

PROYECTO DE GRADO

Presentado ante la ilustre UNIVERSIDAD DE LOS ANDES como requisito final para
obtener el Título de INGENIERO DE SISTEMAS

DISEÑO, MODELADO Y CONTROL DE UN ROBOT TIPO HEXÁPODO, VALIDADO A TRAVÉS DE SIMULACIONES.

Por

Br. José Gabriel Kordahi Amair

Tutor: Prof. Anna Patete

Cotutor: Prof. Francisco Vilorio

Cotutor: Prof. Miguel Díaz

26 de Enero 2017



©2017 Universidad de Los Andes Mérida, Venezuela

Atribución - No Comercial - Compartir igual 3.0 Venezuela
(CC BY - NC - SA 3.0 VE)

DISEÑO, MODELADO Y CONTROL DE UN ROBOT TIPO HEXÁPODO, VALIDADO A TRAVÉS DE SIMULACIONES.

Br. José Gabriel Kordahi Amair

Proyecto de Grado — Control y automatización, 337 páginas

Resumen: En el presente texto se propone el diseño y modelado de la estructura de un robot tipo hexápodo terrestre no volador multipropósito, y el control del mismo a través de algún patrón de locomoción. Los robots tipo hexápodo corresponden a unidades móviles compuestas por tres pares de patas con al menos un grado de libertad en cada una de estas, dichas extremidades se ubican a los laterales de la estructura de forma bilateralmente simétrica o dispuestas de forma equitativa radial brindando estabilidad y capacidades de movimiento omnidireccional, lo cual hace a esta estructura muy versátil a la hora de desplazarse en cualquier tipo de terreno mediante el uso de diversos patrones de locomoción. Las estructuras hexápodas corresponden a un gran campo de estudio en el área de la robótica y la mecatrónica por el simple hecho de poseer extremidades compuestas por articulaciones, brindando así, diversos enfoques de desarrollo como la estabilidad estática y dinámica de su estructura, capacidad de carga, interacción de las extremidades con el entorno, diseño de patrones de locomoción, selección de actuadores para las articulaciones, fuentes de energía, elección de materiales de la estructura, grado de autonomía, entre otros. La generación de patrones de locomoción fijos o adaptativos, según sean las condiciones del terreno, ha sido uno de los puntos de mayor relevancia en cuanto al diseño que este tipo de robots implica. Dadas sus amplias posibilidades de generación de patrones de locomoción, representa una plataforma móvil multipropósito capaz de ser programada para la realización de tareas tan simples como desplazarse en territorios planos o tan complejas como mantener la estabilidad de su base al momento seguir una trayectoria seleccionando el camino de menor resistencia, y su base o extremidades representan un elemento útil para la incorporación de todo tipo de sensores o herramientas.

Se pretende en este documento, hacer uso de los recursos bibliográficos disponibles hasta la fecha, proyectos desarrollados por aficionados, investigaciones y trabajos realizados por empresas comerciales, universidades y organizaciones internacionales para sentar los pilares fundamentales en la selección y diseño de una estructura para un robot tipo hexápodo, obteniendo un modelo de interés que permita definir algún patrón de locomoción para controlar el movimiento de dicho robot. Una vez obtenido el modelo de interés de la estructura y el patrón de locomoción correspondiente al movimiento del robot, Se realizan simulaciones para validar los modelos obtenidos y corroborar que se ha logrado lo especificado en el diseño.

El termino multipropósito hace referencia a la posibilidad de utilizar dicha plataforma para la incorporación de cualquier tipo de herramienta, sensor o dispositivo en la base o extremidades del robot tipo hexápodo, de tal forma de ampliar su funcionalidad y capacidad de realización de diversas tareas.

Palabras clave: Control, hexápodo, locomoción, modelado, robótica.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Índice

Índice de Tablas	viii
Índice de Figuras	xii
Agradecimientos	xxviii
1 Generalidades	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Planteamiento del problema	27
1.3 Justificación	28
1.4 Objetivos	30
1.4.1 Objetivo general	30
1.4.2 Objetivos específicos	30
1.5 Metodología	30
1.6 Alcance	32
1.7 Producto	33
2 Marco Teórico	34
2.1 Robots	34
2.1.1 Clasificación de los robots	36
2.2 Robots hexápodos	43
2.2.1 Clasificación de robots hexápodos	44
2.3 Grados de libertad	48
2.4 Actuadores	49
2.5 Conceptos de estabilidad	49

2.5.1	Estabilidad estática	49
2.5.2	Estabilidad dinámica	50
2.6	Cinemática	51
2.6.1	Representación espacial	51
2.6.2	Matriz de traslación	53
2.6.3	Matriz de rotación	53
2.6.4	Matriz de transformación homogénea	55
2.6.5	Transformaciones homogéneas sucesivas	57
2.7	Denavit-Hartenberg	59
2.7.1	Cinemática directa	62
2.7.2	Cinemática inversa	63
2.8	Hexápodos en la naturaleza	64
2.8.1	Patrones de locomoción naturales de los hexápodos	67
2.9	Servomotores	68
2.9.1	Funcionamiento	69
2.10	Materiales comúnmente utilizados para la construcción de robots hexápodos	70
2.11	Torque	70
2.12	Modelado de sistemas mediante ecuaciones de Euler-Lagrange	71
3	Diseño de Prototipo	74
3.1	Dimensiones del robot	75
3.2	Base del robot	76
3.2.1	Forma de la base y ubicación de anclaje de las extremidades	77
3.3	Extremidades del robot	81
3.3.1	Robots hexápodos referenciales	81
3.3.2	Bio - inspiración	82
3.3.3	Posición de anclaje de las bases de las extremidades	88
3.3.4	Orientación y ubicación de los grados de libertad de las extremidades	88
3.4	Selección de actuadores	90
3.5	Selección de dispositivos electrónicos	92

3.6	Selección de piezas complementarias para la estructura del robot	94
3.6.1	Componentes para la estructura	94
3.6.2	Componentes electrónicos	95
3.7	Material a utilizar para la estructura	96
3.8	Diseño de piezas	96
3.8.1	Base de la estructura del robot	97
3.8.2	Pre-cálculo del peso de los eslabones	99
3.8.3	Cálculo de torques	100
3.9	Área de trabajo del robot	114
3.10	Especificaciones generales del prototipo	117
4	Modelado y Control	120
4.1	Modelado de la estructura	121
4.1.1	Denavit-Hatenberg	122
4.2	Modelado de Servomotores	152
4.3	Modelado de los sistemas actuador-eslabón	157
4.3.1	Modelado mediante Euler-Lagrange	158
4.4	Selección y diseño de controladores	176
4.5	Modelo de validación para polígono de apoyo	194
5	Implementación Virtual del Prototipo	205
5.1	V-rep, importación e implementación del prototipo	206
5.1.1	V-rep	206
5.1.2	Importación de piezas a V-rep	207
5.1.3	Ensamble de prototipo virtual	208
5.2	Conexión y comunicación entre V-rep y Matlab	212
5.3	Implementación de controladores PI externos	214
5.3.1	Discretización de controladores PI	214
5.3.2	Método de implementación	218
5.3.3	Validación de movimientos de la extremidad	222
5.4	Cinemática directa y polígono de apoyo en <i>V-rep</i>	232
5.5	Validación de cinemática inversa en <i>V-rep</i>	237

6	Locomoción	241
6.1	Manejador central del patrón de locomoción	242
6.2	Definición de tabla de movimiento	249
6.3	Herramientas para el análisis de desempeño y validación de los patrones de locomoción.	250
6.4	Datos iniciales para el diseño de patrones de locomoción	255
6.5	Propuesta de patrones de locomoción	261
6.5.1	Gateo trípode para desplazamiento en línea recta versión 1	263
6.5.2	Giro en torno al eje base del robot	274
6.5.3	Patrón de locomoción para giro en dos tiempos	279
6.5.4	Patrón de locomoción para caminata lateral o caminata de tipo cangrejo	283
6.5.5	Patrón de locomoción cuádruple, modo de trabajo de doble extremidad	288
7	Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones	294
7.1	Análisis de resultados	294
7.2	Conclusiones	306
7.3	Recomendaciones	309
	Bibliografía	330

Índice de Tablas

1.1	Comparacion Robots Hexápodos. Fuente: (Tedeschi y Carbone, 2014, p.187)	27
2.1	Tabla de parámetros D-H	62
3.1	Medidas de referencia de robot hexapodo <i>Phoenix</i> . Fuente: Robot Shop (2016)	76
3.2	Peso de referencia de robot hexapodo <i>Phoenix</i> . Fuente: Robot Shop (2016)	76
3.3	Proporciones entre tagmas o eslabones de extremidades hexápodas en la naturaleza	87
3.4	Descripción de dimensiones y peso de componentes electrónicos	94
3.5	Descripción de componentes complementarios para la estructura del robot	96
3.6	Descripción de pesos a soportar por las extremidades de soporte	102
3.7	Descripción de variables para el cálculo de torques	104
3.8	Cálculo de longitud de eslabones 2 y 3	109
3.9	Peso total aproximado de una extremidad desacoplada de la estructura	117
3.10	Peso total aproximado del robot con todos sus componentes y piezas .	118
3.11	Rango de movimiento de los actuadores	118
3.12	Dimensiones del robot virtual ensamblado	119
4.1	Distancias representativas para DH	125
4.2	Parámetros Denavit-Hatemberg para una extremidad prototipo	126
4.3	Variación de θ_0 respecto a la distribución de la extremidad	129
4.4	Prueba de cinemática directa para modelo de la estructura en <i>Matlab</i> .	130
4.5	Tabla de prueba para cinemática inversa	148

4.6	Descripción de constantes para cálculo de inercias	165
4.7	Descripción de los valores utilizados para cada uno de los controladores PI externos para sistema GLD 1	188
4.8	Descripción de los valores utilizados para cada uno de los controladores PI externo para sistema GLD 2	190
4.9	Descripción de los valores utilizados para cada uno de los controladores PI externo para sistema GLD 3	193
5.1	Cálculo de tiempo de muestreo para los tres sistemas	215
5.2	Controladores discretizados	216
5.3	Coordenadas angulares para prueba de cinemática inversa en <i>V-rep</i> . .	238
6.1	Tabla de referencia para descripción de movimientos del robot	249
6.2	Tabla 1 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de gateo trípole de desplazamiento en línea recta	265
6.3	Tabla 2 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de gateo trípole de desplazamiento en línea recta	265
6.4	Tabla 3 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de gateo trípole de desplazamiento en línea recta	265
6.5	Tabla 4 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de gateo trípole de desplazamiento en línea recta	266
6.6	Parámetros MCPL gateo trípole V1 Escenario 1	267
6.7	Tabla comparativa de desempeño según el número de ciclos para patrón de locomoción de gateo trípole con valores del MCPL escenario uno. .	272
6.8	Comparación entre diferentes valores de operacion del MCPL para patrón de locomoción de gateo trípole versión 1	273
6.9	Tabla 1 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de giro en un tiempo	275
6.10	Tabla 2 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de giro en un tiempo	275
6.11	Parámetros MCPL giro en un tiempo escenario 1	276

6.12	Tabla de parámetros para los diferentes escenarios de ejecución para el MCPL	278
6.13	Desempeño para patrón de locomoción de giro en un tiempo, para varios parámetros del MCPL	278
6.14	Definición de movimientos para patrón de locomoción de giro en dos tiempos	279
6.15	Definición de movimientos para patrón de locomoción de giro en dos tiempos	280
6.16	Definición de movimientos para patrón de locomoción de giro en dos tiempos	280
6.17	Parámetros MCPL giro en dos tiempo escenario 1	281
6.18	Tabla de parámetros para los diferentes escenarios de ejecución para el MCPL del patrón de locomoción de giro en dos tiempos	283
6.19	Desempeño para patrón de locomoción de giro en un tiempo, para varios parámetros del MCPL	283
6.20	Descripción de parámetros utilizados para el patrón de locomoción <i>Crab-Walking</i> o caminata tipo cangrejo	285
6.21	Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo	285
6.22	Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo	285
6.23	Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo	286
6.24	Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo	286
6.25	Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo	286
6.26	Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo	286
6.27	Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo	287
6.28	Desempeño del patrón de locomoción para caminata tipo cangrejo . . .	288
6.29	Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple	291
6.30	Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple	291
6.31	Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple	291
6.32	Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple	292
6.33	Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple	292
6.34	Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple	292

6.35	Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple	292
6.36	Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple	293
6.37	Desempeño del patrón de locomoción para caminata cuádruple	293

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Índice de Figuras

1.1	Octaedro cuyos bordes opuestos son equivalentes en pares. (Bricard, R., 2010)	6
1.2	Plataforma hexápoda diseñada por Gough en 1949, <i>Universal Tyre-Testing Machine</i> para la <i>Dunlop Rubber Company</i> en Inglaterra. (ParallelMIC, 2003)	7
1.3	Base de simulador propuesta por Stewart en 1965, vista pictórica. Tomado de: <i>A Platform With Six Degrees Of Freedom</i> , (Stewart D., 1965).	7
1.4	Configuración para actuadores para la plataforma Stewart. Tomado de: <i>A Platform With Six Degrees Of Freedom</i> , (Stewart D., 1965).	8
1.5	Concepto de Mecanismo para la Robot Crane por Dagalakis et al. (1989, p.8).	10
1.6	Simulador RealitySeven desarrollado por Thales Training and Simulation (2015) y L3 Link Simulation and Training (2012) en 2010.	11
1.7	Plataforma de acople LIDS de la NASA, (NASA, 2005).	12
1.8	Analogía de la Plataforma Stewart con la base de un robot hexápodo. Fuente: Propia	13
1.9	Tractor Walking Harvester de John Deere en el año 2002 con sierra de grúa de TimberJack. (Forest Industries Network, 2005)	14
1.10	Hexápodo COMET Universidad de Chiba, Japón. (a) COMET-I, (b) COMET-II, (c) COMET-III, (d) COMET-IV. Tomado de: <i>Hydraulically Actuated Hexapod Robots</i> , Nonami et al. (2014, p.12).	15
1.11	COMET-IV Modo de Trabajo, Herramienta de pala Excavadora en la extremidad frontal derecha. Fuente: Nonami et al. (2014, p.12).	16

1.12 (a) <i>NASA Tri-ATHLETE Rover</i> (2010), (b) Acople de un prototipo de taladro para extracción de material y muestras de la superficie. Fuente: (NASA, 2009)	17
1.13 (a) LAURON-I (1994) y (b) LAURON-V (2013). Siegwart et al. (2011, p.29)	19
1.14 (Hexápodo Tenebrio desarrollado en la Universidad del Valle, Colombia. Tomado de: Arango y Satizabal (2003, p.1)	20
1.15 (a) Patrón de locomoción básico de gateo trípode, (b) Esquema conceptual de dos células neuronales utilizadas para generar patrones de locomoción. Fuente: (Perez, 2009, p.5)	21
1.16 Hexápodo Genghis (1989) diseñado en el MIT. citet[p.30]siegwart2011 .	22
1.17 Hexápodo MorpHex MARK I diseñado por Halvorsen en 2010. Fuente: (Halvorsen, K., 2015)	23
1.18 Hexápodo MorpHex MK III diseñado por Halvorsen en 2014. Fuente: (Halvorsen, K., 2015)	24
1.19 Hexápodo Phonenix, diseñado por Halvorsen (2007). (Halvorsen, K., 2015)	25
1.20 Hexápodo PhantomX AX MARK II distribuido por <i>TrossenRobotics Inc.</i> Tomado de: (TrossenRobotics, 2015)	26
2.1 (a) <i>Quadrator F450 APM 2.6</i> , (b) <i>Kingduino 4WD Ultrasonic</i> , (c) <i>Stag Mk2</i>	38
2.2 (d) <i>Snake robot of Carnegie Mellon University</i> ,(e) <i>The Penn Jerboa: Tailed Hopping Robot</i>	38
2.3 Raibert's hopping robots (a) <i>3D one-legged Hopper</i> , (b) <i>3D biped</i> . Tomado de: (Nonami et al., 2014, p.9)	40
2.4 (a) <i>Honda ASIMO</i> , (b) <i>Rabbit biped robot</i> . Tomado de: (Nonami et al., 2014, p.9)	41
2.5 Robots Cuadrúpedos caminantes <i>TITAN</i> . (a) <i>TITAN-III</i> , (b) <i>TITAN-IV</i> , (c) <i>TITAN VIII</i> . Tomado de: (Nonami et al., 2014, p.10)	41
2.6 Robots Hexápodos(a) <i>COMET-III</i> , (b) <i>COMET-IV</i> , (c) <i>Genghis II</i> . Tomado de: (Nonami et al., 2014, p.12)	42

2.7 Robots Octópodos (a) Robot para la exploración de volcanes <i>DANTE-II</i> , (b) <i>Veteran</i> . Tomado de: (Nonami et al., 2014, p.13)	42
2.8 Posicionamiento de extremidades para robots hexápodos. (a) Simetría bilateral, (b) Simetría radial entorno a una circunferencia, (c) Simetría radial en torno a un hexágono. Fuente: (Tedeschi y Carbone, 2014, p.193)	45
2.9 Configuración de extremidades para hexápodos bio inspirados (a) Configuración arácnido, (b) Configuración reptil, (c) Configuración mamífera. Fuente: (Tedeschi y Carbone, 2014, p.193)	46
2.10 Posición de flexión de las articulaciones para las extremidades (a) Configuración de flexión interna, (b) Configuración de flexión externa. Fuente: (Tedeschi y Carbone, 2014, p.193)	47
2.11 Polígono de estabilidad estática y márgenes de estabilidad longitudinales. Fuente: (Nonami et al., 2014, p.16)	50
2.12 Sistema de representación de coordenadas cartesianas	52
2.13 Sistema de referencia trasladado. Fuente: Khatib (2010)	53
2.14 Operación de rotación con matrices, rotación de punto B respecto a punto A. Fuente: Khatib (2010)	54
2.15 Transformaciones homogéneas sucesivas. Fuente: Khatib (2010)	58
2.16 Diagrama de parámetros D-H. Fuente: Khatib (2010)	59
2.17 Diagrama de extremidad con eslabones y articulaciones señalizados. Fuente: Khatib (2010)	63
2.18 Segmentos del cuerpo de una hormiga, esquema. Fuente: (Merchant, 2013)	65
2.19 Extremidad posterior de saltamontes moderno. Fuente: (Gillott, 2005, p.76)	66
2.20 Extremidad media saltamontes moderno, esquema de musculatura. O, musculo elevador del trocánter y fémur; P,Q, musculo depresor del trocánter y fémur; S,T, Elevador y depresor de tibia; U,V, Elevador y depresor del tarso; P, depresor del pre tarso. Cx, cadera; Tr, trocánter; Fm, fémur; Tb, tibia; Tar, tarso. Fuente: (Snodgrass et al., 1935, p.174)	67

2.21	Gateo trípode de escarabajo de tierra. (a) grupo trípode de extremidades uno (1), (b) grupo tripode de extremidades dos (2) Fuente: (Gullan y Cranston, 2014, p.61).	68
2.22	Esquema básico de los componentes de un servomotor. Fuente: (Escuela Politécnica Superior de Albacete, 2010)	69
2.23	Torque o momento de fuerza aplicada. Fuente: Propia	71
3.1	Analogía entre bases de plataforma de: (a) Octraedro de Cauchy, (b) Plataforma Stewart, (c) Plataforma Gough. Fuente: Propia	79
3.2	Analogía entre bases de plataforma de: (a) Base hexagonal propuesta (<i>Vista superior</i>), (b) Plataforma con base hexagonal (<i>Vista perspectiva</i>). Fuente: Propia	79
3.3	Posibles movimientos de la base triangular $a - c - e$ de la Figura 3.2, según elongación de las extremidades por separado. (a) Base triangular sin movimiento de extremidades, (b) Extremidad f elongada, (c) Extremidad c elongada, (d) Extremidad a elongada. Fuente: Propia	81
3.4	(a) Extremidad media de saltamontes (<i>Melanoplus</i>) (b) Extremidad frontal grillo de grama (<i>Scudderia</i>). fm , fémur; cx , coxa; tr , trocánter; tb , tibia; ts , tarso. Fuente: (Gullan y Cranston, 2014)	83
3.5	Extremidades hexápodas. (a) Grillo topo, extremidad delantera; (b) extremidad trasera abeja melífera; (c) extremidad delantera abeja melífera. Fuente: (Gillott, 2013, p.78), (Gillott, 2013, p.79)	84
3.6	Extremidades hexápodas. (a) Extremidad posterior cucaracha común, (b) Extremidad media hormiga de fuego. Fuente: (Gullan y Cranston, 2014, p.47)	84
3.7	Analogía entre extremidad hexápoda y noción inicial de diseño de extremidad prototipo. Fuente: Propia.	86
3.8	Reducción de modelo o prototipo de extremidad. Fuente: Propia.	86
3.9	Prototipos de extremidades hexápodas (a) Extremidad media abeja melífera (b) Extremidad delantera grillo topo (c) Extremidad media de saltamontes y hormigas. Fuente: Propia.	89

3.10	Plasticidad de extremidad con tres grados de libertad. (a) Extremidad alcanzando posiciones de locomoción, (b) Extremidad alcanzando puntos en el espacio, (c) Extremidades como herramientas conjuntas. Fuente: Propia.	90
3.11	Servomotor <i>Hitec HS-5645MG</i> Fuente: (Hitec Multiplex, 2016).	91
3.12	Componentes electrónicos seleccionados. (a) Tarjeta programable <i>Raspberry Pi B+</i> , (b) Batería <i>Venom 20C 3S 1300mAh 11.1V LiPo</i> , (c) Batería <i>Venom 20C 2S 4000mAh 7.4V LiPo</i>	93
3.13	Componentes electrónicos seleccionados. (a) Regulador de voltaje <i>LM2596-DC-DC</i> , (b) Controlador de servomotores <i>Neewer32</i> de 32 canales, (c) Convertidor de niveles lógicos <i>Qunqi IIC I2C</i> Bi-Direccional de cuatro canales, (d) Acelerómetro <i>SainSmart MMA8451</i> Digital Triaxial.	94
3.14	Base para servomotores <i>NEEWER</i> Fuente: Referencial de fabricante.	95
3.15	Conectores y cables varios. Fuente: Imagen referencial.	95
3.16	Base prototipo del robot, diseñada. Fuente: Propia.	97
3.17	Prototipo con fines de prueba, con elementos electrónicos posicionados en su base. Fuente: Propia.	98
3.18	Esquema de carga para las articulaciones. Fuente: Propia.	103
3.19	Diagrama de fuerzas referencial . Fuente: Propia.	105
3.20	Diagramas para cálculo de torque y longitud de eslabones. (a) Caso 1 τ_{s2} , extremidad en el aire; (b) Caso 2 τ_{s2} , extremidad en el suelo; (c) Caso 3 τ_{s3} , extremidad en el aire; (d) Caso 4 τ_{s3} , extremidad en el suelo. Fuente: Propia.	106
3.21	Prototipo 1 de extremidad del hexápodo. Fuente: Propia.	108
3.22	Rango de movimiento de eslabón uno, respecto a su eje y la base del robot, plano XY. Fuente: Propia.	110
3.23	Posiciones y rango de movimiento para los servomotores dos y tres para el prototipo diseñado. Fuente: Propia.	111
3.24	Prototipo de extremidad completa del hexápodo. Fuente: Propia.	112
3.25	Servomotor 1 y sus componentes Fuente: Propia.	112
3.26	Servomotor 2 y sus componentes. Fuente: Propia.	113

3.27	Servomotor 3 y sus componentes. Fuente: Propia.	113
3.28	Eslabón 3 y sus componentes. Fuente: Propia.	113
3.29	Prototipo de robot hexápodo Hexpodv1, implementado en software de simulación robótica <i>V REP EDU</i> . Fuente: Propia.	114
3.30	Área de trabajo muestreada para una extremidad del robot. (a) Área de trabajo plano XY, (b) Área de trabajo plano XZ. Fuente: Propia. .	115
3.31	Área de trabajo muestreada las extremidades del robot. (a) Área de trabajo para extremidad única plano YZ, (b) Área de trabajo conjunta para tres extremidades. Fuente: Propia.	116
4.1	Analogía entre extremidades del robot hexápodo y base común con múltiples extremidades. Fuente: Propia.	123
4.2	Asignación de identificador para cada extremidad del robot. Fuente: Propia.	124
4.3	Dimensiones de eslabones respecto a la base y cada eje de la extremidad prototipo. Fuente: Propia.	124
4.4	Representación del sistema de coordenadas de referencia mediante método DH para la extremidad prototipo. Fuente: Propia.	126
4.5	Implementación de modelo DH de la extremidad prototipo en <i>Software MRPT RAK</i> . Fuente: Propia.	127
4.6	Representación del robot hexápodo implementado en <i>Matlab</i> , para comprobación de cálculo de cinemática directa. Fuente: Propia.	130
4.7	Representación de puntos para comprobación de cinemática directa. Fuente: Propia.	131
4.8	Planos de acción de los grados de libertad de la extremidad. (a) Grado de libertad 1 (Plano XY), (b) Grados de libertad dos y tres (Plano XZ). Fuente: Propia.	133
4.9	Gráfica para obtener ángulo θ_1 del grado de libertad uno (1). Fuente: Propia.	135
4.10	Gráfica para obtener ángulo θ_1 del grado de libertad uno (1). Fuente: Propia.	136
4.11	Gráfica de referencia para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 . Fuente: Propia. .	137

4.12	Gráfica de referencia para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 . Fuente: Propia. .	138
4.13	Gráfica de referencia para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla arriba. Fuente: Propia.	140
4.14	Gráfica de referencia para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla abajo. Fuente: Propia.	141
4.15	Gráfica de referencia caso a para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla arriba. Fuente: Propia.	141
4.16	Gráfica de referencia caso b para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla arriba. Fuente: Propia.	142
4.17	Gráfica de referencia caso c para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla arriba. Fuente: Propia.	142
4.18	Gráfica de referencia caso a' para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla abajo. Fuente: Propia.	143
4.19	Gráfica de referencia caso b' para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla abajo. Fuente: Propia.	144
4.20	Gráfica de referencia caso c' para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla abajo. Fuente: Propia.	144
4.21	Gráfica de referencia para representación de posición de rodilla para θ_3 . Fuente: Propia.	145
4.22	Ejemplo de esfera de aceptación para puntos obtenidos mediante cinemática inversa. Fuente: Propia.	147
4.23	Comparación de resultados obtenidos mediante la cinemática inversa, con valores de la cinemática directa Fuente: Propia.	149
4.24	Traslación y rotación del sistema de referencia del robot, en base a un sistema solidario. (a)Mímico del hexápodo en base a sistema de referencia propio, (b)Mímico del hexápodo en base a sistema de referencia trasladado y rotado. Fuente: Propia.	151
4.25	Circuito de un motor <i>DC</i> controlado por armadura. Fuente: (Dorf, 2001)	153
4.26	Diagrama de bloques para el motor controlado por armadura. Fuente: (Dorf, 2001)	153

4.27 Diagrama de bloques para el motor con controlador PID acoplado.	
Fuente: Propia	155
4.28 Respuesta del modelo del servomotor, $ref = 1.0472rad$. Fuente: Propia	157
4.29 Separación de sistemas actuador-eslabón. Fuente: Propia	159
4.30 Diagrama péndulo simple para modelado de Euler-Lagrange Fuente:	
Propia	160
4.31 Diagrama de longitudes para el cálculo de inercia del sistema servomotor	
1. Fuente: Propia	162
4.32 Diagrama de longitudes para el cálculo de inercia del sistema servomotor	
2. Fuente: Propia	163
4.33 Diagrama de longitudes para el cálculo de inercia del sistema servomotor	
3. Fuente: Propia	164
4.34 Respuesta del sistema de ecuaciones (4.100) y (4.101) Actuador-eslabón	
para servomotor 1. Fuente: Propia	167
4.35 Respuesta del sistema no lineal Actuador-eslabón para servomotor 2	
(ecuaciones (4.102) y (4.103)). Fuente: Propia	169
4.36 Comparación de respuesta del sistema no lineal (ecuaciones (4.102)	
y (4.107)) con sistema lineal (ecuaciones (4.104) y (4.105)) para	
servomotor 2. Fuente: Propia	171
4.37 Comparación de respuesta del sistema no lineal (ecuaciones (4.102)	
y (4.107)), con el sistema lineal (ecuaciones (4.104) y (4.105)) para	
servomotor 2, (a) Comparación de posición angular, (b) Valor absoluto	
del error. Fuente: Propia	172
4.38 Respuesta del sistema no lineal Actuador-eslabón para servomotor 3,	
(ecuaciones (4.108) y (4.109)). Fuente: Propia	173
4.39 Comparación de respuesta del sistema no lineal (ecuaciones (4.108)	
y (4.113)) con sistema lineal (ecuaciones (4.110) y (4.111)) para	
servomotor 3. Fuente: Propia	175

4.40	Comparación de respuesta del sistema no lineal (ecuaciones (4.108) y (4.113)) con sistema lineal (ecuaciones (4.110) y (4.111)) para servomotor 3, (a) Comparación de posición angular, (b) Valor absoluto del error. Fuente: Propia	175
4.41	Comparación entre características de la respuesta de posición angular de los sistemas lineales 1,2 y 3. (a)Sistema lineal 1, (b)Sistema lineal 2, (c)Sistema lineal 3. Fuente: Propia	176
4.42	Comparación de respuesta del sistema uno, para la función de transferencia original (ecuación (4.120)) y reducida (ecuación (4.130)). Fuente: Propia	182
4.43	Comparación de respuesta del sistema dos, para la función de transferencia original (ecuación (4.124)) y reducida (ecuación (4.132)). Fuente: Propia	183
4.44	Comparación de respuesta del sistema tres, para la función de transferencia original (ecuación (4.128)) y reducida (ecuación (4.134)). Fuente: Propia	184
4.45	Diagrama de bloques para planta con controlador PI externo. Fuente: Propia	185
4.46	Lugar de las raíces, función de transferencia en lazo abierto para sistema de GLD 1 sin controlador PI externo. Fuente: Propia	187
4.47	Comparación y comprobación de respuesta para el sistema actuador-eslabón 1, para tres velocidades de controladores PID externos. Fuente: Propia	189
4.48	Lugar de las raíces, función de transferencia en lazo abierto para sistema de GLD 2, sin controlador PI externo. Fuente: Propia	190
4.49	Gráfica comparativa de la respuesta de los tres controladores PI externos diseñados para el sistema actuador-eslabón 2. Fuente: Propia	191
4.50	Lugar de las raíces, función de transferencia en lazo abierto para sistema de GLD 3, sin controlador PI externo. Fuente: Propia	192
4.51	Gráfica comparativa de la respuesta de los tres controladores PI diseñados para el sistema GLD 3. Fuente: Propia	193

4.52	Diferentes puntos de contacto para cada extremidad del robot. Fuente: Propia	196
4.53	Clasificación de alturas según la posición de los puntos de contactos para cada una de las extremidades. Fuente: Propia	197
4.54	Posibles polígonos contenidos en un hexágono como base de polígono de apoyo, Figuras básicas. Fuente: Propia	199
4.55	Datos para la matriz de ángulos de entrada y tabla de salida del terminal de <i>Matlab</i> . Fuente: Propia	201
4.56	Gráficas representativas para polígonos de apoyo encontrados, (a) Polígonos de apoyo aprobados, (b) Gradiente en función de la altura del punto respecto a la base. Fuente: Propia	202
4.57	Datos para la matriz de ángulos de entrada y tabla de salida del terminal de <i>Matlab</i> . Fuente: Propia	202
4.58	Gráficas representativas para polígonos de apoyo encontrados, (a) Polígonos de apoyo aprobados, (b) Gradiente en función de la altura del punto respecto a la base. Fuente: Propia	203
4.59	Datos para la matriz de ángulos de entrada y tabla de salida del terminal de <i>Matlab</i> . Fuente: Propia	203
4.60	Gráficas representativas para polígonos de apoyo, (a) Polígonos de apoyo aprobados, (b) Gradiente en función de la altura del punto respecto a la base. Fuente: Propia	204
5.1	Reducción de polígonos para importación de piezas en V-rep. (a) Pieza de soporte del servomotor original, (b) Reducción de polígonos para eslabón dos completo. Fuente: Propia	208
5.2	Ensamble completo del hexápodo virtual diseñado, en su versión prototipo 1, (a)Estructura de mallas de polígonos del robot reactiva a simulaciones físicas, (b) Representación visual en la interfaz de V-rep. Fuente: Propia	209
5.3	Modelo del hexápodo, prototipo dos. Fuente: Propia	210
5.4	Representación de inercias de componentes del robot en <i>V-rep</i> . Fuente: Propia	211

5.5	Diagrama de Bode de los tres sistemas, para determinar T_o menor. Fuente: Propia	215
5.6	Comparación de la respuesta del sistema 1 controlado a tiempo continuo y a tiempo discreto. Fuente: Propia	217
5.7	Comparación de la respuesta del sistema 2 controlado a tiempo continuo y a tiempo discreto. Fuente: Propia	217
5.8	Comparación de la respuesta del sistema 3 controlado a tiempo continuo y a tiempo discreto. Fuente: Propia	218
5.9	Diagrama del esquema de funcionamiento para controladores PI externos paralelos Fuente: Propia	220
5.10	Ejemplo de banda de error, banda de aceptación de error para controladores PI externo. Fuente: Propia	221
5.11	Comparación entre respuesta de la articulación uno obtenida en el mímico de <i>V-rep</i> respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en <i>Matlab</i> , para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad lenta. Fuente: Propia	223
5.12	Comparación entre respuesta de la articulación uno obtenida en el mímico de <i>V-rep</i> respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en <i>Matlab</i> , para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad media. Fuente: Propia	224
5.13	Comparación entre respuesta de la articulación uno obtenida en el mímico de <i>V-rep</i> respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en <i>Matlab</i> , para el control de posición angular con el controlador PI de velocidad rápida. Fuente: Propia	225
5.14	Comparación entre respuesta de la articulación dos obtenida en el mímico de <i>V-rep</i> respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en <i>Matlab</i> , para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad lenta. Fuente: Propia	226

5.15	Comparación entre respuesta de la articulación dos obtenida en el mímico de <i>V-rep</i> respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en <i>Matlab</i> , para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad media. Fuente: Propia	227
5.16	Comparación entre respuesta de la articulación dos obtenida en el mímico de <i>V-rep</i> respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en <i>Matlab</i> , para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad rápida. Fuente: Propia	228
5.17	Comparación entre respuesta de la articulación tres obtenida en el mímico de <i>V-rep</i> respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en <i>Matlab</i> , para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad lenta. Fuente: Propia	229
5.18	Comparación entre respuesta de la articulación tres obtenida en el mímico de <i>V-rep</i> respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en <i>Matlab</i> , para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad media. Fuente: Propia	230
5.19	Comparación entre respuesta de la articulación tres obtenida en el mímico de <i>V-rep</i> respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en <i>Matlab</i> , para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad rápida. Fuente: Propia	231
5.20	Polígono de apoyo para patrón de locomoción trípode, Fase 1. Fuente: Propia	234
5.21	Polígono de apoyo para patrón de locomoción trípode, Fase 2. Fuente: Propia	234
5.22	Polígono de apoyo para patrón de locomoción trípode, Fase 3. Fuente: Propia	235
5.23	Fase uno de la secuencia de polígonos de apoyo. Fuente: Propia	236
5.24	Fase dos de la secuencia de polígonos de apoyo. Fuente: Propia	236
5.25	Fase tres de la secuencia de polígonos de apoyo. Fuente: Propia	237
5.26	Diagrama de funcionamiento de la cinemática inversa para V-rep. Fuente: Propia	238

5.27	Resultado de solución para la cinemática inversa de seis puntos en el espacio para la extremidad a. Fuente: Propia	239
6.1	Esquema de estructura de código en <i>Matlab</i> para ejecutar un patrón de locomoción. Fuente: Propia	245
6.2	Bloque de Red de Petri para ejecutar un solo movimiento por el MCPL. Fuente: Propia	246
6.3	Bloque de Red de Petri para ejecutar el conjunto de controladores PI simultáneos. Fuente: Propia	248
6.4	Gráfica de evolución de polígonos de apoyo del patrón de locomoción en ejecución. Fuente: Propia	252
6.5	Gráfica de desplazamiento y trayectoria del centro de masa del robot en el plano XY. Fuente: Propia	253
6.6	Gráfica representativa de angulo de giro en el plano XY respecto al eje Z. Fuente: Propia	254
6.7	Evolución de secuencia de locomoción en <i>V-rep</i> . Fuente: Propia	255
6.8	Rangos de movimientos para extremidades del saltamontes <i>textitSchistocerca Gregaria</i> , en modo de locomoción libre . Fuente: (Bums, 1973, p.48).	258
6.9	Rangos de movimientos para extremidades del insecto palo <i>Carausius morosus</i> , en modo de locomoción línea recta. Fuente: (Cruse y Bartling, 1995, p.765)	259
6.10	Rangos de movimientos para extremidades del insecto palo <i>Carausius morosus</i> , para los escenarios (a) Camino horizontal, (b) Plano horizontal, (c) Colgando de un hilo, (d) Camino vertical en ascenso. Fuente: (Cruse, 1976, p.241).	259
6.11	Rangos de movimientos para extremidades para cucaracha de la especie <i>Blaberus discoidalis</i> , para los escenarios (a) Rangos de movimiento para cada articulación, (b) Descripción porcentual de contribución por al desplazamiento por extremidad.	261
6.12	Posición inicial base para el robot simulado en <i>V-rep</i> . Fuente: Propia .	263

6.13	Sentido de movimiento para patrón de locomoción trípode de desplazamiento en línea recta, dirección eje Y. Fuente: Propia	264
6.14	Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para gateo trípode versión 1, escenario 1. (a)Fase 0, (b)Fase 1, (c)Fase 2. Fuente: Propia	267
6.15	Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para gateo trípode versión 1, escenario 1. (d)Fase 3, (e)Fase 4, (f)Fase 5 Fuente: Propia	268
6.16	Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para gateo trípode versión 1, escenario 1. (h)Fase 6*, (i)Fase 7*, (j)Fase 8* . Fuente: Propia . . .	268
6.17	Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para gateo trípode versión 1, plano ZX. Fuente: Propia	269
6.18	Gráficas de desempeño del patrón de locomoción trípode de línea recta versión 1, escenario 1, (a) Gráfica de desplazamiento en plano XY (b) Gráfica de desplazamiento y giro en torno al eje Z, plano XY. Fuente: Propia	270
6.19	Gráficas de desempeño del de locomoción trípode de línea recta versión 1, para dos ciclos. Fuente: Propia	271
6.20	Gráficas de desempeño del patrón de locomoción trípode de línea recta versión 1, para cinco ciclos. Fuente: Propia	271
6.21	Secuencia de desarrollo de giro en un tiempo para el mímico en <i>V-rep</i> Fuente: Propia	276
6.22	Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para giro de base en un tiempo, escenario 1. (a)Fase 0, (b)Fase 1*, (c)Fase 2*. Fuente: Propia .	277
6.23	Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para giro de base en un tiempo, escenario 1. (d)Fase 3*, (e)Fase 4*, (f)Fase 0. Fuente: Propia .	277
6.24	(h)Leyenda de polígonos de evolución para giro en un tiempo escenario 1, (i) Gráfica representativa de giro en eje Z por el robot. Fuente: Propia	277
6.25	Secuencia de movimientos para patron de locomoción de giro en dos tiempos. Fuente: Propia	281
6.26	Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para giro de base en dos tiempos, escenario 1. (a)Fase 0, (b)Fase 1*, (c)Fase 2*. Fuente: Propia	282

6.27	Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para giro de base en dos tiempos, escenario 1. (d)Fase 3*, (e)Fase 4*, (f)Fase 5*. Fuente: Propia	282
6.28	Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para giro de base en dos tiempos, escenario 1. (g)Fase 0 final. Fuente: Propia	282
6.29	Secuencia de evolución de patrón de locomoción para caminata tipo cangrejo. Fuente: Propia	284
6.30	Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para caminata trípode, hasta la fase 4 en la secuencia de movimientos.. Fuente: Propia	287
6.31	Redistribución de posiciones de extremidades, para formar polígono de apoyo estable cuadrilátero. Fuente: Propia	290
6.32	Prueba de soporte para la posición diseñada de la extremidades en polígono de apoyo cuádruple. (a) Vista lateral, (b) Vista superior. Fuente: Propia	290

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Glosario de Términos

- **Ciclo de tiempo de locomoción.** El ciclo de tiempo es el tiempo que toma completar un ciclo completo de locomoción.
- **Estabilidad.** La estabilidad de cualquier maquina o sistema caminante puede ser cuantificada por el parámetro de margen de estabilidad longitudinal, el cual es la distancia longitudinal más corta desde la proyección vertical del centro gravitatorio hasta los bordes del patrón de soporte en el plano horizontal.
- **Factor de trabajo.** Es la fracción de tiempo de un ciclo en el cual la extremidad esta en contacto con el suelo o en la fase de soporte.
- **Fase de soporte o postura.** La fase de soporte o postura de una extremidad es el periodo en el cual esta está en contacto con el suelo o la superficie.
- **Fase de transferencia, balanceo u oscilación.** La fase de transferencia, balanceo u oscilación, es el periodo en el cual la extremidad se encuentra moviéndose en el aire.
- **Longitud de zancada.** Es la distancia que se desplaza el centro de gravedad del sistema durante un ciclo completo de locomoción.
- **Omnidireccionalidad.** Término utilizado para referirse a la capacidad de movilidad de una partícula respecto a su posición actual, al desplazarse a su objetivo sin orientar su eje de referencia hacia este. Se dice que un robot o móvil es omnidireccional, si este puede desplazarse en cualquier dirección sin tener que efectuar giros o rotaciones para alcanzar un punto del espacio.

- **Paso de extremidad.** El paso de extremidad, es la distancia a través de la cual el pie o punta de extremidad es trasladado relativo al cuerpo durante la fase de soporte.
- **Paso o gateo.** El paso (o gateo) de un sistema con extremidades, se define como el movimiento conjunto de las extremidades, coordinadas con el movimiento del cuerpo, a fin de lograr desplazarlos de un lugar a otro de tal forma que la estabilidad siempre se mantenga. La condición para la estabilidad estática de un sistema esta dada porque la proyección vertical de su centro gravitatorio esté contenida dentro del patrón de soporte.
- **Patrón de soporte.** El patrón de soporte de un sistema andante con extremidades, es un conjunto de puntos bidimensionales descritos en un plano horizontal, que consiste en un área convexa conformada por la proyección vertical de los puntos de soporte de las extremidades que están en la fase de soporte.
- **Plasticidad de una extremidad.** Se define como el grado de movilidad o rango de movimiento que tiene una extremidad entorno al funcionamiento de sus articulaciones y características morfológicas.
- **Plasticidad.** Grado de libertad de movimiento de un cuerpo o extremidad. La plasticidad de un robot caminante se define como la capacidad de movimiento de este en su entorno de trabajo o superficie de desplazamiento en base al movimiento de sus extremidades y estructura base.
- **Protracción.** La protracción, es el movimiento hacia delante de una extremidad relativo al cuerpo y a la superficie.
- **Retracción.** La retracción, es el movimiento hacia atrás de una extremidad, relativo al cuerpo y a la superficie.

Agradecimientos

A Dios por brindarme la vida y la bendición de poner a todas las personas necesarias para lograr mis metas a mi lado, en este largo camino profesional.

A mi Madre, por nunca dejarme desfallecer en cualquiera de mis retos y metas, por su cariño, soporte, apoyo y amor durante toda mi vida.

A mi prima, Carolina Safi, por brindarme su respaldo en todo momento, sin importar lo largo y tortuoso del camino.

A mi novia Shirley Pestana, por estar siempre a mi lado apoyándome, dándome aliento y esas ganas justas cuando las necesitaba.

A mi tutora, Anna Patete, por creer en mí al momento de elegir este proyecto, por su guía, orientación y consejos para poder realizar un trabajo valioso y bien elaborado.

A mis cotutores, Profesores Miguel Díaz y Francisco Vilorio, por su aporte profesional y guía en tópicos relacionados al proyecto.

A Rafael Pacheco, por brindarme su apoyo en materia de entomología, contenido necesario para poder de manera correcta este trabajo de grado. A los profesores Iñaki Aguirre y Claudia Gómez, por su guía y aportes en las áreas de control y automatización.

A todos los profesores que de un modo u otro dejaron sus conocimientos como enseñanzas valiosas para poder forjar un camino como profesional.

Por último a la gloriosa Universidad de los Andes, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional con profesores honorables y ejemplares.

Capítulo 1

Generalidades

Introducción

La necesidad del hombre de diseñar dispositivos móviles autónomos para realizar tareas de diversa índole, lo ha llevado al desarrollo de un área compuesta por un conjunto de ciencias y ramas de la ingeniería denominada robótica. La robótica a lo largo de los años, desde la década de los cincuenta hasta nuestros días, ha impulsado el desarrollo de diferentes dispositivos con el fin de cumplir tareas en primera instancia de tipo industrial, tales como brazos manipuladores y grúas, capaces de realizar tareas de ensamblaje, soldaduras, carga de materiales pesados y peligrosos, por nombrar algunas de las más comunes. El término robótica se utiliza debido a que estos dispositivos cumplen con un requerimiento básico que define a los robots, que es cumplir con tareas programadas siendo la mayoría de estas repetitivas, añadiendo el reconocimiento o interacción de alguna forma con su entorno, con el fin de realizar una función de utilidad en los procesos productivos.

El área de la robótica no se limita únicamente al estudio y desarrollo de robots en el contexto industrial, existe un campo amplio de esta ciencia que aprovecha el estudio y análisis de los seres vivos para el diseño de sistemas robóticos bien fundamentados con diversos fines, entre ellos el diseño de robots con propósitos de exploración espacial, para aplicaciones submarinas y subterráneas, aplicaciones

militares, propósitos médicos, agrícolas entre otros.

Son de gran interés aquellos robots que utilizan extremidades para realizar su desplazamiento en la superficie, debido a la gran variedad de morfologías y diseños existentes que se pueden recrear tomando como guía la naturaleza, sin dejar a un lado los patrones de locomoción que se pueden desarrollar para realizar cualquier tipo de movimiento. Las posibilidades y métodos de desplazamientos posibles solo quedan limitados por la tecnología, requerimientos y creatividad necesarios para su implementación. En lo que respecta a la estructura, desde el concepto más simple como un diseño con un par de piernas, hasta morfologías más elaboradas con más de cuatro, seis, ocho o doce extremidades, el control de estos robots presenta un interesante caso de estudio.

Para la ingeniería de control y automatización, esta clase de robots confiere un gran número de retos, como es el caso de mantener la estabilidad estática o dinámica de una estructura, el control de los actuadores y el censado simultáneo de las señales necesarias provenientes de todo tipo de sensores, para mantener un patrón definido de locomoción, por nombrar algunos. La construcción de un robot que base su desplazamiento y movilidad utilizando extremidades, en vez del clásico sistema de ruedas, requiere un estudio meticuloso que comprenda todos los campos necesarios para lograr acertar en un diseño que sea funcional y eficiente, debido al conjunto de factores que pueden afectar las características de este, como por ejemplo: la estabilidad estructural, los rangos de movimiento de las extremidades, el método de control a utilizar, el consumo de energía, capacidad de autonomía y el comportamiento a implementar con el fin de interactuar y desplazarse por su entorno.

Las estructuras que por definición morfológica se denominan hexápodos son el tema principal de estudio en este trabajo, la aplicación para la cual ha sido utilizado este concepto estructural demuestra versatilidad en un gran número de campos como la exploración y transporte espacial utilizadas en dispositivos como telescopios, vehículos de desplazamiento terrestre y unidades de acople herméticas para

trasbordadores espaciales. Como ejemplo de esto la *NASA (National Aeronautics and Space Administration)* con su robot autónomo *ATHLETE (All-Terrain Hex-Limbed Extra-Terrestrial Explorer)* (NASA, 2009), que dispone de seis extremidades las cuales acoplan en cada una de estas, una rueda independiente capaz de realizar desplazamientos omnidireccionales.

Este concepto de estructura es ampliamente utilizado en plataformas comerciales para simuladores de vuelo, desde escenarios en la órbita terrestre como en aeroespaciales, como los desarrollados por la empresa *Thales Training & Simulations Ltd* (Thales Training and Simulation, 2015) en asociación con *L-3 Link Simulation & Training* (L3 Link Simulation and Training, 2012). Estas empresas diseñan varios modelos simuladores de vuelo en base a aeronaves comerciales y militares que replican condiciones completas de las cabinas de aviones de pasajeros, de combate o helicópteros, como lo es el denominado *OH-58D Kiowa Warrior* ((L3 Link Simulation and Training, 2012) utilizado para el entrenamiento de los pilotos en diversas situaciones de vuelos en patrulla de helicópteros.

En el ámbito industrial, este concepto estructural se utiliza en las bases para manipulación de herramientas y grúas, como es el caso de la plataforma *Stewart* (Stewart D., 1965) utilizada y modificada por la empresa *Fanuc Robotics* (FANUC, 2015) en su base multipropósito *F-200iB* (FANUC, 2005) para el acople de herramientas como taladros, manipuladores, soldadores y pinzas.

Por último, tenemos los diversos robots hexápodos disponibles en la actualidad diseñados por aficionados y desarrolladores de robots comerciales a pequeña escala como *Zenta Robotics*, *Trossenrobotics* y *Lynxmotion* con sus robots, *Phoenix* (Halvorsen, K., 2015) , *PhantomAX MKII* (TrossenRobotics, 2015) y *CH3-R* (Lynxmotion, 2015) respectivamente, que describen básicamente la misma morfología y diseño con diferencias de rendimiento entre sí, como por ejemplo: capacidad de carga útil, nivel de autonomía, patrones de locomoción disponible, entre otros.

Los robots de tipo hexápodos actualmente figuran como una plataforma versátil y multipropósito muy estable para incorporar diversos tipos de herramientas. La diversidad de posibles distribuciones de sus extremidades aventaja su desplazamiento por terrenos escabrosos, caso para el cual un vehículo de configuración terrestre con ruedas presentaría mayor número de inconvenientes mecánicos y de consumo de energía, junto con la posibilidad de desplazamiento omnidireccional que brinda la configuración de seis extremidades, hacen de este tipo de robots plataformas móviles articuladas excepcionales para cualquier aplicación. Por tanto, el estudio e investigación de los diseños existentes, contemplando sus funciones y ventajas, brindan una gran cantidad de información a la hora de proponer el diseño de un primer prototipo para una plataforma robótica hexápoda móvil, de igual forma es de gran ayuda la información que se puede obtener al estudiar la morfología y anatomía de los seres vivos en la cual dichas empresas basaron sus diseños.

En este capítulo se presenta una breve investigación que brinda las bases para iniciar el desarrollo de este trabajo de grado, dicha investigación reúne y confiere diferentes aspectos y conceptos de interés necesarios para poder diseñar un robot del tipo hexápodo móvil como plataforma multipropósito, tomando en cuenta las diversas características que promueven una buena práctica a la hora de proponer e implementar una estructura de este tipo y sus patrones de locomoción, logrando que se complementen y concuerden entre sí de manera satisfactoria. Se procede a definir de igual manera el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, la metodología y el alcance del proyecto.

1.1 Antecedentes

El análisis, diseño y control de robots caminantes ha sido, desde los inicios de la robótica, un tópico de amplio estudio. En la literatura se pueden encontrar registros de investigaciones y desarrollo de proyectos desde los años 1920, con bases en todo tipo de estructuras naturales compuestas por diversos número de extremidades, dispuestas tanto para su desplazamiento como para la manipulación de herramientas

e interacción con su entorno, con el fin de lograr replicar comportamientos y características favorables para el cumplimiento óptimo de tareas específicas en diversas áreas.

Durante el desarrollo de la robótica, en el sentido antes mencionado, una estructura de morfología determinada ha llamado la atención de los investigadores y desarrolladores con gran interés, las denominadas estructuras Hexápodos. Como base, las estructuras hexápodos han servido de inspiración para el desarrollo y construcción de diversas plataformas abarcando desde el área industrial, la exploración terrestre espacial, patrullaje militar, cumplimiento de tareas de carga hasta manipulación de herramientas.

Existen gran cantidad de trabajos basados en estructuras hexápodos, tanto móviles como estáticas, todas aprovechándose de los principios y versatilidades de la omnidireccionalidad, la estabilidad estática, distintas dinámicas y patrones de locomoción posibles en presencia de extremidades. Un gran conjunto de estos trabajos se prestan para formar las bases de esta investigación, tomando en cuenta características pertinentes a un robot hexápodo móvil.

Con respecto a la estabilidad y posicionamiento de una plataforma hexápoda, en el área industrial se basaron gran cantidad de trabajos referenciados a una base denominada Plataforma *Stewart* (Stewart D., 1965). La Plataforma *Stewart* obtiene su origen de funcionamiento en primera instancia gracias a los estudios realizados en el siglo XVIII, por el renombrado matemático Augustin Louis Cauchy (Mikrolar Inc, 2002), que se encargó de estudiar y analizar la rigidez estructural de un octaedro articulado. Dicho estudio comprueba que esta estructura es capaz de brindar una estabilidad rígida dada la distribución de sus caras y bordes, como se muestra en la Figura 1.1.

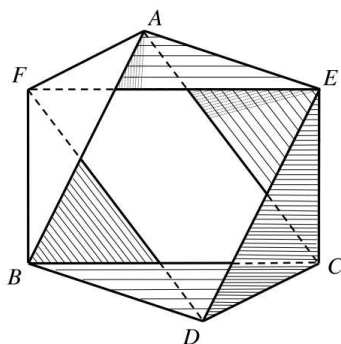


Figura 1.1: Octaedro cuyos bordes opuestos son equivalentes en pares. (Bricard, R., 2010)

En la Figura 1.1 se puede observar el principio de estabilidad estática de forma gráfica, en lo que a conceptos de mecánica se refiere, como analogía a una formación de tres puntos de apoyo estáticos en todo momento conformado por las aristas F, A y E del triángulo superior, siendo los anclajes los segmentos de rectas que unen a los puntos BD, BC y CD los apoyos respectivamente, conformando el triángulo inferior. Como demuestra Bricard (Bricard, R., 2010) en su trabajo *Memoir on the Theory of the Articulated Octahedron*, una estructura triangular móvil con base en tres puntos de apoyo enlazada a una estructura estática triangular es capaz de posicionarse de forma estable en un amplio rango de puntos, según sea la elongación de los segmentos que unen cada una de las aristas del triángulo móvil con el estático, lo que hace beneficioso una estructura de este tipo como base para plataformas multipropósito.

Gough V. (ParallelMIC, 2003) en 1949 construye y utiliza un mecanismo denominado Universal Tyre-Testing Machine, véase la Figura 1.2, basado en el concepto de la rigidez de un octaedro de Cauchy para hacer pruebas en las llantas fabricadas por la empresa Dunlop Rubber Company en Inglaterra. Compuesta de actuadores neumáticos, con esta estructura es posible detectar el rendimiento y grado de uniformidad de las llantas desarrolladas por la empresa, la inclinación y presión ejercida en cada uno de los actuadores, siendo esta última censada por los indicadores en la parte superior de la estructura, para así hacer posible ajustes en el sistema de suspensión y amortiguación de vehículos de carga para optimizar el grado de desgaste

del caucho y el rendimiento del combustible o en su defecto descartar el diseño de la llanta.

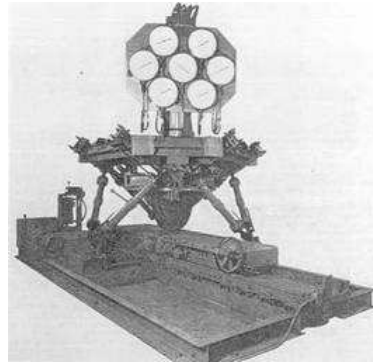


Figura 1.2: Plataforma hexápoda diseñada por Gough en 1949, *Universal Tyre-Testing Machine* para la *Dunlop Rubber Company* en Inglaterra. (ParallelMIC, 2003)

El Ingeniero Stewart D. en 1965 (Stewart D., 1965), publica su famoso documento en el cual propone y describe una plataforma móvil para un simulador de vuelo con seis grados de libertad, en ella propone diseños para generar el movimiento mediante el uso de seis actuadores hidráulicos dispuestos en pares de manera similar a la plataforma diseñada por Gough, con la excepción de que a la base del triángulo superior se acopla un solo actuador con una junta de tres ejes por arista (junta universal), de esta manera el segundo actuador del par perteneciente a cada una de estas uniones se acopla ahora mediante una junta de dos ejes al actuador principal el cual se ancla de la misma forma, véase Figura 1.3.

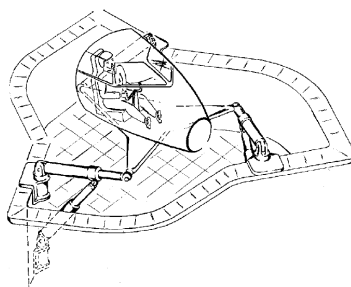


Figura 1.3: Base de simulador propuesta por Stewart en 1965, vista pictórica.

Tomado de: *A Platform With Six Degrees Of Freedom*, (Stewart D., 1965).

Con este diseño de igual forma es posible lograr mover la plataforma en tres direcciones lineales y en tres direcciones angulares de manera separada o simultánea. La configuración de los actuadores de la plataforma de Stewart permite realizar modificaciones a cualquiera de los tres rangos angulares de movimiento: cabeceo, alabeo y guiñada, esto le concede a una plataforma de simulación de vuelo replicar los comportamientos presentes en una cabina de prácticamente cualquier aeronave; logrando de igual forma realizar desplazamientos en los ejes x , y , z , es decir, laterales, longitudinales y verticales respectivamente. Stewart propone que los actuadores utilizados en su diseño pueden ser accionados mecánicamente de manera hidráulica o mediante servomotores, siempre y cuando se preservara las configuraciones de las juntas y uniones entre las partes como se muestra en la Figura 1.4.

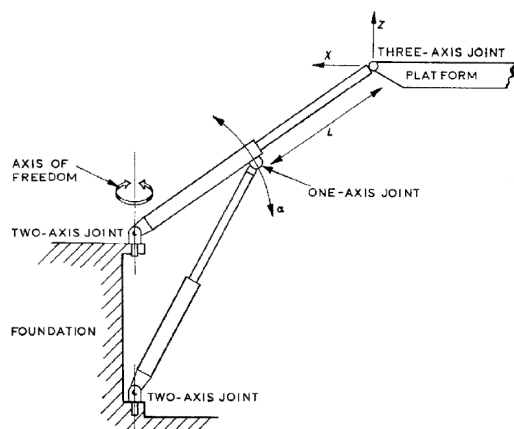


Figura 1.4: Configuración para actuadores para la plataforma Stewart. Tomado de: *A Platform With Six Degrees Of Freedom*, (Stewart D., 1965).

En la Figura 1.4, se puede observar un primer indicio de configuración de actuadores a modo de miembro articulado, que funge de extremidad para la estructura permitiéndole posicionarse en el espacio, haciendo relación con este concepto a robots caminantes con similitudes antropomórficas cuya base esta representada como el cuerpo del robot, se puede considerar que la base triangular de la plataforma Stewart representaría el cuerpo del robot y las extremidades formadas por el arreglo de actuadores le admiten a la estructura posicionarse de manera plena en su área de trabajo; dando la oportunidad de tener esto como referencia al momento de observar la posible movilidad de la plataforma con arreglos de actuadores de este tipo; por tanto toda la dinámica que se refiere al posicionamiento de este tipo de estructura hace referencia a los avances realizados en el control de sus articulaciones.

A partir de la publicación de Stewart (Stewart D., 1965) se empezó una etapa de desarrollo y análisis de este tipo de estructuras, conformando diversas variaciones y mezclas entre la sugerida por Stewart y Gough (ParallelMIC, 2003). Distintas organizaciones y empresas se interesaron por el desarrollo, adaptación y principios de esta plataforma, como la NASA, el NIST (*National Institute of Standards and Technology*) y otras con fines comerciales e industriales como *John Deer*, *Fanuc Robotics*, *Symetrie* y *Parallel Robotic Systemen*, por nombrar algunas.

Por parte del *NIST* el desarrollo en base al concepto de la estructura Stewart se enfocó en gran parte a proponer el diseño de una grúa para trabajos industriales de carga. En una nota técnica de reporte final número 1267, *Robot Crane Technology* los investigadores Dagalakis et al. (1989) enuncian: "Este sistema es una modificación de la plataforma" (Stewart D., 1965, p.1). La grúa propuesta consta de un sistema de poleas suspendida en el aire mediante un conjunto de cables que proporcionan la base para su desplazamiento, con esto es posible realizar el posicionamiento en cualquier punto de un plano tridimensional de ejes x , y , z , definido según la posición y alcance de los cables de suspensión, como se muestra en la Figura 1.5. En este reporte se determinó la factibilidad y ventajas de movimiento de este tipo de grúas, siempre que se incorporara un sistema de amortiguación en la herramienta o base de carga debido a que el movimiento del sistema en general podría generar ligeras oscilaciones al momento de desplazarse haciéndola imprecisa. Dicho sistema de amortiguación también es propuesto e implementado por Dagalakis et al. (1989), en el mismo año de publicación haciendo posible el acople de una cámara de televisión, sistema utilizado actualmente en diversos estadios para la captura de imágenes estables.

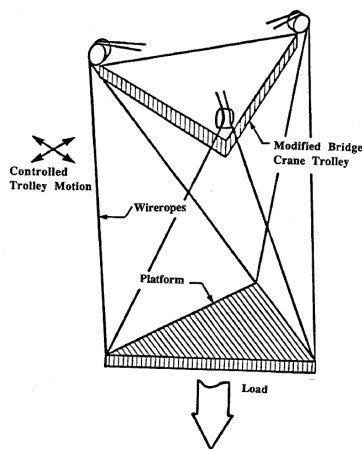


Figura 1.5: Concepto de Mecanismo para la Robot Crane por Dagalakis et al. (1989, p.8).

Desde el desarrollo de la plataforma de Gough (ParallelMIC, 2003), la palabra *hexapod* o hexápodo no es plenamente utilizada en la literatura ni en las investigaciones

posteriores, solo enuncia y se utiliza para referirse a este tipo de estructura o mecanismo a modo de referencia. En el año 1998 la empresa *Geodetic Technology International N.V.* (Arruga, S., 2011), patentó la palabra *Hexapod* para referirse a la plataforma Stewart utilizada para sus distintos productos que la utilizaban como base, como lo es el caso de la perforadora *G1000* desarrollada por la empresa, perteneciente a la familia de plataformas *Geodetic Hexapods*.

La plataforma Stewart tuvo un gran apogeo dado a su uso en la industria de la simulación de vuelo de aeronaves para la capacitación y entrenamiento de pilotos así como para efectuar pruebas necesarias en técnicas, protocolos y procedimientos en planes de vuelo, a fin de reducir el riesgo de pérdida de una aeronave real. Una de las empresas con más renombre por utilizar este tipo de plataforma fue fundada en 1946 con el nombre de *Redifone* en el Reino Unido, actualmente posee el nombre de *Thales Training and Simulation LTD*, en su división de simuladores de vuelo de ámbito civil como militar, con la plataforma desarrollada con la ayuda de *L-3 Link Simulation and Training*, véase Figura 1.6.



Figura 1.6: Simulador RealitySeven desarrollado por Thales Training and Simulation (2015) y L3 Link Simulation and Training (2012) en 2010.

Con respecto a la exploración espacial, mediante el uso de telescopios diversas organizaciones y grupos de investigación se han aprovechado de las ventajas de precisión

que aporta la plataforma hexápoda Stewart. Por enunciar una de las bases hexápodas más destacadas hasta la fecha es la desarrollada por Koch et al. (2009) denominada *AMiBA* (*Array for Microwave Background Anisotropy*), que representa la base más grande construida hasta la fecha para un telescopio, con una altura aproximada de 5.5 metros con los actuadores hidráulicos completamente extendidos. De igual forma la NASA ha desarrollado diversos mecanismos óptimos para su funcionamiento en el espacio con el fin de proporcionar un acople sólido entre las subestaciones de la Estación Espacial Internacional denominada *LIDS* o *Low Impact Docking System* (NASA, 2005), véase Figura 1.7 La NASA, optó por el diseño de este tipo de plataforma de acople dada la gran versatilidad ofrecida y demostrada en las pruebas desde su primer diseño a mediados de la década de los 80. La Figura 1.7 ilustra una prueba realizada a la plataforma de acople LIDS para la tripulación del transbordador X-38 ORION NASA (2005) aprobada para su uso en 2005, con fin de acoplarse a la Estación Espacial Internacional.



Figura 1.7: Plataforma de acople LIDS de la NASA, (NASA, 2005).

Teniendo en claro que, el uso de las plataformas hexápodas no queda solamente arraigado al contexto de monturas fijas como las de Stewart o Gough, en el área de plataformas hexápodos móviles se han logrado avances interesantes, la mayoría de ellos basado en conceptos de locomoción inspirados en animales, insectos o estructuras presentes en la naturaleza. Aunque en gran parte de la literatura no se suele relacionar el concepto de plataforma Stewart con los robots hexápodos diseñados hoy en día, es de gran valor poseer información acerca de las técnicas de posicionamiento y estabilización de este tipo de diseño. La problemática se basa en el uso y aplicaciones

deseadas para un robot con estas características. La estabilización de la plataforma de un robot hexápodo tomando en cuenta los estudios y desarrollos realizados por Cauchy, Gough y Stewart es solo uno de los aspectos que esta rama de la robótica debe considerar al momento del desarrollo de robots caminantes con seis extremidades, dado a que se puede hacer una analogía con la base rígida que se forma en los instantes en los que se ejecutan los patrones de locomoción básicos. Como se muestra en la Figura 1.8, el triángulo compuesto por las aristas 1, 3 y 5 (triángulo negro) es la plataforma cuyas extremidades están tocando la superficie de forma estática y el triángulo formado por 2, 4 y 6 (triángulo gris) las extremidades libres desplazadas para generar el patrón de movimiento. Esta característica asegura la posibilidad de tener presente la estabilidad estática en el robot en todo momento.

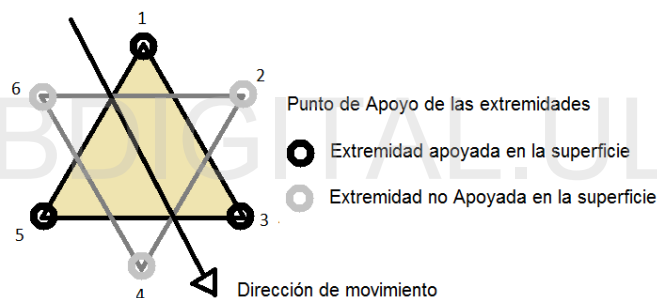


Figura 1.8: Analogía de la Plataforma Stewart con la base de un robot hexápodo.

Fuente: Propia

De este principio se han hecho de la mano empresas como *John Deere*, organizaciones internacionales como la *NASA*, institutos de investigación y universidades como el *NIST*, el *MIT* (*Massachusetts Institute of Technology*) y por último aficionados a la construcción de hexápodos, estos sin saber el origen ni procedencia de este concepto de estabilidad de esta estructura.

Nonami et al. (2014) enuncian la siguiente definición en el libro *Hydraulically Actuated Hexapod Robots*:

Un vehículo móvil o máquina que utilice uno o más mecanismos de piernas como objeto de propulsión y tenga las características de ser reprogramado para modificar su algoritmo de control de movimiento, que logre demostrar cierto grado de inteligencia artificial haciendo posible poder realizar múltiples funciones y ejecutar una variedad de tareas útiles dentro del espacio de trabajo establecido por su diseño mecánico, puede ser considerado como un robot caminante.

