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M6 .	
PASO 10		
Acción 32	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 33	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 34	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	

Tabla 6.2. Metodología para el movimiento en línea recta hacia atrás. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE DESPLAZAMIENTO RECTO-ATRÁS		
PASO 11		
Acción 35	Subir pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 36	Subir pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 37	Subir pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 12		
Acción 38	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M1 .	
Acción 39	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M2 .	
Acción 40	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M3 .	
Acción 41	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M4 .	
Acción 42	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M5 .	
Acción 43	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M6 .	
PASO 13		
A partir de este paso se repite la metodología del paso 7 al paso 12.		
OBSERVACIÓN		
En todos los pasos se debe verificar que en todas las extremidades se cumpla que: $L_{AB} = L_{BC}$		
		

6.3. MÉTODO PARA EL GIRO SOBRE EL CENTRO GEOMÉTRICO DEL ROBOT

Este método permite girar el robot LUNAbot W6 VJ1.0[®] sobre su propio centro geométrico, esto se logra al tener en todas las extremidades la longitud de L_{AB} y L_{BC} desiguales; es decir, la longitud de L_{AB} debe ser menor que la de L_{BC} , pero se debe cumplir que $L_{AB} + L_{BC} = cte$, para cada una de las seis patas. El giro sobre el centro geométrico del robot se realiza, para este caso, con 2 diferentes configuraciones. Este movimiento giratorio se puede realizar en los siguientes casos:

- a) Giro en sentido horario (hacia la izquierda).
- b) Giro en sentido antihorario (hacia la derecha).

A continuación se describen dichos casos.

6.3.1. Giro en Sentido Horario

En la tabla 6.3, se muestran y se describen los pasos que se deben seguir para poder lograr el giro sobre el centro geométrico del robot en sentido horario.

Tabla 6.3. Metodología para el movimiento de giro en sentido horario. (Continúa)

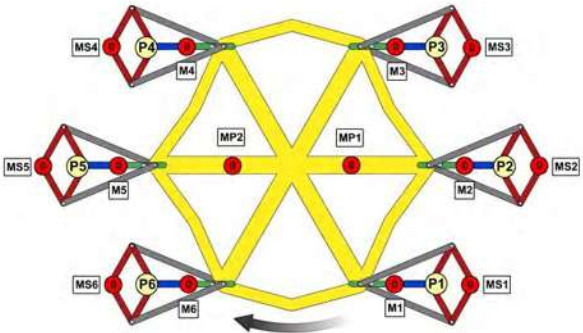
PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-HORARIO		
El robot LUNAbot W6 VJ1.0 puede presentar cualquier postura en cada una de sus extremidades.		
PASO 1		
Acción 1	Todos los pies deben de estar apoyados en el terreno.	

Tabla 6.3. Metodología para el movimiento de giro en sentido horario. (Continuación)

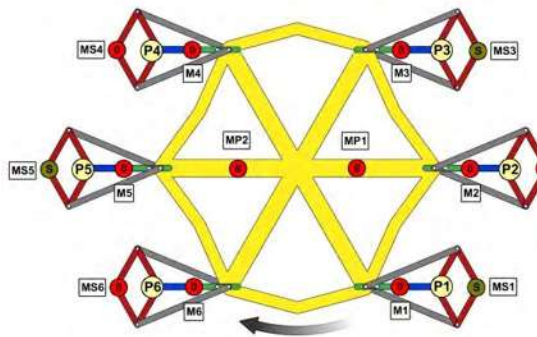
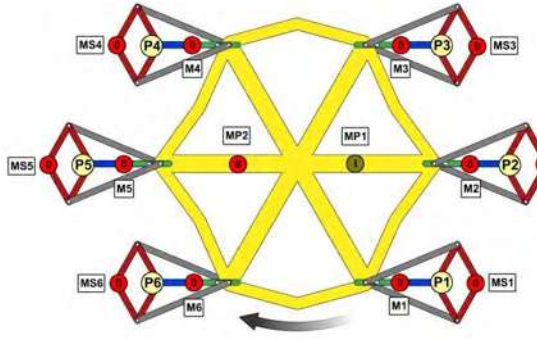
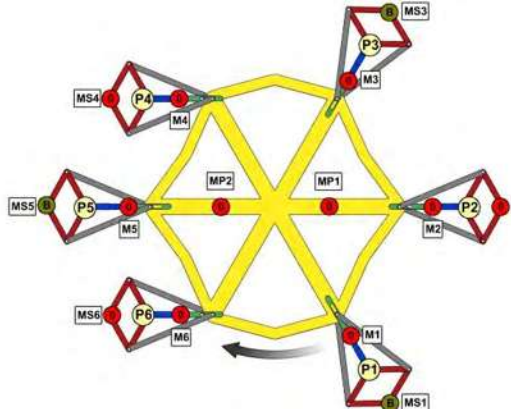
PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-HORARIO		
PASO 2		
Acción 2	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 3	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 4	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 3		
Acción 5	Orientar las piernas P1 , P3 y P5 , activando y girando en sentido horario el motor MP1 .	
PASO 4		
Acción 6	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 7	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 8	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	

Tabla 6.3. Metodología para el movimiento de giro en sentido horario. (Continuación)

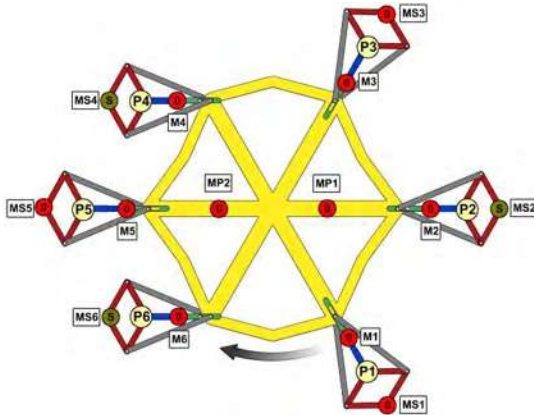
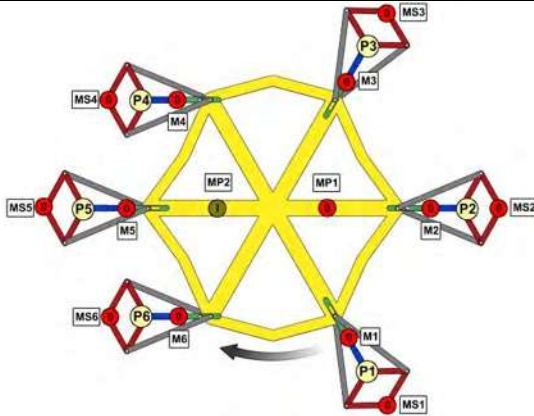
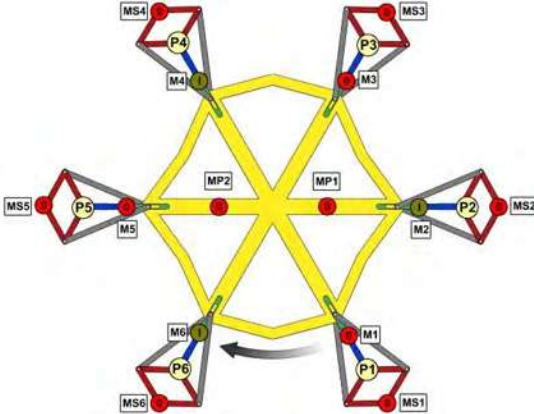
PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-HORARIO		
PASO 5		
Acción 9	Subir pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 10	Subir pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 11	Subir pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 6		
Acción 12	Orientar las piernas P2 , P4 y P6 , activando y girando en sentido horario el motor MP2 .	
PASO 7		
Acción 13	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor MS2 .	
Acción 14	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor MS4 .	
Acción 15	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor MS6 .	

Tabla 6.3. Metodología para el movimiento de giro en sentido horario. (Continuación)

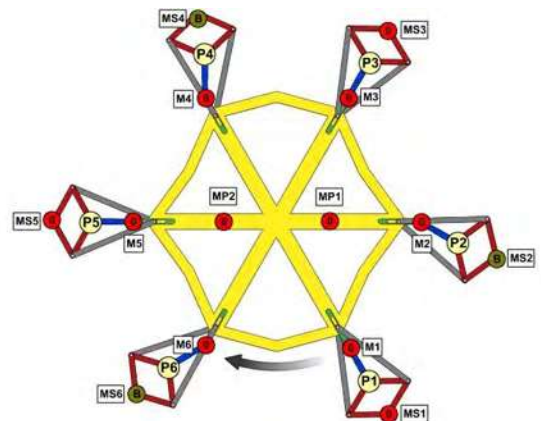
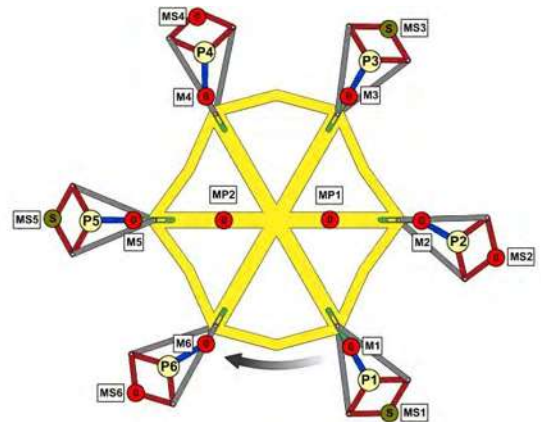
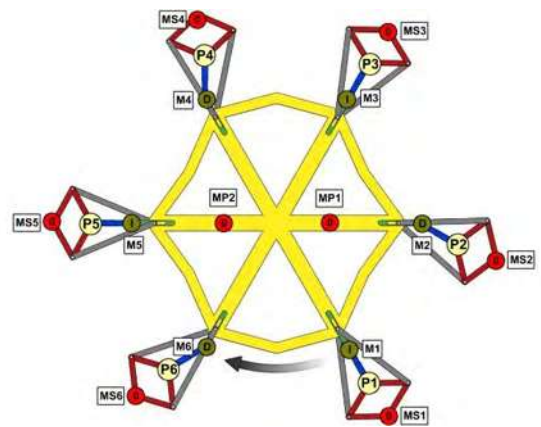
PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-HORARIO		
PASO 8		
Acción 16	Bajar pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 17	Bajar pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 18	Bajar pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 9		
Acción 19	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 20	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 21	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 10		
Acción 22	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B \text{ mín.}$, activando el motor M1 .	
Acción 23	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ máx.}$, activando el motor M2 .	
Acción 24	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B \text{ mín.}$, activando el motor M3 .	
Acción 25	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ máx.}$, activando el motor M4 .	
Acción 26	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B \text{ mín.}$, activando el motor M5 .	
Acción 27	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ máx.}$, activando el motor M6 .	

Tabla 6.3. Metodología para el movimiento de giro en sentido horario. (Continuación)

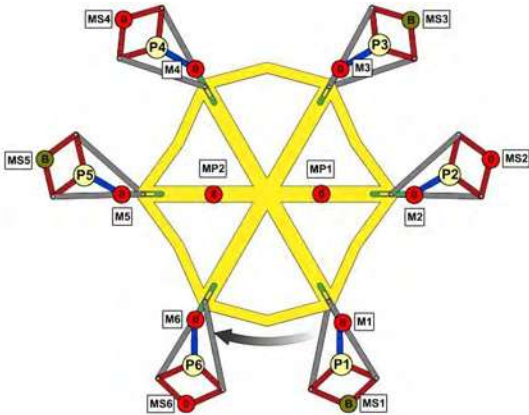
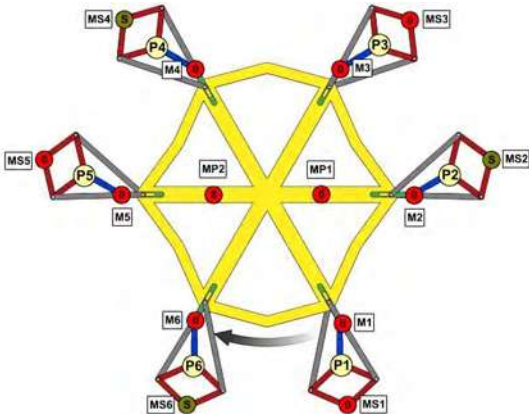
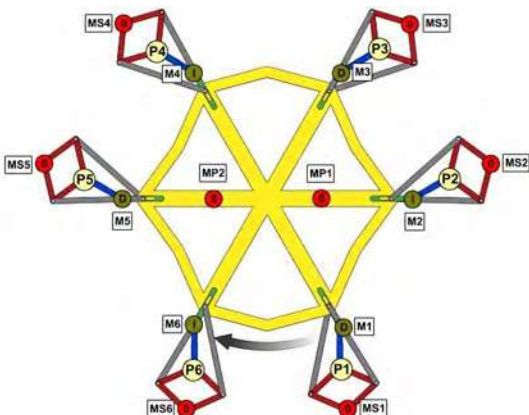
PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-HORARIO		
PASO 11		
Acción 28	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 29	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 30	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 12		
Acción 31	Subir pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 32	Subir pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 33	Subir pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 13		
Acción 34	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M1 .	
Acción 35	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M2 .	
Acción 36	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M3 .	
Acción 37	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M4 .	
Acción 38	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M5 .	
Acción 39	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M6 .	

Tabla 6.3. Metodología para el movimiento de giro en sentido horario. (Continuación)

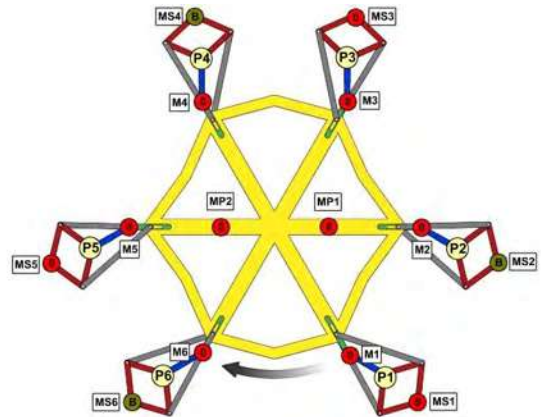
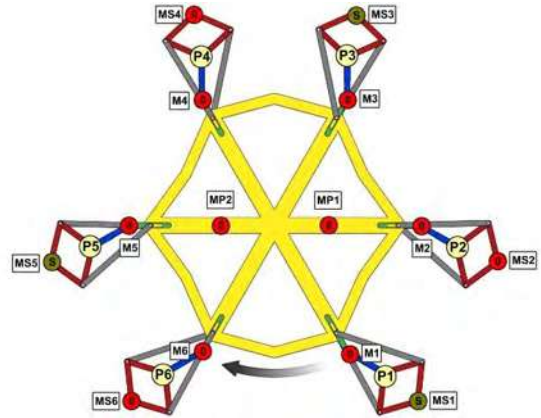
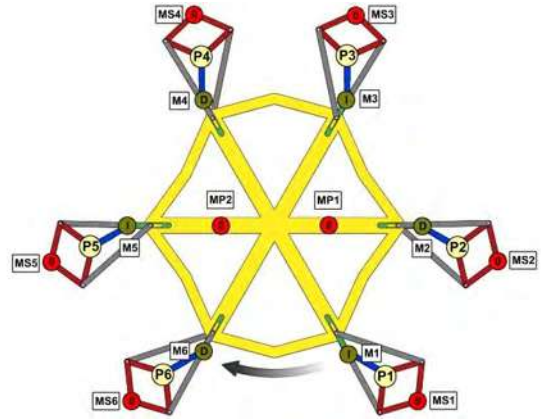
PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-HORARIO		
PASO 14		
Acción 40	Bajar pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 41	Bajar pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 42	Bajar pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 15		
Acción 43	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 44	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 45	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 16		
Acción 46	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M1 .	
Acción 47	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M2 .	
Acción 48	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M3 .	
Acción 49	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M4 .	
Acción 50	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M5 .	
Acción 51	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M6 .	

Tabla 6.3. Metodología para el movimiento de giro en sentido horario. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-HORARIO	
PASO 17	
A partir de este paso se repite la metodología del paso 11 al paso 16.	
OBSERVACIÓN	
A partir del paso 7 se debe verificar que en todas las extremidades se cumpla que: $L_{AB} < L_{BC}$ y $L_{AB} + L_{BC} = cte$	

6.3.2. Giro en Sentido Antihorario

En la tabla 6.4, se muestran y se describen los pasos que se deben seguir para poder lograr el giro sobre el centro geométrico del robot en sentido antihorario.

Tabla 6.4. Metodología para el movimiento de giro en sentido antihorario. (Continúa)

PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-ANTIHORARIO		
El robot LUNAbot W6 VJ1.0 puede presentar cualquier postura en cada una de sus extremidades.		
PASO 1		
Acción 1	Todos los pies deben de estar apoyados en el terreno.	

Tabla 6.4. Metodología para el movimiento de giro en sentido antihorario. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-ANTIHORARIO		
PASO 2		
Acción 2	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 3	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 4	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 3		
Acción 5	Orientar las piernas P1 , P3 y P5 , activando y girando en sentido horario el motor MP1 .	
PASO 4		
Acción 6	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 7	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 8	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	

Tabla 6.4. Metodología para el movimiento de giro en sentido antihorario. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-ANTIHORARIO		
PASO 5		
Acción 9	Subir pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 10	Subir pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 11	Subir pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 6		
Acción 12	Orientar las piernas P2 , P4 y P6 , activando y girando en sentido horario el motor MP2 .	
PASO 7		
Acción 13	Girar la pierna P2 hasta $\theta_{B\text{ máx}}$, activando el motor MS2 .	
Acción 14	Girar la pierna P4 hasta $\theta_{B\text{ máx}}$, activando el motor MS4 .	
Acción 15	Girar la pierna P6 hasta $\theta_{B\text{ máx}}$, activando el motor MS6 .	

Tabla 6.4. Metodología para el movimiento de giro en sentido antihorario. (Continuación)

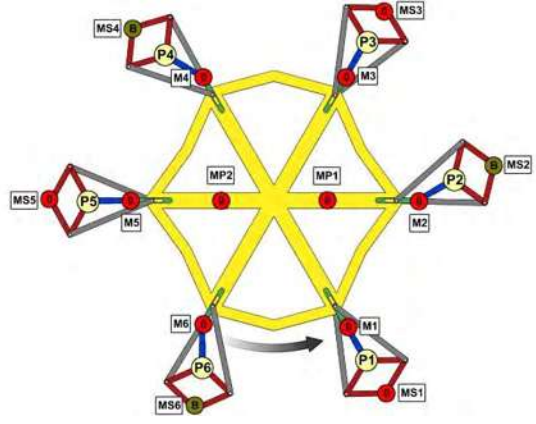
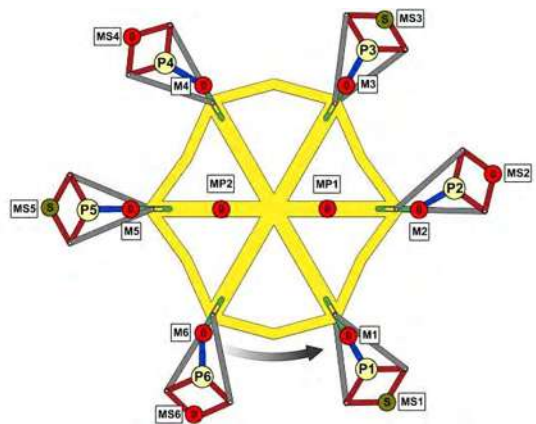
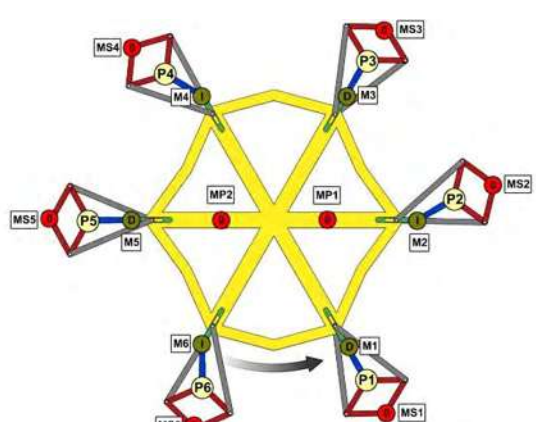
PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-ANTIHORARIO		
PASO 8		
Acción 16	Bajar pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 17	Bajar pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 18	Bajar pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 9		
Acción 19	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 20	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 21	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 10		
Acción 22	Girar la pierna P1 hasta $\theta_{B\text{ máx}}$, activando el motor M1 .	
Acción 23	Girar la pierna P2 hasta $\theta_{B\text{ mín}}$, activando el motor M2 .	
Acción 24	Girar la pierna P3 hasta $\theta_{B\text{ máx}}$, activando el motor M3 .	
Acción 25	Girar la pierna P4 hasta $\theta_{B\text{ mín}}$, activando el motor M4 .	
Acción 26	Girar la pierna P5 hasta $\theta_{B\text{ máx}}$, activando el motor M5 .	
Acción 27	Girar la pierna P6 hasta $\theta_{B\text{ mín}}$, activando el motor M6 .	

Tabla 6.4. Metodología para el movimiento de giro en sentido antihorario. (Continuación)

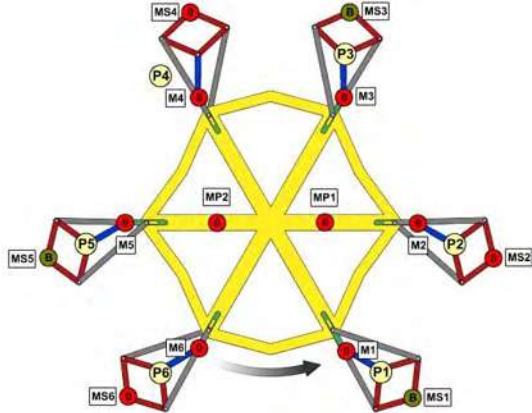
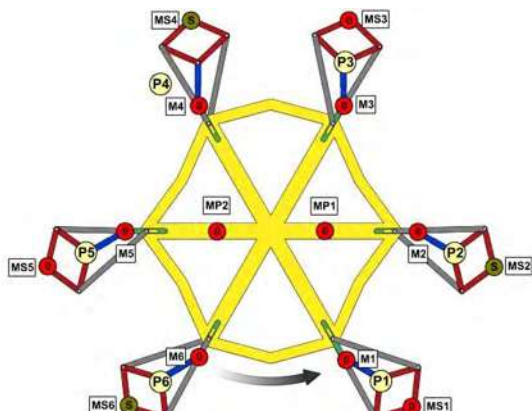
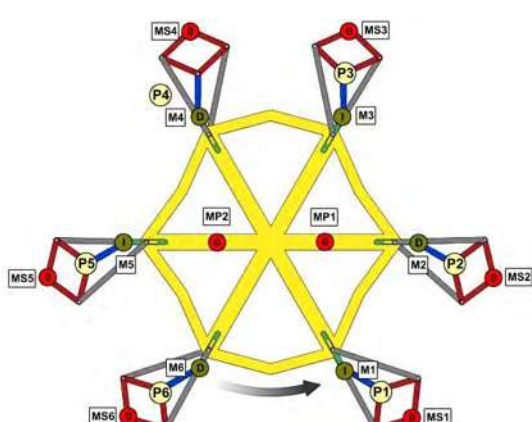
PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-ANTIHORARIO		
PASO 11		
Acción 28	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 29	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 30	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 12		
Acción 31	Subir pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 32	Subir pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 33	Subir pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 13		
Acción 34	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M1 .	
Acción 35	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M2 .	
Acción 36	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M3 .	
Acción 37	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M4 .	
Acción 38	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M5 .	
Acción 39	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M6 .	

Tabla 6.4. Metodología para el movimiento de giro en sentido antihorario. (Continuación)

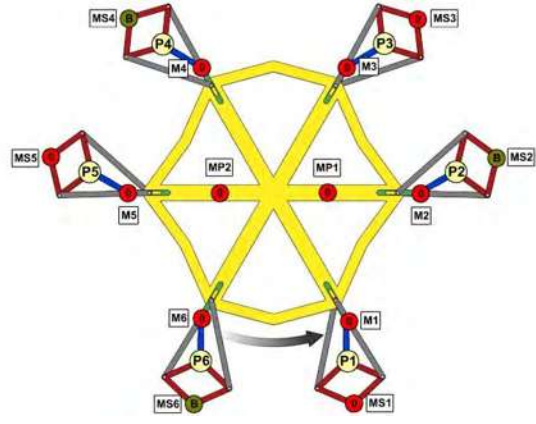
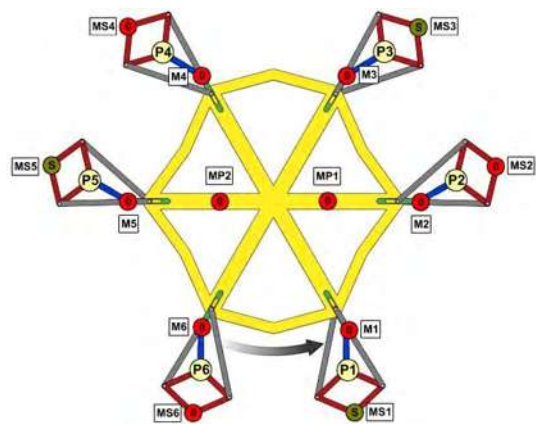
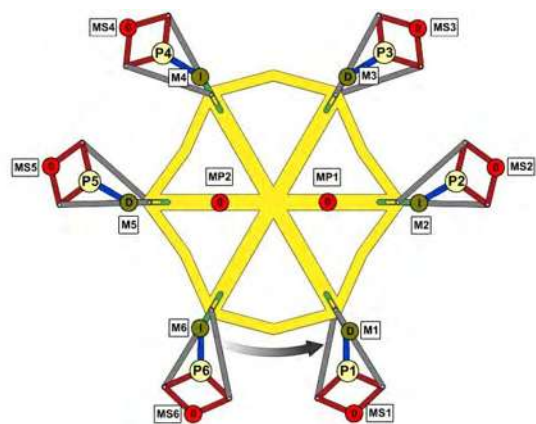
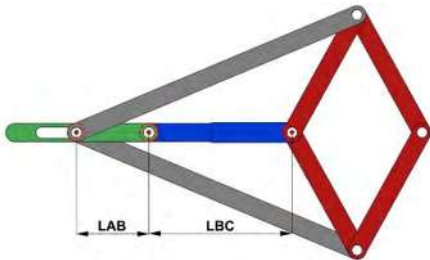
PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-ANTIHORARIO		
PASO 14		
Acción 40	Bajar pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 41	Bajar pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 42	Bajar pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	
PASO 15		
Acción 43	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 44	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 45	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 16		
Acción 46	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M1 .	
Acción 47	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M2 .	
Acción 48	Girar la pierna P3 en hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M3 .	
Acción 49	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M4 .	
Acción 50	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B \text{ máx}$, activando el motor M5 .	
Acción 51	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B \text{ mín}$, activando el motor M6 .	

Tabla 6.4. Metodología para el movimiento de giro en sentido antihorario. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE GIRO-SENTIDO-ANTIHORARIO
PASO 17
A partir de este paso se repite la metodología del paso 11 al paso 16.
OBSERVACIÓN
A partir del paso 7 se debe verificar que en todas las extremidades se cumpla que: $L_{AB} < L_{BC}$ y $L_{AB} + L_{BC} = cte$


6.4. MÉTODO PARA DETENER EL ROBOT

Este método permite detener por completo el movimiento del LUNAbot W6 VJ1.0® y dejarlo en una posición neutral; es decir, dejar listo el robot para que pueda iniciar cualquier tipo de movimiento sin que importe cual haya sido su último movimiento.

Se pueden presentar dos casos de detención en los que se puede encontrar el robot, estos son:

- Detención en desplazamiento recto.
- Detención en movimiento giratorio.

A continuación se describen dichos casos.

6.4.1. Detención en Desplazamiento Recto

En la tabla 6.5, se muestran y se describen los pasos que se deben seguir para poder lograr detener el robot en el desplazamiento recto, ya sea hacia adelante o hacia atrás.