(Nonami et al., 2014, p.4)

En el tema de los hexápodos móviles por parte de la empresa *John Deere* fundada en 1837 (Forest Industries Network, 2005), el desarrollo e implementación de su tractor caminante o *Walking Harvester* (Forest Industries Network, 2014) en 1990, como lo denominan, utiliza el concepto morfológico de un hexápodo para avanzar por bosques y montañas con gran densidad de vegetación y árboles. Su propuesta y diseño empezó en el año 1990, haciendo su aparición a principios de 1994 en Finlandia. Solo se construyeron dos unidades prototipos para ser sometidos a distintas pruebas de rendimiento, comprobadas por más de 2000 horas de funcionamiento. A pesar de no ser un robot según el concepto de Nonami et al. (2014), este tractor cuenta con un sistema de equilibrio y balanceo que controla cada una de las seis extremidades de manera dinámica al desplazarse, su accionamiento es netamente hidráulico haciendo uso de un par de motores Diesel que se encargan de suministrar la presión necesaria para brindar la energía a cada uno de los actuadores. La computadora a bordo, junto con un conjunto de sensores de presión de contacto y equilibrio se encarga de controlar la estabilidad y la cantidad de peso distribuido en cada uno de sus puntos de apoyo. La distribución y diseño de las extremidades le brinda la capacidad de desplazamientos omnidireccionales, razón por la cual toma ventaja sobre cualquier tipo de vehículo en estas condiciones, además de causar un bajo impacto en el suelo debido a la amplia área de contacto con la superficie a diferencia de las ruedas convencionales de un tractor. Como se puede observar en la Figura 1.9, cada una de sus patas está compuesta por tres grados de libertad controlados y un grado de libertad añadido con una junta libre en el extremo para la adaptación a la irregularidad del terreno. Como su nombre lo indica *Walking Harvester*, se utilizó principalmente como móvil

para el transporte de la herramienta de tala de árboles desarrollada por la empresa *Timberjack*, herramienta visible en la Figura 1.9 utilizada para talar árboles, sin limitar la posibilidad de incorporar cualquier otro tipo de herramienta.



Figura 1.9: Tractor Walking Harvester de John Deere en el año 2002 con sierra de grúa de TimberJack. (Forest Industries Network, 2005)

Por su parte, en la Universidad de Chiba, Japón, el profesor de Nonami K. (Nonami et al., 2014) y su grupo de estudiantes, desde el año 2002 han trabajado por más de 10 años en un prototipo de robot denominado *COMET* (*Chiba University Operating Mine detection Electronics Tools*), en distintas versiones a medida que se ha mejorado el diseño como se muestra en la Figura 1.10.



Figura 1.10: Hexápodo COMET Universidad de Chiba, Japón. (a) COMET-I, (b) COMET-II, (c) COMET-III, (d) COMET-IV. Tomado de: *Hydraulically Actuated Hexapod Robots*, Nonami et al. (2014, p.12).

Siendo su propósito inicial el ser empleado como robot exploratorio para la detección de minas terrestres, el *COMET* se encuentra actualmente en su versión IV (Figura 1.10 (d)). Dada su posible capacidad de carga de hasta dos toneladas es factible incorporar cualquier tipo de herramienta para cumplir tareas específicas. El *COMET-IV* brinda una plataforma con suspensión independiente en cada una de sus extremidades conformadas por tres grados de libertad al igual que el tractor de *John Deere* el *Walking Harvester*, funciona mediante actuadores hidráulicos. A diferencia del hexápodo de *John Deere*, el *COMET-IV* tiene dispuestas sus extremidades de forma que pueden ser radialmente extendidas, lo que brinda la capacidad de utilizar cualquiera de estas como base para acoplar herramientas, como se muestra en la Figura 1.11.



Figura 1.11: *COMET-IV* Modo de Trabajo, Herramienta de pala Excavadora en la extremidad frontal derecha. Fuente: Nonami et al. (2014, p.12).

La mayoría de los hexápodos enunciados basan el accionamiento de sus actuadores mediante fuerza hidráulica, esto se debe a que estos están diseñados mayormente para poder transportar herramientas pesadas o simplemente por el hecho de soportar su propia estructura debido al gran tamaño en su diseño. Hoy en día gracias al desarrollo de nuevas tecnologías es posible contar con actuadores mecánicos o servomotores que brindan la capacidad de soportar cargas considerables, ofreciendo de igual forma precisión en los movimientos, además de la ventaja de utilizar baterías como fuente de energía en vez de combustibles fósiles, reduciendo notablemente la contaminación y desgaste de partes mecánicas. De igual forma, todos estos robots no cuentan con una autonomía de operación o inteligencia artificial, es decir, son teleoperados, por tanto, representan mecanismos o herramientas que necesitan de un operador humano para completar una tarea.

Con respecto a la versatilidad funcional de los robots hexápodos la NASA en el 2005 (NASA, 2009) desarrolló el prototipo denominado *ATHLETE* (*All-Terrain Hex-Limbed Extra-Terrestrial Explorer*) primera generación. En 2009 lanzan la segunda generación del *ATHLETE* compuesto de dos robots denominados *Tri-ATHLETE* (NASA, 2009) completamente independientes entre sí, estos robots están compuestos de tres extremidades, que los hacen operacionales y funcionales para ejecutar tareas de navegación y transporte, véase Figura 1.12(a). Al unirse o acoplarse forman una plataforma hexápoda estable con seis extremidades que dispone de seis grados de libertad brindando una gran diversidad de posibles movimientos. Para hacer

aún más versátil cada una de estas extremidades, uno de estos grados de libertad correspondiente al extremo que hace contacto con la superficie está equipado con una rueda con base de giro omnidireccional, permitiendo a la estructura completa desplazarse a manera de vehículo de contacto continuo, haciendo posible ambos enfoques de desplazamiento según sea la necesidad de locomoción requerida por el terreno. Dichas ruedas cuentan con un sistema de bridas que le ofrecen la característica de acoplar diversos tipos de herramientas para utilizar las extremidades como brazos, a fin cumplir tareas de recolección, corte o perforaciones según sea el caso, véase Figura 1.12(b).

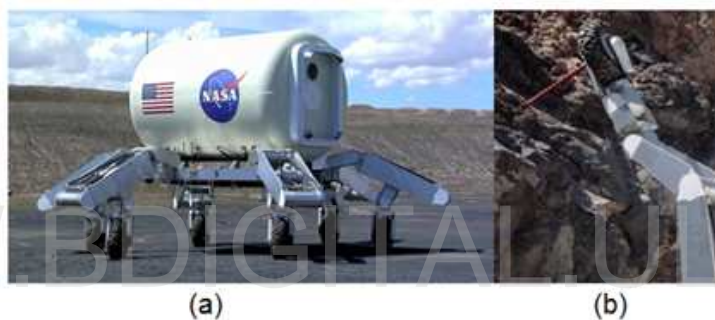


Figura 1.12: (a) *NASA Tri-ATHLETE Rover* (2010), (b) Acople de un prototipo de taladro para extracción de material y muestras de la superficie. Fuente: (NASA, 2009)

El *ATHLETE* está equipado con una computadora a bordo capaz de hacer seguimiento de trayectorias, evasión de obstáculos, planeamiento de caminos óptimos con la menor resistencia para ahorrar energía, esto lo logra gracias al juego de cámaras estereoscópicas ubicadas en cada una de las caras del hexágono que compone la estructura y sensores de presión dispuestos en cada una de las extremidades. De igual forma está equipado con algoritmos que controlan la suspensión combinada de ambos robots al momento de transitar por terrenos irregulares evitando daños en la carga que transporta y a la estructura en sí.

Pasando de mediana a pequeña escala se encuentran distintos hexápodos diseñados

con diversas características, capacidades, morfologías y diversas fuentes de inspiración para su diseño. Como se puede observar en la actualidad la palabra hexápodo tiene relación directa con el concepto de un robot caminante articulado que cualquier aficionado puede construir o utilizar a manera de juguete comercial, gracias a la disposición y gran variedad de piezas en el mercado. No es el caso de los desarrollados con fines más centrados por universidades e institutos de investigación alrededor del mundo.

En 1994 se da a conocer en el *Research Center for Information Technology de Karlsruhe*, Alemania el primer prototipo de la familia de robots denominada *LAURON (Legged Autonomous Robot Neural Controlled)* (Siegwart et al., 2011), el *LAURON I*, véase Figura 1.13(a). El último modelo presentado en el 2013 (Siegwart et al., 2011) en la exhibición del *IEEE ICRA (Institute of Electrical and Electronics Engineers, International Conference of Robotics and Automation)* en Karlsruhe es el *LAURON-V* vigente hasta la fecha, véase Figura 1.13(b), demostrando su capacidad de autonomía, manipulación con las extremidades frontales, estrategias de navegación y la base de su inspiración, el Insecto Palo, para generar su patrón de locomoción para el desplazamiento. Todas estas características son posibles gracias a la gran cantidad de sensores presentes a bordo, entre ellos, sensores 3D de fuerza accionados mediante resortes para cada una de las patas, medición precisa de la posición de cada uno de los servomotores de las articulaciones, conjunto de cámaras estereoscópicas y posicionamiento mediante *GPS (Global Positioning System)*. Aún se siguen investigando patrones más eficientes de locomoción para el ahorro de energía y materiales más livianos para la reducción de peso en este último modelo, pero a pesar de estas necesidades demuestra un desempeño excepcional en el campo de operación a la hora de desenvolverse en terrenos escabrosos.

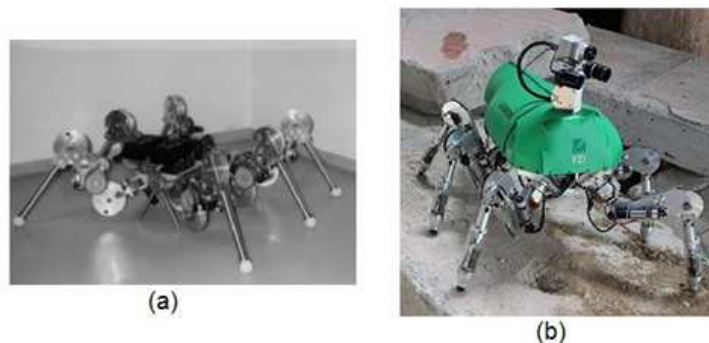


Figura 1.13: (a) LAURON-I (1994) y (b) LAURON-V (2013). Siegwart et al. (2011, p.29)

En la Figura 1.13, se puede observar que se mantiene básicamente la misma morfología en la estructura de este tipo de hexápodo, se mejora el LAURON-V agregando nuevo tipo de motores más eficientes y con más potencia, así como la nueva tecnología en sensores disponibles para realizar lazos de control más complejos y efectivos.

A partir del siglo XX se hace común el uso de servomotores para fungir como actuadores en las articulaciones de la mayoría de los hexápodos diseñados, esto debido a la relación que ofrecen entre el costo, consumo de energía, rango de movimiento y torque otorgado. Para el diseño de prototipos rápidos y de bajo presupuesto se consideran estos actuadores de rango limitado como la mejor opción en la mayoría de los casos.

Arango y Satizabal (Arango y Satizabal, 2003) como tema de tesis para obtener el título en ingeniería electrónica en la Universidad del Valle, Colombia, implementaron un hexápodo con dieciocho grados de libertad, tres grados por extremidad, capaz de desplazarse mediante un patrón de locomoción de gateo básico, manteniendo la estabilidad dinámica de la estructura mientras logra esquivar obstáculos detectados en el camino, haciendo uso de sensores infrarrojos de proximidad de corto alcance ubicados en la parte superior. El robot hexápodo denominado Tenebrio está equipado

con un sensor de posición angular en cada una de las articulaciones, permitiéndole así tener información en todo momento del ángulo de apertura de cada uno de sus actuadores brindando la posibilidad de realizar movimientos mucho más controlados, de esta forma es capaz de detectar las irregularidades del terreno y los efectos de inclinación en la plataforma. Tenebrio está equipado además con sensores de esfuerzo en cada uno de los servomotores para detectar el consumo de corriente, lo cual traducido en cantidad de potencia o esfuerzo realizado determina si el movimiento está siendo obstruido o no se ha logrado por algún desperfecto del robot o del terreno. El prototipo construido de Tenebrio se muestra en la Figura 1.14. Demostrando la factibilidad del uso de servomotores comerciales para la construcción de estructuras para robots hexápodos.



Figura 1.14: (Hexápodo Tenebrio desarrollado en la Universidad del Valle, Colombia.
Tomado de: Arango y Satizabal (2003, p.1)

Pérez J. (Perez, 2009) diseña una estructura hexápoda generando patrones de locomoción utilizando dos células neuronales analógicas. Este hexápodo estructuralmente cuenta solo con dos grados de libertad por extremidad, a forma de simplificar la estructura y hacer una implementación sencilla sin mucho énfasis en su diseño. Basa su desarrollo en un patrón de locomoción de gateo convencional, es decir, tres extremidades haciendo contacto con la superficie mientras las otras tres

realizan el desplazamiento, utilizando simplemente compuertas lógicas, amplificadores operacionales, elementos pasivos y almacenadores de energía como los capacitores para implementar las células neuronales de manera eléctricamente análoga. Cambiando los valores de los componentes almacenadores de energía, el circuito diseñado es capaz de modificar la velocidad del paso del robot. Dicho prototipo no posee sensor alguno para recopilar información de su entorno, sino que se encarga de ejecutar el patrón de locomoción según los valores seleccionados en el circuito analógico. El principal objetivo de Pérez es comprobar que es factible el uso de este tipo de redes neuronales en robots caminantes, haciendo uso de teorías no lineales para la replicación de sistemas de locomoción bio-inspirados. Un esquema conceptual del patrón y diseño de las células se muestra en la Figura 1.15.

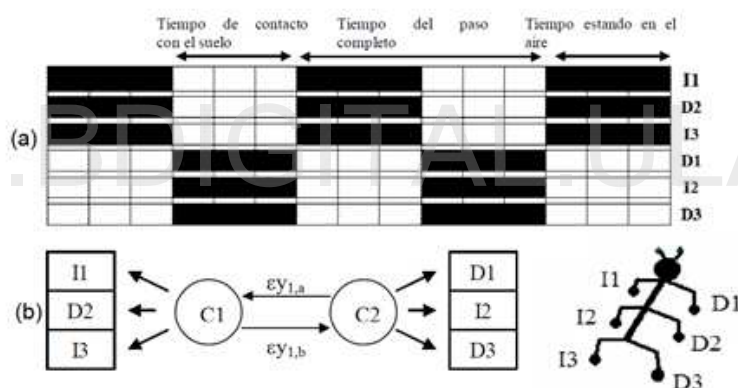


Figura 1.15: (a) Patrón de locomoción básico de gateo trípode, (b) Esquema conceptual de dos células neuronales utilizadas para generar patrones de locomoción.

Fuente: (Perez, 2009, p.5)

Se puede observar que de cada una de las células neuronales se envían dos grupos de señales, el primer grupo compuesto de tres, dirigidas a los actuadores de cada una de las extremidades para que realicen el movimiento y el segundo grupo compuesto de una única señal de espera o inhibición de movimiento a la célula contigua generando un periodo de retraso mientras se finaliza el ciclo de locomoción actual.

Brooks et al. en 1989 (Siegwart et al., 2011), en el *MIT* desarrolló el hexápodo

denominado *Genghis*, conformado por extremidades de solo dos grados de libertad, los necesarios para poder realizar desplazamientos sencillos, véase Figura 1.16. Incorporaba un conjunto de seis sensores infrarrojos de corto alcance en un arreglo capaz de detectar un objeto en un rango horizontal de cuarenta y cinco grados, junto con un par de sensores para detectar la inclinación y los giros de la base, su generador de patrón de locomoción que está basado en una red distribuida de máquinas de estados finitos, es capaz de soportar la carga de procesamiento necesaria para la recolección de la señales provenientes de los sensores haciendo posible enviar las señales correspondientes a los actuadores simultáneamente según el algoritmo de acción incorporado. *Genghis* fue diseñado para cumplir básicamente dos tareas muy específicas, lograr desplazarse a través de terrenos medianamente escabrosos y lograr seguir objetos en movimiento a una distancia máxima de detección de cuarenta y cinco centímetros, sin planteamiento alguno de trayectoria, solo se hacían ajustes ligeros de giro según la posición detectada del objetivo.



Figura 1.16: Hexápodo Genghis (1989) diseñado en el MIT. citet[p.30]siegart2011

Por aficionados con excelentes aptitudes se han desarrollado una gran diversidad de robots hexápodos, quizás con un sentido más recreacional, pero el trasfondo, pruebas y trabajo requerido se hacen notar al observar el producto final. En particular por el hecho que se utilizan partes elaboradas a fin de cumplir requerimientos y medidas específicas, utilizando y optimizando conceptos básicos para generar comportamientos tanto de desplazamiento, de interacción así como de mímica replicando a insectos en

los cuales están inspirados.

Halvorsen K. en 2010, *CEO* de *Zenta Robotics* (Halvorsen, K., 2015) en Noruega empieza el diseño de un hexápodo muy versátil denominado *MorpHex*, compuesto de treinta y un servomotores. Este hexápodo tiene la forma de una esfera por mera decisión y requerimiento del creador, lo cual lo convierte en una especie de hexápodo dual; tanto la parte superior como la inferior de la esfera pueden transformarse en un hexápodo completamente funcional. Cada una de las extremidades consta de tres grados de libertad, siendo uno de los grados de cada extremidad compartido con su homóloga en la unión de las dos extremidades como se muestra en la Figura 1.17, donde se puede observar una vista lateral del conjunto compuesto por un par de extremidades unidas por un tercer grado de libertad común que proporciona un eje de giro perpendicular a la elongación de ambas extremidades. Su cubierta en forma de esfera, cuando las doce extremidades están retraídas, le permite rodar como forma de desplazamiento o evasión de obstáculos; de igual forma según sea su orientación se pueden desplegar cualquier conjunto de seis extremidades en cualquier momento para proceder a hacer contacto discreto con la superficie ejecutando patrones de locomoción básicos de un robot hexápodo articulado.

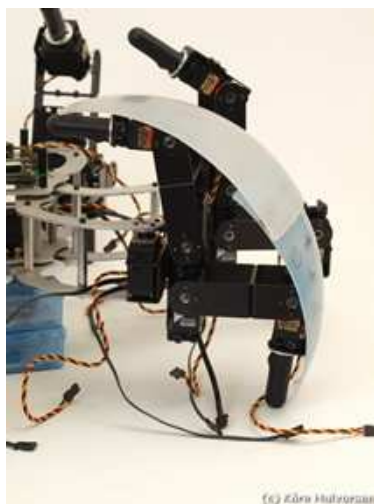


Figura 1.17: Hexápodo MorpHex MARK I diseñado por Halvorsen en 2010. Fuente: (Halvorsen, K., 2015)

Dentro de la electrónica utilizada por Halvorsen, está comprendido el uso de un sensor de posicionamiento denominado *RAZOR IMU* que permite obtener nueve grados de medición inercial para obtener en todo momento la posición y orientación del robot, lo cual le permite realizar diversos tipos de maniobras continuas, brindando la posibilidad de planear según su algoritmo de locomoción y movimiento de la próxima rutina según sean las irregularidades del terreno.

Gracias al algoritmo desarrollado por Halvorsen basado en el *Phoenix Code* de Jereon Janssen utilizando inicialmente en los hexápodos desarrollados para *Lynxmotion*, el *MorpHex* es capaz de imitar de forma bastante natural el movimiento de gateo trípode de los insectos, el de un cangrejo y otras configuraciones interesantes. Actualmente, el *MorpHex* se encuentra en su versión *MK III*, mostrado en la Figura 1.18, con chasis exterior de *PVC (Polyvinyl chloride)* de alta densidad e internos estructurales de aluminio. No posee sensor alguno para detectar obstáculos, enfoque de proximidad ni cámaras estereoscópicas para planificación de trayectorias, simplemente es operado de manera manual o con secuencias de movimientos preestablecidas, ejecutando en segundo plano, según sea el modo de operación, el algoritmo necesario para evadir y superar obstáculos.



Figura 1.18: Hexápodo MorpHex MK III diseñado por Halvorsen en 2014. Fuente: (Halvorsen, K., 2015)

Por parte de Halvorsen, junto a su larga lista de proyectos robóticos, desarrolló un prototipo de hexápodo llamado *Phoenix* entre los años 2006 y 2007, del cual proviene el nombre del código de programación *Phoenix Code* para la generación y control de

patrones de locomoción utilizando su hexápodo *MorpHex MK III* (Halvorsen, K., 2015). Este hexápodo sirvió de plataforma para diversas pruebas y refinaciones por parte de Halvorsen hasta lograr movimientos fluidos y naturales con los actuadores comerciales posibles de adquirir. Junto con una estructura simple de hexápodo, tres grados de libertad por extremidad, logró llamar la atención de gran cantidad de empresas. El prototipo final construido del Hexápodo Phoenix mostrado en la Figura 1.19, representa actualmente el concepto de hexápodo comercial que rige el mercado.



Figura 1.19: Hexápodo Phonenix, diseñado por Halvorsen (2007). (Halvorsen, K., 2015)

Desde la fecha, distintas empresas de desarrollo de partes para robots móviles como, *Lynxmotion* cuyo fundador es Halvorsen adquirida por *Robotshop Inc.*, en el 2012 y *TrossenRobotics* han utilizado el *Código Phoenix*, realizando diversas modificaciones para adaptarlos a sus modelos de producción comercial, como lo son el caso de la amplia lista de *Lynxmotion* con los modelos de hexápodos: *AH3-R*, *BH3-R*, *CH3-R*, *A-pod*, *Phoenix* entre otros, por parte de *TrossenRobotics* el *PhantomX AX MARK II* mostrado en la Figura 1.20.



Figura 1.20: Hexápodo PhantomX AX MARK II distribuido por *TrossenRobotics Inc.* Tomado de: (TrossenRobotics, 2015)

Compuesto por tres grados de libertad en cada extremidad y servomotores capaces de transportar una carga útil de aproximadamente 2.5 kilogramos total en la plataforma, el *PhantomX AX MARK II* utiliza un código que es una variación del Código *Phoenix* original, denominado *NUKE Code*. Sin embargo, Halvorsen ha realizado pruebas utilizando el *Código Phoenix* demostrando un desempeño y velocidad de desplazamiento admirables de aproximadamente 3.5 kilómetros por hora.

Una recopilación de información de gran valor para el desarrollo de este trabajo de grado, es la realizada por Tedeschi y Carbone (2014), quienes en su trabajo de investigación, lograron crear una referencia sobre diversos modelos de hexápodos construidos hasta la fecha, tomando en cuenta diversos aspectos importantes como el número de grados de libertad por extremidad, velocidad promedio de movimiento, capacidad de carga útil, patrones de locomoción utilizados y dimensiones, dando un buen punto de referencia para hacer futuras comparaciones con respecto al modelo a diseñar. Ver Tabla 1.1

Tabla 1.1: Comparacion Robots Hexápodos. Fuente: (Tedeschi y Carbone, 2014, p.187)

Robot	Características principales					Desempeno principal			Año	Aplicación
	Masa(kg)	Largo(cm)	Ancho(cm)	Alto(cm)	GDL	Vel.Max(ms/s)	Gateo	Poder(W)		
Ambler	2700	500	500	700	12	0.007	Oleada libre	1900	1989	Exploración planetaria
ASV	3200	520	240	300	15	1.0	Oleada libre	26000	1989	Terrenos escabrosos
Tum	2.7	80	40	100	18	0.3	Oleada	500	1991	Biológicamente Inspirado
Hannibal	23	35	NA	20	19	0.04	Wave Free	NA	1989	Exploración planetaria
Biobot	11	58	14	23	18	NA	NA	NA	2000	Terrenos Dificiles
Hamlet	13	40	28	40	18	0.1	Oleada libre	52	2001	Pruebas Fuerza/Posicionamiento
Rhex	7	53	20	15	6	0.55	Oleada libre	100	2001	Actuadores Reducidos
Sprawlita	0.27	16	NA	NA	12	0.35	Oleada	NA	2002	Bio inspirado
Lauron III	18	50	30	80	18	0.4	Oleada libre	NA	1999-2003	Controlador jerárquico
Genghis	1	40	15	NA	12	0.04 0.12	Oleada libre	NA	2004	Controlador reactivo
Aqua II	16.5	64	44	13	6	0.7 1	Tierra/Agua	200	2010	Hexápodo submarino
Bill-Ant-p	2.3	47	33	16	22	0.004	Oleada	25	2005	Bio inspirado
Gregor I	1.2	30	9	4	16	0.03	NA	25	2006	Bio Inspirado/Cucaracha
Athlete	850	2750	2750	2000	36	2.78 0.016	Rodante	NA	2006	Exploración Lunar
RiSe	2.8	41	NA	NA	12	NA	Oleada	NA	2006	Hexápodo escalador
Comet IV	2120	280	330	250	24	0.278	Oleada	20600	2009-2011	Multitarea Exteriores
CR200	600	250	200	130	18	0.5	Oleada	20000	2013	Terrestre/Submarino
Mantis	1900	420	220	280	18	NA	Oleada	42000	2013	Entretenimiento

Existe una gran cantidad de información referente a los robots de tipo hexápodo que se puede encontrar en diversas fuentes, tanto en la bibliografía oficial como no oficial, gracias a los avances tecnológicos, investigaciones y trabajos de desarrollo realizados por las universidades, centros de investigación, empresas y organizaciones internacionales alrededor del mundo. El rango de aplicaciones y características de este tipo de robots depende de las necesidades que se requieran satisfacer y tareas que se requieran cumplir, contando actualmente con un amplio número de piezas y materiales disponibles para ser utilizados en los distintos proyectos. Haciendo uso de las investigaciones enunciadas se tienen las herramientas y bases necesarias para proceder a realizar un diseño propio de un robot hexápodo con diversas técnicas para generar patrones de locomoción con el fin de cumplir alguna tarea.

1.2 Planteamiento del problema

Mantener la simpleza de un diseño conservando la funcionalidad a cabalidad, puede ser uno de los problemas con más rigor a ser enfrentado al momento de diseñar un robot con extremidades articuladas. La mayoría de los robots de tipo hexápodo diseñados comercialmente, a modo de dispositivos de entretenimiento o juguetes, no poseen bases fundamentadas ni definidas, con respecto a la elección del diseño que presentan y la mayoría de los patrones de locomoción se basan simplemente en rutinas desarrolladas con propósitos recreativos que no sacan provecho total de la posible funcionalidad de las extremidades de una plataforma móvil tan versátil como lo es un hexápodo, presentando documentación sobre los fundamentos pertinentes al diseño muy reducida por el hecho de ser robots comerciales. Por otra parte, los robots de tipo hexápodo diseñados por universidades, centros de investigación y organizaciones comerciales alrededor del mundo, presentan cierto grado de documentación según sea el caso, pero se enfocan en detallar el fin para el cual se diseñó dicho robot y su funcionamiento, careciendo de razón alguna en los textos públicos de explicación concisa y fundamentos en los cuales se basa la morfología de sus extremidades, base estructural y de la fuente de inspiración fundamentada para el desarrollo de los patrones de locomoción implementados.

Es propósito de este documento de proyecto de grado es diseñar, modelar y controlar una estructura para un robot hexápodo multipropósito que considere los diferentes aspectos necesarios para poder implementar a futuro un prototipo funcional, teniendo en cuenta las investigaciones provistas en la bibliografía y haciendo uso del análisis de las diversas estructuras morfológicas y comportamientos presentes en los seres vivos existentes en la naturaleza, de forma tal que, se pueda hacer uso de técnicas de control sencillas o complejas, para lograr un resultado satisfactorio.

1.3 Justificación

Una plataforma móvil multipropósito representa una estructura versátil para poder incorporar cualquier tipo de herramienta a fin de realizar una amplia diversidad de tareas según sea necesario. La implementación de un robot articulado del tipo hexápodo terrestre comprende un conjunto de ventajas y características que lo hacen único a la hora de desenvolverse en entornos dinámicos gracias a sus extremidades, utilizadas como medio de desplazamiento, teniendo así la posibilidad de adentrarse en terrenos escabrosos y empinados en los cuales vehículos terrestres que utilizan medios convencionales de desplazamiento no son capaces de hacerlo. Este tipo de morfología robótica brinda la capacidad de omnidireccionalidad y una estabilidad estática en todo momento al tiempo de ejecutar o desarrollar cualquier tipo de movimiento, lo que permite, en caso de ser necesario, utilizar alguna de las extremidades como herramienta con propósitos variados interactuando así con su entorno. Por otro lado, a diferencia de los vehículos que están arraigados a solo una fuente de energía o actuador, un vehículo o plataforma hexápoda tiene la posibilidad de compensar fallas de hasta dos extremidades y aún así poder desplazarse, lo que lo hace robusto a un gran número de escenarios.

El desarrollar una plataforma multipropósito de este tipo, brinda las posibilidades de dejar una base para el desarrollo de futuros temas de proyectos de grado en la Universidad de Los Andes, dando rienda suelta a la libertad de escogencia gracias a que el diseño del vehículo ya está propuesto de forma debidamente fundamentada. Dicha plataforma se puede prestar para la incorporación de diversos sensores y dispositivos como: cámaras, sistemas de posicionamiento global, sensores para la detección sustancias químicas en el ambiente, diversos tipos de anclajes en las extremidades, herramientas multipropósito como pinzas en cada una de las extremidades, sensores de orientación, equilibrio y giroscopios a fin de programar tareas complejas de seguimientos de trayectorias sobre terrenos dinámicos, proporcionar patrones de locomoción adaptativos según el terreno en el que se despliegue el robot o manteniendo la estabilidad de la plataforma dinámicamente mientras este se desplaza.

De igual forma, este trabajo de grado perfila a un ingeniero de sistemas trabajando en diversas áreas de interés, haciendo el desarrollo de este proyecto bastante multidisciplinario, integrando áreas de mecánica, electrónica, automatización, control, robótica y tópicos referentes a anatomía y morfología de seres vivos, logrando forjar de esta forma un proyecto que representa una composición integral de múltiples áreas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Diseñar y modelar la estructura de un robot tipo hexápodo terrestre como plataforma multipropósito, y controlar el movimiento del mismo a través del diseño de un patrón de locomoción.

1.4.2 Objetivos específicos

- Proponer un diseño estructural propio de un robot tipo hexápodo, en base a los conceptos y diseños encontrados en la literatura, y a los componentes disponibles y/o accesibles.
- Obtener un modelo de interés de la estructura del hexápodo diseñado.
- Proponer algún patrón de locomoción que defina el movimiento del hexápodo diseñado.
- Validar a través de simulaciones el control del movimiento del hexápodo diseñado.

1.5 Metodología

En primera instancia se procedió a realizar una búsqueda en la literatura y bibliografía existente hasta la fecha sobre los conceptos competentes al desarrollo de una plataforma hexápoda, diseño de robots caminantes y patrones de locomoción, a manera de tener una definición clara de cada uno de estos temas, logrando así considerar toda la

terminología y aspectos utilizados a la hora de diseñar plataformas de este tipo.

De igual forma se revisaron las investigaciones pertinentes entorno a las morfologías naturales hexápodos perfeccionadas a lo largo del periodo de evolución por los seres vivos existentes en la naturaleza, según sus necesidades y función, siendo este aspecto uno de los que más peso e importancia tiene a la hora de seleccionar un diseño funcional y versátil para este proyecto. Así mismo se revisaron los trabajos realizados por centros de investigación, universidades, empresas y aficionados a la construcción de robots, observando las ventajas y desventajas que cada uno de estos diseños reluce según la función que desempeñan.

Posteriormente tomando en cuenta todos los conceptos y diseños disponibles, se procedió a proponer un diseño estructural para el robot hexápodo, y se obtendrá un modelo de interés de dicha estructura para luego proponer un patrón de locomoción, correspondiéndose entre ellos para lograr conseguir un concepto de plataforma multipropósito funcional y versátil; tomando en cuenta que la selección de los actuadores necesarios para soportar la estructura y los patrones de locomoción propuestos, tengan de igual forma la capacidad de soportar una carga útil extra para poder servir de plataforma de transporte de diversos tipos de herramientas, sensores y demás dispositivos a fin de agregar funcionalidades extras al robot.

Una vez propuesto el diseño de la estructura y cada una de sus extremidades, se realizaron las simulaciones necesarias para corroborar su funcionabilidad y rangos de movimiento, validando que el diseño seleccionado posee las características de una plataforma móvil multipropósito con un patrón de locomoción que le permita desplazarse.

Teniendo el diseño de la estructura y el patrón de locomoción propuestos, se procedió a realizar la selección de materiales, actuadores, componentes eléctricos y electrónicos que mantengan las características y funcionalidades descritas, a fin de que a futuro se tengan la posibilidad de construir un primer prototipo o parte de

este tomando en cuenta la accesibilidad, disponibilidad y costos de todas las piezas necesarias, manteniendo en todo momentos los conceptos bases fundamentales para dichos diseños.

Con los resultados obtenidos en las simulaciones se procedió a establecer conclusiones referentes al desempeño de la estructura, en lo que rango de movimientos, estabilidad y posibilidades de generación de diversos patrones de locomoción respecta.

1.6 Alcance

El desarrollo de este proyecto tiene como objetivo principal lograr plantear un diseño funcional y versátil de una estructura para un robot hexápodo, junto con un patrón de locomoción que le permita moverse manteniendo los principios de los conceptos de estabilidad de una estructura hexápoda estudiados en la bibliografía, a fin de servir como una plataforma móvil multipropósito.

Se tomaron en cuenta diversas limitaciones al momento de plantear estos diseños, entre ellas tratar de que el número de actuadores a utilizar sea el mínimo posible, o por lo menos no sea en exceso; debido a que a mayor cantidad de actuadores mayor seria el peso del robot, esto pudiera afectar el diseño del movimiento. De igual forma, la selección de los mismos debe considerar diversos factores como costos, accesibilidad y disponibilidad en el mercado, de esta manera se puede tener la posibilidad de hacer una implementación funcional a futuro para comprobar el funcionamiento del robot. Los materiales a seleccionar para la estructura confieren un punto relevante que deberá ser considerado de acuerdo a aspectos como disponibilidad y variedad en el mercado. Comparando características requeridas por el diseño como durabilidad, resistencia y dificultad de manipulación.

En lo que a materia de control respecta, en primera instancia se desea lograr desarrollar un patrón de locomoción tomando en cuenta las características de

funcionamiento del tipo de actuadores seleccionados. Estos actuadores serán controlados haciendo uso de un esquema de control sencillo en lazo abierto a fin de lograr el movimiento necesario de cada una de las extremidades del robot, según sea requerido por el modelo de patrón de locomoción del robot tipo hexápodo.

Una vez obtenido el modelo de interés de la estructura y patrón de locomoción correspondiente al movimiento del robot, se realizaron simulaciones para validar los modelos obtenidos para corroborar que se ha logrado lo especificado en el diseño.

1.7 Producto

Como resultado de este trabajo de grado se pretende dejar como producto el diseño teórico de la estructura y locomoción de un robot tipo hexápodo a modo de plataforma multipropósito.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se procede a definir los términos y conceptos para formar las nociones básicas necesarias para el entendimiento y comprensión del desarrollo de este trabajo de grado. En el mismo define la terminología puntual sobre robótica, mecánica y entomología necesarios para describir de manera clara lo referente al diseño de un robot tipo hexápodo, partes que le conforman y descripciones de terminología sobre estabilidad y patrones de locomoción. Estas nociones se definen de tal forma de seguir la línea de desarrollo de los capítulos posteriores.

2.1 Robots

Concepto

Según Mellado (2013) la palabra Robot, proviene del término checo *robota*, que significa trabajo forzado o servicio obligatorio, o bien del término *robonik* que significa siervo. Se utilizó en primer lugar por el dramaturgo Karel Capek, en 1918, en historia corta y posteriormente en 1921, en la obra titulada *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)*. Dicha obra trataba sobre una serie de ficción en inglés que en la que se utilizaban métodos biológicos para producir en serie “hombres” que servían a lo humanos.

Por parte de Khalil y Dombre (2004), se define la palabra robot como:

“Un robot es un sistema mecánico con varios grados de libertad, controlado de manera automática, reprogramable y multipropósito que puede estar ubicado en una posición fija o móvil. Utilizados ampliamente en áreas industriales y en escenarios emergentes como lo son la medicina, servicios (área aéreo espacial, seguridad civil...), transporte, entretenimiento, ..., en los cuales el robot funciona de manera autónoma o en cooperación con un operador a distancia para completar tareas simples o complejas en ambientes estructurados.”

(Khalil y Dombre, 2004, p.1)

Según el conciso del diccionario de la Universidad de Oxford, robot se define como:

“Una máquina capaz de completar o llevar acabo una serie de tareas automáticamente, en especial aquellas programadas por una computadora”

(Oxford Living Dictionaries, 2016)

Según el *RIA (Robotic Institute of America)*, se tiene la siguiente definición precisa:

“Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados mediante diversos movimientos programados para completar un conjunto de diversas tareas”

(Nonami et al., 2014, p.4)

En *ISO 8373 (International Organization for Standardization)* se define el concepto de robot como:

“Un manipulador multipropósito, reprogramable y automáticamente controlado con tres o más ejes”

(Nonami et al., 2014, p.4)

Otra definición un poco más comprensiva para la palabra robot, cubriendo un amplio rango en diversas clases, es formulada por Latombe (1990), quien cita:

“Un robot es un dispositivo mecánico versátil, - por ejemplo, un brazo manipulador, una mano con múltiples articulaciones y dedos, un vehículo rodante o caminante, una plataforma de vuelo libre o cualquier combinación de los mencionados anteriormente - equipado con actuadores y sensores bajo el control de un sistema computarizado. Este opera en un área de trabajo delimitada dentro del mundo real. Dicha área de trabajo puede estar poblada de objetos físicos y dominado por las leyes de la naturaleza. El robot lleva acabo diversas tareas mediante la ejecución de movimientos dentro del espacio de trabajo”

(Latombe, 1990)

2.1.1 Clasificación de los robots

Existen diversas formas en las cuales pueden ser clasificados los robots, según su funcionalidad, modo de operación, movilidad o método de desplazamiento, entre otros.

Clasificación de los robots según Mellado Martín

Según Mellado (2013), la clasificación más común de los robots se basa en la función realizada, distinguiéndose entre robots industriales y robots de servicio. Pero de manera prioritaria se definen según movilidad, entre estos se tienen:

- **Robots fijos.** Disponen siempre de una base fija anclada al suelo, por lo que no se pueden desplazar libremente. Al no disponer de movilidad en la base, se trata de robots articulados que desplazan un útil de trabajo por el espacio. Los robots industriales manipuladores son el caso típico de robot fijo, incluso cuando se utilizan como robot de servicio.
- **Robots móviles.** Disponen de cierta libertad de movilidad de su base. Se pueden definir como maquinas autopropulsadas y no tripuladas, capaces de desplazarse libremente y bajo control con un cierto grado de autonomía en un

entorno determinado. Este tipo de robot puede llevar anclados robots del tipo estáticos a los que se les está acoplando una movilidad no propia. Según el grado de movilidad que estos presenten se pueden clasificar en:

- **Robots a hélices.** Este tipo de robots se desplazan con movilidad tridimensional por el entorno en el que se encuentran, bien sea aéreo o acuoso, estando su tracción producida por las hélices o propulsores. Son casos típicos de vehículos aeroespaciales o submarinos. Figura 2.1(a).
- **Robots rodantes.** Se desplazan mediante ruedas o dispositivos similares, como cadenas. Estos disponen de mejor respuesta en entornos con superficies no lisas. Siempre mantienen contacto con el suelo, de los cuales existen diferentes configuraciones según el número de ruedas y su tipo. Figura 2.1(b).
- **Robots andantes.** Se desplazan mediante patas, que alternativamente mantienen contacto con el suelo. Frente a los rodantes, responden mejor ante entornos escabrosos con baches, agujeros o escaleras pero presentan el importante problema del control de su estabilidad. Entre estos pueden distinguirse los robots bípedos, arácnidos o insectos que disponen de más patas o extremidades, normalmente en número par. Entre estos se consideran también los robots del tipo trepadores que se adhieren a superficies no horizontales. Figura 2.1(c).
- **Robots reptiles.** Se caracterizan por mantener contacto continuo con la superficie con gran parte de su cuerpo o estructura mecánica. Figura 2.2(e).
- **Robots saltadores.** Su desplazamiento consiste en la alternancia de toma de contacto y pérdida de contacto con el suelo de forma que se desplazan a saltos. Figura 2.2(d).

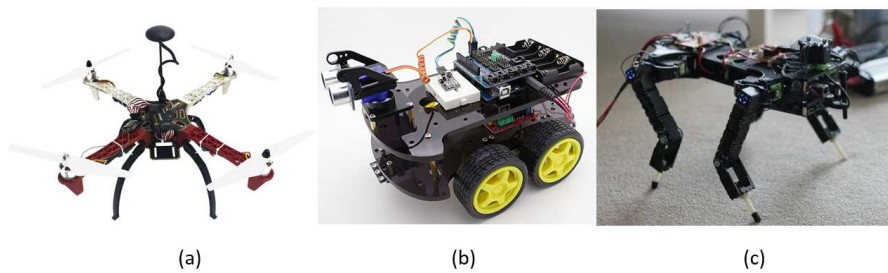


Figura 2.1: (a) *Quadrator F450 APM 2.6*, (b) *Kingduino 4WD Ultrasonic*, (c) *Stag Mk2*



Figura 2.2: (d) *Snake robot of Carnegie Mellon University*, (e) *The Penn Jerboa: Tailed Hopping Robot*

En paralelo a la clasificación realizada según su desplazamiento, se puede agregar que cualquiera de estos robots puede ser controlado de manera autónoma o teleoperado:

- **Autónomo.** Una vez programados tienen capacidad propia para trabajar, sin necesidad de una continua interacción con el operario.
- **Teleoperado o teledirigido.** Deben ser operados continuamente y a cierta distancia, de forma que ante la inactividad de este no se realiza ninguna acción.

Clasificación de los robots caminantes según Nonami Kenzo

Nonami et al. (2014) propone esta primera clasificación basada en el concepto de estabilidad estática y dinámica, durante la ejecución del patrón de movimiento o

desplazamiento sobre la superficie de contacto. Se pueden formar dos categorías, robots caminantes estáticamente estables y robots caminantes dinámicamente estables, definidas a continuación:

- **Robots estáticamente estables.** Estos robots controlan su locomoción de tal forma que las patas que brindan soporte mantienen su posición de manera fija (fase de postura o soporte) en localizaciones preestablecidas, seguido de su retracción para ejecutar el movimiento en la dirección deseada. Las extremidades o patas que se encuentran en movimiento (fase de transferencia) son levantadas para ser posicionadas en sus nuevas localizaciones fijas mediante la proyección, satisfaciendo siempre la restricción en la cual la proyección vertical del centro de gravedad de la máquina caminante esté contenida dentro del polígono de apoyo formado por las extremidades que están en fase de postura o en contacto con la superficie de desplazamiento. Las velocidades de locomoción de las máquinas estáticamente estables no suelen ser muy rápidas, la ventaja es que estas pueden detener su movimiento en cualquier momento a punto del ciclo de locomoción sin perder el balance o la estabilidad de la estructura. Robots del tipo bípedo con pies de gran superficie de contacto, robots cuadrúpedos en fase de gateo trípode, y robots con seis u ocho extremidades son los ejemplos básicos de estabilidad estática.
- **Robots dinámicamente estables.** A diferencia de los anteriores, en los robots dinámicamente estables, no existe la restricción de estabilidad estática. Este tipo de robots utilizan mediciones de fuerzas dinámicas siendo estables en un ciclo a la vez, hasta que el patrón de movimiento se vuelva a repetir. En estos robots, la energía potencial, cinética y la velocidad juegan un papel crucial al momento de mantener la estabilidad. Calcular la cinemática del robot de manera geométrica no suele ser suficiente para mantener el patrón de movimiento garantizando la estabilidad. Tomar en cuenta el almacenamiento de energía en diversos puntos claves del robot es esencial a la hora de mantener un patrón de locomoción estable. Entre estos robots se tienen como ejemplo, el patrón de locomoción de saltos de un robot con una sola extremidad y el control de movimiento de un bípedo o un

cuadrúpedo moviéndose a altas velocidades.

Así como la clasificación según el tipo de estabilidad del robot es notable, el número de las extremidades brinda la posibilidad de diferenciar los distintos subgrupos según sea el interés. De manera sencilla contando el número de extremidades que se presentan en la estructura, dicho robot pertenecerá a dicha categoría.

Según Nonami et al. (2014), se puede usar la siguiente terminología para categorizar los robots según los desarrollos actuales:

- **Monopods.** Robots compuestos por una sola extremidad, dependen del control y cálculo de la estabilidad dinámica para mantenerse en movimiento. En la Figura 2.3 se puede apreciar el primer prototipo de robot Raibert, desarrollado en el MIT. Posteriormente su modificación un 3D bípedo que usa la misma técnica de saltos en una sola extremidad para lograr realizar desplazamientos.

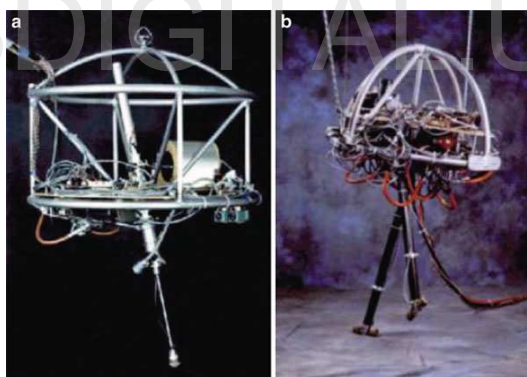


Figura 2.3: Raibert's hopping robots (a) *3D one-legged Hopper*, (b) *3D biped*.

Tomado de: (Nonami et al., 2014, p.9)

- **Bípedos.** Este tipo de robots usa una configuración usualmente similar a la distribución apreciada en las extremidades humanas. Compuestos normalmente de dos o más articulaciones por extremidad para lograr realizar desplazamientos. Dada su condición de estabilidad, a menos que se cuente con una superficie en el pie lo suficientemente grande para catalogarse como robot estáticamente estable, es necesario utilizar criterios de estabilidad dinámica para poder mantener de este

tipo de robot. En la Figura 2.4 se puede observar dos configuraciones clásicas, uno actuado y otro no actuado. El robot de la Figura 2.4(b), debe permanecer siempre en movimiento para ser estable.

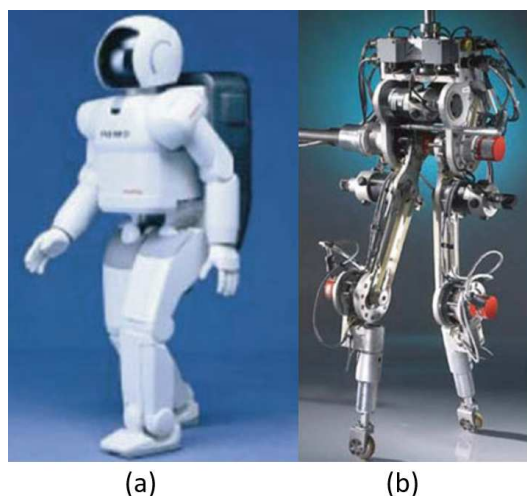


Figura 2.4: (a) *Honda ASIMO*, (b) *Rabbit biped robot*. Tomado de: (Nonami et al., 2014, p.9)

- **Cuadrúpedos.** Robots con cuatro extremidades, usualmente dispuestas en cada extremo de una base cuadrada o rectangular según sea el requerimiento. Este tipo de morfología de robots permite hacer uso de los dos tipos de estabilidad, tanto la dinámica como la estática dependiendo de las necesidades a la hora de desplazarse. Ver Figura 2.5.

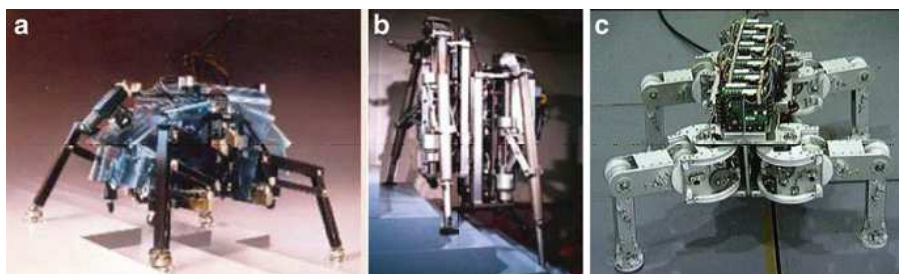


Figura 2.5: Robots Cuadrúpedos caminantes *TITAN*. (a) *TITAN-III*, (b) *TITAN-IV*, (c) *TITAN VIII*. Tomado de: (Nonami et al., 2014, p.10)

- **Hexápodos.** Robots con seis extremidades, dispuestas de manera simétrica

radial o simétricamente bilateral. Pueden sacar provecho de los dos tipos de estabilidades según sean las necesidades a la hora de desplazarse al igual que los robots cuadrúpedos. Se utilizan con mayor regularidad dado a que su número de extremidades permite un desplazamiento en modo de gateo trípode, lo cual permite que se aproveche de manera más eficiente el rendimiento de desplazamiento por ciclos. Dado su número de extremidades puede hacerse complejo el diseño de patrones de locomoción y coordinación para lograr generar movimientos simples. Ver Figura 2.6.

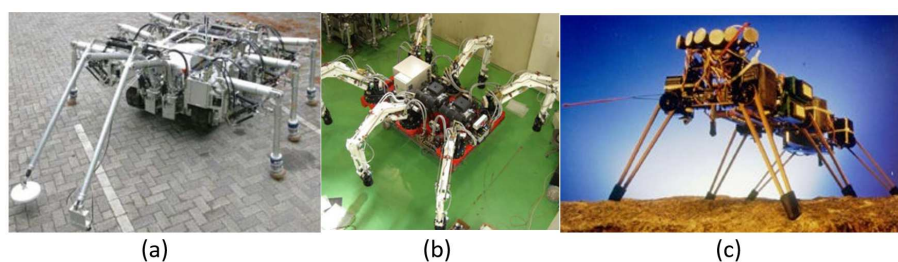


Figura 2.6: Robots Hexápodos (a) *COMET-III*, (b) *COMET-IV*, (c) *Genghis II*.

Tomado de: (Nonami et al., 2014, p.12)

- **Octópodos.** Robots formados por ocho extremidades. Mantiene las propiedades de los robots con cuatro a más extremidades sobre criterios de estabilidad. En la Figura 2.7(a), se puede observar como las puntas de las extremidades del robot *DANTE-II* son equipadas con granpones para maximizar la tracción sobre el terreno en el cual se debe desplazar, en este caso la superficie de un volcán.

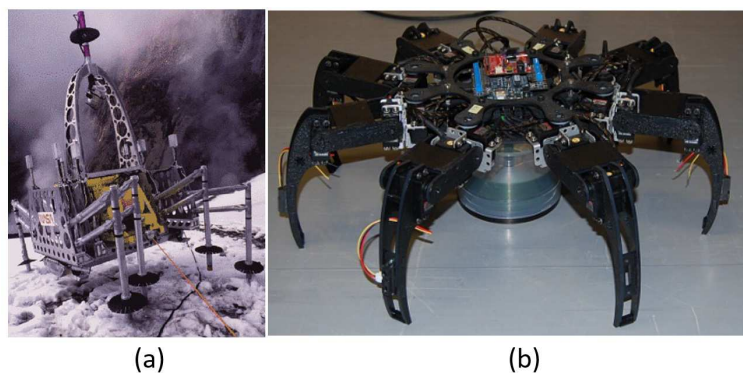


Figura 2.7: Robots Octópodos (a) Robot para la exploración de volcanes *DANTE-II*, (b) *Veteran*. Tomado de: (Nonami et al., 2014, p.13)

2.2 Robots hexápodos

Utilizando las definiciones de la palabra Robot por parte de Latombe (1990), Khalil y Dombre (2004), junto con las clasificaciones propuestas por Mellado (2013) y Nonami et al. (2014), se puede llegar entonces a una definición clara sobre un robot del tipo hexápodo.

Un robot del tipo hexápodo esta conformado, como se enuncia en la sección 2.1, por seis extremidades. Cada una de estas con uno o más grados de libertad, dándole así la plasticidad necesaria para poder desplegar un amplio rango de patrones de movimiento y locomoción. Dado el número de extremidades, este tipo de robot puede lograr, en primera instancia, la condición estabilidad estática, necesaria para que el robot no caiga al suelo al momento de desplazar una o más extremidades, a la vez según sea necesario para ejecutar un patrón de locomoción específico.

De igual forma basándonos en la clasificación previa de Mellado (2013) y teniendo en cuenta el modo de locomoción sobre la superficie y tipo de extremidades, se puede denotar a un robot hexápodo como un robot móvil andante, con extremidades articuladas que puede ser o no teleoperado.

Con respecto al modo de desplazamiento ó locomoción, Nonami et al. (2014) enuncian textualmente:

“La locomoción hexápoda o basada en seis extremidades, es un trato intermedio entre la locomoción de un robot con cuatro extremidades y uno con ocho. Un robot con seis extremidades puede caminar en terreno plano utilizando patrones de locomoción regulares como gateo por oleadas e incluso desplazarse por terrenos difíciles mediante gateos de locomoción libres o del tipo de seguimiento de extremidad líder. Estos robots, según sus dimensiones pueden sortear obstáculos grandes, subir y bajar pendientes o sobrepasar grietas de manera bastante eficiente. Con respecto a las demás estructuras, su consumo de energía es moderado y según sea el diseño pueden lidiar con carga útil considerable. La capacidad de tener seis extremidades, le permite al robot usar de tres a seis extremidades como soporte sobre la superficie, por tanto puede mover cualquiera de las demás extremidades mientras aún mantiene la estabilidad estática y su altura.”

Nonami et al. (2014, p.14)

2.2.1 Clasificación de robots hexápodos

La clasificación de los robots hexápodos esta basada principalmente en la ubicación, distribución y morfología de las extremidades que lo conforman. Tedeschi y Carbone (2014), explican las distintas configuraciones según su investigación, en la cual se pueden observar diversos criterios. Siguiendo esta idea se tienen las siguientes categorías para clasificar un robot hexápodo:

Configuración para el posicionamiento de las extremidades:

Según Escobar y Silva (2011) se refiere a la distribución de las extremidades entorno a la estructura base que las contiene. Dependiendo de la estructura, bien sea un polígono regular como un cuadrado, un rectángulo, un hexágono o un círculo u óvalo se tienen las siguientes configuraciones más comunes.

- **Configuración bilateral.** Se caracterizan por distribuir equitativamente las extremidades en tres pares, los cuales son posicionados de tal forma que se consoliden tres extremidades a cada lado del cuerpo. Para este tipo de distribución de extremidades, se suelen utilizar bases o cuerpos con formas del tipo cuadrada o rectangulares, bien sea articuladas o seccionadas. Ver Figura 2.8(a).
- **Configuración simetría radial.** Se refiere a la configuración en la cual las extremidades están dispuestas de tal forma que su espaciación se produce entorno a un eje central. Cada extremidad o base de extremidad está equitativamente separada entre las demás, a fin de completar la colocación de las mismas de manera holónomicamente. Ver Figura 2.8(b) y (c).

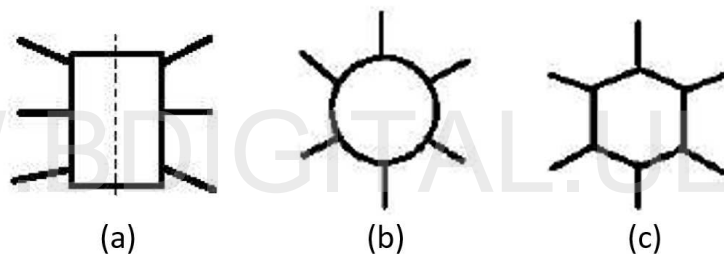


Figura 2.8: Posicionamiento de extremidades para robots hexápodos. (a) Simetría bilateral, (b) Simetría radial entorno a una circunferencia, (c) Simetría radial en torno a un hexágono. Fuente: (Tedeschi y Carbone, 2014, p.193)

Configuración y posición de las articulaciones

Según sea la configuración morfológica empleada para el diseño de las extremidades del robot hexápodo, se puede tener la siguiente referencia de clasificación:

- **Bio inspirado.** Si las extremidades están basadas en un diseño presente en algún ser vivo, bien sea de la familia de invertebrados o no, como arácnidos, hormigas, reptiles o mamíferos. Ver Figura 2.9.
 - **Arácnido.** En esta distribución de las articulaciones y eslabones, se pretende que la posición estable siempre mantenga un grado de movimiento

o actuador en la parte superior a la línea base del cuerpo. Usualmente el último eslabón de la cadena cinemática que forma la extremidad es de mayor longitud en proporción a los demás. Como su nombre lo sugiere está inspirado en estructuras morfológicas de extremidades presentes en arácnidos y demás invertebrados. Ver Figura 2.9(a).

- **Reptil.** La configuración de las extremidades para esta distribución mantiene la línea base o media de la plataforma del robot horizontalmente alineada con el primer y segundo actuador o articulación que conforma la cadena cinemática de la extremidad. Inspirado en animales vertebrados como cocodrilos y lagartijas. Ver Figura 2.9(b).
- **Mamífero.** Esta configuración dispone las extremidades de tal forma que todas tienen la articulación predominante o rodilla apuntando en la misma dirección. Dicho diseño es principalmente eficiente para caminar en una dirección específica, en la cual se orientan las extremidades. Ver Figura 2.9(c).

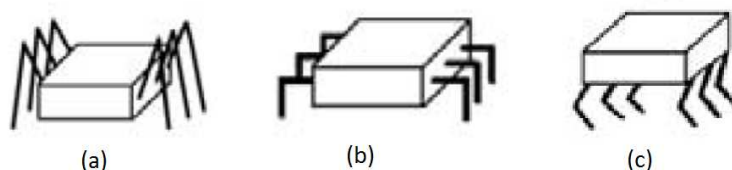


Figura 2.9: Configuración de extremidades para hexápodos bio inspirados (a) Configuración arácnido, (b) Configuración reptil, (c) Configuración mamífera.

Fuente: (Tedeschi y Carbone, 2014, p.193)

- **Posición de flexión de las articulaciones.** Esta característica define la posición o rango de movimiento predominante de los actuadores que definen la morfología de la extremidad. Según sea el caso, puede que se presenten ambos tipos de flexión en las articulaciones según se distribuya o seleccione el rango de operación de la articulación acoplada. Usualmente se determina dicha característica en torno a la rodilla, articulación de movimiento predominante en los organismos vivos.

- **Flexión interna.** La ubicación de los actuadores tiene su predominancia o selección de rango de movimiento de tal forma que estén pautando hacia el interior de la estructura. Ver Figura 2.10(a).
- **Flexión externa.** Al contrario de la flexión interna, la externa mantiene las articulaciones cuyos rangos de movimiento son predominantes apuntando hacia el exterior, brindando una mayor plasticidad de movimiento a la hora de generar patrones de locomoción. Ver Figura 2.10(b).

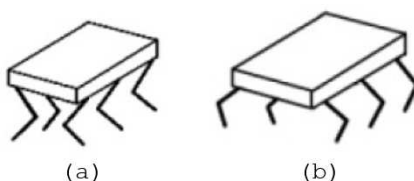


Figura 2.10: Posición de flexión de las articulaciones para las extremidades (a) Configuración de flexión interna, (b) Configuración de flexión externa. Fuente: (Tedeschi y Carbone, 2014, p.193)

Clasificación de las extremidades según el número de articulaciones o grados de libertad

Según sean los requerimientos de diseño y las funciones a realizar por el robot, la selección del número de grados de libertad a implementar es crucial. A mayor número de grados de libertad mayor complejidad requerirá la planificación del movimiento del robot. Según (Martinez y Fernández, 2003, p.9), las configuraciones más comunes encontradas en la literatura son las siguientes:

- **Un grado de libertad.** Esta es la configuración más sencilla que se puede emplear, dado que las extremidades serán básicamente rígidas y cada una de estas cumplirá una función específica. En este tipo de configuraciones usualmente las extremidades centrales o par central proporcionan el levante necesario de la estructura para lograr el avance o movimiento en una dirección específica por medio de los otros dos pares, manteniendo en todo momento al menos tres extremidades en contacto con la superficie.

- **Dos grados de libertad.** Esta es la configuración más utilizada, actualmente. Son los hexapodos más lúdicos y más utilizados para la investigación, incrementando un poco la complejidad de control de las extremidades. Ver Figura 2.6(c).
- **Tres o más grados de libertad.** Los hexápodos con tres o más grados de libertad por extremidad suelen ser los más complejos de controlar, debido a que para aprovechar completamente su movilidad, es necesario tener en cuenta los rangos de movimientos de cada una de sus articulaciones en todo momento. Al aumentar el número de grados de libertad, se hace más compleja la tarea de control pero la plasticidad de movimientos posibles hace muy versátil la configuración lograda, según sea la distribución seleccionada. Ver Figura 2.6(a) y 2.6(b).

2.3 Grados de libertad

Definición

Según Dapena (2015), un grado de libertad se define como:

“Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior.”

(Dapena, 2015)

Dada la definición anterior, se puede denotar entonces la relación entre la palabra articulación y un grado de libertad. Un grado de libertad se utiliza para relacionar dos eslabones o un eslabón con la base de la estructura. Cada articulación puede representar un o más grados de libertad según sea su diseño y configuración, permitiendo realizar diversos movimientos.

Teniendo la definición clara, se pueden clasificar los diversos tipos de articulaciones desarrolladas actualmente. Entre las más comunes utilizadas en el área de la robótica, se tiene las articulaciones rotacionales y las prismáticas, cada una de estas representando un grado de libertad.

2.4 Actuadores

Son los dispositivos encargados de generar el movimiento de los elementos móviles del robot, las articulaciones. Estos se ubican en las posiciones consolidadas, destinadas a los grados de libertad de cada una de las extremidades para brindar una variedad o rango de movimiento específico. Entre los actuadores más utilizados actualmente se tiene como primera opción los servomotores debido a que estos proporcionan una relación considerablemente buena entre, torque, rango de movimiento y precio.

2.5 Conceptos de estabilidad

A groso modo, la estabilidad para un robot articulado caminante se define como la capacidad de este para permanecer en una posición fija o en equilibrio según mientras hace contacto con la superficie, bien sea al momento de desplazarse o de manera estática. Debido a esto existen dos conceptos necesarios a definir, como lo son la estabilidad estática y dinámica.

La noción de estabilidad, esta dada por la necesidad o no de hacer correcciones continuas en los actuadores del robot para poder mantener una posición estable o fija. Se define a continuación los dos conceptos de estabilidad:

2.5.1 Estabilidad estática

Se dice que un robot caminante es estáticamente estable si tiene tres o más puntos de contacto en la superficie sobre la cual se desliza. En la proyección vertical de dicho polígono formado, debe estar contenido el centro de masa del robot, dando de esta forma márgenes de estabilidad o movimiento que determinan el desplazamiento

máximo que puede lograr, o las restricciones de movimiento que debe respetar antes de realizar una acción para mantener dicha condición. Nonami et al. (2014)

Como referencia se tiene la gráfica planteada por Nonami et al. (2014), en la cual muestra lo explicado anteriormente, ver Figura 2.11.

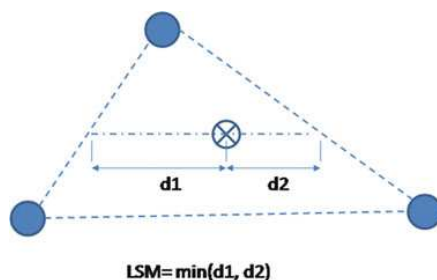


Figura 2.11: Polígono de estabilidad estática y márgenes de estabilidad longitudinales. Fuente: (Nonami et al., 2014, p.16)

En la cual, los puntos de contacto con la superficie están representados por los círculos azules, el centro de masa del robot está dado por el círculo marcado azul y las distancias $d1$ y $d2$, representan la holgura longitudinal de movimiento en un eje dado según la posición de las extremidades de soporte. Estas distancias representan qué tanto se puede mover o desplazar el centro de masa del robot sin perder la estabilidad estática. Por tanto, según se observa, se debe formar un polígono de apoyo triangular como mínimo para poder cumplir con el criterio de estabilidad mencionado.

Cumpliendo con este criterio, es posible entonces mantener una posición estable sin hacer correcciones continuas con los actuadores que conforman el robot, dejando a plena libertad las demás extremidades para realizar otras tareas u operaciones como buscar y desplazarse a los nuevos puntos de apoyo, para generar el nuevo polígono de soporte.

2.5.2 Estabilidad dinámica

Este tipo de estabilidad, depende completamente del movimiento continuo de los actuadores que conforman el robot para mantener una posición estable o fija, a groso modo un concepto de equilibrio. Es necesario poder medir o censar cada uno de los

aspectos físicos que describan las características del robot, como posiciones geométricas, respecto a la superficie de contacto, velocidades, inercias y algoritmos más complejos para mantener al robot en una posición estable. Usualmente se tiene en cuenta este concepto de estabilidad en robots que utilizan patrones de locomoción dependientes de una a dos extremidades o patrones de locomoción en los cuales el contacto de las extremidades o apéndices con el suelo no es constante (patrones de locomoción de movimientos rápidos como correr y saltar).

2.6 Cinemática

La cinemática de un robot, describe el posicionamiento, velocidad y aceleración de cada uno de los componentes que lo conforman respecto a un sistema de referencia definido, bien sea uno centrado en el robot u otro punto de vista u observación.

Para el caso de los robots caminantes o robots móviles, es de vital importancia conocer en todo momento las posiciones de su centro de masa, puntas de extremidades, posición de articulaciones y eslabones, respecto a diversos sistemas de referencias relativos. Para esto se utilizan un conjunto de diversas técnicas matemáticas que se encargan de realizar operaciones de transformación espaciales, a fin de tener la mayor cantidad de información para poder realizar y completar tareas con la mayor precisión posible.

2.6.1 Representación espacial

Una descripción o representación espacial, se refiere a como se define una o más partículas en un espacio determinado. En sistemas robóticos, se utiliza la representación espacial para poder especificar atributos de varios objetos a la vez, bien sean eslabones o articulaciones.

Dicha representación espacial se basa en sistemas de coordenadas espaciales bien definidos, cuya selección dependen de qué tipo de operaciones son necesarias para poder describir las características de las partículas en el espacio. Entre los más

comunes se tienen los sistemas de referencia: coordenadas cartesianas, coordenadas polares y coordenadas esféricas.

Para el desarrollo de este trabajo de grado, se utilizará el sistema de referencia cartesiano tridimensional en R^3 . En el cual los vectores \vec{i} , \vec{j} y \vec{k} representan los ejes de la base para definir dicho sistema. Ver Figura 2.12. En este sistema se suele utilizar una notación específica para representar vectores que unen la base del sistema con cualquier punto contenido en dicho espacio. Dichos vectores tienen la siguiente notación:

$$\overrightarrow{OA} = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Donde x_A , define la coordenada X del vector \overrightarrow{OA} , y_A , define la coordenada Y del vector \overrightarrow{OA} y z_A , define la coordenada Z del vector \overrightarrow{OA} .