Tabla 6.5. Metodología para la detención del robot en el desplazamiento recto. (Continúa)

PROCEDIMIENTO DE DETENCIÓN EN DESPLAZAMIENTO RECTO		
El robot LUNAbot W6 VJ1.0 puede presentar cualquier postura en cada una de sus extremidades.		
PASO 1		
Acción 1	Los pies de las piernas P1 , P3 y P5 se encuentran apoyados en el terreno, los pies de las piernas P2 , P3 y P6 se encuentran levantados y todas las piernas se encuentran en diferente posición.	
PASO 2		
Acción 2	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M2 .	
Acción 3	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M4 .	
Acción 4	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M6 .	
PASO 3		
Acción 5	Bajar pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 6	Bajar pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 7	Bajar pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	

Tabla 6.5. Metodología para la detención del robot en el desplazamiento recto. (Continuación)

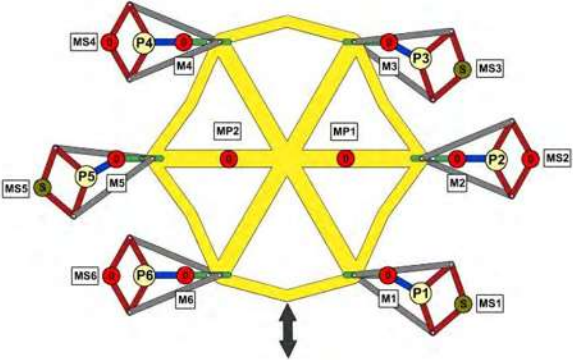
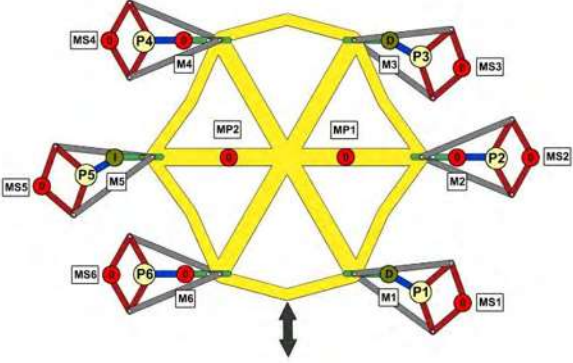
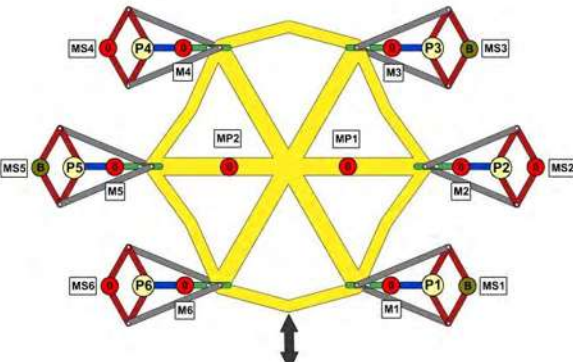
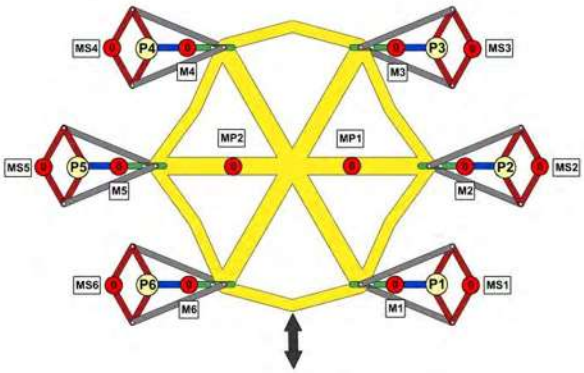
PROCEDIMIENTO DE DETENCIÓN EN DESPLAZAMIENTO RECTO		
PASO 4		
Acción 8	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 9	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 10	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 5		
Acción 11	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M1 .	
Acción 12	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M3 .	
Acción 13	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M5 .	
PASO 6		
Acción 14	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 15	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 16	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	

Tabla 6.5. Metodología para la detención del robot en el desplazamiento recto. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE DETENCIÓN EN DESPLAZAMIENTO RECTO		
PASO 7		
Acción 17	Todos los pies deben de estar apoyados en el terreno.	

6.4.2. Detención en Movimiento Giratorio

Ahora, para terminar con este capítulo, en la tabla 6.6, se muestran y se describen los pasos que se deben seguir para poder lograr detener el robot en el movimiento giratorio, ya sea hacia en sentido horario o en sentido antihorario.

Tabla 6.6. Metodología para la detención del robot en el movimiento giratorio. (Continúa)

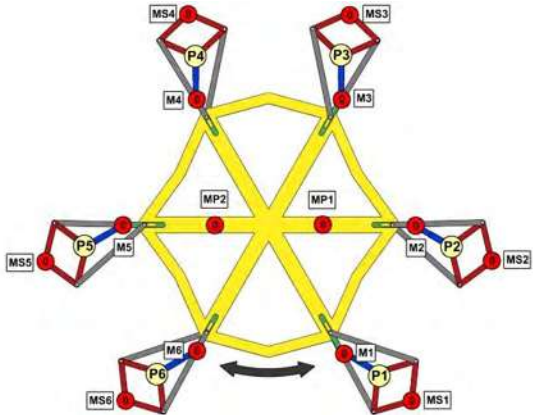
PROCEDIMIENTO DE DETENCIÓN EN MOVIMIENTO GIRATORIO		
El robot LUNAbot W6 VJ1.0 puede presentar cualquier postura en cada una de sus extremidades.		
PASO 1		
Acción 1	Los pies de las piernas P1 , P3 y P5 se encuentran levantados, los pies de las piernas P2 , P3 y P6 se encuentran apoyados en el terreno y todas las piernas se encuentran en diferente posición	

Tabla 6.6. Metodología para la detención del robot en el movimiento giratorio. (Continuación)

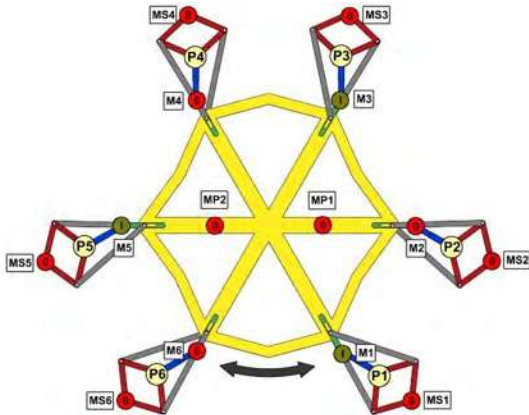
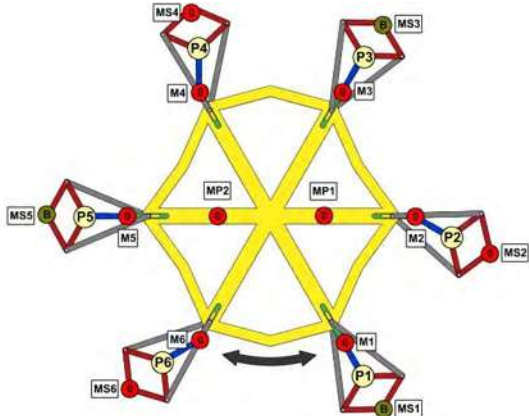
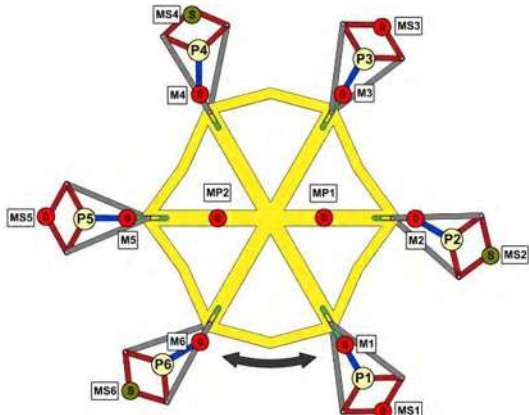
PROCEDIMIENTO DE DETENCIÓN EN MOVIMIENTO GIRATORIO		
PASO 2		
Acción 2	Girar la pierna P1 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M1 .	
Acción 3	Girar la pierna P3 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M3 .	
Acción 4	Girar la pierna P5 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M5 .	
PASO 3		
Acción 5	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 4	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 6	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 4		
Acción 7	Subir pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 8	Subir pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 9	Subir pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	

Tabla 6.6. Metodología para la detención del robot en el movimiento giratorio. (Continuación)

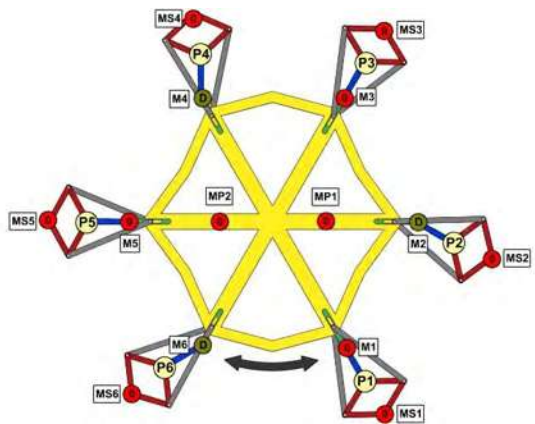
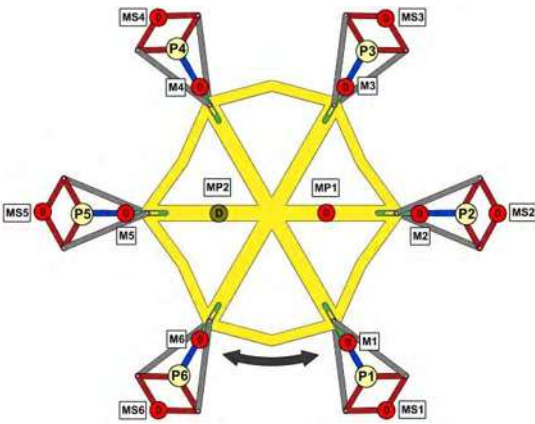
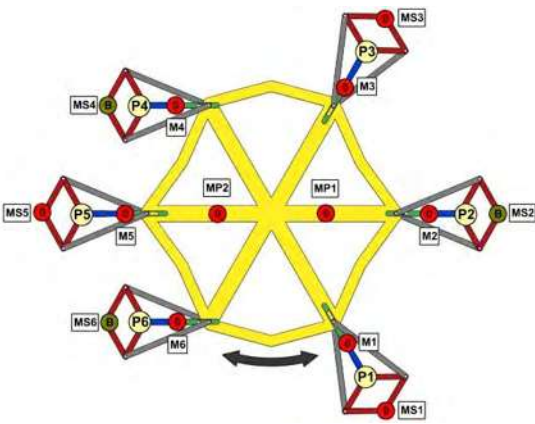
PROCEDIMIENTO DE DETENCIÓN EN MOVIMIENTO GIRATORIO		
PASO 5		
Acción 10	Girar la pierna P2 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M2 .	
Acción 11	Girar la pierna P4 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M4 .	
Acción 12	Girar la pierna P6 hasta $\theta_B = 0^\circ$, activando el motor M6 .	
PASO 6		
Acción 13	Orientar las piernas P2 , P4 y P6 , activando y girando en sentido antihorario el motor MP2 .	
PASO 7		
Acción 14	Bajar pie de la pierna P2 , activando el motor MS2 .	
Acción 15	Bajar pie de la pierna P4 , activando el motor MS4 .	
Acción 16	Bajar pie de la pierna P6 , activando el motor MS6 .	

Tabla 6.6. Metodología para la detención del robot en el movimiento giratorio. (Continuación)

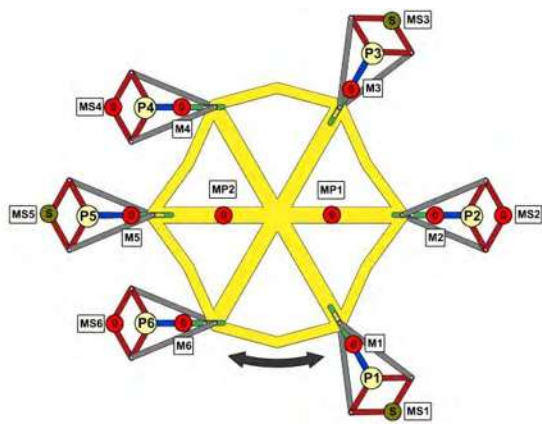
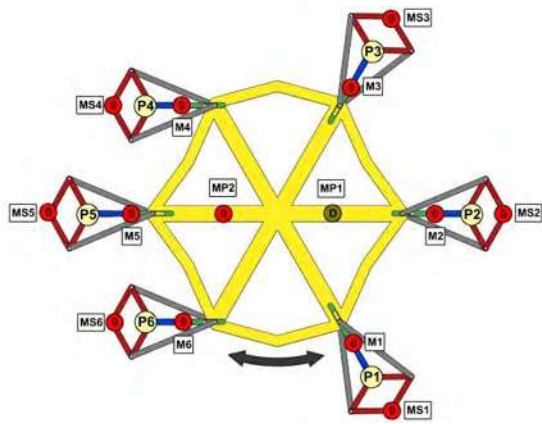
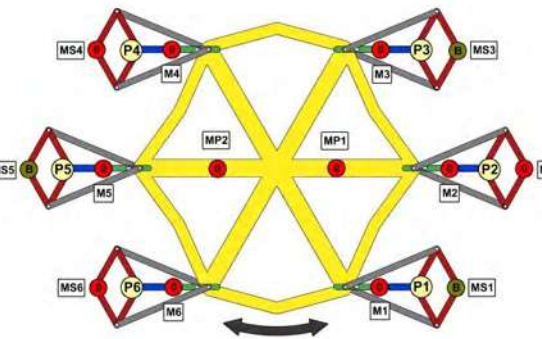
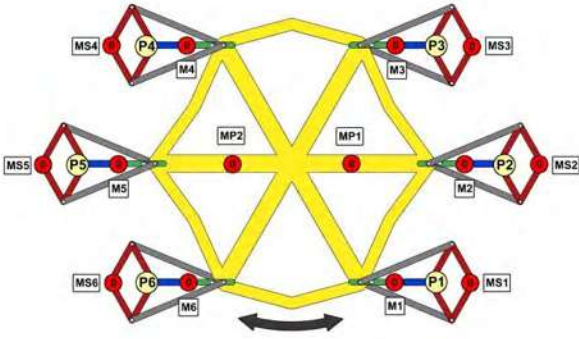
PROCEDIMIENTO DE DETENCIÓN EN MOVIMIENTO GIRATORIO		
PASO 8		
Acción 17	Subir pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 18	Subir pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 19	Subir pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	
PASO 9		
Acción 20	Orientar las piernas P1 , P3 y P5 , activando y girando en sentido antihorario el motor MP1 .	
PASO 10		
Acción 21	Bajar pie de la pierna P1 , activando el motor MS1 .	
Acción 22	Bajar pie de la pierna P3 , activando el motor MS3 .	
Acción 23	Bajar pie de la pierna P5 , activando el motor MS5 .	

Tabla 6.6. Metodología para la detención del robot en el movimiento giratorio. (Continuación)

PROCEDIMIENTO DE DETENCIÓN EN MOVIMIENTO GIRATORIO		
PASO 11		
Acción 24	Todos los pies deben de estar apoyados en el terreno.	

CAPÍTULO 7. DISEÑO MECÁNICO DEL ROBOT LUNAbot W6 VJ1.0©

7.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo trata todo lo relativo al diseño propio de robot *LUNAbot W6 VJ1.0©*, tanto el conceptual y como el de detalle. La máquina caminante se ha dividido en 3 partes principales a las cuales se les ha nombrado como ***Pie***, ***Pierna*** y ***Pelvis***.

En el diseño conceptual se encuentra la propuesta de materiales para la fabricación del robot, así como las características morfológicas preliminares del robot realizadas en el software de diseño 3D Solidworks®.

Por otra parte, en el diseño de detalle, se presenta la determinación de la resistencia mecánica de algunas piezas y conjunto de piezas que están sujetas a cargas estáticas y dinámicas utilizando el análisis de elemento finito por medio del software ANSYS®; además, se muestran las características morfológicas finales que tendrán las piezas del *LUNAbot W6 VJ1.0©*.

7.2. CRITERIOS DE DISEÑO

Para poder realizar el diseño del LUNAbot®, se parte de los criterios de diseño que presenta la *Guía de buenas prácticas para diseñadores de productos fabricados con materiales plásticos* del Instituto Tecnológico del Plástico de Valencia, España. En esta guía se muestran las técnicas y criterios funcionales y estéticos que han de seguirse y se recomiendan para poder diseñar piezas hechas a base de materiales plásticos.

A continuación se muestran los criterios o reglas que se han tomado en cuenta para el diseño de las diferentes partes que conforman el LUNAbot®.

7.2.1. Ángulo de desmoldeo

Las geometrías de la pieza que cortan la superficie del molde de forma perpendicular al plano de partición, requerirán una conicidad o ángulo que permita una adecuada expulsión de la pieza.

Este desmoldeo permite que la pieza pueda ser extraída al abrirse el molde después del ciclo de procesado.

Se debe tener en cuenta, en el caso de los termoplásticos, que éstos se contraen a medida que enfrían, por lo que pueden agarrarse a las geometrías internas o macho del molde, haciendo más difícil una expulsión normal si no se incluye el ángulo de desmoldeo.

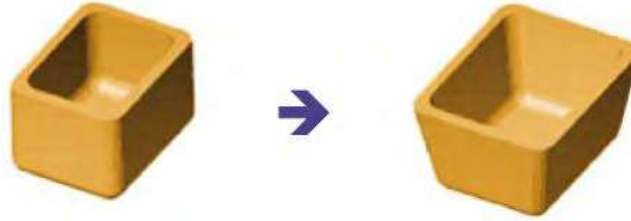


Fig. 7.1. Ejemplo de ángulo de desmoldeo [14].

Los valores genéricos empleados para superficies no texturizadas se encuentran alrededor de los 0.5° por cara. Si se lleva a cabo un pulido en la dirección de movimiento de la pieza en su expulsión, puede ayudar a conseguir este efecto de desmoldeo.

Para paredes texturizadas es habitual añadir un ángulo de desmoldeo adicional de 0.4° por 0.1 mm de profundidad de texturizado.

Normalmente se recomiendan valores de 1° a 3° de desmoldeo.

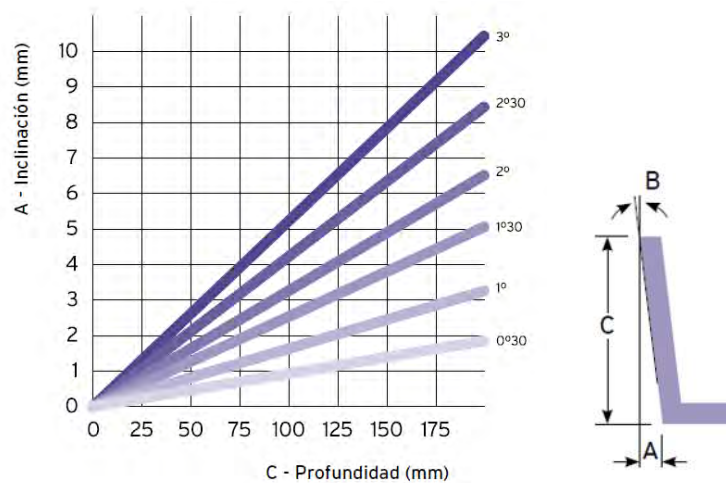


Fig. 7.2. Gráfica con desmoldeo (A) en mm para varios ángulos de desmoldeo (B) en función de la profundidad de la pieza (C) [14].

7.2.2. Espesor de pieza

Si se piensa en piezas de plástico y específicamente en piezas inyectadas, el espesor de la pieza estará en el rango de 0.5mm a 4mm .

Dependiendo del diseño de la pieza y del tamaño, se puede encontrar piezas que tengan zonas gruesas y finas.

En cuanto a requisitos funcionales, la convención es la de mantener el espesor de pared tan delgado y uniforme como sea posible. De esta forma se puede mejorar a priori, tanto el llenado del molde, como prever la contracción de la pieza.

Todas estas reglas son necesarias para reducir tensiones internas en el producto.

Si el espesor de pared uniforme no es una opción, por razones de diseño, se debería plantear una transición gradual (de proporción 3 a 1).

Las diferencias en los espesores de pared a lo largo de la pieza pueden causar fenómenos como rechupes o alabeos durante la etapa de enfriamiento de la pieza.



Fig. 7.3. Transición gradual en espesor de pared [14].

7.2.3. Alojamientos

Los alojamientos tienen el objetivo de servir como puntos de ensamblaje o unión.

Consecuentemente, para un buen diseño, se debe conseguir una buena apariencia y un agarre adecuado en estas zonas. Para ello se deben evitar las secciones gruesas (o aparecerán defectos estéticos como los rechupes).

En el diseño de alojamientos, se necesita seguir las siguientes reglas generales:

- El espesor de pared del alojamiento deberá ser menor del 75% del espesor nominal de la pieza.
- Debe establecerse un radio mínimo del 25% del espesor nominal de la pared o 0.4mm en la base del alojamiento (para evitar tensiones no deseadas).
- Un desmoldeo mínimo de 0.25° en las cotas internas para asegurar un ensamblaje adecuado con el enganche o fijación.
- Un desmoldeo mínimo de 0.5° en las dimensiones exteriores del alojamiento, para favorecer la expulsión de la pieza.

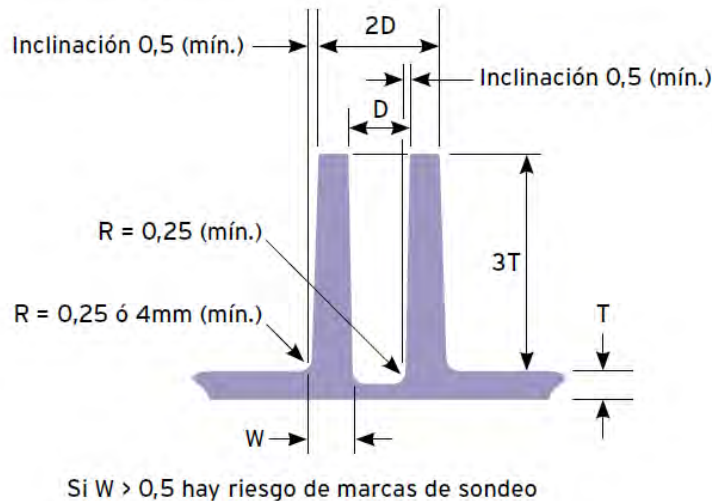


Fig. 7.4. Esquema de cotas de alojamientos [14].

7.2.4. Agujeros

Se distinguen dos tipos de agujeros en piezas de plástico, los agujeros ciegos y los agujeros pasantes.

7.2.4.1. Agujeros ciegos

Los agujeros ciegos se forman por la acción de machos apoyados únicamente en una de las caras del molde.

Esta característica limita la longitud y profundidad de los mismos, ya que longitudes demasiado grandes pueden verse afectadas por el empuje del material fundido durante el proceso de inyección.

Como regla general, la profundidad de un agujero ciego no deberá sobrepasar 3 veces el diámetro.

Pero en el caso de diámetros menores de 5mm, esta relación debería disminuirse a 2.

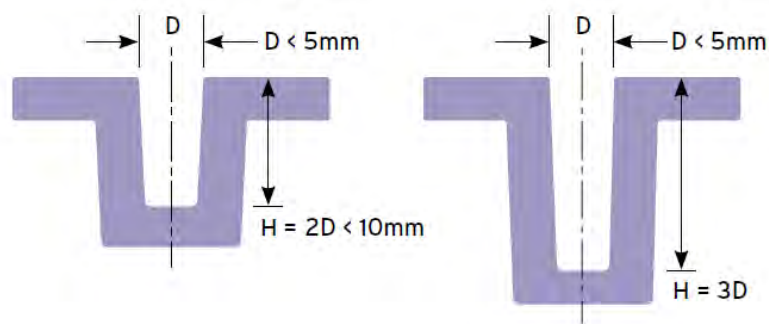


Fig. 7.5. Dimensiones para agujeros ciegos [14].

7.2.4.2. Agujeros pasantes

Los agujeros pasantes pueden ser de mayor longitud, dado que el macho se apoya en la cara opuesta del molde, pudiendo soportar mejor la presión ejercida por el avance del frente de plástico fundido dentro del molde.

Hay que tener en cuenta que todos los agujeros cuyo eje sea perpendicular a la dirección de apertura del molde necesitaran machos móviles.

Estos machos deberán estar pulidos e incluir un ángulo de desmoldeo para asegurar una buena expulsión de la pieza.

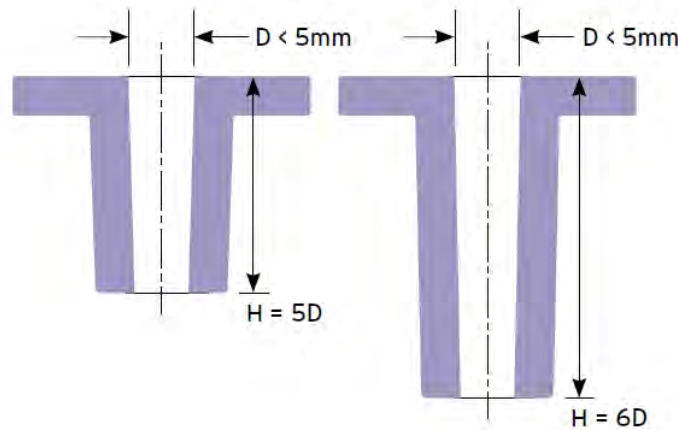


Fig. 7.6. Diseño de agujeros pasante [14].

Otro aspecto adicional a tener en cuenta es la localización de los agujeros y la distancia entre ellos, y también respecto a la esquina de la pieza.

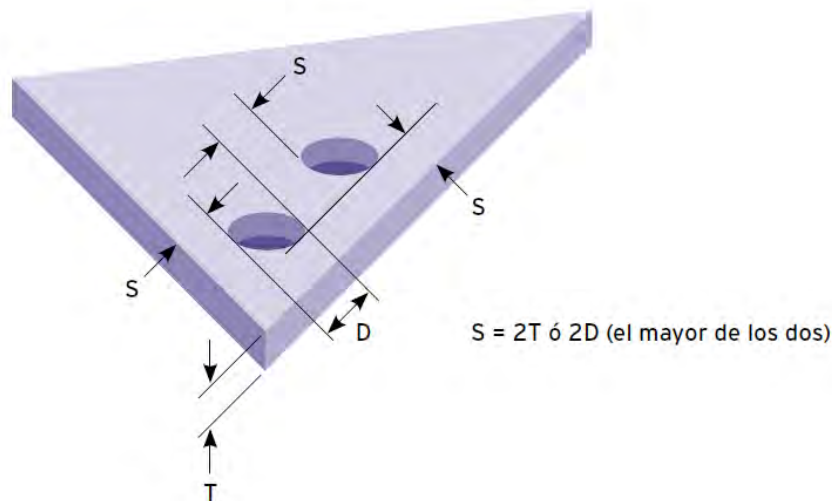


Fig. 7.7. Distribución y localización recomendada de los agujeros [14].

7.2.5. Roscas

Si el diseñador necesita roscas internas o externas, esta geometría puede ser fabricada automáticamente en el molde, evitando, posteriormente, operaciones de mecanizado de roscas.

7.2.5.1. Roscas externas

Las piezas con roscas externas se pueden moldear de dos formas:

- a) Situando la línea de partición en el eje central de la rosca.

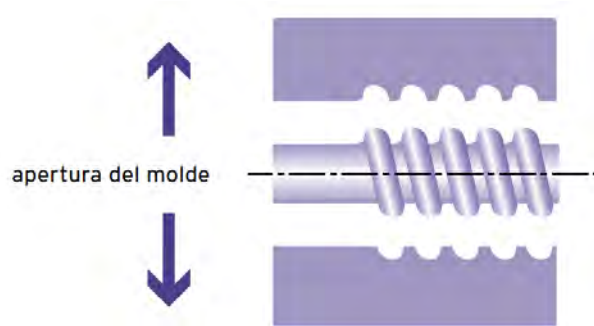


Fig. 7.8. Roscas externas con el eje en la línea de partición [14].

- b) La vía alternativa a la solución anterior pasaría por equipar el molde con sistema automatizados de roscado y desenroscado.

7.2.5.2. Roscas internas

Para producir roscas internas, la solución que pasa por el empleo de sistemas automatizados de desenroscado, antes de la apertura del molde, se revela como la única alternativa técnica posible.

7.2.6. Nervios

En el caso de piezas estructurales, la primera opción para incrementar la resistencia de la pieza pasa por aumentar el espesor nominal. Pero esta acción incrementará el peso de la pieza y sus costes de procesado, debido a la necesidad de ciclos de producción más largos.

Por ello, si la pieza requiere espesores superiores a 4 mm, es aconsejable el refuerzo por medio de nervios para obtener la resistencia exigida con un aceptable espesor de pared.

Para evitar la aparición de defectos estéticos por la presencia de los nervios en la pieza, hay que seguir unas reglas sencillas de dimensionado de los mismos, las cuales se muestran en la fig. 7.9.