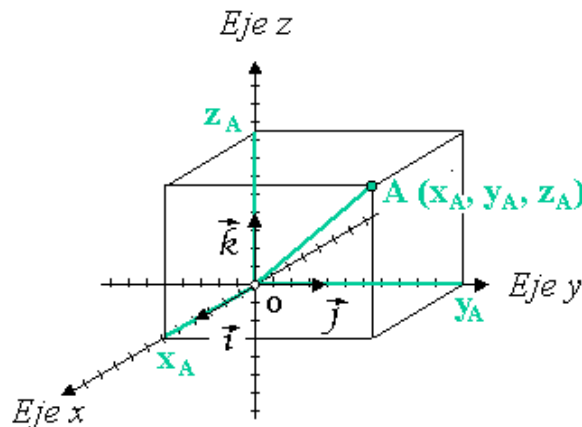


Figura 2.12: Sistema de representación de coordenadas cartesianas

Teniendo en cuenta dicha representación, se puede formar entonces un sistema de referencia en el nuevo punto A, el cual tendrá un desplazamiento de la magnitud del vector \overrightarrow{OA} y una orientación respecto a los ejes del sistema base centrado en O.

Para esto se procede a determinar un conjunto de operaciones básicas, como lo son la traslación y rotación en base a sistemas solidarios, de modo que es posible definir nuevos sistemas de referencias o cadenas de estos en base un sistema origen definido.

Mediante matrices de transformación, es posible realizar dichas operaciones. Se describen a continuación estas operaciones de transformación .

2.6.2 Matriz de traslación

La matriz de traslación, básicamente representa la operación de trasladar un punto en el espacio en base a un sistema de referencia o punto de origen, ver Figura 2.13. Mediante dicha matriz es posible obtener la representación de un punto P, con origen O_B , en base a un Origen distinto O_A . Esto se logra mediante una simple suma o resta de vectores según sea el sistema de referencia sobre el cual se desea obtener la ubicación del punto deseado.

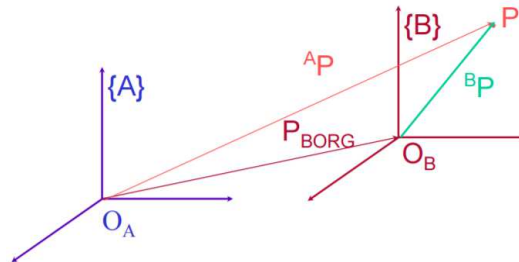


Figura 2.13: Sistema de referencia trasladado. Fuente: Khatib (2010)

Si se conocen las coordenadas del vector P_{BORG} que relaciona los orígenes de ambos sistemas de referencia, A y B, y se tiene la coordenada del punto P, respecto al sistema de referencia B, cuyo origen es O_B , el vector A_P se puede determinar mediante la siguiente ecuación (2.2):

$$\vec{A_P} = \begin{bmatrix} x_{P_{Borg}} + x_{BP} \\ y_{P_{Borg}} + y_{BP} \\ z_{P_{Borg}} + z_{BP} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

2.6.3 Matriz de rotación

Al igual que la matriz de traslación, las matrices de rotación permiten cambiar la orientación de un sistema B, respecto a un sistema A y viceversa. Dichas rotaciones se pueden realizar entorno a los ejes que definen el sistema de referencia. Cada una de estas rotaciones cambia la configuración del sistema objetivo respecto al original según un valor radial o ángulo entre los ejes pivotes, modificando así la ubicación en el espacio de cualquier elemento que esté contenido en el sistema rotado.

La matriz de rotación tiene la siguiente forma, ver ecuación (2.3)

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Donde r_{11} , r_{21} y r_{31} representan la rotación de eje X de B, respecto a los ejes X, Y y Z de A, y así los demás vectores columna respectivamente. Como se puede apreciar en la ecuación (2.4).

$${}^A \hat{X}_B = {}^A_B R \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; {}^A \hat{Y}_B = {}^A_B R \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; {}^A \hat{Z}_B = {}^A_B R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow {}^A_B R \begin{bmatrix} {}^A \hat{X}_B & {}^A \hat{Y}_B & {}^A \hat{Z}_B \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

En la Figura 2.14, se tiene una rotación del punto B, que puede representar el origen de algún sistema de referencia o simplemente un punto cualquiera en el espacio, respecto al origen del sistema de referencia A.

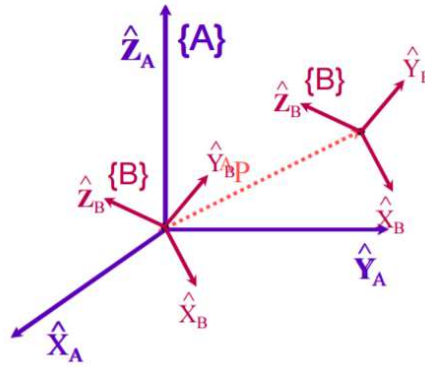


Figura 2.14: Operación de rotación con matrices, rotación de punto B respecto a punto A. Fuente: Khatib (2010)

Dado esto es posible entonces hacer rotaciones específicas según los tres ejes coordenados, de un punto cualquiera en el espacio mediante las siguientes expresiones. Sea el punto $p(u, v, w)$, las matrices de rotación en torno a cada uno de los ejes coordenados, están dadas por:

$$\begin{bmatrix} R(x, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} R(y, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} R(z, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Siendo las expresiones 2.5 la rotación de θ grados entorno al eje x , 2.6 la rotación de θ grados entorno al eje y , y por último 2.7 la rotación de θ grados entorno al eje z .

Se puede definir entonces un operador para realizar la transformación de rotación de un punto B, respecto a un punto A, como se muestra en la Figura 2.14 mediante la

siguiente ecuación (2.8):

$${}^A X_B = {}^A R * {}^B X_B \quad (2.8)$$

Donde la ecuación (2.8), representa la operación de rotar el punto B respecto al origen del sistema coordenado A . (Khatib, 2010).

2.6.4 Matriz de transformación homogénea

Una vez definidas las matrices de traslación y de rotación, teniendo claros sus efectos sobre la transformación que se logran con estas sobre un punto en el espacio en base a un sistema de referencia, se puede definir el concepto de matriz de transformación homogénea, que no es más que una combinación de las dos transformaciones anteriores a fin de poder trasladar y rotar un punto de manera simultánea. Como se muestra en la ecuación (2.9).

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A P_B & {}^A P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Como se puede observar dicha transformación no es más que la combinación de las dos operaciones descritas anteriormente. Dicha transformación se describe mediante la expresión (2.10).

$${}^A P = {}^A R {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (2.10)$$

Donde se puede apreciar como ambas operaciones son combinadas en la ecuación (2.11).

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A P_B & {}^A P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Donde queda como resultado la expresión (2.12):

$${}^A P_{4x1} = ({}^A T_{4x4})({}^B P_{4x1}) \quad (2.12)$$

En la cual ${}^A T$ representa la matriz de transformación homogénea, ${}^B P$ el punto a transformar con respecto al origen del sistema de referencia A .

Una representación alternativa de la matriz de transformación T es la descrita en la ecuación (2.13):

$$T = \begin{bmatrix} Rotacion & Posicion \\ Perspectiva & Escalado \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Gracias a esta matriz transformación es posible lograr obtener la posición de un punto cualquiera en el espacio, siempre que se conozca la ubicación del origen de su sistema de referencia asociado y la rotación de este respecto al punto anterior. Con esto en mente, se puede obtener la posición de cualquier punto a n sistemas de referencia de distancia, es decir, se puede obtener la posición de un efector final de un robot conociendo su base, las dimensiones de sus eslabones y los ángulos de rotación de estas si se conocen los orígenes de los sistemas de referencia solidarios a cada articulación. (Khatib, 2010).

2.6.5 Transformaciones homogéneas sucesivas

Las transformaciones homogéneas sucesivas permiten hacer uso de las transformaciones de rotación y traslación de forma conjunta, mediante la matriz de transformación homogénea, para poder encontrar la posición de una partícula cuya posición está descrita mediante una sucesión de transformaciones a través de varios sistemas de referencia que están asociados entre sí.

De esta forma, un robot con n grados de libertad, tendrá un sistema de referencia asociado a cada uno de ellos, descritos por una posición en el espacio y una rotación establecida con respecto al grado de libertad anterior. Con esta idea definida, las

transformaciones realizadas mediante la matriz homogénea permiten poder desplazarse por toda la cadena cinemática que describen los grados de libertad pertenecientes a las articulaciones que conforman una extremidad; logrando de esta forma poder relacionar la posición de la base del robot con algún objeto en su entorno mediante el uso de transformaciones sucesivas. Ver Figura 2.15.

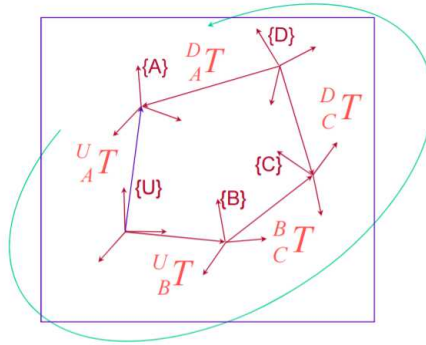


Figura 2.15: Transformaciones homogéneas sucesivas. Fuente: Khatib (2010)

Donde se puede hacer referencia a sistema coordenado U como la base del robot, cuya cadena cinemática hasta la punta efectora de la extremidad articulada está descrita por la siguiente secuencia: U-B-C-D-A, la matriz de transformación resultante está descrita por la expresión (2.14).

$${}^U_A T = {}^U_B T * {}^B_C T * {}^C_D T * {}^D_A T \quad (2.14)$$

Definiendo una nomenclatura clara, teniendo como indice 0 a la base y n el grado de libertad final, la transformación homogénea desde la base o sistema de referencia principal hasta la punta efectora de una articulación de n grados de libertad tiene la siguiente expresión general (2.15):

$${}^0_n T = {}^0_1 T * {}^1_2 T * {}^2_3 T * \dots * {}^{n-1}_n T \quad (2.15)$$

Para poder hacer las transformaciones en sentido base - punta efectora y viceversa, es necesario mantener un modelo o convención en la asignación de los sistemas de

referencia solidarios a cada eslabón en la cadena cinemática. (Khatib, 2010).

2.7 Denavit-Hartenberg

El algoritmo de Denavit-Hartenberg, es un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas S_i ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, pudiéndose determinar de modo siguiente las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa.

Según la representación Denavit Hartenberg (D-H), escogiendo adecuadamente los sistemas asociados a cada eslabón, será posible pasar de un eslabón al siguiente mediante cuatro transformaciones básicas que dependen exclusivamente de la configuración geométrica del eslabón. Dichas transformaciones consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones como las descritas en la sección anterior, que permiten relacionar el sistema de referencia del elemento i con el sistema de referencia del sistema $i-1$ (Barrientos et al., 1997, p.96), como se puede ver en la Figura 2.16.

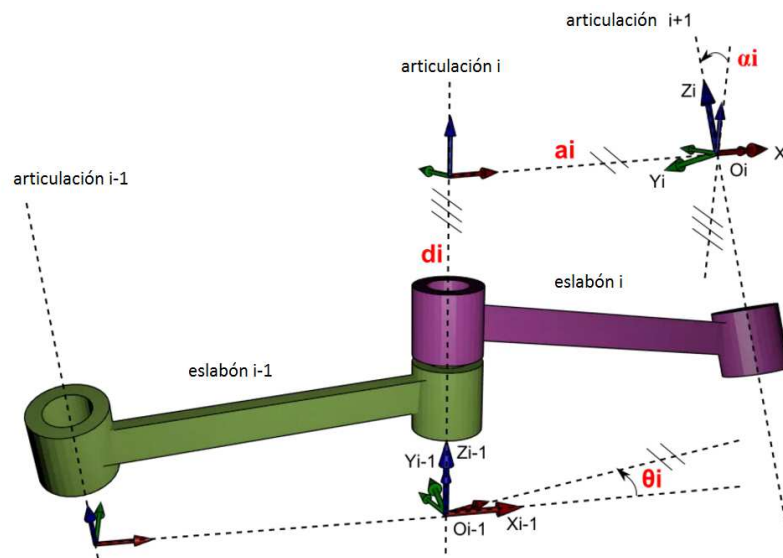


Figura 2.16: Diagrama de parámetros D-H. Fuente: Khatib (2010)

Las transformaciones básicas a realizar son las siguientes:

1. Rotación alrededor del eje z_{i-1} un ángulo θ_i .
2. Traslación a lo largo del eje z_{i-1} , una distancia d_i ; vector $d_i(0, 0, d_i)$.
3. Traslación a lo largo del eje x_i una distancia a_i ; vector $a_i(0, 0, a_i)$.
4. Rotación alrededor del eje x_i , un ángulo α_i .

Obteniendo de manera siguiente la ecuación general para obtener la matriz de transformación:

$${}^{i-1}A_i = T(z, \theta) * T(0, 0, d_i) * T(a_1, 0, 0) * T(x, \alpha_i) \quad (2.16)$$

Obteniendo como producto final la matriz de transformación homogénea del eslabón $i - 1$ a el i , de la ecuación (2.17):

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) * \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) * \sin(\theta_i) & a_i * \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) * \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) * \cos(\theta_i) & a_i * \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Para determinar de manera concisa los parámetros de cada eslabón, se debe seguir el siguiente algoritmo descrito por Denavit-Hartenberg (Barrientos et al., 1997, p.97):

1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numera como eslabón 0 a la base fija del robot.
2. Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad y acabando en n).
3. Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
4. Para i de 0 a $n - 1$, situar el eje Z_i , sobre el eje de la articulación $i + 1$.

5. Situar el origen del sistema de la base (S_0) en cualquier punto del eje Z_0 . Los ejes X_0 e Y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con Z_0 .
6. Para i de 1 a $n - 1$, situar el sistema (S_i) (solidario al eslabón i) en la intersección del eje Z_i con la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría (S_i) en el punto de corte. Si fuesen paralelos (S_i) se situaría en la articulación $i + 1$.
7. Situar X_i en la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i .
8. Situar Y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con X_i y Z_i .
9. Situar el sistema (S_n) en el extremo del robot de modo que Z_n coincida con la dirección de Z_{n-1} y X_n sea normal a Z_{n-1} y Z_n .
10. Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a Z_{i-1} para que X_{i-1} y X_i queden paralelos.
11. Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de Z_{i-1} , que habría que desplazar (S_{i-1}) para que X_i y X_{i-1} quedasen alineados.
12. Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de X_i (que ahora coincidiría con X_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo (S_{i-1}) para que su origen coincidiese con (S_i).
13. Obtener α_i como el ángulo que habría que girar en torno a X_i (que ahora coincidiría con X_{i-1}), para que el nuevo (S_{i-1}) coincidiese totalmente con (S_i).
14. Obtener las matrices de transformación $i - 1_i^A$.
15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot $T = 0_i^A, 1_2^A \dots n - 1_n^A$.
16. La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

Una vez completados estos pasos es posible entonces tener cada uno de los eslabones de la cadena cinemática del robot bien referenciados con respecto al anterior, procediendo a desarrollar la Tabla de parámetros D-H, que denota los parámetros respectivos de cada eslabón, se tiene la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Tabla de parámetros D-H

Articulación	θ_i	d_i	α_{i-1}	a_{i-1}
1	θ_1	d_1	α_0	a_0
n	θ_n	d_n	α_{n-1}	a_{n-1}

2.7.1 Cinemática directa

Una vez desarrollado todos los términos previos, se puede definir entonces la cinemática directa, en contexto, como la operación en la cual teniendo las coordenadas articulares de cada una de las articulaciones que componen un brazo o extremidad de un robot, se puede obtener la posición del efector final o de cualquiera de sus eslabones respecto a un sistema de referencia definido.

Con el conjunto de reglas definidos por Denavit-Hartenberg, para poder obtener los parámetros de la Tabla 2.1, se puede entonces construir las matrices de transformación pertenecientes a cada uno de los eslabones que conforman la extremidad de interés. Utilizando la nomenclatura de la sección anterior, se tiene entonces que la matriz de transformación homogénea 0A_1 representa la relación que existe entre el primer eslabón de la cadena cinemática y su base, a través de conjunto de transformaciones descritas en la expresión (2.16). Con dicha transformación se tienen las coordenadas del final del eslabón 1, respecto a su base 0. De esta manera se puede seguir desarrollando la búsqueda de posiciones mientras más eslabones tenga la extremidad en cuestión, quedando así resuelto el problema cinemático directo. (Khatib, 2010). Ver Figura 2.17.

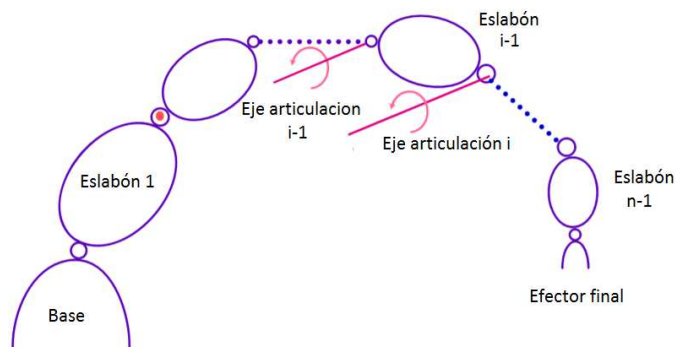


Figura 2.17: Diagrama de extremidad con eslabones y articulaciones señalizados.

Fuente: Khatib (2010)

2.7.2 Cinemática inversa

Una vez resuelto el problema cinemático directo, surge la incógnita de lograr conocer cuáles son los valores que deberían adquirir cada una de las articulaciones (sus respectivos grados de libertad) para poder alcanzar una posición específica en el espacio. Fuera de la validación de si el punto es alcanzable o no por la extremidad a su máxima elongación, el problema cinemático inverso no suele ser trivial, mientras más grados de libertad contenga la extremidad mayor dificultad se enfrentará para poder completar esta tarea.

Existen un conjunto de técnicas para solucionar este problema, entre las más comunes están las que emplean las mismas matrices de transformación para la resolución del problema cinemático directo, invirtiendo el sentido de la transformación e intentando despejar los valores de cada uno de los ángulos de las articulaciones en base al punto conocido en el espacio; otra de las vertientes es aplicar la resolución geométrica, conocida la estructura del robot y sus características dimensionales, se plantean las ecuaciones posibles para lograr encontrar los valores de cada una de las articulaciones. En ambos casos, la configuración del robot puede ser de ayuda o aumentar la complejidad de la operación.

Cinemática inversa, solución mediante matrices de transformación homogénea

Dado que se conoce la cinemática directa, de entrada a la hora de analizar el posicionamiento de la extremidad de un robot, matemáticamente sería posible lograr encontrar el valor de cada una de las articulaciones mediante la transformación inversa de las matrices homogéneas. Sin embargo, en la practica esta técnica no suele ser tan trivial, siendo en muchas ocasiones tan compleja que llega desecharse debido a las dependencias que se forman entre el número de ecuaciones posibles y el número de incógnitas a calcular. De igual forma, a la hora de la implementación del cálculo cinemático inverso, puede ser muy costoso computacionalmente procesar todo el conjunto de operaciones trigonométricas requeridas para este método, por ello si el robot posee tres o más grados de libertad se suelen utilizar técnicas como el desacople cinemático para poder reducir el número de cálculos y ecuaciones necesarias.

Cinemática inversa, solución geométrica

Este método es el utilizado cuando existen pocos grados de libertad, tres o menos, en el caso más complicado cuatro, debido a las singularidades geométricas que se pueden presentar. Se basa en encontrar el mayor número de relaciones geométricas, en las cuales se pueda referenciar el valor de las articulaciones en base a las coordenadas alcanzadas por el efector final en el espacio. Según sea la configuración de la extremidad dicho problema puede presentar un reto exhaustivo. Usualmente se intenta estudiar las relaciones geométricas de las articulaciones que tengan su rango de acción predominante en el mismo plano de manera conjunta, de tal forma que mediante operaciones sencillas se puedan hallar las siguientes por simple sustitución. Este método es recomendado para extremidades con tres extremidades o menos. (Khatib, 2010).

2.8 Hexápodos en la naturaleza

Los hexápodos son una categorización de artrópodos, la cual agrupa el mayor número de especies incluyendo en sus subcategorías a los insectos. La palabra hexápodo deriva del griego *hexa* y *poda*, que significa seis patas. Su cuerpo esta básicamente dividido

en tres tagmas o subsecciones que contienen todos los órganos de invertebrado, cabeza, tórax y abdomen, ver Figura 2.18.

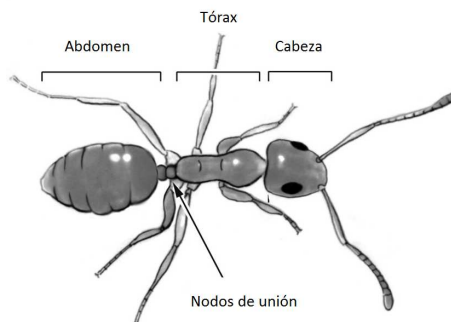


Figura 2.18: Segmentos del cuerpo de una hormiga, esquema. Fuente: (Merchant, 2013)

En el tórax, se ubican los tres pares de extremidades o apéndices locomotores que le dan su respectivo nombre. Entre los hexápodos más comunes se encuentran los siguientes: hormigas, abejas, grillos, saltamontes, insectos palo, cucarachas, escarabajos, entre otros.

Cada uno de estos con extremidades finamente especializadas para completar tareas específicas, tales como: excavación, desplazamiento sobre superficies irregulares, sujeción de presas, acicalamiento, recolección de alimentos, ejecución de saltos, carga de peso y demás funciones particulares. Dichas extremidades comparten un diseño general, que en algunas especies y ramas de insectos varía debido a la especialización evolutiva. Como ejemplo en la Figura 2.19, se puede observar la morfología básica de las extremidades de un hexápodo descrita por Gillott (2005). Se pueden notar de manera simple las secciones importantes que la conforman como lo son: la cadera, el trocánter, el fémur, la tibia y por último el tarso.

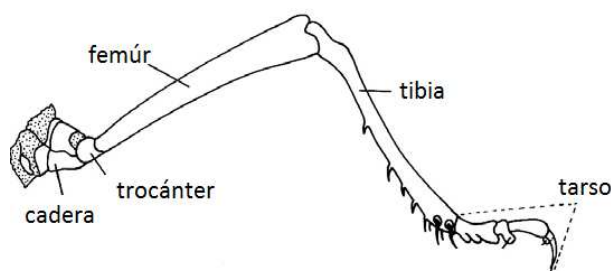


Figura 2.19: Extremidad posterior de saltamonte moderno. Fuente: (Gillott, 2005, p.76)

Cada una de estas secciones representan un eslabón para la conformación total de las extremidades básicas presentes en la mayoría de los hexápodos de la naturaleza. Pero el aspecto más importante es la estructura muscular que se encarga de mover dichos eslabones, a modo de actuadores hidráulicos, los grupos de músculos que conforman el mecanismo de movimiento de cada una de estas articulaciones juega un rol importante a la hora de poder efectuar desde el movimiento más complejo al más simple. Uno de los padres de la entomología Snodgrass et al. (1935), hace referencia a la ubicación y nomenclatura para cada uno de estos grupos musculares descritos en la Figura 2.19. En esta Figura, se puede observar como cada eslabón o sección de la extremidad es movida por un par de músculos, uno elevador y otro depresor, haciendo cierta analogía con las articulaciones de un grado de libertad.

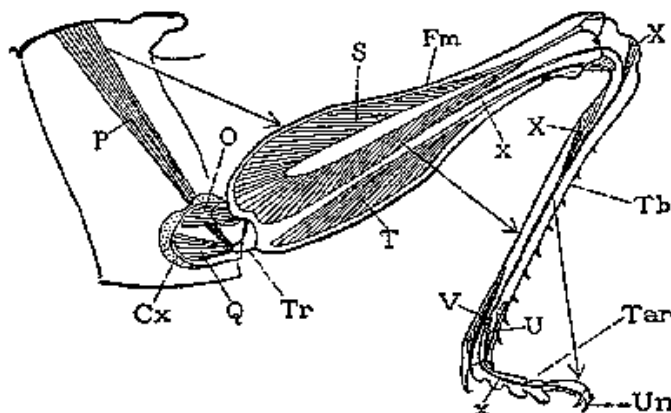


Figura 2.20: Extremidad media saltamontes moderno, esquema de musculatura. O, musculo elevador del trocánter y fémur; P,Q, musculo depresor del trocánter y fémur; S,T, Elevador y depresor de tibia; U,V, Elevador y depresor del tarso; P, depresor del pre tarso. Cx, cadera; Tr, trocánter; Fm, fémur; Tb, tibia; Tar, tarso. Fuente: (Snodgrass et al., 1935, p.174)

2.8.1 Patrones de locomoción naturales de los hexápodos

Los hexápodos a lo largo de la evolución han logrado desarrollar diversos patrones de locomoción especializados aprovechando la plasticidad de movimiento de sus extremidades. Desde caminar a velocidades muy lentas para asechar presas, patrones de locomoción desplazamiento en superficies planas e irregulares, balanceo de peso e incluso patrones complejos reactivos para movimientos rápidos. Entre estos distintos modos de locomoción, la evolución se encargó de desarrollar un método infalible de movimiento que es utilizado por casi todas las especies, el gateo trípode. Dado a que se presenta en casi todos los hexápodos es una muestra de selección por diversos factores como lo son: la eficiencia en el consumo de energía, la estabilidad al desplazarse y el rendimiento respecto al desplazamiento por ciclo.

Como enuncia Gullan y Cranston (2014), en su publicación sobre la entomología de los insectos, la locomoción de seis extremidades permite en general desplazamientos a velocidades moderadas, permitiendo un contacto continuo con la superficie con al

menos tres extremidades (dos grupos: 1-delantera izquierda, trasera izquierda, derecha media; 2-delantera derecha, trasera derecha, media izquierda), mientras las otras tres consiguen los nuevos puntos de apoyo para generar el movimiento. (Gullan y Cranston, 2014, p.60)Dicho movimiento de locomoción se puede apreciar en la Figura 2.21:

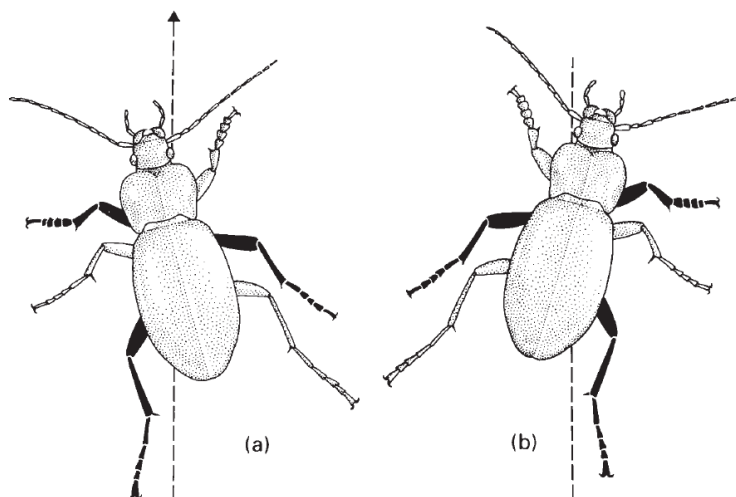


Figura 2.21: Gateo trípole de escarabajo de tierra. (a) grupo trípole de extremidades uno (1), (b) grupo trípole de extremidades dos (2) Fuente: (Gullan y Cranston, 2014, p.61).

2.9 Servomotores

El servomotor, el primer candidato para actuador robótico, es un dispositivo electrónico que posee un eje controlado. Este puede llevarse a una posición específica y mantenerse dependiendo de la señal de control que se le ingrese en torno a un rango de operación.

El servomotor consta de un conversor de ancho de pulso a voltaje, un amplificador de error, una resistencia variable (potenciómetro) que está conectada al eje principal del motor, engranajes y un motor de corriente directa DC.

El tamaño de los servomotores dependiendo de su aplicación al igual que, el torque,

la velocidad y el peso varían, permitiéndoles adaptarse a casi cualquier tipo de trabajo, son comúnmente usados en proyectos de robótica debido a su facilidad de control en la posición angular del eje de salida.

2.9.1 Funcionamiento

Para la ubicación del servomotor en un punto deseado, éste utiliza un sistema de control interno que mediante una señal externa obtendrá el punto de referencia requerido. La señal con la cual se realiza el control de posición es de tipo cuadrada con un periodo fijo. La variación del ancho de pulso de esta señal será la encargada de modificar el ángulo de posición, a medida que se incremente su ancho de pulso ubicará el motor en un ángulo mayor. Un potenciómetro conectado por un costado directamente al eje principal del servo y por el otro al amplificador de error, permite supervisar el ángulo o estado actual del servomotor, ya que al rotar el servomotor el potenciómetro también lo hará y esto indicará un valor en voltaje en una de las entradas del amplificador.

Los componentes del servomotor se describen en la Figura 2.22.

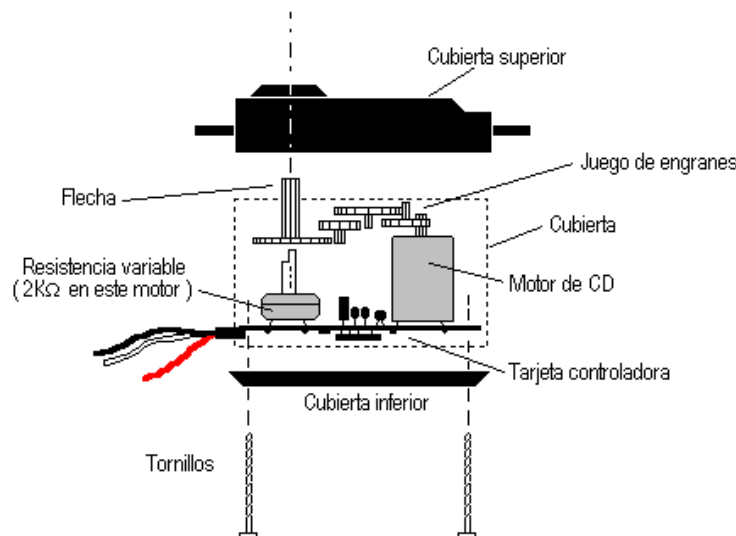


Figura 2.22: Esquema básico de los componentes de un servomotor. Fuente: (Escuela Politécnica Superior de Albacete, 2010)

2.10 Materiales comúnmente utilizados para la construcción de robots hexápodos

Según (Martínez y Fernández, 2003, p.5), los materiales más comunes a utilizar a la hora de construir plataformas robóticas a mediana y pequeña escala son: aluminio, metraquilato, fibra de carbono, acrílico, madera, PVC (policloruro de vinilo), acero y cobre. Una combinación de estos en lugares específicos de la estructura brinda mayor rigidez y soporte. Siendo la madera (de baja densidad), el aluminio y el acrílico los tres más usados por su relación entre peso y resistencia.

2.11 Torque

El concepto de torque es uno de los más importantes a tener en claro a la hora del diseño de un robot y sus extremidades, debido a que los actuadores a seleccionar para poder representar cada uno de los grados de libertad que conforman la estructura, funcionan en base a un par de torque máximo posible a entregar. Las extremidades formadas mediante eslabones y articulaciones hacen las veces de palancas con ejes fijos en los cuales dicho concepto de torque se utiliza para calcular si es posible o no realizar movimientos de la extremidad, considerando el peso y fuerzas que se interpongan al movimiento.

Definición formal

En la mecánica newtoniana, se denomina momento de una fuerza (respecto a un punto dado) a una magnitud vectorial, obtenida como el producto vectorial del vector posición del punto de aplicación de la fuerza (con respecto al punto al cual se toma el momento) por el vector fuerza, en este orden. (Hibbeler, 2004, p.107)

Se puede definir entonces la ecuación (2.18) torque como:

$$M = r * F \quad (2.18)$$

El vector M se conoce como el momento del par; se trata de un vector perpendicular al plano que contiene las dos fuerzas y su magnitud está dada por ecuación (2.19):

$$M = r * F * \sin(\theta) \quad (2.19)$$

Donde r representa la distancia o proyección de la misma sobre el plano de estudio o interés (en el cual actúa la fuerza), F representa la fuerza en cuestión, θ el ángulo que forma el vector posición respecto al eje o referencia. Ver Figura 2.23.

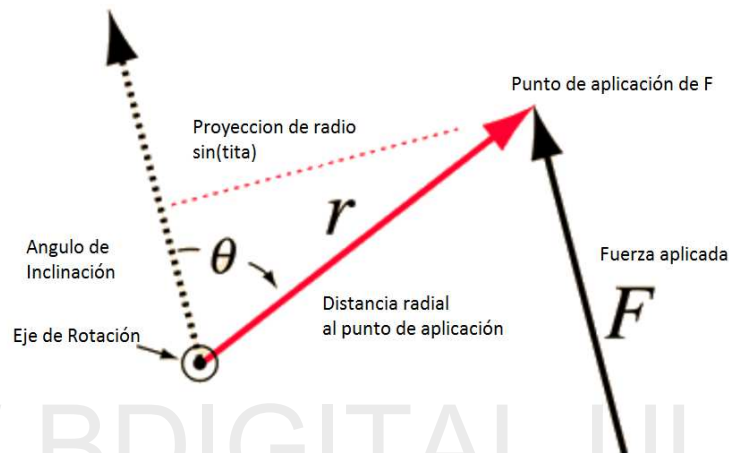


Figura 2.23: Torque o momento de fuerza aplicada. Fuente: Propia

Una extremidad con más de una articulación puede modelarse, en el plano estático como una sumatoria de momentos respecto a un punto, a fin de obtener el par necesario o ejercido por la diversas fuerzas que actúen sobre el eje de la extremidad. (Hibbeler, 2004, p.81).

2.12 Modelado de sistemas mediante ecuaciones de Euler-Lagrange

Las ecuaciones de Lagrange o Euler Lagrange, permiten contar con un sistema analítico para poder desarrollar un conjunto de ecuaciones que modelen el comportamiento de una partícula. Dicho enfoque se basa en las características del trabajo y energía propios del sistema.

- **Trabajo:** El trabajo realizado en un sistema es el producto de la fuerza por la distancia recorrida relativa Patete (2015). Ecuación de trabajo para sistemas traslacionales (2.27). Ecuación de trabajo para sistemas rotacionales (2.21).

$$\text{Trabajo} = W_t = F \times d \quad (2.20)$$

$$\text{Trabajo} = W_t = \tau \times \theta \quad (2.21)$$

- **Energía:** La energía se define como la capacidad para hacer trabajo. Se dice que un sistema tiene energía cuando puede trabajar. Patete (2015).
 - **Energía cinética T:** Corresponde al trabajo o las transformaciones que un cuerpo puede producir debido a su movimiento (ver ecuación (2.22), es decir, todos los cuerpos en movimiento tienen energía cinética. En reposo la energía cinética es cero.

$$T = W = \int F dr = \frac{1}{2}mv(t)^2 \quad (2.22)$$

ejemplo:

$$T = \frac{1}{2}mv(t)^2 \quad (2.23)$$

donde m =masa

$v(t)$ =velocidad

- **Energía potencial V:** Se almacena en los cuerpos en reposo capaces de moverse o luego de que liberan la energía cinética, ver ecuación (2.24).

$$U = W = \int F \times dr \quad (2.24)$$

ejemplo:

$$U = mgh(t) \quad (2.25)$$

donde: g = gravedad

m = masa

$h(t)$ = altura

Lagrangiano

Se define el Lagrangiano como:

$$L = T - V \quad (2.26)$$

Donde T es la energía cinética total del sistema y V es la energía potencial total del sistema.

Ecuación del sistema

Para obtener la ecuación que modela el comportamiento del sistema se procede a resolver la expresión (2.27), (Vandier, 2011, p.9):

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{p}_i(t)} \right] - \frac{\partial L}{\partial p_i(t)} + \frac{\partial D}{\partial \dot{p}_i(t)} = Q_i \quad (2.27)$$

donde:

- **Energía cinética total del sistema T :** suma de las energías cinéticas de las partículas.
- **Energía potencial total del sistema V :** suma de las energías potenciales de las partículas.
- **Coordenada generalizada $p(t)$:** representativo a cada grado de libertad del sistema, el cual se expresa mediante una coordenada generalizada.
- **Velocidad generalizada $\dot{p}(t)$:** derivada temporal de las coordenadas generalizadas.
- **Energía disipativa total del sistema D :** termino disipativo de energía en base a cada coordenada generalizada del sistema.
- **Fuerzas fuente del sistema Q_i :** sumatoria de fuerzas fuente del sistema.

Capítulo 3

Diseño de Prototipo

Introducción

En el presente capítulo se presenta el desarrollo del diseño de un robot hexápodo terrestre no volador, cuya estructura está basada en las características y conceptos citados previamente. En este capítulo se propone un diseño en el cual se logre una amplia funcionalidad para generar patrones de locomoción básicos en superficies planas, tratando de no exceder el número de actuadores por extremidad sin sacrificar la movilidad y versatilidad de las mismas; a fin de obtener un diseño y dimensiones que dé como referencia para la construcción del prototipo: el peso de los componentes diseñados, los materiales sugeridos para su implementación, los actuadores requeridos para completar especificaciones de diseño, la carga útil de transporte capaz de soportar el robot, entre otros.

En primer lugar, se define el diseño de la base del robot, elemento en el cual van acopladas cada una de las extremidades, dispositivos de control, baterías y demás elementos como circuitos integrados, necesarios para el funcionamiento del robot. En este diseño se toman en cuenta características como la forma de la base, posición de los anclajes de las extremidades y características de movimiento de la base acoplada con las extremidades.

Seguidamente se procede a definir el diseño de las extremidades, basándose en diversos aspectos como lo son: la morfología y usos de extremidades de hexápodos contruidos previamente, investigaciones sobre morfología de insectos e invertebrados presentes en la naturaleza, beneficios de movilidad tales como la omnidireccionalidad, tipos de actuadores a utilizar para definir las articulaciones; a fin de lograr obtener extremidades versátiles que puedan ser utilizadas tanto para realizar desplazamientos sobre la superficie de contacto, como para ser usadas como herramientas.

3.1 Dimensiones del robot

La selección de las dimensiones del robot, dependerán del conjunto de tareas que se deseen completar con este, tomando en cuenta la capacidad y características de los actuadores requeridos por el diseño propuesto, que en parte definirán las medidas de los eslabones y su peso, afectando de manera directa las características de la estructura en general. De igual forma, las dimensiones del robot pueden verse afectadas en base a la carga útil que este necesitará transportar, dado que el requerimiento de versatilidad y función multipropósito del prototipo podría implicar el acople de algún sensor o herramienta para completar una tarea específica, aparte de lograr desplazarse por la superficie mediante la ejecución de algún método de locomoción.

A fin de poder hacer uso de actuadores sencillos como servomotores comerciales de gama media o baja, las dimensiones y pesos se considerarán en torno al torque y rango de movimiento requeridos por el diseño morfológico del robot, como los utilizados por el *MorpHex* en la Figura 1.18 y el *Phoenix* de la Figura 1.19 que son accesibles y prestan un buen rendimiento torque/velocidad, modelo *HS-645MG* fabricados por la empresa *Hitec*.

Las dimensiones de la base serán seleccionadas en base a los dispositivos que son necesarios transportar, para poder poner en funcionamiento un robot de este tipo, como lo son las tarjetas programables, los controladores de servomotores, los

circuitos integrados para la comunicación, los circuitos de regulación de la fuente de alimentación y el elemento necesario para brindarle cierto grado de independencia al robot, como las baterías. Las dimensiones de las extremidades serán determinadas en base a los actuadores seleccionados, a modo de no exceder el torque necesario por la selección de una longitud exagerada.

Para tener una idea general de la escala de diseño de este prototipo, se pueden observar las siguientes medidas (Tabla 3.1) y pesos (Tabla 3.2) a modo de referencia del hexápodo comercial *Phoenix* fabricado por la empresa *Lynxmotion*:

Tabla 3.1: Medidas de referencia de robot hexapodo *Phoenix*. Fuente: Robot Shop (2016)

	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)
Hexápodo completo	36	43	13,3
Base del hexápodo	19	14,9	5

Peso del hexapodo:

Tabla 3.2: Peso de referencia de robot hexapodo *Phoenix*. Fuente: Robot Shop (2016)

	Peso (Kg)
Con componentes electrónicos	1,815
Sin componentes electrónicos	0,5

3.2 Base del robot

La base del robot o estructura central, es el elemento principal a diseñar. En concepto de forma y dimensiones, se pretende tomar en cuenta aquellos que garanticen el movimiento de las extremidades en el mayor rango posible, dando así la posibilidad de introducir la capacidad de plasticidad de movimiento a las extremidades, haciéndolas directamente más versátiles. Dado que las extremidades o bases de las mismas van acopladas a la base del robot, el futuro posicionamiento de estas será uno de los

factores que determinará qué tan posible es mantener el concepto de movimiento omnidireccional de la estructura. De igual forma, la distribución de las extremidades alrededor de la base estará ligado a los grados de libertad o movimiento que se puedan lograr en la misma, todo esto tomando en cuenta que se debe dejar un espacio respectivo para la colocación y posicionamiento de los demás dispositivos necesarios para la construcción del robot.

3.2.1 Forma de la base y ubicación de anclaje de las extremidades

A la hora de definir el concepto de multipropósito y capacidad de movimientos omnidireccionales para un robot andante, como objetivo principal se quiere lograr referenciar la habilidad de este para poder moverse en cualquier dirección sin tener que orientar su eje de referencia hacia el punto deseado, por tanto es razón necesaria hacer una elección de la forma correcta de la base para la estructura que beneficie esta capacidad, intentando lograr una distribución equitativa de los apéndices alrededor del eje central o punto central de la estructura, de tal forma que todas las extremidades consigan tener un alcance o rango de movimiento en igual proporción a las demás.

Partiendo de la clasificación realizada para los robots de tipo hexápodos de Tedeschi y Carbone (2014), en la cual da lugar a tres posibles conceptos para la estructura de la base, siendo estos los más comunes como se aprecia en la Figura 2.8, se observa que en el modelo 2.8a, está mucho más enfocado a robots con propósitos cuyo desplazamiento esta beneficiado con movimientos hacia delante o hacia atrás de la base de su estructura, en cambio las bases con distribuciones como las Figuras 2.8b y 2.8c están más orientadas a un desplazamiento equitativo en cualquiera de las direcciones con respecto a su centro.

Teniendo el concepto de una base con simetría radial como idea principal, se puede hacer referencia a la distribución y ubicación de las bases de los actuadores utilizadas para la Plataforma *Stewart* de la Figura 1.3, en la que (Stewart D., 1965) diseñan

su prototipo de base funcional hexápoda, en la cual los seis arreglos de actuadores agrupados en pares, cada uno de ellos ubicados en una arista de la base triangular, logran brindar movimiento en los seis ejes (tres rotacionales y tres traslacionales), dándole la capacidad de movimiento omnidireccional a la base a pesar de ésta estar fija.

Como se muestra en la analogía de la Figura 1.8, si se ubicara una extremidad en cada una de las aristas de los triángulos formados por los vértices (1), (3) y (5) ó (2), (4) y (6), siempre que estos lograran desplazar la base en al menos dos ejes, teniendo a la vez tres extremidades o bases de actuadores haciendo contacto con la superficie, la base de dicho triángulo o polígono podría tener la capacidad de desplazarse omnidireccionalmente.

Con el concepto desarrollado por Cauchy enunciado en la investigación de Bricard, R. (2010), donde formula que un octaedro puede alcanzar con alguna de sus caras triangulares cualquier punto en el espacio mediante la elongación de los segmentos de recta que unen sus vértices (ver Figura 1.1), se puede realizar la siguiente analogía: si se tiene una base triangular equilátera, la cual hace contacto con la superficie mediante tres extremidades a modo de los segmentos de recta anteriormente mencionados, será posible entonces desplazar dicha base a un deseado punto en el espacio mediante la elongación de estas extremidades.

Por último tomando como referencia la plataforma hexápoda diseñada por Gough (ParallelMIC, 2003) de la Figura 1.2, se puede tener una idea más de dónde ubicar las bases de las extremidades en la estructura. Con estos tres conceptos claros se tiene la siguiente analogía para estas tres bases y sus respectivas configuraciones y principios. (Ver Figura 3.1).

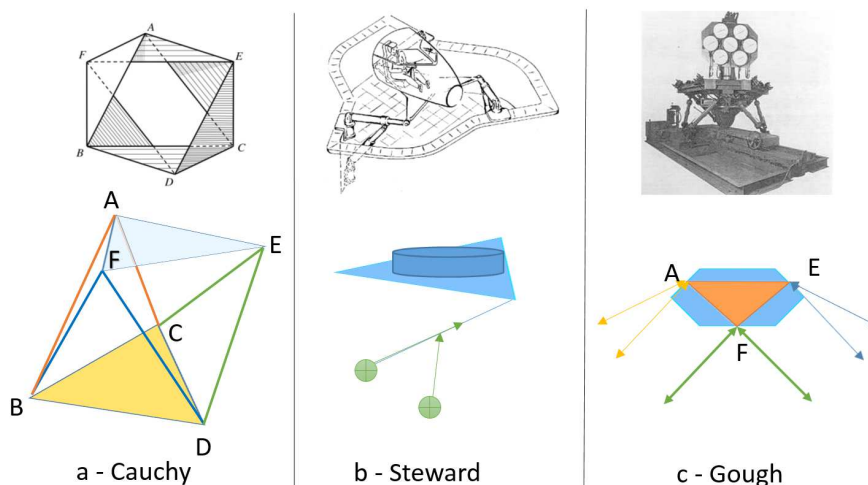


Figura 3.1: Analogía entre bases de plataforma de: (a) Octaedro de Cauchy, (b) Plataforma Stewart, (c) Plataforma Gough. Fuente: Propia

Con esto en consideración, se propone el uso de una plataforma hexagonal, a modo de combinar el posicionamiento de los accionadores prismáticos de Gough (3.1c) y la proposición de movilidad del octaedro de Cauchy (3.1a), con la ubicación de la base de los actuadores en las aristas de la base triangular equilátera de la Plataforma Stewart (3.1b). De este modo, se obtiene la siguiente propuesta de modelo para la base y posición de las bases para las extremidades, ver Figura 3.2.

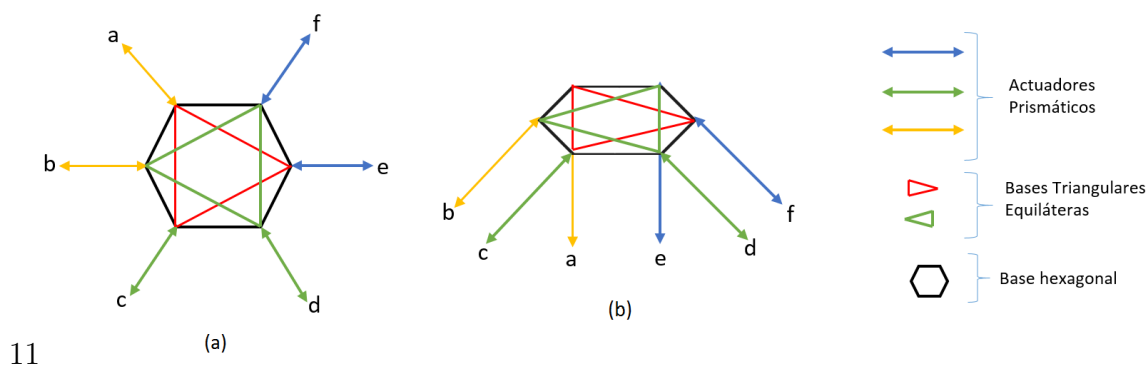


Figura 3.2: Analogía entre bases de plataforma de: (a) Base hexagonal propuesta (*Vista superior*), (b) Plataforma con base hexagonal (*Vista perspectiva*). Fuente: Propia

En la Figura 3.2, se puede observar que la forma seleccionada es un hexágono cuyos

lados son iguales, manteniendo la idea principal propuesta por Tedeschi y Carbone (2014) (ver Figura 2.8(a)), donde se tiene presente el concepto de simetría radial. En la forma para la base propuesta se puede apreciar que los accionadores prismáticos o actuadores anclados a esta no están ubicados en la misma posición que en la base triangular de Gough (ver Figura 3.1(c)), sino que se ubica un accionador en cada arista de la base hexagonal, de modo que se pueden formar dos bases triangulares cada una con su trío de accionadores propios, como lo son el triángulo equilátero rojo con los accionadores a-c-e y el triángulo equilátero verde b-d-f. Entonces, para lograr la movilidad de la plataforma según los conceptos mencionados en las referencias, se requiere que cada uno de estos accionadores o extremidades tenga movilidad en al menos dos grados de libertad no paralelos, de tal forma que con uno de estos se pueda girar la base y el otro permita hacer la elevación o el descenso del punto en el cual se acopla a la base, dando ya un indicio de la morfología que se debe tener en cuenta al momento de diseñar las extremidades.

Con la forma ya seleccionada se puede entonces tener una primera noción de que la base presentará las características de omnidireccionalidad, es decir, se podrán efectuar movimientos en cualquiera de los seis grados de libertad, siempre que las extremidades tengan las características y configuraciones descritas por los trabajos previamente citados.

Tomando como referencia el plano cartesiano en R^3 y aislando solo uno de los triángulos contenidos en el hexágono, con sus respectivas extremidades compuestas de al menos dos grados de libertad, se pueden generar las siguientes gráficas para poder apreciar la noción de movimiento en los tres ejes traslacionales y rotacionales al presentarse la elongación de alguna de las extremidades mientras estas están en contacto con la superficie, ver Figura 3.3.

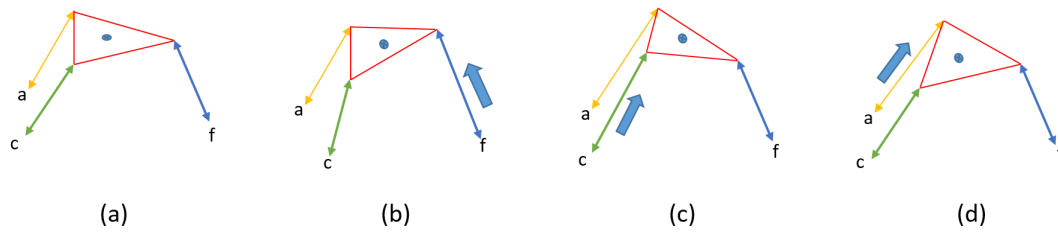


Figura 3.3: Posibles movimientos de la base triangular $a - c - e$ de la Figura 3.2, según elongación de las extremidades por separado. (a) Base triangular sin movimiento de extremidades, (b) Extremidad f elongada, (c) Extremidad c elongada, (d) Extremidad a elongada. Fuente: Propia

En la Figura 3.3, se puede observar que un simple movimiento o elongación en alguna de la extremidades o actuadores, implica directamente cierto giro o desplazamiento en la base de la estructura, que por mínimo que sea representa un desplazamiento considerable. De este modo, movimientos más complejos o de múltiples extremidades de manera simultanea, pueden lograr desplazar de manera más notable la base de la estructura.

3.3 Extremidades del robot

El diseño de las extremidades del robot debe cumplir con un conjunto de criterios de movilidad sin excederse en el número de actuadores para lograr un grado aceptable de plasticidad en la locomoción y versatilidad individual en cada una de ellas, de tal forma que se logre alcanzar una noción en la que estas se cataloguen como extremidades multipropósito, pudiéndose utilizar tanto para el desplazamiento de la estructura, como para el uso de estas de manera aislada o conjunta a la hora de realizar actividades en sus respectivas áreas de trabajo a modo de herramientas.

3.3.1 Robots hexápodos referenciales

Tomando como referencia las extremidades de los hexápodos mencionados anteriormente, según la Tabla 1.1. Se puede observar que la primera característica

relevante es referente al número de grados de libertad por extremidad, basándose en robots no muy especializados, existe una tendencia de tener entre doce (12) y dieciocho (18) grados de libertad en total, es decir, entre dos y tres grados de libertad por extremidad. De igual forma, los hexápodos comerciales, referenciados en este trabajo, diseñados con fines de entretenimiento como el *PhantomAX* (TrossenRobotics, 2015) y el *Phoenix* (Lynxmotion, 2015), presentan un número similar de grados de libertad por extremidad, variando su posición respecto al eslabón anterior según el diseño propio de cada fabricante.

La mayoría de estos hexápodos sin importar el fin o función a cumplir al momento de ser implementados, son diseñados de tal forma que puedan llevar al menos una carga útil considerable, necesaria para incorporar sensores u otro tipo de equipamiento como fuentes de energía con más capacidad, factor determinante a tomar en cuenta a la hora de realizar el diseño de las extremidades para el prototipo.

Detallando los diseños y especificaciones brindadas por algunos fabricantes, es posible tener una idea inicial del tipo de actuadores a utilizar según las dimensiones del robot. De igual forma, en los trabajos publicados referenciados en este trabajo de grado, se pueden apreciar diversos factores importantes a tomar en cuenta al momento de diseñar las extremidades del prototipo, como: la función de las extremidades y la movilidad de las mismas.

3.3.2 Bio - inspiración

La naturaleza puede brindar una base mucho más sustentada respecto al diseño de las extremidades de un robot, debido a que sus diseños poseen mayor cantidad de tiempo en funcionamiento, tanto como en el reino animal de los insectos o hexápodos, los cuales con su abrumadora cantidad de especies, demuestran que la locomoción en seis extremidades puede ser una de las más eficientes, más diversa y más funcionales de la naturaleza.

Teniendo esto como base, se procede a observar la morfología de las extremidades

en diversas especies de hexápodos, entre ellos: grillos, saltamontes, abejas, hormigas de fuego, cucarachas, insectos palos, entre otros; a fin de seleccionar un conjunto de candidatos para basar la referencia del diseño en ellos.

En la Figura 3.4, se pueden apreciar dos extremidades de dos especies distintas de saltamontes, las cuales a pesar de que realizan funciones distintas, su morfología es muy similar. Se componen de cinco a seis tagmas bien definidos, como: la coxa, trocánter, fémur, tibia y tarso (con pre tarso en algunos casos). Para la Figura 3.4a, la extremidad media se utiliza únicamente para desplazamiento y sujeción de la superficie de contacto, con funciones alternas como el acicalamiento; de igual forma con la Figura 3.4b, una extremidad frontal que además de las funciones mencionadas anteriormente se utiliza para la alimentación.

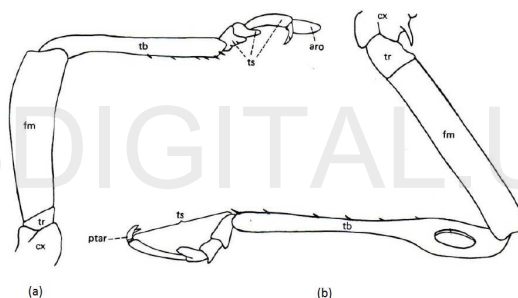


Figura 3.4: (a) Extremidad media de saltamontes (*Melanoplus*) (b) Extremidad frontal grillo de grama (*Scudderia*). *fm*, fémur; *cx*, coxa; *tr*, trocánter; *tb*, tibia; *ts*, tarso. Fuente: (Gullan y Cranston, 2014)

De igual forma, en la Figura 3.5, se puede observar la descripción morfológica de otras extremidades hexápodos por parte de (Gillott, 2013, p.78), en la cual se presentan tres extremidades más especializadas, como lo son la Figura 3.5(a) la extremidad delantera de un grillo topo utilizada para cavar agujeros en la tierra como vía de desplazamiento, en las Figuras 3.5(b) y 3.5(c), las extremidades posteriores y anteriores de la abeja melífera común, con especializaciones entre el tarso y la tibia cada una, a fin de incorporar recolectores de polen y un limpiador de antenas. Presentando estas tres extremidades la misma estructura tagmática, una morfología similar.

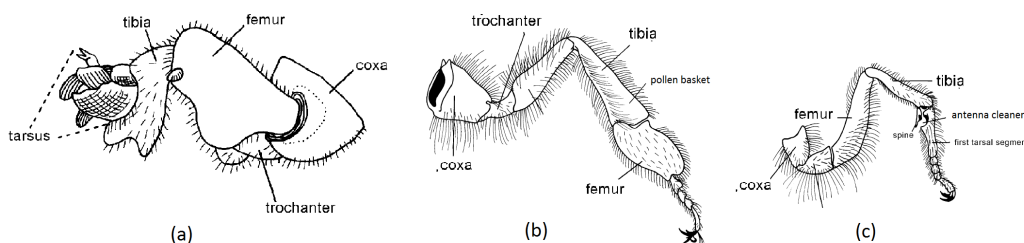


Figura 3.5: Extremidades hexápodas. (a) Grillo topo, extremidad delantera; (b) extremidad trasera abeja melífera; (c) extremidad delantera abeja melífera. Fuente: (Gillott, 2013, p.78),(Gillott, 2013, p.79)

Otras extremidades interesantes a estudiar son las mostradas en la Figura 3.6, en la Figura 3.6a, se puede observar la extremidad trasera de una cucaracha común (Gullan y Cranston, 2014, p.47), utilizada para proporcionar la mayor cantidad del impulso necesario para su desplazamiento. Así como las extremidades de las hormigas de fuego y cortadoras de hojas, que presentan una morfología tagmática similar a la Figura 3.6b, con la particularidad que estas ultimas son capaces de soportar diez o más veces su peso.

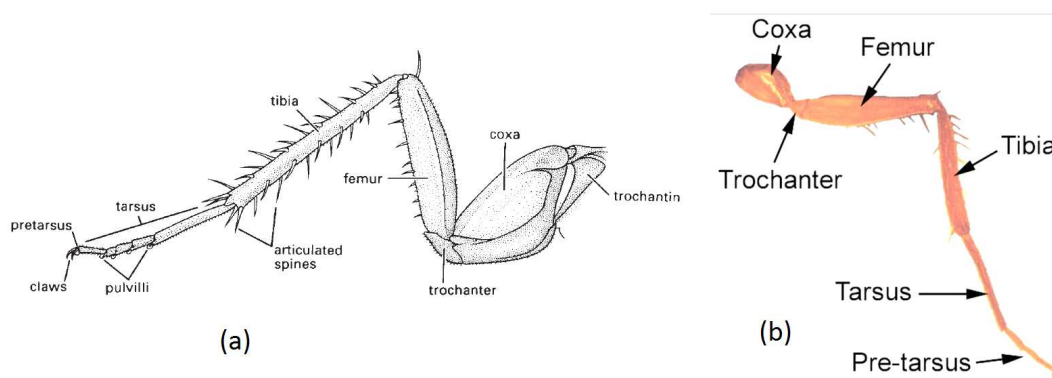


Figura 3.6: Extremidades hexápodas. (a) Extremidad posterior cucaracha común, (b) Extremidad media hormiga de fuego. Fuente: (Gullan y Cranston, 2014, p.47)

De este conjunto de morfologías, a pesar de las especializaciones propias de cada especie, se puede notar que los segmentos tagmáticos: la coxa, trocánter, fémur, tibia y tarso están presentes en todas las configuraciones sin importar su función, aspecto a

tomar en cuenta al momento de empezar a formar una noción sobre como debería estar diseñada morfológicamente una extremidad funcional para el diseño del prototipo en cuestión.

Cabe destacar que es importante el estudio del funcionamiento de los músculos a modo de actuadores para poder mover cada uno de los tagmas que conforman las extremidades de estos insectos. En cada tagma anterior existe al menos un par de músculos especializados para poder mover el tagma siguiente, por ejemplo, los músculos necesarios para mover la tibia de un insecto, están ubicados (su inicio o anclaje) en fémur y así sucesivamente. Como se muestra en la Figura 2.20.

Esta acción de contracción y elongación del par de músculos encargados de mover cada tagma puede ser relacionada como un movimiento de giro en un pivote con respecto a la unión entre el siguiente tagma.

Esta acción de contracción y elongación de los músculos encargados de mover cada tagma, puede ser vista de manera análoga a tener un par de músculos agrupados alrededor de un eje o pivote, en el cual el tagma S_i es rotado por el movimiento de los músculos anclados en el tagma S_{i-1} . No todas las uniones tagmáticas entre cada eslabón que conforma las extremidades poseen solo un par músculos, como por ejemplo, entre la coxa y el trocánter, en las que suelen existir un conjunto complejo de musculatura que permiten un rango más amplio y especializado de movimiento, logrando efectuar movimientos en el trocánter en más de un eje, de manera traslación o rotacional.

También, es posible notar en el estudio de estas extremidades y distribuciones morfológicas entre los tagmas que las conforman, cuáles son las secciones que se mueven en un plano común, como lo son el fémur, la tibia y el tarso, dejando a la coxa y el trocánter como eslabones en los cuales se presenta movimiento o giro en un plano diferente.

Teniendo en consideración las morfologías anteriores, se puede hacer la analogía de que cada articulación existente en las extremidades descritas que pueden ser sustituidas de manera análoga como un servomotor, a fin de reducir la complejidad de implementación, sin sacrificar la movilidad de la extremidad. A su vez, tomando en cuenta que la mayor cantidad de movimiento se hace al desplazar los tagmas de la coxa respecto a la base torácica, el fémur respecto a la coxa y la tibia respecto al fémur; se puede entonces reducir el número de eslabones necesarios para representar una extremidad, quedando esta como en la Figura 3.7, donde la punta o extremo de contacto con la superficie pasa a ser el extremo de la tibia.

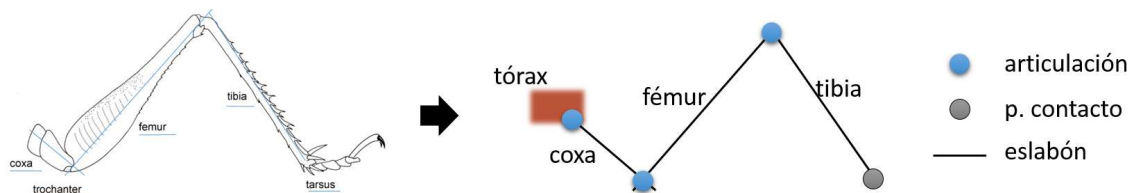


Figura 3.7: Analogía entre extremidad hexápoda y noción inicial de diseño de extremidad prototipo. Fuente: Propia.

De esta forma, asumiendo que solo existe un grado de libertad rotacional por articulación según la analogía anterior, se podría formar la siguiente reducción general de una extremidad hexápoda. Ver Figura 3.8.

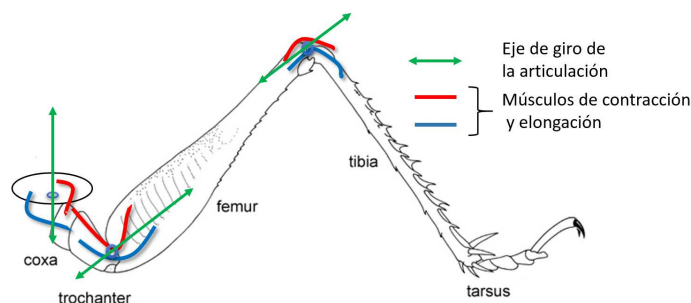


Figura 3.8: Reducción de modelo o prototipo de extremidad. Fuente: Propia.

Gracias a la reducción anterior, se puede entonces contar con una extremidad compuesta por tres eslabones con tres articulaciones de un grado de libertad rotacional cada una, en la cual dos ejes de rotación son paralelos entre sí, correspondientes a las

articulaciones entre la coxa-fémur y fémur-tibia, mientras que el eje de rotación entre el tórax o base-coxa no lo es.

Con los eslabones a utilizar ya identificados para las extremidades del prototipo, se procede a tomar en cuenta a modo de referencia la relación existente entre los tagmas de las extremidades hexápodos presentes en la naturaleza. Esto se realiza con el fin de tener una proporción entre las longitudes de los eslabones considerados, es decir, entre la coxa, fémur y tibia, a fin de poder implementar, de ser posible, dicha proporción en la extremidad a diseñar, respetando siempre las demás restricciones posibles que puedan aparecer, como el torque máximo que soporten los actuadores seleccionados, dado que mientras más largo sea el eslabón más será el torque requerido para mover la extremidad.

Se procede a formar una tabla tomando como referencia la relación espacial que existe entre dichos eslabones, mediante la simple medición de imágenes de referencia o datos obtenidos mediante consultas de diversas referencias e investigaciones, formando así la Tabla 3.3. En esta Tabla se toma la medición inicial de la coxa como 1 adimensionalmente a fin de solo obtener una proporción, es decir, si la coxa medida en centímetros tiene como longitud 3 cm, el fémur 6 cm y la tibia 9 cm, la relación de proporción obtenida será (1:2:3), de igual forma, se procederá a crear una relación de proporción única entre la longitud del fémur y la tibia dado que estos dos eslabones se mueven en planos y ejes paralelos.

Tabla 3.3: Proporciones entre tagmas o eslabones de extremidades hexápodos en la naturaleza

Especie	Coxa + Trocánter	Fémur	Tibia	proporción (coxa:fémur:tibia)	proporción (fémur:tibia)	función de la extremidad
Extremidad frontal saltamontes <i>Melanoplus</i>	2	3,5	7,4	(1:1,75:3,7)	(1:2,11)	Limpieza y Desplazamiento
Extremidad media saltamontes <i>Scudderia</i>	2,5	7,5	10,5	(1:3:4,2)	(1:2,66)	desplazamiento
Extremidad frontal grillo topo	5,2	10,5	5	(1:2,01:0,96)	(1:0,48)	Palanca y desplazamiento
Extremidad trasera piojo	2	5	4	(1:2,5:2)	(1:0,8)	Sujeción y desplazamiento
Extremidad delantera abeja melífera	3,8	6,5	5,4	(1:1,71:1,42)	(1:0,83)	Limpieza y desplazamiento
Extremidad trasera abeja melífera	3,8	6,5	5,4	(1:1,71:1,42)	(1:0,83)	Limpieza, desplazamiento
Extremidad media, hormiga de fuego	2,5	3,8	5,4	(1:1,52:2,16)	(1:1,42)	Limpieza, desplazamiento
Extremidad media, hormiga cortadora de hojas	2,1	4,5	4	(1:2,14:1,90)	(1:0,88)	Limpieza, desplazamiento

En la Tabla 3.3 se puede apreciar que la mayoría de las extremidades tienen dos

funciones principales: el desplazamiento o locomoción del insecto y la limpieza, es decir, que tienen la capacidad de alcanzar básicamente cualquier punto al rededor de su tórax, características que se quieren lograr en el desarrollo de este prototipo.

3.3.3 Posición de anclaje de las bases de las extremidades

Dado que la plataforma o base hexagonal que funge como base estructural del robot es el punto en el cual se acoplan o anclan las extremidades, la selección de la posición en la cual estas estarán ubicadas es primordial para proseguir con el diseño. A similitud con las analogías de los hexápodos en la naturaleza, se puede notar que básicamente las extremidades están en la parte inferior de la zona del tórax, orientadas hacia la superficie objetivo de contacto, lo que permite desarrollar un rango de plasticidad lo suficientemente amplio como para utilizarlas en el desplazamiento y la limpieza en general. De este modo, parece conveniente, como primera noción, ubicar la base de las extremidades en el inferior de la estructura, debido a que quedaría libre la parte superior de la plataforma para ubicar los dispositivos necesarios para el funcionamiento y control del mismo, por tanto, esta será la ubicación del punto de anclaje de las extremidades a la base.

3.3.4 Orientación y ubicación de los grados de libertad de las extremidades

En base a las morfologías antes mencionadas, se puede seleccionar la orientación o colocación de cada una de las articulaciones que conforman la configuración de la morfología de la extremidad del prototipo. Cada especie en la naturaleza tiene una morfología diferente debido a que sus extremidades están especializadas para realizar diversas funciones muy específicas, dando lugar a la aparición de ventajas o desventajas respecto a funciones básicas.

La orientación y ubicación de cada uno de los actuadores es primordial para determinar qué tipo de movilidad tendrá el robot, por tanto, hacer referencia a las configuraciones previas y analizarlas en conjunto con las nociones ya adoptadas, es

necesario para poder conciliar una morfología que sea funcional según la tónica de extremidades multipropósito.