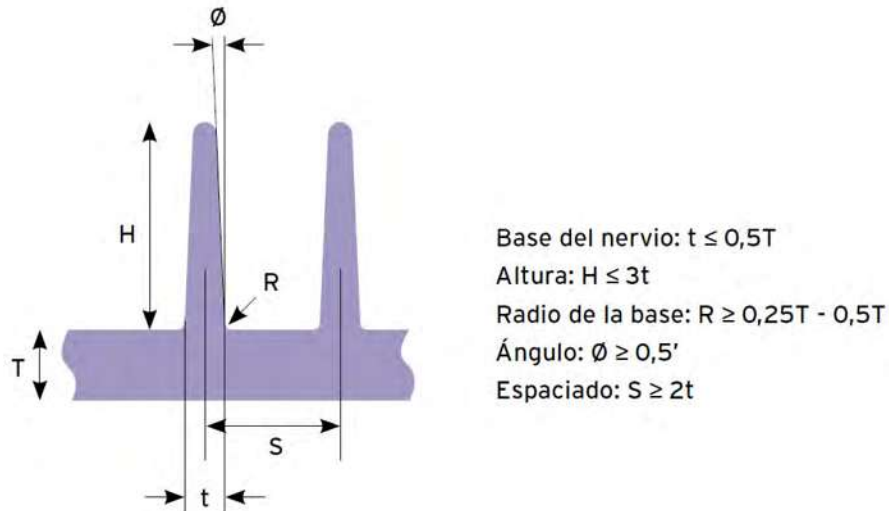


Fig. 7.9. Reglas generales de dimensionado de nervios [14].

Otros puntos a tener en cuenta son:

- Diseñar los nervios en sentido paralelo al que va a seguir el material termoplástico fundido durante el llenado de la pieza.
- Los nervios situados en paralelo, deberán estar separados a una distancia, como mínimo 2 veces respecto a su espesor nominal, para evitar problemas durante el enfriamiento de la pieza.

7.2.7. Radios y esquinas

En general, al diseñar piezas para ser fabricadas en material plástico, es necesario evitar las esquinas agudas o cortantes.

Así se reduce la concentración de tensiones en esas áreas, que pueden provocar fragilidad o inicios de rotura en las piezas. Para conseguir este objetivo, se tiene la posibilidad de colocar radios en las esquinas, redondeándolas.

Las principales desventajas de las esquinas agudas son:

- Tensiones elevadas en las piezas de plástico.
- Reducción en sus propiedades mecánicas (disminuye su resistencia).
- Un llenado de pieza deficiente.
- Defectos de apariencia a nivel superficial.

Si se redondean las esquinas, se obtiene:

- Menores alabeos o pandeos en la pieza, ya que existirá menor concentración de tensiones en las esquinas.

- Mejor llenado de la pieza, ya que se favorece el paso del plástico fundido, sin obligarle a cambios bruscos de dirección.
- Enfriamiento uniforme.

Como convención para dimensionar radios se sigue la siguiente regla; “El radio exterior de la pieza debe ser igual al radio interior más el espesor de pared, ya que así se mantiene el espesor nominal de pared uniforme y se reducen las concentraciones de tensiones”.

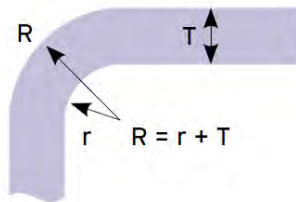


Fig. 7.10. Redondeo en esquinas [14].

Lo mismo ocurre en el caso de los radios interiores, ya que las diferencias en la fase de enfriamiento, en las partes interna y externa, puede provocar que la parte interna contraiga más y deforme la esquina.

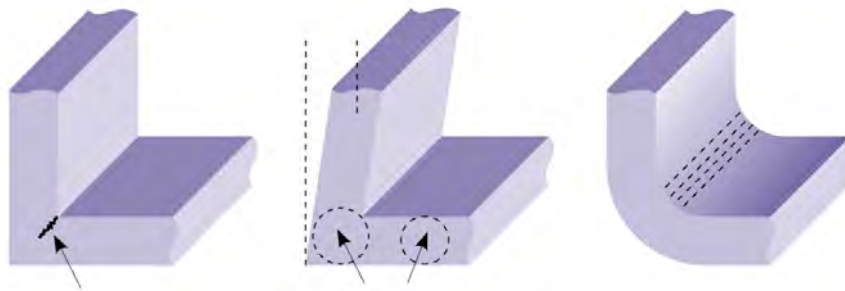


Fig. 7.11. Tensiones en esquinas [14].

7.2.8. Evitar zonas sobredimensionadas en las piezas

En el diseño de una pieza de plástico es necesario eliminar tanto material como sea posible, manteniendo la funcionalidad y estética de la pieza.

Esto se consigue vaciando volumen de la geometría diseñada, que se traducirá en la fase de fabricación del utillaje, en el añadido de acero en el molde. En la fase de concepción y diseño de la pieza hay que tener siempre en mente que “todo lo que es vacío o hueco en mi pieza, es acero en el molde”.

Seguir esta regla favorecerá el diseño en términos de consumo de plástico por pieza, tiempos de ciclo de fabricación, comportamiento de la pieza en uso e incluso en mejora de su aspecto estético (por disminución de la posibilidad de aparición de defectos).



Fig. 7.12. Ejemplo de vaciado de pieza [14].

7.2.9. Contrasalidas

Las geometrías que provoquen contrasalidas se deben evitar en la medida de lo posible por medio del rediseño de la pieza.

Cambiar la forma y orientación de los agujeros en la pieza, puede reducir costes iniciales de molde y los costes añadidos de mantenimiento al incluir elementos mecánicos móviles para producir esos agujeros en la pieza.

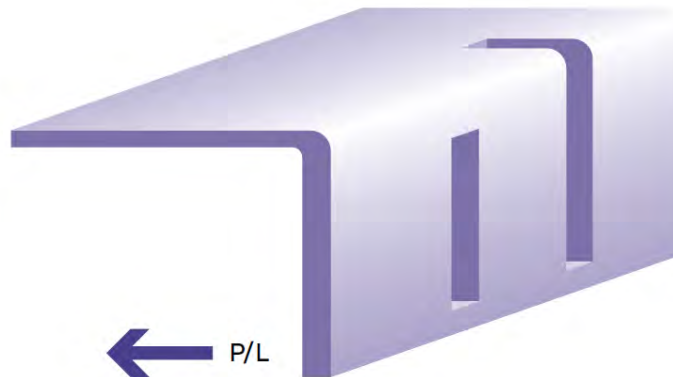


Fig. 7.13. Diferencias en el diseño de agujeros. Opción izquierda, necesita movimiento lateral del molde, y la opción derecha, presenta una salida en la dirección natural del molde (sin necesidad de mecanismos auxiliares) [14].

Pero esta posibilidad ideal no existirá en el caso de piezas complejas. Por esta razón, el diseñador de pieza y el diseñador del molde necesitarán soluciones técnicas que produzcan los movimientos deseados para definir la figura.

En estos casos será necesario recurrir a:

- Uso de insertos, que puedan eliminarse o quitarse posteriormente.
- Diseñar correderas para favorecer el movimiento lateral en el molde, liberando las contrasalidas mientras el molde abre.
- Incorporar cilindros neumáticos o hidráulicos, que permiten mover partes del molde antes de la expulsión de la pieza, pero incrementando los costes totales del utillaje.

7.2.10. Nervios de soporte

En el caso de su uso como soportes, se emplean nervios de refuerzo, y se pueden aplicar las mismas reglas generales que las mencionadas en el apartado 7.2.6 concerniente a los Nervios.

La principal característica en este caso específico de nervios es que cumplirán su función de refuerzo en esquinas, paredes de pieza o alojamientos.

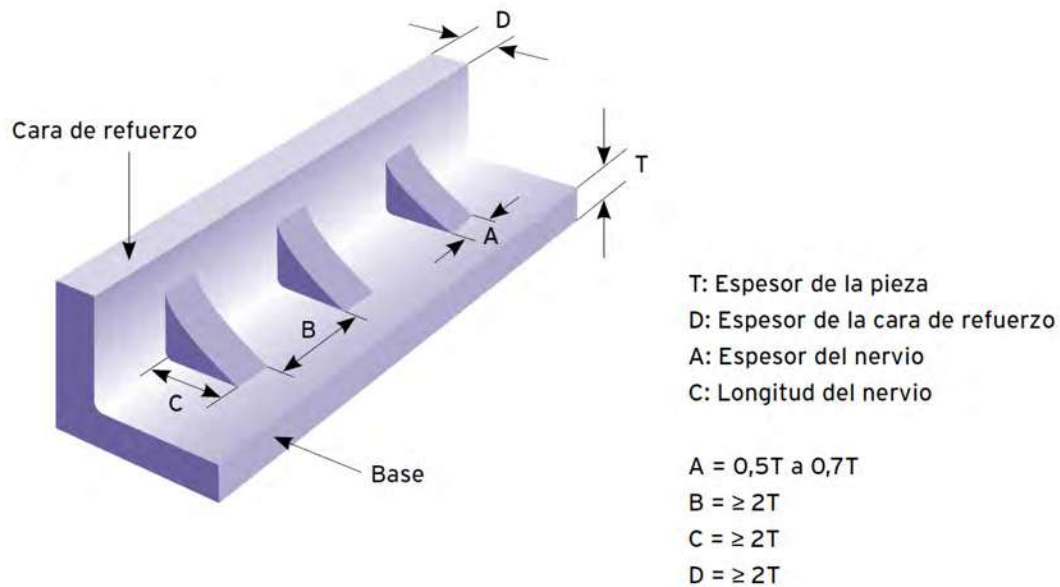


Fig. 7.14. Diseño de nervios de soporte [14].

Normalmente, la altura de un nervio de soporte puede ser hasta un 95% de la altura del agujero o nervio al que sirva de apoyo.

Los refuerzos pueden tener hasta 4 veces el espesor nominal de la pieza, pero dependerá fundamentalmente de la altura del nervio a reforzar. Relacionado con la base del refuerzo, la longitud será 2 veces el espesor nominal de pared.

Seguir estas reglas básicas hará más fácil el llenado de la pieza y su posterior expulsión del molde.

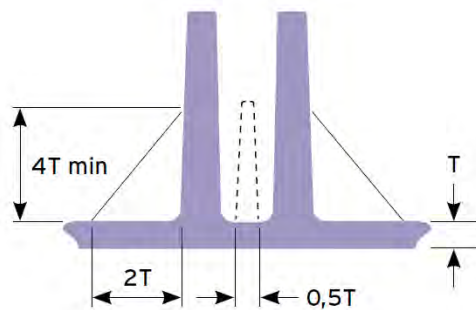


Fig. 7.15. Diseño de nervios de soporte [14].

Aparte de estas reglas básicas de diseño, hay que considerar un aspecto muy importante a la hora de dimensionar la geometría de la pieza a fabricar, y es la influencia de la contracción del material plástico.

Cuando el plástico se inyecta en una cavidad, empieza a enfriar, mientras su volumen disminuye.

La medida para evaluar esta disminución volumétrica viene dada por la diferencia entre la densidad en sólido y la densidad en fundido que presente el material termoplástico.

Se entiende por contracción la variación que existirá entre la dimensión de la cavidad del molde creada para fabricar la pieza, y las dimensiones finales de la pieza tras ser enfriada y expulsada del molde.

Los valores estimados de contracción volumétrica presentan variaciones en función del material termoplástico utilizado y deben figurar en las hojas técnicas de especificaciones de cada material comercial [14].

7.2.11. Grosor de pared

En la siguiente tabla se muestra el grosor de pared que se recomienda para el diseño de las piezas plásticas dependiendo del tipo de resina a utilizar.

Tabla 7.1. Grosor recomendado para la pared de las piezas plásticas según el tipo de resina [48].

Resina	Grosor de pared recomendado (mm)
ABS	1.143 – 3.556
Acetal	0.762 – 3.048
Acrílico	0.635 – 3.810
Polímero de cristal líquido	0.762 – 3.048
Plásticos reforzados por fibra larga	1.905 – 25.400
Nailon	0.762 – 2.921
Policarbonato	1.016 – 3.180
Poliéster	0.635 – 3.175
Polietileno	0.762 – 5.080
Polisulfuro de fenileno	0.508 – 4.572
Polipropileno	0.635 – 3.810
Poliestireno	0.889 – 3.810
Poliuretano	2.032 – 19.050

7.3. DISEÑO CONCEPTUAL

Como se mencionó anteriormente, dentro de este apartado se encuentran los siguientes temas:

- a) Tipos de Materiales.
- b) Selección de Materiales.
- c) Diseño preliminar del LUNAbot W6 VJ1.0®.

7.3.1. Tipos de Materiales

Hasta este momento, se ha propuesto que los diferentes componentes del LUNAbot® que serán fabricados deberán estar compuestos por materiales ligeros, durables y resistentes; por lo tanto se ha decidido que sean hechos tanto de materiales plásticos como metales ligeros o no ferrosos (P.ej. aluminio), ya que el robot está pensado para los niños, principalmente, llevándonos a pensar que debe ser un robot ligero para su fácil traslado cuando éste no se encuentre en funcionamiento, además de que la energía que ha de consumir sea la que nos puedan proporcionar las baterías comerciales..

A continuación se presenta una descripción de las características generales de los materiales plásticos y del aluminio (que se ha propuesto utilizar ya que es un metal ligero y no ferroso), para así poder seleccionar el material que más nos convenga para el robot.

7.3.1.1. Plásticos o Polímeros

Los **plásticos** son materiales no metálicos que se pueden formar o moldear por calor, presión, reacciones químicas o una combinación de estos elementos. Los plásticos son materiales fuertes, tenaces y durables que tienen diversas aplicaciones en el diseño de máquinas y equipo en general.

Por otro lado, los metales son duros y rígidos. Esto significa que se pueden maquinar hasta lograr tolerancias muy cerradas, para fabricar levas, cojinetes, bujes, y engranes que funcionarán con mayor suavidad con cargas pesadas y durante largos periodos. Aunque algunos se encuentran muy próximos, ningún plástico tiene la dureza ni la resistencia al flujo plástico del acero, por ejemplo. Sin embargo, los metales tienen muchas desventajas que los plásticos para ingeniería no tienen. Los metales se corroen o se llenan de herrumbre, deben lubricarse, sus superficies de trabajo se desgastan con facilidad, no se pueden usar como aisladores eléctricos o térmicos, son opacos y ruidosos y cuando deben flexionarse, se fatigan con rapidez.

Los plásticos pueden mejorar las deficiencias de los metales, aunque no de necesidad con un solo material. Los plásticos para ingeniería son resistentes a la mayor parte de los productos químicos. Ninguno de estos plásticos se corroe o forma herrumbre. También estos plásticos se pueden utilizar en piezas que funcionan con cargas y a velocidades bajas y, sin

lubricación, se encuentran entre los sólidos más resbalosos del mundo, siendo comparables al hielo. Además, dichos plásticos, son elásticos; por lo tanto, las piezas hechas con ellos funcionan de manera más silenciosa y con mayor suavidad que los productos metálicos equivalentes y pueden soportar sobrecargas periódicas sin efectos perjudiciales.

El uso extendido y creciente de los plásticos en casi todas las fases de la vida moderna se puede acreditar en gran parte a sus combinaciones únicas de ventajas. Estas ventajas son:

- ✚ Peso ligero
- ✚ Gama de colores
- ✚ Buenas propiedades físicas
- ✚ Adaptabilidad a los métodos de producción en masa
- ✚ A menudo, costos más bajos

Aparte de la gama de usos que se pueden atribuir a las cualidades especiales de los diferentes plásticos, estos materiales logran todavía una mayor variedad a través de las distintas formas en las cuales se pueden producir.

Se les puede dar formas definidas como las vajillas y las cajas de interruptores eléctricos. Se les puede producir como películas y hojas flexibles, como las cortinas de baño y tapicería. Los plásticos se pueden producir como láminas, varillas y tubos a los que después se les conforma o maquina como por ejemplo los anuncios iluminados internamente o torrecillas salientes del fuselaje de aviones. Se les puede obtener como filamentos para usarse como cortinas domésticas, coladores industriales y tamices. Los plásticos se pueden usar como recubrimiento sobre telas y papel. Se pueden usar para ligar materiales como fibra de vidrio y láminas de papel o madera para formar cascos de botes, puntas de alas de aviones y tablas de mesas.

Los plásticos se clasifican en **termoplásticos** y **plásticos termofijos**.

a) Termoplásticos.

Cuando se les aplica calor los termoplásticos se ablandan o funden, y fluyen. Al eliminarse el calor, estos materiales se fraguan o se solidifican. Se pueden volver a calentar y de nuevo darles forma o reutilizarlos. En este grupo se encuentran:

- | | |
|----------------------|--|
| ✚ acrílicos | ✚ polivinilo |
| ✚ celulósicos | ✚ ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-
Estireno) |
| ✚ nylon (poliamidas) | ✚ resina de acetal |
| ✚ polietileno | ✚ polipropileno |
| ✚ poliestireno | ✚ policarbonatos |
| ✚ polifluorocarbonos | |
| ✚ vinilos | |

b) Plásticos Termofijos.

Los plásticos termofijos sufren un cambio químico irreversible cuando se les aplica calor o cuando se les agrega catalizadores o reactantes. Se hacen duros, insolubles e infusibles y no se ablandan al volverles a aplicar calor. Los plásticos termofijos a los:

- + fenólicos
- + aminoplásticos (melamina y urea)
- + poliésteres moldeados en frío
- + epoxis
- + siliconas
- + alquidos
- + alílicos
- + caseína

Las tablas 7.2 y 7.7 muestran las principales características de los termoplásticos y los plásticos termofijos, respectivamente.

Maquinado.

Prácticamente todos los termoplásticos y los plásticos termofijos se pueden maquinar de manera satisfactoria en equipo estándar, con las herramientas adecuadas. La naturaleza del plástico determinará si debe aplicarse calor, como en algunos laminados, o evitarse, como en el pulimentado de algunos termoplásticos.

Se pueden usar las operaciones estándar de maquinado, como torneado, taladrado, roscado, fresado, punzonado y troquelado [8].

Tabla 7.2. Termoplásticos (The Society of Plastics Industry) [8]. (Continúa)

TERMOPLÁSTICOS			
NOMBRE DEL PLÁSTICO	PROPIEDADES	FORMAS Y MÉTODOS DE FORMADO	USOS
ABS (Acrilonitrilo- Butadieno-Estireno)	Fuerte, tenaz, buenas propiedades eléctricas.	Se encuentra en polvo o gránulos para moldeo por inyección, extrusión y satinado y como lámina para formado al vacío. También se encuentra como barra y plancha.	Tubos, ruedas, cascos de fútbol, cubiertas de baterías, gabinetes de radios, patinetas para niños, cajas de carga, partes de automóviles, juguetes.
Resina de acetal	Rígido sin llegar a ser frágil, tenaz, resistente a las temperaturas extremas, buenas propiedades eléctricas.	Producida en forma de polvo para moldeo y extrusión, se encuentra en varilla, barra, tubo, cinta y plancha.	Grupos de instrumentos de automóviles, engranes, cojinetes, bujes, manijas de puertas, accesorios de plomería, sujetadores roscados, levas.

Tabla 7.2. Termoplásticos (The Society of Plastics Industry) [8]. (Continuación)

TERMOPLÁSTICOS			
NOMBRE DEL PLÁSTICO	PROPIEDADES	FORMAS Y MÉTODOS DE FORMADO	USOS
Acrílicos	Claridad excepcional y buena transmisión de la luz. Fuertes, rígidos y resistentes a los golpes. Aisladores excelentes. Incoloros, o bien, en una gama completa de colores transparentes, translúcidos u opacos.	Se encuentran en láminas, varillas, tubos y polvo para moldeo. Los productos de plástico se pueden producir mediante la fabricación de láminas, varillas y tubos, formado en caliente de láminas, moldeo por inyección y compresión de polvo, extrusión, forjado.	Cubiertas corredizas de las cabinas y ventanas de aviones, lentes de televisión y de visores de cámaras, peines, joyería de fantasía, tazones para ensaladas, charolas, bases de lámparas, modelos a escala, luces traseras de automóviles, anuncios en exteriores.
Celulósicos	Entre los más tenaces de los plásticos. Mantiene un acabado lustroso con un desgaste normal. Transparente, translúcido u opaco en una amplia variedad de colores y en transparente incoloro. Buenos aisladores.	Se encuentran en gránulos, láminas, película, varillas, tubos, cintas, cordón revestido. Se puede convertir en productos por inyección, moldeo por compresión, extrusión y formado al vacío, o en láminas y recubrimiento.	Armazones de anteojos, juguetes, pantallas de lámparas, peines, tacones de zapatos.
A) Acetato de celulosa		Se encuentran en gránulos, láminas, varillas, tubos, cintas y como recubrimiento. Se puede convertir en productos por inyección, moldeo por compresión, extrusión, soplado y estirado de hojas, laminado, recubrimiento.	Volantes de dirección, gabinetes de radios, tubo estándar y tubería, manijas de herramientas, cartas de baraja.
B) Acetato-butirato de celulosa		Se encuentra en gránulos para inyección, extrusión o moldeo por compresión.	Alojamientos de aparatos electrodomésticos, microteléfonos, plumas y lápices.
C) Propionato de celulosa		Se encuentra en gránulos, escama, lámina, varilla, tubo, película u hoja. Se puede convertir en producto terminado por inyección, moldeo por compresión, extrusión, estirado.	Piezas moldeadas de canto, lámparas de mano, piezas eléctricas.
D) Etilcelulosa		Se encuentra en varillas, tubos, láminas para maquinado y como recubrimiento.	Cubiertas de tacones de zapatos, recubrimiento de telas.
E) Nitrato de celulosa			

Tabla 7.2. Termoplásticos (The Society of Plastics Industry) [8]. (Continuación)

TERMOPLÁSTICOS			
NOMBRE DEL PLÁSTICO	PROPIEDADES	FORMAS Y MÉTODOS DE FORMADO	USOS
Fluorocarbonos	Bajo coeficiente de fricción, resistentes al calor y al frío extremos. Fuertes, duros y buenos aisladores.	Se encuentra como polvo y gránulos en forma de resina. Lámina, varilla, tubo, película, cinta y dispersiones. Moldeados, extruidos y maquinados.	Asientos de válvulas, empaques, recubrimientos, revestimientos, tuberías.
Nylon (Poliamidas)	Resistente a las temperaturas extremas. Fuerte y en una amplia gama de colores suaves de larga duración.	Se encuentra como polvo para moldeo en láminas, varillas, tubos y filamentos. Inyección, compresión, moldeo por soplado y extrusión.	Vasos, arandelas de grifos, engranes. Como filamentos, se usa como cerdas para brochas y como sedal.
Polycarbonato	Elevada resistencia al impacto, resistente a la intemperie, transparente.	Principalmente un material para molde, puede tomar la forma de película, extrusión, recubrimientos, fibras o elastómeros.	Piezas para aviones, automóviles, máquinas de oficina, calibradores, lentes para anteojos de seguridad.
Polietileno	Excelentes propiedades de aislamiento, a prueba de humedad, transparente incoloro, translúcido.	Se encuentra en gránulos, polvo, lámina, película, filamento, varilla, tubo y espuma. Moldeo por inyección, compresión y soplado, extrusión, recubrimiento y vaciado.	Charolas para cubos de hielo, vasos, platos, botellas, bolsas, globos, juguetes, barreras contra la humedad.
Poliestireno	Transparente incoloro, translúcido u opaco. Todos los colores. Resistente al agua y a la intemperie, resistencia al calor o al frío.	Se encuentra en polvos o gránulos para moldeo, láminas, varillas, bloques de espuma, solución líquida, recubrimientos y adhesivos. Inyección, moldeo por compresión, extrusión, laminado, maquinado.	Artículos de cocina, recipientes para alimentos, azulejos para paredes, juguetes, paneles de instrumentos.
Polipropilenos	Buena resistencia al calor, elevada resistencia al agrietamiento. Amplia gama de colores.	Procesados por moldeo por inyección, moldeo por soplado y extrusión.	Platos térmicos, agitadores de máquinas lavadoras, tubo y accesorios para éstos, aislamiento para alambres y cables, cajas de baterías, película y hojas para empacar.
Uretanos	Tenaces y resistentes al choque para los materiales sólidos. Flexibles para los materiales en espuma, se pueden espumar en el lugar.	Tipo sólido: partiendo de dos reactantes, el artículo final se puede extrudir, moldear, satinar o vaciar. Tipo de espuma: se pueden obtener por medio de un prepolímero o en un proceso de un solo paso. En materia en bruto en forma de plancha o en forma moldeada.	Colchones, acojinado, relleno, juguetes, capas de base de alfombras, almohadillas contra choques, esponjas, tapetes, adhesión, aislamiento térmico, neumáticos industriales.

Tabla 7.2. Termoplásticos (The Society of Plastics Industry) [8]. (Continuación)

TERMOPLÁSTICOS			
NOMBRE DEL PLÁSTICO	PROPIEDADES	FORMAS Y MÉTODOS DE FORMADO	USOS
Vinilos	Fuertes y resistentes a la abrasión. Resistentes al calor y al frío. Amplia gama de colores.	Se encuentran en polvo para moldeado, lámina, varilla, tubo, gránulos. Se puede formar por extrusión, vaciado, satinado, compresión y moldeo por inyección.	Impermeables, bolsas para prendas de vestir, juguetes inflables, mangueras, discos, azulejos para pisos y paredes, cortinajes, tubos y paneles.

Tabla 7.3. Plásticos termofijos (The Society of Plastics Industry) [8]. (Continúa)

PLÁSTICOS TERMOFIJOS			
NOMBRE DEL PLÁSTICO	PROPIEDADES	FORMAS Y MÉTODOS DE FORMADO	USOS
Alquidos	Excelente resistencia dieléctrica, resistencia al calor y a la humedad.	Se encuentran en polvo para moldear y como resina líquida. Los productos moldeados y acabados se producen por moldeo a compresión.	Interruptores de luz, aisladores y alojamientos para montajes de motores eléctricos, aparatos de sintonización de televisión y soportes de tubos.
Alfílicos	Excelente resistencia dieléctrica y resistencia de aislamiento. No hay absorción de humedad, resistencia a las manchas. Amplia gama de colores opacos y transparentes.	Se encuentra en la forma de monómeros, prepolímeros y polvos. Los artículos acabados se pueden hacer por moldeo de transferencia o compresión, laminación, recubrimiento o impregnación.	Conectores eléctricos, manijas de aparatos electrodomésticos, perillas, etc. Sobrecapas o recubrimientos laminados para madera contrachapada, cartón y otros materiales laminados que necesitan protección contra la humedad.
Amino (melanina y urea)	Amplia gama de colores translúcidos y opacos. Muy duro, fuerte, pero no irrompible. Buenas cualidades eléctricas.	Se encuentra como polvo o gránulos para moldeo, como material espumado en solución y como resinas. Los productos acabados se pueden obtener por moldeo de compresión, de transferencia o con pistón, y por laminación con madera, papel, etc.	Melamina: vajillas, botones, cubiertas distribuidoras, tablas de mesa, adhesivo para madera contrachapada y como tratamiento para papel y telas. Urea: alojamiento de balanzas, gabinetes de radios, aparatos eléctricos, alojamientos de aparatos electrodomésticos, perillas de estufas en la forma de resina como recubrimientos de esmalte horneado.

Tabla 7.3. Plásticos termofijos (The Society of Plastics Industry) [8]. (Continuación)

PLÁSTICOS TERMOFIJOS			
NOMBRE DEL PLÁSTICO	PROPIEDADES	FORMAS Y MÉTODOS DE FORMADO	USOS
Caseína	Excelente pulido de la superficie. Amplia gama de colores casi transparentes y opacos. Fuerte, rígido, puede ser afectado por la humedad y los cambios de temperatura.	Se encuentra en láminas rígidas, varillas y tubos, como polvo y líquido. Los productos terminados se obtienen por maquinado de las láminas, varillas y tubos.	Botones, abrazaderas, cuentas, máquinas contadoras para juegos, agujas para tejer, juguetes y adhesivos.
Moldeados en frío Tres tipos: Bitumina Fenólico Cemento-asbesto	Resistencia al calor intenso, solventes, agua y aceite.	Se encuentran en compuestos. Los artículos acabados se producen por moldeo y curado.	Bases para interruptores y clavijas, aisladores, engranes pequeños, manijas y perillas, azulejos, plantillas y matrices, bloques de construcción de juguetes.
Epóxicos	Buenas propiedades eléctricas, resistencia al agua y a la intemperie.	Se encuentran como compuestos para moldear, resinas, bloques formados, soluciones líquidas, adhesivos, recubrimientos, selladores.	Recubrimiento protector para aparatos electrodomésticos, latas, tambores, pisos de gimnasios y otras superficies difíciles de proteger. Pegan con firmeza los metales, el vidrio, la cerámica, el caucho duro y los plásticos, circuitos impresos, herramientas y plantillas laminadas, y tanques de almacenamiento de líquidos.
Fenólicos	Fuertes y duros. Resistentes al calor y al frío; aisladores excelentes.	Vaciado y moldeo.	Gabinets de radios y televisiones, agitadores para máquinas lavadoras, alojamientos de máquinas tragamonedas, joyería, poleas, aislamiento eléctrico.
Poliestirenos (fibra de vidrio)	Fuertes y tenaces, colores brillantes y pastel. Grandes cualidades dieléctricas.	Se producen como líquidos, polvos secos, compuestos premezclados para moldear y como láminas vaciadas, varillas y tubos. Se forman por moldeo, vaciado, impregnación y premezclado.	Se usan para impregnar el paño o los tapetes de fibras de vidrio, papel, algodón y otras fibras en la producción de plástico reforzado para usarse en botes, automóviles, equipaje.