Se puede hacer referencia de manera análoga a las extremidades más relevantes y diferentes entre sí debido a su configuración morfológica particular. Construyendo las extremidades a sabiendas de que se cuentan con tres eslabones y tres articulaciones, se pueden apreciar los prototipos de la Figura 3.9, basados en los insectos cuyas extremidades son particulares de observar entre los hexápodos. Estos prototipos son elaborados observando el movimiento más común realizado por las extremidades. Prototipos diseñados en *SketchUp Google inc.*

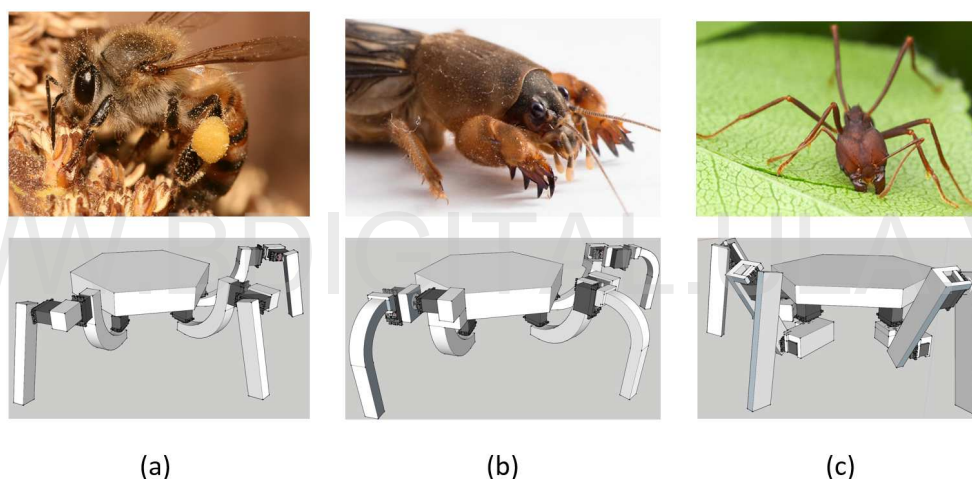


Figura 3.9: Prototipos de extremidades hexápodos (a) Extremidad media abeja melífera (b) Extremidad delantera grillo topo (c) Extremidad media de saltamontes y hormigas. Fuente: Propia.

En la Figura 3.9a se puede observar que los tres actuadores funcionan en ejes distintos, generando la movilidad necesaria de la base pero haciendo difícil el posible uso de la extremidades como herramientas conjuntas por la ubicación y orientación de los dos últimos grados de libertad; en la Figura 3.9b, se tiene la capacidad de igual forma de desplazar la base en cualquier eje, pero su movilidad en general como robot andante se vería comprometida ya que dicha configuración hace difícil el movimiento rectilíneo traslacional; en la Figura 3.9c se tiene una estructura morfológica que

permite el movimiento de la base en los tres ejes y su rotación de manera conjunta, dando plasticidad de posiciones en buena medida para que las extremidades puedan ser utilizadas como herramientas de manera conjunta.

La Figura 3.9c, presenta la opción que puede generar la mayor cantidad de movimientos en cualquier dirección, sobre todo respecto a la elevación de la base en relación a la superficie, factor primordial al momento de sortear obstáculos o mantener la estabilidad de la plataforma. Por esta razón, se selecciona dicha configuración para las extremidades, donde se tienen los dos últimos grados de libertad con ejes paralelos y el grado de libertad de la articulación principal es ortogonal a ellos.

Dada ya la selección de la configuración para los grados de libertad de la extremidad, se pueden observar las diversas posiciones que podrían lograrse con dicha morfología, cumpliendo en principio con la especificación de diseño de manera conceptual, logrando alcanzar posiciones posibles para realizar diversos patrones de locomoción, posicionarse en diversos puntos en el espacio y lograr utilizar dos extremidades a modo de herramientas multipropósito con posibilidad de trabajo conjunto. Ver Figura 3.10.

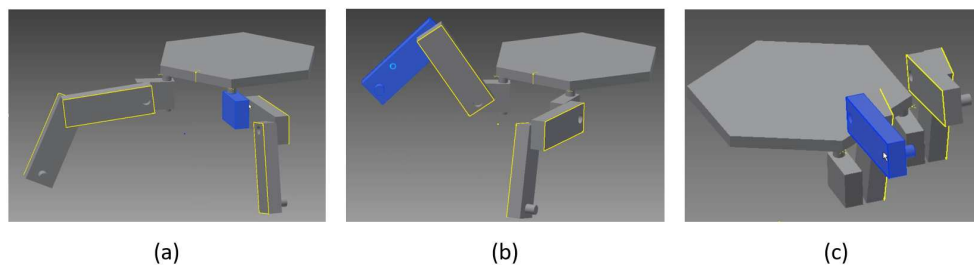


Figura 3.10: Plasticidad de extremidad con tres grados de libertad. (a) Extremidad alcanzando posiciones de locomoción, (b) Extremidad alcanzando puntos en el espacio, (c) Extremidades como herramientas conjuntas. Fuente: Propia.

3.4 Selección de actuadores

Como se mencionó anteriormente, el tipo de articulación a implementar posee solo un grado de libertad y este es rotacional. Para este tipo de implementación existen

diversos dispositivos o actuadores capaces de realizar dicha acción, pero los más accesibles y comúnmente utilizados en el ámbito de la robótica son los conocidos servomotores. Dichos actuadores poseen generalmente buenas prestaciones en relación al torque que brindan, consumo de energía y rango de movimiento, no siendo el peso su mayor ventaja, logran cumplir con la función de articulaciones rotacionales.

Como indican las referencias, los servomotores de gama media pueden fungir como actuadores rotacionales con una buena relación precio/rendimiento de manera general, por tanto, en base a los utilizados por los prototipos comerciales se procede a seleccionar el servomotor *Hitec - HS5645MG*, ver Figura 3.11, capaz de entregar un torque considerable a fin de poder calcular y diseñar un robot con eslabones de dimensiones funcionales. Este servomotor es capaz de entregar un torque referencial de 1,21 N.m con la alimentación máxima de 6 V, capaz de girar en 0,18 segundos 60 grados y un rango de movimiento programable de 180 grados, con un peso de 50 gramos según la ficha técnica del fabricante: Hitec Multiplex (2016), ver Tabla 3.4. Las dimensiones de este servomotor son las generales para servomotores utilizados en aeromodelismo, lo que lo hace ideal para la complementación funcional con piezas o bases en caso de ser necesario.



Figura 3.11: Servomotor *Hitec HS-5645MG* Fuente: (Hitec Multiplex, 2016).

A diferencia de los servos convencionales, este servomotor es digital, es decir que su rango y velocidad de respuesta pueden ser programados mediante un programador de servos. En comparación con su ejemplar análogo, el servomotor *Hitec HS-645*,

este modelo posee una resolución mayor gracias a un circuito controlador interno más preciso, garantizando así un movimiento más suave y exacto al momento de alcanzar la posición designada.

Como se describe en el diseño de las extremidades, cada una de las extremidades estará equipada con tres servomotores, a fin de representar el número requerido de grados de libertad para el diseño de la extremidad.

3.5 Selección de dispositivos electrónicos

A modo general se procede a seleccionar el conjunto de componentes necesarios para poner en funcionamiento el robot, con el fin de tener un peso aproximado de estos, dado que tiene un efecto directo al momento de calcular la longitud de los eslabones y demás componentes que conforman el robot. Los componentes descritos estarán ubicados en la base de la plataforma del robot. Se procede entonces a describir cada uno de estos componentes:

- **Tarjeta programable *Raspberry Pi B+*:** Representa el centro de procesamiento de la estructura, con capacidad de funcionar con sistemas operativos como *Unix*, necesarios para poder implementar el protocolo de comunicación y procesamiento de los programas necesarios para generar la locomoción de las extremidades. Cuenta con características como, conexión inalámbrica mediante módulos adicionales (*Bluetooth* y *Wifi (Wireless Fidelity)*), pines *PWM (pulse-width modulation)*, modulación de ancho de pulso y diversos puertos para comunicación de distintos protocolos para expandir su funcionalidad con otros dispositivos. Ver Figura 3.12(a).
- **Batería *Venom 20C 3S 1300mAh 11.1V LiPo*:** Batería principal encargada de brindarle la fuente de alimentación necesaria para el funcionamiento de la tarjeta programable *Raspberry Pi B+*, tarjetas controladoras de servomotores, convertidor de niveles lógicos y acelerómetro. Ver Figura 3.12(b).
- **Batería *Venom 20C 2S 4000mAh 7.4V LiPo*:** Batería utilizada para

alimentar los dieciocho servomotores de la estructura, así como los reguladores de voltaje y controladores de servos necesarios para su correcto funcionamiento. Ver Figura 3.12(c).

- **Regulador de voltaje *LM2596-DC-DC*:** Dispositivo utilizado para regular el voltaje de salida de la batería de 7.4 V a 6.0 V, necesario para que cada uno de los servomotores funcione óptimamente. Así como su uso para bajar el voltaje de la batería principal según el requerido de operación para los demás dispositivos que componen el robot. Ver Figura 3.13(a).
- **Controlador de servomotores *Newer32* de 32 canales:** Dispositivo encargado de modular las señales *PWM* de cada servomotor del robot, este se encarga de traducir las señales de control provenientes de la tarjeta programable. Ver Figura 3.13(b).
- **Convertidor de niveles lógicos *Qunqi IIC I2C* Bi-Direccional de cuatro canales:** Dispositivo encargado de convertir los niveles lógicos de manera bidireccional entre la tarjeta programable *Raspberry Pi B+* y el controlador de servomotores *Newer32*. Ver Figura 3.13(c).
- **Acelerómetro *SainSmart MMA8451* Digital Triaxial:** Sensor necesario para saber la orientación del robot y en caso de ser necesario su aceleración. Dispositivo opcional. Ver Figura 3.13(d).

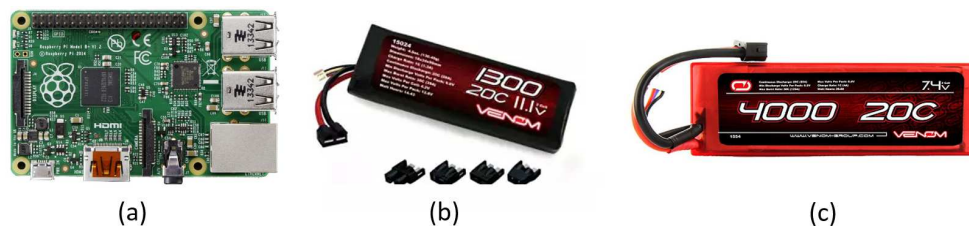


Figura 3.12: Componentes electrónicos seleccionados. (a) Tarjeta programable *Raspberry Pi B+*, (b) Batería *Venom 20C 3S 1300mAh 11.1V LiPo*, (c) Batería *Venom 20C 2S 4000mAh 7.4V LiPo*

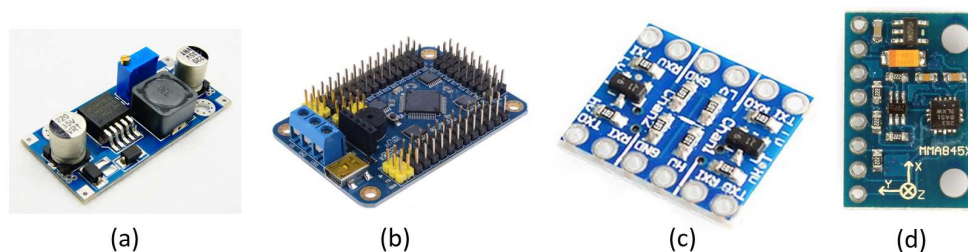


Figura 3.13: Componentes electrónicos seleccionados. (a) Regulador de voltaje *LM2596-DC-DC* , (b) Controlador de servomotores *Neewer32* de 32 canales, (c) Convertidor de niveles lógicos *Qunqi IIC I2C* Bi-Direccional de cuatro canales, (d) Acelerómetro *SainSmart MMA8451* Digital Triaxial.

De estos elementos se tiene la Tabla 3.4, en la que se consideran las dimensiones y peso de cada uno, expresadas las longitudes en centímetros y el peso en gramos para una mejor apreciación de sus dimensiones físicas.

Tabla 3.4: Descripción de dimensiones y peso de componentes electrónicos

Componente	Largo (cm)	ancho (cm)	alto (cm)	peso (gr)
Servomotor <i>Hitec HS-5645MG</i>	4,1	1,95	3,75	54
Tarjeta programable <i>Raspberry Pi B+</i>	9,2	6,1	2,7	113
Batería <i>Venom 20C 3S 1300mAh 11.1V LiPo</i>	8,5	3,1	1,7	113
Batería <i>Venom 20C 2S 4000mAh 7.4V LiPo</i>	13,7	4,6	2,2	275
Regulador de voltaje <i>LM2596-DC-DC</i>	4,1	2,0	1,3	35
Controlador de servomotores <i>Neewer32</i>	6,5	4,4	1,5	85
Convertidor de niveles lógicos <i>Qunqi IIC I2C</i>	1,8	1,6	0,5	10
Acelerómetro <i>SainSmart MMA8451</i>	1,9	1,7	0,4	25

3.6 Selección de piezas complementarias para la estructura del robot

3.6.1 Componentes para la estructura

- Base para servomotores *NEEWER* con set de bujes y tornillos: Base utilizada para ampliar la capacidad de montura y acople de los servomotores seleccionados

a la estructura, ver Figura 3.14. Útil debido a que no modifica en gran medida las dimensiones estructurales del servomotor. Las especificaciones del fabricante se pueden apreciar en la Tabla 3.5.

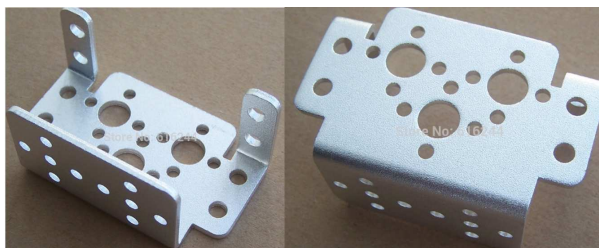


Figura 3.14: Base para servomotores *NEEWER* Fuente: Referencial de fabricante.

3.6.2 Componentes electrónicos

Entre los componentes electrónicos varios se tiene el conjunto de secciones de cableado necesarias para poder hacer las conexiones correspondientes en cada dispositivos. Principalmente se considera el uso de cableado de cobre, teniendo como referencia cables acondicionados con *jumpwires* y pines según cada tipo de conector presente en la estructura. Dado que el uso de este cableado debería ser considerado, solo se indica a modo de referencia para tener una noción, debido a que el número de piezas y longitudes de las mismas a utilizar dependerá de la implementación, en caso de realizarse. Los conectores se muestran en la Figura 3.15.

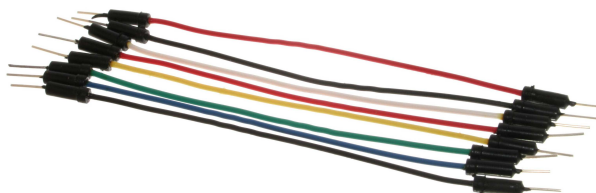


Figura 3.15: Conectores y cables varios. Fuente: Imagen referencial.

Tabla 3.5: Descripción de componentes complementarios para la estructura del robot

Componente	Largo (cm)	ancho (cm)	alto (cm)	peso (gr)
Cables y conectores	10	0,2	0,1	1
Base para servomotores <i>NEEWER</i>	5,8	2,6	3,59	14

3.7 Material a utilizar para la estructura

Considerando que las bases de los servomotores están fabricadas de aluminio de 3 mm de espesor, se puede tomar a modo de referencia este material como el principal en la elección para la construcción y cálculo de pesos estimados de cada componente. Para esto es necesario conocer al menos una densidad referencial de este material, se procede a utilizar aluminio de $2,7 \text{ gr/cm}^3$, para hacer los cálculos necesarios del peso de cada componente.

Los pesos de los componentes diseñados son tan aproximados como sea posible, debido a que cualquier cambio en alguna de las dimensiones o longitudes de las piezas requeridas a la hora del diseño pueden modificar dicho valor. Para el proceso de diseño de los eslabones, sí se hace referencia cierta a las longitudes de los eslabones que conforman las extremidades.

3.8 Diseño de piezas

Teniendo como base la elección del aluminio, para la construcción y posible implementación de las piezas, se procede entonces a dimensionar y diseñar los componentes de la estructura.

3.8.1 Base de la estructura del robot

Diseño del componente

Considerando que en esta base estarán ubicados los componentes electrónicos antes mencionados, se debe diseñar de tal forma que se tomen en cuenta las dimensiones de los componentes de mayor tamaño, dejando cierta holgura entre los extremos de la misma para que las piezas utilizadas no interfieran con el movimiento de las extremidades. Como se puede apreciar en la Tabla 3.4 de descripción de componentes, las piezas de mayor tamaño son las baterías y la unidad de procesamiento, por tanto, tomando la longitud mayor, se diseña la base hexagonal respetando las restricciones antes mencionadas, acomodando estos tres componentes de tal forma que se logre distribuir, en la medida de lo posible, equitativamente el peso de estos sobre la base.

Como la batería secundaria tiene una longitud (largo) de 13,7 cm, se diseña una base hexagonal regular con radio de su centro a las aristas de 11 cm o 110 mm, teniendo como resultado la base de la Figura 3.16.

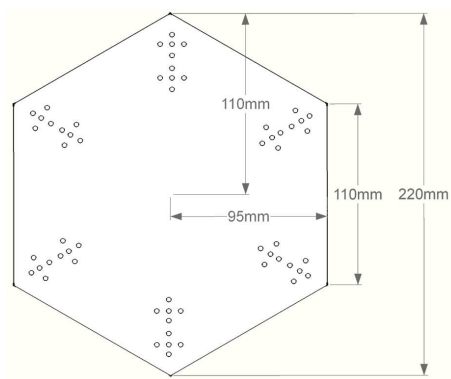


Figura 3.16: Base prototipo del robot, diseñada. Fuente: Propia.

Para demostrar que los componentes antes mencionados pueden ser colocados dentro de la base, se procede a hacer referencia a un modelo estructural elaborado en cartón solo para fines de pruebas de posicionamiento de componentes y plasticidad de las extremidades, como se puede ver en la imagen 3.17. Dando prueba fiel de que se pueden posicionar sin problemas los componentes electrónicos antes mencionados.



Figura 3.17: Prototipo con fines de prueba, con elementos electrónicos posicionados en su base. Fuente: Propia.

Cálculo de peso del componente

Es necesario calcular el peso de la base diseñada, en referencia al material seleccionado, debido a que el futuro cálculo de las longitudes que conformaran los eslabones de las extremidades del robot dependerán del peso total que deban soportar los actuadores.

Utilizando las dimensiones de longitud de la base, espesor del material y la densidad del mismo se puede obtener entonces el peso de este componente mediante la fórmula:

$$P = V \times d \quad (3.1)$$

$$P = \frac{\text{perímetro} \times \text{apotema}}{2} \times \text{espesor} \times \text{densidad} \quad (3.2)$$

Donde, perímetro hace referencia al la suma de las distancias de cada lado que forma el hexágono; el apotema refiere a la distancia desde el centro de la estructura a cualquiera de sus lados.

Considerando las dimensiones anteriores se tiene que:

$$P_{base} = \left(\left(\frac{66\text{cm} \times 9,5\text{cm}}{2} \right) \times 0,3\text{cm} \right) \times 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 253,93\text{g} \approx 255\text{g} \quad (3.3)$$

Teniendo como resultado un valor aproximado de 255 gramos para la base de la

estructura.

3.8.2 Pre-cálculo del peso de los eslabones

Los servomotores, al representar los puntos móviles del robot, serán los encargados de brindar el torque necesario para que cada articulación sea capaz de realizar su movimiento correspondiente. Existen diversos escenarios en los cuales cada una de las articulaciones deberá mantener o cambiar su posición según sea la acción que esté realizando el robot, entre ellos se tiene que:

1. Las extremidades estén soportando la estructura cuando se encuentre separada del suelo, o en alguna posición estática.
2. Efectuando el desplazamiento o movimiento mediante algún patrón de locomoción en ejecución.
3. Que se este ejecutando el movimiento de alguna de las extremidades sin contacto con la superficie.

Por esto, es necesario poder calcular el torque que se requiere en cada uno de estos escenarios, de tal forma que se pueda determinar si se excede o no el torque nominal del motor seleccionado. Para poder lograr determinar esto, es necesario tener un estimado del peso de los eslabones, asumiendo que el diseño de estos no excederá cierto valor nominal de peso o dimensiones preestablecidas.

Existen tres posibles eslabones a construir: la coxa, el fémur y la tibia. Utilizando como referencia el mismo material de construcción para la pieza de la base, el aluminio, solo que ahora se procede a utilizar uno de 2 mm de espesor. Se puede preestablecer una longitud base general para estos eslabones, a modo de que si los torques calculados para los servomotores logran mantenerse dentro de los rangos de operación, dicho peso excedente podrá ser considerado como carga útil adicional; de esta forma logrando de manera indirecta un diseño con una holgura a favor.

Tomando en cuenta la expresión anterior del cálculo de peso, de la ecuación (3.1), se procede a establecer una medida estándar para los eslabones del robot, asumiéndolos en primera instancia iguales. Se tiene entonces las siguientes características para los eslabones:

- Largo: 10 cm
- Ancho: 2 cm
- Espesor: 0.2 cm
- Densidad: $2,7 \text{ g/cm}^3$

Se tiene entonces que:

$$P_{\text{barraeslabon}} = 10\text{cm} \times 2\text{cm} \times 0,2\text{cm} \times 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 10,8\text{g} \approx 11\text{g} \quad (3.4)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Utilizando dos secciones o piezas de aluminio con el peso previamente calculado para formar un eslabón estable se tiene que cada eslabón tendrá un peso estándar de 22 g. Añadiendo el peso de la base de 14 g seleccionada para los servomotores, junto con el conjunto de tornillos y tuercas necesarios para la unión de las piezas se puede tener un estimado de peso para los eslabones de 50 g.

3.8.3 Cálculo de torques

Para poder hacer el cálculo necesario de los torques soportados por cada una de las articulaciones en los diversos escenarios posibles de acción, es necesario determinar cuáles son los casos críticos para el funcionamiento del robot.

Partiendo del concepto de estabilidad estática para robots andantes o caminantes, se tiene que es necesario lograr posicionar al menos tres puntos de contacto o extremidades sobre la superficie para cumplir con dicho criterio; por tanto, las otras tres extremidades pueden estar en el aire. Con esto en mente, se tiene que las tres

extremidades de soporte deben cargar con el peso de la estructura, así como con el peso de las demás extremidades que no están en contacto con la superficie.

Dicho esto, entra en juego el peso estándar previamente calculado de los eslabones, el cual será utilizado para determinar cuál es el peso de las extremidades que se encuentran en el aire. El peso de las extremidades en el aire es sumado con el peso de la estructura base del robot y con los componentes electrónicos necesarios incluidos para su funcionamiento, para así poder determinar el peso total que tienen que soportar las extremidades que están en contacto con el suelo, en cada una de sus articulaciones.

Determinando cuál es el peso estimado de la estructura y las extremidades que no fungen como soporte, se puede dividir equitativamente dicha magnitud entre las tres extremidades de soporte, dando lugar al cálculo estimado del rango de longitudes que pueden alcanzar cada uno de los eslabones del robot.

En el cálculo de este peso o valor de carga para las extremidades apoyadas en la superficie se procede a tomar en cuenta un peso de carga útil de 500 g, que servirá para poder acoplar cualquier tipo de sensor o herramienta en la base del robot. De igual forma, se consideran dos pesos cuyas magnitudes pueden ser determinadas solo si se implementa el prototipo, estos se toman en cuenta para dejar un margen de holgura respecto al diseño de la estructura y los componentes que puedan variar según necesidades no previstas como el uso de tornillos, tuercas, arandelas o cableado y componentes electrónicos varios; denominados: peso estimado de cableado y componentes varios para uniones mecánicas.

Se procede a escribir una tabla para determinar el peso de carga de las extremidades de soporte, ver Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Descripción de pesos a soportar por las extremidades de soporte

Elemento	cantidad	peso (g)	peso total (g)
Servomotores en el aire	9	54	486
Eslabones en el aire	9	50	450
Componentes varios uniones mecánicas	1	150	150
Controlador de servomotores	1	85	85
Batería 7,4 v	1	275	275
Batería 11,1 v	1	113	113
<i>Raspberry Pi B+</i>	1	80	80
Reguladores de voltaje	6	35	210
Base del hexápodo	1	255	255
Peso estimado de cableado	1	150	150
Punta de contacto de extremidades	3	35	105
Carga útil	1	500	500
Peso total a soportar por las extremidades			2859
Peso individual a soportar por extremidad			953

Dado el resultado de la Tabla 3.6, se puede observar que el peso a soportar por cada una de las extremidades de soporte es de aproximadamente 960 gramos o casi 1 Kg.

Consideración previa al cálculo de los torques en las articulaciones o cada grado de libertad

Previo al cálculo de la longitud de los eslabones para cada una de las extremidades en base al peso y torque máximo de los servomotores, es necesario tener en consideración un análisis de la estructura a implementar, para observar cuáles son las articulaciones que soportarán o sufrirán el efecto del peso de la estructura en sí. Como se puede ver en la Figura 3.18, se tiene que las articulaciones dos (2) y tres (3) son las que tendrían mayor posibilidad de ser afectadas por la carga de la estructura, eso por la sencilla razón de que el eje de acción en el que actúa la fuerza del peso como magnitud es el eje Z o eje vertical, dicho eje forma parte de los ejes en los cuales las articulaciones

mencionadas efectúan su movimiento (planos XZ y YZ), a diferencia de la articulación uno (1), que no tiene movilidad en dicho plano (movilidad en plano XY), pero si podría verse afectada en su movilidad y funcionamiento si no se diseña una pieza de unión mecánicamente correcta, que anule o disminuya en la medida de los posible, la fricción o torsión del eje del servomotor al acoplarse con el eslabón de la coxa.

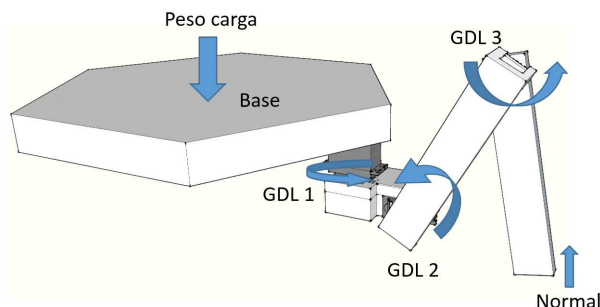


Figura 3.18: Esquema de carga para las articulaciones. Fuente: Propia.

Teniendo en cuenta que las articulaciones dos (2) y tres (3), son las que se ven afectadas por el peso o carga de la estructura, serán entonces las longitudes de los eslabones dos (2) y tres (3) respectivamente las siguientes a determinar; siendo la longitud del eslabón uno (1) variable, de tal forma que se puede asignar un valor para este eslabón a plenitud para lograr rangos de movimientos amplios en su plano de acción.

Se procede a definir un modelo matemático con ecuaciones que permitan relacionar el torque de las articulaciones y las dimensiones de los eslabones de interés.

Modelo y ecuaciones para el cálculo de torques

Utilizando el concepto de palanca y la sumatoria de torques en un punto o eje, el torque requerido a calcular para la estructura de las extremidades descritas, debe realizarse en dos puntos definidos, que son el eje del servomotor dos (2) y el eje del servomotor tres (3) respectivamente, en los cuales se ubica un sistema de referencia propio para calcular dichos valores. Se procede a describir las variables que representarán los valores necesarios para el cálculo de los torques, ver Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Descripción de variables para el cálculo de torques

Variable	Descripción
l_0	longitud media del centro o base hasta el eje del primer servomotor; $l_0 = \frac{L_0}{2}$
l_1	longitud media del primer eslabón; $l_1 = \frac{L_1}{2}$
l_2	longitud media del segundo eslabón; $l_2 = \frac{L_2}{2}$
l_3	longitud media del tercer eslabón; $l_3 = \frac{L_3}{2}$
p_0	peso de carga individual de extremidad
p_{s1}	peso del servomotor 1
p_{s2}	peso del servomotor 2
p_{s3}	peso del servomotor 3
p_4	peso de la punta de extremidad
e_1	peso de eslabón 1
e_2	peso de eslabón 2
e_3	peso de eslabón 3
τ_{s2}	torque servomotor 2
τ_{s3}	torque servomotor 3
e_3	peso de eslabón 3
θ_2	ángulo del eslabón 2 respecto al eje x positivo
θ_3	ángulo del eslabón 3 respecto al eje x positivo
N	fuerza normal
g	constante de gravedad

Nota: l_i es igual a la longitud media del eslabón descrito, para tener la dimensión del eslabón completo se denota como $L_i = 2l_i$.

Observando el siguiente diagrama se puede tener una mejor referencia de la ubicación de cada una de las magnitudes, ver Figura 3.19

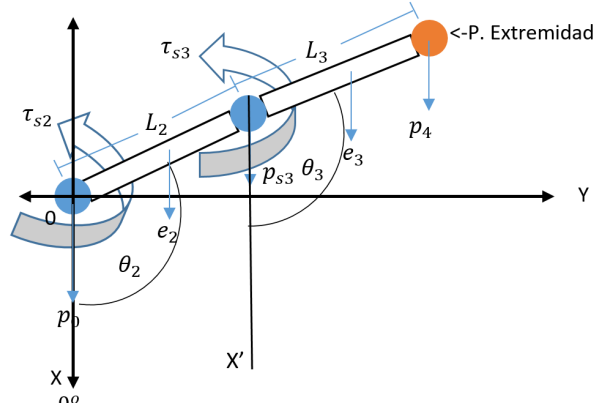


Figura 3.19: Diagrama de fuerzas referencial . Fuente: Propia.

Cabe destacar que el valor de cada magnitud de torque es función de la longitud de ambos eslabones, como se representa en las ecuaciones (3.5) y (3.6), haciendo que las ecuaciones sean dependientes entre sí.

$$\tau_{s2} = f(l_2, l_3, p_0, p_{s1}, p_{s2}, p_{s1}, p_4, \theta_2, \theta_3, e_1, e_2 e_3, N) \quad (3.5)$$

$$\tau_{s3} = f(l_2, l_3, p_0, p_{s1}, p_{s2}, p_{s1}, p_4, \theta_2, \theta_3, e_1, e_2 e_3, N) \quad (3.6)$$

Para hacer el cálculo de la longitud de los eslabones en base al torque se dejan el resto de variables fijas, haciendo el valor de las variables de interés dependientes de los valores que sean necesarios modificar.

Con esto a la mano, se debe destacar que pueden existir diversos escenarios de interés para el cálculo de cada valor de torque en los servomotores, dado a que la extremidad puede estar en dos posibles posiciones, bien sea haciendo contacto con el suelo mientras soporta el peso de la estructura o en el aire soportando solo su propio peso.

Como se muestra en la Figura 3.19, se puede notar que el valor de los ángulos τ_2 y τ_3 determinarán de manera directa la magnitud de los torques obtenidos y por ende la longitud de los eslabones, debido a esto se puede definir que el peor caso de cálculo en el que la carga de la extremidad es máxima, va de la mano con la consideración de

tener el valor de estos ángulos en $\frac{\pi}{2}$ o muy cercanos a este valor, de tal modo que los próximos escenarios de estudio consideren la opción de contacto con el suelo utilizando o no el término de la fuerza normal en su formulación.

Se tienen entonces los cuatro posibles casos de cálculo de torque, representados en la Figura 3.20, cada uno con su respectivo diagrama.

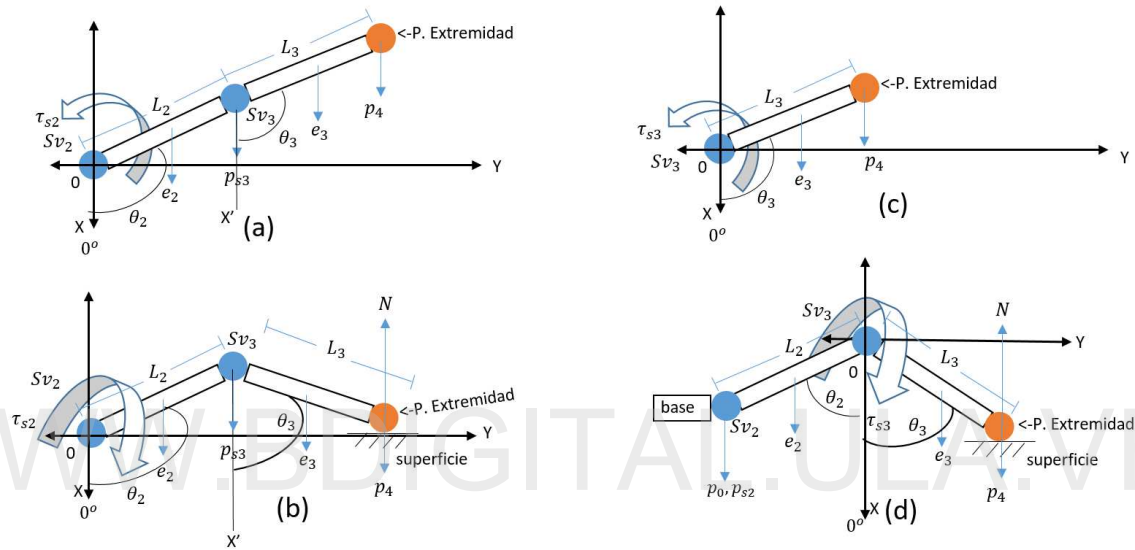


Figura 3.20: Diagramas para cálculo de torque y longitud de eslabones. (a) Caso 1 τ_{s2} , extremidad en el aire; (b) Caso 2 τ_{s2} , extremidad en el suelo; (c) Caso 3 τ_{s3} , extremidad en el aire; (d) Caso 4 τ_{s3} , extremidad en el suelo. Fuente: Propia.

1. **Cálculo de torque de servomotor 2, extremidad en el aire:** Como se muestra en la Figura 3.20(a), se tiene que la expresión para la sumatoria de torques en el eje del servomotor dos es la representada en la ecuación (3.7).

$$\tau_{s2} - l_2 \sin \theta_2 e_2 g - 2l_2 \sin \theta_2 p_3 g - (2l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3) (e_3 g) - (2l_2 \sin \theta_2 + 2l_3 \sin \theta_3) (p_4 g) = 0 \quad (3.7)$$

2. **Cálculo de torque de servomotor 2, extremidad en el suelo:** Como se muestra en la Figura 3.20(b), se tiene que la expresión para la sumatoria de

torques en el eje del servomotor dos es la representada en la ecuación (3.8).

$$\begin{aligned} & -\tau_{s2} - l_2 \sin \theta_2 e_2 g - 2l_2 \sin \theta_2 p_3 g - (2l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3) (e_3 g) \\ & - (2l_2 \sin \theta_2 + 2l_3 \sin \theta_3) (p_4 g) + (2l_2 \sin \theta_2 + 2l_3 \sin \theta_3) Ng = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

donde N es:

$$N = p_0 + p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + e_2 + e_3 \quad (3.9)$$

3. **Cálculo de torque de servomotor 3, extremidad en el aire:** Como se muestra en la Figura 3.20(c), se tiene que la expresión para la sumatoria de torques en el eje del servomotor tres es la representada en la ecuación (3.10).

$$\tau_{s3} - l_3 \sin \theta_3 e_3 g - 2l_3 \sin \theta_3 p_4 g = 0 \quad (3.10)$$

4. **Cálculo de torque de servomotor 3, extremidad en el suelo:** Como se muestra en la Figura 3.20(d), se tiene que la expresión para la sumatoria de torques en el eje del servomotor tres es la representada en la ecuación (3.11).

$$\begin{aligned} & -\tau_{s3} - l_3 \sin \theta_3 e_3 g - 2l_3 \sin \theta_3 p_4 g + (2l_3 \sin \theta_3 p_4 g) Ng \\ & + l_2 \sin \theta_2 e_2 g + 2l_2 \sin \theta_2 p_2 g + 2l_2 \sin \theta_2 p_0 g = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

donde N es:

$$N = p_0 + p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + e_2 + e_3 \quad (3.12)$$

Con estas ecuaciones planteadas, es posible determinar si los torques requeridos para mover las articulaciones exceden los suministrados por cada servomotor, pero primero se debe iniciar el cálculo de estos valores con alguna dimensión de referencia para los dos eslabones que influyen en los cálculos del torque. Como referencia a la Tabla 3.3, de proporciones de extremidades hexápodos en la naturaleza, se procede a seleccionar las extremidades que coinciden en las funciones de limpieza y desplazamiento, tomando en cuenta solo la proporción que existe entre los tagmas del fémur y la tibia que representan en este caso a los eslabones dos y tres descritos en las ecuaciones. Promediando dicha relación, entre los seis (6) valores con funciones comunes, se obtiene que la tibia tiene 1,4 veces el tamaño del fémur aproximadamente,

por tanto, se asienta esta primera referencia para la selección de las dimensiones; pero de igual forma es necesario tener una dimension inicial de al menos uno de los eslabones para poder tomar en cuenta dicha proporción.

Para determinar al menos una de estas medidas, se puede partir del hecho de tener a la mano las dimensiones de los actuadores o servomotores y la base. Haciendo un conjunto de pruebas a modo de intentar posicionar los servomtores de manera que se cumplan las especificaciones de diseño para las extremidades ya mencionadas, es posible mediante pruebas de simple ensayo y error, lograr formar un prototipo o bosquejo de la extremidad de tal forma que se pueda determinar al menos la distancia mínima necesaria para lograr tener una extremidad funcional que aproveche el rango completo de los actuadores. Considerando que cada actuador, tiene un rango de giro de 0 a 180 grados, se tiene un primer bosquejo de la extremidad. Como se puede apreciar en la Figura 3.21, se dispone en primera instancia de eslabones de igual longitud, de 10 centímetros cada uno.

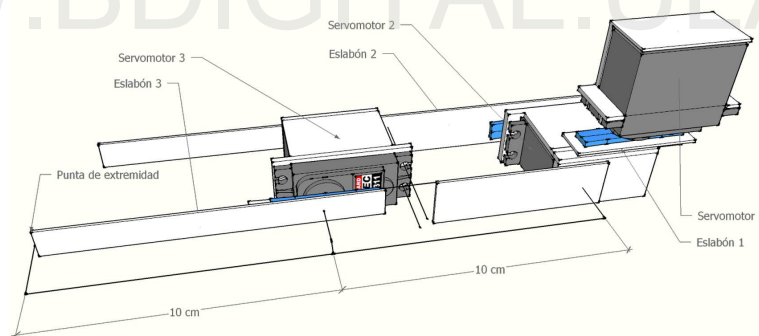


Figura 3.21: Prototipo 1 de extremidad del hexápodo. Fuente: Propia.

Así es posible empezar a calcular, mediante el uso de las ecuaciones de torque y las dimensiones iniciales para los eslabones descritas anteriormente, el valor de los torques requeridos en base a la longitud de los eslabones.

Cálculo de dimensiones de los eslabones dos y tres en base al torque

La condición principal que se quiere cumplir es que el torque requerido en cada servomotor para mover los elementos acoplados a él no sea el máximo nominal que

este puede entregar. Esto para cada uno de los escenarios de interés, en las mismas condiciones críticas que se presentan cuando la extremidad esta plenamente horizontal haciendo contacto con el suelo o no. Tomando como inicio la longitud de 10 cm para el eslabón 2 y de 14 cm para el eslabón 3, según la proporción referida (1:1.4), se procede a buscar qué tanto debe de reducirse dichas dimensiones o aumentarlas de ser posible, para poder mover cada articulación.

Dado que el torque nominal de cada servomotor es de $1,21Nm$, se realizan los cálculos tantas veces como sea necesario para lograr una combinación que permita la funcionalidad de ambos servomotores. Cabe destacar que los resultados de alguno de estos casos puede ser un factor determinante para la selección de las longitudes, debido a que según estas proporciones uno de los dos servomotores deberá soportar más carga que el otro. Se tiene como resultado, utilizando *Maple 17* para realizar los cálculos, la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Cálculo de longitud de eslabones 2 y 3

Escenario	Ec. Servomotor	θ_2	θ_3	$\frac{L_2}{2}(m)$	$L_2(m)min/Max$	$\frac{L_3}{2}(m)$	$L_3(m)min/Max$	Torque $S_{V2}(Nm)$	Torque $S_{V3}(Nm)$	Observación
Aire	SV2	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0.038	≤ 0.7136	0.0525	≤ 1.8479	0.18407	N/a	a
Aire	SV3	N/a	$\frac{\pi}{2}$	0.038	N/a	0.0525	≤ 1.0278	N/a	0.0618	b
Suelo	SV2	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0.038	≤ 0.00873	0.0525	≤ 0.02758	2.1721	N/a	c
Suelo	SV3	$3\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0.038	N/a	0.0525	≤ 0.1638	N/a	0.4782	d
Escenario Crítico										
Suelo	SV2	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0.038	≤ 0.00873	0.0525	≤ 0.02758	2.1721	N/a	c
Variando Tita 3										
Suelo	SV2	$\frac{\pi}{2}$	$0.165\frac{\pi}{2}$	0.038	≤ 0.07673	0.0525	≤ 0.1076	1.2015	N/a	e
Suelo	SV2	$\frac{\pi}{2}$	$0.15\frac{\pi}{2}$	0.038	≤ 0.07935	0.0525	≤ 0.1181	1.1717	N/a	f

Como se puede apreciar en la Tabla 3.8, para el cálculo de estos escenarios se obtuvieron las medidas para los eslabones dos y tres son de 7,6 cm o 0.076 m y 10,5 cm o 0.105 m, respectivamente. En los casos a, b y d se logra cumplir el criterio de no exceder el torque máximo de los servomotores, no así en el caso c, que se refiere al escenario en el que el servomotor dos tiene que sobrellevar toda la carga de mover la extremidad desde la posición horizontal, excediendo considerablemente el valor del torque que puede producir dicho actuador. Se realizaron pruebas variando el ángulo horizontal del servomotor tres para evaluar el comportamiento del servomotor dos en este caso particular, dado que si se reduce la distancia horizontal del eslabón tres, la

palanca o torque que debe suministrar el servomotor dos para mover la extremidad sera mayor, como se muestra en los casos e y f; en los cuales el valor requerido para el torque necesario del servomotor dos vuelve a estar dentro de los rangos de operación de dicho actuador. Dicho resultado da como indicio que al momento de realizar o ejecutar movimientos en los que cualquiera de las extremidades estén ubicadas en este escenario estudiado, sera conveniente, realizar movimientos en el servomotor tres a fin de evitar una avería o mal funcionamiento de extremidad.

Prototipo de extremidad

Teniendo ya las dimensiones de los eslabones dos y tres respecto a sus ejes de rotación, es necesario ahora determinar la longitud que tendrá el eslabón uno. Dado que la dimensión de este no afecta directamente al torque de los servomotores dos y tres, puede ser seleccionado en función de lograr un rango de movimiento lo suficientemente amplio como para que la plasticidad de movimiento de las extremidades del robot sea la mejor. Se establece una medida de 6,9 cm para el eslabón uno, dando un rango de giro de la extremidad con respecto a la base de 155 grados, suficiente para realizar una amplia variedad de movimientos, ver Figura 3.22.

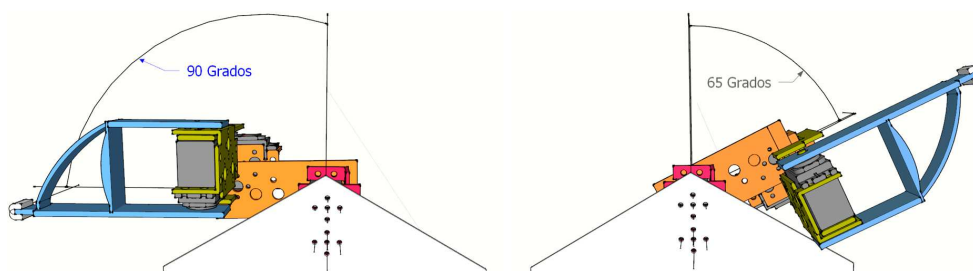


Figura 3.22: Rango de movimiento de eslabón uno, respecto a su eje y la base del robot, plano XY. Fuente: Propia.

Se procede luego a hacer uso de la estructura del soporte para la base de servomotores seleccionada, así como el concepto de poder utilizar dos láminas de aluminio para brindar rigidez a los eslabones a fin de obtener un diseño prototipo de

las extremidades. Los orificios de las bases para los servomotores se utilizarán para poder acoplar o unir las piezas fijas que componen el robot, como por ejemplo, el servomotor uno a la base del robot, por tanto, dichos orificios son tomados en cuenta en cada pieza diseñada que forma parte de la extremidad; el método o dispositivos para hacer la unión, tales como tornillos y tuercas se seleccionarán posteriormente en caso de hacer la implementación del robot.

Dado que se quiere lograr el diseño de una extremidad funcional, el peso o inercia de los servomotores debe ser considerado de manera requerida, por ende la distribución de su peso en la estructura es crucial. Aprovechando el hecho de que se puede utilizar un par de láminas de aluminio sin modificar mucho el peso total de la estructura, se procede a ubicar los servomotores dos y tres con 180 grados de diferencia respecto a sus ejes, manteniéndolos aún a ambos en el mismo plano de acción, con ejes de rotación paralelos. Esta medida a tomar balancea el peso en la extremidad para que este no esté concentrado completamente hacia un lado solamente. Como se ven en la Figura 3.23, donde se puede apreciar la posición y rango de movimiento de dichos servomotores y sus respectivos eslabones.

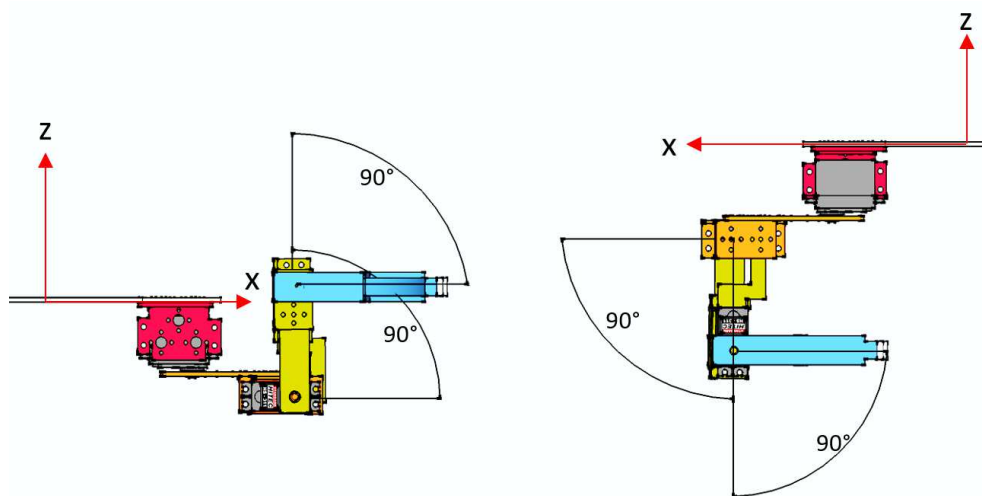


Figura 3.23: Posiciones y rango de movimiento para los servomotores dos y tres para el prototipo diseñado. Fuente: Propia.

Prototipo general de la extremidad

En base a las especificaciones de diseño, consideraciones estructurales y demás factores antes mencionados, se tiene como resultado el siguiente prototipo para las extremidades del robot, (el plano de piezas esta descrito con más detalle en apéndice A del presente trabajo), se procede a mostrar el producto final, ver Figura 3.24.

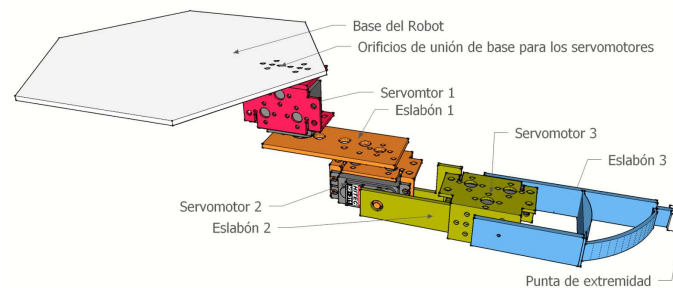


Figura 3.24: Prototipo de extremidad completa del hexápodo. Fuente: Propia.

A continuación, un detalle en perspectiva de cada uno de los componentes con los elementos que lo forman, para poder tener una idea general del prototipo.

- **Servomotor 1 y sus componentes:**

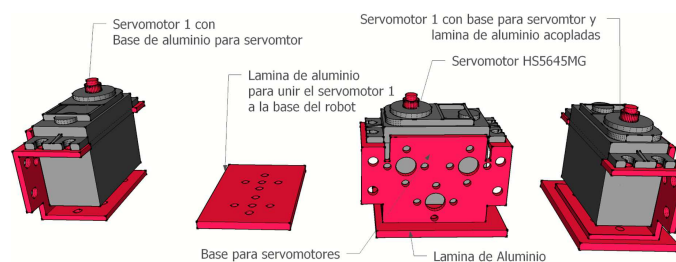


Figura 3.25: Servomotor 1 y sus componentes Fuente: Propia.

- **Servomotor 2, eslabón 1 y sus componentes:**

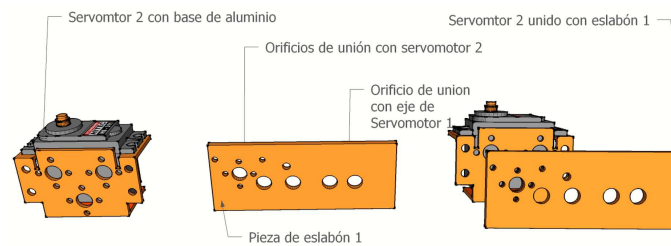


Figura 3.26: Servomotor 2 y sus componentes. Fuente: Propia.

- **Servomotor 3, eslabón 2 y sus componentes:**

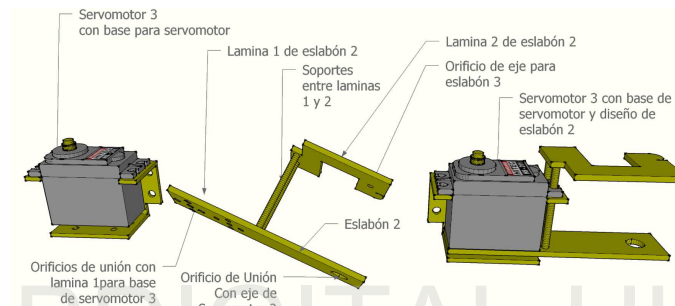


Figura 3.27: Servomotor 3 y sus componentes. Fuente: Propia.

- **Eslabón 3 y sus componentes:**

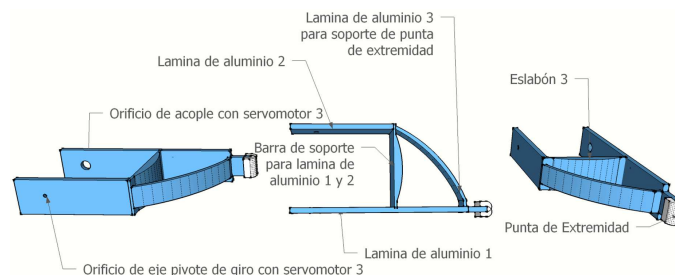


Figura 3.28: Eslabón 3 y sus componentes. Fuente: Propia.

Uniendo todas las piezas para hacer el ensamble del robot completo, se tiene el prototipo denominado Hexpodv1, ver Figura 3.29, como resultado del diseño de este capítulo.

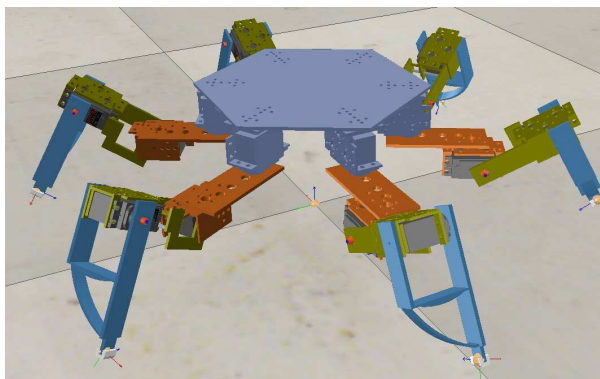


Figura 3.29: Prototipo de robot hexápodo Hexapodv1, implementado en software de simulación robótica *V REP EDU*. Fuente: Propia.

Los planos isométricos correspondientes a cada una de las piezas utilizadas para componer el robot Hexapodv1, se encuentran descritos en la sección de apéndices en el apéndice A; donde se tiene detalle de cada una de las piezas en escala milimétrica respecto a las medidas reales del robot.

3.9 Área de trabajo del robot

El área de trabajo del robot esta formada por los puntos en el espacio que las extremidades o sus efectores finales pueden alcanzar, moviéndose desde su base en todo el rango de movimiento válido de sus actuadores. Para un robot caminante a diferencia de un robot industrial que usualmente poseen bases fijas, el área de trabajo esta denotada por el espacio en el que sus apéndices pueden moverse de manera libre, bien sea para poder desplazarse en la superficie de contacto o en alguna trayectoria o secuencia de puntos dada en el espacio alcanzable por este.

De manera aislada, tomando en cuenta las especificaciones de diseño de las extremidades del prototipo, se tiene que los rangos de movimiento de cada una de sus articulaciones están restringidas por el rango de movilidad de los actuadores, dado por 180 grados. Para el servomotor dos y tres, es posible utilizar el rango completo de movilidad, no así para el servomotor uno, que por estar acoplado a la base su rango de movimiento se restringe a solo 140 grados para evitar posibles colisiones de

la estructura de la extremidad con los vértices de la base o posibles contactos que interfieran con el movimiento entre extremidades.

Para describir el área de trabajo de las extremidades del robot, se hace uso de la de un *script* en *Matlab* para dibujar puntos discretos cada cierta separación, y así poder observar el rango de movimiento conjunto de toda la extremidad, marcando en el espacio solo aquellos puntos alcanzables por la punta de la extremidad. Ver Figura 3.30 y 3.31

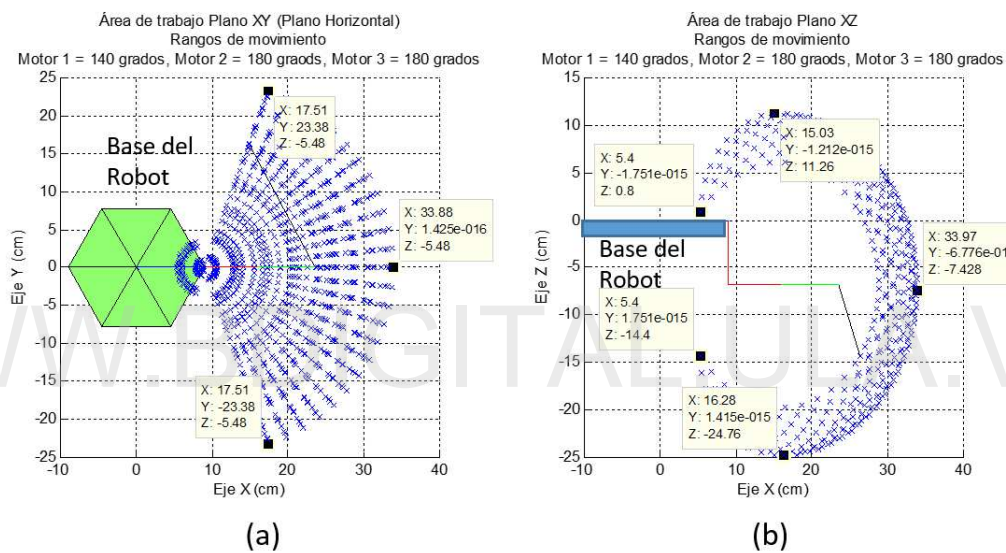


Figura 3.30: Área de trabajo muestreada para una extremidad del robot. (a) Área de trabajo plano XY, (b) Área de trabajo plano XZ. Fuente: Propia.

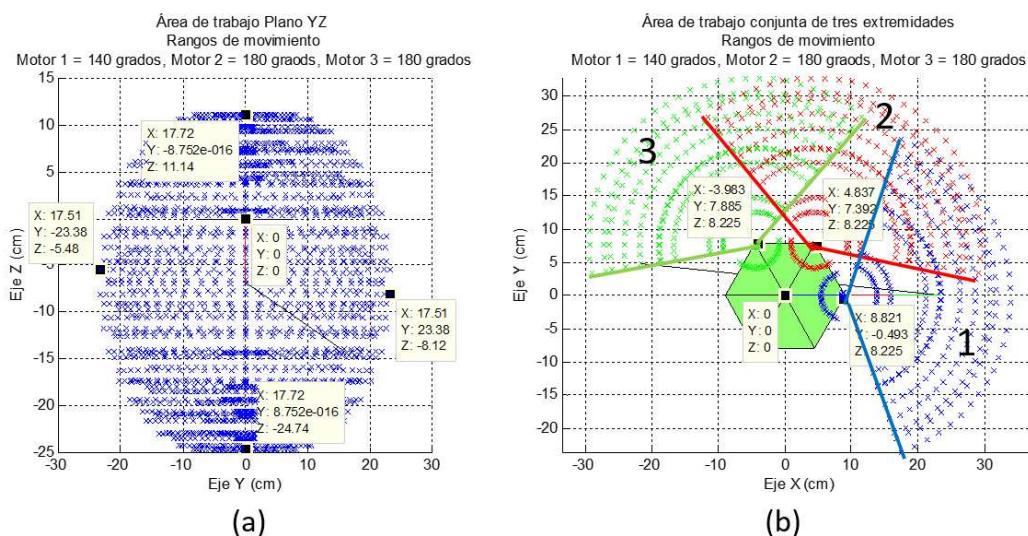


Figura 3.31: Área de trabajo muestreada las extremidades del robot. (a) Área de trabajo para extremidad única plano YZ, (b) Área de trabajo conjunta para tres extremidades. Fuente: Propia.

En la Figura 3.30(a), 3.30(b) y 3.31(a) se puede notar el espacio de trabajo en los planos XY, XZ y YZ, que en general describen un área considerable para poder efectuar movimientos libremente alrededor de la estructura. Los puntos seleccionados están denotados para poder tener una apreciación de las dimensiones del área en cada uno de los ejes, respecto al sistema de referencia en la base del robot. De esta Figuras se tiene que el desplazamiento horizontal en el eje X tiene un rango aproximado de 5.15 cm (ancho de la banda de puntos de la Figura 3.30(b)), mientras que el desplazamiento total en dicha coordenada esta dado por 28.57 cm. En el eje Z, se tiene una banda máxima de movimiento de 5.15 cm, con un desplazamiento total en esta coordenada de 36 cm, mientras que en el eje Y se tiene un desplazamiento total de 46.76 cm. Describiendo así un amplio rango posible para la generación de posiciones de locomoción de la extremidad.

Por último, se tiene la gráfica de la Figura 3.31(b), en la que se muestra el área de solapamiento entre las áreas de trabajo de dos extremidades, que abarca unos 70 grados de área conjunta entre extremidades, lo cual brinda una amplia posibilidad

de utilizar dos herramientas de manera simultánea a modo de pinzas o herramientas multipropósito.

3.10 Especificaciones generales del prototipo

Se procede a describir las características respecto a longitud, peso y rangos de movimiento del prototipo diseñado en la Tablas 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12.

Peso total de una extremidad desacoplada de la estructura

Tabla 3.9: Peso total aproximado de una extremidad desacoplada de la estructura

Elemento	cantidad	peso (g)	peso total (g)
Servomotores	3	54	162
Eslabones	3	50	150
Componentes varios uniones mecánicas	1	35	30
Peso estimado de cableado	1	30	30
Punta de contacto de extremidades	3	35	105
Peso total aprox. de extremidad individual			477

Tabla 3.10: Peso total aproximado del robot con todos sus componentes y piezas

Elemento	cantidad	peso (g)	peso total (g)
Servomotores en el aire	18	54	972
Eslabones en el aire	18	50	900
Componentes varios uniones mecánicas	1	150	150
Controlador de servomotores	1	85	85
Batería 7,4 v	1	275	275
Batería 11,1 v	1	113	113
<i>Raspberry Pi B+</i>	1	80	80
Reguladores de voltaje	6	35	210
Base del hexápodo	1	255	255
Peso estimado de cableado	1	150	150
Punta de contacto de extremidades	6	35	210
Carga útil	1	500	500
Peso total aproximado del robot			3900

Tabla 3.11: Rango de movimiento de los actuadores

Elemento	Rango de movimiento (grados)
Actuador 1	140
Actuador 2	180
Actuador 3	180

Dimensiones del robot, considerando al eje Z como altura, Eje Y como largo (profundidad) y al eje X como ancho.

Tabla 3.12: Dimensiones del robot virtual ensamblado

Escenario/Posición	Alto (cm)	Largo (cm)	Ancho (cm)
Extremidad aislada (Eje actuador 1 hasta punta extremidad) ($\theta_1 = 0; \theta_2 = 0; \theta_3 = 0$)	9.0	6.8	25
Robot extendido en la superficie. ($\theta_1 = 0; \theta_2 = 0; \theta_3 = 0$)	8.76	68	68
Robot erguido. ($\theta_1 = 0; \theta_2 = 90; \theta_3 = 0$)	24.95	35.8	35.8
Robot extremidad flexionada. ($\theta_1 = 0; \theta_2 = 90; \theta_3 = 90$)	16.1	53.2	53.2

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Capítulo 4

Modelado y Control

Introducción

En el presente capítulo se procede a obtener diversos modelos de interés que brinden la suficiente información para luego realizar control del movimiento de la estructura del sistema, es decir, poder posicionar y controlar cada una de las articulaciones que conforman las seis extremidades del robot; así como poder saber la posición de cada uno de los eslabones, ángulos de cada actuador, la ubicación de la base de la estructura y su orientación.

Como primer paso, se procede a modelar la estructura del robot utilizando la representación de Denavit-Hatenberg (D-H), a fin de poder obtener un modelo que nos permita posicionar individualmente cada una de las extremidades, conocida su longitud, ángulo de cada articulación y posición relativa respecto a la base del robot o a un sistema de referencia solidario a la base, denominado también *POV (Point of view)* o punto de vista alternativo. A través de dicho modelado es posible obtener la cinemática directa e inversa del robot, con las que se puede alcanzar cualquier punto del espacio, siempre que sea morfológicamente posible, según las dimensiones y capacidades de movimiento de las extremidades, es decir, que el punto que se quiera alcanzar este dentro del área de trabajo respectivo a cada extremidad; bien sea posicionando las extremidades según la asignación definida de valores angulares para

cada articulación en algún punto del espacio (cinemática directa) u obteniendo los valores angulares necesarios para cada articulación respecto a una posición específica requerida en el espacio (cinemática inversa).

Posteriormente, se procede a obtener un modelo de interés con el que se pueda describir la dinámica de los actuadores, representados en este caso por los servomotores seleccionados en el capítulo de diseño (capítulo 3), dicho modelado se realiza tomando en cuenta las características de los actuadores, a fin de obtener una representación aproximada de su comportamiento. Con el modelo completo de los servomotores, se procede a tratar cada sistema actuador-eslabón, que conforman la estructura de la extremidad, análogamente, a modo de un péndulo simple, considerando las características de cada eslabón como lo son: su peso, longitudes e inercias respectivas en cada uno de los casos.

Por último, se procede a diseñar controladores para cada uno de los sistemas actuador-eslabón, a fin de regular la acción y movimiento de cada articulación del robot, tratando de obtener como objetivo una respuesta sobreamortiguada, para evitar el deterioro de los actuadores por acciones mecánicas que puedan afectar los componentes internos, así como la regulación de la velocidad de estos para mantenerla dentro del rango de operación máximo del componente, con la meta principal de lograr alcanzar la posición de referencia requerida para la articulación al momento de ejecutar o poner en marcha algún patrón de locomoción específico. De igual forma con los controladores a diseñar, se pretende lograr un movimiento suave y controlado a fin de poder obtener un movimiento lo más armónico posible de toda la extremidad o robot según sea el caso.

4.1 Modelado de la estructura

Como se describe en el apartado anterior, en referencia al término modelado, se desea lograr obtener una representación del robot que permita conocer en todo momento la posición de los eslabones correspondientes a cada extremidad, ángulo de operación

de cada articulación y la posición y orientación de la base, respecto a un sistema de referencia propio o con respecto a otro sistema de referencia solidario que esté ubicado en otro punto del espacio.

Haciendo uso de la técnica de modelado para la representación de extremidades robóticas desarrolladas por Denavit-Hatenberg, es posible obtener un modelo que satisfaga los requerimientos descritos; que además con la fusión de las operaciones espaciales posibles de realizar, definidas mediante las matrices de transformación homogénea, también utilizadas por la representación Denavit-Hatenberg (DH), es posible obtener la posición de cada elemento de interés respecto a su sistema de referencia relativo o respecto a un sistema solidario que sea necesario definir, como por ejemplo, uno que permita ubicar al robot en un espacio definido o entorno de operación con solo conocer la posición y orientación de su base.

4.1.1 Denavit-Hatenberg

Usualmente los pasos descritos por Denavit-Hatenberg (DH) para obtener una representación espacial relacional entre un conjunto de eslabones, es utilizada con mayor frecuencia en robots de base fija como los implementados en áreas de trabajos industriales; definiendo la posición relativa del efector final del robot respecto a su posición fija de operación, donde usualmente dicho robot está formado por una sola extremidad o brazo a controlar.

Para el caso particular del robot hexápodo diseñado en este proyecto de grado, Hexapodv1, se tiene la característica particular de no poseer una sola extremidad, si no seis extremidades con múltiples articulaciones, lo que dispone a debate si es posible utilizar dicha representación de Denavit-Hatenberg para obtener un modelo que relacione la base del robot con cada una de sus extremidades.

Dado que la representación de Denavit-Hatenberg permite modelar una sucesión de eslabones respecto a una base, se puede aplicar dicho método a modo de tener la representación de las seis extremidades del robot, con sus respectivas articulaciones,

distribuidas de manera simétricamente radial alrededor de un punto central o eje de giro; donde cada extremidad se puede tratar como un caso aislado de un brazo robótico independiente del movimiento de las demás extremidades que componen la estructura completa. Visualmente se tiene el ejemplo del prototipo del robot diseñado en la Figura 4.1.

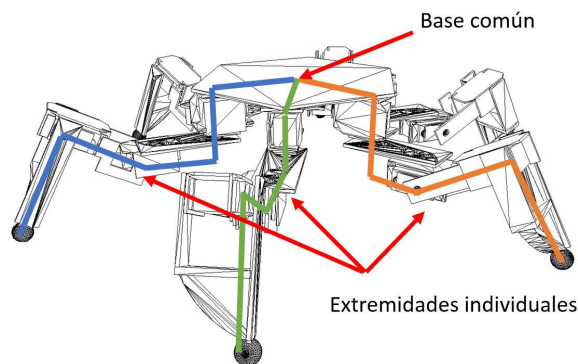


Figura 4.1: Analogía entre extremidades del robot hexápodo y base común con múltiples extremidades. Fuente: Propia.

Donde cada brazo estaría separado simétricamente sesenta grados del siguiente, ubicando así en cada arista de la base hexagonal cada una de las seis extremidades que conforman el robot. Se procede a definir la enumeración de cada una de las extremidades distribuidas alrededor de la base para poder identificarlas de manera puntual, como se muestra en la Figura 4.2. Aunque el robot presenta en su locomoción la posibilidad de realizar movimientos omnidireccionales se le define, de igual forma, un sistema de referencia solidario a la base de la estructura para poder tener una referencia con la cual poder medir su posición y orientación en el espacio. La asignación de los identificadores de las extremidades se hace en sentido anti horario, empezando con la letra A para la primera extremidad posicionada en el eje X y terminando en la letra F ubicada a 300 grados en sentido anti horario de giro respecto al eje de las ordenadas o -60 grados respecto al mismo.