Tabla 7.3. Plásticos termofijos (The Society of Plastics Industry) [8]. (Continuación)

PLÁSTICOS TERMOFIJOS			
NOMBRE DEL PLÁSTICO	PROPIEDADES	FORMAS Y MÉTODOS DE FORMADO	USOS
Siliconas	Resistentes al calor, buenas propiedades dieléctricas.	Se encuentran como compuestos para moldear, resinas, recubrimientos, grasas, fluidos y caucho de siliconas. Se les da el acabado por moldeo de compresión y de transferencia, extrusión, recubrimiento, satinado, vaciado, espumado e impregnación.	Formas de espiras, piezas de interruptores, aislamiento para motores y bobinas para generadores.

7.3.1.2. Aluminio

El **aluminio** se utiliza ampliamente en aplicaciones estructurales y mecánicas. Entre las principales de sus interesantes propiedades están la ligereza, una buena resistencia a la corrosión, facilidad relativa para darle forma y maquinarlo y lo atractivo de su aspecto. Su densidad equivale aproximadamente a una tercera parte de la del acero. Sin embargo, su resistencia es, a su vez, un tanto menor.

En las designaciones estándar para las aleaciones de aluminio que integran la lista de la *Aluminum Association* (Asociación del Aluminio) en EE.UU., se emplea un sistema de cuatro dígitos. El primer dígito indica el tipo de aleación de acuerdo con el elemento más importante de ella. El segundo, si es distinto de 0 señala modificaciones de otra aleación o límites que se establecen respecto a impurezas en la aleación. La presencia de impurezas es en particular importante en el caso de los conductores eléctricos. Dentro de cada grupo existen diversas aleaciones específicas, que se indican por medio de los dos últimos dígitos que componen la designación. La tabla 7.4 muestra una lista de los grupos de aleaciones que más se utilizan.

Tabla 7.4. Grupos de aleaciones de Aluminio [9]

DESIGNACIÓN DE ALEACIONES (POR ELEMENTO PRINCIPAL DE ALEACIÓN)	
1xxx	Contenido de Aluminio 99.00% o mayor
2xxx	Cobre
3xxx	Manganeso
4xxx	Silicio
5xxx	Magnesio
6xxx	Magnesio y Silicio
7xxx	Zinc

La tabla 7.5 se integra con una lista de algunas aleaciones comunes, junto con las formas en que, por lo general, se fabrican en algunas de sus aplicaciones más importantes. La lista

de la tabla incluye además varias de las 50 o más aleaciones disponibles en el mercado que abarcan el rango de las aplicaciones típicas. La tabla resulta de utilidad para seleccionar una aleación adecuada para una aplicación en particular.

Tabla 7.5. Aleaciones de Aluminio y sus usos [9].

ALEACIÓN	APLICACIONES	FORMAS
1060	Equipo químico y tanques.	Lámina, placa, tubo.
1350	Conductores eléctricos.	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, tubería, formas.
2014	Estructuras para aeronaves y bastidores para vehículos.	Lámina, placa, varilla, barra, alambre, formas, piezas forjadas (forjas)
2024	Estructuras para aeronaves, ruedas, partes de máquinas.	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, formas, remaches.
2219	Partes sujetas a altas temperaturas (hasta 315.5 °C o 600 °F).	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, formas, forjas.
3003	Equipo químico, tanques, utensilios de cocina, partes para arquitectura.	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, tubería, formas, remaches, forjas.
5052	Tubería hidráulica, aparatos para el hogar (línea blanca), fabricación de láminas de metal.	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, remaches.
6061	Estructuras, bastidores y partes para vehículos, usos marinos.	Todas las formas.
6063	Muebles, accesorios para arquitectura.	Tubos, tubería, formas extruidas.
7001	Estructuras de alta resistencia.	Tubos, formas extruidas.
7075	Estructuras para aeronaves y para trabajo pesado.	Todas las formas, excepto tuberías.

Las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio dependen en gran medida de su condición. Por ese motivo, la especificación de una aleación estará incompleta si no hace mención a su *temple*. Es necesario hacer notar que algunas aleaciones responden al tratamiento térmico y otras se procesan con endurecimiento por estiramiento o tracción. En el *endurecimiento por estiramiento o tracción* la aleación se trabaja en frío de manera controlada, donde un incremento en el trabajo aumenta la dureza y la resistencia en tanto se reduce la ductilidad. En la lista siguiente se describen los temples que con mayor frecuencia se le dan a las aleaciones de aluminio, los temples disponibles son:

- F – según se fabrica:** no se proporciona control especial alguno de las propiedades. Se desconocen los límites reales. Este temple debe aceptarse sólo cuando la pieza se puede probar con todo cuidado antes que entre en servicio.
- O – recocido:** un tratamiento térmico que da por resultado la condición más blanda y baja en la resistencia. En ocasiones se especifica para obtener la forma más susceptible de trabajarse la aleación. A la pieza que se obtiene se le puede dar tratamiento térmico con el fin de mejorar sus propiedades, si se fabrica con aleaciones

que entran en las series 2xxx, 4xxx, 6xxx o 7xxx. El trabajar la pieza también puede aportar cierta mejoría de las propiedades similar a la que se genera por medio del endurecimiento por tensión o tracción para aleaciones en las series 1xxx, 3xxx y 5xxx.

- c) **H – endurecimiento por estiramiento o tracción:** proceso de trabajo en frío, bajo condiciones controladas, que generan mejores propiedades predecibles para aleaciones de los grupos 1xxx, 3xxx y 5xxx. Cuanto mayor sea el trabajo en frío, mayor será la resistencia y la dureza, aunque también hay decremento en cuanto a ductilidad. A la designación *H* le sigue uno o más dígitos, los cuales indican resistencia más alta en forma progresiva. No obstante, se utilizan muchas otras designaciones.
- d) **T – tratamiento térmico:** una serie de procesos de calentamiento y enfriado que se aplican a aleaciones en los grupos 2xxx, 4xxx, 6xxx y 7xxx. A la letra *T* le sigue uno o más números para indicar procesos específicos. Las designaciones más comunes para productos mecánicos y estructurales son T4 y T6.

En la tabla 7.6 se muestra la información relativa a propiedades para aleaciones de aluminio más comerciales.

Tabla 7.6. Propiedades típicas del aluminio [9].

Aleación y tratamiento	Resistencia a la tensión		Resistencia de fluencia		Ductilidad (porcentaje de elongación en 2 pulgadas)	Resistencia al corte		Resistencia a la fatiga	
	(ksi)	(MPa)	(ksi)	(MPa)		(ksi)	(MPa)	(ksi)	(MPa)
1060-O	10	69	4	28	43	7	48	3	21
1060-H14	14	97	11	76	12	9	62	5	34
1060-H18	19	131	18	124	6	11	121	6	41
1350-O	12	83	4	28	28	8	55		
1350-H14	16	110	14	97		10	69		
1350-H19	27	186	24	165		15	103	7	48
2014-O	27	186	14	97	18	18	124	13	90
2014-T4	62	427	42	290	20	38	262	20	138
2014-T6	70	483	60	414	13	42	290	18	124
2024-O	27	186	11	76	22	18	124	13	90
2024-T4	68	469	47	324	19	41	283	20	138
2024-T361	72	496	57	393	12	42	290	18	124
2219-O	25	172	11	76	18				
2219-T62	60	414	42	290	10			15	103
2219-T87	69	476	57	393	10			15	103
3003-O	16	110	6	41	40	11	121	7	48
3003-H14	22	152	21	145	16	14	97	9	62
3003-H18	29	200	27	186	10	16	110	10	69
5052-O	28	193	13	90	30	18	124	16	110
5052-H34	38	262	31	214	14	21	145	18	124
5052-H38	42	290	37	255	8	24	165	20	138
6061-O	18	124	8	55	30	12	83	9	62
6061-T4	35	241	21	145	25	24	165	14	97
6061-T6	45	310	40	276	17	30	207	14	97
6063-O	13	90	7	48		10	69	8	55
6063-T4	25	172	13	90	22				
6063-T6	35	241	31	214	12	22	152	10	69
7001-O	37	255	22	152	14				
7001-T6	98	676	91	627	9			22	152
7075-O	33	228	15	103	16	22	152		
7075-T6	83	572	73	503	11	48	331	23	159

Nota: Propiedades comunes:

Densidad: 0.095 a 0.102 lb/pulg³ (2635 a 2829 kg/m³)

Módulo de elasticidad: 10 a 10.6 × 10⁶ psi (69 a 73 GPa)

Resistencia a la fatiga a 5 × 10⁶ ciclos

Para aplicaciones en diseño mecánico, la aleación 6061 es uno de los tipos más versátiles.

El aluminio debe la mayoría de sus aplicaciones a su baja densidad y a la resistencia mecánica relativamente elevada de sus aleaciones, aunque otros usos dependen de su resistencia a la corrosión, que es relativamente buena, de sus buenas propiedades para ser trabajado o de sus propiedades eléctricas o térmicas de conductividad y reflexividad. El aluminio comercial es un metal blando y dúctil, y se usa para muchas aplicaciones en las que no se desea una resistencia mecánica muy alta. Se consigue en formas producidas por extrusión o laminado y puede endurecerse o templarse por trabajo en frío, pero no por tratamiento térmico. Las aleaciones de aluminio poseen mejores características para ser fundidas y maquinadas y mejores propiedades mecánicas y, por lo tanto, se emplean con mayor extensión que el metal puro. La tabla 7.7 muestra la composición y propiedades típicas de algunas aleaciones de aluminio. [10]

Tabla 7.7. Composición y propiedades típicas a temperatura ambiente de aleaciones de aluminio forjado [10].

Designación de la aleación, Aluminum Association †	Composición nominal, % (el resto, aluminio)					Temple‡	Densidad, lb/pulg³	Conductividad eléctrica, %, IACS	Dureza Brinell, carga 500 kg, bola de 10 mm	Propiedades mecánicas				
	Cu	Si	Mn	Mg	Otros elementos					Resistencia de fluencia, § 1000 lb/pulg²	Resistencia a la tracción, 1000 lb/pulg²	Alargamiento, %, en 2 pulg	Límite de aguantar, 1000 lb/pulg²	
Aleaciones endurecibles por trabajo														
1100						0	0.098	59	23	5	13	35	5	
						H14			32	17	18	9	7	
3003			1.2			H18		57	44	22	24	5	9	
						0	0.099	50	28	6	16	30	7	
						H14		41	40	21	22	8	9	
5052				2.5	0.25 Cr	H18		40	55	27	29	4	10	
						0	0.096	40	47	13	28	25	16	
						H34		68	31	38	10	18		
5056			0.1	5.2	0.1 Cr	H38		40	77	37	42	7	19	
						0	0.095	29	65	22	42	35	20	
						H18		27	105	59	63	10	22	
Aleaciones susceptibles de tratamiento térmico														
2011	5.5				0.5 Pb	T3	0.102	40	95	43	55	15	18	
					0.5 Bi	T8			100	43	59	12	18	
2014	4.4	0.8	0.8	0.4		0	0.101	40	43	14	27	18	13	
						T4, 451			105	42	62	20	20	
						T6, 651			135	60	70	13	18	
Alealad 2014						0	0.101	40		10	25	21	18	
						T4, 451				37	61	22	37	
						T6, 651				60	68	10	41	
2017	4.0		0.5	0.5		0	0.101	45	45	10	26	22	13	
						T4, 451		30	105	40	62	22	18	
2024	4.4		0.5	1.5		0	0.100	50	47	11	27	20	13	
						T3			120	50	70	18	20	
Alealad 2024						T4, 351		30	120	47	58	20	20	
						0	0.100			11	26	20		
						T3				45	65	18		
2025	4.5	0.8	0.8			T4, 351				42	64	19		
2219	6.1		0.5			T6	0.101	40	110	37	58	19	18	
					0.15 Zr	0				11	25	18		
					0.10 V	T351				36	52	17		
					0.06 Ti	T851				51	66	10		
6053		0.7		1.3	0.25 Cr	0	0.097	45	130	8	16	35	8	
						T6		40	80	32	37	13	13	
6061	0.25	0.6		1.0	0.25 Cr	0	0.098	45	30	8	18	25	9	
						T6, 651			95	40	45	12	14	
6063		0.4		0.7		T0	0.098	50	25	7	13	25	8	
						T6		55	73	31	35	12	14	
7075	1.6			2.5	5.6 Zn	0	0.101		60	15	33	17		
					0.3 Cr	T6, 651		30	150	73	83	11	23	
Alealad 7075						0	0.101			14	32	17		
						T6, 651				67	76	11		
7178	2.0			2.7	0.3 Cr, 6.8 Zn	T6, 651				78	88	10		

Un punto muy importante por considerar en la selección del aluminio es la variación cíclica de su precio. El suministro de aluminio es inelástico porque la capacidad de los hornos no puede ampliarse rápidamente. En tanto que los componentes de aluminio cuestan menos

que los componentes de cobre o magnesio cuando la oferta excede la demanda, los componentes de magnesio y a veces también los conductores de cobre pueden resultar económicamente superiores cuando el aluminio se encuentra escaso. En casos extremos, una selección correcta hecha al diseñar un componente puede resultar incorrecta cuando se llega a su manufactura. [11]

Maquinado.

Muchas aleaciones de aluminio se maquinan con facilidad sin técnicas especiales. El aluminio puro y las aleaciones de Al-Mn son duros para maquinar, a no ser que se empleen herramientas especiales con mayor ángulo de salida que el acostumbrado por el acero. En general, dichas herramientas son semejantes a las usadas para labrar madera, aunque deben ser más duras.

Las herramientas duras de carburo cementado son casi esenciales para las aleaciones de Al-Si. Las aleaciones para fundición que contienen cobre y todas las aleaciones forjadas tratadas térmicamente tienen buena maquinabilidad.

Para los productos en los que las propiedades físicas se subordinan a la alta maquinabilidad, como en el trabajo que hacen las máquinas automáticas para tornillos, se emplea la aleación 2011. Las aleaciones de Pb y Bi hacen que esta aleación sea de fácil corte. [10]

7.3.2. Selección de Materiales

Una vez que se han revisado las características de los diferentes tipos de plásticos y aluminio que se encuentran en el mercado, procedemos a realizar una selección de dichos materiales, atendiendo a nuestras necesidades para la fabricación de las diferentes piezas de que consta el LUNAbot® y que no son comerciales.

En un principio se había propuesto que la estructura de las diferentes partes del LUNAbot® fueran de plástico **ABS**; es decir, que las partes que conforman el pie, la pierna y la pelvis del robot fueran de ese material, ya que es fuerte, tenaz y es muy resistente al impacto; además, es uno de los plásticos más utilizados en las industrias, sobretodo en la automotriz y en la de juguetes. Sin embargo, con el transcurso de la investigación, se observó que también es posible fabricar las piezas utilizando el plástico **PLA**, puesto que cuenta con buenas propiedades mecánicas, además de ser un plástico amigable con el ambiente ya que es un plástico biodegradable.

Por otra parte, también se ha propuesto que otras partes del LUNAbot® sean de **Aluminio**, que en este caso serían algunos pernos que conforman al pie, pierna y pelvis, y que estarán sometidos a posibles pares torsionales. Como también se mencionó anteriormente, es factible utilizar la aleación de **aluminio 6061** ya que es una aleación muy comercial y es versátil para diseños mecánicos.

Por último, se ha propuesto que se utilice **Nylon**, **Acetal** y **Caucho** para ciertas piezas que conforman la pata del robot; no obstante, es posible que también se utilicen para otras piezas que conforman tanto a la pierna como a la pelvis.

A continuación se muestran las principales características de los materiales que se han propuesto para el LUNAbot®.

7.3.2.1. Ácido Poliláctico (PLA)

El **Ácido Poliláctico (PLA)**, es un biopolímero termoplástico amorfo, semicristalino que se obtiene mediante la fermentación del ácido láctico, el cual, es una molécula quiral que posee dos esteroisómeros L-láctida y D-láctida y un meso isómero. Las propiedades físico-químicas obtenidas del PLA dependerán de los esteroisómeros utilizados durante la polimerización [12].

El PLA puede procesarse utilizando diversos métodos como la extrusión, inyección y moldeo que son métodos convencionales utilizados con otros polímeros.

El PLA tiene diversos campos de aplicación por ejemplo, en área de medicina se utiliza en la producción de hilo para sutura, implantes, cápsulas para la liberación lenta de fármacos, tornillos y clavos para fijación de fracturas, prótesis, producción de películas para la protección de cultivos en estadios primarios, etc. Mientras que en el área alimenticia se usa en la producción de envases y empaques para alimentos, entre otros. Debido a sus propiedades físico-químicas este biopolímero ha despertado el interés de investigadores, productores y procesadores ya que fuera de su degradabilidad, se ha encontrado que puede ser un gran competidor frente a otros plásticos de origen petroquímico. [13].

Producción.

El ácido poliláctico, PLA, es un poliéster termoplástico que forma parte de los α -hidroxiácidos; su precursor es el ácido láctico, molécula quiral. El lactido, monómero del ácido poliláctico, es una molécula que existe bajo 4 formas: L, D, meso y racémica.

El ácido láctico (ácido 2-hidroxipropanoico $\text{CH}_3 - \text{CHOH} - \text{COOH}$), el monómero simple de PLA, es producido vía fermentación o síntesis química. Sus 2 configuraciones ópticas activas, los estereoisómeros $D(-)$ y $L(+)$ son producidos por la fermentación bacteriana de carbohidratos. El ácido láctico utilizado en la polimerización para la producción de PLA debe ser de alta pureza.

En la fig. 7.16 se muestran los pasos para la producción del PLA.

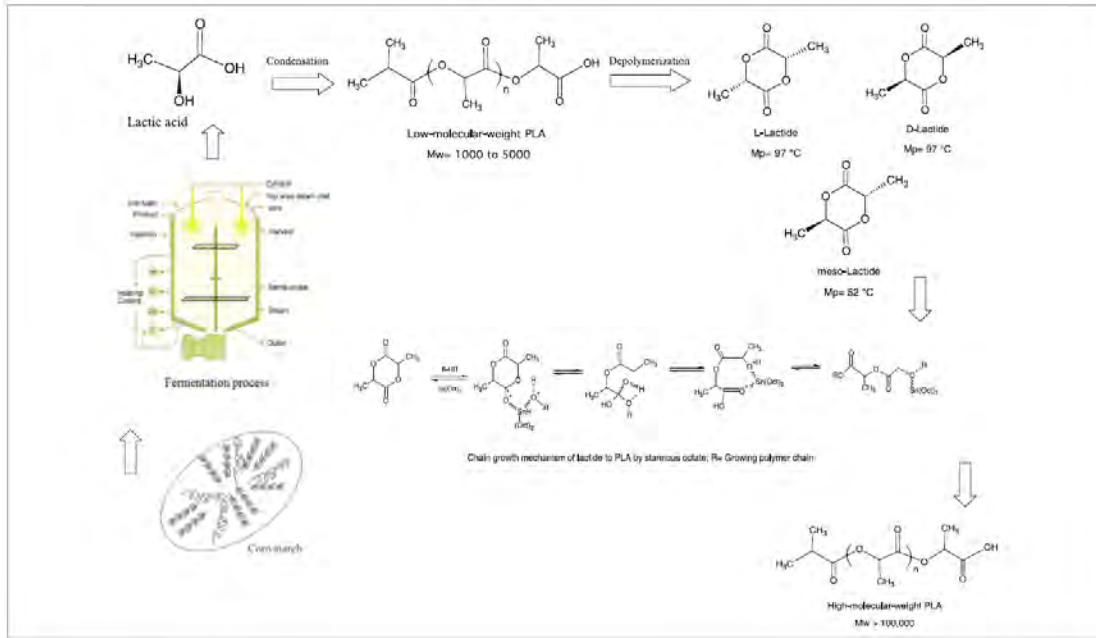


Fig. 7.16. Pasos para la producción actual del PLA [13].

Propiedades.

El PLA tiene propiedades únicas como una buena apariencia, alta resistencia mecánica y una baja toxicidad; y sus buenas propiedades de barrera han ampliado sus aplicaciones. Numerosos investigadores han estudiado las diferentes propiedades del PLA solo y en combinación con otros polímeros como mezcla o copolímero.

Existen muchas resinas de PLA para diferentes aplicaciones con diferentes propiedades; las características generales del PLA amorfo comercial, grado inyección de molde y teniendo un proporción de contenido L:D de 96:4. Estas características se sintetizan en la tabla 7.8.

Tabla 7.8. Características generales del PLA amorfo comercial en película, grado inyección de molde, L:D a 96:4, producido por NatureWorks® Co. [13]. (Continúa)

CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	UNIDADES
Físicas		
Peso Molecular	66000	<i>g/mol</i>
Gravedad Específica	1.27	-
Densidad en Sólido	1.2515	<i>g/cm³</i>
Densidad en forma Fundida	1.0727	<i>g/cm³</i>
Temperatura de transición a Cristal	55	°C
Temperatura de Fundición	165	°C
Calor Específico (Cp)		
190 °C	2060	<i>J/kg °C</i>
100°C	1955	
55°C	1590	
Conductividad Térmica		
190 °C	0.195	<i>W/m °C</i>
109°C	0.197	
48°C	0.111	

Tabla 7.8. Características generales del PLA amorfo comercial en película, grado inyección de molde, L:D a 96:4, producido por NatureWorks® Co. [13]. (Continuación)

CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	UNIDADES
Ópticas		
Transmisión de Luz UV 190 a 220 nm 225 a 250 nm > 300 nm	<5% 85% 95%	
Transmisión de Luz Visible Color L* a* b*	90.64±0.21 -0.99±0.01 -0.50±0.04	
Mecánicas		
Resistencia a la Tensión	59	MPa
Elongación a la Rotura	7.0	%
Módulo Elástico	3500	MPa
Módulo de Corte	1287	MPa
Módulo de Poisson	0.36	-
Resistencia al Punto Cedente	70	MPa
Resistencia a la Flexión	106	MPa
Impacto Izod sin Muesca	195	J/m
Impacto Izod con Muesca	26	J/m
Dureza Rockwell	88	HR
Temperatura de Deflexión Térmica	55	°C
Penetración Vicat	59	°C
Resistencia a la Tensión Última	73	MPa
Porcentaje de Elongación	11.3	%
Módulo de Young	1280	MPa

Aplicaciones.

El PLA tiene potencial para utilizarse en un rango amplio de aplicaciones; la tabla 7.9 muestra un resumen del PLA de NatureWorks® y fibras Ingeo™, las posibilidades y los ejemplos de productos comerciales disponibles de PLA [13].

Tabla 7.9. Segmentos de negocios para productos basados en plásticos y fibras de PLA de Ingeo™ (NatureWorks®) [13]. (Continúa)

Segmento de negocios	Aplicaciones disponibles comercialmente
Aplicaciones de plástico Ingeo	
Termoformas rígidas	Empaque transparente para frutas y vegetales frescos.
	Bandejas para fiambre de carne.
	Contenedores opacos para lácteos.
	Contenedores para pastelería, hierbas frescas y dulces.
	Embalaje de pantallas y electrónicos de consumo.
	Artículos desechables y tazas para bebidas frías.

Tabla 7.9. Segmentos de negocios para productos basados en plásticos y fibras de PLA de Ingeo™ (NatureWorks®) [13]. (Continuación)

Segmento de negocios	Aplicaciones disponibles comercialmente
Aplicaciones de plástico Ingeo	
Películas orientadas biaxialmente	Envolturas de caramelo para torsión
	Sobres y escaparates de cartón.
	Película de laminación.
	Productos de envoltura (canasta de regalos).
	Cubiertas de almacenaje.
	Troquel para corte de etiquetas.
	Envoltura floral.
	Cintas.
	Casquillos de contracción.
	Bolsas rectas.
	Bolsas para mezclas para pastel, cereales y pan.
Envases	Para leche de poca caducidad
	Para aceites comestibles
	Para agua enbotellada
Aplicaciones de fibras Ingeo	
Prendas	Casuales (de deportes) y artículos de ropa interior de moda.
Telas sin tejer	Toallitas, productos de higiene, pañales, forros de calzado, revestimiento de las puertas de automóviles y reforzamientos para papel.
Mobiliario	Mantas y paneles, tapicería y telas decorativas.
Alfombras industriales	Agrícola y geotextiles.
	Alfombra sin costuras y baldosas de alfombra residencial/institucional.
Fibra de relleno	Almohadas, edredones, colchones y muebles.

7.3.2.2. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

El **Acrilonitrilo Butadieno Estireno** o **ABS** es un plástico muy resistente al impacto (golpes) muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos. Es un termoplástico amorfo.

Se le llama plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes, como son las polioleofinas (polietileno, polipropileno). El acrónimo deriva de los tres monómeros utilizados para producirlo: acrilonitrilo, butadieno y estireno. Por estar constituido por tres monómeros diferentes se lo denomina terpolímero (copolímero compuesto de tres bloques).

Estructura.

La estructura del ABS es una mezcla de un copolímero vítreo (estireno- acrilonitrilo) y un compuesto elástico principalmente el polímero de butadieno. La estructura con la fase

elastómera del polibutadieno (forma de burbujas) inmersa en una dura y rígida matriz SAN (fig. 7.17).

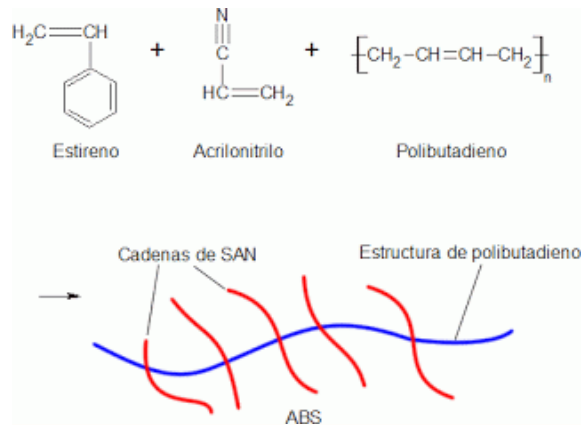
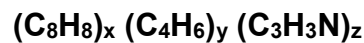


Fig. 7.17. Composición del ABS [42].

Por lo tanto, la fórmula química del ABS es:



El ABS es un plástico más fuerte, por ejemplo, que el poliestireno debido a los grupos nitrilo. Estos son muy polares, así que se atraen mutuamente permitiendo que las cargas opuestas de los grupos nitrilo puedan estabilizarse. Esta fuerte atracción sostiene firmemente las cadenas de ABS, haciendo el material más fuerte. También el polibutadieno, con su apariencia de caucho, hace al ABS más resistente que el poliestireno.

Propiedades.

Las tablas 7.10 y 7.11 muestran las propiedades cualitativas y las propiedades cuantitativas generales del ABS, respectivamente.

Tabla 7.10. Propiedades cualitativas del ABS [42]. (Continúa)

Resistencia a la abrasión	Alta.
Permeabilidad	Todos los grados son considerados impermeables al agua, pero ligeramente permeables al vapor.
Propiedades relativas a la fricción	No los degradan los aceites son recomendables para cojinetes sometidos a cargas y velocidades moderadas.
Estabilidad dimensional	Es una de las características más sobresalientes, lo que permite emplearla en partes de tolerancia dimensional cerrada. La baja capacidad de absorción de la resina y su resistencia a los fluidos fríos, contribuyen a su estabilidad dimensional.
Pigmentación	La mayoría de estas resinas, están disponibles en colores estándar sobre pedido, se pueden pigmentar aunque requieren equipo especial.

Tabla 7.10. Propiedades cualitativas del ABS [42]. (Continuación)

Facilidad de unión	Se unen fácilmente entre sí y con materiales plásticos de otros grupos mediante cementos y adhesivos
Capacidad de absorción	Baja.
Propiedades ambientales	La exposición prolongada al sol produce una capa delgada quebradiza, causando un cambio de color y reduciendo el brillo de la superficie y la resistencia a la flexión. La pigmentación en negro provee mayor resistencia a la intemperie.
Resistencia química	Generalmente buena aunque depende del grado de la resina, de la concentración química, temperatura y esfuerzos sobre las partes. En general no son afectadas por el agua, sales inorgánicas, álcalis y por muchos ácidos. Son solubles en ésteres, acetona, aldehídos y en algunos hidrocarburos clorados.
Formado	Se adaptan bien a las operaciones secundarias de formado. Cuando se calientan, los perfiles extruidos, se pueden doblar y estampar.
Facilidad de maquinado	Sus características son similares a las de los metales no ferrosos, se pueden barrenar, fresar, torneear, aserrar y troquelar.
Acabados superficiales	Pueden ser acabados mediante metalizado al vacío y electroplateado.
Resistencia a la fatiga	Se presenta para cargas cíclicas o permanentes mayores a 0.7 Kg mm ² .
Recocida	Se mantiene 5° C arriba de la temperatura de distorsión durante 2 a 4 horas.

Tabla 7.11. Propiedades cuantitativas del ABS [42].

Propiedades	Método ASTM	Unidad	Grados de ABS			
			Alto Impacto	Impacto Medio	Bajo Impacto	Resistente al Calor
Mecánicas a 23 °C						
Resistencia al impacto, prueba IZOD	D2546	J/m	375 – 640	215 – 375	105 – 215	105 – 320
Resistencia a la tensión	D638	kg/mm ²	3.3 – 4.2	4.2 – 4.9	4.2 – 5.3	4.2 – 5.3
Elongación	D638	%	15 – 70	10 – 50	5 – 30	5 – 20
Módulo de tensión	D638	GPa	1.73 – 2.14	2.14 – 2.55	2.14 – 2.65	2.14 – 2.65
Dureza	D785	HRC (Rockwell)	88 – 90	95 – 105	105 – 110	105 – 110
Densidad	D792	g/cm ³	1.02 – 1.04	1.04 – 1.05	1.05 – 1.07	1.04 – 1.06
Térmicas						
Coefficiente de expansión térmica	D696	x10 ⁵ cm/cm * °C	9.5 – 11.0	7.0 – 8.8	7.0 – 8.2	6.5 – 9.3
Distorsión por calor	D648	°C a 18.4 kg/cm ²	93 – 99	96 – 102	96 – 104	102 – 112

Usos y Aplicaciones.

a) *Industria automotriz.*

- + El ABS se caracteriza por ser un material muy fuerte y liviano, lo suficientemente fuerte como para ser utilizado en la fabricación de piezas para automóviles. El empleo de plásticos como ABS hace más livianos a los autos, lo que promueve una menor utilización de combustible.
- + Se utiliza tanto en el interior como en el exterior. Se puede nombrar el panel de instrumentos, consolas, cobertores de puertas y otras partes decorativas del interior. En cuanto a aplicaciones del exterior del automóvil pueden ser la parrilla del radiador, cuna de faros, alojamiento del espejo, defensas o parachoques.
- + Los autos pueden tener 12 Kg o más de ABS c/u.

b) *Electrodomésticos.*

- + Se utiliza en el recubrimiento interior y exterior de las puertas de las heladeras y refrigeradores.
- + En carcasas de aparatos eléctricos como taladros, televisiones, radios, aspiradoras, máquinas de coser y secadores de pelo.
- + Otra aplicación muy común dentro de este grupo es en máquinas de oficina, carcasas de computadoras y teléfonos.

c) *Juguetes.*

- + El ABS es muy utilizado en juguetes, sobre todo en los bloques de LEGO y en los juegos de Airsoft (pistolas y rifles).
- + También se utiliza en las piezas plásticas de casi todas las figuras de acción de la compañía de juguetes BANDAI.

d) *Otros.*

- + El ABS también suele usarse en tubos, accesorios, particularmente en las tuberías de drenaje, desagüe, ventilación de los edificios y juntas [42].

7.3.2.3. Aleación de Aluminio 6061-T6

El **Aluminio 6061** es una aleación de aluminio endurecido que contiene como principales elementos aluminio, magnesio y silicio. Originalmente denominado “aleación 61S” fue desarrollada en 1935.

Tiene buenas propiedades mecánicas y para su uso en soldaduras. Es una de las aleaciones de aluminio más comunes para uso general. Se emplea comúnmente en formas pre templadas como el 6061-O y las templadas como el 6061-T6 y 6061-T651.

Composición Química.

La proporción de aluminio debe oscilar entre el 95.85 y el 98.56 por ciento, mientras que el resto de elementos de la aleación atiende a los márgenes establecidos en la tabla 7.12, sin que existan otros elementos (distintos a los señalados en la tabla) en proporciones superiores a 0.05 de forma individual ni el 0.15 % en total:

Tabla 7.12. Cantidad mínima y máxima de elementos presentes en la aleación 6061 [43].

ELEMENTO	MÍNIMO (%)	MÁXIMO (%)
Silicio	0.4	0.8
Hierro	0.0	0.7
Cobre	0.15	0.4
Manganeso	0.0	0.15
Magnesio	0.8	1.2
Cromo	0.04	0.35
Zinc	0.0	0.25
Titanio	0.0	0.15

Propiedades Físicas.

La tabla 7.13 muestra las propiedades físicas con que cuenta la aleación de aluminio 6061.

Tabla 7.13. Propiedades físicas de la aleación 6061 [43].

Densidad (g/cm^3)	2.7	Coef. de dilatación térmica (0 a 100 °C) ($^{\circ}C^{-1} \times 10^6$)	23.6
Rango de fusión (°C)	575 – 650	Conductividad térmica (0 a 100 °C) ($W/m^{\circ}C$)	Temple T6: 167
Módulo de elasticidad (MPa)	69 500	Resistividad a 20 °C ($\mu\Omega \cdot cm$)	Temple T6: 4.0
Coeficiente de Poisson	0.33	Calor específico (0 a 100 °C)	940
Dureza Brinell	65		

Propiedades Tecnológicas.

La tabla 7.14 muestra las principales propiedades tecnológicas con las que cuenta la aleación de aluminio 6061.

Tabla 7.14. Propiedades tecnológicas de la aleación 6061 [43].

PROCESO	CLASIFICACIÓN	PROCESO	CLASIFICACIÓN
<u>Soldabilidad:</u> Electrón Beam Gas inerte Por resistencia Brazing	A B B B	<u>Resistencia a la Corrosión:</u> Agentes atmosféricos Ambiente marino	A B
<u>Maquinabilidad:</u> Corte de viruta Brillo de superficie mecanizada	C A	<u>Anodizado:</u> Protección Brillante Duro	A C A

Clasificación: (A) Muy buena – (B) Buena – (C) Aceptable – (D) Pobre o No Recomendable

Usos.

Es usado en todo el mundo para los moldes de inyección y soplado, construcción de estructuras de aeronaves, como las alas y el fuselaje de aviones comerciales y de uso militar; en refacciones industriales, en la construcción de yates, incluidos pequeñas embarcaciones, en piezas de automóviles, en la manufactura de latas de aluminio para el empaquetado de comida y bebidas. Es fácil de maquinar y resistente a la corrosión [43].

7.3.2.4. Nylon (Poliamidas)

Las poliamidas (alifáticas) o nylon difieren de los polímeros tipo polietilenos en que tienen grupos polares CONH separados a intervalos regulares a lo largo de la cadena alifática. Los grupos polares ocasionan que los polímeros cristalicen con una alta interacción molecular mientras que los segmentos intermedios de cadena alifática proporcionan flexibilidad en la zona amorfa. En principio las poliamidas o nylon se forman por la condensación de una diamina con un ácido dicarboxílico (fig. 7.18).

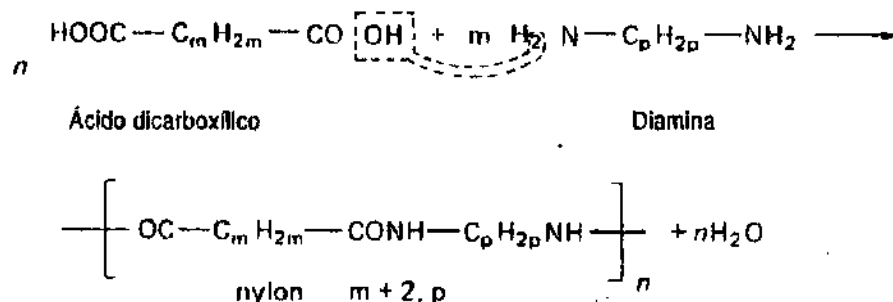


Fig. 7.18. Reacción de formación de poliamidas o nylon [11].

Los nylon se clasifican por números de acuerdo con el número de átomos de carbono ($m + 2, p$) en el material o materiales con los que se forman. Así el nylon 6, que está formado por caproláctum, que contiene seis átomos de carbono, tiene la fórmula mostrada en la fig. 7.19.

El número o números miden la separación de los grupos CONH en la cadena. Mientras más próximos estén los grupos CONH mayor es el punto de fusión, la temperatura de deflexión de calor, la resistencia a la tensión, la dureza, la resistencia a la fluencia e hidrocarburos y la absorción de agua.

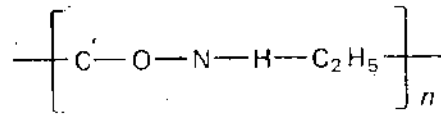


Fig. 7.19. Estructura del nylon 6 [11]

El nylon 6 y el nylon 66, que tienen grupos CONH relativamente cercanos (figuras 7.19 y 7.20), son muy adecuados para la producción de fibras que toman entre 80% y 85% de su producción. Esto le da a esos dos grados una ventaja de economía de escala de modo que los otros grados sólo se usan cuando el nylon 6 y el nylon 66 se usan sobre todo en aplicaciones de ingeniería en los que resultan ventajosas sus buenas propiedades antifricción, pero recientemente las resinas acetálicas, que son superiores en todo excepto en tenacidad (la tenacidad del nylon se incrementa con la absorción de agua), han empezado a competir con los nylon.

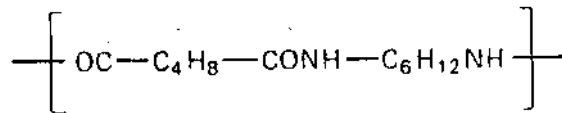


Fig. 7.20. Estructura del nylon 66 [11].

Los nylon 11 y 12 se usan para aislamiento eléctrico en el que la absorción de agua puede ser crítica. Los nylon rellenos de vidrio, como el ICI Verton, de fibras largas alineadas, están ganando una parte considerable en el mercado [11].

Algunos fabricantes o proveedores de nylon le dan un determinado nombre comercial a sus productos, como por ejemplo Nylomaq de la proveedora de materiales La Paloma o Nylamid el cual manejan otros proveedores. A continuación se muestra las especificaciones que nos da el proveedor sobre el nylon nombrado comercialmente "Nylomaq".

El *Nylomaq*, por sus buenas propiedades mecánicas, rigidez, dureza, tenacidad, bajo coeficiente de fricción, resistencia al desgaste y facilidad de maquinado es considerado como la primera alternativa para la fabricación de componentes sometidos al desgaste y elementos estructurales.

Para mejorar sus propiedades según el uso de aplicación, el Nylomaq ofrece una amplia variedad de opciones que a continuación se mencionan junto con sus principales aplicaciones y características. Cada uno de los Nylon mencionados a continuación viene en un amplio rango de presentaciones y medidas.

Aplicaciones Generales.

Cojinetes, ruedas, engranes, poleas, catarinas, guías de desgaste, rodillos, insertos, tolvas, aislantes eléctricos, aislantes térmicos, moldes, prototipos, gusanos alimentadores, estrellas, mandriles, empaques, slippers, raspadores, sellos, etc.

Nylon por Vaciado.

- a) **NYLOMAQ “M” (Color hueso).**- M=Mecánico. Nylon sin aditivos. Combina una adecuada resistencia mecánica, rigidez y dureza junto con una buena resistencia al desgaste. Aprobada para trabajar en contacto con los alimentos según la norma NMX-E-202-1993-SCFI. Muy buena estabilidad dimensional libre de esfuerzos internos.
- b) **NYLOMAQ “SL” (Negro).**- SL = Súper Lubricado. Es un Nylon súper lubricado de alta calidad con pequeñas partículas de disulfuro de molibdeno (MoS₂), dispersas homogéneamente que mejoran sus propiedades de resistencia al desgaste. Tiene un incremento en la dureza superficial que brinda excelente maquinabilidad y mejores propiedades antifricción. (Poleas)
- c) **NYLOMAQ “XL” (Verde).**- XL = Extra Lubricado Es un nylon de muy alta calidad ya que contiene una carga de aceite para reducir aún más su coeficiente de fricción, desgaste y además es de baja absorción de humedad. Tiene como resultado un incremento muy importante en su vida media. El lubricante que se añade en este Nylon jamás migrará a la superficie, escurrirá o se secará.
- d) **NYLOMAQ “TS” (Ámbar o Amarillo).**- TS = Tabla de Suaje. Formulación especial del Nylon cuya característica principal es su alta resiliencia, la cual brinda gran rendimiento, versatilidad y calidad de corte en el proceso de suajado (corte) industrial de piel, cuero materiales sintéticos, textiles, etc. Este material protege las herramientas de corte y permiten un mejor acabado.
- e) **NYLOMAQ “HS-BLUE” (Azul).**- Nylon estabilizado al calor a temperaturas de operación hasta de 127°C. Ofrece mayor tenacidad, flexibilidad y resistencia a la fatiga, lo cual le permite operar satisfactoriamente en aplicaciones a temperaturas elevadas sin perder sus propiedades mecánicas. Es resistente a la luz ultravioleta.
- f) **NYLOMAQ “NSM” (Gris o Rojo).**- Es un Nylon que soporta mucha presión y fricción. Contiene lubricantes sólidos en forma de aditivos que proporcionan a éste material excelentes propiedades de fricción, autolubricación, resistencia al desgaste, y un límite del factor Presión-Velocidad excepcional. (5 veces superior al de otros Nylon vaciados). Aguenta hasta 120°C.
- g) **NYLOMAQ EXTRUÍDO (6/6) “B” (Blanco).**- De todos los Nylon sin modificar, éste es el más fuerte, el más rígido y tiene uno de los más altos puntos de fusión. Este Nylon también es aprobado para trabajar en contacto directo con los alimentos de consumo humano por la FDA [44].

En la tabla 7.15 se muestran las principales propiedades de los tipos de Nylomaq.

Tabla 7.15. Propiedades de los tipos de Nylomaq (La Paloma compañía de metales S.A de C.V) [44].

Tipo Nylomaq / Propiedades	Unidades	NYLOMAQ "M"	NYLOMAQ "SL"	NYLOMAQ "XL"	NYLOMAQ "TS"	NYLOMAQ HS-BLUE	NYLOMAQ "NSM"	NYLOMAQ 6/6 "B"
Gravedad Específica, 73°F	-	1.15	1.16	1.15	1.00	1.15	1.15	1.15
Resistencia a la Tensión, 73°F	psi	12,000	11,000	12,000	8,755	12,000	11,000	11,500
Modulo de Elasticidad a la Tensión, 73°F	psi	400,000	400,000	400,000	3,900	400,000	410,000	425,000
Elongación a la Ruptura, 73°F	%	20	30	20	-	20	20	50
Resistencia a la Flexión, 73°F	psi	16,000	16,000	16,000	1,560	16,000	16,000	15,000
Resistencia a la Compresión, 10% de Deformación, 73°F	psi	15,000	14,000	15,000	7,110	15,000	14,000	12,500
Dureza, Rockwell, 73°F	-	M85(R115)	M80(R110)	M85(R115)	-	M85(R115)	M80(R110)	M85(R115)
Coefficiente de Fricción Dinámico (En seco vs. Acero)	-	0.2	0.2	0.2	-	0.2	0.18	0.25
Factor de Desgaste "k" x 10 ⁻¹⁰ (in ² min/ft. lbs. hr.)	←	100	90	100	-	100	9	80
Conductividad Térmica (BTU in./hr. ft. ² °F)	←	1.7	-	1.7	-	1.7	-	1.7
Coef. de Expansión Térmica Lineal (de -40°F a 300°F)	in./in./°F	3.5x10 ⁻⁵	3.5x10 ⁻⁵	3.5x10 ⁻⁵	-	3.5x10 ⁻⁵	5.0x10 ⁻⁵	5.5x10 ⁻⁵
Temp. de Servicio Continuo en Aire (Máx.) (1)	°F	200	200	200	-	260	200	210
Constante Dieléctrica 106 Hz	-	3.7	3.7	3.7	-	3.7	-	3.6
Absorción de Agua por Inmersión, en 24 Horas	% por peso	0.3	0.3	0.3	-	0.3	0.25	0.3

Una vez que se ha revisado esta información, se propone que se utilice el **Nylomaq "M"**, ya que cuenta con buenas propiedades de resistencia mecánica, rigidez, dureza y buena resistencia al desgaste, y que se utilizará para el componente que sube y baja el Pie del LUNAbot®.

7.3.2.5. Resina de Acetal

El **acetal** es una resina termoplástica comúnmente utilizada para aplicaciones de moldeo por inyección. Las resinas de acetal, o técnicamente llamados polioximetilenos (POM), se encuentran entre los más fuertes y más rígidos de los termoplásticos. Los copolímeros de acetal son bien conocidos por su resistencia a la fatiga y al desgaste, así como alta resistencia química y estabilidad dimensional.

Las resinas de acetal proporcionan una consistencia excepcional de características y de color. Tienen resistencia excepcional a los disolventes, y no son afectados por bases fuertes. Los acetales son rígidos, resistentes a la fluencia y fuertes. Poseen bajos coeficientes de fricción, y permanecen estables a altas temperaturas, incluso para un uso prolongado [45].

Este plástico de Ingeniería es un copolímero color blanco o negro, producido por extrusión, que sirve para fabricar partes de gran precisión. Este material provee alta resistencia y rigidez en combinación con su excelente estabilidad dimensional y elevado módulo de elasticidad. Es de fácil maquinado.

El acetal es caracterizado por su bajo coeficiente de fricción, su resistencia al desgaste y buena resistencia a la abrasión. Tiene alta resistencia a impactos repetidos y gran resistencia a la humedad, gasolinas, solventes, así como a otras sustancias químicas neutras.

Su baja absorción de humedad brinda excelente estabilidad dimensional en el maquinado de partes con tolerancia cerrada y además conserva sus propiedades físicas en una gran variedad de ambientes [46].

Un acetal es una molécula con dos grupos alcoxi, unidos a un mismo átomo de carbono. Se suele diferenciar a los acetales de los cetales. Mientras que el átomo de carbono funcional de los cetales está unido necesariamente a dos átomos de carbono, en los acetales al menos una de las valencias la ocupa un átomo de hidrógeno. Sin embargo, las definiciones actuales consideran a los cetales como un subgrupo de los acetales.

Los acetales se preparan a partir de un aldehído y una cetona correspondiente, y un alcohol, en presencia de ácido mineral [15].

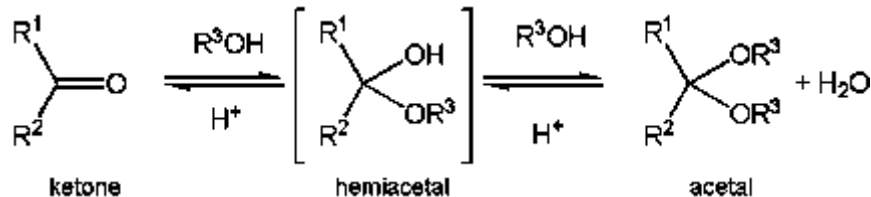


Fig. 7.21. Formación del acetal [15].

Tabla 7.16. Propiedades del Acetal (La Paloma compañía de metales S.A de C.V) [46].

PROPIEDADES	CANTIDAD	UNIDADES
Gravedad Especifica, 23°C	1.41	-
Resistencia a la Tensión, 23°C	668	kg/cm ²
Módulo de Elasticidad a la Tensión, 23°C	28,124	kg/cm ²
Elongación a la Ruptura, 23°C	30	%
Resistencia a la Flexión, 23°C	844	kg/cm ²
Resistencia a la Compresión, 10% de Deformación, 23°C	1,055	kg/cm ²
Dureza Rockwell, 23°C	M88 (R120)	-
Dureza escala Shore D, 23°C	D85	-
Coeficiente de Fricción Dinámico (En seco vs. Acero)	0.25	-
Punto de Fusión	168	°C
Conductividad Térmica	0.31	W/(K · m)
Resistencia Dieléctrica Corto Tiempo	420	Volts/mil
Coeficiente de Expansión Térmica Lineal (de -40°C a 149°C)	110x10 ⁻⁶	m/(m · K)
Temperatura de Servicio Continuo en Aire (Máx.)	82	°C
Constante Dieléctrica 10 ⁶ Hz	3.8	-
Absorción de Agua por Inmersión, en 24 Horas	0.2	% por peso

Usos.

Por lo general, este tipo de Acetal es utilizado para fabricar aisladores eléctricos que requieren resistencia y rigidez.

También es utilizado para trabajar en contacto con los alimentos y en aplicaciones médicas.

Ejemplos.

Cojinetes, componentes eléctricos, soportes estructurales, raspadores, engranes, ruedas, rodillos, sellos para válvulas, arneseras, etc. [46].

Al revisar la información anterior, se propone que se utilice el acetal para los sistemas de engranes que estarán presentes en las partes principales del LUNAbot®, debido a que también este material se autolubrica y no habría la necesidad de engrasarlo.

7.3.2.6. Caucho (Elastómeros)

Los elastómeros o cauchos se han usado en la ingeniería durante algo más de 100 años. Actualmente, los elastómeros son una clase grande y creciente de materiales. En un extremo del espectro, el caucho natural (NR) y los cauchos sintéticos como el caucho cloropreno (CR) son materiales suaves que tienen la capacidad de sufrir alargamientos de varios cientos por ciento y recuperar rápidamente su forma original cuando la fuerza que los deforma se retira; en el otro extremo se encuentran algunos de los elastómeros termoplásticos (TPE) que son más duros y menos elásticos. La deformación del caucho, tanto lineal como angular (cortante) combinada con su casi incompresibilidad, implica que a menudo es necesario usar procedimientos particulares de análisis de esfuerzos con esos materiales.

Muchos aspectos de la vida contemporánea, como el transporte por carretera, serían mucho más difíciles, ruidosos y menos cómodos si no fuera por los elastómeros; sin embargo, los elastómeros siguen siendo subexplotados. Esto se explica en parte por las dificultades de modelar su comportamiento mecánico, en particular cuando están rellenos. Además los elastómeros son a menudo mal caracterizados. Con mucha frecuencia se consideran como materiales marginales o de segunda. En realidad, son los materiales naturales a considerar en muchas situaciones en que se requiere un resorte, una articulación o un cojinete. La gama cada vez más amplia de propiedades mecánicas y ambientales disponibles en los elastómeros ofrece a los diseñadores un recurso valioso y un reto a su ingenio [11].

La tabla 7.17 muestra algunos de los productos que maneja la empresa PHASA y que es fabricante y proveedora de productos hechos de caucho en México.

Tabla 7.17. Productos de caucho que maneja la empresa PHASA [47]. (Continúa)

PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS	USOS Y APLICACIONES
Neopreno® Comercial en Rollo <1600>	• Acabado liso espejo en ambas caras. • Desde 0.4mm (1/64") hasta 25.4mm (1") de espesor. • Anchos de 1m y 1.22m. • Rollos de 10m De longitud. • Dureza 65° Shore "A" +/-5° (ASTM D-2240). • Resistencia a la tensión: 600 psi.	Se utiliza para elaborar sellos, juntas roldanas o empaques que estarán constantemente en contacto con agua, vapor polvo, etc. y que estarán expuestos a intemperie. Puede tener contacto eventual con grasas, aceites y otros hidrocarburos sin perder sus propiedades. En México también se utiliza como soporte de maquinaria en todo tipo de industrias. En construcciones se utiliza como efectivo aislante de vibraciones. Su rango de temperaturas de operación va de -20°C a 80°C.
Neopreno® Comercial en Placa <1100>	• Acabado liso (espejo) en ambas caras. • Desde 1.6mm (1/16") hasta 76.2mm (3") de espesor. • Placas de 1m x 1m. • Dureza 65° Shore "A" +/-5° (ASTM D-2240). • Resistencia a la tensión: 600 psi. • Peso específico: 1.45 g/cm³.	El neopreno en placa o lámina de neopreno se utiliza en México principalmente para elaborar juntas, sellos, roldanas o empaques, que estarán en constante contacto con agua, vapor o polvo, es decir: expuestos a la intemperie. Puede tener contacto eventual con grasas, aceites y otros hidrocarburos, sin perder sus propiedades. Este elastómero también es utilizado como soporte de maquinaria en todo tipo de industrias. En construcciones, se coloca como efectivo aislante de vibraciones, ruido y temperatura. Rango de Temperatura: De -20°C a 80°C.
Hule con Inserción de Tela <603>	• Acabado liso o textil en ambas caras. • Desde 1.6mm (1/16") hasta 12.7mm (1/2") de espesor. • Rollos de 1.22m de ancho x 10m de longitud. • Dureza 65° Shore "A" +/-5° (ASTM D-2240). • 1 capa de poliéster por cada 1/16" de espesor. • En 3/8" y 1/2" de espesor, lleva 4 capas.	Se utiliza para elaborar juntas, sellos, roldanas o empaques, que estarán en constante contacto con agua, vapor o polvo y requieran alta resistencia a la presión y al desgarre. El contacto con derivados del petróleo deberá ser eventual. Rango de Temperatura: De -20°C a 80°C.