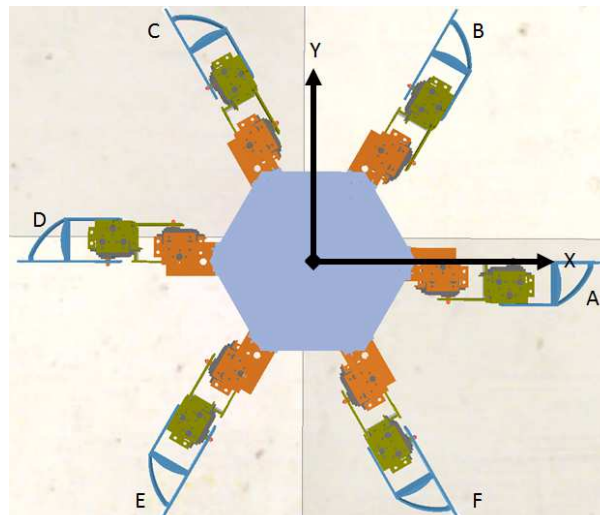


Figura 4.2: Asignación de identificador para cada extremidad del robot. Fuente: Propia.

Teniendo ya la estructura y un diseño de prototipo, es necesario conciliar el sistema de referencia base, las dimensiones y ubicación de cada uno de los componentes del modelo base de la extremidad propuesto en la Figura 3.24, a modo de poder aplicar los pasos del algoritmo DH de manera óptima. Se procede a determinar cada longitud necesaria de la extremidad como se muestra en la Figura 4.3, según las especificaciones logradas en el capítulo 3.

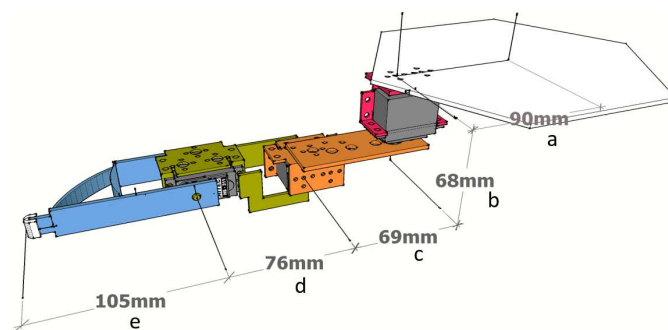


Figura 4.3: Dimensiones de eslabones respecto a la base y cada eje de la extremidad prototipo. Fuente: Propia.

Se tiene la Tabla 4.1, con estas medidas.

Tabla 4.1: Distancias representativas para DH

Distancia	Valor (m)	Descripción
a	0,09	Distancia horizontal desde la base del robot al eje de servomotor uno.
b	0,068	Distancia vertical del eje de rotación de servomotor 1 e eje de servomotor dos.
c	0,069	Distancia horizontal desde el eje de servomotor uno a servomotor dos.
d	0,076	Distancia horizontal desde el eje de servomotor dos a servomotor tres.
e	0,105	Distancia horizontal desde el eje de servomotor tres hasta punta de extremidad.

Con estas dimensiones definidas se procede a obtener la solución de la cinemática directa e inversa del robot.

Cinemática directa

Se procede a hallar la representación de la extremidad según la técnica de modelado de Denavit-Hatenberg para la solución del problema cinemático directo. Como se describe en la sección de diseño 3.3, el prototipo posee tres grados de libertad por extremidad, pero a su vez como se poseen seis extremidades en vez de solo una como la mayoría de los robots industriales, se deriva en la necesidad de añadir un grado de libertad adicional previo a la posición del servomotor uno o grado de libertad uno, denominado grado de libertad cero, para poder distribuir cada una de las extremidades alrededor de la base del robot; cada sesenta grados como se describe en la sección anterior, ver en la Figuras 4.2 y 4.1.

Siguiendo el algoritmo planteado por Denavit-Hatenberg, estableciendo de manera adecuada cada sistema de referencia para cada eslabón, tomando en cuenta las orientaciones de cada eje de operación de los actuadores presentes y considerando las distancias entre cada eje, se puede elaborar la siguiente gráfica de la cual se obtienen los parámetros necesarios para resolver el problema cinemático, ver Figura 4.4.

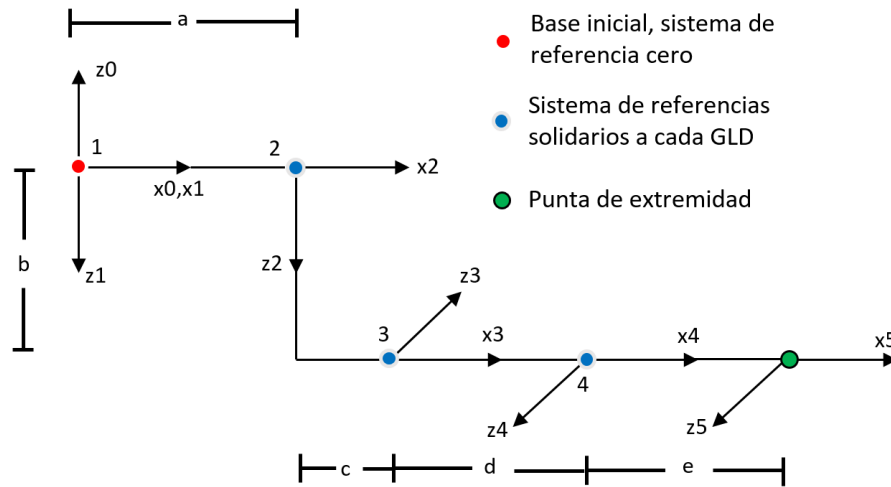


Figura 4.4: Representación del sistema de coordenadas de referencia mediante método DH para la extremidad prototipo. Fuente: Propia.

Con los parámetros identificados, es posible completar la Tabla 2.1 para la extremidad diseñada. Ver 4.2.

Tabla 4.2: Parámetros Denavit-Hatemberg para una extremidad prototipo

Articulación	θ_i	d_i	α_{i-1}	a_{i-1}
0	θ_0	0	0	0.09
1	θ_1	-0.068	-90	0.069
2	θ_2	0	-180	0.076
3	θ_3	0	0	0.105

Para corroborar que los parámetros han sido seleccionados y referenciados de manera adecuada se procede a hacer una prueba en el simulador para brazos robóticos de MRPT (*Mobile Robot Programming Toolkit*) (MRPT, 2013). Tomando los valores de la Tabla 4.2 y un ángulo para cada articulación de cero grados, se tiene la siguiente Figura 4.5. Donde el eslabón cero (0), representa la distancia a y b que se debe desplazar la estructura de la extremidad para posicionar el primer grado de libertad.

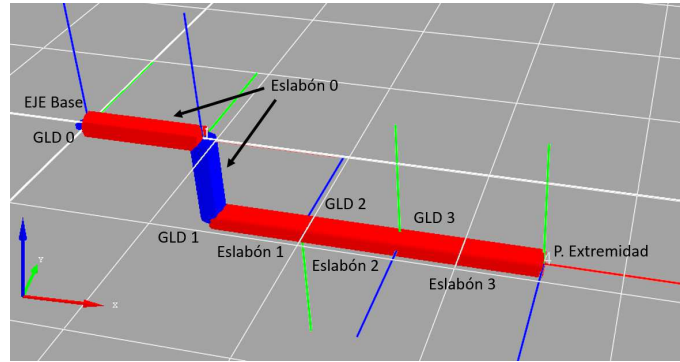


Figura 4.5: Implementación de modelo DH de la extremidad prototipo en *Software MRPT RAK*. Fuente: Propia.

Dado los resultados previos, se procede a obtener las matrices de transformación correspondientes a cada articulación. Haciendo uso de la expresión (2.17) para cada conjunto de parámetros, se obtienen los siguientes resultados o matrices de transformaciones homogéneas de las expresiones (4.1), (4.2), (4.3) y (4.4):

$$A_{01} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_0) & 0 & 0.09 * \cos(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) & 0 & 0.09 * \sin(\theta_0) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) & 0.069 * \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0.069 * \sin(\theta_1) \\ 0 & -1 & 0 & -0.068 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 0.076 * \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2) & 0 & 0.076 * \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$A_{34} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & 0.105 * \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0.105 * \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Con estas matrices de transformación se puede hallar la posición general desde la base del robot hasta la punta de la extremidad, mediante el uso de la expresión (2.15); de igual, forma estas matrices permiten obtener de manera aislada las transformaciones hasta cualquier punto de interés que se requiera, realizando la operación de transformación de la cadena cinemática solo hasta donde se desee conocer la posición, es decir, se puede hallar la posición de la coxa, fémur y tibia del robot de manera independiente respecto a su base, mediante las siguientes expresiones:

- **Base-coxa:** Posición desde la base del robot hasta base de inicio de la coxa, mediante la expresión (4.5):

$${}^0T_1 = {}^0_1 A \quad (4.5)$$

- **Base-fémur:** Posición desde la base del robot hasta base de inicio del fémur, mediante la expresión (4.6):

$${}^0T_2 = {}^0_1 A {}^1_2 A \quad (4.6)$$

- **Base-tibia:** Posición desde la base del robot hasta base de inicio del tibia, mediante la expresión (4.7):

$${}^0T_3 = {}^0_1 A {}^1_2 A {}^2_3 A \quad (4.7)$$

- **Base-punta de extremidad:** Posición desde la base del robot hasta el final de la extremidad o punto de contacto, mediante la expresión (4.8):

$${}^0T_4 = {}^0_1 A {}^1_2 A {}^2_3 A {}^3_4 A \quad (4.8)$$

Para corroborar que dichas expresiones de transformación representan de manera concreta la solución de la cinemática directa de cada una de las secciones mencionadas anteriormente, se procede a realizar un mímico o Figura de simulación estática en el software matemático *Matlab* (MathWorks, 2016) (ver Figura 4.6), permitiendo

obtener como primer producto la posición de cualquier eslabón respecto al sistema de referencia centrado en la base.

Para poder distribuir cada uno de los seis apéndices alrededor de la estructura, se procede a seleccionar el valor de θ_0 para cada extremidad, de sesenta en sesenta grados, con el fin de posicionar cada una de ellas en su posición de operación respecto a la base del robot; este valor de θ_0 se mantiene fijo para cada extremidad, solo se usa como grado de libertad auxiliar. Se tiene el valor θ_{0_i} para cada extremidad representado en la Tabla 4.3, asignados del mismo modo que en la Figura 4.2.

Tabla 4.3: Variación de θ_0 respecto a la distribución de la extremidad

Extremidad	Variación de θ_{0_i} (<i>grados</i>)
A	0
B	60
C	120
D	180
E	240
F	300

Con el valor de θ_0 definido para cada extremidad, se obtiene el modelo del hexápodo representado en la Figura 4.6, para poder probar el funcionamiento de la cinemática directa. (El código desarrollado para dibujar dicho mímico se encuentra en la sección de apéndices, Apéndice A).

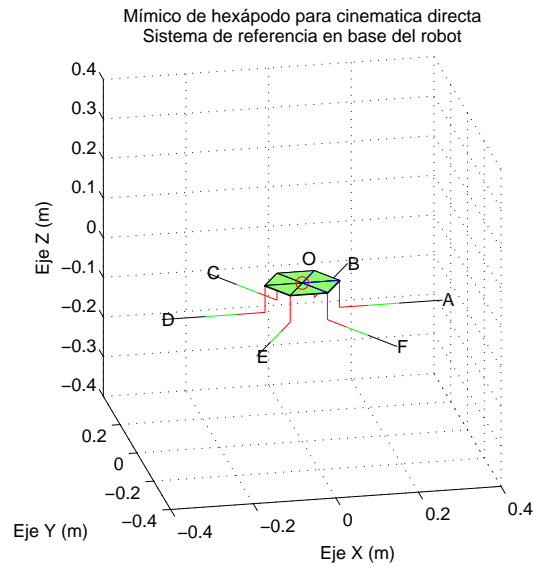


Figura 4.6: Representación del robot hexápodo implementado en *Matlab*, para comprobación de cálculo de cinemática directa. Fuente: Propia.

Con dicho modelo funcionando, se puede proceder a realizar un conjunto de pruebas básicas asignando sets de ángulos para cada una de las extremidades. Este set de ángulos, se asigna de modo que se pueda observar una distancia característica en cada uno de los ejes coordenados X, Y y Z que sea representativa de la suma de las dimensiones de los eslabones. Se procede a ubicar representativamente las extremidades, A, B, C y D según la Tabla 4.4 de ángulos para comprobar el funcionamiento de la cinemática directa y así validar su funcionamiento.

Tabla 4.4: Prueba de cinemática directa para modelo de la estructura en *Matlab*

Extremidad	Valor θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	θ_3 (rad)	Valor esperado (x, y, z)	Valor obtenido (x, y, z)
A	0	0	0	$(0.34, 0, -0.068)$	$(0.34, 0, -0.068)$
B	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$(0.0795, 0.1377, 0.113)$	$(0.0795, 0.1377, 0.113)$
C	0	$\frac{\pi}{2}$	0	$(-0.0795, 0.1377, -0.249)$	$(-0.0795, 0.1377, -0.249)$
D	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$(-0.09, 0.25, -0.068)$	$(-0.09, 0.25, -0.068)$

Dichas posiciones de las extremidades se pueden apreciar en el resultado del mímico de la Figura 4.7, para cada uno de los sets de ángulos y puntos obtenidos.

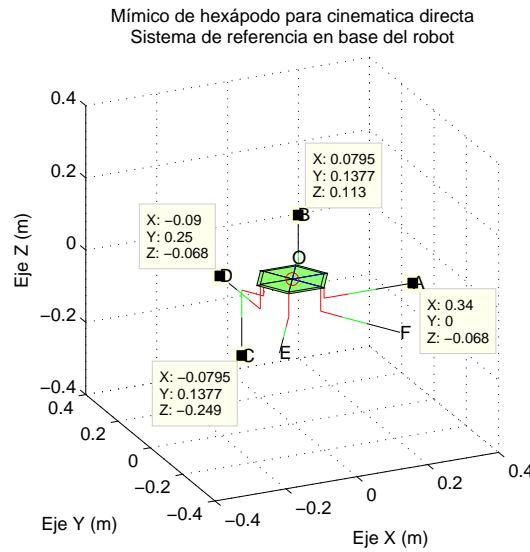


Figura 4.7: Representación de puntos para comprobación de cinemática directa.

Fuente: Propia.

Donde para la extremidad A, que está alineada con el eje X del sistema de referencia, se tiene una coordenada x que representa una distancia igual a la suma de las dimensiones de los eslabones a, c, d y e, que describe el alcance máximo de la extremidad en posición completamente horizontal como se observa en la expresión (4.9):

$$X^+ = a + c + d + e = 0.09m + 0.069m + 0.076m + 0.105m = 0.34m \quad (4.9)$$

De igual forma, con las extremidades B y C, respecto a sus coordenadas Z, B alcanzando la posición máxima en sentido Z positivo y C en sentido Z negativo respectivamente, como se puede observar en las expresiones (4.10) y (4.11):

$$Z^+ = -b + d + e = -0.068m + 0.076m + 0.105m = 0.113m \quad (4.10)$$

$$Z^- = -(b + d + e) = -(0.068m + 0.076m + 0.105m) = -0.249m \quad (4.11)$$

Así como la distancia en el eje Y positivo alcanzada por la extremidad D en la expresión (4.12):

$$Y^+ = c + d + e = 0.069m + 0.076m + 0.105m = 0.25m \quad (4.12)$$

De esta forma, queda comprobado el funcionamiento de la cinemática directa para el robot, el la cual será posible determinar cada una de las posiciones requeridas para el futuro uso al momento de describir y planear patrones de movimiento de las extremidades.

Cinemática inversa

La solución del problema cinemático inverso, se refiere a lograr determinar los valores en los que deberían posicionarse cada una de las articulaciones que componen la extremidad para alcanzar una posición específica en el espacio. La opción de resolver la cinemática inversa de manera gráfica, implica lograr conseguir el suficiente número de expresiones matemáticas y trigonométricas para lograr relacionar el punto objetivo en el espacio con los valores en los que deberían posicionarse cada una de las articulaciones. Para el caso del robot en desarrollo, dado que no está conformado por un solo brazo o extremidad, es necesario plantear un conjunto de ecuaciones que funcionen para cada una de las seis extremidades, sin importar su orientación respecto a la base.

Una vez determinados los ángulos de las articulaciones necesarios para poder alcanzar el punto en el espacio, se puede hacer uso de la cinemática directa con dichos valores para comprobar que efectivamente la extremidad llega esa posición.

Para obtener las relaciones trigonométricas entre un punto del espacio y los valores angulares de las articulaciones del robot, primero es necesario determinar el número de grados de libertad que intervienen en el movimiento de la extremidad, como elementos aislados, y el plano de acción en el que efectúa el movimiento de los mismos para lograr de esta manera descomponer el problema en problemas más simples. Como se menciona anteriormente la extremidad esta modelada con cuatro (4) grados de libertad, donde el grado de libertad inicial refiere al posicionamiento de las extremidades alrededor de la base de la estructura, dicho grado se mantiene

fijo y no presenta cambio alguno para efectos de locomoción, razón por la cual el problema cinemático inverso se ve reducido por el hecho de lograr conseguir el número de expresiones necesarias solo para los tres grados de libertad restantes.

Tomando como sistema de referencia principal el punto central de la estructura o base del robot, donde el eje Z representa la altura, el eje X los movimientos laterales hacia la izquierda y derecha y el eje Y el movimiento hacia adelante y atrás, se procede a describir los planos de acción o de movimiento de cada grado de libertad, para determinar cuales de estos actúan en planos comunes. Tomando como referencia el rango de movimiento posible de la extremidad prototipo diseñada de las Figuras 3.22 y 3.23, se puede observar que el grado de libertad uno tiene su plano de acción contenido en el plano XY y su eje de rotación en Z, por otro lado, los grados de libertad dos y tres tiene un eje de rotación paralelo, este eje está denotado por un eje paralelo, eje de las ordenadas o eje Y como referencia el plano de acción conjunto para ambos grados de libertad un plano paralelo al plano XZ, como se describe en la gráfica de la Figura 4.8. Estos planos de acción o referencia son solo planos auxiliares paralelos a los del sistema de referencia de la estructura; los mismos podrán ser girados alrededor de un eje definido para poder efectuar el movimiento de la extremidad.

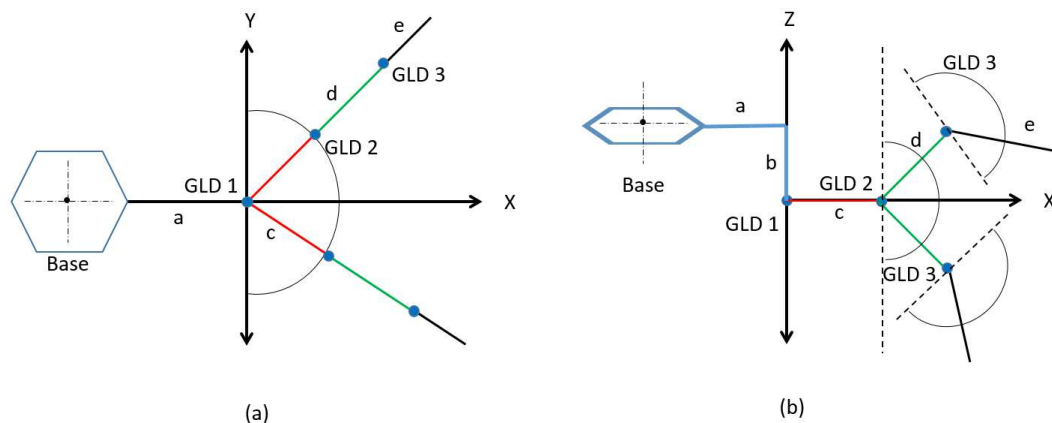


Figura 4.8: Planos de acción de los grados de libertad de la extremidad. (a) Grado de libertad 1 (Plano XY), (b) Grados de libertad dos y tres (Plano XZ). Fuente: Propia.

Observando la Figura 4.8(b), se puede notar que el plano en el que están contenidos

el rango de movimiento de los grados de libertad dos y tres es un plano paralelo al plano XZ, dicho plano tiene como eje o pivote el eje Z del cual se origina el vector c o eslabón c de la extremidad, como se puede observar en la Figura 4.8(a) dicho plano de movimiento de los últimos grados de libertad siempre será colineal con el vector del eslabón c gracias al diseño elegido para la extremidad; esta selección facilita la solución gráfica de la cinemática inversa.

En base a la Figura 4.8, se puede plantear un conjunto de relaciones vectoriales simples para poder relacionar las secciones que representan los eslabones de la extremidad, los planos de movimiento de cada grado de libertad y el punto en el espacio con coordenadas (x, y, z) que se desea alcanzar como objetivo de la cinemática inversa.

Para obtener el valor de θ_1 perteneciente al ángulo del primer grado de libertad se tiene la gráfica de la Figura 4.9, donde la longitud del eslabón a puede ser tomada como el vector, ver expresión (4.13):

$$|\vec{a}_i| = a \quad (4.13)$$

El vector \vec{o}_i representa el segmento de recta que une la base de la extremidad con el punto P_i , ver expresión (4.14).

$$\vec{o}_i = \vec{b}_i + \vec{c}_i + \vec{d}_i + \vec{e}_i \quad (4.14)$$

Cuyo módulo se puede expresar como en la expresión (4.15):

$$|\vec{o}_i| = |\vec{b}_i + \vec{c}_i + \vec{d}_i + \vec{e}_i| \quad (4.15)$$

En la expresión (4.16), \vec{r}_i es el vector que va desde la base del robot al punto objetivo P_i .

$$\vec{r}_i = \vec{a}_i + \vec{o}_i \quad (4.16)$$

Donde:

$$|\vec{r}_i| = |\vec{a}_i| + |\vec{o}_i| \quad (4.17)$$

Para el caso de la Figura 4.9, se selecciona el subíndice $i = 1$, para denotar el uso de las expresiones anteriores en la extremidad 1 o a del robot; dicho subíndice puede tomar los valores de $i = 1, 2 \dots 6$, según sea el caso de calculo para la cinemática inversa de cada extremidad en específico.

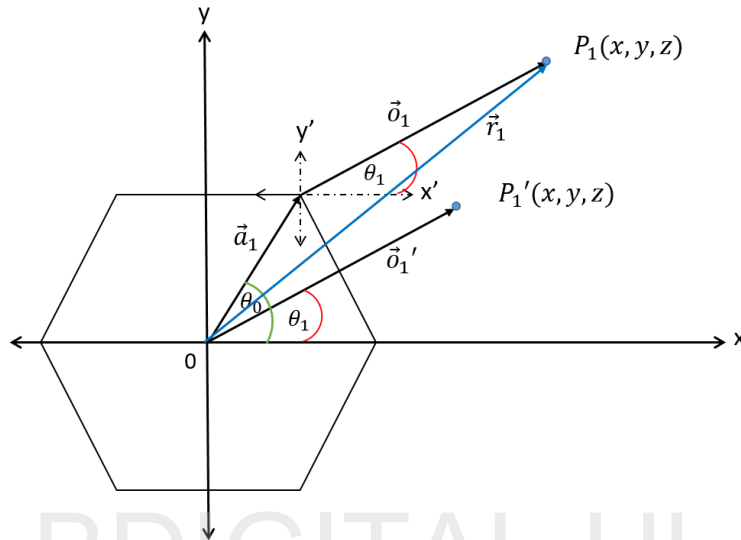


Figura 4.9: Gráfica para obtener ángulo θ_1 del grado de libertad uno (1). Fuente: Propia.

El ángulo θ_0 representa el ángulo para la distribución de las extremidades alrededor de la base, el ángulo θ_1 representa el valor de giro angular del grado de libertad uno, el vector \vec{r}_i representa el vector que va desde el punto origen del sistema de referencia del sistema XY hasta el punto P_i , el vector \vec{o}_i representa el vector que va del origen del sistema auxiliar $X'Y'$ al punto P_i paralelo al vector \vec{o}_i , que va del origen de XY a P'_i auxiliar, de los cuales se puede determinar el ángulo θ_1 mediante las coordenadas del punto $P_i (x_{p_i}, y_{p_i})$ o $P'_i (x_{p'_i}, y_{p'_i})$.

Tomando como referencia la gráfica de la Figura 4.9 y las consideraciones anteriores, se puede determinar el valor de θ_1 posicionando el punto de vista en el punto de salida del vector \vec{o}_i e inicio del vector \vec{a}_i a fin de poder plantear relaciones geométricas a partir de las coordenadas del punto P_i , como se observa en la gráfica de la Figura 4.10.

En la Figura 4.10, se denotan los nuevos ángulos $\theta_{0i}DH$ y $\theta_{1i}DH$ que representan la medición del ángulo positivo o negativo, de los vectores \vec{a}_i y \vec{o}_i respectivamente, respecto al eje X^+ y X'^+ , en sentido antihorario positivo y en sentido horario negativo. Se tiene que para los grados de libertad cero y uno el eje de giro es el eje coordenado Z^+ , saliendo del plano XY , el ángulo ^+DH positivo se mide en sentido antihorario y el ángulo ^-DH negativo en sentido horario, respecto al eje base X^+ . Se define dos valores adicionales $\theta_{0i}grafico$ y $\theta_{1i}grafico$, medidos en el mismo sentido de $\theta_{0i}DH$ y $\theta_{1i}DH$, dichos valores se utilizan complementariamente para determinar el valor de $\theta_{1i}DH$ mediante el uso de la función arcotangente con las coordenadas (X, Y) o (X', Y') del punto P_i o P'_i respectivamente.

Se establece un nuevo sistema de referencia en el extremo del vector \vec{a}_i cuyos ejes son $X\vec{a}'_{oi}$, $Y\vec{a}'_{oi}$ y su centro es $O\vec{a}'_{oi}$, donde la coordenada X de dicho sistema de referencia es colineal con la dirección del vector a_i ; este nuevo sistema de referencia es el sistema base para la medición del ángulo $\theta_{1i}DH$.

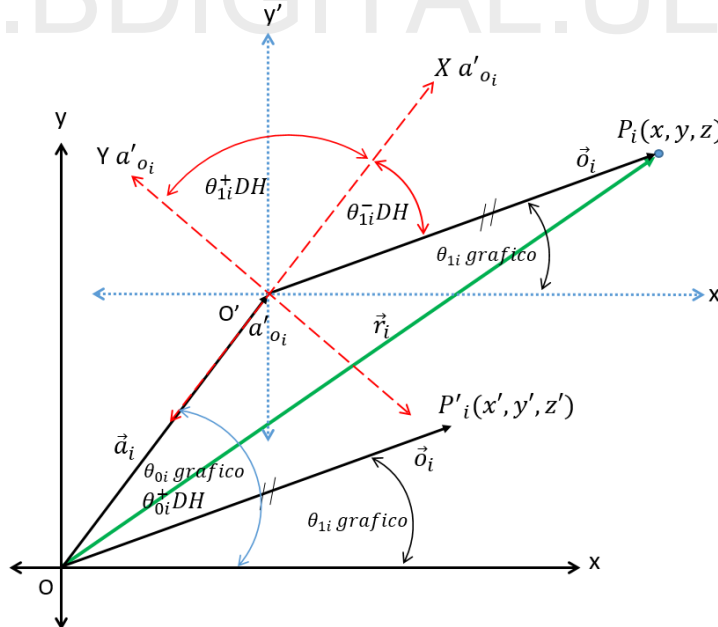


Figura 4.10: Gráfica para obtener ángulo θ_1 del grado de libertad uno (1). Fuente: Propia.

De la gráfica de la Figura 4.10 se pueden obtener las siguientes expresiones:

Las coordenadas de la base del vector \vec{o}_i , de la expresión (4.18):

$$\vec{o}_i = \vec{r}_i - \vec{a}_i \quad (4.18)$$

El ángulo gráfico $\theta_{1i}gráfico$ mediante la expresión (4.19):

$$\theta_{1i}gráfico = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) = \arctan\left(\frac{y'}{x'}\right) \quad (4.19)$$

Donde $\theta_{1i}DH$ que es valor de interés se obtiene de las expresiones (4.20) y (4.21):

$$\theta_{1i}DH = \theta_{1i}gráfico - \theta_{0i}gráfico \quad (4.20)$$

$$\theta_{0i}DH = \theta_{0i}gráfico \quad (4.21)$$

Obteniendo así el ángulo que representa el $\theta_{1i}DH$ requerido para la comprobación a través de la cinemática directa.

Ahora se procede a determinar los valores de θ_2 y θ_3 para los grados de libertad dos y tres respectivamente. Dado que los eslabones posicionados por estos grados de libertad forman parte del en el vector \vec{o}_i , se puede trabajar con el sistema de referencia centrado en O' referenciado en la Figura 4.10, que no es más que la representación del vector \vec{o}_i en un sistema de referencia aislado, a fin de hacer más fácil la formulación de las expresiones necesarias para determinar las relaciones geométricas. Se tiene la siguiente gráfica del sistema de referencia centrado en O' , ver Figura 4.11.

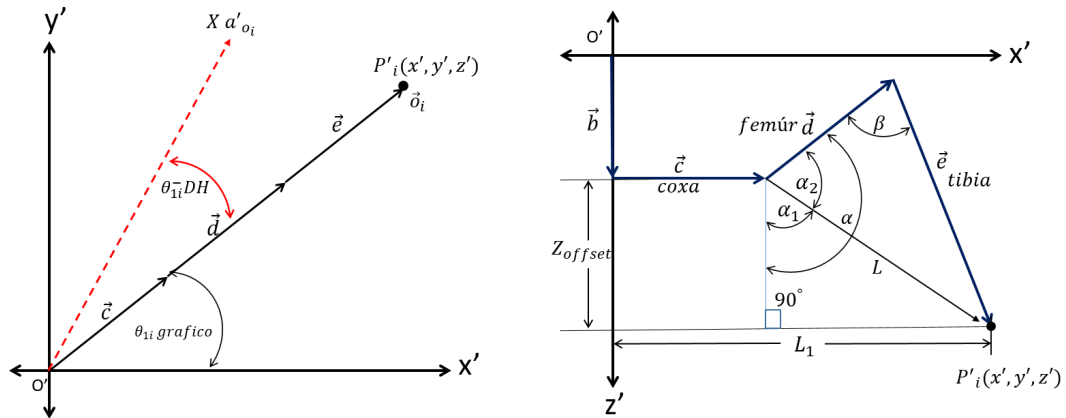


Figura 4.11: Gráfica de referencia para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 . Fuente: Propia.

De la cual se pueden obtener las siguientes relaciones geométricas para obtener los ángulos α y β . Se procede a obtener la proyección de la magnitud de la coxa, o vector \vec{c} , conocido previamente el valor de $\theta_{1igrafo}$:

$$x'_c = \cos(\theta_{1igrafo}) |c| \quad (4.22)$$

$$y'_c = \sin(\theta_{1igrafo}) |c| \quad (4.23)$$

$$coxa = \sqrt{(x'_c)^2 + (y'_c)^2} \quad (4.24)$$

Para L_1 se tiene:

$$L_1 = \sqrt{(x'_o)^2 + (y'_o)^2} \quad (4.25)$$

Z_{offset} se obtiene mediante la expresión (4.26):

$$Z_{offset} = |b - z'| \quad (4.26)$$

Obteniendo L mediante la expresión (4.27):

$$L = \sqrt{(Z_{offset})^2 + (L_1 - coxa)^2} \quad (4.27)$$

Con estos valores base, se procede a determinar cada uno de los ángulos necesarios para obtener los valores de θ_2 y θ_3 . Se tiene la siguiente expresión (4.28):

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \left(\frac{Z_{offset}}{L} \right) \quad (4.28)$$

Utilizando las relaciones geométricas para los ángulos y lados de un triángulo, como en la Figura 4.12:

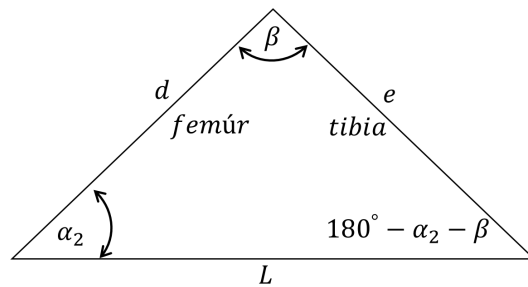


Figura 4.12: Gráfica de referencia para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 . Fuente: Propia.

Se obtienen las expresiones para hallar β y α_2 :

$$L^2 = (femur)^2 + (tibia)^2 - 2 (femur) (tibia) \cos \beta \quad (4.29)$$

donde:

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{(L)^2 - (tibia)^2 - (femur)^2}{-2 (tibia) (femur)} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{(L)^2 - (e)^2 - (d)^2}{-2 (e) (d)} \right) \quad (4.30)$$

para α_2 se tiene:

$$tibia^2 = (femur)^2 + (L)^2 - 2 (femur) (L) \cos \alpha_2 \quad (4.31)$$

donde:

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{(tibia)^2 - (femur)^2 - (L)^2}{-2 (L) (femur)} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{(e)^2 - (d)^2 - (L)^2}{-2 (L) (d)} \right) \quad (4.32)$$

para obtener α , con el resultado para α_2 se tiene que:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (4.33)$$

Con las expresiones descritas anteriormente es posible obtener los valores para cada uno de los ángulos de las articulaciones que componen la extremidad del robot; pero previo a esto es necesario resolver un conjunto de singularidades geométricas que se pueden presentar para poder obtener la solución del problema cinemático inverso, debido a que existen puntos en los cuales se puede tener dos sets o más de ángulos que permitan alcanzar la misma posición en el espacio.

Para este problema de singularidades angulares, se propone como solución seleccionar previamente la posición que se desea de la rodilla para la extremidad, es decir, seleccionar si se desea que su ángulo sea convexo o cóncavo según sea la función o tarea a completar por la extremidad; designando la rodilla arriba para generar patrones de locomoción principalmente y la rodilla abajo para alcanzar algún punto en el espacio en la fase de balanceo, sin dejar a fuera la posibilidad de hacer uso de

esta posición de manera inversa.

Dado que de momento solo se conocen los ángulos θ_2 y θ_3 de manera gráfica mediante las expresiones obtenidas para α y β respectivamente, es necesario hallar la representación de dichos ángulos en base a la formulación de Denavit-Hatemberg de la misma manera que se hizo con θ_1 .

Para resolver estos problemas se proponen los siguientes posibles casos de operación para la extremidad, a modo de lograr determinar la representación de los ángulos θ_2 y θ_3 en base a los valores de α y β respecto al eslabón anterior. Se procede a denotar las condiciones en las cuales se basan cada uno de estos escenarios, como se describe en las gráficas de las Figuras 4.13 y 4.14. Para resolver este problema de singularidad se procede a clasificar los casos en torno a las siguientes consideraciones:

- Si el valor que toma el ángulo α es $> 90^\circ$ o $< 90^\circ$ medido desde el eje Z^+ ,
- Si el valor de la coordenada z del punto es $> b$ o $< b$,
- la posición requerida para la rodilla de la extremidad determinada por el sentido de medición del θ_3 .

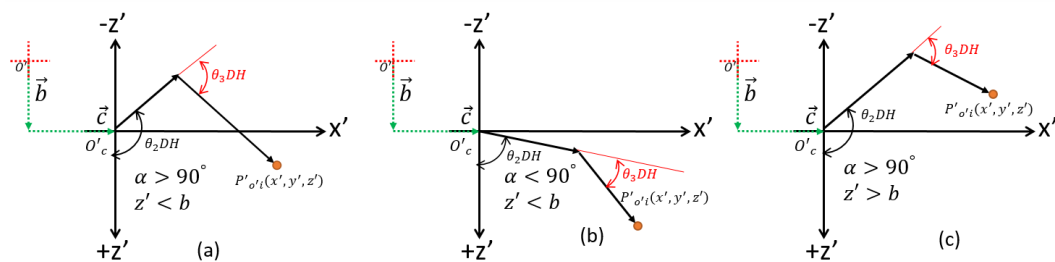


Figura 4.13: Gráfica de referencia para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla arriba. Fuente: Propia.

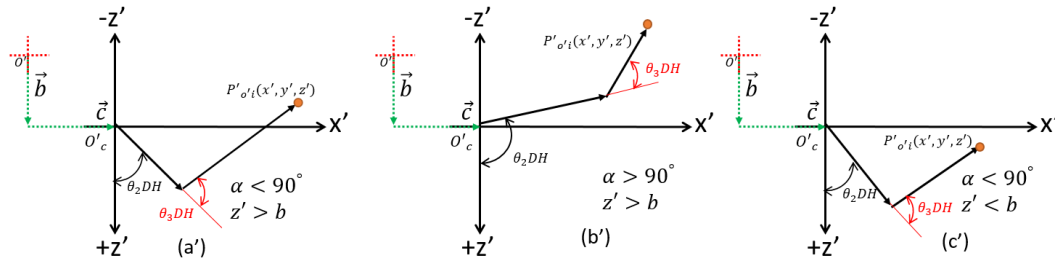


Figura 4.14: Gráfica de referencia para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla abajo. Fuente: Propia.

Teniendo esto en cuenta se procede a formular cada uno de los siguientes casos, en base a las gráficas de las Figuras 4.13 y 4.14:

- **Caso a** para $\alpha > 90^\circ$ y $z' < b$, ver Figura 4.15:

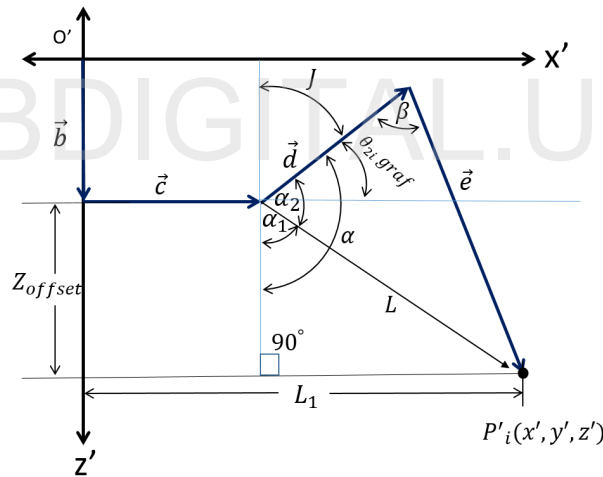


Figura 4.15: Gráfica de referencia caso a para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla arriba. Fuente: Propia.

Donde:

$$J^\circ = \alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (4.34)$$

$$\theta_{2i}gráfico_x = 90^\circ - J^\circ \quad (4.35)$$

$$\theta_{2i}DH = -\theta_{2i}gráfico_x = -(90^\circ - J^\circ) \quad (4.36)$$

- **Caso b** para $\alpha < 90^\circ$ y $z' < b$, ver Figura 4.16:

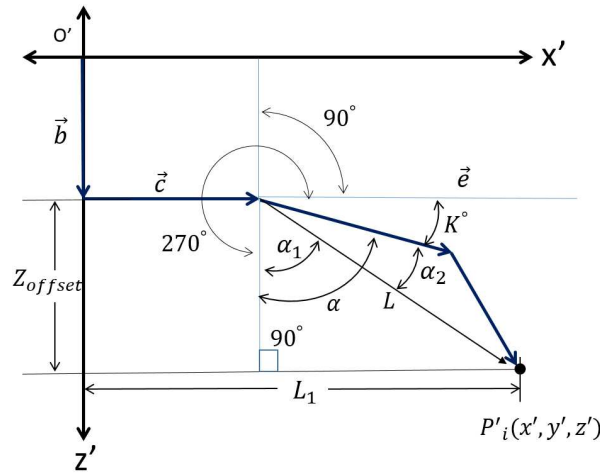


Figura 4.16: Gráfica de referencia caso b para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla arriba. Fuente: Propia.

Donde:

$$K^\circ = 90^\circ - \alpha \quad (4.37)$$

$$\theta_{2i} DH = 270^\circ + \alpha \quad (4.38)$$

- **Caso c** para $\alpha > 90^\circ$ y $z' > b$, ver Figura 4.17:

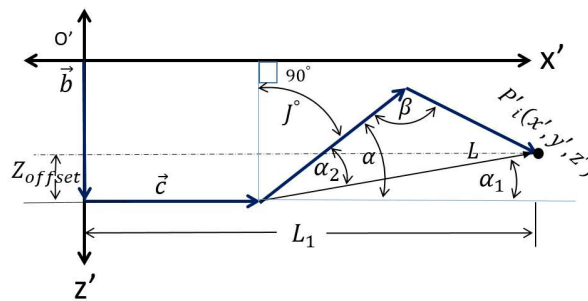


Figura 4.17: Gráfica de referencia caso c para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla arriba. Fuente: Propia.

Donde:

$$\alpha_{1aux} = \cos^{-1} \left(\frac{Z_{offset}}{L} \right) \quad (4.39)$$

$$\alpha_1 = 180^\circ - \alpha_{1aux} \quad (4.40)$$

$$J^\circ = 180^\circ - \alpha \quad (4.41)$$

$$\theta_{2i}gráfico_x = 90^\circ - J^\circ \quad (4.42)$$

$$\theta_{2i}DH = -\theta_{2i}gráfico_x \quad (4.43)$$

- **Caso a'** para $\alpha < 90^\circ$ y $z' > b$, ver Figura 4.18:

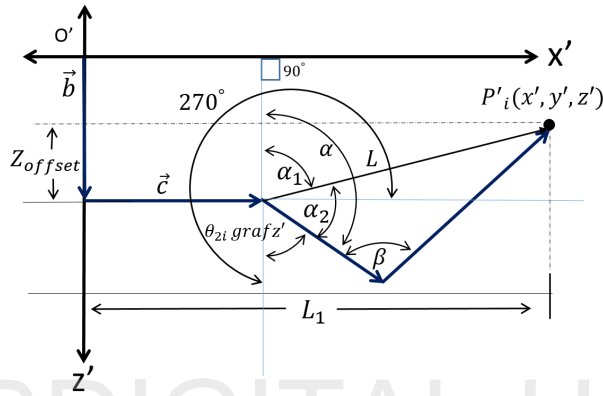


Figura 4.18: Gráfica de referencia caso a' para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla abajo. Fuente: Propia.

Donde:

$$\theta_{2i}gráfico_{-z} = 180^\circ - \alpha \quad (4.44)$$

$$\theta_{2i}gráfico_x = 270^\circ - \theta_{2i}gráfico_{z'} \quad (4.45)$$

$$\theta_{2i}gráfico_x = 270^\circ - \theta_{2i}gráfico_{z'} \quad (4.46)$$

$$\theta_{2i}DH = 90^\circ - \theta_{2i}gráfico_{z'} \quad (4.47)$$

- **Caso b'** para $\alpha > 90^\circ$ y $z' > b$, ver Figura 4.19:

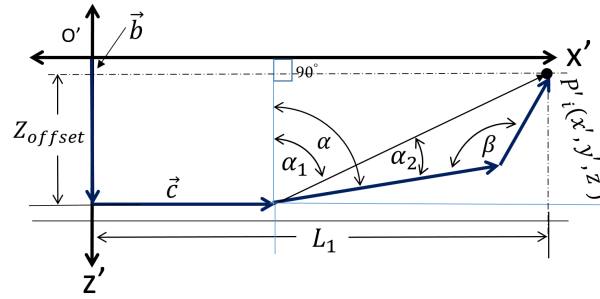


Figura 4.19: Gráfica de referencia caso b' para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla abajo. Fuente: Propia.

Donde:

$$\theta_{2i} \text{grafico}_x = 90^\circ - \alpha \quad (4.48)$$

$$\theta_{2i} DH = -(90^\circ - \alpha) = -\theta_{2i} \text{grafico}_x \quad (4.49)$$

- Caso c' para $\alpha < 90^\circ$ y $z' < b$, ver Figura 4.20:

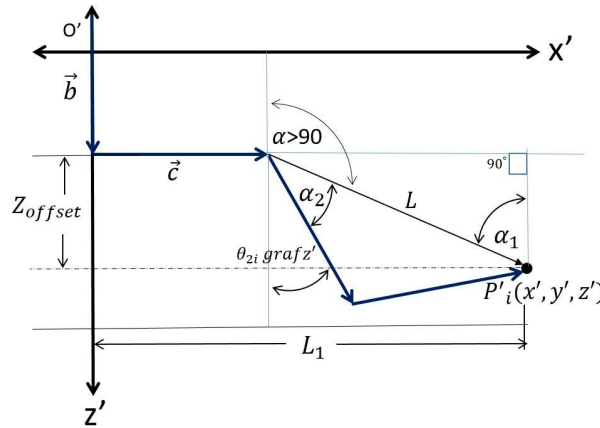


Figura 4.20: Gráfica de referencia caso c' para obtener los ángulos θ_2 y θ_3 , posición de rodilla abajo. Fuente: Propia.

Donde:

$$\alpha_{1aux} = \cos^{-1} \left(\frac{Z_{offset}}{L} \right) \quad (4.50)$$

$$\alpha_1 = 180^\circ - \alpha_{1aux} \quad (4.51)$$

$$\theta_{2i}gráfico_z = \alpha - 90^\circ \quad (4.52)$$

$$\theta_{2i}gráfico_z = 270^\circ - \theta_{2i}gráfico_{x'} \quad (4.53)$$

$$\theta_{2i}DH = 90^\circ - \theta_{2i}gráfico_{z'} \quad (4.54)$$

Con las expresiones desarrolladas anteriormente es posible determinar el valor de $\theta_{2i}DH$, para cada uno de los casos posibles de posiciones de la extremidad; ahora se procede a formular las expresiones para obtener el valor $\theta_{3i}DH$, el cual se determina mediante el valor de β hallado para cada caso anterior. Como se puede observar en la Figura 4.21, el ángulo de $\theta_{3i}DH$ puede ser obtenido mediante el valor de β , dado a que están relacionados entre si de manera gráfica. β corresponde a la medición del ángulo que se forma entre los vectores vector d y e. Estableciendo un sistema de referencia (lineas segmentadas) en el extremo del vector d, $\theta_{3i}DH$ representa el ángulo medido entre la línea colineal del vector d con el vector e. En base a la Figura 4.21, se obtienen las expresiones (4.55), (4.56), (4.57) y (4.58).

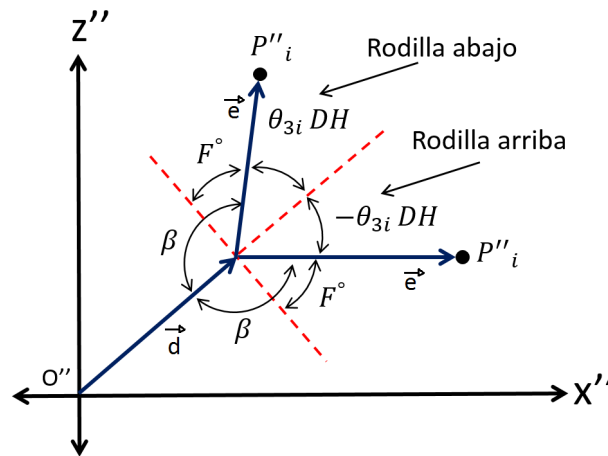


Figura 4.21: Gráfica de referencia para representación de posición de rodilla para θ_3 .

Fuente: Propia.

Donde

$$F^\circ = \beta - 90^\circ \quad (4.55)$$

Para un valor de $\beta \geq 90^\circ$ dada la limitación de movimiento del servomotor. Obteniendo:

$$90^\circ - F^\circ = \pm \theta_{3i} DH \quad (4.56)$$

Con esto para obtener el valor del ángulo para lograr la posición de rodilla abajo o rodilla arriba deseado, donde puntualmente se tiene para rodilla arriba:

$$\theta_{3i} DH = F^\circ - 90^\circ \quad (4.57)$$

Para rodilla abajo:

$$\theta_{3i} DH = 90^\circ - F^\circ \quad (4.58)$$

Donde cada caso de medición para $\theta_{3i} DH$ es aplicado según sea la posición de la rodilla definida para cada uno de los escenarios descritos para obtener el valor de $\theta_{2i} DH$, de modo que se obtienen seis posibles casos en los cuales se puede ubicar la extremidad. Con estos seis casos se asegura conseguir una posición posible de las articulaciones, en el mejor de los casos que dicha posición sea alcanzable por la extremidad. En caso de existir redundancia, es decir, que exista dos sets de ángulos para alcanzar el mismo punto en el espacio, se utiliza la selección de uno de estos casos para la posición de la rodilla para escoger uno de estos.

La eficacia de este método desarrollado, esta dada por el caso de que si el ángulo está fuera de alcance por parte de la extremidad, las relaciones trigonométricas devolverán como resultado un valor imaginario para al menos uno de los ángulos calculados, por tanto, dicho ángulo no es válido y no se podrá asignar a la articulación correspondiente, lo que descarta el set de ángulos de manera directa.

Una vez obtenido al menos un resultado válido es posible corroborar, como doble prueba mediante la cinemática directa descrita para el robot previamente, si el punto obtenido en el espacio es el mismo que el punto objetivo, es decir, se compara el valor del punto objetivo con el valor de punto calculado a través la cinemática directa con los valores obtenidos para el set de ángulo mediante la cinemática inversa, de esta forma es posible conseguir los valores articulares para cualquiera de las extremidades del robot, siempre que dicho punto esté dentro del área de trabajo o de alcance

máximo de la extremidad.

Con lo antes mencionado se formula el siguiente algoritmo para determinar los ángulos de una posición en el espacio, según la secuencia siguiente de pasos:

1. Se selecciona el punto en el espacio objetivo,
2. Se selecciona la extremidad con la que se desea alcanzar dicho punto y la posición de la rodilla,
3. Se precálculan cada uno de los seis casos posibles para la extremidad mostrados en las Figuras 4.13 y 4.14, obteniendo así seis sets de ángulos de la cinemática inversa,
4. Mediante la cinemática inversa, se calcula el valor de cada punto en el espacio que se alcanzan con los ángulos obtenidos en cada set,
5. Se valida si dicho punto obtenido está contenido dentro de una esfera de aceptación de puntos formada alrededor del punto objetivo original, si dicho punto cumple con las condiciones de proximidad, es aceptado. Se tiene gráficamente un ejemplo de esta esfera en la gráfica de la Figura 4.22.

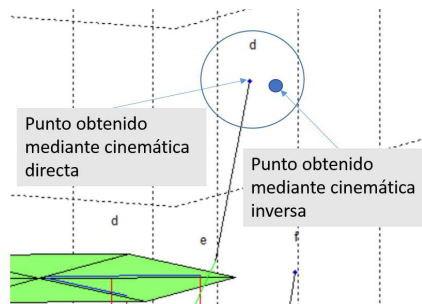


Figura 4.22: Ejemplo de esfera de aceptación para puntos obtenidos mediante cinemática inversa. Fuente: Propia.

6. En caso de existir redundancia de puntos (más de un set con el mismo resultado), se selecciona el caso descrito previamente para la rodilla.

7. Como paso final se obtiene un único set de ángulos según sea el caso necesario para la extremidad.
8. **Nota:** en caso de no especificarse en el algoritmo la posición requerida de la rodilla, esta siempre será seleccionada como rodilla arriba.

Se procede a realizar un conjunto de pruebas para demostrar el funcionamiento de la cinemática inversa. Para realizar dicha prueba se procede a crear la Tabla 4.5, en la cual se suministrará un set de ángulos para cada una de las extremidades del robot en posiciones de locomoción o de balanceo. Se obtiene el punto de interés a calcular mediante la cinemática inversa y se compara el resultado de esta con el punto de referencia. Se tiene la Tabla:

Tabla 4.5: Tabla de prueba para cinemática inversa

Extremidad	Ángulos C.D. ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) (rad)	Punto C.Directa	Ángulos C.I. ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) (rad)	Punto C.Inversa	Diferencia	Error Relativo (%)
A	(0, 0.5236, -0.7854)	(0.252, 1.76E - 17, -0.2074)	(0, 0.4402, -0.7858)	(0.2632, 1.71E - 17, -0.1992)	(-0.0112, 5E - 19, -0.0082)	(4.44%, 2.84%, 3.95%)
B	(0, -0.5236, -0.6981)	(0.1641, 0.2842, -0.04823)	(0, -0.3815, -0.6997)	(0.1646, 0.2852, -0.07255)	(-0.0005, -0.001, 0.02432)	(0.30%, 0.35%, 50.43%)
C	(0, 1.0472, -0.6981)	(-0.08938, 0.1548, -0.2372)	(0, 1.0468, -0.6989)	(-0.08938, 0.1548, -0.2372)	(0, 0, 0)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)
D	(0, -1.2217, -0.4363)	(-0.2592, 3.52E - 17, 0.07766)	(0, -0.7138, 0.4376)	(-0.2592, 4.61E - 17, 0.07766)	(0, -6.1E - 19, 0)	(0.00%, 1.34%, 0.00%)
E	(0, 0.5236, 1.2217)	(-0.2592, 3.52E - 17, 0.07766)	(0, 0.5234, 1.2213)	(-0.1526, -0.2644, -0.03851)	(0, 0, 0)	(0.00%, 0.00%, 0.00%)
F	(0, 0, 1.3090)	(0.1311, -0.2271, 0.03342)	(0, 0, 1.3084)	(0.1311, -0.2271, 0.03341)	(0, 0, 1E - 05)	(0.00%, 0.00%, 0.03%)

Para tener una apreciación más ejemplificada del resultado se tiene la gráfica de la Figura 4.23, utilizando el algoritmo descrito e implementado en *Matlab* (MathWorks, 2016) en base al modelo de posicionamiento del hexápodo o mímico del robot.

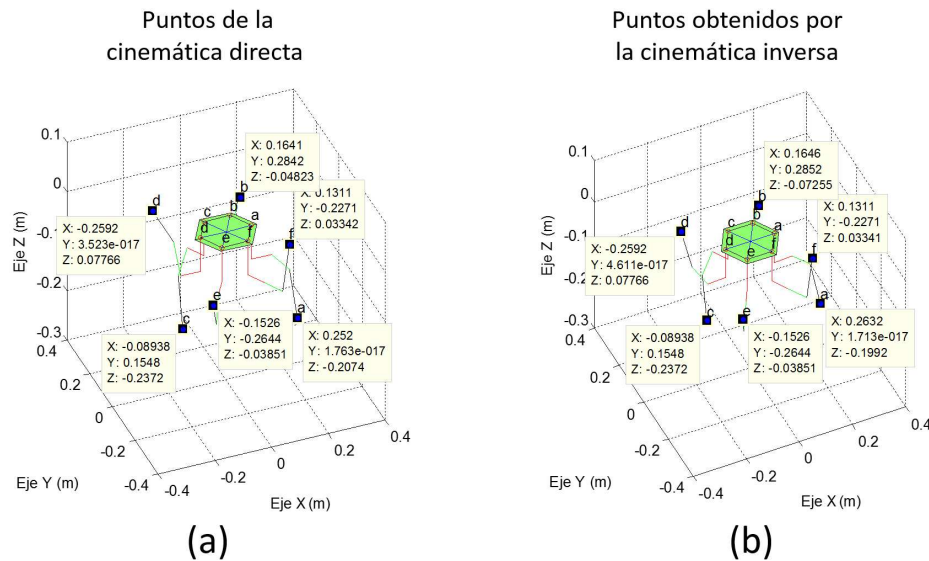


Figura 4.23: Comparación de resultados obtenidos mediante la cinemática inversa, con valores de la cinemática directa Fuente: Propia.

Mediante los resultados obtenidos en la Tabla 4.5 y la Figura 4.23, se puede observar que el desempeño del método gráfico es aceptable, los puntos obtenidos mediante los sets de ángulos determinados con la cinemática inversa alcanzan a estar dentro de la esfera de aceptación de puntos respecto al punto objetivo, en cualquiera de los casos descritos para las posiciones de la extremidad, demostrando el funcionamiento en cualquiera de las extremidades.

Para el ejemplo mostrado en la Figura 4.23, se utiliza un radio de esfera de aceptación de 0.005 m o 0.5 cm.

Sistema solidario de aplicación para la cinemática directa e inversa

Haciendo uso de la ventaja que proveen las transformaciones espaciales de las matrices de transformación homogénea, en torno a representar un sistema de referencia respecto a otro solidario a este, es posible lograr hacer los cálculos necesarios para poder representar al robot en cualquier punto del espacio. El modelado y explicación de este concepto es requerido debido a que el robot puede ser movido o desplazado a

cualquier posición del espacio durante su locomoción, que comprenda su superficie o área de trabajo; hecho que requiere que se pueda tener la posición de este y todos sus elementos en base a un punto de vista o sistema de referencia distinto al propio de su base.

Mediante operaciones básicas de suma, resta y giro de vectores respecto a un ángulo dado es posible lograr posicionar al robot en base a un sistema solidario. Dichas operaciones básicas implementadas, hacen la función de trasladar al robot en los tres ejes traslacionales (X, Y, Z), contemplando con el giro de este solo respecto a la rotación de su base entorno al eje Z , lo que permite representar al robot en cambios de posición con respecto a cuatro grados de libertad, suficientes para poder cumplir con el objetivo de poder representar o describir las mediciones necesarias al momento de que esté ejecutando algún patrón de locomoción que modifique su posición original por motivos desplazamiento o giro de su base.

Dado que las operaciones realizadas para determinar la cinemática directa e inversa del robot, funciona en torno a traslaciones y rotaciones vectoriales entre diversos sistemas de referencias, se puede aprovechar el uso de estas operaciones básicas para poder representar el sistema de referencia base del robot, así como todos sus componentes, respecto a un nuevo sistema de referencia de interés.

Estas operaciones básicas de rotación y traslación de vectores en el espacio son utilizadas para poder graficar el mímico del robot implementado en *Matlab*, e ilustrar así el posicionamiento del robot mediante la obtención del conjunto de puntos que representa cada elemento que lo forman. Las operaciones son consideradas tanto para el cálculo de la cinemática inversa como para la cinemática directa, lo que permite expandir la funcionalidad del mímico del robot al poder representar el resultado de estas operaciones en cualquier punto del espacio de un sistema de referencia solidario.

Conociendo que los cálculos necesarios para la cinemática inversa o directa del robot pueden ser trasladados o rotados respecto a otro sistema de referencia, se puede

definir el movimiento como un desplazamiento y rotación de la base del robot respecto a su propio sistema mediante un vector V_{offset} y un ángulo θ_{offset} que va desde la base del sistema solidario a la base de la estructura del modelo del robot implementado.

Se procede a mostrar un ejemplo de la movilidad del robot en base al cambio de su posición respecto a un nuevo sistema de referencia. Se tienen las gráficas de la Figura 4.24.

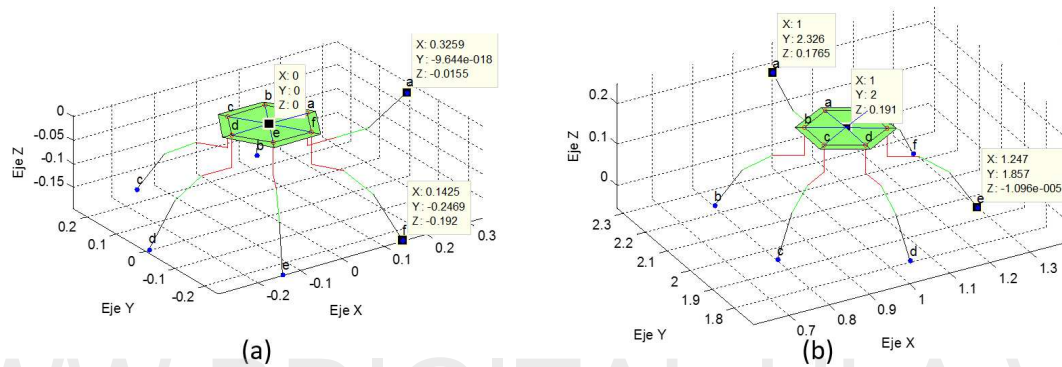


Figura 4.24: Traslación y rotación del sistema de referencia del robot, en base a un sistema solidario. (a)Mímico del hexápodo en base a sistema de referencia propio, (b)Mímico del hexápodo en base a sistema de referencia trasladado y rotado. Fuente: Propia.

En las gráficas de la Figura 4.24 se puede observar que el desplazamiento se realiza respecto al vector de coordenadas $(1, 2, 0.192)$ y un giro de la base respecto a $\frac{\pi}{2}$, lo que traslada y rota la base de la Figura (a) al estado de la Figura (b). Dicha traslación y rotación puede ser utilizada para referencia como superficie al valor de la coordenada Z como 0, de modo que la representación del robot o mímico respecto a la futura superficie plana de desplazamiento queda descrita y determinada por dicha operación. El contacto por la superficie se determina en base al mayor valor de coordenada Z que tiene cada una de las extremidades del robot respecto a su base, convirtiéndose dicha magnitud a posterior en la distancia adicional de cada punto del robot respecto a la superficie (distancia contemplada como Z_{offset} en desarrollo de la solución para la cinemática inversa.)

De este modo, queda comprobada la operación de traslación y rotación de robot, para poder representar el cambio posicional de cada uno de sus elementos en *Matlab* según su locomoción lo requiera, mediante el simple uso de operaciones con vectores.

Los algoritmos implementados para poder hallar la solución del problema cinemático inverso, lograron un tiempo de ejecución menor entre 0.015 segundos y 0.032 segundos, dependiendo de la carga o uso actual del los requisitos del procesador de la maquina sobre la cual se ejecuta *Matlab*, lo que es un buen tiempo considerando que se hace una búsqueda de ángulos matemáticos de seis casos posibles con funciones trigonométricas presentes en las expresiones.

4.2 Modelado de Servomotores

Los servomotores como componentes fundamentales seleccionados como actuadores para este proyecto, deben ser modelados de tal forma que su funcionalidad y características de operación sean lo más próxima posible a su funcionamiento en la realidad. Como referencia al modelado de servomotores, se puede tener el trabajo desarrollado por parte de Rivas et al. (2012), en el cual se modela el servomotor como un motor de armadura, al cual se le acopla un controlador PID para poder hacer el control de posición del eje.

Tomando este modelo como punto de partida, se tiene el diagrama descrito por Rivas, J. (2012) para realizar dicho modelado. Ver Figura 4.25.

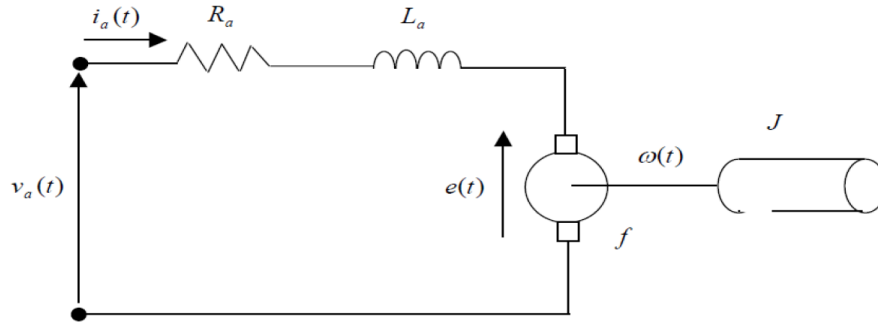


Figura 4.25: Circuito de un motor *DC* controlado por armadura. Fuente: (Dorf, 2001)

Del cual se puede obtener el siguiente diagrama de bloques, ver Figura 4.26, donde se toman en cuenta la parte mecánica y la parte electrónica del motor.

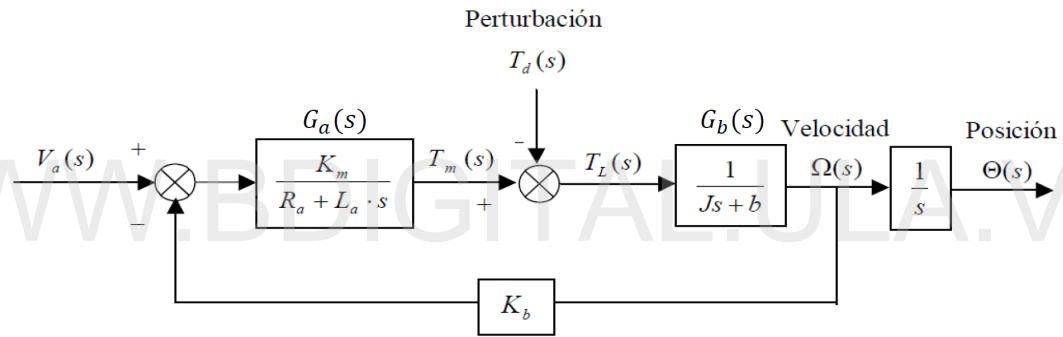


Figura 4.26: Diagrama de bloques para el motor controlado por armadura. Fuente: (Dorf, 2001)

De dicho diagrama se pueden obtener las siguientes ecuaciones como modelo inicial para caracterizar el funcionamiento del motor controlado por armadura:

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = T_m \quad (4.59)$$

$$L_a \dot{T}_m = k_m V_a - k_m k_b \dot{\theta} - T_m R_a \quad (4.60)$$

Donde cada uno de los términos de la expresión representa: J la inercia de motor dada en $(\frac{N.m.s^2}{rad})$, θ es el desplazamiento angular dado en $(rads)$, b es el coeficiente de fricción mecánica $(\frac{Nm}{rad/s})$, T_m es el torque del motor dado en $(N.m)$, L_a es la inductancia de armadura dada en (G) , K_m es la constante de torque dada por $(\frac{N.m}{A})$, R_a es la resistencia de armadura $(Ohms)$, V_a el voltaje de alimentación dado en (V) y

por último K_b es la fuerza electromotriz dada en $(\frac{V}{rad/s})$.

Como enuncia Rivas, J. (2012), muchos de estos valores no se pueden encontrar en las referencias de los fabricantes de servomotores comerciales, por tanto, algunos deben ser obtenidos mediante mediciones o pruebas que pueden llegar a ser complicadas. Para el caso del servomotor seleccionado, el *Hitec HS5645-MG*, solo se cuenta con la información de referencia, como lo es su torque, velocidad de operación y voltaje de alimentación; con estos valores es posible obtener algunos de los parámetros necesarios para el funcionamiento del modelo.

Para obtener el torque del motor, se utiliza el torque nominal suministrado en las descripciones del mismo cuando este es alimentado con un voltaje de 6 V, obteniendo un torque máximo nominal de 1.21 N.m. Para el voltaje de armadura del motor se toma como aproximación el voltaje de alimentación de 6 V. Mediante la relación que existe entre el torque del motor y el voltaje de armadura es posible determinar dos parámetros, la resistencia armadura del motor y la constante de electromecánica mediante la expresión (4.61):

$$\frac{K_m}{R_a} = \frac{N.m/A}{\Omega} = \frac{N.m}{\Omega.A} = \frac{1.21 N.m}{6V} = 0.2016 \frac{N.m}{\Omega.A} \quad (4.61)$$

Donde del resultado de la ecuación (4.61), se puede asignar un valor para la resistencia de la armadura del motor de $R_a = 10\Omega$ para este tipo de motores, esto en base al resultado obtenido por Rivas, J. (2012) y Kaiser, D. (2006).