Tabla 7.17. Productos de caucho que maneja la empresa PHASA [47]. (Continuación)

PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS	USOS Y APLICACIONES
Hule Natural Puro Ámbar <490>	• Acabado liso en ambas caras. • Desde 1.6mm (1/16") hasta 25.4mm (1") de espesor. • Anchos de 1m y 1.22m. • Rollos de 10m de longitud. • Dureza 45° Shore "A" +/-5° (ASTM D-2240). • Resistencia a la tensión: 2000 psi. • Buena resistencia a los ácidos.	Se utiliza para elaborar juntas, sellos, roldanas, empaques, o recubrimientos que requieran excelente resiliencia, muy buena resistencia al desgaste, abrasión, impacto, y corrosión. Las aplicaciones más comunes que se dan al HULE NATURAL PURO AMBAR se encuentran en la minería que presenta entornos abrasivos muy severos. Rango de Temperatura: De -40°C a 85°C.
Hule SBR Rojo <660>	• Acabado liso o textil en ambas caras. • Desde 1.6mm (1/16") hasta 6.3mm (1/4") de espesor. • Anchos de 1m. Y 1.22m. • Dureza 75° shore "A" +/-5° (ASTM D-2240). • Resistencia a la tensión: 500 psi. • Peso específico: 1.60 g/cm³.	Se utiliza para elaborar juntas, sellos, roldanas o empaques, que estarán en constante contacto con agua, vapor, polvo, etc. Este producto tiene resistencia moderada a la abrasión. No se recomienda para entrar en contacto con derivados del petróleo, ni para estar expuesto a la intemperie. Rango de Temperatura: De -20°C a 80°C.
Nitrilo Negro <700>	• Acabado liso en ambas caras. • Desde 1.6mm (1/16") hasta 6.3mm (1/4") de espesor. • Anchos de 1m y 1.22m. • Dureza 65° Shore "A" +/-5° (ASTM D-2240). • Resistencia a la tensión de: 750psi. • Peso específico: 1.45g/cm³.	Se utiliza para elaborar juntas, sellos, roldanas o empaques, que estarán en constante contacto con aceite, gasolina, solventes, acetona, esmalte, grasa, o cualquier hidrocarburo. Muy buena resistencia a la fricción. Buena adhesividad al acero. Rango de Temperatura: De -25°C a 90°C.
Neopreno® Alta Calidad <800>	• Acabado liso en ambas caras. • Desde 1.6mm (1/16") hasta 6.3mm (1/4") de espesor. • Anchos de 1m y 1.22m. • Dureza 65° shore "A" +/-5° (ASTM D-2240). • Resistencia a la tensión: 750 psi. • Peso específico: 1.45 g/cm³.	Se utiliza para elaborar juntas, sellos, roldanas o empaques, que estarán en constante contacto con agua, vapor, polvo, etc., expuestos a la intemperie. Puede tener contacto con grasas, aceites, solventes, ácidos diluidos, así como productos químicos inorgánicos Muy efectivo cuando se somete a altas temperaturas. Buena adhesión al metal. Rango de Temperatura: De -30°C a

	120°C.
--	--------

Tabla 7.17. Productos de caucho que maneja la empresa PHASA [47]. (Continuación)

PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS	USOS Y APLICACIONES
Hule EPDM en Rollo <115>	• Acabado liso en ambas caras. • Desde 1.6mm (1/16") hasta 6.3mm (1/4") de espesor. • Anchos de 1m y 1.22m. • Dureza 65° Shore "A" +/-5° (ASTM D-2240). • Resistencia a la tensión: 900 psi. • Peso específico: 1.30 g/cm³.	Se utiliza para elaborar juntas, sellos, roldanas o empaques, que estarán expuestos a la intemperie, cambios bruscos de temperatura, y/o condiciones climatológicas. Muy buena resistencia a ácidos diluidos, y buena resistencia a ácidos concentrados. Las aplicaciones más comunes del HULE EPDM se encuentran en la Industria Automotriz y Carrocera. Rango de Temperatura: De -40°C a 130°C
Vitón® (Flouroelastómero) <10318>	• Acabado liso en ambas caras. • Desde 1.6mm (1/16") hasta 6.3mm (1/2") de espesor. • Anchos de 1m y 1.22m. • Dureza 75° Shore "A" +/-5° (ASTM D-2240). • Resistencia a la tensión: 900 psi. • Peso específico: 1.8 g/cm³.	Se utiliza para elaborar juntas, sellos, roldanas o empaques, que requieran una extraordinaria resistencia a temperaturas extremas, y estén sometidos a contacto con cualquier tipo de hidrocarburos, así como a la intemperie, ácidos concentrados o diluidos, y álcalis. Una característica del VITÓN® es el ser ignífugo, es decir, no se prende cuando se le expone al fuego. Rango de Temperatura: De -50°C a 300°C.
Piezas Moldeadas	• Fabricamos en la calidad requerida dependiendo de la aplicación. • Dureza: desde 20° hasta 95° Shore A. • Dureza: entre 20° y 95° Shore A. • Insertos metálicos. • Adhesiones a metal. • Insertos de lona. • Diferentes colores. • Cualquier tamaño. • Cualquier cantidad. • Asesoría técnica.	Tenemos la capacidad de fabricar piezas moldeadas de acuerdo a características, especificaciones y aplicaciones especiales, apegándonos a diseños o muestras físicas. O bien, desarrollando el diseño con altos estándares de ingeniería. Contamos con la flexibilidad de maquilar con moldes proporcionados por el cliente o fabricar los moldes necesarios. Podemos fabricar en una gran diversidad de materiales como: HULE NATURAL, SBR, NITRILO, EPDM, NEOPRENO, SILICÓN, HY-PALON, VITÓN, NITRILO SANITARIO, POLIURETANO, TEFLÓN, PVC, NYLON, POLIPROPILENO, TERMOPLÁSTICO, ETC.

De la información anterior, podemos decir que utilizaremos el **Neopreno** en forma moldeada, ya que la pieza que se requiere de este material y que forma parte del Pie del LUNAbot®, es más sencillo que se produzca en molde que se machine debido a su geometría.

7.3.3. Diseño preliminar del LUNAbot W6 VJ1.0®

Como se mencionó anteriormente, el diseño del robot se ha dividido en 3 partes principales: *Pie, Pierna y Pelvis*; dichas partes son sub-ensambles que constan de diferentes piezas.

Para el diseño de estas piezas se tomaron en cuenta los criterios de diseño que se mencionan en el apartado 7.2, además del tipo de material de que estarán conformadas y que serán, algunas de ellas, analizadas mediante elemento finito para comprobar que su diseño es óptimo; es decir, su resistencia estructural es aceptable para su posterior fabricación.

Cabe mencionar que la mayoría de las piezas se ha decidido diseñarlas en PLA, con espesores de pared de entre 1.75 y 2.00 mm.

A continuación se muestran las piezas que conforman al LUNAbot®.

7.3.3.1. Componentes del Pie

Las diferentes piezas que forman parte del Pie del LUNAbot®, tanto las que se fabricarán como las comerciales, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7.18. Componentes que conforman al Pie del LUNAbot®. (Continúa)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes para Fabricación				
Lb-W6-VJ1-PE101	Pie	Plástico PLA		1
Lb-W6-VJ1- PE102	Tornillo Elevador de Pata	Nylomaq "M"		1

Lb-W6-VJ1- PE103	Tuerca de Tornillo Elevador de Pata	Nylomaq "M"		1
------------------	-------------------------------------	-------------	---	---

Tabla 7.18. Componentes que conforman al Pie del LUNAbot®. (Continuación)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes para Fabricación				
Lb-W6-VJ1- PE104	Plataforma para Motor	Plástico PLA		1
Lb-W6-VJ1- PE105	Telescopio Guía de Plataforma Parte A	Plástico PLA		4
Lb-W6-VJ1- PE106	Telescopio Guía de Plataforma Parte B	Plástico PLA		4
Lb-W6-VJ1- PE107	Conector de Motor y Tornillo Elevador	Acetal		1
Lb-W6-VJ1- PE108	Soporte de Motor	Plástico PLA		1
Lb-W6-VJ1- PE109	Goma de Pie	Neopreno		1

Partes Comerciales				
Lb-W6-VJ1.0- PE001	Motor de CD Modelo: FF-050SB-10230			1

Tabla 7.18. Componentes que conforman al Pie del LUNAbot®. (Continuación)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes Comerciales				
Lb-W6-VJ1.0- PE110	Anillo de Retención Tipo E para ejes de Ø8mm - Ø11mm	Acero		1

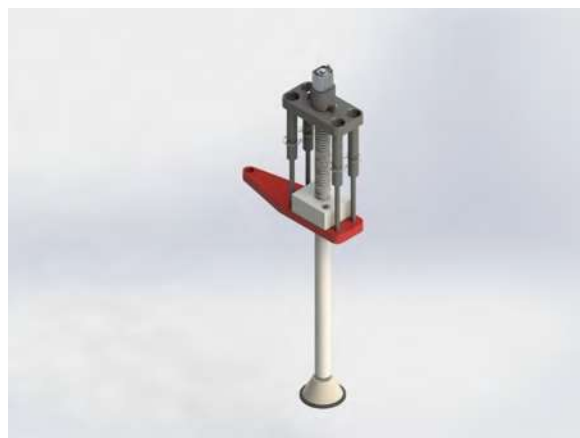
La fig. 7.25 muestra el ensamble de las piezas mencionadas en la tabla 7.18 y que conforman al Pie del LUNAbot®.



(a)



(b)



(c)

(d)

Fig. 7.22. Ensamble del Pie del LUNAbot®. (a) Vista frontal del pie en la posición apoyada. (b) Vista frontal del pie en la posición levantada. (c) Vista isométrica del pie en la posición apoyada. (d) Vista isométrica del pie en la posición levantada.

7.3.3.2. Componentes de la Pierna

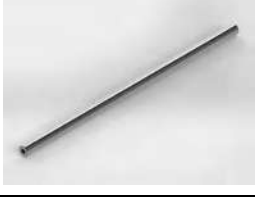
Las diferentes piezas que conforman parte de la Pierna del LUNAbot®, tanto las que se fabricarán como las comerciales, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7.19. Componentes que conforman a la Pierna del LUNAbot®. (Continúa)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes para Fabricación				
Lb-W6-VJ1-PR201	Eslabón AB	Plástico PLA		2
Lb-W6-VJ1- PR203	Eslabón AD-AE	Plástico PLA		4
Lb-W6-VJ1- PR204	Eslabón BC Parte A	Plástico PLA		2
Lb-W6-VJ1- PR205	Eslabón BC Parte B	Plástico PLA		2
Lb-W6-VJ1- PR207	Eslabón CD-CE	Plástico PLA		4

Lb-W6-VJ1- PR208	Eslabón DE-EF	Plástico PLA		3
------------------	---------------	--------------	---	---

Tabla 7.19. Componentes que conforman a la Pierna del LUNAbot®. (Continuación)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes para Fabricación				
Lb-W6-VJ1- PR209	Eslabón EF Superior	Plástico PLA		1
Lb-W6-VJ1- PR210	Perno A	Aluminio 6061-T6		1
Lb-W6-VJ1- PR211	Perno B	Aluminio 6061-T6		1
Lb-W6-VJ1- PR212	Perno C	Aluminio 6061-T6		1
Lb-W6-VJ1- PR213	Perno D-E	Aluminio 6061-T6		2

Lb-W6-VJ1- PR214	Buje Separador de Ø6.5x8.5mm	Plástico PLA		4
Lb-W6-VJ1- PR215	Buje Separador de Ø6.5x10.5mm	Plástico PLA		2

Tabla 7.19. Componentes que conforman a la Pierna del LUNAbot®. (Continuación)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes para Fabricación				
Lb-W6-VJ1- PR216	Buje Separador de Ø6.5x16mm	Plástico PLA		2
Lb-W6-VJ1- PR217	Buje Separador de Ø6.5x69mm	Plástico PLA		3
Lb-W6-VJ1- PR218	Buje Separador de Ø13.5x8.5mm	Plástico PLA		2
Lb-W6-VJ1- PR219	Buje Separador de Ø13.5x69mm	Plástico PLA		1

Lb-W6-VJ1- PR220	Soporte para Servomotor	Plástico PLA		1
Lb-W6-VJ1- PR221	Engrane M1.0xN19 para Servomotor	Acetal		1
Lb-W6-VJ1- PR222	Engrane M1.0xN19 para Perno B	Acetal		1

Tabla 7.15. Componentes que conforman a la Pierna del LUNAbot®. (Continuación)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes Comerciales				
Lb-W6-VJ1- PR002	Servomotor DS-3115 MG	Engranes metálicos		1
Lb-W6-VJ1-PR012	Resorte de Extensión E01200161370M	Acero Inoxidable		4

La fig. 7.23 muestra el ensamble de las piezas mencionadas en la tabla 7.19 y que conforman a la Pierna del LUNAbot®.

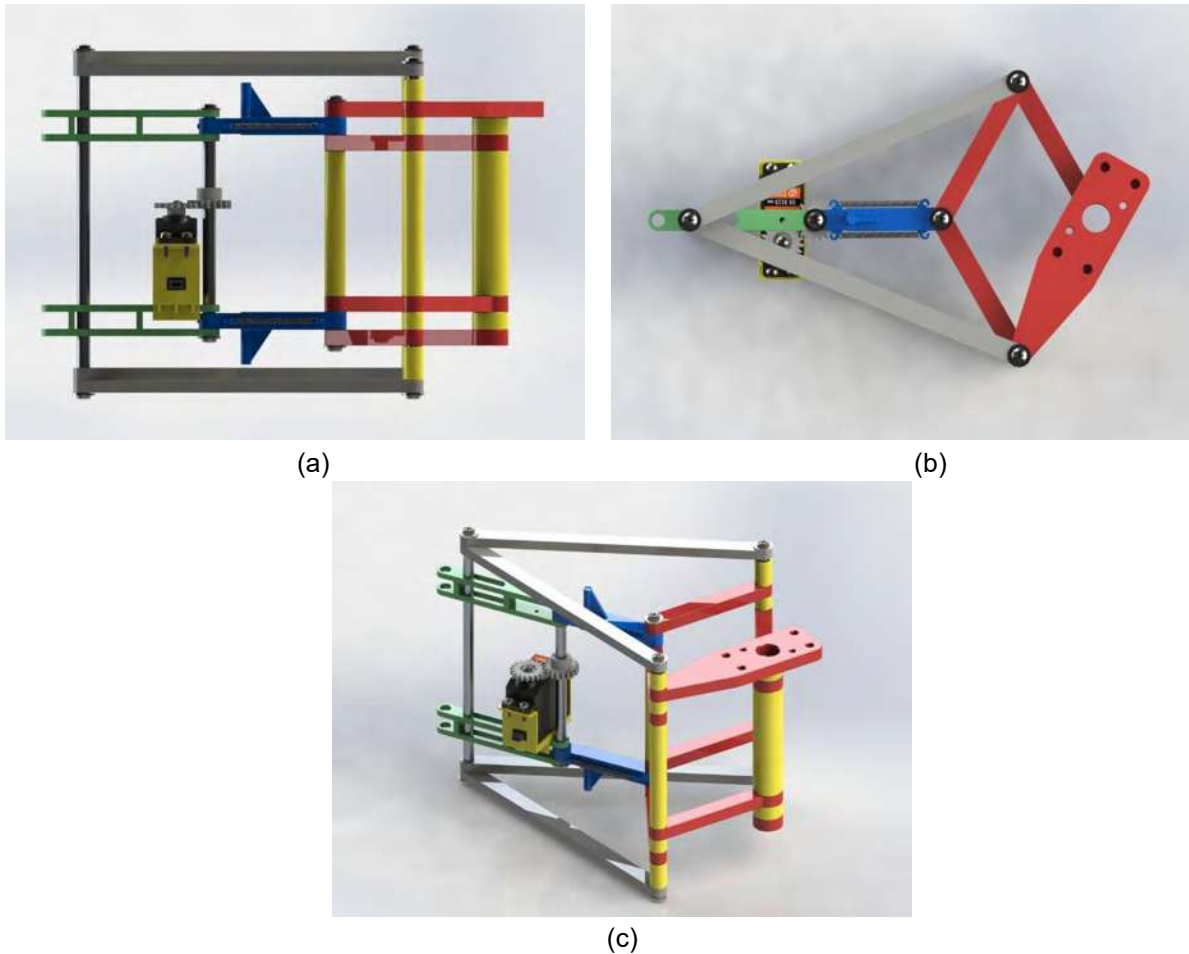


Fig. 7.23. Ensamble de la Pierna del LUNAbot®. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. (c) Vista isométrica.

7.3.3.3. Componentes de la Pelvis

Las diferentes piezas que conforman parte de la Pelvis del LUNAbot®, tanto las que se fabricarán como las comerciales, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7.20. Componentes que conforman la Pelvis del LUNAbot®. (Continúa)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes para Fabricación				
Lb-W6-VJ1-PV301	Pelvis Parte A	Plástico PLA		1

Lb-W6-VJ1- PV302	Pelvis Parte B	Plástico PLA		1
Lb-W6-VJ1- PV303	Poste Separador A-1	Plástico PLA		2
Lb-W6-VJ1- PV304	Poste Separador A-2	Plástico PLA		4
Lb-W6-VJ1- PV305	Poste Separador A-3	Plástico PLA		2
Lb-W6-VJ1- PV306	Poste Separador A-4	Plástico PLA		4

Tabla 7.20. Componentes que conforman la Pelvis del LUNAbot®. (Continuación)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes para Fabricación				
Lb-W6-VJ1- PV307	Poste Separador B-1	Plástico PLA		4

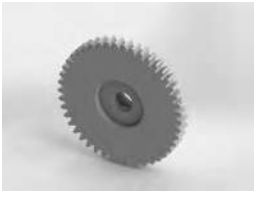
Lb-W6-VJ1- PV308	Poste Separador B-2	Plástico PLA		8
Lb-W6-VJ1.0- PV309	Leva Guía de Eslabón BC	Plástico PLA		4
Lb-W6-VJ1.0- PV310	Placa Soporte	Plástico PLA		4
Lb-W6-VJ1.0- PV311	Soporte para Servomotor	Plástico PLA		2
Lb-W6-VJ1.0- PV312	Base para Batería	Plástico PLA		1
Lb-W6-VJ1.0- PV313	Tapa de Base de Batería	Plástico PLA		1

Tabla 7.20. Componentes que conforman la Pelvis del LUNAbot®. (Continuación)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes para Fabricación				
Lb-W6-VJ1.0- PV314	Viga Soporte Derecha para Base de Batería	Plástico PLA		6

Lb-W6-VJ1.0- PV315	Viga Soporte Izquierda para Base de Batería	Plástico PLA		6
Lb-W6-VJ1- PV350	Brazo Direccionador A	Plástico PLA		4
Lb-W6-VJ1- PV351	Brazo Direccionador B	Plástico PLA		4
Lb-W6-VJ1- PV352	Brazo Direccionador C	Plástico PLA		2
Lb-W6-VJ1- PV353	Eslabón de Brazo Direccionador A y B	Plástico PLA		8
Lb-W6-VJ1- PV354	Poste Guía para Brazo Direccionador A y B	Plástico PLA		16

Tabla 7.20. Componentes que conforman la Pelvis del LUNAbot®. (Continuación)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes para Fabricación				
Lb-W6-VJ1- PV355	Engrane M0.5xN45 para Servomotor	Acetal		2

Lb-W6-VJ1- PV356	Engrane M0.5xN45 Conector	Acetal		2
Lb-W6-VJ1- PV357	Engrane M0.5xN56 para Brazo Direccionador A y B	Acetal		4
Lb-W6-VJ1- PV358	Engrane M0.5xN84 para Brazo Direccionador C	Acetal		2
Lb-W6-VJ1- PV359	Engrane M0.5xN40 para Leva Guía	Acetal		4
Lb-W6-VJ1- PV360	Perno G	Aluminio 6061-T6		2
Lb-W6-VJ1- PV361	Perno para Eslabón de Brazo Direccionador	Aluminio 6061-T6		8

Tabla 7.20. Componentes que conforman la Pelvis del LUNAbot®. (Continuación)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Cant.
Partes Comerciales				

Lb-W6-VJ1- PV003	Servomotor DS- 3115 MG	Engranés metálicos		2
Lb-W6-VJ1- PV004	Bateria Solar			1

La fig. 7.24 muestra el ensamble de las piezas mencionadas en la tabla 7.20 y que conforman a la Pelvis del LUNAbot®.

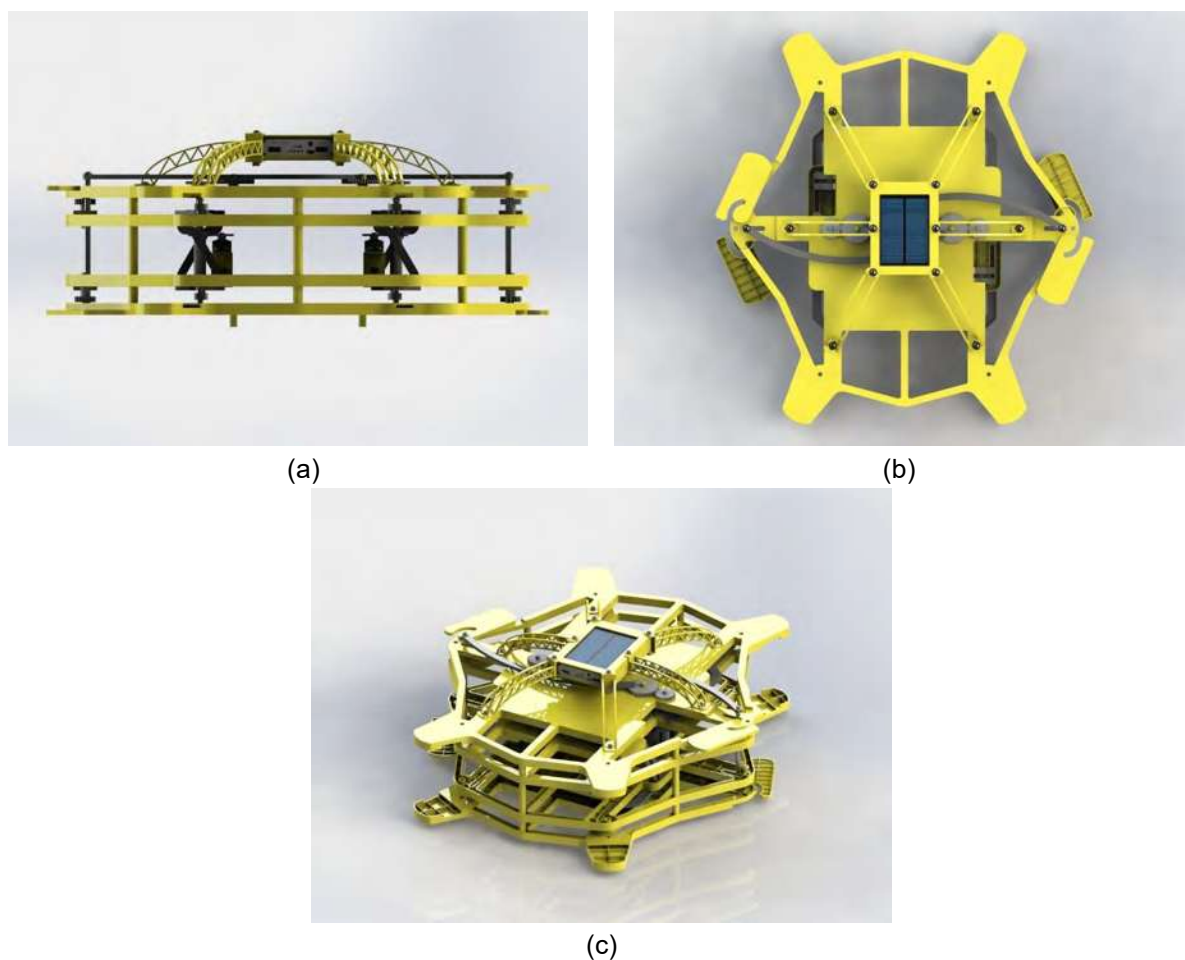


Fig. 7.24. Ensamble de la Pelvis del LUNAbot®. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. (c) Vista trimétrica.

En la siguiente figura se muestra el ensamble global del LUNAbot®.

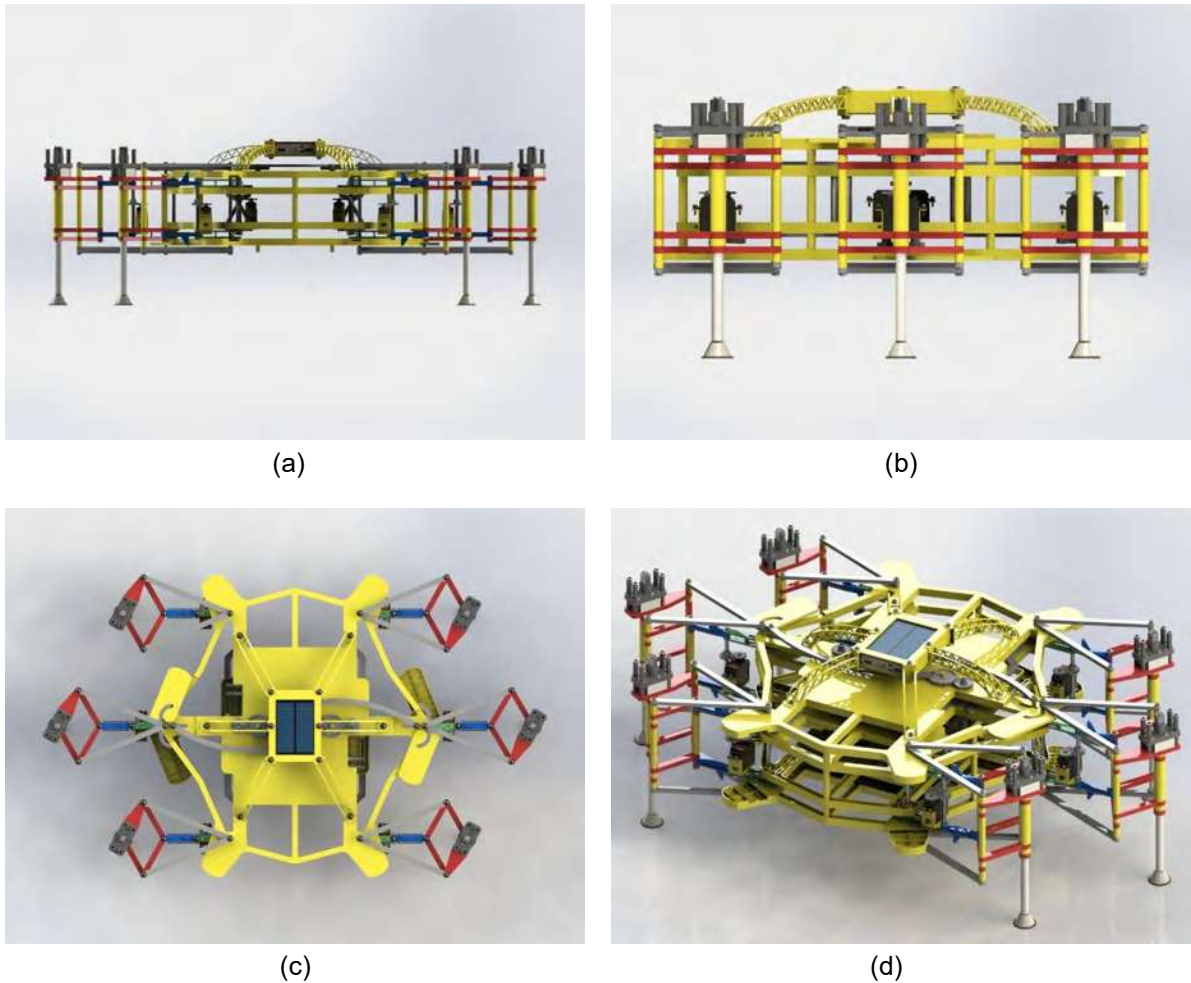


Fig. 7.25. *Ensamble global del LUNAbot®. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral. (c) Vista superior. (d) Vista trimétrica.*

7.4. DISEÑO DE DETALLE

Dentro de este apartado se encuentran los siguientes temas:

- Aplicación del Método de Elemento Finito (MEF) para el análisis estructural del LUNAbot W6 VJ1.0®.
- Características morfológicas finales de las piezas que conforman al LUNAbot W6 VJ1.0®.

7.4.1. Empleo del Método de Elemento Finito (MEF) para el análisis estructural del LUNAbot W6 VJ1.0®

Una vez que se ha realizado el diseño conceptual del LUNAbot®, se procede a realizar un análisis estructural de varias piezas que conforman al robot y que son susceptibles a sufrir algún tipo de fisura o fatiga debido a las cargas a que estarán sometidas dichas piezas por los movimientos que el robot genera.

Para este análisis se tomó como herramienta una solución mediante el *Método de Elemento Finito (MEF)*.

7.4.1.1. Método de Elemento Finito (MEF)

Los Métodos de Elemento Finito son en la actualidad ampliamente muy utilizados en el análisis de ingeniería. Los métodos son empleados extensamente en el análisis de sólidos, de estructuras, de transferencia de calor y de fluidos y, de hecho, los métodos de elemento finito son útiles virtualmente en cada campo del análisis en la ingeniería.

El desarrollo de métodos de elemento finito para la solución de problemas prácticos de ingeniería empieza con la llegada de la computación digital. Es decir, la esencia de una solución de elemento finito de un problema de ingeniería, es que un conjunto de ecuaciones algebraicas gobernantes se estableció y se resolvió, y esto fue sólo a través del uso de la computación digital en el que este proceso podría ser interpretado eficazmente y dando una aplicabilidad general. Estas dos propiedades –efectividad y aplicabilidad general en el análisis de ingeniería– son inherentes en la teoría utilizada y ha sido desarrollada en un alto grado para cálculos prácticos, así que los métodos de elemento finito han encontrado gran atractivo en las prácticas ingenieriles.

En el proceso completo del diseño asistido por computadora (CAD) es en donde los métodos de análisis de elemento finito tienen su mayor utilidad y en donde un ingeniero es más probable que encuentre el uso de los métodos de elemento finito.

El MEF es utilizado para resolver problemas físicos en el análisis y diseño ingenieril. *El análisis de elemento finito resuelve las ecuaciones diferenciales de un modelo matemático.*

En el uso temprano de los métodos de elemento finito, solamente algunas estructuras específicas eran analizadas, principalmente en las industrias de ingeniería aeroespacial y civil. Sin embargo, una vez que el potencial de los métodos de elemento finito fue realizado y el uso de computadoras incremento en los ambientes de diseño de ingeniería, el énfasis en la investigación y desarrollo se colocó al hacer uso de métodos de elemento finito una parte integral de los procesos de diseño en la ingeniería mecánica, civil y aeronáutica.

El análisis mediante el MEF es claramente sólo una actividad de apoyo en el campo del diseño de ingeniería. El proceso de análisis ayuda a identificar bien los nuevos diseños y puede ser utilizado para mejorar un diseño existente con respecto al desempeño y costo.

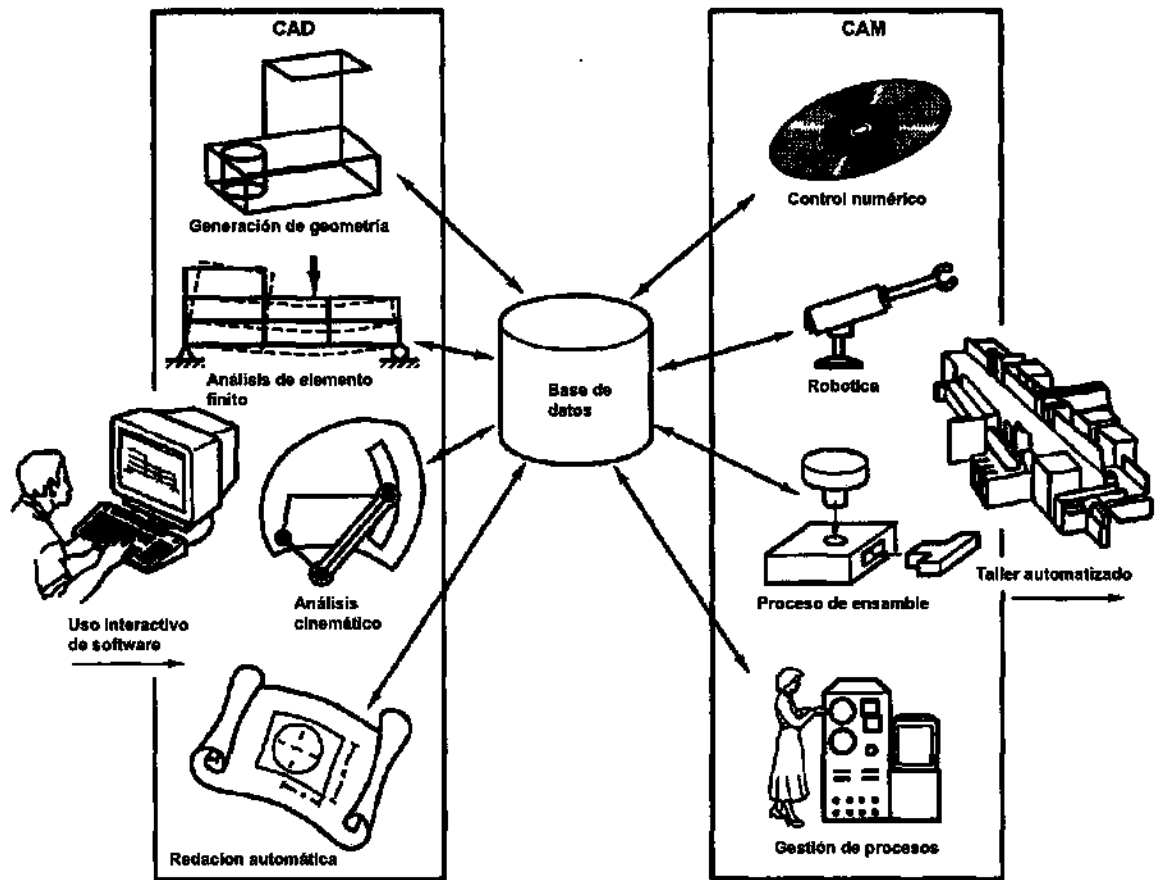


Fig. 7.26. El campo del CAD/CAM visto esquemáticamente [16].

La figura 7.26 da una visión general de los pasos en un proceso típico de diseño asistido por computadora. El análisis de elemento finito es sólo una pequeña parte del proceso completo, pero es una parte importante [16].

Existen dos maneras para la formulación del MEF: uno se basa en el método variacional directo (tal como el método Rayleigh-Ritz) y el otro en el método de residuos ponderados (tal como el método Galerkin). En la formulación basada en el método variacional, las ecuaciones fundamentales se derivan de las condiciones estacionarias de la función para los problemas de valor-frontera. Sin embargo, esto es generalmente difícil derivar la función excepto por el caso donde los principios variacionales están ya establecidos como en el caso del principio del trabajo virtual o el principio de la energía potencial mínima en el campo de la mecánica de sólidos. Esta formulación tiene una ventaja en la que el proceso de derivar funciones no es necesario, por lo que es fácil formular el MEF basado en el método de los residuos ponderados. [17].

Entonces, el análisis de elemento finito es un cálculo basado en una técnica numérica que se utiliza para resolver análisis de esfuerzos, transferencia de calor, flujo de fluidos y otro tipo de problemas de ingeniería. Primero fue utilizado para resolver problemas de análisis de esfuerzos, pero ahora es utilizado en la solución de muchos otros tipos de problemas. Se

basa en solucionar un sistema de ecuaciones que describe algún parámetro (tal como desplazamientos) sobre el dominio de un sistema físico continuo (tal como la superficie de una pieza).

Con el fin de definir completamente un modelo de elemento finito, los puntos nodales, elementos, cargas, soportes y datos relacionados al elemento (tal como las propiedades del material) deben ser definidos. Una vez que estos datos han sido definidos, se entregan a un programa de elemento finito para el proceso de computación actual. El programa entonces formula un conjunto de ecuaciones simultáneas, que son las ecuaciones de equilibrio correspondientes a cada grado de libertad (direcciones en que los movimientos pueden ocurrir) en cada punto nodal. Un punto nodal puede tener hasta 6 grados de libertad (translación en las direcciones x , y y z y rotación sobre cada uno de estos ejes). Como el modelo de elemento finito se carga y empieza a deformarse, la fuerza en cada punto nodal depende de la fuerza en todos los otros nodos. El modelo de elemento finito, por lo tanto, actúa como un gran sistema de resortes (deformándose hasta balancear todas las fuerzas). Debido a que normalmente se utilizan cientos o miles de ecuaciones de equilibrio generadas para representar a un modelo típico de elemento finito, el uso de una computadora para el proceso de solución es obligatorio.

Pasos en el Proceso de Análisis de Elemento Finito

El primer paso en la preparación de un modelo de elemento finito implica la definición de los datos de entrada y se conoce como la fase de Pre-procesamiento. Éste consta de lo siguiente:

- a) Discretizar la pieza mediante la definición de puntos nodales (coordenadas x , y y z) y elementos (conectividad).
- b) Definir las propiedades del material de los elementos, tal como: módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, densidad y coeficiente de expansión térmica.
- c) Especificar los soportes, también llamados condiciones de frontera (lugares donde la pieza se une al suelo a una pieza adyacente).
- d) Especificar las cargas (fuerzas, carga centrífuga, expansión térmica, deflexiones).

El proceso de análisis existente no requiere ninguna interacción del usuario y, frecuentemente, consume bastante tiempo. Los usuarios muchas veces comienzan la fase de análisis y lo dejan correr en el “background” mientras continúan trabajando en otras tareas en el ambiente del primer plano. Durante esta fase de análisis, el programa ejecuta los siguientes pasos:

- a) Formula ecuaciones que describen cada rigidez de los elementos y entonces ensamblan todas las ecuaciones de los elementos de tal manera que forman un conjunto de ecuaciones simultáneas que representan la rigidez total de la estructura.
- b) Resuelve el sistema de ecuaciones para los desplazamientos de cada punto nodal.

- c) Utiliza los desplazamientos de los puntos nodales para resolver el esfuerzo dentro de cada elemento.

La fase final se refiere al Post-procesamiento. El primer objetivo de esta fase es dar sentido a la gran cantidad de datos que se genera durante la fase de análisis. Ya que por lo general es un gran número de puntos nodales y elementos, el proceso de examinar manualmente página por página de los impresos de la computadora ha sido reemplazado por la revisión en las pantallas gráficas del ordenador. Esas pantallas generalmente muestran: desplazamientos de los puntos nodales, los esfuerzos dentro de cada elemento, la deformación y varios esfuerzos como gráficos de contorno [18].

Es necesario hacer notar que en los problemas de la mecánica de sólidos, el MEF siempre llevará a la siguiente forma general:

$$[\textit{Matriz de Rigidez}]\{\textit{Matriz de Desplazamiento}\} = \{\textit{Matriz de Carga}\}$$

En estas matrices intervienen la sección transversal A del cuerpo, el cual tiene una longitud l y que se desplaza una distancia x debido a una carga aplicada P [19].

7.4.1.2. Análisis estructural de algunas piezas del LUNAbot® aplicando el MEF

En este análisis se siguieron los pasos del MEF descritos en el apartado anterior y se utilizó, como ayuda, el software *ANSYS® Workbench™*. Para estos análisis se ocupó una computadora con las siguientes características:

Marca: Hewlett-Packard

Modelo: MXL05001PM

Sistema operativo: Windows 7 Enterprise® 64 bits SP1.0

Procesador: Intel® Core™ i7 CPU 860 @ 2.80GHz

Memoria RAM: 8.00 GB

Tarjeta de Video: NVIDIA Quadro FX 1800 de 2.50 GB de memoria

A continuación se presentan los resultados de los análisis que se realizaron a las piezas susceptibles a fallar estructuralmente debido a alguna carga, tanto estática y/o dinámica.

Eslabón BC Parte A (Lb-W6-VJ1-PR204).

La tabla 7.21 muestra los resultados obtenidos del análisis mediante el MEF a la pieza Lb-W6-VJ1-PR204 y que se le ha nombrado como *Eslabón BC Parte A*. En la parte del gráfico se muestra el número de elementos, generados a causa de los diferentes tamaños de malla, en el eje de las abscisas y la propiedad a analizar en el eje de las ordenadas.

Tabla 7.21. Análisis mediante el MEF para la pieza Lb-W6-VJ1-PR204. (Continúa)

ANÁLISIS MEDIANTE EL MEF																							
Gráfico	Imagen																						
Deformación Total - PLA <table border="1"> <caption>Data for Deformación Total - PLA</caption> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>Deformación Total (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50000</td><td>1.82E-05</td></tr> <tr><td>75000</td><td>1.83E-05</td></tr> <tr><td>100000</td><td>1.78E-05</td></tr> <tr><td>125000</td><td>1.88E-05</td></tr> <tr><td>150000</td><td>1.95E-05</td></tr> <tr><td>175000</td><td>1.95E-05</td></tr> <tr><td>200000</td><td>2.05E-05</td></tr> <tr><td>225000</td><td>2.04E-05</td></tr> <tr><td>250000</td><td>2.02E-05</td></tr> <tr><td>275000</td><td>2.08E-05</td></tr> </tbody> </table>	Elementos	Deformación Total (m)	50000	1.82E-05	75000	1.83E-05	100000	1.78E-05	125000	1.88E-05	150000	1.95E-05	175000	1.95E-05	200000	2.05E-05	225000	2.04E-05	250000	2.02E-05	275000	2.08E-05	
Elementos	Deformación Total (m)																						
50000	1.82E-05																						
75000	1.83E-05																						
100000	1.78E-05																						
125000	1.88E-05																						
150000	1.95E-05																						
175000	1.95E-05																						
200000	2.05E-05																						
225000	2.04E-05																						
250000	2.02E-05																						
275000	2.08E-05																						
Deformación Elástica Equivalente - PLA <table border="1"> <caption>Data for Deformación Elástica Equivalente - PLA</caption> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>Deformación Elástica Equivalente (m/m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50000</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>75000</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>100000</td><td>0.024</td></tr> <tr><td>125000</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>150000</td><td>0.026</td></tr> <tr><td>175000</td><td>0.027</td></tr> <tr><td>200000</td><td>0.028</td></tr> <tr><td>225000</td><td>0.042</td></tr> <tr><td>250000</td><td>0.042</td></tr> <tr><td>275000</td><td>0.044</td></tr> </tbody> </table>	Elementos	Deformación Elástica Equivalente (m/m)	50000	0.025	75000	0.025	100000	0.024	125000	0.025	150000	0.026	175000	0.027	200000	0.028	225000	0.042	250000	0.042	275000	0.044	
Elementos	Deformación Elástica Equivalente (m/m)																						
50000	0.025																						
75000	0.025																						
100000	0.024																						
125000	0.025																						
150000	0.026																						
175000	0.027																						
200000	0.028																						
225000	0.042																						
250000	0.042																						
275000	0.044																						
Esfuerzo Equivalente (von-Mises) - PLA <table border="1"> <caption>Data for Esfuerzo Equivalente (von-Mises) - PLA</caption> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>Esfuerzo Equivalente (Pa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50000</td><td>3.2E+07</td></tr> <tr><td>75000</td><td>3.2E+07</td></tr> <tr><td>100000</td><td>3.1E+07</td></tr> <tr><td>125000</td><td>3.2E+07</td></tr> <tr><td>150000</td><td>3.3E+07</td></tr> <tr><td>175000</td><td>3.3E+07</td></tr> <tr><td>200000</td><td>3.4E+07</td></tr> <tr><td>225000</td><td>5.2E+07</td></tr> <tr><td>250000</td><td>5.2E+07</td></tr> <tr><td>275000</td><td>5.1E+07</td></tr> </tbody> </table>	Elementos	Esfuerzo Equivalente (Pa)	50000	3.2E+07	75000	3.2E+07	100000	3.1E+07	125000	3.2E+07	150000	3.3E+07	175000	3.3E+07	200000	3.4E+07	225000	5.2E+07	250000	5.2E+07	275000	5.1E+07	
Elementos	Esfuerzo Equivalente (Pa)																						
50000	3.2E+07																						
75000	3.2E+07																						
100000	3.1E+07																						
125000	3.2E+07																						
150000	3.3E+07																						
175000	3.3E+07																						
200000	3.4E+07																						
225000	5.2E+07																						
250000	5.2E+07																						
275000	5.1E+07																						
Esfuerzo de Corte - PLA <table border="1"> <caption>Data for Esfuerzo de Corte - PLA</caption> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>Esfuerzo de Corte (Pa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50000</td><td>9.5E+06</td></tr> <tr><td>75000</td><td>8.5E+06</td></tr> <tr><td>100000</td><td>7.5E+06</td></tr> <tr><td>125000</td><td>6.5E+06</td></tr> <tr><td>150000</td><td>8.0E+06</td></tr> <tr><td>175000</td><td>9.0E+06</td></tr> <tr><td>200000</td><td>9.5E+06</td></tr> <tr><td>225000</td><td>1.3E+07</td></tr> <tr><td>250000</td><td>1.2E+07</td></tr> <tr><td>275000</td><td>1.25E+07</td></tr> </tbody> </table>	Elementos	Esfuerzo de Corte (Pa)	50000	9.5E+06	75000	8.5E+06	100000	7.5E+06	125000	6.5E+06	150000	8.0E+06	175000	9.0E+06	200000	9.5E+06	225000	1.3E+07	250000	1.2E+07	275000	1.25E+07	
Elementos	Esfuerzo de Corte (Pa)																						
50000	9.5E+06																						
75000	8.5E+06																						
100000	7.5E+06																						
125000	6.5E+06																						
150000	8.0E+06																						
175000	9.0E+06																						
200000	9.5E+06																						
225000	1.3E+07																						
250000	1.2E+07																						
275000	1.25E+07																						

Tabla 7.21. Análisis mediante el MEF para la pieza Lb-W6-VJ1-PR204. (Continuación)

ANÁLISIS MEDIANTE EL MEF	
Gráfico	Imagen
Tipo de análisis: Estático estructural Tipo de elemento: Tetrahedro Tamaño de elemento: 0.32 mm No. de elementos: 259,837	

Eslabón BC Parte B (Lb-W6-VJ1-PR205).

La tabla 7.22 muestra los resultados obtenidos del análisis mediante el MEF a la pieza Lb-W6-VJ1-PR205 y que se le ha nombrado como *Eslabón BC Parte B*.

Tabla 7.22. Análisis mediante el MEF para la pieza Lb-W6-VJ1-PR205. (Continúa)

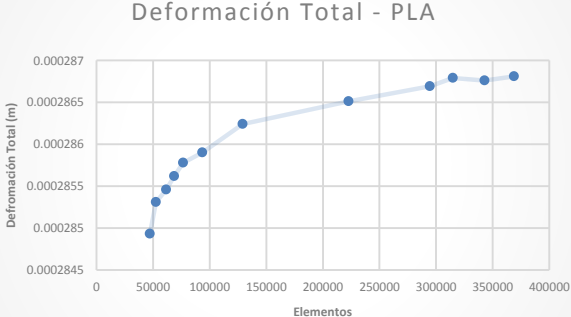
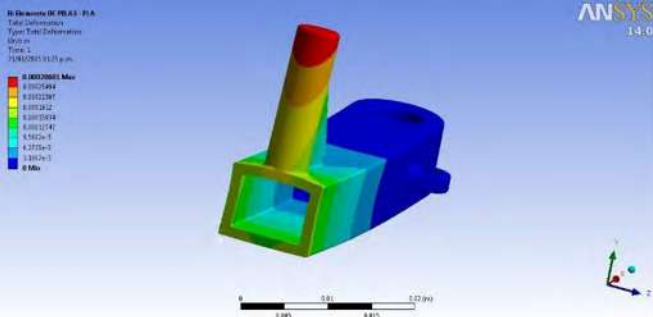
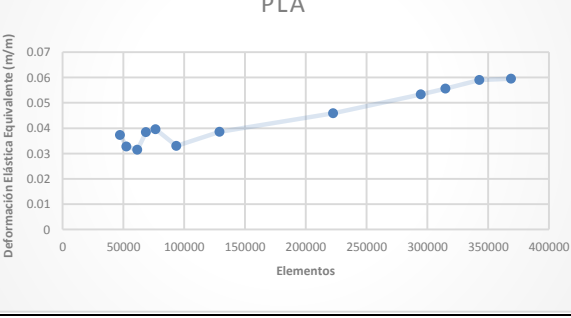
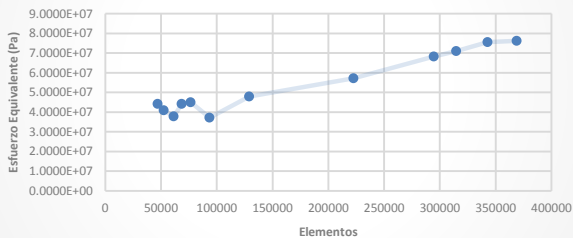
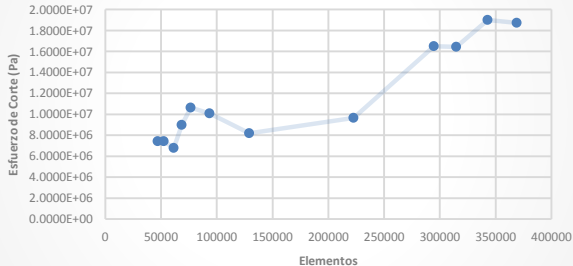
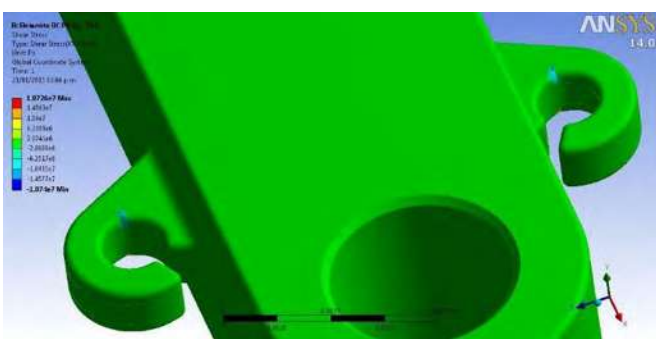
ANÁLISIS MEDIANTE EL MEF	
Gráfico	Imagen
Deformación Total - PLA 	
Deformación Elástica Equivalente - PLA 	

Tabla 7.22. Análisis mediante el MEF para la pieza Lb-W6-VJ1-PR205. (Continuación)

ANÁLISIS MEDIANTE EL MEF																					
Gráfico	Imagen																				
Esfuerzo Equivalente (von-Mises) - PLA  <table border="1"> <caption>Data for Esfuerzo Equivalente (von-Mises) - PLA</caption> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>Esfuerzo Equivalente (Pa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50000</td><td>4.5000E+07</td></tr> <tr><td>75000</td><td>4.8000E+07</td></tr> <tr><td>100000</td><td>4.2000E+07</td></tr> <tr><td>150000</td><td>5.0000E+07</td></tr> <tr><td>225000</td><td>6.0000E+07</td></tr> <tr><td>300000</td><td>7.0000E+07</td></tr> <tr><td>325000</td><td>7.5000E+07</td></tr> <tr><td>350000</td><td>8.0000E+07</td></tr> <tr><td>375000</td><td>8.0000E+07</td></tr> </tbody> </table>	Elementos	Esfuerzo Equivalente (Pa)	50000	4.5000E+07	75000	4.8000E+07	100000	4.2000E+07	150000	5.0000E+07	225000	6.0000E+07	300000	7.0000E+07	325000	7.5000E+07	350000	8.0000E+07	375000	8.0000E+07	
Elementos	Esfuerzo Equivalente (Pa)																				
50000	4.5000E+07																				
75000	4.8000E+07																				
100000	4.2000E+07																				
150000	5.0000E+07																				
225000	6.0000E+07																				
300000	7.0000E+07																				
325000	7.5000E+07																				
350000	8.0000E+07																				
375000	8.0000E+07																				
Esfuerzo de Corte - PLA  <table border="1"> <caption>Data for Esfuerzo de Corte - PLA</caption> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>Esfuerzo de Corte (Pa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50000</td><td>7.5000E+06</td></tr> <tr><td>75000</td><td>1.0000E+07</td></tr> <tr><td>100000</td><td>1.0500E+07</td></tr> <tr><td>150000</td><td>8.5000E+06</td></tr> <tr><td>225000</td><td>9.5000E+06</td></tr> <tr><td>300000</td><td>1.6500E+07</td></tr> <tr><td>325000</td><td>1.7000E+07</td></tr> <tr><td>350000</td><td>1.8000E+07</td></tr> <tr><td>375000</td><td>1.8000E+07</td></tr> </tbody> </table>	Elementos	Esfuerzo de Corte (Pa)	50000	7.5000E+06	75000	1.0000E+07	100000	1.0500E+07	150000	8.5000E+06	225000	9.5000E+06	300000	1.6500E+07	325000	1.7000E+07	350000	1.8000E+07	375000	1.8000E+07	
Elementos	Esfuerzo de Corte (Pa)																				
50000	7.5000E+06																				
75000	1.0000E+07																				
100000	1.0500E+07																				
150000	8.5000E+06																				
225000	9.5000E+06																				
300000	1.6500E+07																				
325000	1.7000E+07																				
350000	1.8000E+07																				
375000	1.8000E+07																				
Tipo de análisis: Estático estructural Tipo de elemento: Tetrahedro Tamaño de elemento: 0.32 mm No. de elementos: 368,889																					

Pie (Lb-W6-VJ1-PE101).

La tabla 7.23 muestra los resultados obtenidos del análisis mediante el MEF a la pieza Lb-W6-VJ1-PE101y que se le ha nombrado como *Pie*.

Tabla 7.23. Análisis mediante el MEF para la pieza Lb-W6-VJ1-PE101. (Continúa)

ANÁLISIS MEDIANTE EL MEF																									
Gráfico	Imagen																								
Deformación Total - PLA <table border="1"> <caption>Data for Deformación Total - PLA</caption> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>Deformación Total (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>4.845E-06</td></tr> <tr><td>100000</td><td>4.850E-06</td></tr> <tr><td>200000</td><td>4.852E-06</td></tr> <tr><td>300000</td><td>4.854E-06</td></tr> <tr><td>400000</td><td>4.855E-06</td></tr> <tr><td>500000</td><td>4.856E-06</td></tr> <tr><td>600000</td><td>4.857E-06</td></tr> <tr><td>700000</td><td>4.858E-06</td></tr> <tr><td>800000</td><td>4.859E-06</td></tr> <tr><td>900000</td><td>4.860E-06</td></tr> <tr><td>1000000</td><td>4.861E-06</td></tr> </tbody> </table>	Elementos	Deformación Total (m)	0	4.845E-06	100000	4.850E-06	200000	4.852E-06	300000	4.854E-06	400000	4.855E-06	500000	4.856E-06	600000	4.857E-06	700000	4.858E-06	800000	4.859E-06	900000	4.860E-06	1000000	4.861E-06	
Elementos	Deformación Total (m)																								
0	4.845E-06																								
100000	4.850E-06																								
200000	4.852E-06																								
300000	4.854E-06																								
400000	4.855E-06																								
500000	4.856E-06																								
600000	4.857E-06																								
700000	4.858E-06																								
800000	4.859E-06																								
900000	4.860E-06																								
1000000	4.861E-06																								
Deformación Elástica Equivalente - PLA <table border="1"> <caption>Data for Deformación Elástica Equivalente - PLA</caption> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>Deformación Elástica Equivalente (m/m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.00045</td></tr> <tr><td>100000</td><td>0.00048</td></tr> <tr><td>200000</td><td>0.00050</td></tr> <tr><td>300000</td><td>0.00052</td></tr> <tr><td>400000</td><td>0.00054</td></tr> <tr><td>500000</td><td>0.00056</td></tr> <tr><td>600000</td><td>0.00058</td></tr> <tr><td>700000</td><td>0.00059</td></tr> <tr><td>800000</td><td>0.00060</td></tr> <tr><td>900000</td><td>0.00061</td></tr> <tr><td>1000000</td><td>0.00062</td></tr> </tbody> </table>	Elementos	Deformación Elástica Equivalente (m/m)	0	0.00045	100000	0.00048	200000	0.00050	300000	0.00052	400000	0.00054	500000	0.00056	600000	0.00058	700000	0.00059	800000	0.00060	900000	0.00061	1000000	0.00062	
Elementos	Deformación Elástica Equivalente (m/m)																								
0	0.00045																								
100000	0.00048																								
200000	0.00050																								
300000	0.00052																								
400000	0.00054																								
500000	0.00056																								
600000	0.00058																								
700000	0.00059																								
800000	0.00060																								
900000	0.00061																								
1000000	0.00062																								
Esfuerzo Equivalente (von-Mises) - PLA <table border="1"> <caption>Data for Esfuerzo Equivalente (von-Mises) - PLA</caption> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>Esfuerzo Equivalente (Pa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>6.0E+05</td></tr> <tr><td>100000</td><td>6.5E+05</td></tr> <tr><td>200000</td><td>6.8E+05</td></tr> <tr><td>300000</td><td>7.0E+05</td></tr> <tr><td>400000</td><td>7.2E+05</td></tr> <tr><td>500000</td><td>7.4E+05</td></tr> <tr><td>600000</td><td>7.6E+05</td></tr> <tr><td>700000</td><td>7.8E+05</td></tr> <tr><td>800000</td><td>7.9E+05</td></tr> <tr><td>900000</td><td>8.0E+05</td></tr> <tr><td>1000000</td><td>8.1E+05</td></tr> </tbody> </table>	Elementos	Esfuerzo Equivalente (Pa)	0	6.0E+05	100000	6.5E+05	200000	6.8E+05	300000	7.0E+05	400000	7.2E+05	500000	7.4E+05	600000	7.6E+05	700000	7.8E+05	800000	7.9E+05	900000	8.0E+05	1000000	8.1E+05	
Elementos	Esfuerzo Equivalente (Pa)																								
0	6.0E+05																								
100000	6.5E+05																								
200000	6.8E+05																								
300000	7.0E+05																								
400000	7.2E+05																								
500000	7.4E+05																								
600000	7.6E+05																								
700000	7.8E+05																								
800000	7.9E+05																								
900000	8.0E+05																								
1000000	8.1E+05																								
Esfuerzo de Corte - PLA <table border="1"> <caption>Data for Esfuerzo de Corte - PLA</caption> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>Esfuerzo de Corte (Pa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>2.5E+05</td></tr> <tr><td>100000</td><td>2.8E+05</td></tr> <tr><td>200000</td><td>3.0E+05</td></tr> <tr><td>300000</td><td>3.2E+05</td></tr> <tr><td>400000</td><td>3.4E+05</td></tr> <tr><td>500000</td><td>3.5E+05</td></tr> <tr><td>600000</td><td>3.6E+05</td></tr> <tr><td>700000</td><td>3.7E+05</td></tr> <tr><td>800000</td><td>3.75E+05</td></tr> <tr><td>900000</td><td>3.8E+05</td></tr> <tr><td>1000000</td><td>3.85E+05</td></tr> </tbody> </table>	Elementos	Esfuerzo de Corte (Pa)	0	2.5E+05	100000	2.8E+05	200000	3.0E+05	300000	3.2E+05	400000	3.4E+05	500000	3.5E+05	600000	3.6E+05	700000	3.7E+05	800000	3.75E+05	900000	3.8E+05	1000000	3.85E+05	
Elementos	Esfuerzo de Corte (Pa)																								
0	2.5E+05																								
100000	2.8E+05																								
200000	3.0E+05																								
300000	3.2E+05																								
400000	3.4E+05																								
500000	3.5E+05																								
600000	3.6E+05																								
700000	3.7E+05																								
800000	3.75E+05																								
900000	3.8E+05																								
1000000	3.85E+05																								

Tabla 7.23. Análisis mediante el MEF para la pieza Lb-W6-VJ1-PE101. (Continuación)

ANÁLISIS MEDIANTE EL MEF	
Gráfico	Imagen
Tipo de análisis: Estático estructural Tipo de elemento: Tetrahedro Tamaño de elemento: 0.25 mm No. de elementos: 1,016,905	

Una vez que se ha realizado el análisis estructural mediante el MEF, se procede a hacer las modificaciones morfológicas necesarias a las piezas analizadas para que puedan resistir los esfuerzos a los que serán sometidas.