Para obtener el valor de la constante K_b , se hace referencia al conjunto de estudios realizados en base servomotores de gama media como el utilizado por Rivas, J. (2012) en su proyecto, el Hitec HS311, clasificación en la cual está incluido el servomotor seleccionado para el desarrollo de este proyecto. Rivas, J. (2012) se refiere a la investigación realizada por Araujo (2009), donde se designa para K_b el valor de la ecuación (4.85) para este tipo de motores.

$$K_b = 6.875E^{-4} \frac{V}{rad/s} \quad (4.62)$$

Ahora es necesario determinar los valores de la inercia del motor e inductancia de los mecanismos internos, para obtener dichos valores se hace referencia a los sugeridos nuevamente por Kaiser, D. (2006) para este tipo de servomotores, así como al trabajo realizado por García y Nuñez (2009) obteniendo, los valores de las expresiones (4.63) y (4.64):

$$J = 5E^{-5} \frac{N.m.s^2}{rad} \quad (4.63)$$

$$L = 4E^{-3}(H) \quad (4.64)$$

Por último, es necesario seleccionar el valor del término del coeficiente de fricción viscosa, como en este trabajo de grado no se realiza ningún proceso experimental de identificación de parámetros se procede a asignar un valor entre 0 y 1 para dicho coeficiente, de tal forma que 0 representa la ausencia de fricción viscosa entre las partes mecánicas del motor y 1 representa el máximo de fricción. Se selecciona el valor de b con la expresión (4.65).

$$b = 0.01 \frac{N.m}{rad/seg} \quad (4.65)$$

Con estos parámetros seleccionados, es posible ahora diseñar el controlador PID que se acopla al sistema electromecánico del motor para lograr el control de la posición. Dicho controlador es acoplado al modelo de motor controlado por armadura como se muestra en la Figura 4.27, del esquema de diagrama de bloques completo del sistema propuesto por Rivas, J. (2012).

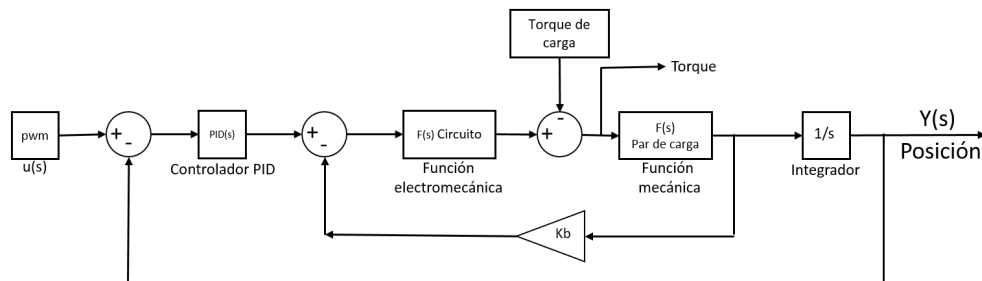


Figura 4.27: Diagrama de bloques para el motor con controlador PID acoplado.

Fuente: Propia

Los valores para el controlador PID se obtienen haciendo uso del método de lazo cerrado de Ziegler-Nichols (Kuyvenhoven, 2002), ajustando posteriormente los

parámetros mediante ensayo y error, para lograr obtener un comportamiento de la salida del sistema que concuerde con las especificaciones dadas por el fabricante del servomotor seleccionado, tales como que el servomotor alcance la posición de referencia de 60 grados en 0.2 segundos. Dichas constantes son seleccionadas de tal forma que se logre un comportamiento sobreamortiguado, comportamiento presente para el servomotor sin carga alguna en su eje. Se obtienen los siguientes valores para las constantes del controlador PID interno:

$$K_p = 3.8 \quad (4.66)$$

$$K_i = 0.001255 \quad (4.67)$$

$$K_d = 0.01 \quad (4.68)$$

Se define PID interno, a efectos del desarrollo de este proyecto, al controlador que trae acoplado internamente cada servomotor para su funcionamiento.

Donde la estructura general del controlador PID en el dominio frecuencial, está dada por la expresión (4.115):

$$H(s) = K_p + \frac{1}{K_i s} + K_d s \quad (4.69)$$

Usando las ecuaciones del sistema (4.59) y (4.60), además de los valores obtenidos para el controlador PID interno (4.115), se puede definir el modelo completo del sistema del servomotor con el siguiente sistema de ecuaciones de la expresión (4.70):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{r_a}{l_a} x_1(t) - \frac{k_b k_m}{l_a} x_3(t) + \frac{k_m}{l_a} u(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{1}{J} x_1(t) - \frac{b}{J} x_3(t) \\ \dot{x}_4(t) &= ref - x_2(t) \end{aligned} \quad (4.70)$$

Donde:

$$u(t) = K_p (ref - x_2(t)) + K_i x_4(t) - K_d x_3(t) \quad (4.71)$$

Implementando el modelo con el controlador PID interno en *Matlab*, con las ecuaciones del sistema (4.70) y constantes seleccionadas en las expresiones (4.66), (4.67) y (4.68), se obtiene el comportamiento dinámico de la Figura 4.28.

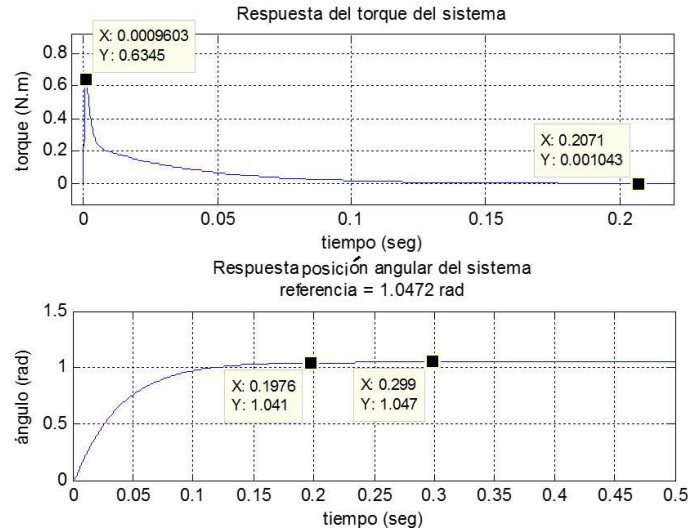


Figura 4.28: Respuesta del modelo del servomotor, $ref = 1.0472rad$. Fuente: Propia

Donde se puede observar que el modelo logra las especificaciones del fabricante, alcanzando los 60 grados en aproximadamente 0.3 segundos, tomando un valor de torque inicial para vencer la inercia del sistema de $0.6345N.m$ que no excede el torque nominal de $1.21N.m$. Se puede notar que de igual forma se obtiene un comportamiento sobre amortiguado y el seguimiento pleno de la señal de referencia. Por tanto, el modelo representa el sistema del servomotor *Hitec HS5645-MG* para este proyecto.

4.3 Modelado de los sistemas actuador-eslabón

Una vez obtenido el modelo del servomotor a utilizar, se procede a modelar cada uno de los grados de libertad de los que está compuesto la extremidad, eso para incluir la dinámica que le agrega la inercia del eslabón acoplado a cada eje del servomotor.

Para obtener un modelo de cada sistema actuador-eslabón es necesario utilizar un enfoque que tome en cuenta la inercia de los componentes que están acoplados

a cada eje. Dado que cada eje del servomotor tiene una masa acoplada que gira en torno a un punto fijo, cada sistema actuador-eslabón puede ser modelado como un péndulo simple, de esta forma se pueden representar cada uno de los elementos con su respectiva masa e inercia desde el eje de rotación hasta el final de la extremidad.

Como producto de este modelado se obtendrá entonces una ecuación que represente el movimiento del eslabón en torno al eje de cada servomotor, de tal forma que es posible obtener la posición del brazo o extremo en todo momento. Una vez obtenido el modelo de cada sistema, se procede a acoplarlo al modelo del servomotor obtenido previamente con el fin de poder observar el comportamiento aislado de cada sistema.

Desacoplando cada sistema actuador-eslabón es posible, al igual que para el desarrollo de la cinemática directa e inversa, determinar el plano en el que cada servomotor ejecuta su movimiento. Con lo previamente desarrollado en el capítulo 3, sección de diseño de extremidades (ver Figuras 3.22 y 3.30), se puede observar que de entrada el servomotor uno actúa en un plano horizontal XY, en el cual si se desprecia el efecto de que el eje de dicho servomotor se pudiese doblar por el peso de la extremidad, dicho sistema puede ser modelado como un péndulo simple sin la componente de la gravedad afectado su dinámica; esto también con el fin de reducir la no linealidad del término que representa su efecto físico.

De igual forma, para los servomotores 2 y 3, la analogía para modelar su dinámica está basada en péndulos simples, a diferencia respecto al servomotor 1, estos sí son afectados por el efecto de la gravedad de sus eslabones (ver Figuras 3.23 y 3.31); en mayor medida el servomotor 2 que debe soportar el peso del servomotor 3. Por ende, se puede utilizar el mismo modelo inicial de péndulos simples para el modelado de cada sistema actuador-eslabón, de tal forma de adaptarlo a cada modelo específico según sus constantes.

4.3.1 Modelado mediante Euler-Lagrange

Utilizando el modelado de sistemas mediante ecuaciones de Euler-Lagrange (Vandier, 2011), se puede obtener un modelo en base a la posición angular del sistema, magnitud de interés para poder ejercer control de la extremidad al momento de plantear y desarrollar cualquier movimiento requerido para un patrón de locomoción. Se procede a descomponer la extremidad en cada uno de los sistemas actuador-eslabón para su respectivo modelado, como se puede apreciar en la Figura 4.29.

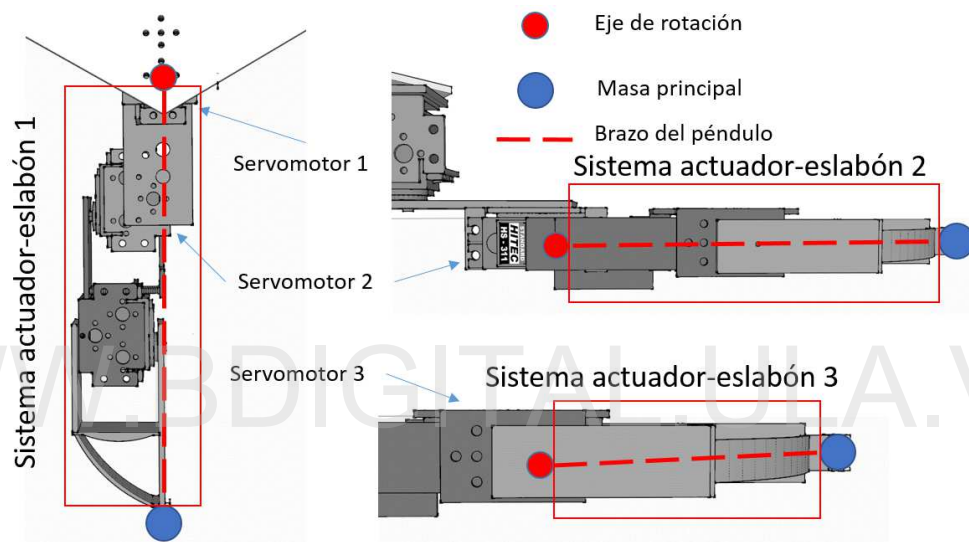


Figura 4.29: Separación de sistemas actuador-eslabón. Fuente: Propia

Partiendo de la Figura 4.29, se puede generar un modelo general en el cual se tomen en consideración los elementos comunes y posteriormente modificarlo según el sistema en estudio actuador-eslabón. Como modelo general en base a las ecuaciones de Euler Lagrange (ver sección 2.12, capítulo 2), se tiene el siguiente desarrollo partiendo del diagrama de la Figura 4.30.

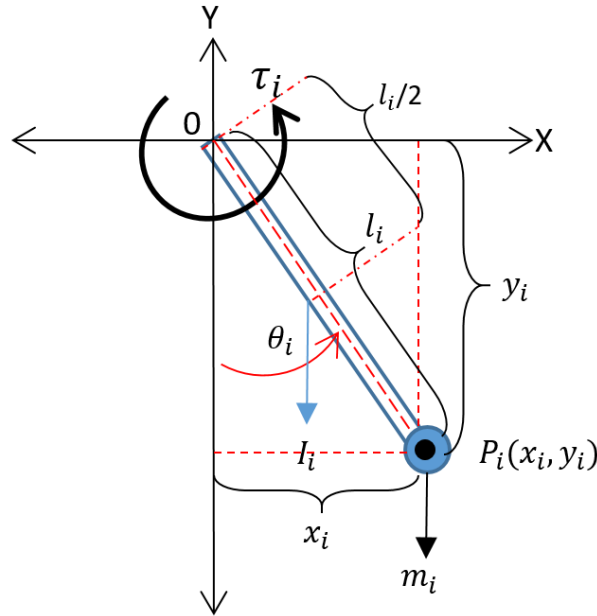


Figura 4.30: Diagrama péndulo simple para modelado de Euler-Lagrange Fuente:

Propia

De donde para x_i y y_i se tienen las expresiones (4.72) y (4.73):

$$x_i = l_i \sin \theta_i(t) \quad (4.72)$$

$$y_i = -l_i \cos \theta_i(t) \quad (4.73)$$

quedando sus derivada como las expresiones (4.74) y (4.75):

$$\dot{x}_1 = l_i \cos \theta_i \quad (4.74)$$

$$\dot{y}_1 = l_i \sin \theta_i \quad (4.75)$$

Considerando la inercia de la barra como medida general del eslabón, se tiene el Lagrangiano como la expresión (4.76):

$$L = T - V \quad (4.76)$$

Donde

$$T = \frac{1}{2} m_i ((\dot{x}_i)^2 + (\dot{y}_i)^2) + \frac{1}{2} (I_i) (\dot{\theta}_i)^2 \quad (4.77)$$

$$V = -m_i g l_i \cos \theta_i \quad (4.78)$$

Simplificando las ecuaciones haciendo uso de *Maple 17* (MapleSoft, 2016), se tiene:

$$L = \frac{1}{2} \left(\dot{\theta}_i(t) \right)^2 (l_i^2 m_i + I_i) + m_i g l_i \cos(\theta_i) \quad (4.79)$$

Derivando nuevamente y obteniendo el Lagrangiano final, añadiendo el término disipativo a la expresión se obtiene:

$$\ddot{\theta}_i (l_i^2 m_i + I_i) + m_i * g l_i \sin(\theta_i) + \beta_i \dot{\theta}_i = \tau_i \quad (4.80)$$

Donde $\ddot{\theta}_i$ representa la aceleración angular del eslabón, $\dot{\theta}_i$ representa la velocidad angular, θ_i representa la posición angular, l_i representa la longitud del eslabón, m_i la masa concentrada del extremo del eslabón, I_i representa la inercia total del sistema, g representa la constantes de gravedad, β_i representa la constante de fricción viscosa del eje de rotación y por último τ_i que representa el torque de entrada al sistema.

Teniendo desarrollada la ecuación base para cada uno de los péndulos de manera general, se procede a determinar cada uno de los valores de longitudes, inercias y masas correspondientes a la dinámica de cada sub-sistema. Utilizando el teorema de Steiner o ejes paralelos, se procede para determinar la inercia de cada uno de los componentes de la extremidad a fin de poder representar la inercia total del sistema. Se tienen los siguientes valores para cada sistema de péndulo simple:

- **Servomotor 1.** Para modelar la inercia de este sistema se tienen las siguientes consideraciones: se define una masa concentrada al final del péndulo que representa la masa del servomotor 3, la masa del eslabón tres y la masa de la punta de extremidad; cada uno de los eslabones son considerados prismas con sus respectivas dimensiones de longitud y masa, determinando así su inercia respecto al eje de rotación; de igual forma con los servomotores dispuestos, son considerados como prismas con sus respectivas dimensiones y masa, para obtener su inercia respecto al eje de rotación de la extremidad.

Se tiene el diagrama de la Figura 4.31 para calcular la inercia del sistema:

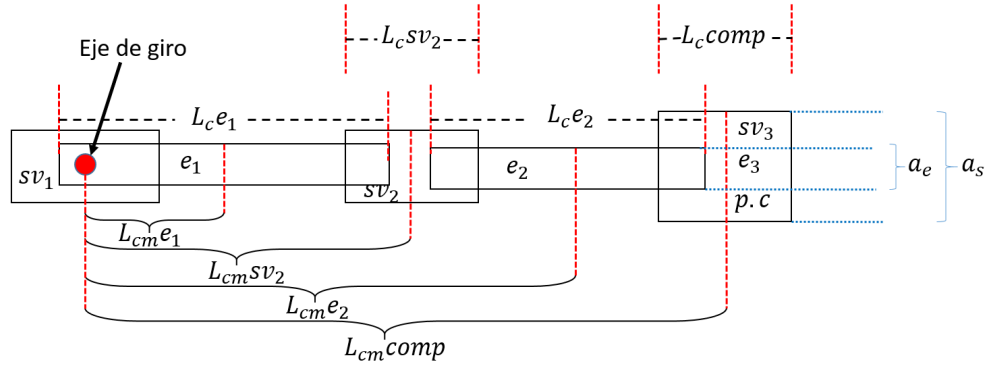


Figura 4.31: Diagrama de longitudes para el cálculo de inercia del sistema servomotor

1. Fuente: Propia

Para calcular la inercia total se tienen las siguientes expresiones:

$$I_1 = I_{total1} = I_{e1} + I_{e2} + I_{comp} \quad (4.81)$$

$$I_{e1} = \frac{1}{12} m_{e1} (a_e^2 + l_{ce1}^2) + m_{e1} l_{cme11}^2 \quad (4.82)$$

$$I_{e2} = \frac{1}{12} m_{e2} (a_e^2 + l_{ce2}^2) + m_{e2} l_{cme21}^2 \quad (4.83)$$

$$I_{comp1} = \frac{1}{12} m_{comp} (a_s^2 + l_{ccomp1}^2) + m_{comp} (l_{cmcomp1}^2) \quad (4.84)$$

$$m_{comp} = m_{sv3} + m_{e3} + m_{pe4}; \quad (4.85)$$

Tomando la expresión de Lagrange general de la ecuación (4.80) y adaptándola al sistema, eliminando el término perteneciente a la gravedad, se tiene la expresión (4.95):

$$\ddot{\theta}_1 (l_1^2 m_{sv2} + I_1) + \beta_1 \dot{\theta}_1 = \tau_1 \quad (4.86)$$

Donde la inercia de la masa del servomotor 2 está considerada como la masa final del péndulo.

- **Servomotor 2:** Para modelar la inercia de este sistema se realiza de manera análoga al sistema anterior. Tomando en cuenta el eje de giro del segundo servomotor, se tiene que las inercias que intervienen en el sistema son la inercia

del servomotor 2, la inercia del eslabón dos y por último la inercia de la masa compacta. Se tienen las siguientes expresiones en base a la Figura 4.32:

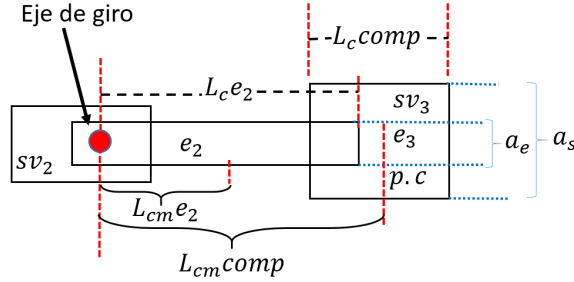


Figura 4.32: Diagrama de longitudes para el cálculo de inercia del sistema servomotor 2. Fuente: Propia

Donde

$$I_2 = I_{total2} = I_{e22} + I_{comp2} \quad (4.87)$$

$$I_{comp2} = \frac{1}{12} m_{comp2} (a_s^2 + l_{ccomp2}^2) + m_{comp2} (l_{cmcomp2}^2) \quad (4.88)$$

$$m_{comp2} = m_{e3} + m_{pe4}; \quad (4.89)$$

$$I_{e22} = \frac{1}{12} m_{e2} (a_e^2 + l_{ce2}^2) + m_{e2} * (l_{cme22}^2) \quad (4.90)$$

Tomando la expresión de Lagrange general de la ecuación (4.80) y adaptándola al sistema, considerando esta vez el término perteneciente a la gravedad, , se tiene la expresión (4.96):

$$\ddot{\theta}_2 (l_2^2 m_{sv3} + I_2) + m_{sv3} * gl_2 \sin(\theta_2) + \beta_2 \dot{\theta}_2 = \tau_2 \quad (4.91)$$

Donde la inercia de la masa del servomotor 3 está considerada como la masa final ubicada en el brazo del péndulo.

- **Servomotor 3:** Para modelar la inercia de sistema del servomotor 3 siguiendo el mismo desarrollo anterior, se tiene que la inercia total del sistema está formada por la inercia del eslabón tres y la inercia de la punta de la extremidad o punta de contacto. Se tienen las siguientes expresiones en base al diagrama de la Figura 4.33:

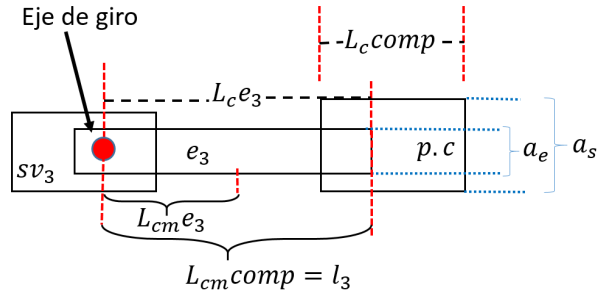


Figura 4.33: Diagrama de longitudes para el cálculo de inercia del sistema servomotor
3. Fuente: Propia

$$I_3 = I_{total3} = I_{e33} \quad (4.92)$$

$$I_{e33} = \frac{1}{12} m_{e3} (a_e^2 + l_{ce3}^2) + m_{e3} (l_{cme33}^2) \quad (4.93)$$

Tomando la expresión de Lagrange general de la ecuación (4.80) y adaptándola al sistema, considerando esta vez el término perteneciente a la gravedad, se tiene la expresión (4.97):

$$\ddot{\theta}_3 (l_3^2 m_{pc} + I_3) + m_{pc} * g l_3 \sin(\theta_3) + \beta_3 \dot{\theta}_3 = \tau_3 \quad (4.94)$$

Donde la inercia de la masa de la punta de contacto o extremidad está considerada como la masa final ubicada en el brazo del péndulo.

Así cada una de las constantes anteriores tiene los valores y significados en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Descripción de constantes para cálculo de inercias

Constante	Significado	valor
$I_1=I_{total1}$	Inercia total del sistema 1	$3.4E^{-3}kgm^2$
$I_2=I_{total2}$	Inercia total del sistema 2	$2.33E^{-4}kgm^2$
$I_3=I_{total3}$	Inercia total del sistema 3	$1.172E^{-4}kgm^2$
I_{e1}	Momento inercia eslabón 1 r. eje 1	$7.515E^{-5}kgm^2$
I_{e2}	Momento inercia eslabón 2 r. eje 1	$6.055E^{-4}kgm^2$
I_{comp1}	Momento inercia masa compacta 1 r. eje 1	$2.8E^{-3}kgm^2$
I_{e22}	Inercia del eslabón 2 respecto al eje de rotación 2	$1.159E^{-4}kgm^2$
I_{e33}	Inercial de eslabón 3 respecto al eje de rotación 3	$1.172E^{-4}kgm^2$
a_s	Ancho de servomotor	$0.02m$
a_e	Ancho de de eslabón	$0.03m$
l_{cme11}	Longitud desde eje 1 hasta centro de masa eslabón 1	$0.026m$
l_{cmsv21}	Longitud desde eje 1 hasta centro de masa de servomotor 2	$0.06m$
l_{cme21}	Longitud desde eje 1 hasta centro de masa eslabón 2	$0.106m$
l_{ccomp1}	Longitud completa de masa compacta 1	$0.04m$
$l_{cmcomp1}$	Longitud desde eje 1 hasta centro de masa de masa compacta 1	$0.135m$
l_{cme22}	Longitud desde el eje 2 hasta centro de masa eslabón 2	$0.038m$
l_{cme33}	Longitud desde el eje 3 hasta centro de masa eslabón 3	$0.037m$
m_{comp1}	Sumatoria de masa compacta 1	$0.15kg$
m_{comp2}	Sumatoria de masa compacta 2	$0.1kg$
m_{e1}	Masa eslabón 1	$0.05kg$
m_{e2}	Masa eslabón 2	$0.05kg$
m_{e3}	Masa eslabón 3	$0.05kg$
m_{sv2}	Masa servomotor 2	$0.05kg$
m_{sv3}	Masa servomotor 3	$0.05kg$
m_{pc}	Masa punta de contacto	$0.05kg$

Con el valor de estas constantes, establecidas según mediciones en el prototipo diseñado y cada uno de los modelos para los péndulos simples completados, se procede ahora a hacer unión de dichos modelos con el modelo electromecánico del servomotor. Con esta unión se pretende crear un modelo compuesto que tome en cuenta las características físicas de cada eslabón descritas mediante el modelo de Lagrange y las características de funcionamiento electromecánicas del servomotor. Se tienen las

siguientes expresiones para el modelado de los péndulos simples.

Ecuación (4.95) para péndulo de servomotor 1, :

$$\ddot{\theta}_1 (l_1^2 m_{sv2} + I_1) + \beta_1 \dot{\theta}_1 = \tau_1 \quad (4.95)$$

Ecuación (4.96) para péndulo de servomotor 2:

$$\ddot{\theta}_2 (l_2^2 m_{sv3} + I_2) + m_{sv3} * gl_2 \sin(\theta_2) + \beta_2 \dot{\theta}_2 = \tau_2 \quad (4.96)$$

Ecuación (4.97) para péndulo de servomotor 3:

$$\ddot{\theta}_3 (l_3^2 m_{pc} + I_3) + m_{pc} * gl_3 \sin(\theta_3) + \beta_3 \dot{\theta}_3 = \tau_3 \quad (4.97)$$

Y las ecuaciones (4.98) y (4.99), para el modelo del servomotor:

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = T_m \quad (4.98)$$

$$L_a \dot{T}_m = k_m V_a - k_m k_b \dot{\theta} - T_m R_a \quad (4.99)$$

Donde cada modelo completo consta de unir cada una de las expresiones del modelo electromecánico del servomotor con cada modelo del sistema del péndulo simple, mediante la analogía mecánica que existe entre la ecuación de torque de ambos, donde $\tau_i = T_m$, $\beta_i = b$, $J = \text{inerciatotal}$ del sistema y por último $\theta_i = \theta$; tomando en cuenta el PID interno del modelo del servomotor, que se mantiene igual para cada caso. Teniendo esto definido se procede a plantear los modelos para cada sistema en espacio de estados.

Los términos PID interno, hacen referencia al controlador interno de cada servomotor. El diseño e implementación de este controlador se hace para poder representar el comportamiento real del servomotor, sin embargo a este controlador no se tiene acceso físicamente para poder realizar modificaciones, es único y característico del motor.

- **Servomotor 1, modelo actuador-eslabón:**

Partiendo de la analogía que existe entre las ecuaciones (4.95) y (4.98), junto con

la ecuación (4.99), se puede formar el siguiente sistema de ecuaciones (4.100), análogo al modelo del servomotor del sistema de ecuaciones (4.70).

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{r_a}{l_a} x_1(t) - \frac{k_b k_m}{l_a} x_3(t) + \frac{k_m}{l_a} u_1(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{1}{(m_{sv2} l_1^2 + I_1)} x_1(t) - \frac{\beta_1}{(m_{sv2} l_1^2 + I_1)} x_3(t) \\ \dot{x}_4(t) &= ref - x_2(t) \end{aligned} \quad (4.100)$$

donde la entrada de control esta dada por:

$$u_1(t) = K_p (ref - x_2(t)) + K_i x_4(t) - K_d x_3(t) \quad (4.101)$$

El sistema de ecuaciones en espacio de estados esta dado por un conjunto de ecuaciones lineales, del cual es posible obtener el comportamiento del torque y la posición angular como respuesta del sistema, al momento de asignar valor de referencia a ref mediante las variables $x_1(t)$ y $x_2(t)$. Se procede a hacer la simulación de las ecuaciones (4.100) y (4.101), en espacio de estados del sistema en *Matlab*, para un valor $ref = 60\text{grados}$ o $ref = 1.0472\text{rad}$; con los valores de las constantes calculadas previamente, se tiene:

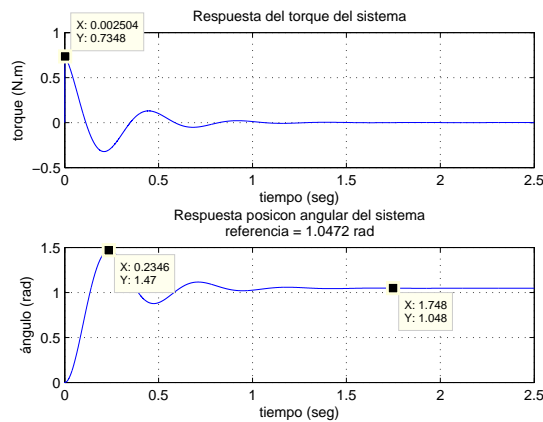


Figura 4.34: Respuesta del sistema de ecuaciones (4.100) y (4.101) Actuador-eslabón para servomotor 1. Fuente: Propia

Como se puede apreciar en la Figura 4.34, gracias a la acción del PID interno del servomotor, el sistema logra alcanzar el valor de referencia deseado en estado

estacionario, pero el comportamiento en la fase transitoria se ve afectado, como es de esperarse, por los efectos de la inercia adicional que supone toda la carga de la extremidad; lo que da indicios a que es necesario realizar una fase de control adicional para mejorar el comportamiento del sistema implementando una ley de control que sea acorde a las características que este presenta. De igual forma se ve en la necesidad de la implementación de dicho control adicional o control externo, ya que el sistema tiene un respuesta muy rápida, comportamiento que no se desea a la hora de trabajar con piezas mecánicas o servomecanismos, debido al desgaste que se puede generar en las piezas de estos, por lo que una respuesta sobreamortiguada seria ideal para la operación del motor.

- **Servomotor 2, modelo actuador-eslabón:**

Al igual que con el sistema para el servomotor 1, se procede a utilizar la analogía que existe entre las ecuaciones (4.96) y (4.98), donde de la misma manera, se supone la inercia del servomotor 2 como nula, tomando en cuenta ahora un nuevo término que modifica la dinámica del sistema. Este término es el que toma en cuenta el efecto de la gravedad del peso de la extremidad, dado su plano de acción o movimiento. Para describir el modelo de este sistema, se hace uso del sistema en espacio de estados elaborado para el modelo del servomotor, ecuaciones (4.70) y (4.71), y su analogía con la expresión (4.96), para obtener el siguiente sistema de ecuaciones (4.102) en espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{r_a}{l_a}x_1(t) - \frac{k_b k_m}{l_a}x_3(t) + \frac{k_m}{l_a}u_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{1}{(m_{sv3}l_2^2 + I_2)}x_1(t) - \frac{\beta_2}{(m_{sv3}l_2^2 + I_2)}x_3(t) - \frac{m_{sv3}gl_2 \sin(x_2)}{(m_{sv3}l_2^2 + I_2)} \\ \dot{x}_4(t) &= ref - x_2(t) \end{aligned} \quad (4.102)$$

donde la entrada de control esta dada por:

$$u_2(t) = K_p(ref - x_2(t)) + K_i x_4(t) - K_d x_3(t) \quad (4.103)$$

Como se puede apreciar en el sistema de ecuaciones de espacio de estados (4.102) y (4.103) obtenido para el sistema actuador-eslabón del servomotor 2, existe un

término no lineal, proveniente del efecto de la gravedad sobre la extremidad, volviendo el sistema de ecuaciones de espacio de estado no lineal. A pesar de que el controlador interno, con el que se modela el servomecanismo del servomotor, es un controlador PID para sistemas lineales, es posible obtener la respuesta del modelo para una posición de referencia deseada. Tomando en cuenta los términos constantes descritos anteriormente para este modelo en específico, se tiene la siguiente respuesta del sistema simulado en *Matlab* para una posición de referencia de $ref = 60\text{grados}$ o $ref = 1.0472\text{rad}$. (Ver Figura 4.35).

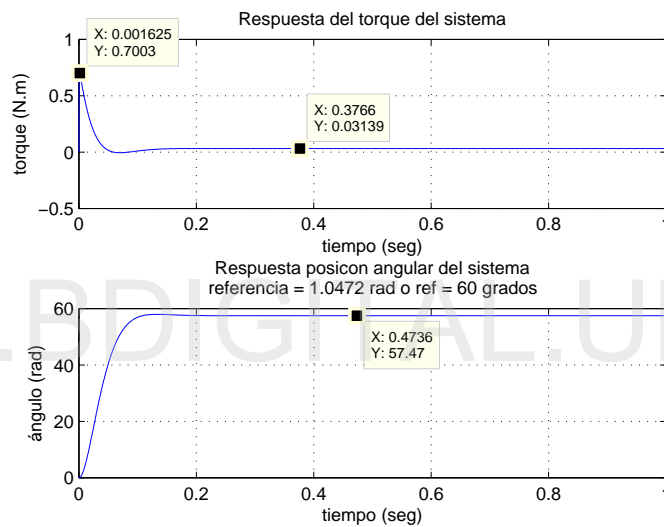


Figura 4.35: Respuesta del sistema no lineal Actuador-eslabón para servomotor 2 (ecuaciones (4.102) y (4.103)). Fuente: Propia

Donde se puede observar que la respuesta del sistema no alcanza la referencia, por el hecho de que el controlador PID interno no está diseñado tomando en cuenta la existencia de un término referente a la magnitud del peso del eslabón, que es producido cuando entra en juego la gravedad; por otro lado, la respuesta del sistema es muy rápida, casi tanto como la del servomotor sin ninguna masa acoplada, por lo que es necesario diseñar un controlador adicional, llamado controlador externo, para modificar el comportamiento de la respuesta.

Como las características que se desean modificar de la respuesta del sistema consisten en lograr un tiempo de asentamiento mayor y que el sistema consiga alcanzar el valor de referencia, un primer candidato de controlador a seleccionar es alguno perteneciente a la familia de controladores PID lineales, por su sencillez de implementación y diseño, lo que hace necesario tener que linealizar el sistema.

Utilizando el método de linealización aproximada, por medio de la matriz jacobiana, como se describe en el libro de Control Moderno de Ogata (1998), se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones (4.104) de espacio de estados linealizado:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{r_a}{l_a} x_1(t) - \frac{k_b k_m}{l_a} x_3(t) + \frac{k_m}{l_a} u_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{1}{(m_{sv3} l_2^2 + I_2)} x_1(t) - \frac{\beta_2}{(m_{sv3} l_2^2 + I_2)} x_3(t) - x_2(t) \frac{m_{sv3} g l_2 \cos(X_2)}{(m_{sv3} l_2^2 + I_2)} \\ \dot{x}_4(t) &= ref - x_2(t) \end{aligned} \quad (4.104)$$

donde la entrada de control está dada por:

$$u_2(t) = K_p (ref - x_2(t)) + K_i x_4(t) - K_d x_3(t) \quad (4.105)$$

El valor de linealización denotado por X_2 , representa el punto sobre el cual se desea linealizar el sistema, mantenido paramétricamente para realizar pruebas y determinar un punto de operación que permita obtener una respuesta cercana al comportamiento del sistema no lineal. Dadas las características de operación del las articulaciones del robot, el rango medio de operación para un servomotor está dado por 90grados, probando el efecto de la linealización en ese punto y posteriormente en puntos menores para lograr un comportamiento del sistema aceptable, se fija el valor de linealización en 60 grados o $1.0472rad$ para X_2 .

Se procede a comparar la respuesta del sistema linealizado con la respuesta del sistema no lineal para verificar la discrepancia entre el resultado de la salida respecto a la posición, y el torque máximo generado por el sistema para alcanzar

la referencia. Para esto es necesario desplazar el sistema no lineal al punto de operación sobre el cual se realiza la linealización, a fin de poder comparar su respuesta con la del sistema linealizado en dicho punto. Para poder realizar esta comparación, al sistema no lineal se le añade a la entrada el valor de U_{op} o U de operación, obteniendo así el sistema no lineal compensado, haciendo ahora comparable los sistemas. El valor de U_{op} para el sistema compensado se obtiene de la expresión (4.106).

$$U_{op} = \frac{r_a m_{sv2} g l_2 \sin(X_2)}{k_m} \quad (4.106)$$

Sustituyéndola en la expresión de la señal de control completa se obtiene la U_{op} compensada:

$$u_2(t) = K_p (ref - x_2(t)) + K_i x_4(t) - K_d x_3(t) + \frac{r_a m_{sv2} g l_2 \sin(X_2)}{k_m} \quad (4.107)$$

Utilizando el sistema de ecuaciones para el modelo de espacio de estados original de la expresión (4.102), con el nuevo valor la entrada de U_{op} de la expresión (4.107) se obtiene el nuevo sistema de ecuaciones del modelo no lineal compensado. Con este nuevo sistema de ecuaciones es posible ahora comparar la respuesta del modelo lineal formado por el sistemas de ecuaciones (4.104) y (4.105), y el no lineal compensado formado por las ecuaciones (4.102) y (4.107), obteniendo las Figuras 4.36 y 4.37 para los valores de $ref = 60$ grados o $ref = 1.0472rad$.

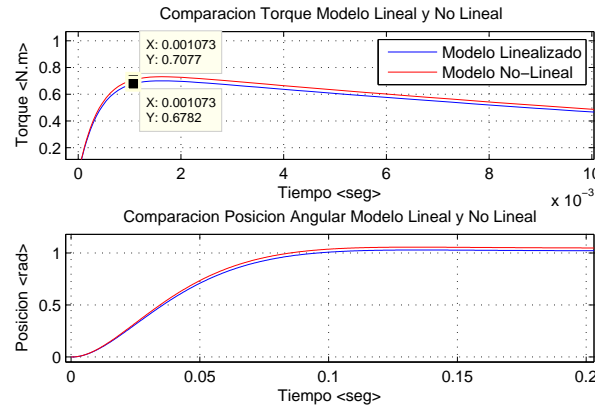


Figura 4.36: Comparación de respuesta del sistema no lineal (ecuaciones (4.102) y (4.107)) con sistema lineal (ecuaciones (4.104) y (4.105)) para servomotor 2. Fuente:

Propia

Con más detalle se tiene la Figura 4.37(b), donde se puede observar que el error en estado estacionario entre la respuesta del sistema no lineal y lineal es de 1.5 grados aproximadamente o 0.02617 rad, lo que representa un error aceptable para optar por el sistema lineal obtenido.

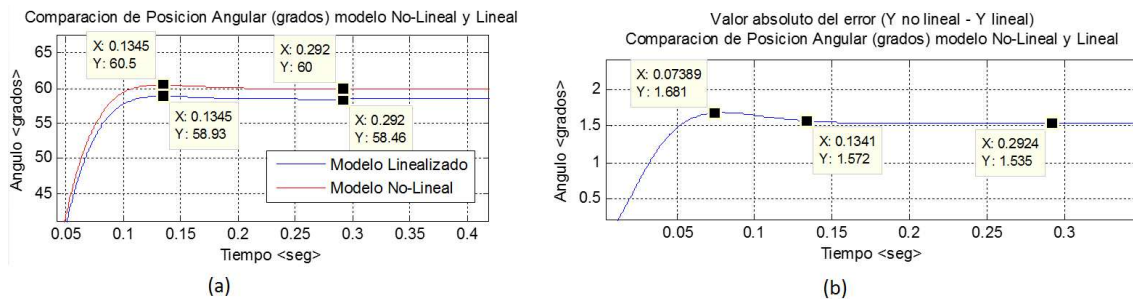


Figura 4.37: Comparación de respuesta del sistema no lineal (ecuaciones (4.102) y (4.107)), con el sistema lineal (ecuaciones (4.104) y (4.105)) para servomotor 2, (a) Comparación de posición angular, (b) Valor absoluto del error. Fuente: Propia

De esta forma se obtiene el sistema lineal para el servomotor 2, subsistema actuador-eslabón.

- **Servomotor 3, modelo actuador-eslabón:**

Para obtener el modelo actuador-eslabón del servomotor 3, se procede de la misma

manera que con el sistema de ecuaciones para el modelo completo en espacio de estados para el servomotor 2. Partiendo de la primicia de la analogía entre las ecuaciones que representan la dinámica de la mecánica del servomotor y el péndulo simple (ecuaciones (4.97) y (4.98)) se puede relacionar ambos modelos. De igual forma, que en el modelo anterior se supone la inercia del servomotor 3 como nula y se toma en cuenta el término de la gravedad que afecta al sistema del péndulo simple. Tomando en cuenta el sistema de ecuaciones de espacio de estados del modelo del original servomotor (ecuación (4.70) y (4.71)), junto con la expresión del modelo para el pendulo simple del servomotor 3 (ecuacion (4.97)), se tienen las siguientes ecuaciones en espacio de estado para el sistema del servomotor 3 (ecuaciones (4.108) y (4.109)):

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1(t) &= -\frac{r_a}{l_a} x_1(t) - \frac{k_b k_m}{l_a} x_3(t) + \frac{k_m}{l_a} u_3(t) \\
 \dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\
 \dot{x}_3(t) &= \frac{1}{(m_{pc} l_3^2 + I_3)} x_1(t) - \frac{\beta_3}{(m_{pc} l_3^2 + I_3)} x_3(t) - \frac{m_{pc} g l_3 \sin(x_2)}{(m_{pc} l_3^2 + I_3)} \\
 \dot{x}_4(t) &= ref - x_2(t)
 \end{aligned} \tag{4.108}$$

donde la entrada de control esta dada por:

$$u_3(t) = K_p (ref - x_2(t)) + K_i x_4(t) - K_d x_3(t) \tag{4.109}$$

De igual forma, que con el sistema de ecuaciones para el servomotor 2, se tiene presente el término no lineal. Se procede a observar la respuesta del sistema, para un valor de referencia de $ref = 60$ grados o $ref_1.0472rad$, tomando en cuenta los valores descritos para este modelo (ver Tabla 4.6), se tiene la gráfica de la Figura 4.38.

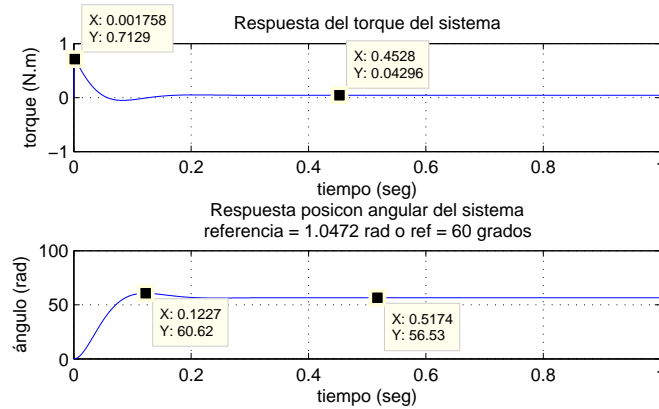


Figura 4.38: Respuesta del sistema no lineal Actuador-eslabón para servomotor 3, (ecuaciones (4.108) y (4.109)). Fuente: Propia

Se puede observar que de igual forma que el sistema no lineal con el controlador lineal no es capaz de alcanzar la referencia requerida, además de tener una respuesta muy rápida, por lo que es necesario diseñar otro controlador, llamado controlador externo, que modifique el comportamiento de la respuesta.

Se procede a realizar el mismo procedimiento de linealización jacobiana que en el modelo del servomotor 2 para lograr obtener un sistema lineal, a fin de poder diseñar posteriormente un controlador de la familia PID, con el fin de mejorar las características de la respuesta del sistema. Se obtiene el siguiente sistema linealizado de las ecuaciones (4.110):

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1(t) &= -\frac{r_a}{l_a} x_1(t) - \frac{k_b k_m}{l_a} x_3(t) + \frac{k_m}{l_a} u_3(t) \\
 \dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\
 \dot{x}_3(t) &= \frac{1}{(m_{pc} l_3^2 + I_3)} x_1(t) - \frac{\beta_3}{(m_{pc} l_3^2 + I_3)} x_3(t) - x_2(t) \frac{m_{pc} g l_3 \cos(X_2)}{(m_{pc} l_3^2 + I_3)} \\
 \dot{x}_4(t) &= ref - x_2(t)
 \end{aligned} \tag{4.110}$$

donde la entrada de control está dada por la expresión (4.111):

$$u_3(t) = K_p (ref - x_2(t)) + K_i x_4(t) - K_d x_3(t) \tag{4.111}$$

Tomando de manera similar se opta por elegir un valor de linealización de

$X2 = 60\text{grados}$ o 1.0472rad , dada las pruebas realizadas según la similitud en la respuesta del sistema linealizado en dicho punto respecto a la respuesta del sistema no lineal. Se obtiene la siguiente expresión de U_{op} (4.112) para la señal de control $u_3(t)$ del sistema no lineal compensado, y así poder realizar la comparación entre la respuesta del sistema no lineal con el lineal:

$$U_{op} = \frac{r_a m_{pc} g l_3 \sin(X2)}{k_m} \quad (4.112)$$

$$u_3(t) = K_p (ref - x_2(t)) + K_i x_4(t) - K_d x_3(t) + \frac{r_a m_{pc} g l_3 \sin(X2)}{k_m} \quad (4.113)$$

Con las ecuaciones (4.112) y (4.113), junto al modelo de espacio de estados descrito por el sistema de ecuaciones (4.108), es posible formar el modelo de espacio de estados del sistema del servomotor 3 no lineal compensado, a fin de poder comparar la respuesta del sistema lineal de la expresión (4.110). Se tiene las gráficas 4.39 y 4.40, para comparar el comportamiento de la salida de ambos sistemas.

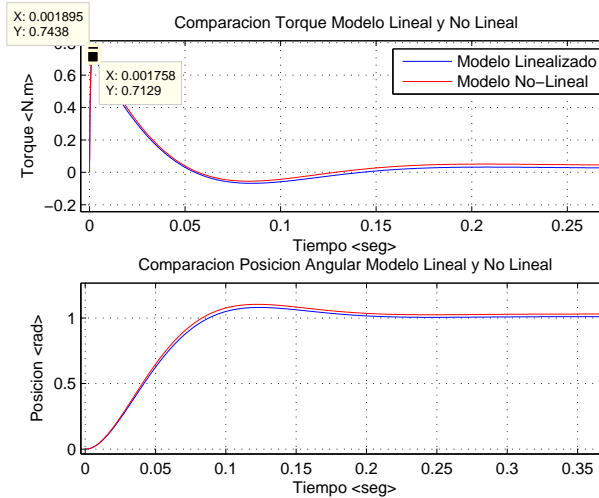


Figura 4.39: Comparación de respuesta del sistema no lineal (ecuaciones (4.108) y (4.113)) con sistema lineal (ecuaciones (4.110) y (4.111)) para servomotor 3. Fuente: Propia

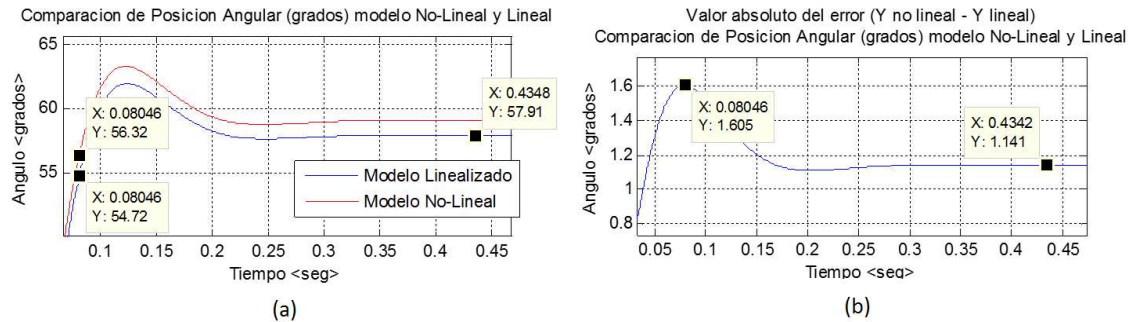


Figura 4.40: Comparación de respuesta del sistema no lineal (ecuaciones (4.108) y (4.113)) con sistema lineal (ecuaciones (4.110) y (4.111)) para servomotor 3, (a) Comparación de posición angular, (b) Valor absoluto del error. Fuente: Propia

En la Figura 4.40(b), se puede notar que el error absoluto entre la respuesta en estado estacionario de la posición angular de ambos sistemas difiere en 1.14grados o 0.01989 rad, lo que es aceptable para el punto de linealización seleccionado. De igual forma, el valor máximo del torque obtenido comparando en ambos sistemas no excede el torque máximo nominal del motor, por lo que se considera que la linealización desarrollada proporciona un sistema aceptable y representativo del sistema no lineal, por ende se toma este como el modelo del sistema actuador-eslabón para el servomotor 3.

4.4 Selección y diseño de controladores

En un contexto general, observando los resultados obtenidos para cada sistema lineal que representa cada uno de los subsistemas actuador-eslabón de la extremidad, se pueden observar características de comportamiento comunes a modificar de la salida, en base a la posición angular, como se tiene en la Figura 4.41, en la cual se puede notar que la respuesta de los sistemas 2 y 3 no alcanzan la referencia, así como que el sistema 1 presenta una respuesta oscilatoria con sobre disparo en su fase transitoria. Para los tres sistemas la respuesta es bastante rápida, alcanzando el punto de asentamiento en menos de un segundo, acción que mecánicamente puede dañar a la larga los componentes internos de los actuadores.

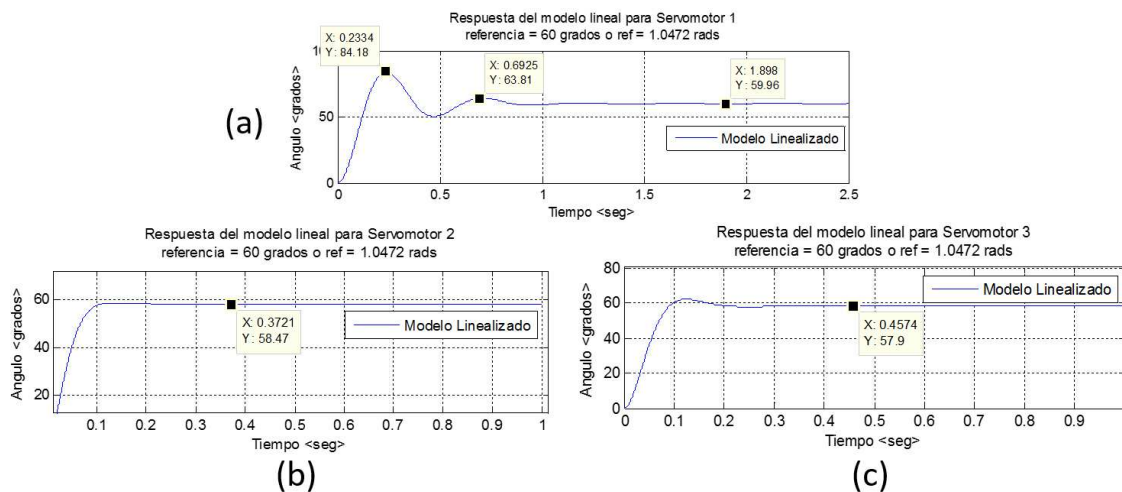


Figura 4.41: Comparación entre características de la respuesta de posición angular de los sistemas lineales 1,2 y 3. (a)Sistema lineal 1, (b)Sistema lineal 2, (c)Sistema lineal 3. Fuente: Propia

El controlador a diseñar en esta sección hace referencia al controlador externo a cada subsistema Actuador-eslabón, obtenidos para cada articulación de la extremidad (distinto a los controlador PID internos ya incluidos en cada modelo), sobre el cual se tendrá total acceso al momento de una implementación, bien sea de manera digital o física del sistema en lazo cerrado.

A pesar de que el comportamiento previamente mostrado por los sistemas lineales puede ser aceptable, no son los deseados para lograr cumplir el fin del este proyecto, por tanto, es necesario el diseño de una etapa más de control que permita satisfacer requerimientos de operación para los actuadores. Como lo que se desea lograr en primera instancia, es que el sistema alcance la referencia, para poder garantizar que los motores que posicionen la extremidad en punto deseado según la señal o ángulo asignado es necesario apuntar a la escogencia de un controlador que posea dichas características.

Aprovechando que se cuenta con sistemas de ecuaciones de espacio de estados ya linealizadas, se puede utilizar algún tipo de controlador que pueda trabajar con este tipo de sistemas. Los controladores usualmente utilizados para lograr alcanzar puntos

de referencia son los denominados controladores PI, de la familia de controladores PID, que tienen la característica principal de garantizar el estado estable si estos están bien diseñados, además de que una correcta formulación de sus parámetros puede lograr actuar para modificar el comportamiento en la fase transitoria del sistema así como modificar el tiempo de asentamiento según se desee.

Existen un conjunto de métodos a través de los cuales se pueden diseñar este tipo de controladores, bien sea por métodos gráficos o tabulados como los de Ziegler-Nichols, métodos de diseño en el espacio frecuencial o temporal basados en especificaciones de error en el estado estacionario, velocidad o aceleración; la selección del método depende de las ventajas que brinde para modificar las características que son necesarias para el sistema.

Previa a la selección del método de diseño del controlador a utilizar, es necesario observar el tipo de requerimientos necesarios que debe cumplir el sistema. Entre los requisitos básicos está dado que si se va utilizar un controlador lineal, el sistema debe ser linealizado, paso ya completado para cada uno de los sistemas. Lo siguiente que se necesita es lograr observar el comportamiento del sistema en lazo cerrado, lo que implica llevar el modelo representativo de cada sub sistema actuador-eslabón al espacio frecuencial; una vez allí es necesario determinar el orden del sistema, dado que en esta familia de controladores la mayoría de los métodos para diseñarlos requieren que el sistema sea de orden dos o tres, además de propios, para poder garantizar su funcionalidad.

Dado que los sistemas de por sí ya son sistemas lineales, se procede a hallar la función de transferencia de cada uno. Utilizando las matrices A,B,C y D de cada sistema es posible hallar la representación en espacio frecuencial mediante la transformación de Laplace (Ogata, 1998, p.35) u operador de Laplace, como se tiene en la siguiente expresión:

$$G(s) = C.(SI - A)^{-1}.B \quad (4.114)$$

Donde $G(s)$ representa la función de transferencia resultante del sistema en lazo abierto. Posteriormente, se procede a utilizar la expresión del controlador PID del servomotor en espacio frecuencial de la ecuación (4.115), junto a los valores para dicho PID de las expresiones (4.66), (4.67) y (4.68), para obtener el PID interno del sistema, de la forma de la expresión (4.115).

$$H(s) = K_p + \frac{1}{K_i s} + K_d s = 3.8 + 0.1s + \frac{0.001255}{s} \quad (4.115)$$

A fin de obtener la expresión en lazo cerrado del sistema, con realimentación unitaria negativa, mediante la expresión de la ecuación (4.116).

$$G_{lc}(s) = \frac{G_{la}(s)H(s)}{G_{la}(s)H(s) + 1} \quad (4.116)$$

Se procede a hallar las funciones de transferencia para cada sistema.

• **Sistema actuador-eslabón 1:**

Para el sistema 1, tomando las matrices A, B y C se tiene la siguiente expresión para hallar la función de transferencia en lazo abierto:

$$G_{la}(s) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{r_a}{l_a} & 0 & -\frac{k_b k_m}{l_a} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{(l_1^2 m_{sv2} + I_1)} & 0 & -\frac{\beta_1}{(l_1^2 m_{sv2} + I_1)} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{k_m}{l_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.117)$$

Obteniendo la función de transferencia para el sistema en la expresión (4.118):

$$G_{la}(s) = \frac{k_m}{(l_1^2 l_a m_{sv2} + I_1 l_a) s^3 + (l_1^2 m_{sv2} r_a + I_1 r_a + \beta_1 l_a) s^2 + (\beta_1 r_a + k_b k_m) s} \quad (4.118)$$

Substituyendo cada uno de los valores constantes de la expresión se obtiene:

$$G_{la}(s) = \frac{1.8666}{(0.1491008333e^{-4} s^3 + 0.3731520833e^{-1} s^2 + 0.1012832875s)} \quad (4.119)$$

Utilizando la ecuación (4.116), (4.119) y la (4.115), se obtiene la función de transferencia en lazo cerrado del sistema de la expresión (4.120):

$$G_{lc}(s) = \frac{4666.5s^2 + 1.773e^5 * s + 58.564}{0.3727520832s^4 + 932.880s^3 + 7198.58s^2 + 1.773e^5s + 58.564} \quad (4.120)$$

• **Sistema actuador-eslabón 2:**

Para el sistema 2, tomando las matrices A, B y C se tiene la siguiente expresión (4.121) para hallar la función de transferencia en lazo abierto:

$$G_{la}(s) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{r_a}{l_a} & 0 & -\frac{k_b k_m}{l_a} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{(l_2^2 m_{sv3} + I_2)} & -\frac{m_{sv3} g l_2 \cos(X2)}{(l_2^2 m_{sv3} + I_2)} & -\frac{\beta_2}{(l_2^2 m_{sv3} + I_2)} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} k_m \\ l_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.121)$$

Obteniendo la función de transferencia para el sistema en la expresión (4.122):

$$G_{la}(s) = k_m / (l_2^2 l_a m_{sv3} + I_2 l_a) s^3 + (l_2^2 m_{sv3} r_a + I_2 r_a + \beta_2 l_a) s^2 + (\cos(X2) g l_2 l_a m_{sv3} + \beta_2 r_a + k_b k_m) s + \cos(X2) g l_2 m_{sv3} r_a \quad (4.122)$$

Substituyendo cada uno de los valores constantes de la expresión (4.122), así como el valor de X2 como valor de linealización se obtiene la expresión (4.123):

$$G_{la}(s) = \frac{1.8666}{0.161e^{-5}s^3 + 0.408e^{-2}s^2 + 0.101s + 0.1862} \quad (4.123)$$

Utilizando la ecuación (4.116), (4.123) y la (4.115), se obtiene la función de transferencia en lazo cerrado del sistema de la expresión (4.124):

$$G_{lc}(s) = \frac{2333.25s^2 + 88663.5s + 29.282}{0.2024e^{-1}s^4 + 51.095s^3 + 3600.222s^2 + 90991s + 29.282} \quad (4.124)$$

• **Sistema actuador-eslabón 3:**

Para el sistema 3, tomando las matrices A, B y C se tiene la siguiente expresión para hallar la función de transferencia en lazo abierto:

$$G_{la}(s) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{r_a}{l_a} & 0 & -\frac{k_b k_m}{l_a} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{(l_3^2 m_{pc} + I_3)} & -\frac{m_{pc} g l_3 \cos(X_2)}{(l_3^2 m_{pc} + I_3)} & -\frac{\beta_3}{(l_3^2 m_{pc} + I_3)} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{k_m}{l_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.125)$$

Obteniendo la función de transferencia para el sistema en la expresión (4.126):

$$G_{la}(s) = k_m / (l_3^2 l_a m_{pc} + I_3 l_a) s^3 + (l_3^2 m_{pc} r_a + I_3 r_a + \beta_3 l_a) s^2 + (\cos(X_2) g l_3 l_a m_{pc} + \beta_3 r_a + k_b k_m) s + \cos(X_2) g l_3 m_{pc} r_a \quad (4.126)$$

Sustituyendo cada uno de los valores constantes de la expresión (4.126), así como el valor de X_2 como valor de linealización se obtiene la expresión (4.127):

$$G_{la}(s) = \frac{1.8666}{0.2674e^{-5}s^3 + 0.6725e^{-2}s^2 + 0.1013s + 0.257} \quad (4.127)$$

Utilizando la ecuación (4.116), (4.123) y la (4.115), se obtiene la función de transferencia en lazo cerrado del sistema de la expresión (4.124):

$$G_{lc}(s) = \frac{18666s^2 + 7.093e^5 s + 234.258}{0.267s^4 + 672.516s^3 + 28804.618s^2 + 7.35033e^5 s + 234.258} \quad (4.128)$$

De las funciones de transferencia en lazo cerrado previamente desarrolladas (4.120, 4.124 y 4.128), se tiene que el orden de los tres sistemas es superior a dos, por lo que es necesario hacer una reducción de orden a cada uno, si es posible, de tal forma que se mantenga el comportamiento del sistema con una función representativa. Para poder hacer uso de los controladores de la PID es necesario reducir el orden de sistema al menos a dos, por tanto, se procede a utilizar el comando de *Matlab balred* para realizar dicha reducción. Este comando de cierto modo intenta reducir el orden del sistema, en base a hallar un conjunto de polos y ceros que mantengan las características de comportamiento dinámico del sistema, según el orden de reducción que se pide. En ocasiones no es posible obtener un sistema del orden deseado. (Para más información acerca de cómo funciona este comando revisar las referencias del programa *Matlab* (MathWorks, 2016)).

Se procede a realizar la reducción para la función de transferencia en lazo cerrado de cada sistema, se tiene para cada sistema el siguiente resultado:

- **Sistema 1:**

La función de transferencia en lazo cerrado original está dada por la ecuación (4.120), aplicando el comando *balred* para obtener un sistema de segundo orden en *Matlab*, se tiene la siguiente función de transferencia de la expresión (4.129):

$$G_{lcred}(s) = \frac{-0.1967e^{-2}s^2 + 4.941s + 190.7}{s^2 + 7.663s + 190.7} \quad (4.129)$$

Donde se puede notar que se obtiene una función de transferencia propia de segundo orden, en la que existe un cero no dominante reflejado en el término de s^2 , respecto a los demás coeficientes. Este término se puede eliminar sin afectar el comportamiento del sistema, obteniendo ahora la nueva expresión de orden reducido del sistema como una función de transferencia estrictamente propia en la expresión (4.130) siguiente:

$$G_{lcred}(s) = \frac{4.941s + 190.7}{s^2 + 7.663s + 190.7} \quad (4.130)$$

Con esta expresión de la función de transferencia de orden reducido y la eliminación del cero no dominante, es posible ahora hacer la comparación entre la función de transferencia original respecto a la reducida obtenida. Se tiene dicha comparación en la Figura 4.42, donde la respuesta de ambos sistemas coinciden, por tanto, se acepta la función de transferencia de orden reducido como función representativa del sistema.

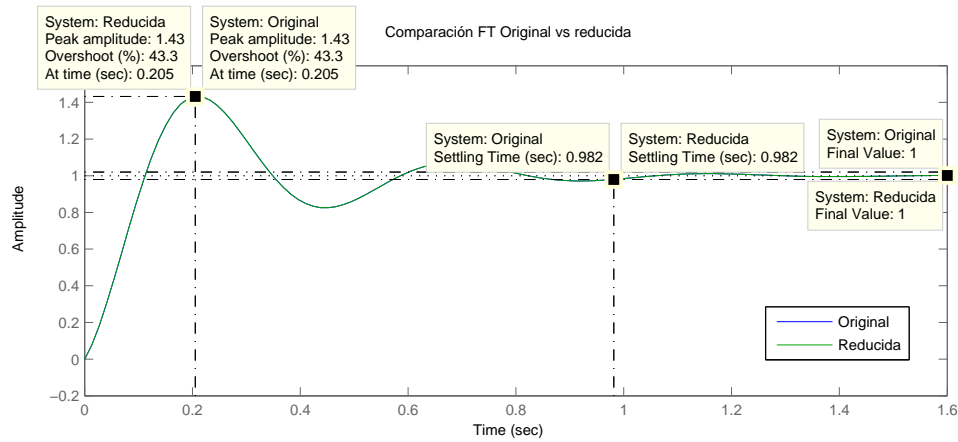


Figura 4.42: Comparación de respuesta del sistema uno, para la función de transferencia original (ecuación (4.120)) y reducida (ecuación (4.130)). Fuente: Propia

- **Sistema 2:** La función de transferencia en lazo cerrado original está dada por la ecuación (4.124), aplicando el comando *balred* para obtener un sistema de segundo orden en *Matlab*, se tiene la siguiente función de transferencia:

$$G_{lcred}(s) = \frac{0.008398s^2 + 39.4s + 4007}{s^2 + 104.2s + 4007} \quad (4.131)$$

Análogamente al caso anterior el término de S^2 en el numerado se puede eliminar sin afectar el comportamiento del sistema, bajo el criterio de comparación del sistema reducido con el sistema original y su comportamiento similar, obteniendo ahora la nueva expresión de orden reducido del sistema como una función de transferencia estrictamente propia en la expresión (4.132) siguiente:

$$G_{lcred}(s) = \frac{39.4s + 4007}{s^2 + 104.2s + 4007} \quad (4.132)$$

Con esta expresión de la función de transferencia de orden reducido y la eliminación del cero no dominante, es posible ahora hacer la comparación entre la función de transferencia original (ecuación (4.124)) respecto a la reducida obtenida (ecuación (4.132)). Se tiene dicha comparación en la Figura 4.43, donde la respuesta de ambos sistemas coinciden, por tanto, se acepta la función de transferencia de orden reducido como función representativa del sistema.

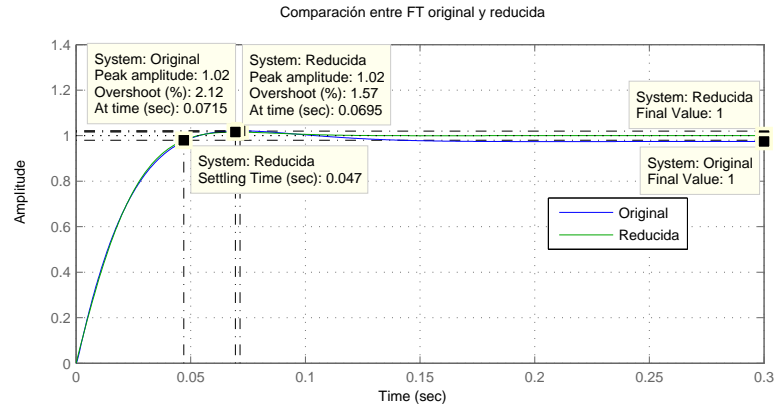


Figura 4.43: Comparación de respuesta del sistema dos, para la función de transferencia original (ecuación (4.124)) y reducida (ecuación (4.132)). Fuente: Propia

- **Sistema 3:** La función de transferencia en lazo cerrado original está dada por la ecuación (4.128), aplicando el comando *balred* para obtener un sistema de segundo orden en *Matlab*, se tiene la siguiente función de transferencia:

$$G_{lcred}(s) = \frac{0.02433s^2 + 22.93s + 1630}{s^2 + 51.11s + 1630} \quad (4.133)$$

De igual manera a los casos anteriores, se elimina el término de S^2 en el numerador, debido a su baja influencia en el comportamiento del sistema, obteniendo ahora la nueva expresión de orden reducido del sistema como una función de transferencia estrictamente propia en la expresión (4.134) siguiente:

$$G_{lcred}(s) = \frac{22.93s + 1630}{s^2 + 51.11s + 1630} \quad (4.134)$$

Con esta expresión de la función de transferencia de orden reducido (ecuación (4.134)), es posible ahora hacer la comparación entre la función de transferencia original (ecuación (4.128)), respecto a la reducida obtenida (ecuación (4.134)). Se tiene dicha comparación en la Figura 4.43, donde la respuesta de ambos sistemas coinciden, por tanto, se acepta la función de transferencia de orden reducido como función representativa del sistema.

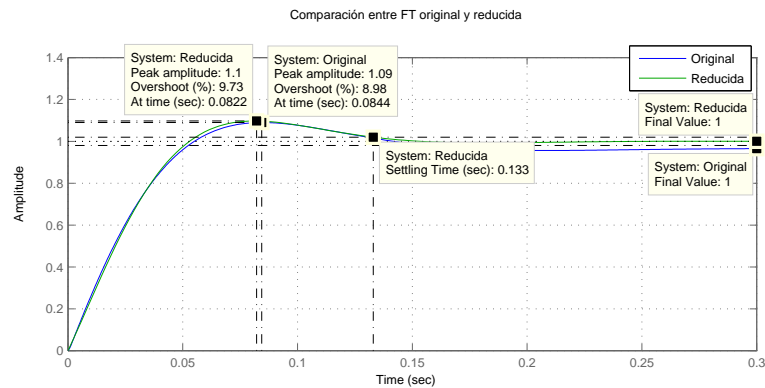


Figura 4.44: Comparación de respuesta del sistema tres, para la función de transferencia original (ecuación (4.128)) y reducida (ecuación (4.134)). Fuente: Propia

Con las funciones de transferencia reducidas para cada sistema, se procede a describir el método mediante el cual se diseñarán cada uno de los controladores PI externos de los sistemas actuador-eslabón.

Diseño de los controladores.

Se procede a utilizar como referencia para el diseño del controlador PI externo de cada sistema, el método del lugar de las raíces descrito por Cerrada (2010), con bases teóricas en los textos de (Kuo, 1996, p.609) y (Nise, 2004, p.424).

Para implementar dicho controlador se tiene el siguiente diagrama de bloques de la Figura 4.45, en la cual $G_p(s)$ representa la función de transferencia de la planta y $G_c(s)$ la función de transferencia del controlador PI externo a diseñar.

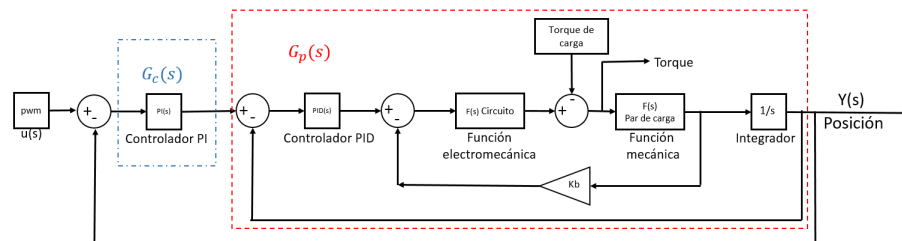


Figura 4.45: Diagrama de bloques para planta con controlador PI externo. Fuente: Propia

Para el diseño de cada uno de los controladores, se procede a hacer uso de un análisis del lugar de las raíces de cada función de transferencia de los sistemas reducidos actuador-eslabón, mediante el cual se podrá observar cual será la posible posición del polo que se va a agregar con el controlador para modificar la dinámica de su respuesta. La estructura del controlador PI externo a implementar está dada por la ecuación (4.135):

$$G_c(s) = \frac{K_p(s + Z_c)}{s} \quad (4.135)$$

Donde Z_c representa el valor del polo escogido para el controlador, el cual debe ser mayor que el polo dominante del sistema para poder observar algún efecto o cambio en la dinámica del mismo. Dado que un controlador PI externo, por agregar un polo en el origen, otorga como garantía principal un error de posición nulo, se opta por utilizar la ecuación de error de velocidad para formular el diseño del controlador, dicha expresión se está dada por la ecuación (4.136).

$$\frac{1}{E_v} = \lim_{s \rightarrow 0} s G_c(s) G_p(s) \quad (4.136)$$

Donde $G_p(s)$ representa la función de transferencia de la planta o sistema y $G_c(s)$ la función de transferencia del controlador.

La expresión del error de velocidad del sistema, se mantiene de manera simbólica para poder despejar el valor de la constante proporcional del controlador, que está dada por la ecuación (4.137).

$$K_p = \frac{1}{E_v Z_c} \quad (4.137)$$

El valor de E_v esta dado por la escogencia del error de velocidad que se desea respecto a las características del sistema original, previo al diseño de controlador PI externo. Dicho valor se obtiene mediante la expresión (4.138).

$$E_v = \frac{\text{PorcentajeError}}{100} \quad (4.138)$$

Donde $\text{PorcentajeError}/100$ representa un valor del tipo 0.5 que describe el 50% de error de velocidad respecto al sistema original.

Por último el valor de la constante integrativa del controlador, se determina mediante la fórmula de la expresión (4.139).

$$K_i = K_p Z_c \quad (4.139)$$

Con esto se logra formular la estructura básica del controlador. Por último se grafica la respuesta del sistema completo en lazo cerrado con el controlador PI externo diseñado, para observar el comportamiento del sistema en caso de que se necesiten realizar modificaciones adicionales para lograr las especificaciones deseadas.

Para este diseño de controlador si se selecciona un Z_c más pequeño se obtendrá una respuesta más lenta del sistema controlado y viceversa, por tanto, para poder generar distintos tiempos de asentamiento se puede optar por seleccionar distintos valores de Z_c que estén ubicados entre una posición en la que sigan siendo dominantes y el origen o polo cero del sistema. Otra forma de obtener tiempos de asentamiento distintos es seleccionando un valor de Z_c fijo y modificar el error de velocidad deseado respecto al tiempo de asentamiento requerido.

Para cada sistema actuador-eslabón, se procede a diseñar tres controladores PI externo, que comprenden tres tiempos de asentamiento distintos como especificación inicial entre lento, medio y rápido, además de diseñar dichos controladores para mantener características como lo son presencia de una respuesta sobreamortiguada, eliminación de sobre disparo e implícitamente que se logre alcanzar el punto de referencia. El diseño de tres controladores distintos está justificado por el hecho de poder utilizar varias velocidades de movimiento para los distintos grados de libertad que componen cada extremidad del robot, según se requiera en el patrón de locomoción diseñado.

Se tiene entonces para cada sistema el siguiente análisis y diseño de sus respectivos controladores PI externos:

Sistema actuador-eslabón o GLD 1:

Se procede a observar el comportamiento de la función de transferencia en lazo abierto

(4.130), la cual representa la dinámica del sistema actuador-eslabón incluyendo el PID interno, en el lugar de las raíces para determinar la ubicación de polos y ceros, haciendo uso de la herramienta *Matlab* con el comando *rlocus*, obteniendo la gráfica de la Figura 4.46.

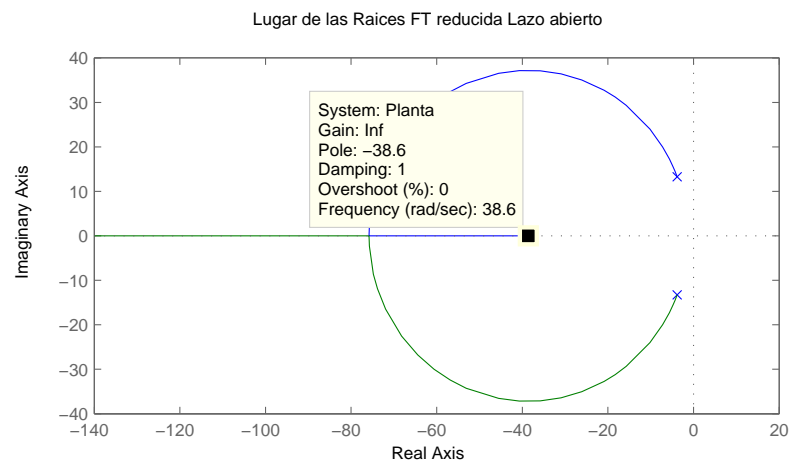


Figura 4.46: Lugar de las raíces, función de transferencia en lazo abierto para sistema de GLD 1 sin controlador PI externo. Fuente: Propia

En la Figura 4.46 se puede observar que el polo dominante del sistema está ubicado en $Z_c = 38.6$. Se procede a seleccionar un $Z_c = 20$ para relentizar la respuesta del sistema en dos de los controladores PI externos a diseñar (medio y lento), y un $Z_c = 40$ para el controlador PI externo rápido, a fin evitar comportamientos no sobre amortiguados en la fase transitoria. Se hace uso, de igual forma, de la expresión de diseño en base al error de velocidad para determinar las características de la respuesta del sistema. Se tiene la Tabla 4.7 de parámetros seleccionados para cada uno de los tres controladores PID externos.

Tabla 4.7: Descripción de los valores utilizados para cada uno de los controladores PI externos para sistema GLD 1

Velocidad del controlador	Z_c	E_v	K_p	K_i	Ts(seg)
Rápido	40	0.6	0.041667	1.666667	3.09
Medio	20	1.7	0.029412	0.588235	8.71
Lento	20	2.2	0.017857	0.714286	11.2

Con estos controladores PI externos, se obtiene las siguientes funciones de transferencia para la planta en lazo cerrado con realimentación unitaria negativa:

$$G_{plc}(s) = \frac{0.2059s^2 + 16.18s + 317.8}{s^3 + 7.869s^2 + 206.9s + 317.8} \quad (4.140)$$

$$G_{plc}(s) = \frac{0.1453s^2 + 8.515s + 112.2}{s^3 + 7.808s^2 + 199.2s + 112.2} \quad (4.141)$$

$$G_{plc}(s) = \frac{0.1123s^2 + 6.58s + 86.68}{s^3 + 7.775s^2 + 197.3s + 86.68} \quad (4.142)$$

Con estas funciones de transferencia se procede a hacer una gráfica comparativa de la respuesta de cada sistema para observar el tiempo de asentamiento obtenido según los valores seleccionados para cada controlador, se tiene la gráfica de la Figura 4.47.

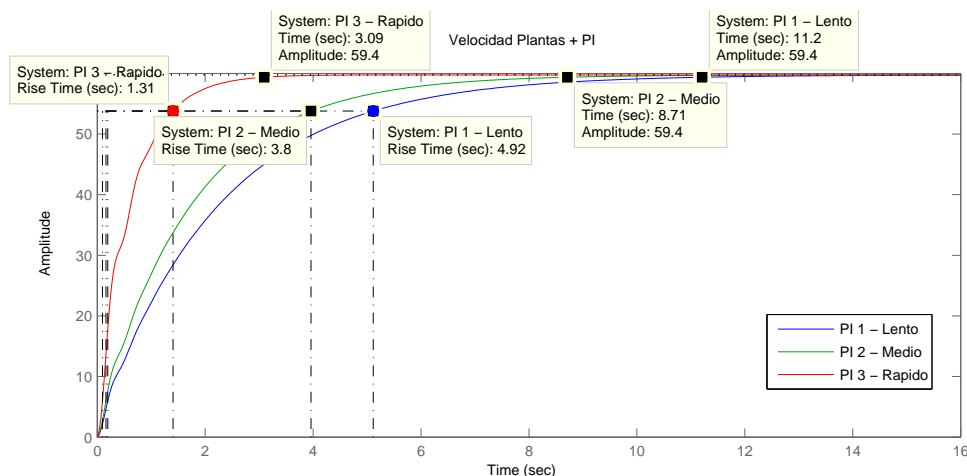


Figura 4.47: Comparación y comprobación de respuesta para el sistema actuador-eslabón 1, para tres velocidades de controladores PID externos. Fuente:

Propia

En la gráfica de la Figura 4.47, se puede observar que se logran las especificaciones para cada controlador del GLD 1 diseñado, obteniendo un comportamiento sobre amortiguado sin sobredisparo alguno. Con esto quedan definidos los tres controladores PID externos a utilizar para poder hacer control del movimiento del segundo servomotor que conforma cada una de las extremidades.

Sistema actuador-eslabón o GLD 2:

De manera análoga al caso anterior, se procede a observar el comportamiento de la función de transferencia en lazo abierto (4.132), en el lugar de las raíces para determinar la ubicación de polos y ceros, haciendo uso de la herramienta *Matlab* con el comando *rlocus*, obteniendo la gráfica de la Figura 4.48.

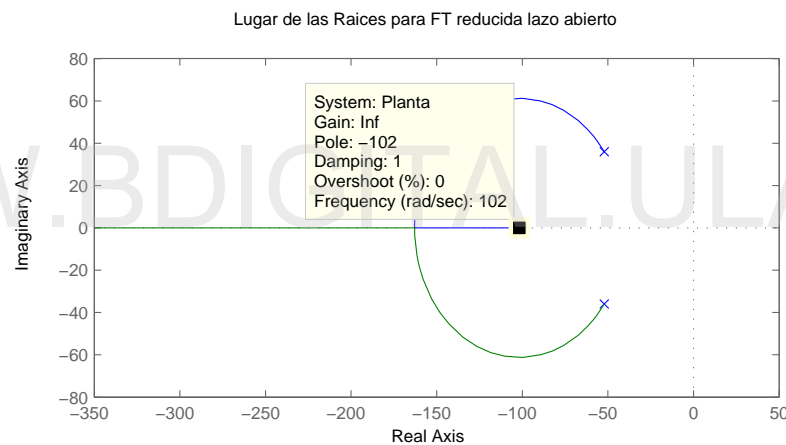


Figura 4.48: Lugar de las raíces, función de transferencia en lazo abierto para sistema de GLD 2, sin controlador PI externo. Fuente: Propia

En la Figura 4.48 se puede observar que el polo dominante del sistema está ubicado en $Z_c = 102$. En este caso se elige un valor de $Z_c = 130$, que a pesar de que es mayor al polo dominante del sistema, se elige de tal forma para poder eliminar comportamientos oscilatorios no deseados en la fase transitoria del sistema una vez acoplado el controlador PI externo resultante. Como esta elección de un polo más alejado que el polo dominante tiene como consecuencia hacer el sistema más rápido, se mantiene dicho valor de $Z_c = 130$ y se diseña el controlador en base al error de velocidad para relentizar la respuesta. Se tiene la Tabla 4.8 con los los valores de los

tres controladores PI externo diseñados, en base a una entrada de referencia de 60 grados para observar el tiempo en el cual se logra alcanzar dicho valor.

Tabla 4.8: Descripción de los valores utilizados para cada uno de los controladores PI externo para sistema GLD 2

Velocidad del controlador	Z_c	E_v	K_p	K_i	Ts(seg)
Rápido	130	0.6	0.012821	1.666667	3.03
Medio	130	1.7	0.0085470085	1.111111	4.49
Lento	130	2.0	0.003846	0.500000	9.94

Con estos controladores PI externos, se obtiene las siguientes funciones de transferencia para la planta en lazo cerrado con realimentación unitaria negativa:

$$G_{plc}(s) = \frac{0.5051s^2 + 117s + 6678}{s^3 + 104.7s^2 + 4124s + 6678} \quad (4.143)$$

$$G_{plc}(s) = \frac{0.3368s^2 + 78.03s + 4452}{s^3 + 104.5s^2 + 4085s + 4452} \quad (4.144)$$

$$G_{plc}(s) = \frac{0.1515s^2 + 35.11s + 2004}{s^3 + 104.4s^2 + 4042s + 2004} \quad (4.145)$$

Con estas funciones de transferencia se procede a realizar una gráfica comparativa de la respuesta del sistema para cada una de las velocidad de los controladores PI externos diseñados, se tiene la gráfica de la Figura 4.49.

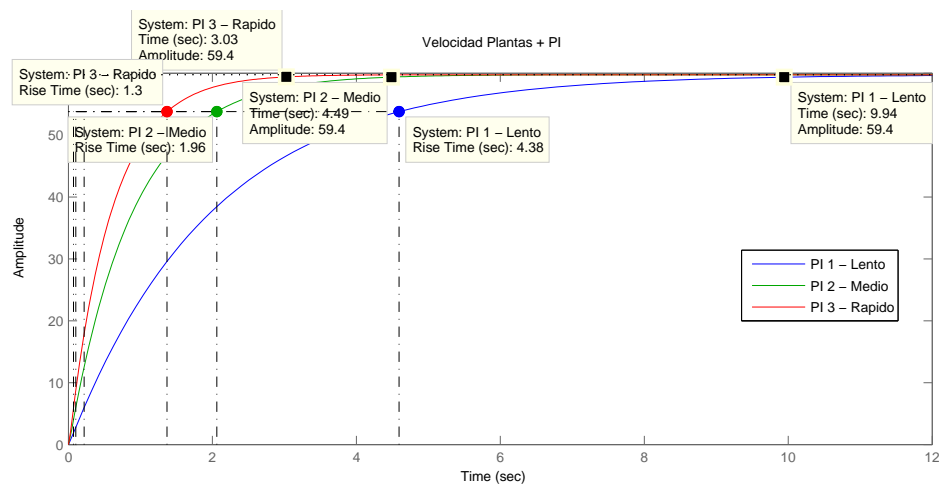


Figura 4.49: Gráfica comparativa de la respuesta de los tres controladores PI externos diseñados para el sistema actuador-eslabón 2. Fuente: Propia

En la gráfica de la Figura 4.49, se puede observar que se logran las especificaciones para cada controlador del sistema actuador-eslabón 2 diseñado, obteniendo un comportamiento sobre amortiguado. Con esto quedan definidos los tres controladores a utilizar para poder hacer control del movimiento del segundo servomotor en cada una de las extremidades.

Sistema actuador-eslabón o GLD 3:

De igual forma que con el sistema actuador-eslabón 2, se procede a observar el comportamiento de la función de transferencia en lazo abierto para el sistema actuador-eslabón 3, en el lugar de las raíces para determinar la ubicación de polos y ceros, haciendo uso de la herramienta *Matlab* con el comando *rlocus*, obteniendo la gráfica de la Figura 4.50.

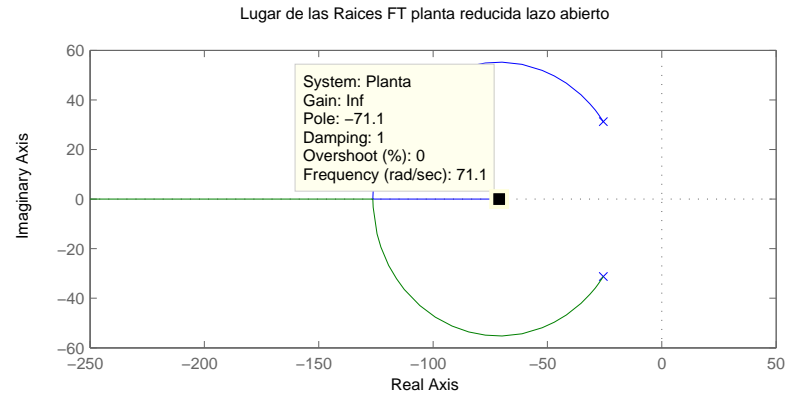


Figura 4.50: Lugar de las raíces, función de transferencia en lazo abierto para sistema de GLD 3, sin controlador PI externo. Fuente: Propia

En la Figura 4.50 se puede observar que el polo dominante del sistema está ubicado en $Z_c = 71$. En este caso se elige un valor de $Z_c = 90$, que a pesar de que es mayor al polo dominante del sistema, se elige de tal forma, para poder eliminar comportamientos oscilatorios no deseados en la fase transitoria del sistema producidos al acoplar el controlador PI externo. Como esta elección de un polo más alejado que el polo dominante tiene como consecuencia hacer el sistema más rápido, se mantiene dicho valor de $Z_c = 90$ y se diseña el controlador en base al error de velocidad para relentizar la respuesta. Se tiene la Tabla 4.9 con los valores de los tres controladores PI externo diseñados, en base a una entrada de referencia de 60 grados para observar el tiempo en el cual se logra alcanzar dicho valor.

Tabla 4.9: Descripción de los valores utilizados para cada uno de los controladores PI externo para sistema GLD 3

Velocidad del controlador	Z_c	E_v	K_p	K_i	Ts(seg)
Rápido	90	0.6	0.0158730	1.428571	3.47
Medio	90	1.7	0.00740740	0.666666	7.49
Lento	90	2.0	0.0050505	0.454545	11

Se procede a obtener las funciones de transferencia en lazo cerrado con realimentación unitaria negativa de la planta del sistema en lazo abierto de la expresión (4.134),

con cada uno de los controladores descritos anteriormente, obteniendo las expresiones (4.146), (4.147) y (4.148).

$$G_{plc}(s) = \frac{0.364s^2 + 58.63s + 2329}{s^3 + 51.47s^2 + 1689s + 2329} \quad (4.146)$$

$$G_{plc}(s) = \frac{0.1699s^2 + 27.36s + 1087}{s^3 + 51.28s^2 + 1657s + 1087} \quad (4.147)$$

$$G_{plc}(s) = \frac{0.1158s^2 + 18.66s + 740.9}{s^3 + 51.23s^2 + 1649s + 740.9} \quad (4.148)$$

Se procede a observar la respuesta de cada sistema de las expresiones anteriores, para observar si cumple con los requerimientos de diseño, se tiene la gráfica de la Figura 4.51.

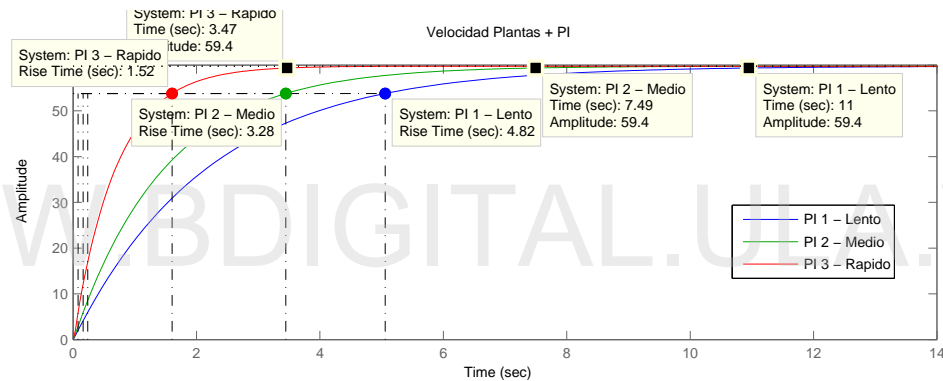


Figura 4.51: Gráfica comparativa de la respuesta de los tres controlador PI diseñados para el sistema GLD 3. Fuente: Propia

En la gráfica de la Figura 4.51, se puede observar que el comportamiento de cada uno de los sistemas cumple los requisitos de diseño, logrando un comportamiento sobreamortiguado y la modificación del tiempo de asentamiento, además de alcanzar la referencia. Con esto quedan definidos los tres controladores a utilizar para poder hacer control del movimiento del tercer servomotor que conforma cada una de las extremidades.

Con estos controladores definidos, se tiene todo lo necesario para poder realizar cualquier tipo de movimiento con las extremidades del robot. Haciendo uso simultáneo del modelo de cinemática directa o inversa, y el conjunto de transformaciones espaciales

antes mencionadas, se puede planear las posiciones angulares a las que se desea llegar con cada actuador de la estructura, según se necesite para poder efectuar un ciclo de locomoción o un simple movimiento de alguna de las extremidades hacia algún punto en el espacio, punto en el cual los controladores regulan dicho movimiento, a fin de obtener una respuesta sobreamortiguada y que alcance la posición deseada, manteniendo una velocidad fija para cada rango de movimiento.

4.5 Modelo de validación para polígono de apoyo

El poder conseguir un polígono de apoyo que sea válido para un robot que posea como medio de desplazamiento extremidades articuladas, es crucial a la hora de efectuar cualquier movimiento requerido por su patrón de locomoción. Gracias a dicho polígono es posible garantizar la estabilidad estática de la estructura, mientras un grupo de extremidades de soporte cargan con el peso del robot y el otro grupo de extremidades se posiciona para el siguiente paso del ciclo de locomoción. Dada la representación de la estructura en *Matlab*, mediante el modelo cinemático directo del robot, es posible poder determinar si la posición en la que están dispuestas las extremidades se puede o no formar una base estable para poder garantizar el criterio de estabilidad estática (Ver sección 2.5) para la estructura antes de poder realizar otro movimiento o paso del ciclo del patrón de locomoción.

Tomando en cuenta que es posible poder obtener la posición de cualquiera de los elementos que conforman al robot, mediante el uso del modelo cinemático directo, se puede hacer una búsqueda en la cual se intente conseguir el mejor polígono de apoyo, en caso de existir, que le brinde la estabilidad necesaria al robot.

Los posibles puntos de contacto del robot están dados por cada elemento final de cada uno de los eslabones que componen las extremidades, es decir, se puede hacer contacto con la superficie de desplazamiento bien sea con la coxa, la rodilla o con la punta final de contacto de la extremidad, dando lugar a un gran número de posibilidades de polígonos de apoyo a formar según el número de apéndices que tiene

el hexápodo diseñado. Aunque en primera instancia se puede intentar simplemente buscar los polígonos que se formen con el último punto de contacto de la cadena cinemática de la extremidad, es una realidad que pudiesen existir casos en los cuales no sea este elemento el único que tenga contacto con la superficie, por tanto, es necesario tomarlos en consideración para hacer un modelo mucho más amplio en funcionalidad a la hora de conseguir un polígono de apoyo estable.

Como se describe previamente, en el desarrollo del modelo cinemático directo (ver capítulo 4, sección 1.1), dicho modelo toma como base el sistema de referencia ubicado en el centro de la base del robot, es decir, si se pudiese tener un punto de vista internamente del modelo el robot solo podría ver sus propias extremidades sin conocer si estas están o no en contacto con la superficie, acotación a tomar en cuenta al momento de modelar la forma de validar el polígono de apoyo que se puede formar.

Se propone entonces como modelo de validación de polígono de apoyo, el siguiente algoritmo para poder realizar la búsqueda de los posibles polígonos que se puedan formar con las extremidades del robot.

En principio, suponiendo que el robot no está siendo referenciado en base a algún sistema solidario diferente de su sistema inicial o base, solo se conocen las medidas o posiciones de cada uno de sus elementos respecto a su propio origen coordenado, donde los ejes XY representan el plano en el cual se realizan movimientos laterales o hacia delante y atrás, y el eje Z representa la altura positiva de la base hacia arriba y negativa de la base hacia abajo. Con esto descrito, es posible tener un primer indicio, como dicta la lógica, que las extremidades que estén más inferior de la posición de referencia de la base son las que tendrán contacto con la superficie con mayor posibilidad.

Como se puede apreciar en la Figura 4.52, la extremidad a puede tener como punto de contacto la coxa, la extremidad b la rodilla y por último la extremidad c la punta de contacto propia de la extremidad, entonces el primer paso que se debe seguir para poder

conseguir un polígono de apoyo válido es determinar qué punto de cada extremidad tiene el valor de la coordenada Z más inferior de la base del robot, a fin de poder crear una primera clasificación de la altura de cada extremidad.

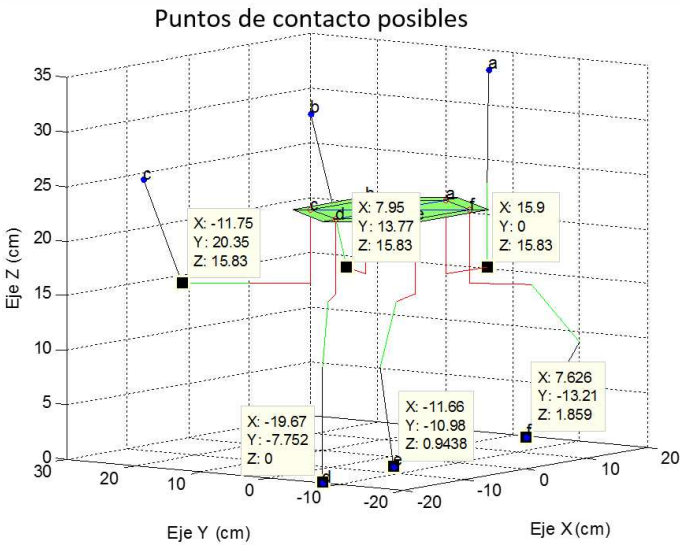


Figura 4.52: Diferentes puntos de contacto para cada extremidad del robot. Fuente: Propia

Se tiene la captura de pantalla de la Figura 4.53, que representa la salida del terminal de *Matlab* mostrando una tabla donde se jerarquizan las extremidades según la lejanía de su punto de contacto respecto a la base medida en el eje Z, donde la distancia mayor es tomada como la distancia que existe de la base a la superficie. **Nota:** a modo de referencia para poder explicar el algoritmo se utiliza como unidad de medición de longitudes el centímetro.

Punto de contacto			Prioridad de contacto		Identificador de Extremidad	
	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z			
3.0000	-19.6702	-7.7524	0	6.0000	21.1428	30.9729
3.0000	-11.6590	-10.9816	0.9438	5.0000	16.0165	26.9629
3.0000	7.6257	-13.2082	1.8589	4.0000	15.2515	25.7723
1.0000	15.9000	0	15.8341	3.0000	15.9000	17.2931
1.0000	7.9500	13.7698	15.8341	3.0000	15.9000	17.2931
2.0000	-11.7500	20.3516	15.8341	3.0000	23.5000	24.4641

extremidades

4.0000

5.0000

6.0000

1.0000

2.0000

3.0000

Figura 4.53: Clasificación de alturas según la posición de los puntos de contactos para cada una de las extremidades. Fuente: Propia

En la figura anterior se describe como prioridad de contacto seis posibles niveles dado que existen seis posibles extremidades, en caso de que más de una extremidad esté a la misma altura se le asignará a esta y su par el mismo nivel, como lo es el caso de las extremidades 1, 2 y 3 que a pesar de que tienen puntos de contacto distintos estos tienen la misma altura y se le asigna una prioridad de tres. El suelo o superficie de contacto está representada por la altura máxima, para este set se tiene que la extremidad 4 con altura 0, es decir, esta dicta cuál es la superficie respecto a la base.

Se parte de dos suposiciones o casos posibles para las extremidades y la altura de su punto de contacto respecto al suelo o superficie (altura mayor entre las extremidades). Estas dos suposiciones describen la posibilidad de que se puedan o no agrupar los puntos de contacto de manera factible en caso de que se esté ejecutando un patrón de locomoción regular o irregular, dado a que la altura de estos puede variar en base a la posición requerida por el patrón de locomoción.

En la primera suposición se asume que el patrón de locomoción que se está ejecutando tiene como base siempre al menos tres puntos de contacto que se encuentran a la misma altura. En este caso se asume que la superficie solo puede ser completamente plana, es decir, el polígono de apoyo a formar estará compuesto por al menos tres puntos de contacto a la misma altura; se supone que dicho patrón de locomoción en ejecución está previamente diseñado y garantiza que la posición de las extremidades, en principio, forme un triángulo base definido o algún polígono previamente comprobado como polígono de apoyo estable. Para la segunda suposición, se tiene que los puntos que conforman el posible polígono de apoyo no estén agrupados de ninguna forma entre sí, en base al nivel de prioridad, es decir, que cada extremidad esté a una altura distinta porque el patrón de locomoción así lo requiera.

Para hacer la búsqueda de los posibles polígonos de apoyo, en base a las dos suposiciones previas, se define una jerarquía o secuencia de búsqueda según el número de puntos respecto al nivel de prioridad en el que se encuentren. Si existe un grupo de al menos tres puntos, que representa el mínimo número de puntos para formar un

polígono cerrado (un triángulo), que se encuentren en el nivel máximo de prioridad, se determinará previamente que dichos puntos no pertenezcan a extremidades contiguas, para evitar la selección de un polígono de apoyo falso, a pesar de que formar una base poligonal cerrada, tiene posibilidad nula de crear un polígono que contenga la proyección vertical del centro de masa de la estructura en el interior de su perímetro. Como primer nivel de descarte para un polígono falso, se tiene que si el grupo de puntos que forma el polígono de apoyo, cuya altura es igual, no es de prioridad máxima, es decir, que exista al menos un punto de altura mayor, se descarta directamente la posibilidad de conseguir un polígono de apoyo base mediante la primera suposición.

Esta primera suposición considera en su búsqueda conseguir como prioridad principal, un triángulo como polígono de apoyo, y en caso de existir uno procede a la búsqueda del siguiente polígono válido posible entre el conjunto de puntos que hacen contacto con la superficie, es decir, si existe un triángulo como polígono de apoyo es posible que exista al menos un triángulo más o cualquier otro polígono que esté formado de tres a seis puntos, llámense cuadrados, pentágonos y hexágonos. Esta primera suposición contempla, como se menciona anteriormente, que se ejecute un patrón de locomoción que garantiza la estabilidad de la estructura, por tanto, genera al menos un triángulo con la siguiente agrupación de puntos de contacto por extremidad, como se ve en la Figura 4.54(a) y 4.54(b).

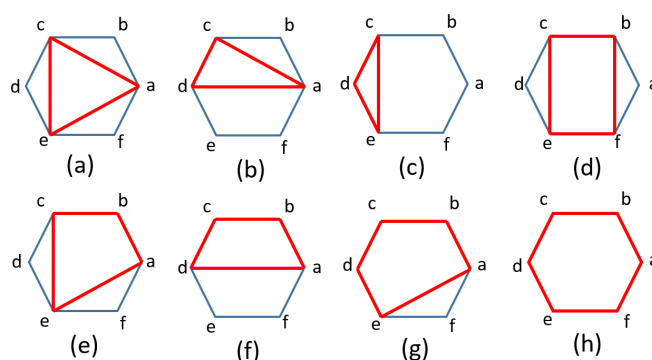


Figura 4.54: Posibles polígonos contenidos en un hexágono como base de polígono de apoyo, Figuras básicas. Fuente: Propia

Posterior a conseguir o no un triángulo se procede a buscar cualquiera de las demás Figuras básicas de polígonos de apoyo de la Figura 4.54. Si con dicha suposición se consigue al menos un polígono estable, se retorna un valor valido para poder continuar con la secuencia del ciclo de patrón de locomoción.

La segunda suposición, como se describe previamente, asume que pueda existir el caso que no se esté ejecutando un patrón de locomoción con alturas regulares, por ejemplo, el posicionamiento individual de cada una de las extremidades en un punto específico en el espacio de una superficie no plana. Para este caso, se procede a priorizar la lista o tabla de extremidades en base a la mayor altura o los puntos más cercanos a la superficie, es decir, se ordena dicha Tabla al igual que la mostrada en la Figura 4.53, ya las extremidades no están ordenadas en base su posición alrededor de la base del robot si no a su prioridad de contacto con la superficie. Posteriormente, se procede a realizar la misma búsqueda en base a las Figuras geométricas básicas que pueden estar contenidas en un hexágono o Figuras cerradas que se pueden formar de tres a seis puntos.

En esta segunda suposición, como la superficie plana no es la regla de contacto para el patrón de locomoción, puede que existan polígonos de apoyo que a pesar de ser válidos, no sean los más convenientes para seleccionar como polígonos estables, por esto es necesario tener en cuenta otra regla o medida de descarte adicional respecto a las utilizadas en la suposición uno.

Dado el gran número de polígonos que se pueden conseguir, es necesario filtrar los que en realidad sean válidos, es decir, polígonos cuyo perímetro contenga en primera instancia la proyección vertical del centro de masa del robot, representado en este caso por el centro geométrico de la base de la estructura; este proceso de descarte se hace verificando si la distancia bidimensional de las coordenadas (x, y) que existe entre el centro geométrico del polígono de apoyo y el centro geométrico de la base del robot es mayor al radio de la base del robot. Una vez descartados los polígonos no válidos, se agrupan según su número de puntos para ser comparados en base a Figuras

de su mismo tipo como primer paso para filtrar dichas bases candidatas; se utiliza el módulo del vector de tres dimensiones (x, y, z) que va desde el centro geométrico de la estructura hasta el centro geométrico del polígono de apoyo preseleccionado para priorizar la mejor base de esa clasificación de polígonos, teniendo como candidatos un polígono de cada tipo en caso que existan. Posteriormente, se hace uso del mismo módulo del vector tridimensional para seleccionar los dos mejores polígonos en base al polígono que el módulo más pequeño, que garantiza según pruebas realizadas ser una medida válida para la selección y descarte de las bases candidatas para polígonos de apoyo. Si se consigue al menos un polígono de apoyo se devuelve un valor que confirma la búsqueda exitosa de un polígono en base a esta suposición.

Sin importar el patrón de locomoción que se esté ejecutando, se hace uso del algoritmo de ambas suposiciones para poder encontrar al menos una base válida, si es que esta existe, garantizando así una búsqueda amplia al momento de intentar conseguir el polígono que forma la base para poder brindarle estabilidad estática a la estructura.

Se procede a realizar un conjunto de pruebas para demostrar el funcionamiento del algoritmo utilizado para el modelo de validación del polígono de apoyo.

Prueba 1:

Se procede a introducir la matriz de ángulos para posicionar cada una de las extremidades en una posición específica a fin de obtener un caso para el cual se pueda buscar los polígonos base de apoyo. Se tiene la Figura 4.55 con las tablas de la matriz de entrada y la matriz o tabla de salida luego de procesar los datos de cada uno de los puntos.

Matriz de ángulos de entrada										
					Punto de contacto	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z	Prioridad de contacto	
	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3						
Extremidad	a	0	0.7854	1.0472	-1.0472	3.0000	12.8537	3.8537	1.3492	4.0000
	b	1.0472	0.7854	1.0472	-0.6283	3.0000	2.0147	17.0695	0	6.0000
	c	2.0944	0.7854	1.0472	-0.6283	3.0000	-13.7753	10.2795	0	6.0000
	d	3.1416	0.7854	1.0472	-0.7854	3.0000	-14.6444	-5.6444	0.3003	5.0000
	e	4.1888	0.7854	1.0472	-1.5708	3.0000	-4.0841	-9.3462	5.1925	3.0000
	f	5.2360	0.7854	1.0472	-0.6283	3.0000	13.7753	-10.2795	0	6.0000

Figura 4.55: Datos para la matriz de ángulos de entrada y tabla de salida del terminal de *Matlab*. Fuente: Propia

Obteniendo las gráficas de la Figura 4.56, donde se puede notar que se consiguió un polígono de apoyo triangular válido sobre el cual se puede apoyar la estructura como se puede notar en la Figura 4.56(a), mientras que en la Figura 4.56(b) se tiene una representación de la búsqueda de polígonos según su prioridad en base a la altura de cada extremidad, que para este caso, cinco puntos tienen la misma altura y solo uno está más cerca de la base de los demás. Se puede observar que el primer punto seleccionado es el punto de la extremidad a, representado por la zona azul, y el punto más cercano a la base el e, representado por el color naranja.

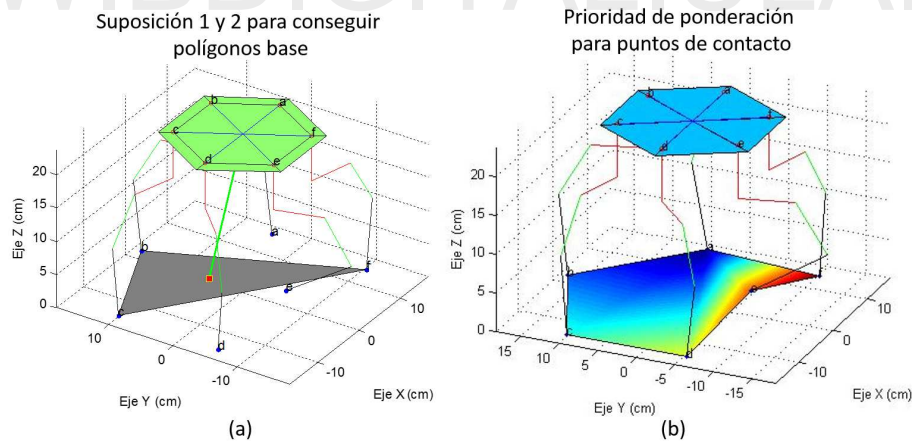


Figura 4.56: Gráficas representativas para polígonos de apoyo encontrados, (a) Polígonos de apoyo aprobados, (b) Gradiente en función de la altura del punto respecto a la base. Fuente: Propia

Como resultado se tiene que la estructura tiene al menos un polígono válido, por lo que se podría seguir ejecutando el siguiente paso del ciclo de locomoción o movimiento.

Prueba 2:

Se tiene la matriz de entrada para los ángulos de las articulaciones, y como resultado la matriz o tabla de los puntos procesados para poder hallar los posibles polígonos de apoyo, ver Figura 4.57.

Matriz de ángulos de entrada									
Extremidad	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	Punto de contacto	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z	Prioridad de contacto
	0	0.6283	1.0472	-0.6283	3.0000	16.7685	5.6442	0	6.0000
	1.0472	0.7854	1.0472	-0.6283	3.0000	2.0147	17.0695	0	6.0000
	2.0944	0.4488	1.0472	-0.6283	3.0000	-12.4339	13.2035	0	6.0000
	3.1416	0.7854	1.0472	-0.6283	3.0000	-15.7900	-6.7900	0	6.0000
	4.1888	0.7854	1.0472	-0.6283	3.0000	-2.0147	-17.0695	0	6.0000
	5.2360	0.7854	1.0472	-1.0472	3.0000	9.7643	-9.2048	1.3492	5.0000

Figura 4.57: Datos para la matriz de ángulos de entrada y tabla de salida del terminal de *Matlab*. Fuente: Propia

Obteniendo las gráficas de la Figura 4.58.

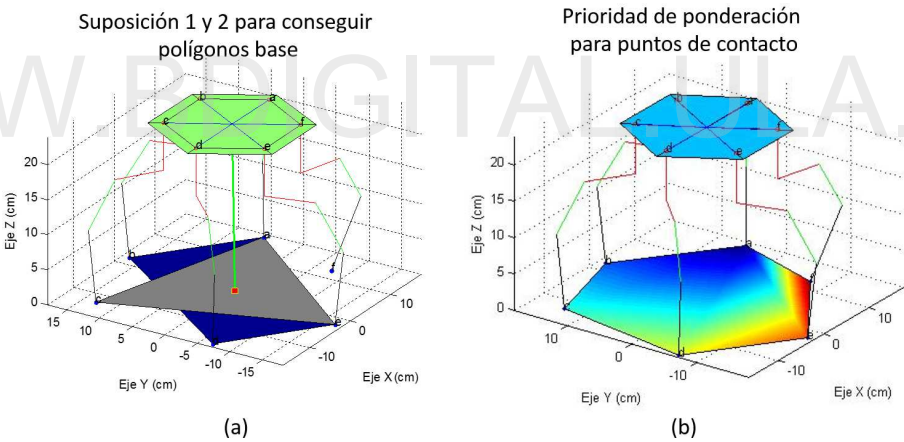


Figura 4.58: Gráficas representativas para polígonos de apoyo encontrados, (a) Polígonos de apoyo aprobados, (b) Gradiente en función de la altura del punto respecto a la base. Fuente: Propia

En la Figura 4.58(a) se puede notar que se hallan dos polígonos de apoyo posibles, uno determinado por un triángulo y el otro por un rectángulo. Aquí se puede notar la funcionalidad del método diseñado, en la que se consiguen las posibles mejores soluciones según los criterios descritos para el funcionamiento del algoritmo. De igual forma, se describe a modo de gradiente de colores la proximidad de las extremidades

a la base en la Figura 4.58(b).

Prueba 3:

Se tiene la matriz de entrada para los ángulos de las articulaciones, y como resultado la matriz o tabla de los puntos procesados para poder hallar los posibles polígonos de apoyo, ver Figura 4.59.

Matriz de ángulos de entrada										
Extremidad	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	Punto de contacto	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z	Prioridad de contacto	Número de extremidad
	0	0	-1.5708	-0.0175	3.0000	-19.6702	-7.7524	0	6.0000	4.0000
	1.0472	0	-0.7854	0	3.0000	-11.6590	-10.9816	0.9438	5.0000	5.0000
	2.0944	0	0	20.0000	3.0000	7.6257	-13.2082	1.8589	4.0000	6.0000
	3.1416	0.6283	0.7854	-0.6981	1.0000	15.9000	0	15.8341	3.0000	1.0000
	4.1888	-0.6283	0.7854	-1.2217	1.0000	7.9500	13.7698	15.8341	3.0000	2.0000
	5.2360	0	0.7854	-1.3963	2.0000	-11.7500	20.3516	15.8341	3.0000	3.0000

Figura 4.59: Datos para la matriz de ángulos de entrada y tabla de salida del terminal de *Matlab*. Fuente: Propia

Obteniendo las gráficas de la Figura 4.60.

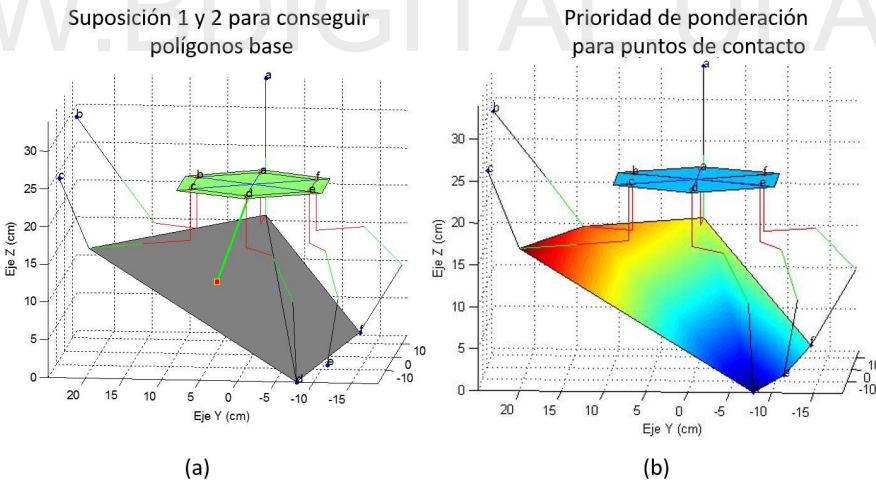


Figura 4.60: Gráficas representativas para polígonos de apoyo, (a) Polígonos de apoyo aprobados, (b) Gradiente en función de la altura del punto respecto a la base.

Fuente: Propia

Donde se puede notar el funcionamiento del algoritmo inclusive cuando el polígono de apoyo no está formado por un polígono alineado a la superficie. En la Figura 4.60(a), se puede notar que en este caso se seleccionan dos polígonos triangulares

diferentes, donde ambos fungen como candidatos a polígonos de apoyo, pero el que tiene su centro geométrico seleccionado mediante el vector verde es el principal a ser seleccionado, de igual forma, en la Figura 4.60(b) se puede apreciar como a pesar de que los puntos de contacto no son los extremos de la extremidad, si no la rodilla y coxa para dos extremidades, el polígono de apoyo es encontrado de igual forma, garantizando así la posibilidad de lograr conseguir bases para posiciones de las extremidades que no sean regulares.

De esta forma, queda validado el método para conseguir polígonos de apoyo que satisfagan el criterio de estabilidad estática para la estructura del robot.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Capítulo 5

Implementación Virtual del Prototipo

Introducción

En el presente capítulo se pretenden explicar brevemente, cómo es el funcionamiento del programa de simulación robótica *V-Rep*, herramienta crucial para poder observar el comportamiento del robot al momento de ejecutar cualquier movimiento con sus extremidades o al desarrollar algún patrón de locomoción. Para esto se explica cómo se importan los elementos y piezas diseñadas, que conforman la estructura del prototipo, desde el programa de diseño virtual *SketchUp* hacia la *suit* de simulación, describiendo un grupo de consideraciones importantes para poder ensamblar un modelo representativo en base a las dimensiones reales y magnitudes físicas presentes como la inercia y el peso de cada eslabón, de la base y rangos de movimiento de las articulaciones.

Posteriormente, se procede a describir de manera rápida, cómo se realiza la comunicación entre *V-Rep* y *Matlab* a través de la *API* (*Application programming interface*) remota para la sincronización de aplicaciones, necesaria para poder enviar señales y comandos para mover las extremidades mediante el accionamiento de los actuadores o articulaciones implementadas en el modelo, así como la descripción del

conjunto de funciones necesarias para obtener las posiciones de cada elemento del robot, entre ellos, las puntas de extremidad, la base o centro de la estructura y las posiciones angulares de las articulaciones.

Con esto claro se procede a probar el funcionamiento de los controladores PI externos diseñados para accionar y regular el funcionamiento de los actuadores del robot, que dado a que están diseñados en espacio continuo de tiempo, deberán ser discretizados en base al tiempo o retraso entre la comunicación de los dos programas para poder utilizarlos en las rutinas programadas de control para mover cada grado de libertad, de manera única o conjunta. Una vez discretizados, se procederá a hacer pruebas para validar su funcionamiento, en base a la implementación que se logra entre los dos programas, para garantizar que la respuesta que se obtiene es para la cual fueron diseñados. Con estos controladores se pretende poder lograr movimientos lo más armónicos posibles, en caso de ser necesario, al mover todos los grados de libertad de una extremidad, o varias de estas, de manera simultánea.

Por último, se procederá a demostrar el funcionamiento del modelo de validación de polígonos de apoyo en el prototipo implementado virtualmente, requisito necesario para poder planear y diseñar cualquier patrón de locomoción para el robot o para mover una o más extremidades hacia cualquier punto del espacio perteneciente a su área de trabajo.

5.1 V-rep, importación e implementación del prototipo

5.1.1 V-rep

El simulador de robots V-rep como ambiente de desarrollo integrado, es una herramienta basada en una arquitectura de control distribuido, en el cual cada objeto o modelo puede ser individualmente controlado mediante un *Script*, plug in o una *API* remota, lo que hace de esta herramienta de simulación una opción versátil para la

simulación de implementación rápida de prototipos próximos a sus pares reales. En esta herramienta se pueden utilizar lenguajes estructurados como *C++*, *Python* o *Scripts* de *Matlab*, brindando la capacidad de ampliar su funcionamiento. El programa tiene integrado diversos motores de simulación física que permiten poder contar con efectos físicos de la naturaleza como la gravedad e inercias, así como permite el monitoreo de la posición, velocidad y aceleración de piezas, partículas o cualquier objeto presente en el espacio de simulación. Posee una licencia estudiantil que brinda la capacidad de implementación completa de todas sus funciones, siempre que los proyectos sean sin fines de lucro, caso en el cual debe ser consignada una licencia. La descarga del programa se puede realizar directamente a través de su portal oficial, referenciado en (Coppelia Robotics, 2016a).

5.1.2 Importación de piezas a V-rep

Dado los diversos componentes con los que puede estar conformado un robot, V-rep brinda la facilidad de poder diseñar cada uno de estos dentro de su entorno virtual mediante un conjunto de herramientas de edición de polígonos básica, pero no es el método más óptimo al momento de diseñar prototipos de robots más complejos, por tanto, es posible importar ciertos formatos de archivos como lo son el **.collada* producidos por la herramienta de diseño *SketchUp*, en la cual se diseñaron e implementaron todos los componentes del robot hexápodo en cuestión.

Cada una de las piezas diseñadas para el robot en *SketchUp* es importada a V-rep haciendo uso la herramienta de importación de polígonos de mallas, que es como virtualmente se representan los polígonos cerrados, siguiendo las indicaciones y recomendaciones de la sección respectiva informativa de *V-rep*, disponible en (Coppelia Robotics, 2016d), con el fin de obtener un modelo preciso en escala y longitudes respecto al diseño original. Al momento de importar una figura o pieza que conforma la estructura del robot, se debe tener en cuenta el número de polígonos (enmallado) que conforman dicha figura, dado que mientras mayor sea el número de polígonos que esta contenga mayor será el procesamiento necesario para poder simular su movimiento, por eso es necesario lograr encontrar un balance entre el número de

polígonos que forma la pieza y el nivel de detalle que se desea tener respecto a su par real, siguiendo las indicaciones para obtener o finalizar la importación de piezas de V-rep disponible en (Coppelia Robotics, 2016b).

Siguiendo este conjunto de pasos es posible obtener los resultados de la Figura 5.1, donde se puede observar como la sección del soporte para el servomotor tres esta conformado originalmente por un total de 3500 polígonos para representar dicha pieza (ver Figura 5.1(a)), posterior a seguir el conjunto de pasos y recomendaciones de *V-rep*, se obtiene una pieza que representa completamente al eslabón dos, donde está contenido dicha base del servomotor, a diferencia que ahora todo el componente está formado por solo 1300 polígonos (Ver Figura 5.1(b)).

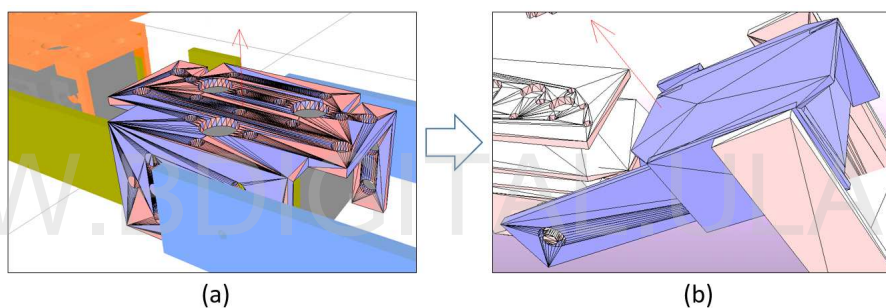


Figura 5.1: Reducción de polígonos para importación de piezas en V-rep. (a) Pieza de soporte del servomotor original, (b) Reducción de polígonos para eslabón dos completo. Fuente: Propia

Esta operación se realiza con cada una de las piezas diseñadas para completar la estructura completa de una extremidad. Posteriormente, se replica para las seis extremidades del robot y la base de este, a fin de obtener un modelo lo más reducido posible, para que la simulación del mismo sea más precisa y fluida.

5.1.3 Ensamble de prototipo virtual

Una vez obtenidas todas las piezas de las extremidades reducidas al menor número de polígonos, se procede a hacer uso del elemento representativo de las articulaciones rotacionales de V-rep para ensamblar la estructura completa del robot. Siguiendo

el conjunto de pasos proporcionados por *Coppelia Robotics* (ver referencia (Coppelia Robotics, 2016c)) para ensamblar un robot con múltiples grados de libertad, se procede a armar jerárquicamente la estructura del robot, desde la base hasta la punta de contacto, tomando en cuenta cada uno de los tres grados de libertad por extremidad. Se tiene como resultado el primer robot prototipo para la implementación virtual, mostrado en la Figura 5.2, donde se puede observar en la Figura 5.2(a) que se logra completar el modelo de mallas de polígonos, con una representación visual como la de la Figura 5.2(b).

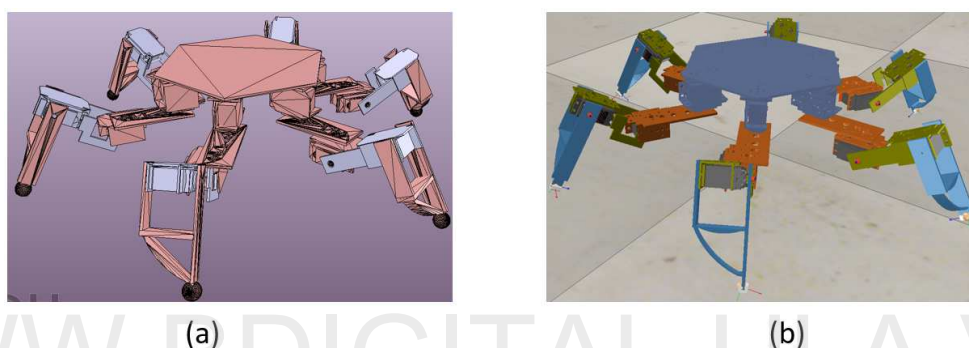


Figura 5.2: Ensamble completo del hexápodo virtual diseñado, en su versión prototipo 1, (a) Estructura de mallas de polígonos del robot reactiva a simulaciones físicas, (b) Representación visual en la interfaz de V-rep. Fuente: Propia

De igual forma, se puede reducir aún más el número de polígonos que forma la estructura aplicando un filtrado más minucioso, a fin de mejorar aún más la simulación del robot, obteniendo como resultado el siguiente modelo reactivo para la simulación física del robot, obteniendo el segundo prototipo virtual del hexápodo, ver Figura 5.3, en el cual, los cálculos a realizar por el motor gráfico y de físicas del V-rep, tiene un rendimiento mejor.

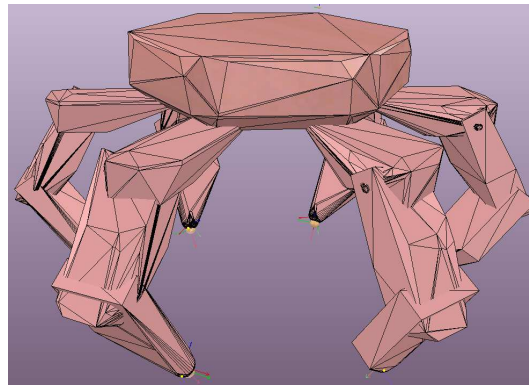


Figura 5.3: Modelo del hexápodo, prototipo dos. Fuente: Propia

Con el modelo ya definido, se procede a hacer un conjunto de configuraciones para el modo de funcionamiento de las articulaciones, en las cuales se selecciona el modo de operación PID, que permite mover cada una de las articulaciones de manera independiente según una señal angular en radiales de entrada, ajustando a su vez el rango de operación y velocidades máximas permitidas por la articulación según las especificaciones del servomotor modelado, que son, rango de 180 grados y una velocidad angular máxima de 300 grados por segundo o 60 grados en 0.2 segundos.

Como paso siguiente, se procede a definir y configurar las inercias y pesos de cada uno de los elementos que conforman el robot. Este paso es crucial al momento de poder obtener una respuesta de la dinámica de los controladores de los servomotores a la hora de controlar el movimiento de los eslabones, dado a que su diseño está basado en soportar la carga para la cual está diseñada dicha articulación, por tanto, si se quiere obtener una respuesta lo más similar posible a la realidad sobre la cual fue modelada, las inercias y los pesos de la estructura deben ser bien ajustados.

Los pesos de cada elemento del robot se asignan según lo calculado en la sección de diseño de piezas, tomando en cuenta la carga útil o extra y todos los dispositivos para que se pueda efectuar el movimiento del robot. Al momento de asignar los momentos de inercias, tomando en cuenta las recomendaciones de V-rep por cuestiones de diseño del programa se asigna una inercia uniforme a todo el prototipo en cada

una de sus piezas contiguas, esto con el fin de que no se presentaran vibraciones en las extremidades a la hora de iniciar la simulación, como consecuencia del modo de diseño del motor físico desarrollado por la empresa. Obteniendo el modelo de inercias para la estructura representado en al Figura 5.4.

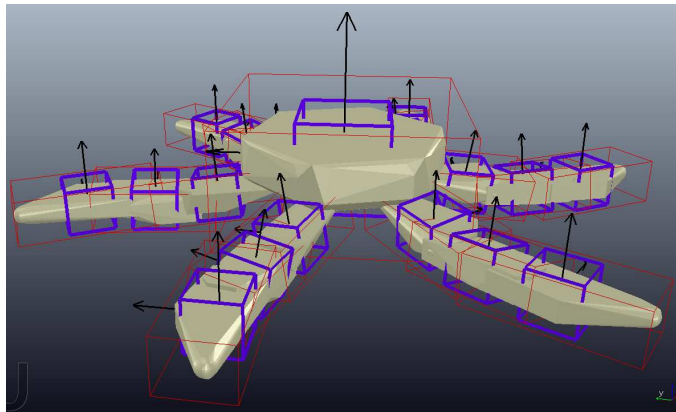


Figura 5.4: Representación de inercias de componentes del robot en *V-rep*. Fuente: Propia

A este modelo además, se le adicionan siete elementos denominados objetos *Dummy* en *V-rep*, utilizados para poder obtener la posición y orientación de objetos de interés del robot. En este caso se acoplan dichos objetos del entorno virtual a las puntas de las extremidades y al centro de la base del robot para saber su posición siempre que sea requerido.

Con el modelo casi listo, solo queda alinear los ejes de los sistemas de referencia según se propone en el capítulo de diseño, para tener así una orientación que concuerde con el modelo de cinemática inversa desarrollado en *Matlab*, donde la extremidad uno está alineada con el eje x positivo del sistema de referencia base del hexápodo y así sucesivamente.

5.2 Conexión y comunicación entre V-rep y Matlab

Los modelos representativos, tanto de la cinemática directa como de la cinemática inversa, del robot están implementados en *Matlab*, por tanto, es necesario hacer uso de la función de conectividad de *V-rep* mediante la API remota para poder establecer una comunicación en dos canales entre ambos programas. Para más información sobre cómo hacer uso de esta API remota véase la referencia (Coppelia Robotics, 2016e).

Para el protocolo de comunicación entre las dos aplicaciones se selecciona el modo asíncrono, que permite la comunicación en ambos canales, envío y recepción de información desde y hacia cualquiera de los dos programas, permitiendo así poder enviar ordenes de movimiento a los actuadores del robot y haciendo consultas de las posiciones de los elementos *Dummys* mediante comandos en *Matlab*.

Como cada objeto en *V-rep* es una entidad aislada, en la escena de simulación tiene asociado un número o identificador para poder realizar cualquier operación con este, en el caso de los actuadores, asignarle posiciones angulares o obtener su posición actual al igual que con los objetos *Dummy*, de esta forma es posible realizar movimientos y las operaciones necesarias desde *Matlab* con los componentes del robot en *V-rep*.

Para obtener y asignar posiciones de los objetos de interés en la escena de simulación de *V-rep*, se hace uso del identificador del objeto junto con el comando o función del programa que se requiere realizar. Las más comunes utilizadas son:

- **vrep.simxGetObjectHandle([parámetros]):** Con la cual se obtienen los valores enteros de los identificadores de los objetos presentes en la escena de simulación.
- **vrep.simxGetObjectPosition([parámetros]):** Esta función permite obtener la posición respecto al sistema de referencia de un objeto en específico, como por ejemplo, el eje referencial del suelo. Se utiliza para obtener la posición de los *Dummys* que representan la posición de la base y la punta de las extremidades.

- **vrep.simxGetObjectOrientation([parámetros]):** Se utiliza para obtener la orientación del sistema de referencia asociado del objeto con respecto a otro sistema de referencia seleccionado.
- **vrep.simxGetJointPosition([parámetros]):** Se utiliza para asignarle la posición de las articulaciones del robot, según su identificador.
- **vrep.simxSetJointTargetPosition([parámetros]):** Se utiliza para obtener la posición actual de la articulación seleccionada.

Con este conjunto de funciones para el lado de cliente de la *API* en *Matlab* es posible realizar todas las operaciones necesarias para tener control sobre el robot virtual implementado en *V-rep*. Ahora es necesario tomar en cuenta un factor importante para poder hacer la implementación del control de las articulaciones mediante los controladores PI, que es determinar la tasa de muestreo máxima o promedio entre los dos programas. Dado que el tipo de comunicación seleccionada es asíncrona, solo se realizan acciones o envío de paquetes luego de que se tenga alguna acción que realizar posterior a operaciones matemáticas en *Matlab*, de igual forma, la recepción y envío de paquetes para enviar una nueva posición a las articulaciones u obtener la posición de estas o de los objetos *Dummys*, es un tiempo importante a tomar en cuenta para calcular el retardo total entre los ciclos de comunicación de ambos programas.

Para tener una medida de este tiempo que sea segura y brinde una holgura suficiente, a fin de no perder información o producir cuellos de botella en la comunicación, se procede obtener el tiempo estimado promedio que le toma a los programas hacer ordenes conjuntas de lectura y escritura para los dieciocho (18) grados de libertad y los siete (7) objetos *Dummy* presentes en la escena; de este modo se calcula el peor caso posible con respecto al tiempo respuesta de *V-rep* y *Matlab* para completar dichas operaciones. En el peor caso, dependiendo de la carga de la máquina donde se esté realizando la simulación se pueden obtener tiempos de al rededor de 0.02 segundos, pero en el mejor de los casos puede ser 0.009 segundos; tiempos a tomar en cuenta

para la discretización de los controladores, dado a que este será el tiempo de muestreo del sistema.

5.3 Implementación de controladores PI externos

Para poder realizar la implementación de los controladores PI externos diseñados, es necesario tratar ahora al sistema que se desea controlar como un sistema discreto, dado el tipo de comunicación que se tiene entre los dos programas, *Matlab* como programa de control y *V-Rep* como programa de simulación virtual del prototipo. Como la comunicación no se realiza de manera continua, sino cada cierto tiempo n , cada dicho intervalo de tiempo es que se puede aplicar una señal de control y obtener información del sistema.

Para poder realizar la implementación de estos controladores, es necesario poder discretizar cada una de sus funciones de transferencia de tal forma que se pueda obtener una respuesta similar entre la del tiempo discreto y en tiempo continuo, escogiendo un tiempo de discretización, o muestreo denotado como T_o , lo suficientemente pequeño como para la ley de control sea enviada al sistema en el instante correcto de tiempo, y no con retrasos.

5.3.1 Discretización de controladores PI

Se procede a discretizar cada uno de los controladores PID, en base a los tiempos de muestreo necesarios según el teorema de Shanon (Iserman, 1989, p.30), que se puede determinar mediante las expresiones siguientes:

$$\omega_o = 2\omega_{max} \quad (5.1)$$

Donde ω_o representa la frecuencia muestreo y esta debe ser al menos dos veces mayor que la frecuencia máxima o natural del sistema ω_{max} . Para esto el tiempo de muestreo T_o se obtiene con la expresión:

$$\omega_o = \frac{2\pi}{T_o} \quad (5.2)$$

Por tanto T_o queda expresado como (5.3):

$$T_o < \frac{\pi}{\omega_{max}} \quad (5.3)$$

Para poder aplicar las ecuaciones previas, es necesario determinar la frecuencia máxima de cada sistema, para esto se procede a obtener el diagrama de Bode de cada función de transferencia haciendo uso de *Matlab* y la función *bode* de cada sistema en lazo cerrado sin el controlador PI externo a discretizar, obteniendo las gráficas de respuesta en frecuencia de la Figura 5.5.

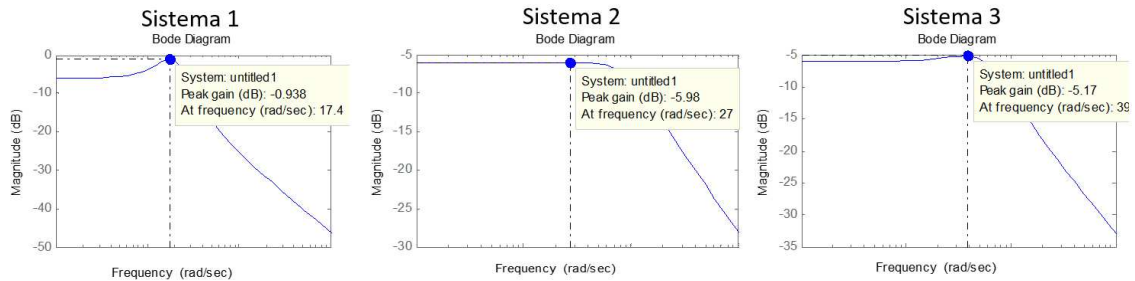


Figura 5.5: Diagrama de Bode de los tres sistemas, para determinar T_o menor.

Fuente: Propia

De la cual se puede generar la tabla 5.1, para seleccionar el menor tiempo de muestreo entre los tres sistemas, en base a las ecuaciones (5.1) y (5.2).

Tabla 5.1: Cálculo de tiempo de muestreo para los tres sistemas

Sistema	ω_{max}	$\frac{\pi}{\omega_{max}}$	$\frac{T_o}{2}$ (seg)
Sistema 1	17.4 rad/seg	0.1806	0.0903
Sistema 2	27 rad/seg	0.1164	0.0582
Sistema 3	39 rad/seg	0.0806	0.0403

Seleccionando el $T_o=0.0403$ seg, como tiempo de discretización o muestreo para los tres sistemas, dado que a un tiempo de muestreo menor para los sistemas 1 y 2 solo se consigue tener mejor resultado en la discretización.

Con este valor de T_o seleccionado es posible discretizar la función de transferencia de cada uno de los controladores. Para hacer, esto es necesario seleccionar con qué método de discretización realizarlo. Se selecciona la discretización trapezoidal o discretización de *tustin* (Iserman, 1989, p.105) para encontrar los coeficientes q_0 y q_1 para la ley del controlador en tiempo discreto:

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) \quad (5.4)$$

Para conseguir estos términos, se procede a hacer uso de la función de transformación o discretización de espacio de frecuencial S a discreto Z de *Matlab* denominada *c2d*, para discretizar cada uno de los tres controladores PI externos obtenidos en continuo para cada sistema y así poder determinar cada uno de sus coeficientes q_i .