7.4.2. Características morfológicas finales de las piezas que conforman al LUNAbot W6 VJ1.0®

Después de haberse realizado el análisis mediante el MEF de ciertas piezas del robot, a continuación se presentan los componentes que sufrieron un cambio en su geometría debido a dicho análisis, que con el transcurso del proyecto se decidió hacer un cambio a su morfología o que se añadieron al diseño del propio robot (tabla 7.24).

Tabla 7.24. Piezas que sufrieron algún cambio en su morfología y piezas nuevas del LUNAbot®. (Continúa)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Observaciones
Piezas que sufrieron cambios				
Lb-W6-VJ1- PE108	Soporte de Motor	Plástico PLA		Cambio en su morfología
Lb-W6-VJ1.0- PE001	Motorreductor PPN7PA128-27X05KB			Sustituye al Motor de CD FF-050SB-10230

Tabla 7.24. Piezas que sufrieron algún cambio en su morfología y piezas nuevas del LUNAbot®. (Contición)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Observaciones
Piezas que sufrieron cambios				
Lb-W6-VJ1- PR204	Eslabón BC Parte A	Plástico PLA		Se aumento el redondeo en los filetes de las orejas y se quitó el hueco de la parte interior
Lb-W6-VJ1- PR205	Eslabón BC Parte B	Plástico PLA		Se aumento el redondeo en los filetes de las orejas
Lb-W6-VJ1-PR012	Resorte de Extensión E01200141370M	Acero Inoxidable		Sustituye al resorte de extensión E01200161370M
Lb-W6-VJ1.0-PV352	Brazo Direccionador C	Plástico PLA		Cambio en su morfología
Lb-W6-VJ1- PV353	Eslabón de Brazo Direccionador A y B	Plástico PLA		Cambio en su morfología
Lb-W6-VJ1- PV354	Poste Guía para Brazo Direccionador A y B	Plástico PLA		Cambio en su morfología
Lb-W6-VJ1- PV356	Engrane M0.5xN45 Conector	Acetal		Cambio en su morfología

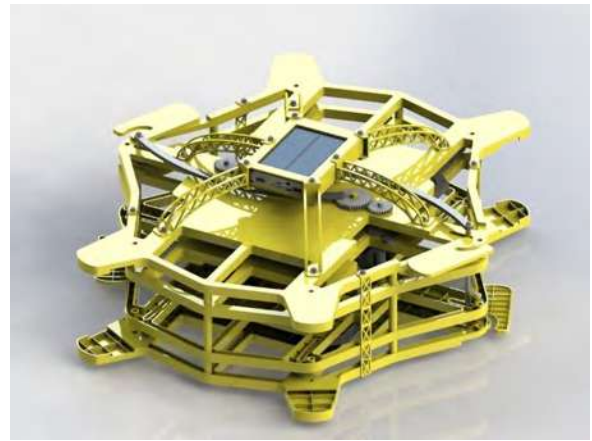
Tabla 7.24. Piezas que sufrieron algún cambio en su morfología y piezas nuevas del LUNAbot®. (Contición)

Código de Pieza	Nombre	Material	Imagen de Pieza	Observaciones
Piezas que sufrieron cambios				
Lb-W6-VJ1- PV357	Engrane M0.5xN56 para Brazo Direccionador A y B - 1	Acetal		Cambio en su morfología
Piezas nuevas				
Lb-W6-VJ1- PE108	Capuchón para Soporte de Motor	Plástico PLA		
Lb-W6-VJ1- PV358	Engrane M0.5xN56 para Brazo Direccionador A y B - 2	Acetal		
Lb-W6-VJ1- PV359	Eje del Tren de Engranes	Acetal		
Lb-W6-VJ1- PV358	Columna Soporte para Pelvis	Plástico PLA		

En la fig. 7.27 se muestra la morfología final de los 3 componentes principales de la máquina caminante (Pie, Pierna y Pelvis), así como la del LUNAbot W6 VJ1.0® completo.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7.27. (a) Pie y Pierna. (b) Pelvis. (c) LUNAbot W6 VJ1.0®.

En la sección de **Anexos** se presentan todos los dibujos de detalle de los componentes del LUNAbot® en donde se muestran todas las características morfológicas de cada uno de ellos, así como los subensambles del Pie, Pierna y Pelvis y el ensamble general de la máquina caminante.

CAPÍTULO 8. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA UNIDAD DE PROPULSIÓN

8.1. INTRODUCCIÓN

Para la fabricación de las piezas de plástico del prototipo del LUNAbot W6 VJ1.0[®] se ha optado por realizarlo en **Impresión 3D**, ya que en la actualidad esta tecnología se encuentra en auge y es una manera más sencilla y económica de realizar algún tipo de prototipo que con otros procesos de fabricación como, por ejemplo, procesos en máquinas de CNC.

A continuación se da una breve explicación sobre esta tecnología y se explica cómo se llevó a cabo, paso a paso, la construcción del prototipo del robot.

8.2. IMPRESIÓN EN 3D

La impresión 3D es una tecnología la cual hace posible construir objetos reales de objetos virtuales en que se encuentran en 2D. Esto se hace “cortando” el objeto virtual 2D en rebanadas e imprimiendo el objeto real de rebanada por rebanada. Las capas se imprimen una encima de la otra dando así un espesor, por ejemplo de 0.5 mm, el objeto real gana volumen cada vez que se añade una capa. Por lo tanto, la impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. [49]

Las impresoras 3D son por lo general más rápidas, más baratas y más fáciles de usar que otras tecnologías de fabricación por adición, aunque como cualquier proceso industrial, estarán sometidas a un compromiso entre su precio de adquisición y la tolerancia en las medidas de los objetos producidos. Las impresoras 3D ofrecen a los desarrolladores de producto, la capacidad para imprimir partes y montajes hechos de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de montaje. Las tecnologías avanzadas de impresión 3D, pueden incluso ofrecer modelos que pueden servir como prototipos de producto.

Desde 2003 ha habido un gran crecimiento en la venta de impresoras 3D. De manera inversa, el coste de las mismas se ha reducido. Esta tecnología también encuentra uso en los campos tales como joyería, calzado, diseño industrial, arquitectura, ingeniería y construcción, automoción y sector aeroespacial, industrias médicas, educación, sistemas de información geográfica, ingeniería civil y muchos otros [50].

8.3. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE LA PIERNA Y EL PIE DEL LUNAbot W6 VJ1.0[©] UTILIZANDO IMPRESIÓN 3D

Para la fabricación del prototipo del Pie y la Pierna, que son los componentes principales de la unidad de propulsión, para las piezas de plástico, se hizo uso de una impresora 3D. Las características principales de la impresora se muestran en la tabla 8.1.

Tabla 8.1. Características principales de la impresora 3D utilizada [51].

Característica	Especificaciones	
Modelo	Rostock MAX v2	
Fabricante	SeeMECNC	
Ancho total de la impresora	18" (457mm) de diámetro	
Altura total de la impresora	48" (1220mm) de alto con el carrete montado	
Peso total de la impresora	25 lb (11.34 kg)	
Requerimientos de energía	100-240 AC	
Zona X/Y máxima imprimible	11" (280mm) de diámetro	
Tamaño cuadrado máximo imprimible	7 3/4" (197mm)	
Altura Z máxima imprimible	14 3/4" (375mm)	
Resolución máxima de impresión en X/Y	0.1mm	
Resolución máxima de impresión en Z	0.0125mm	
Velocidad promedio de impresión	30-60 mm/s	
Velocidad máxima de los movimientos	300 m/s	
Temperatura máxima del extrusor	245 °C	
Temperatura máxima de la cama	120 °C	

A continuación se presentan los prototipos realizados con la impresora mostrada en la tabla anterior (tabla 8.1).

8.3.1. Prototipo del Pie

Para el prototipo del Pie se utilizó como plástico de impresión PLA en varios colores, así como los componentes comerciales mostrados en las tablas 7.18 y 7.24. La fig. 8.1 muestra

las piezas impresas y comerciales que conforman al Pie y la fig. 8.2 muestra al Pie ya ensamblado.



Fig. 8.1. Piezas impresas y comerciales del prototipo del Pie.



Fig. 8.2. Ensamble del prototipo del Pie.

8.3.2. Prototipo de la Pierna

Para el prototipo de la Pierna, como el del Pie, se utilizó como plástico de impresión PLA en varios colores, así como los componentes comerciales mostrados en las tablas 7.19 y 7.24. La fig. 8.3 muestra las piezas impresas y comerciales que conforman al Pie, la fig. 8.4 muestra la Pierna ya ensamblada y la fig. 8.5 muestra el ensamble del Pie con la Pierna.



Fig. 8.3. Piezas impresas y comerciales del prototipo de la Pierna.



Fig. 8.4. Ensamble del prototipo de la Pierna.



Fig. 8.5. Ensamble del Pie con la Pierna.

CAPÍTULO 9. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROTORIPO DE LA UNIDAD DE PROPULSIÓN

9.1. PRUEBAS

Las pruebas que se realizaron a la unidad de propulsión fueron las siguientes:

- Tiempo total en que asciende el Pie al aplicar diferentes voltajes al motorreductor.
- Tiempo total en que desciende el Pie al aplicar diferentes voltajes al motorreductor.
- Movimiento de los eslabones de la Pierna al aplicarle un torque manual al perno B.

Los resultados de estas pruebas se muestran en el siguiente apartado (9.2).

9.2. RESULTADOS

La tabla 9.1 muestra los resultados del tiempo total que tardo el tornillo del pie en ascender aproximadamente 7 cm aplicando diferentes voltajes, desde 2V hasta 6V, al motorreductor.

Tabla 9.1. Tiempo total al ascender el Pie del LUNAbot®.

Voltaje	Tiempo total (s)	Imagen
2	27.71	
3	18.48	
4	13.86	
5	11.08	
6	9.23	

Ahora, la tabla 9.2 muestra los resultados del tiempo total que tardo el tornillo del pie en descender aproximadamente 7 cm aplicando diferentes voltajes, desde 2V hasta 6V, al motorreductor.

Tabla 9.2. Tiempo total al descender el Pie del LUNAbot®.

Voltaje	Tiempo total (s)	Imagen
2	27.56	
3	18.37	
4	13.78	
5	11.02	
6	9.19	

Por último, la fig. 9.1 muestra la posición del MPL como resultado de hacer girar con la mano al perno B en los dos sentidos.



(a)



(b)

Fig. 9.1. Posiciones del MPL al aplicar un torque con la mano al perno B. (a) Giro en ángulo positivo. (b) Giro en ángulo negativo.

CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES

- ✚ Desde tiempos muy remotos el ser humano ha tenido la inventiva para crear dispositivos que sirvan como máquinas de entretenimiento para la sociedad, así como lo hizo en su respectiva época Al-Jazari o Leonardo da Vinci. También se ha tenido la necesidad de crear robots que imiten la morfología y movimientos de los animales y del ser humano para desplazarse en superficies accidentadas, ya que la capacidad que tienen éstos es superior a la que presentan otro tipo de robots como los de ruedas y orugas.
- ✚ El Mecanismo de Peaucellier-Lipkin (MPL), como se pudo apreciar, es un mecanismo algo poco complejo ya que no sólo su elemento de salida puede generar una línea recta exacta, sino que también al hacer variar la longitud dos de sus eslabones constitutivos se pueden obtener arcos, tanto el cóncavo como el convexo.
- ✚ Las máquinas caminantes clase LUNAbot® basan su unidad de propulsión en el MPL, dicha unidad cuenta con 5 grados de libertad, pero gracias a un mecanismo desarrollado en este proyecto, se logró reducir a 4 grados de libertad la unidad de propulsión. Puesto que una máquina caminante hexápoda clase LUNAbot® (como la que se encuentra en desarrollo nombrada LUNAbot W6 VX1.0®), consta de 30 actuadores en total para poder realizar su movimiento en línea recta y en giro, el mecanismo desarrollado hace que también se reduzca el número de actuadores a sólo 14, aunque se sacrifique la versatilidad de su movilidad en lo que se refiere a giros alrededor de ejes instantáneos de rotación que no cruzan el centro geométrico del robot. Es por eso que el LUNAbot W6 VJ1.0® sólo puede moverse en línea recta y girar sobre su propio centro.
- ✚ Es necesario basarse en normas y criterios para el diseño y fabricación de cualquier objeto o dispositivo, ya que éstas ayudan a tener una idea clara de cómo empezar a desarrollar dicho objeto o dispositivo. También es importante conocer las propiedades de los materiales con los que se pretende realizar los componentes del dispositivo a diseñar.
- ✚ El análisis mediante el Método de Elemento Finito (MEF) es una gran herramienta para poder determinar la resistencia de los materiales que se han seleccionado para el diseño del objeto o dispositivo, ya que si lo que se está diseñando es algún sistema mecánico, éste estará sujeto a cargas estáticas y dinámicas, las cuales serán la causa de que el sistema pueda fallar debido a un exceso en su deformación o a cargas cíclicas que puedan provocar fatiga en los componentes de dicho sistema mecánico.
- ✚ Gracias al MEF, se pudo comprobar que los materiales seleccionados para los componentes del robot cumplen con la resistencia estructural necesaria para soportar las cargas a las cuales estará sometido debido a su propio peso y a sus movimientos.

Además, se puede decir que el plástico biodegradable PLA (que forma parte de la mayoría de las piezas de la máquina caminante) puede ser utilizado también como materia prima para la fabricación de piezas para juguetes.

- + Es una gran ventaja que en la actualidad ya se cuente con el proceso de impresión en 3D y que, a pesar de que ya lleva varios años, se hayan desarrollado nuevos métodos de este tipo impresión haciendo que sea más barata la fabricación de prototipos que con otro tipo de métodos de manufactura.
- + Al haber realizado el prototipo del Pie y la Pierna del LUNAbot W6 VJ1.0[©], se observó que puede funcionar, como se había pensado, como una unidad de propulsión para máquinas caminantes, ya que se aprecia que el MPL se comporta como lo muestra el análisis matemático. Por lo tanto con esto se puede comprobar la hipótesis plateada.
- + Cabe señalar que aún se puede mejorar la morfología de las piezas para que pueda haber una disminución en el tamaño de la unidad de propulsión y, por lo tanto, se obtendría un robot más pequeño y que se pueda apreciar más como un juguete, además que sería más económica su fabricación.

TRABAJO FUTURO

- + Hacer las pruebas necesarias a todo el prototipo del LUNAbot W6 VJ1.0[©] utilizando su propio sistema de control.
- + Reducir el tamaño del LUNAbot W6 VJ1.0[©] para abaratar más los costos de fabricación y mejorar su autonomía.
- + Mejorar el diseño de algunas piezas para optimizar sus propiedades mecánicas.
- + Reemplazar los motorreductores de los pies por otros que manejen más velocidad y un torque similar para hacer más rápidos los movimientos de la unidad de propulsión.
- + Diseñar un tipo de “piel” para cubrir las partes mecánicas del robot y darle un mejor aspecto estético.

REFERENCIAS

- [1]. Pagello E., Gini M. & Ohnishi K. (2010). Advances in autonomous robots for service and entertainment. *Journal: Robotics and Autonomous Systems*. Editorial ELSEVIER. (pp. 829).
- [2]. Mastrogiovanni F. & Sgorbissa A. (2013). A behaviour sequencing and composition architecture based on ontologies for entertainment humanoid robots. *Journal: Robotics and Autonomous Systems*. Editorial ELSEVIER. (pp. 170).
- [3]. Warnakulasooriya S., Bagheri A., Sherburn N. & Shanmugavel M. (2012). Bipedal Walking Robot – A Developmental Desing. *Precedia Engineering*. Editorial ELSEVIER. (pp. 1016 – 1017).
- [4]. Kumar V., Waldron K. (1989). A Review of Research on Walking Vehicles. *The Robotics Review 1*, Ed. Khatib, Craig and T. Lozano Pérez, The MIT Press.
- [5]. Gorrostieta E., Morales C., Solano J., & Vargas E. *Diseñando un Robot Caminante de Seis Patas*.
- [6]. Simionescu, I., Curaj, A., Marin, A. (2007). Modular Walking Robots. En H. Zhang (Ed.), *Climbing and Walking Robots: towards New Applications* (pp.546), Itech Education and Publishing, Vienna, Austria.
- [7]. Jin, B., Chen, C., Li, W. (2012). Power Consumption Optimization for a Hexapod Walking robot. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. Editorial SPRINGER.
- [8]. Jensen, C., Hensel, J., & Short, D. (2004). Materiales de fabricación. *Dibujo y Diseño en Ingeniería* (6ª Ed.). Editorial Mc Graw-Hill. (M. Amador, J. Enríquez, J. Yescas, M. Hano & R. Navarro, Trads.) (pp. 389 – 393). México, D. F.
- [9]. Mott, R. L. (1992). Materiales en el diseño mecánico. En S. Helba & S. C. Robb (Eds.). *Diseño de Elementos de Máquinas*. (2ª Ed.). Editorial Prentice-Hall. (A. Córdova, Trad.). (pp. 42 – 45). México.
- [10]. Kunsman, L., & Carlson, C. (2007). Metales no ferrosos. En E. A. Avallone & T. Baumeister III (Eds.). *Marks. Manual del Ingeniero Mecánico*. Tomo I (9ª Ed.). Editorial McGraw-Hill. (F. Noriega, J. de la Cera, & M. Aguilar, Trads.) (pp. 6-80 – 6-89). México.

- [11]. Smith, E. H. (1998). Materiales, propiedades y selección. *Manual del Ingeniero Mecánico*. Tomo II (1ª Ed.). Editorial Prentice-Hall. (J. de la Cera, R. Escalona, G. Sánchez, H. Escalona, Trads.). (pp. 7/62, 7/106 – 7/146). México.
- [12]. Gupta, A. & Kumar V. (2007). New emerging trends in synthetic biodegradable polymers - polylactide: A critique. *European Polymer Journal*. Vol. 3, No. 10. (pp. 4053 – 4074).
- [13]. Jamshidian, M., Arab, E., Imran, M., Jacquot, M. & Desobry S. (2010). Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Vol. 9.
- [14]. AIMPLAS. Departamento de Diseño e Inyección. (2009). Reglas básicas de diseño de pieza para productos fabricados con materiales plásticos moldeados por inyección. *Guía de buenas prácticas para diseñadores de productos fabricados con materiales plásticos*. Instituto Tecnológico del Plástico. (pp. 90 – 100). España.
- [15]. Etiévant, P. (1991). Acetals. En H. Maarse (Eds.). *Volatile Compounds in Foods and Beverages*. (1ª Ed.). Marcel Dekker, Inc. (pp. 510-511). EUA.
- [16]. Bathe, K. (1996). An Introduction to the Use of Finite Element Procedures. *Finite Element Procedures* (1ª Ed.). Editorial Prentice-Hall. (pp. 1 – 16). EUA.
- [17]. Stolarski, T., Nakasone, Y. & Yoshimoto, S. (2006). Basic of Finite-Element Method. *Engineering Analysis with ANSYS® Software*. (1ª Ed.). Editorial Elsevier Butterworth-Heinemann. (pp. 1 – 34). Reino Unido.
- [18]. Dadkhah, F. & Zecher, J. (2009). Introduction. *ANSYS® Workbench™ Software. Tutorial with Multimedia CD. Release 12*. (1ª Ed.). Editorial Schroff Development Corporation. (pp. 1-1 – 1-8). EUA.
- [19]. Moaveni, S. (1999). Finite Element Analysis. *Theory and Application with ANSYS*. (1ª Ed.). Editorial Prentice-Hall. (pp. 6 – 14). New Jersey, EUA.
- [20]. Núñez, D., Juárez, I., Juárez, M., Márquez, L., González, J., Zaragoza, A. & Curiel, J. (2014). Pelvis Áureos que emplean Unidades de Propulsión Reconfigurables para Máquinas Caminantes. Solicitud de Patente No. MX/a/2014/012577 y No. de Folio MX/E/2014/074558. (pp. 1 – 2). México.
- [21]. Juárez, I., González J., Núñez, D., Juárez, M., Márquez, L., Zaragoza, A., Curiel, J. & López V. (2015). Sistema de Reconfiguración para Robot Hexápodo Mínimo dotado de

Unidades de Propulsión basadas en Mecanismos de Trayectoria Exacta. Solicitud de Patente No. MX/a/2015/000727 y No. de Folio MX/E/2015/003683. (pp. 1 – 29). México.

OTRAS REFERENCIAS

- [22]. Darryl A. (2003). *Toy Robot History. A brief history of toy robots*. Consultado el 6 de noviembre de 2012, de <http://www.robotnut.com/history>
- [23]. *Robótica de Servicios*. Consultado el 6 de noviembre de 2012, de http://www.roboticadeservicios.com/robots_ocio.html
- [24]. *Robotica*. Consultado el 7 de enero de 2013, de <http://roboticaultimageracion.blogspot.mx/p/rebotica-evolucion.html>
- [25]. *Ghoul Gear*. Consultado el 7 de enero de 2013, de <http://ghoulgear.blogspot.mx/2014/05/robot-lilliput-tin-toy.html>
- [26]. *Atomic Robot Man*. Consultado el 7 de enero de 2013, de <https://www.orau.org/ptp/collection/atomic toys/atomicrobotman.htm>
- [27]. *Robert the Robot*. Consultado el 7 de enero de 2013, de <http://www.vectis.co.uk/Page/ViewLot.aspx?LotId=448266&Section=6197>
- [28]. *Icollector.com*. Consultado el 7 de enero de 2013, de http://www.icollector.com/Toy-Marvelous-Mike-Tractor-mfgd-by-Saunders-Aurora-IL-litho-on-metal-crawler-w-robot-driver-c-1_i9374147
- [29]. *Robot Galleries*. Consultado el 7 de enero de 2013, de <http://www.robotnut.com/gallery/92.htm>
- [30]. *Marx Electric Robot*. Consultado el 7 de enero de 2013, de <http://www.liveauctioneers.com/item/2567930>
- [31]. *ASIMO*. Consultado el 7 de enero de 2013, de <http://asimo.honda.com/asimo-specs/>
- [32]. Galet A. (2005). *Robots coreanos caseros*. Consultado el 1° de abril de 2013, de <http://es.engadget.com/2005/08/25/robots-coreanos-caseros>
- [33]. Livingston D. *Robótica, Robots de Entretenimiento*. Consultado el 1° de abril de 2013, de <http://www.pcdactor.com.mx/Radio%20Formula/temas/Robotica.htm>

- [34]. *Un humanoide japonés que canta y baila*. Consultado el 7 de enero de 2013, de <http://martinarium.wordpress.com/2010/10/22/un-humanoide-japones-que-canta-y-baila/>
- [35]. Cox, W. (2010). *Top 10 Robots of the Past 10 Years – Robots of the Decade Awards*. Consultado el 7 de enero de 2013, de <http://www.robotshop.com/blog/en/top-10-robots-of-the-past-10-years-robots-of-the-decade-awards-3743>
- [36]. Bueno, A. *Control y Robótica*. Consultado el 7 de enero de 2013, de http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web_robot_3/robot_indice.html
- [37]. *Introducción a la Robotica Básica (I)*. Consultado el 7 de enero de 2013, de <http://manuelnl.blogspot.mx/2012/12/introduccion-la-robotica-basica-i.html>
- [38]. *The Arabic Automata*. Consultado el 21 de junio de 2013, de <http://history-computer.com/Dreamers/Arabic.html>
- [39]. *A History of Toy Robots*. Consultado el 21 de junio de 2013, de http://www.whatisarobot.co.uk/a_history_of_toy_robots.php#.VHIKkzG-_5o
- [40]. *A History of Robotics: Da Vinci's Mechanical Knight*. Consultado el 21 de junio de 2013, de <http://salviusrobot.blogspot.mx/2014/01/a-history-of-robotics-da-vincis.html>
- [41]. *Historia de la robotica en la ANTIGÜEDAD y la Actualidad*. Consultado el 21 de junio de 2013, de <http://roboticajefferson.blogspot.mx/>
- [42]. ABS. Consultado el 3 de septiembre de 2013, de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/06/abs.html>
- [43]. Aluminios y Metales Unicornio. *Aluminio 6061*. Consultado el 12 de septiembre de 2013, de <http://www.aluminiosmetalesunicornio.com.mx/6061.html>
- [44]. La Paloma. *Nylomaq*. Consultado el 12 de septiembre de 2013, de http://www.lapaloma.com.mx/lapaloma_metales/nylomaq.html
- [45]. Professional Plastics. *Acetal resin*. Consultado el 13 de septiembre de 2013, de http://www.professionalplastics.com/es/ACETAL_RESIN.html
- [46]. La Paloma. *Acetal*. Consultado el 13 de septiembre de 2013, de http://www.lapaloma.com.mx/lapaloma_metales/acetal.html

- [47]. PHASA. *Especialistas en productos de HULE*. Consultado el 13 de septiembre de 2013, de <http://www.prodhule.com.mx/default.aspx>
- [48]. Proto labs®. Consultado el 13 de septiembre de 2013, de <http://www.protolabs.es/resources/molding-design-guidelines/wall-thickness-recommended>
- [49]. *3D Printing process*. Consultado el 9 de junio de 2014, de <http://www.createitreal.com/index.php/technology/process>
- [50]. *Close-Up on Technology. 3D Printers Lead Growth of Rapid Prototyping*. Consultado el 9 de junio de 2014, de <http://www.ptonline.com/articles/3d-printers-lead-growth-of-rapid-prototyping>
- [51]. SeeMeCNC. Delta 3D Printers & More. Consultado el 9 de junio de 2014, de <http://seemecnc.com/products/rostock-max-complete-kit>

GLOSARIO

Autómata humanoide. Máquina que imita la figura y los movimientos de un ser humano.

Bípedo. De dos extremidades o pies.

Brazos manipuladores. Extremidades articuladas que operan con algún instrumento en su extremo final.

CNC. Siglas de Control Numérico por Computadora.

Cuadrúpedo. De cuatro extremidades o pies.

Grado de libertad. Número de parámetros independientes que se necesitan para definir la posición de un sistema mecánico en el espacio en cualquier instante.

Hexápodo. De seis extremidades o pies.

Hojalata. Lámina de hierro o acero, estañada por las dos caras.

Litografía en estaño. Arte de dibujar o grabar en estaño preparado al efecto, para reproducir, mediante impresión, lo dibujado o grabado.

LUNAbot. Clase de máquina caminante que utiliza el mecanismo de Peaucellier-Lipkin en sus unidades de propulsión.

Mecanismo de Peaucellier-Lipkin. Mecanismo desarrollado por Charles Nicolas Peaucellier y Yom Tov Lipman Lipkin en 1864, constituido de ocho eslabones y considerado como un mecanismo de línea recta exacta.

Morfológico(a). Se refiere a la forma de un objeto.

Multi-eslabones. Que consta de muchas piezas enlazadas con otras y que forman algún tipo de cadena.

Octópodo. De ocho extremidades o pies.

Procedimiento. Método que se utiliza para ejecutar algunas cosas.

Punto focal. Punto de referencia para otro punto o elemento del espacio.

Robot. Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas solo a las personas.

Robótica. Técnica que aplica la informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos, por lo general en instalaciones industriales.

Sensor. Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente.

Sentido antihorario. Se refiere al sentido contrario al que giran las agujas del reloj.

Sentido horaio. Se refiere al sentido en que giran las agujas del reloj.

Servo. Se refiere a un mecanismo o sistema auxiliar. En este caso se utiliza para abreviar la palabra servomotor.

Servomotor. Sistema electromecánico que amplifica la potencia reguladora.

Software. Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.

Terreno semiestructurado. Sitio que presenta algún tipo de construcción u obstáculo.

VJ. Siglas para denotar que se refiere a “versión juguete”.

W6. Viene de la palabra en inglés “walking” que se traduce a “caminante”. El número 6 es por tener dicho número de extremidades.

ANEXOS

A partir de esta sección se presentan los dibujos de detalle de LUNAbot W6 VJ1.0[©].