Se tiene la Tabla 5.2 para la discretización de cada controlador:

Tabla 5.2: Controladores discretizados

Sistema	Vel. de controlador	FT(z)	q_0	q_1
Sistema 1	Lento	$G_c(z) = \frac{0.04318z-0.002273}{z-1}$	0.04318	0.002273
	Medio	$G_c(z) = \frac{0.05588z-0.002941}{z-1}$	0.05588	0.002941
	Rápido	$G_c(z) = \frac{0.1167z+0.03333}{z-1}$	0.1167	0.03333
Sistema 2	Lento	$G_c(z) = \frac{0.02635z+0.01865}{z-1}$	0.02635	0.01865
	Medio	$G_c(z) = \frac{0.03077z+0.01368}{z-1}$	0.03077	0.01368
	Rápido	$G_c(z) = \frac{0.04615z+0.02051}{z-1}$	0.04615	0.02051
Sistema 3	Lento	$G_c(z) = \frac{0.02551z+0.0154}{z-1}$	0.02551	0.0154
	Medio	$G_c(z) = \frac{0.03741z+0.02259}{z-1}$	0.03741	0.02259
	Rápido	$G_c(z) = \frac{0.08016z+0.04841}{z-1}$	0.08016	0.04841

Validación de la discretización

Para comprobar que la discretización se hizo de manera correcta, es necesario comparar la respuesta del sistema en espacio frecuencial S con la respuesta del sistema en espacio discreto Z. Se tiene el conjunto de gráficas para demostrar el funcionamiento de los tres controladores discretizados de cada sistema respecto a su respuesta en plano frecuencial.

Para el sistema 1:

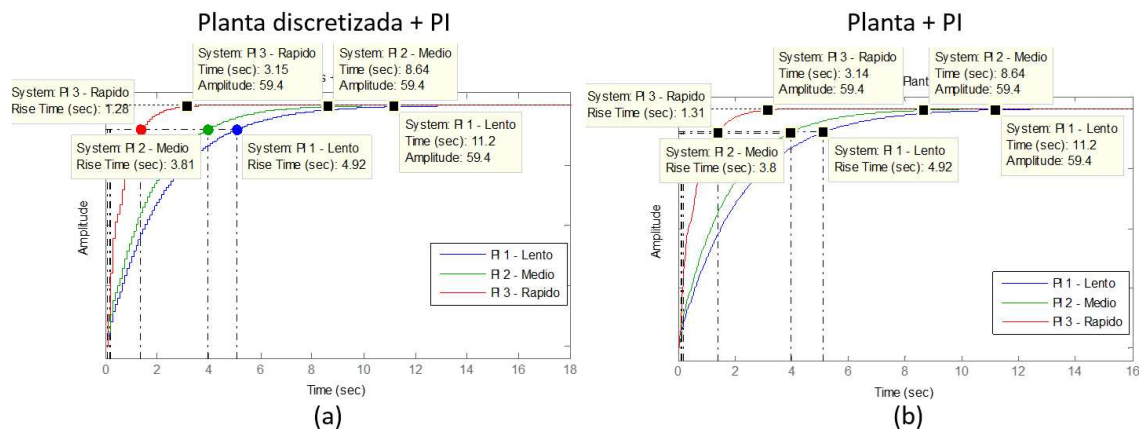


Figura 5.6: Comparación de la respuesta del sistema 1 controlado a tiempo continuo y a tiempo discreto. Fuente: Propia

Para el sistema 2:

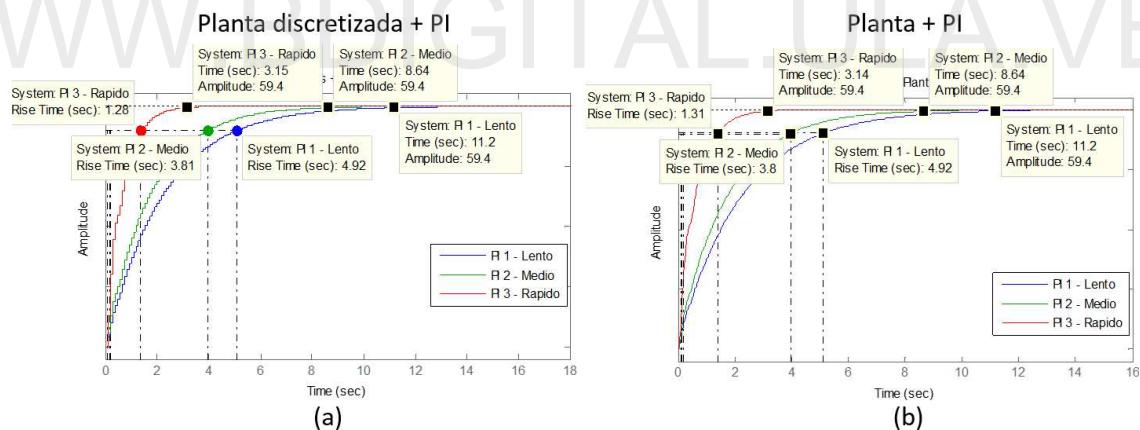


Figura 5.7: Comparación de la respuesta del sistema 2 controlado a tiempo continuo y a tiempo discreto. Fuente: Propia

Para el sistema 3:

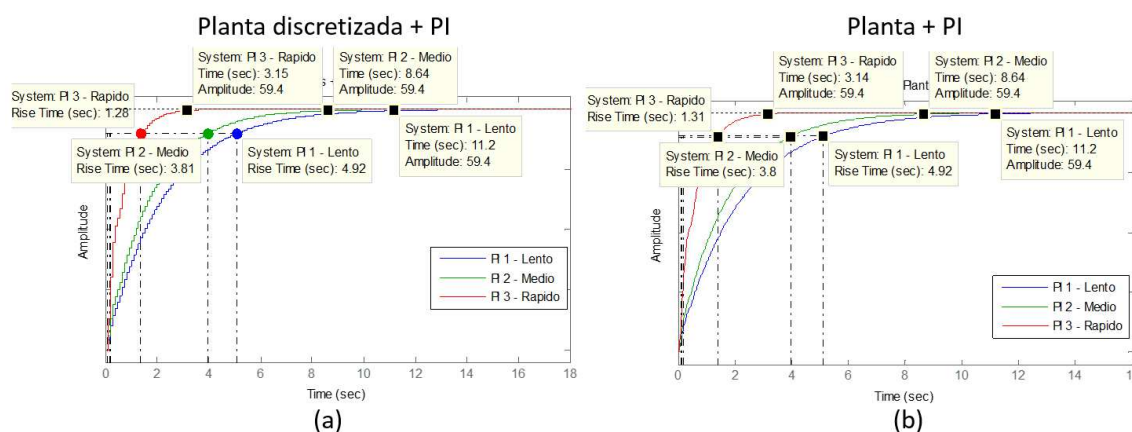


Figura 5.8: Comparación de la respuesta del sistema 3 controlado a tiempo continuo y a tiempo discreto. Fuente: Propia

Donde para los tres sistemas se puede observar que se obtiene una respuesta casi exacta del sistema controlado discretizado respecto al controlado continuo. Se aceptan estos resultados para poder utilizar los controladores discretizados en la implementación virtual para el control de las articulaciones de las extremidades.

5.3.2 Método de implementación

Para poder hacer la implementación de los controladores, es necesario poder definir una forma en la cual se pueda obtener un movimiento conjunto de al menos todos los servomotores de una extremidad, lo que da la noción que puede ser necesaria la implementación de controladores que funcionen en paralelo o de manera simultánea. Esto es necesario para poder generar movimientos armónicos en las articulaciones de una extremidad individual o de varias extremidades a la vez, en algunos casos, según lo requiera el patrón de locomoción, en grados de libertad similares de extremidades distintas, a fin de obtener un movimiento más natural. De este modo es posible poder acortar el tiempo de espera para poder completar un ciclo de locomoción o un movimiento compuesto del movimiento de varios grados de libertad, dado que no se tendría que esperar a que finalice el movimiento de una articulación para empezar el movimiento de la siguiente.

Dado esto, para poder hacer la implementación virtual del control para el mímico en *V-rep* de todas las extremidades o parte de estas, es necesario que en *Matlab* se desarrollen rutinas de código o *scripts* que permitan realizar dicha tarea, generando una estructura para el funcionamiento de varios controladores PI externos de manera simultánea según sea el número de servomotores a controlar.

Se hace uso de una característica de funcionalidad particular de *V-rep*, que se adquiere al momento de seleccionar el modo de control de las articulaciones en modo PID, en el cual el programa mantiene la última posición asignada por *Matlab* en las articulaciones, haciendo uso de un PID interno del programa que siempre se mantiene en ejecución. Dicha función de operación PID mantiene la posición de las articulaciones de manera fija, sin importar los movimientos que se estén realizando por las demás articulaciones del robot. Con esto se puede garantizar que al terminar una rutina de control de *Matlab*, para el movimiento de un conjunto de servomotores, estos se mantendrán en la posición final que se les asignó al salir de su ciclo de control, mientras que *V-rep* mantendrá a los demás motores que no están siendo controlados, en la última posición que se le asignó a esa articulación, siempre que sea estructuralmente posible para la articulación soportar el torque de carga que se le exige y que este no sea mayor al definido al momento de su configuración.

Se procede a diseñar estructuras de controladores PI externos en paralelo de 1, 3, 6, 9, 12 y 18 grados de libertad para movimiento simultáneo, debido a las posibles necesidades de controlar diversos grados de libertad para poder realizar movimientos sincronizados o armónicos necesarios al ejecutar patrones de locomoción o para alcanzar posiciones en el espacio con las extremidades como herramientas de trabajo. La lógica de funcionamiento para estas estructuras de controladores está dada por una entrada en la cual se asigna las posiciones de referencia que se quieren alcanzar, con los grados de libertad de cada una de las extremidades seleccionadas, asignando la velocidad de funcionamiento sin importar en la posición que estas articulaciones se encuentren previamente. Se tiene el siguiente esquema de funcionamiento para el controlador paralelo, descrito en la Figura 5.9.

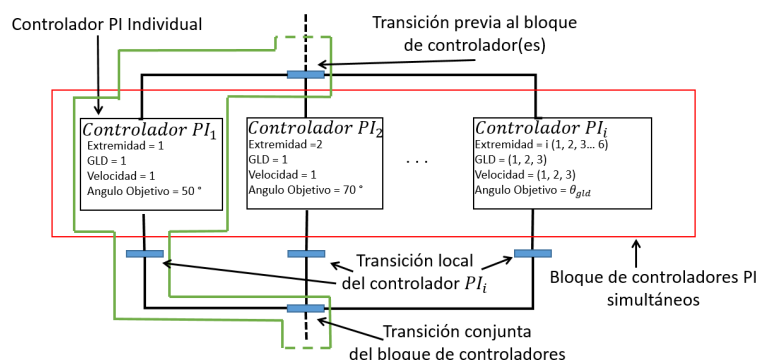


Figura 5.9: Diagrama del esquema de funcionamiento para controladores PI externos paralelos Fuente: Propia

Donde en la Figura 5.9, a similitud de una red de Petri (Iñaki, 2011) para la transición entre estados del sistema, se tiene que cada controlador individualmente tiene como objetivo un ángulo de referencia a alcanzar, una vez se hayan alcanzando todos los ángulos de referencia para cada controlador en conjunto se abandona el bloque de ejecución del controlador PI externo paralelo. De esta forma es posible programar cualquier número de controladores para que funcionen a la vez, como los descritos previamente.

Alcanzar el valor de referencia para la respuesta de este tipo de sistemas, puede ser una tarea que le tome un poco más de tiempo al controlador que para el que está diseñado, es decir, si este está diseñado para estabilizar el sistema en 60 grados en 10 segundos, dado el comportamiento sobreamortiguado de la curva de respuesta del controlador, puede que tome mucho tiempo alcanzar un valor de error nulo para cumplir la transición o inclusive por errores en el cálculo numérico que se presentan al trabajar con sistemas discretos, no se alcance el error nulo del todo, lo que implicaría que la transición no logre satisfacerse, por esto se asigna una banda de operación o aceptación de error para cada uno de los controladores, en la cual, no se intenta alcanzar un error nulo si no entrar en la banda de error para satisfacer la transición de cada controlador.

Cada una de estas bandas de aceptación de error está diseñada específicamente

para cada uno de los tres controladores PI externos, dado a que el controlador PI_i externo está diseñado en base a las mismas especificaciones para cada una de las seis extremidades. En la Figura 5.10 se describe dicho fenómeno, a modo de ejemplo para el servomotor o grado de libertad uno. Donde se puede notar que el controlador no alcanza el valor de referencia de 60 grados de manera exacta, sin importar que el tiempo se extienda a 20 segundos el error no es nulo, caso en el cual es más conveniente hacer uso de una banda de aceptación de error diseñada para el 1% del error, con esto se tiene $\pm 1\%$ de error entorno al valor de referencia asignado, dando un ancho de banda total de 2%, en el cual el controlador tiene más holgura para poder satisfacer la transición o condición de que haya alcanzado un valor muy próximo a la referencia asignada.

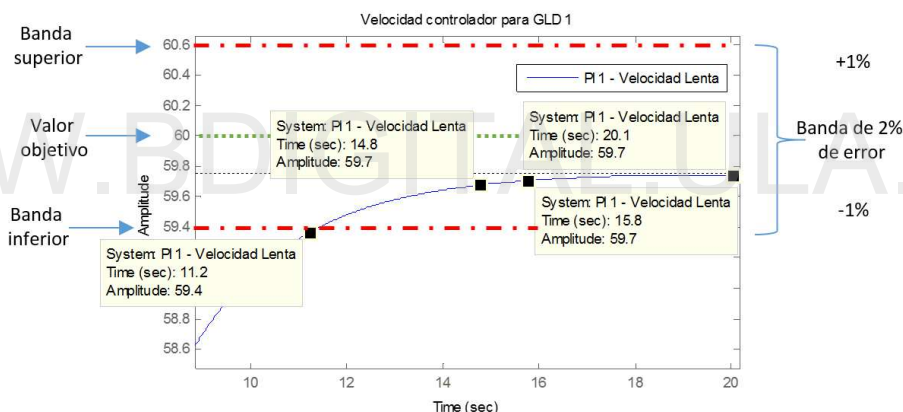


Figura 5.10: Ejemplo de banda de error, banda de aceptación de error para controladores PI externo. Fuente: Propia

De igual forma, esta banda de error garantiza, que por error numérico o de comunicación entre tiempos de las dos interfaces de los programas se salte a la parte superior de la banda, asegurando que una aproximación por ambos lados de la banda cumpla la condición para finalizar la ejecución de controlador. Con esto, hasta que cada controlador PI externo no alcance la condición de aceptación de su propia banda de error, no se deja de ejecutar el bloque de código completo de dicho controlador paralelo.

Con lo previamente descrito se procede a validar el funcionamiento de los

controladores en el mímico del robot implementado en *V-rep*.

5.3.3 Validación de movimientos de la extremidad

La validación de los movimientos de las extremidades del robot es necesaria para poder corroborar que los controladores PI externo diseñados y discretizados, al momento de ser implementados para el control de mímico, están logrando comportarse al igual que sus pares continuos simulados en *Matlab*, para cada modelo Actuador-eslabón de la extremidad.

Para poder realizar dicha comprobación o validación se implementaron dentro de las rutinas de los controladores PI externo un conjunto de variables para poder obtener el valor de la salida del controlador, error y señal de control generadas respecto al tiempo real en el que transcurre cada ciclo de control para cada grado de libertad, haciendo uso de las funciones *tic* y *toc*, que permiten determinar el tiempo que tarda en ejecutarse un bloque de código en *Matlab*.

Para efectos de la simulación del mímico en *V-rep*, se debe acotar que los valores introducidos de pesos, inercias y longitudes son los más cercanos y ajustados para poder hacer funcionar el modelo. Particularmente respecto a la magnitud física de la inercia de las piezas se debe hacer una acotación especial, debido a las características de funcionamiento del motor de procesamiento de físicas y motor gráfico del programa, como se sugiere en la página y foros de ayuda de *V-rep*, se optó por introducir los valores de inercias que fuesen necesarios para evitar el efecto de *Damping Joints*, que se produce en los robots ensamblados cuando las inercias de los eslabones no son equitativas entre ellas; por eso la respuesta de los controladores en el modelo puede variar, dado a que la dinámica se ve ligeramente modificada por este hecho.

Se procede a comparar el comportamiento obtenido de la respuesta de los actuadores del mímico de *V-rep* controlador mediante *Matlab*, respecto al modelo discreto simulado en *Matlab*, para cada uno de las velocidades de los controladores PI externo, lento, medio y rápido, obteniendo un total de nueve posibles combinaciones,

para demostrar el funcionamiento de los controladores.

Todas las pruebas de comparación se realizan en un escenario en el cual solo se efectúa el movimiento del grado de libertad en estudio, mientras que los otros dos permanecen estáticos, partiendo desde 0 grados para hasta un valor de referencia de 60 grados. Se tienen las siguientes respuestas para cada una de las articulaciones o grados de libertad, respecto a cada uno de sus controladores diseñados:

- **Articulación o grado de libertad 1:**

1. Respuesta del sistema controlado con controlador PI externo de velocidad lenta.

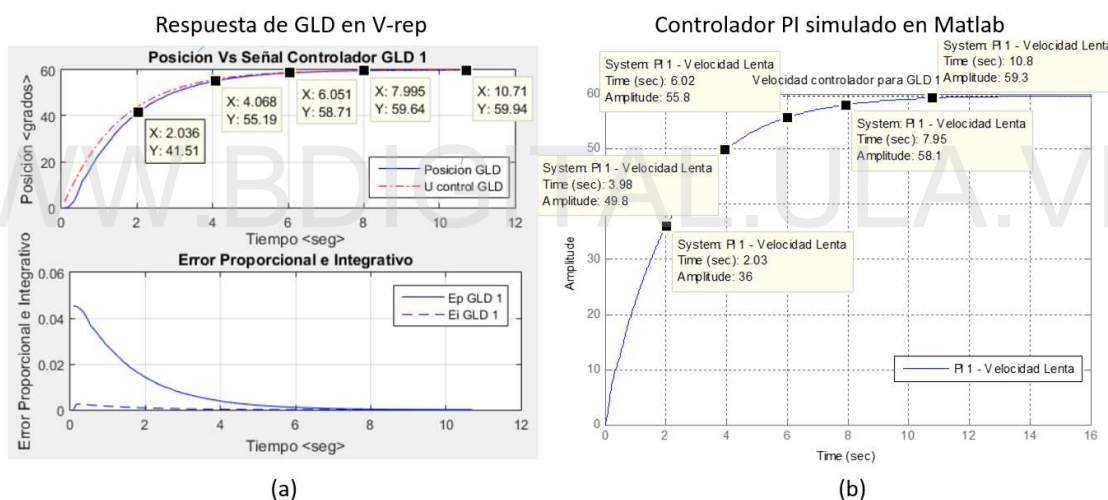


Figura 5.11: Comparación entre respuesta de la articulación uno obtenida en el mímico de *V-rep* respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en *Matlab*, para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad lenta. Fuente: Propia

2. Respuesta del sistema controlado con controlador PI externo de velocidad media.

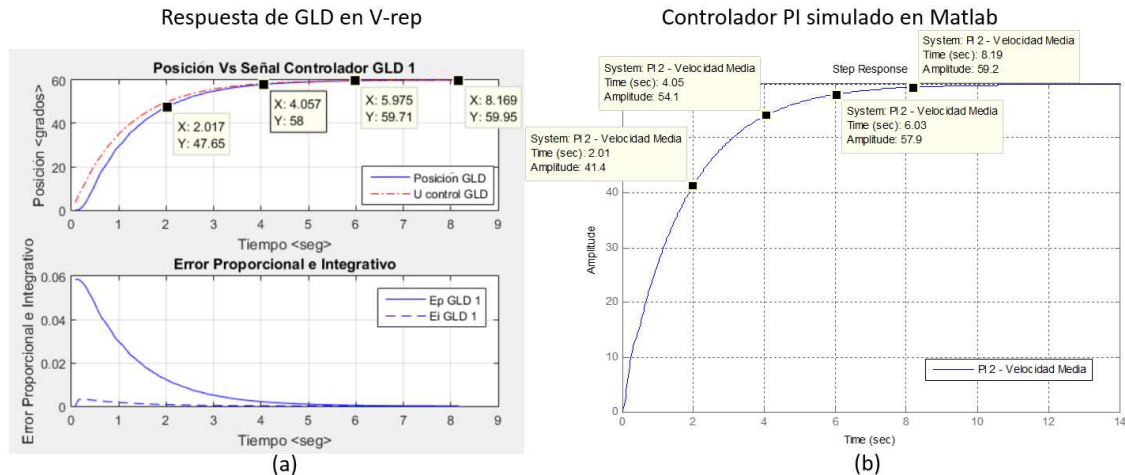


Figura 5.12: Comparación entre respuesta de la articulación uno obtenida en el mímico de *V-rep* respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en *Matlab*, para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad media. Fuente: Propia

3. Respuesta del sistema controlado con controlador PI externo de velocidad rápida.

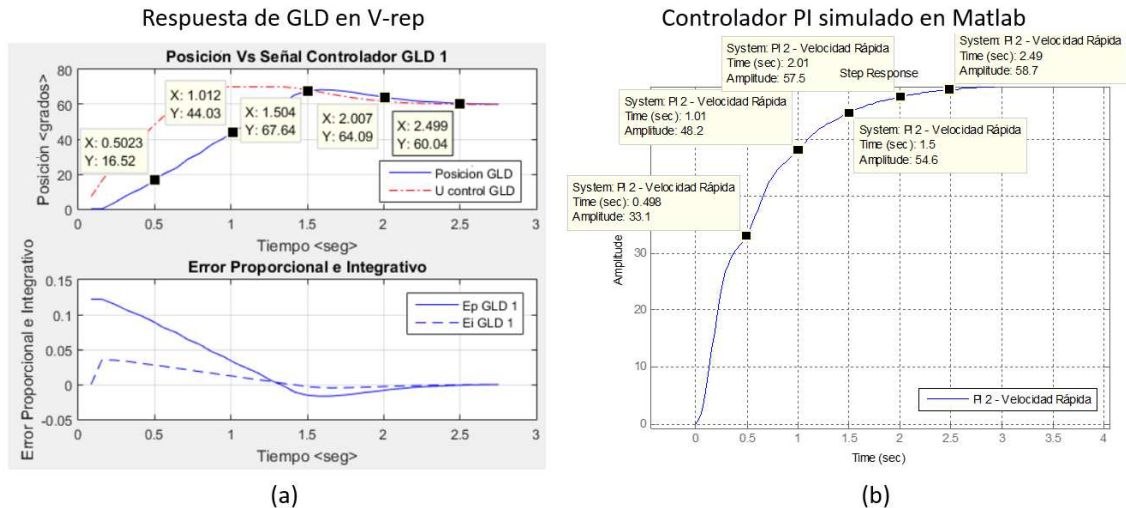


Figura 5.13: Comparación entre respuesta de la articulación uno obtenida en el mímico de *V-rep* respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en *Matlab*, para el control de posición angular con el controlador PI de velocidad rápida.

Fuente: Propia

Donde en general, se obtiene un resultado aceptable de la respuesta del GLD respecto a las simulaciones realizadas en *Matlab* de la planta actuador-eslabón uno con el PI externo discretizado. La discrepancia o el error que se observa en los tiempos de la fase transitoria en la respuesta del mímico de *V-rep*, sobre todo en la velocidad rápida del controlador, corresponden a que los momentos de inercia no coinciden del todo por consecuencia de la modificación de los mismos para lograr el ensamble de la estructura. Este efecto se nota con mayor énfasis mientras se aumenta la velocidad del controlador, debido a que a menor tiempo de asentamiento requerido, la velocidad y la aceleración aumentan para alcanzar el valor de referencia requerido, lo que provoca que la energía cinética del eslabón aumente, por tanto, el controlador debe compensar la dinámica del momento de inercia extra para la cual no está diseñado; a pesar de esto, el controlador logra estabilizar la posición angular de la articulación en un tiempo de referencia

aceptable respecto a los valores obtenidos en el modelo simulado, lo que permite aceptar este resultado como válido para demostrar su funcionamiento.

- **Articulación o grado de libertad 2:**

1. Respuesta del sistema controlado con controlador PI externo de velocidad lenta.

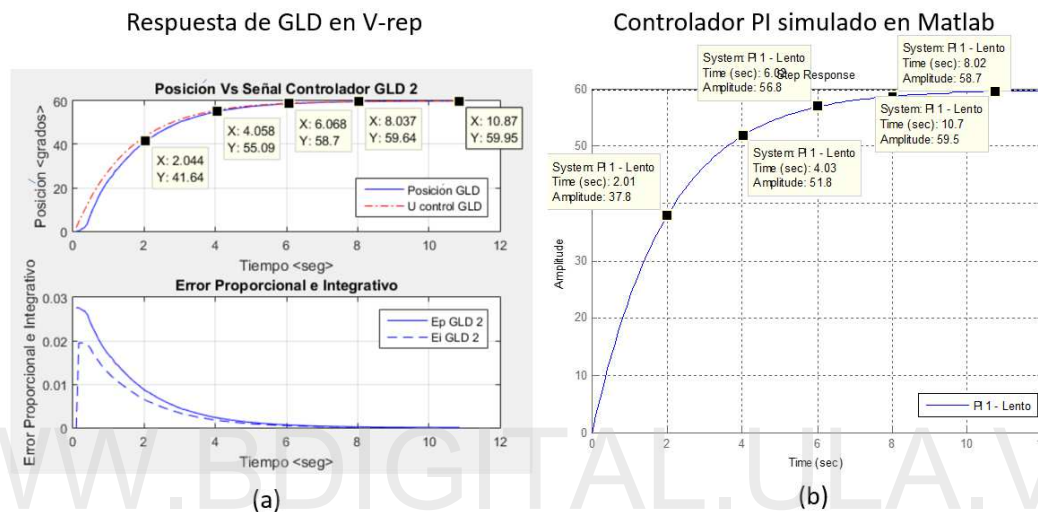


Figura 5.14: Comparación entre respuesta de la articulación dos obtenida en el mímico de *V-rep* respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en *Matlab*, para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad lenta. Fuente: Propia

2. Respuesta del sistema controlado con controlador PI externo de velocidad media.

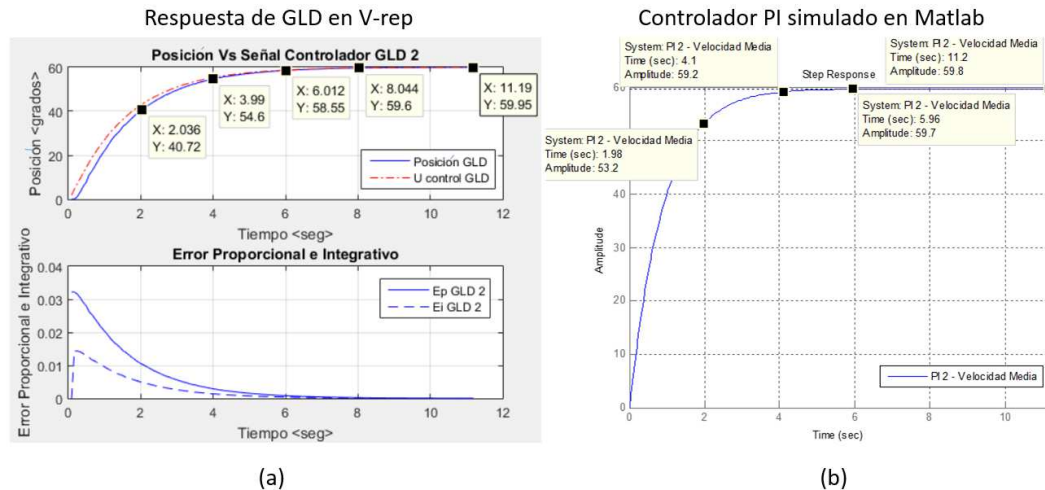


Figura 5.15: Comparación entre respuesta de la articulación dos obtenida en el mímico de *V-rep* respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en *Matlab*, para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad media. Fuente: Propia

3. Respuesta del sistema controlado con controlador PI externo de velocidad rápida.

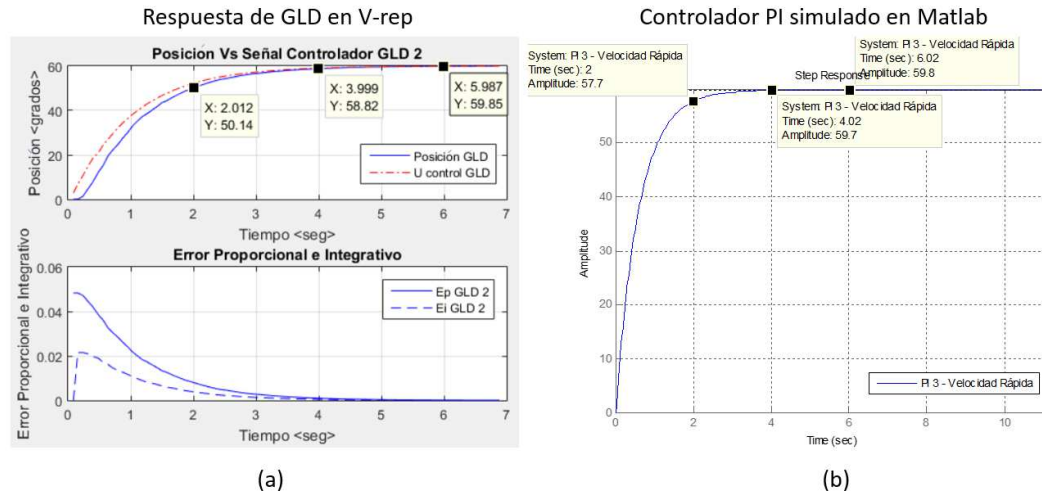


Figura 5.16: Comparación entre respuesta de la articulación dos obtenida en el mímico de *V-rep* respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en *Matlab*, para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad rápida. Fuente: Propia

• Articulación o grado de libertad 3:

1. Respuesta del sistema controlado con controlador PI externo de velocidad lenta.

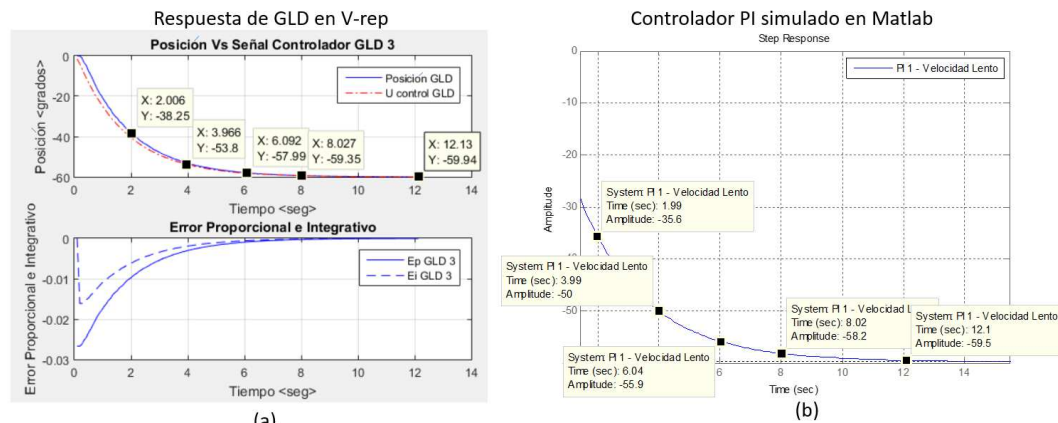


Figura 5.17: Comparación entre respuesta de la articulación tres obtenida en el mímico de *V-rep* respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en *Matlab*, para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad lenta. Fuente: Propia

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

2. Respuesta del sistema controlado con controlador PI de velocidad media.

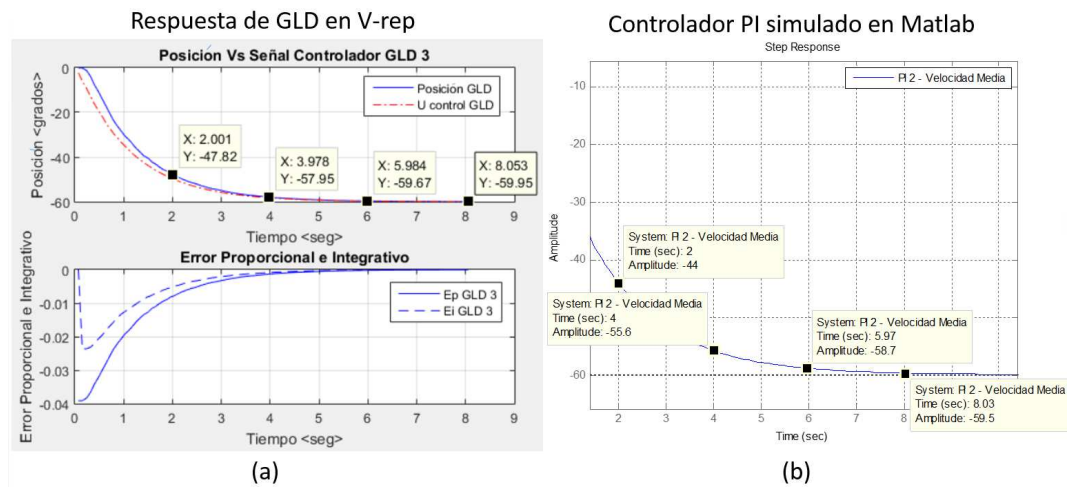


Figura 5.18: Comparación entre respuesta de la articulación tres obtenida en el mímico de *V-rep* respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en *Matlab*, para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad media. Fuente: Propia

3. Respuesta del sistema controlado con controlador PI externo de velocidad rápida.

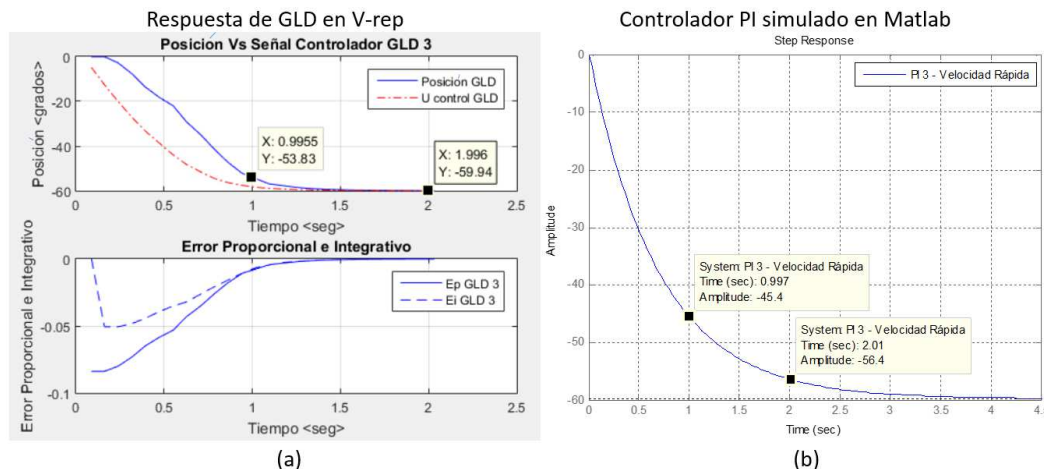


Figura 5.19: Comparación entre respuesta de la articulación tres obtenida en el mímico de *V-rep* respecto a la respuesta obtenida en la simulación del modelo en *Matlab*, para el control de posición angular con el controlador PI externo de velocidad rápida. Fuente: Propia

De igual forma que para el servomotor 1, los servomotores 2 y 3 controlados por los controladores PI externos discretos tienen buen desempeño respecto a la velocidad o tiempos de asentamientos lentos y medios, debido a que el momento acumulado de inercia de los eslabones que deben soportar dichos actuadores no es tan elevado a comparación con la velocidad alta. Para los casos de control con el controlador PI externo de velocidad alta, sucede el mismo fenómeno del aumento de una inercia que para el servomotor uno, ambos controladores PI externos logran alcanzar la referencia, pero su respuesta ante una inercia en base a la cual no están modelados hace variar su comportamiento, a pesar de esto, se considera dicha respuesta del sistema como aceptable dado a que los tiempos de asentamiento son similares a los obtenidos por los modelos simulados.

Con estos resultados obtenidos para la respuesta de cada servomotor o actuador, implementado en *V-rep* y controlador desde *Matlab*, queda demostrado el funcionamiento de los controladores PI externos diseñados para el control de cada

articulación del robot, con los cuales realizar movimientos finos, precisos y sobre amortiguados será posible según se requiera en los patrones de locomoción a ejecutar.

5.4 Cinemática directa y polígono de apoyo en *V-rep*

El modelo cinemático directo y los polígonos de apoyo que pueden formar las extremidades del robot, juegan un papel importante en la representación del mímico o estructura implementada en *V-rep* para poder realizar cualquier movimiento.

Para su implementación y visualización se hace uso del conjunto de funciones descritas previamente, que permiten la obtención de la posición y orientación de los objetos *Dummys* que representan los puntos de interés del robot, como lo son las puntas de extremidad y el centro de la base de la estructura. Conjuntamente con las operaciones descritas de traslación y rotación, utilizadas para poder referenciar el sistema coordinado solidario a la base del robot respecto a cualquier otro sistema, es posible obtener las posiciones de cada uno de estos objetos respecto al entorno de simulación en el cual se implementa el modelo virtual del robot en *V-rep*.

La cinemática directa y los polígonos de apoyo obtenidos mediante esta, juegan un rol importante a la hora de poder ejecutar de manera correcta ciclos de movimientos para los posibles patrones de locomoción a diseñar. Mediante la cinemática directa es posible conseguir los candidatos a polígonos de apoyo que le permitirán asegurar al robot que tendrá una base estable para poder ejecutar el próximo paso en la búsqueda de puntos de soporte para completar el patrón de locomoción o para posicionar cualquiera de sus extremidades en algún punto en el espacio para completar tareas específicas.

Por tanto, el uso conjunto del modelo cinemático directo y de los polígonos de apoyo fungen como validación requerida para asegurar bases estables de soporte de la estructura, lo que constituye un paso necesario a tomar en cuenta en cada etapa

de movimiento del robot. Previo a realizar cualquier movimiento, será necesario comprobar que dicha acción no afecte la estabilidad estática previa lograda por las extremidades que dan soporte a la estructura.

Para poder apreciar el funcionamiento y uso de la búsqueda y validación de los polígonos de apoyo, se hace la implementación de ambos modelos mediante *Scripts* desarrollados en *Matlab*, a fin de poder graficar las posiciones del robot respecto al nuevo sistema de referencia en el escenario de simulación. Como primer paso se obtiene la posición de la base del robot y su orientación o giro respecto al eje Z, para poder identificar el valor del vector V_{offset} y θ_{offset} , con esto es posible tener una representación de cada uno de los componentes de la estructura respecto al nuevo sistema coordinado. A pesar de que el algoritmo de comprobación y búsqueda de polígonos de apoyo, funciona en base al propio sistema de referencia del robot, este sistema de referencia puede ser desplazado y rotado sin afectar las operaciones a realizar, dado que solo se hace uso como medida de importancia el valor de la altura de cada extremidad respecto al suelo.

Como el requerimiento base para el diseño de patrones de locomoción está basado en desplazamientos sobre superficies planas en primera instancia, se puede garantizar que la mayoría de los patrones de locomoción a desarrollar siempre tendrá que las extremidades que formen sus polígonos de apoyo estarán a una altura igual o muy cercanas entre sí, esto permite poder apreciar con mayor facilidad los polígonos de apoyo descritos en cada ciclo de la locomoción.

Se procede a demostrar el funcionamiento de estos modelos, mediante la ejecución de un patrón de locomoción trípede sencillo, solo a modo de referencia, para observar la proyección del polígono de apoyo formado al momento de completar cada ciclo de la locomoción por las extremidades que tienen contacto con la superficie. Partiendo de una posición base en la cual el robot tiene un polígono de apoyo hexagonal haciendo contacto con las seis extremidades, se obtiene la Figura 5.20(a), en la que se muestran los polígonos iniciales de apoyo encontrados por la rutina de validación. En esta figura

(5.20(a)) se puede apreciar cómo se consiguen al menos dos polígonos, un hexágono (a,b,c,d,e,f) que es el más complejo de formar y un triángulo (a,c,e) base formado por tres de las extremidades. El encontrar estos polígonos da paso posible a lograr realizar el siguiente movimiento del robot, ilustrado en la Figura 5.20(b), en la cual se levantan las extremidades (a,c,e) a fin de buscar una nueva superficie de apoyo al avanzar el posición recta.

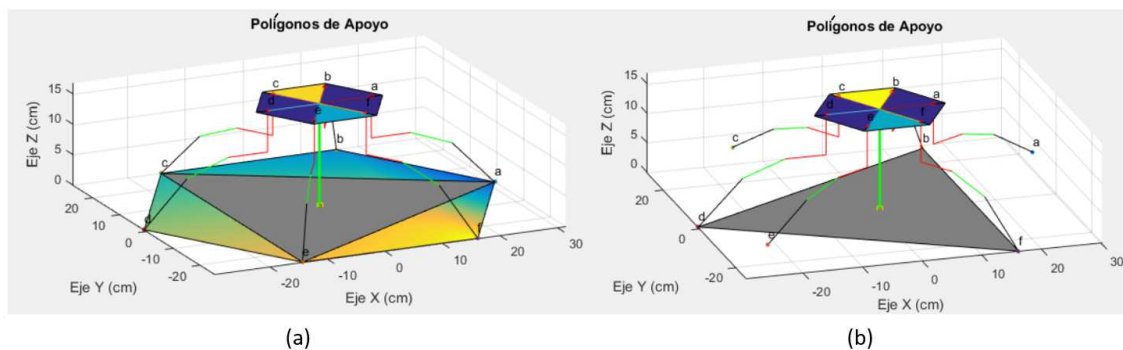


Figura 5.20: Polígono de apoyo para patrón de locomoción trípode, Fase 1. Fuente: Propia

En esta Figura 5.20(b), se logra conseguir y mantener el polígono triangular formado por las extremidades (b,d,f), que funge como base mientras las demás extremidades están en la fase de *Swing*.

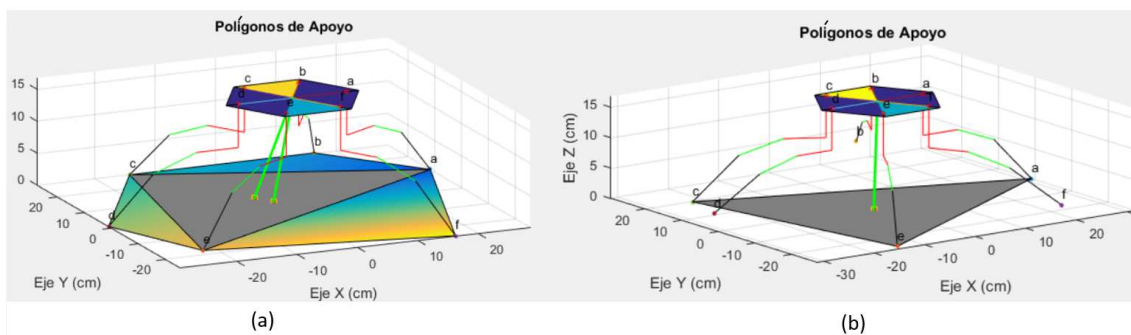


Figura 5.21: Polígono de apoyo para patrón de locomoción trípode, Fase 2. Fuente: Propia

Como culminación de la fase 1 de movimiento, se tiene como resultado la Figura 5.21(a), en la cual vuelven a hacer contacto en la superficie con las extremidades

(a,c,e) en una nueva posición avanzada respecto a su posición original, creando un polígono cuyo centro geométrico puede ser desplazado por la acción de los servomotores designados para el empuje en este tipo de patrón de locomoción para moverse hacia delante. Una vez finalizado el movimiento dichas extremidades, (a,c,e) fungen como base válida para que se pueda alcanzar una nueva posición por el otro trio de extremidades, teniendo como resultado la Figura 5.21(b).

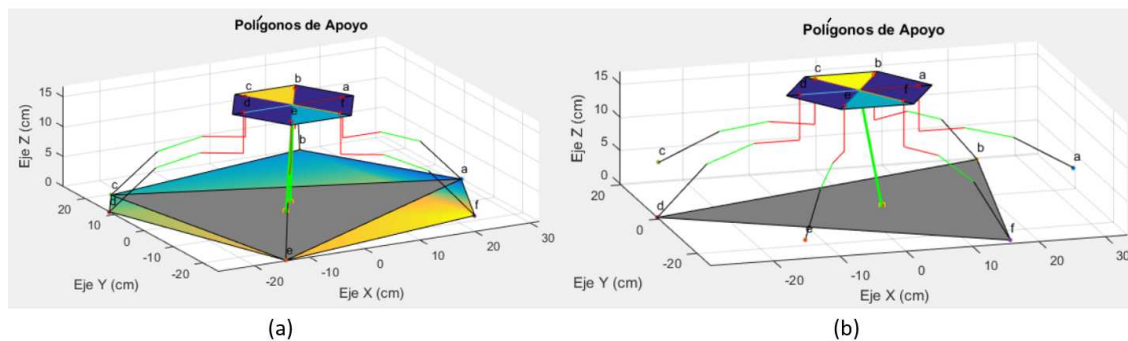


Figura 5.22: Polígono de apoyo para patrón de locomoción trípode, Fase 3. Fuente: Propia

Por último se obtiene la Figura 5.22(a) en la cual se logra alcanzar una nueva posición con las extremidades (b,c,f) para continuar la secuencia del patrón de locomoción de la fase de movimiento de la Figura 5.22(b).

Con esto se demuestra cómo se obtienen los polígonos de apoyo para la validación del siguiente movimiento de cualquier patrón de locomoción en sus distintas fases o etapas. De igual forma, se tiene la siguiente secuencia de gráficas que muestra la evolución de movimiento de dichos polígonos. Donde la Figura 5.23 corresponde a los polígonos de apoyo de la Figura 5.20.

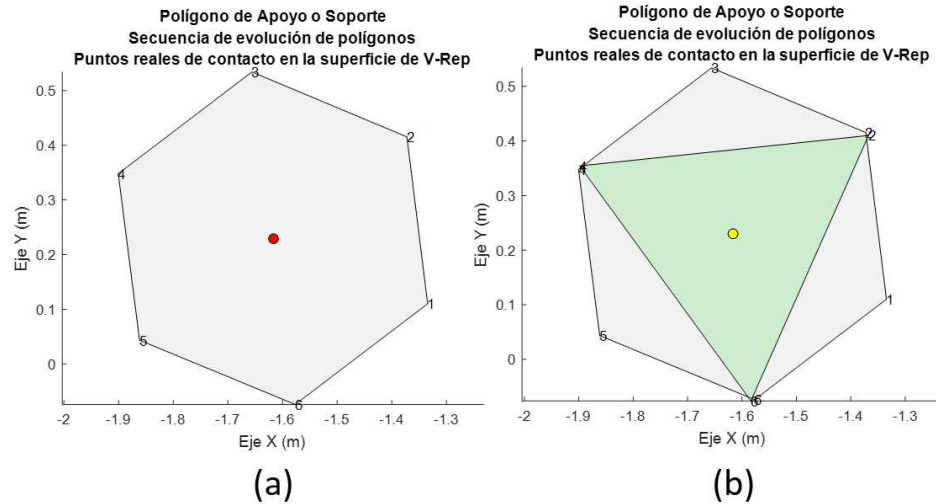


Figura 5.23: Fase uno de la secuencia de polígonos de apoyo. Fuente: Propia

Donde la Figura 5.24 corresponde a los polígonos de apoyo de la Figura 5.21.

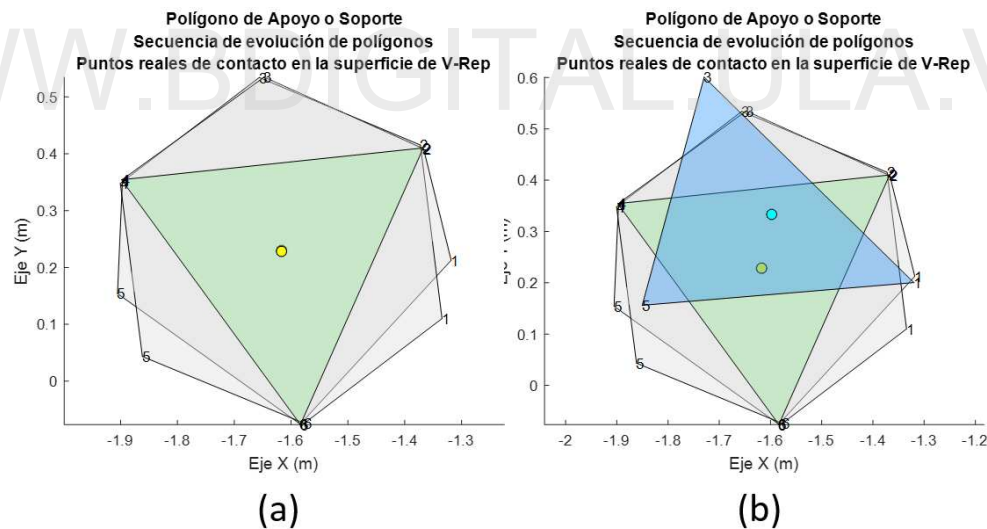


Figura 5.24: Fase dos de la secuencia de polígonos de apoyo. Fuente: Propia

Donde la Figura 5.25 corresponde a los polígonos de apoyo de la Figura 5.22.

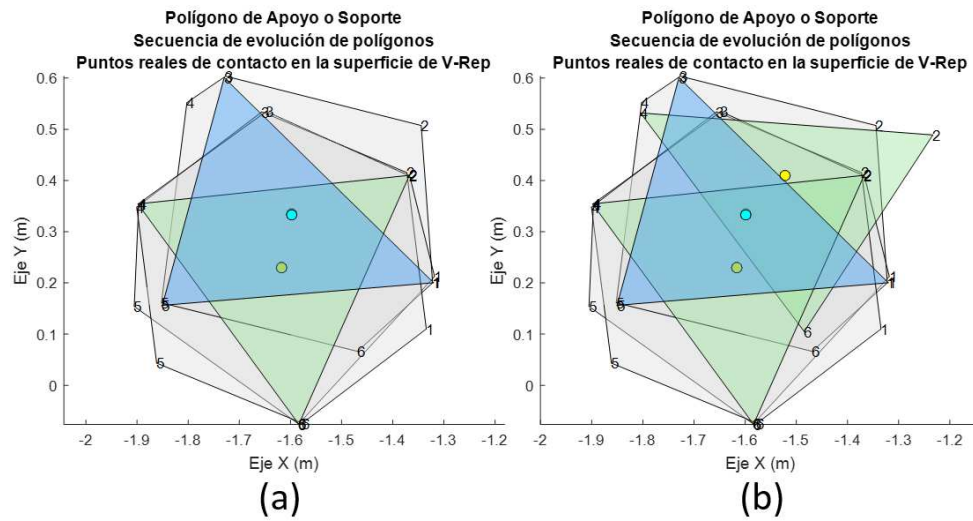
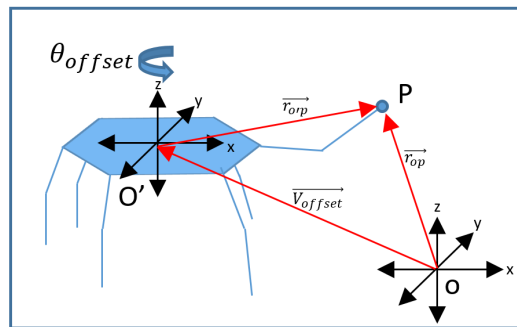


Figura 5.25: Fase tres de la secuencia de polígonos de apoyo. Fuente: Propia

5.5 Validación de cinemática inversa en *V-rep*

La comprobación del funcionamiento del modelo cinemático directo da lugar a que el modelo cinemático inverso funcione también, dado que para la solución del problema cinemático inverso se hace uso del modelo cinemático directo. Por tanto, con conocer la posición o vector V_{offset} y el ángulo de giro de la base θ_{offset} se puede conseguir el conjunto de ángulos necesarios para poder alcanzar cualquier punto con las extremidades del robot siempre que este esté dentro del área de trabajo alcanzable por el robot.

Para comprobar su funcionamiento se procede a generar un conjunto de puntos alcanzables por la extremidad a, solo a modo de ejemplo, suministrando un conjunto de sets de ángulos para obtener la posición que alcanza esta extremidad con dichas posiciones en la escena de simulación de *V-rep*, respecto al sistema de referencia perteneciente al programa.

Figura 5.26: Diagrama de funcionamiento de la cinemática inversa para *V-rep*.

Fuente: Propia

Se tiene el siguiente conjunto de set de ángulos para obtener los puntos a alcanzar por el robot mediante el modelo cinemático inverso. Este conjunto de puntos se obtiene desde una posición inicial de la base del robot, dada por un punto P, en este caso el punto de coordenadas $P = (-1.389; 0.8225; 0.2496)$. Se tiene la siguiente Tabla 5.3 de ángulos para la extremidad a, para obtener los puntos en el espacio.

Tabla 5.3: Coordenadas angulares para prueba de cinemática inversa en *V-rep*

Set	Coordenadas $(\theta_1; \theta_2; \theta_3)$
1	$(35; -55; 0)$
2	$(-55; 45; 0)$
3	$(-35; 0; 35)$
4	$(15; 15; -10)$
5	$(-20; -60; 9)$
6	$(55; 45; 20)$

Donde se procede a seguir el mismo método utilizado para la comprobación de la cinemática inversa que en *Matlab* al momento de proponer el método. Para este caso se selecciona siempre la rodilla arriba para cada set de ángulos. Se comprueba que el punto obtenido mediante la cinemática inversa está contenido en la esfera de aceptación de puntos, y en caso de estarlo es aceptado. Se tiene como resultado que los seis puntos en este caso, son alcanzados por la extremidad, comprobando el funcionamiento de la cinemática inversa, como se muestra en la Figura 5.27.

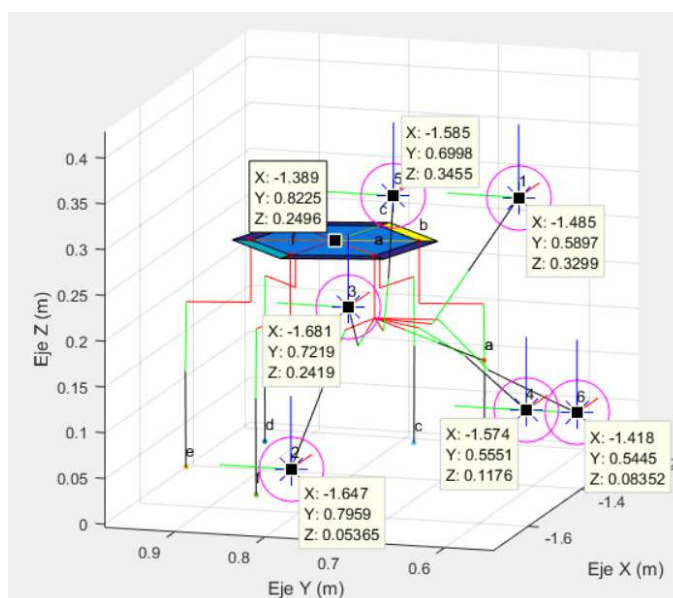


Figura 5.27: Resultado de solución para la cinemática inversa de seis puntos en el espacio para la extremidad a. Fuente: Propia

Para poder mover la extremidad hasta los puntos de prueba se hace uso de las rutinas de controladores PI externos discretos de funcionamiento paralelo, a fin de generar un movimiento armónico y simultáneo de los tres grados de libertad que conforman la extremidad.

En la Figura 5.27, se pueden denotar los siguientes elementos: cada punto está identificado por su perteneciente orden en la secuencia de puntos a alcanzar, se tiene dibujada la esfera de aceptación al rededor del punto objetivo, se utiliza un asterisco azul o uno rojo para describir si el punto conseguido en el espacio a través de la cinemática inversa está dentro o fuera de la esfera de aceptación, donde en este caso, se consigue acertar en la solución del problema cinemático para los seis puntos necesarios a alcanzar por la extremidad a.

Con esto, queda demostrado el funcionamiento de la cinemática inversa respecto a un sistema de referencia solidario a la base. Dicho modelo se puede utilizar para poder seguir una secuencia de puntos al trazar trayectorias en el espacio con una extremidad o

varias de estas a la vez, para realizar tareas específicas o simplemente para posicionarlas en un punto de la superficie con motivos de desplazamiento.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Capítulo 6

Locomoción

Introducción

En este capítulo se procede a describir cómo se implementarán los patrones de locomoción utilizando *Matlab* y *V-rep* conjuntamente para observar y analizar el movimiento del robot. Utilizando *scripts* desarrollados en *Matlab*, se procede a definir cómo se ejecuta la secuencia de fases o etapas presentes en cada ciclo de locomoción para lograr que el robot se desplace sobre superficies planas, tomando siempre en cuenta el conjunto de validaciones para garantizar que se tengan bases estables y que cada uno de los controladores logre alcanzar la posición deseada por los diferentes grados de libertad presentes en la estructura; definiendo a groso modo, el concepto de supervisor que se encargará de ejecutar de manera secuencial el ciclo de pasos o fases que debe desarrollar el robot según sean programados, a este supervisor se le asigna el nombre de manejador central de patrones de locomoción.

Posteriormente, para poder definir y analizar cada uno de los patrones de locomoción a diseñar, se plantea una estructura o representación para poder describir los movimientos secuenciales que realiza el robot en general, de tal forma que se puedan implementar y modificar para observar diferencias en el rendimiento según sean los parámetros asignados. A través de *Matlab*, se procederá a generar un conjunto de gráficas para poder realizar el análisis del desempeño de los movimientos del robot,

medidos en relación al tiempo real que le toma al mímico implementado en *V-rep* ejecutar la secuencia de pasos indicados por el patrón de locomoción; entre estos valores a analizar está la velocidad promedio del centro de la base del robot respecto al sistema de referencia del mundo, el giro que experimenta la base respecto al eje Z, el desplazamiento total por ciclo de movimiento y el conjunto de polígonos o patrones de polígonos de apoyo que se obtienen al mover las extremidades.

Para poder tener una noción de los posibles valores a utilizar para el movimiento de las extremidades del robot, se hace uso de la investigación realizada respecto a los modos de locomoción comunes de los hexápodos en la naturaleza tomando en cuenta los rangos de movimientos, longitud de extremidades, función del patrón de locomoción, velocidad, apertura de cada una de sus articulaciones y desplazamientos del centro de masa o de gravedad del insecto. Con estos valores es posible entonces lograr obtener un primer diseño de diversos patrones de locomoción que le permitan al robot modificar su posición del centro de masa y desplazarse a través de la superficie.

Seguidamente, se proponen diversos patrones de locomoción tomando en cuenta todas las características tanto estructurales como de funcionamiento del robot, describiendo el uso y razón de diseño de dicho patrón.

Por último, se procederá a observar la respuesta del mímico del prototipo del robot implementado en *V-rep* y controlador mediante *Matlab*, ejecutar los patrones de locomoción para realizar el análisis de desempeño de los mismos en base al tiempo, distancias y ciclos que se ejecutan en cada diseño. Con los resultados se procede luego a realizar una comparación entre patrones de locomoción similares, para observar las variaciones entre estos en base a la modificación de sus parámetros.

6.1 Manejador central del patrón de locomoción

Para poder implementar el concepto de locomoción en el robot, es necesario definir una estructura de control que permita realizar la secuencia de movimientos de manera

ordenada, para lograr una ejecución del conjunto de ciclos de movimientos o fases de movimiento de las extremidades de la estructura como lo dicta el diseño de cada patrón de locomoción en específico. Dicha estructura de control se basa en el conjunto de comprobaciones definidas respecto a los conceptos de estabilidad estática que se logran a través de la validación de polígonos de apoyo, y el correcto funcionamiento de cada uno de los controladores para alcanzar su posición de referencia, por lo que en general este manejador central de patrones de locomoción se encargará solo de ejecutar las secuencias de pasos diseñadas para cada patrón de locomoción, comprobando que se cumplan las condiciones entre los pasos previos y siguientes, en cada etapa o ciclo de movimiento de las extremidades.

Denotando el manejador central de patrón de locomoción con las siglas MCPL para abreviar, se tiene entonces que para cada patrón de locomoción diseñado existe un MCPL propio, con sus valores de operación respectivos para poder lograr ejecutar de manera coordinada cada secuencia de movimiento, es decir, para realizar giros en el mismo eje o base del robot existirá un MCPL que tendrá valores y secuencias de movimiento distintas a los que tendría un MCPL encargado de realizar el movimiento en línea recta.

Se define cada MCPL, como el manejador de la secuencia de pasos diseñados para cada patrón de locomoción individual, en el cual se realizan las comprobaciones necesarias para poder ejecutar de manera correcta, cada movimiento diseñado. Dicho MCPL durante su ejecución proporcionará a su vez el conjunto de valores y medidas respecto al escenario donde se desenvuelve el robot, necesarios para el análisis de movimiento de la estructura.

La implementación de cada patrón de locomoción diseñado es realizada mediante rutinas escritas en *Matlab*, dichas rutinas describen el funcionamiento secuencial del MCPL para cada una de las secuencias de movimiento diseñadas, en las cuales se hacen el conjunto de inicializaciones, verificaciones y comprobaciones necesarias para poder garantizar y asegurar la ejecución de correcta de cada paso o movimiento de

las extremidades, según el estado previo y siguiente de las posiciones de cada una de estas.

Para la correcta ejecución del patrón de locomoción del robot, el MCPL hace uso de los modelos de validación del polígono de apoyo y de las comprobaciones de finalización de funcionamiento de los controladores PI externos simultáneos implementados en *Matlab*. Por tanto, dichas comprobaciones y validaciones sirven de transiciones para poder realizar el siguiente ciclo o fase de movimiento en el patrón de locomoción. La idea anterior define un funcionamiento similar a descritos para Redes de Petri, en las cuales para poder pasar de un estado a otro es necesario cumplir una transición. Utilizando este concepto, la programación del MCPL es básicamente una Red de Petri secuencial, en el cual se asignan un conjunto de parámetros a cada una de las extremidades del robot para poder mover la estructura desde su punto de origen hacia otro punto en la superficie.

De modo general, se tiene el esquema de la Figura 6.1, con el cual están estructurados todos los códigos para la ejecución de los patrones de locomoción en *Matlab*. Donde el programa se puede dividir en tres bloques, un primer bloque para la inicialización de parámetros y comunicación con el entorno de simulación, junto todas las funciones para obtener las posiciones y valores de operación del robot, un segundo bloque que engloba todas las rutinas que ejecuta el MCPL para iniciar, ejecutar y finalizar el patrón de locomoción y por último un tercer bloque que tiene como objetivo producir el conjunto de gráficas necesarias para el análisis de desempeño del patrón de locomoción, así como la finalización de la comunicación con el entorno de simulación de V-rep y Matlab.

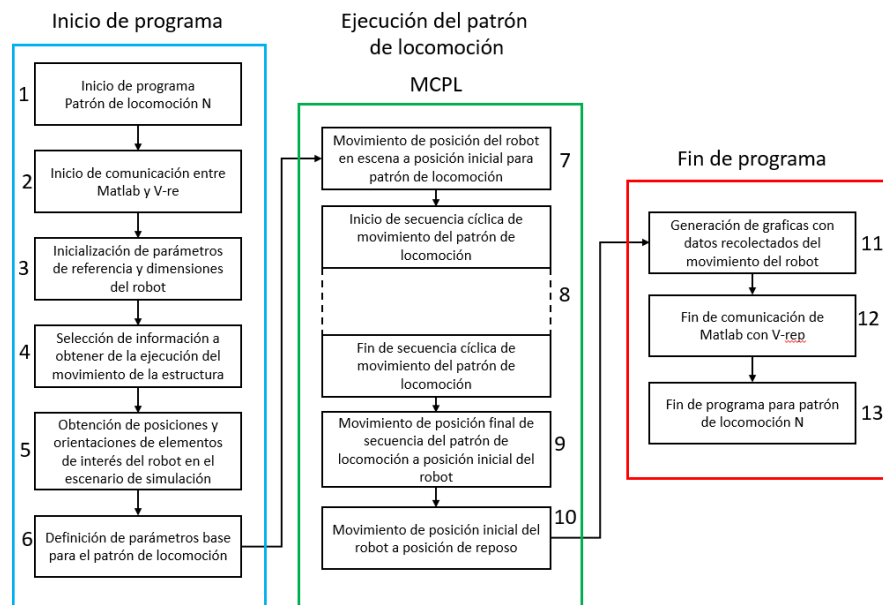


Figura 6.1: Esquema de estructura de código en *Matlab* para ejecutar un patrón de locomoción. Fuente: Propia

Ahora, se puede describir con más detalle el bloque de código que representa de manera general al MCPL, en el cual se realizan todos los movimientos de los motores del robot para desarrollar el patrón de locomoción. Se parte de la premisa de que todo movimiento a realizar depende de: el estado anterior del robot, su posición actual y su estado futuro; es decir: (a) para poder realizar un movimiento se debe lograr tener previamente una base que cumpla con las características de estabilidad estática, (b) durante el desarrollo del movimiento de las extremidades se requiere que se logre alcanzar la posición requerida para cada motor o grado de libertad y (c) por último el próximo paso dependerá de la posición en la que se dispongan las extremidades según los nuevos ángulos de movimiento, por lo que la evolución de las posiciones de los patrones de locomoción tienen que estar bien diseñadas para que cumplan con todas las premisas mencionadas.

El principal factor que determina si un movimiento se podrá realizar o no, está dado por el hecho de que se pueda o no formar una base estable con las nuevas posiciones que se le asignarán a las extremidades. El polígono de apoyo se calcula

según la posición futura antes de realizar un movimiento, esto a manera de prever que se seleccione la posición de una o más extremidades que desestabilicen la estructura. Una vez que se determina que el movimiento de las extremidades sigue proporcionando un base estable para el robot, es decir, se consigue un polígono de apoyo válido, se procede a realizar el movimiento planificado, en caso de no ser válido se obvia dicho movimiento y se pasa al siguiente. Al momento de ejecutar el movimiento de las articulaciones es donde entran en funcionamiento los controladores PI externos regulando la dinámica de la respuesta de los motores mientras estos alcanzan la posición objetivo asignada.

Con esto definido, se tiene la Figura 6.2 que representa el esquema de una sección de red de petri utilizada para describir el funcionamiento del código en *Matlab* que define cómo se ejecutan los movimientos en el bloque MCPL, de manera individual. En esta sección de red se define la secuencia necesaria de acciones y comprobaciones para hacer un movimiento de las extremidades partiendo de una posición válida previa del robot. El objetivo de esta secuencia es lograr realizar el siguiente movimiento dictado por el patrón de locomoción diseñado o pasar al siguiente en caso de que algún movimiento no válido se consiga.

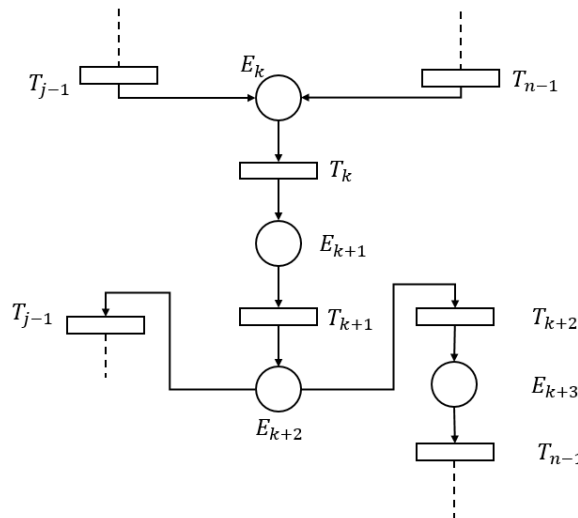


Figura 6.2: Bloque de Red de Petri para ejecutar un solo movimiento por el MCPL.

Fuente: Propia

Donde cada transición y estado se definen como:

- T_{n-1} : Controlador PI simultáneo alcanzó todas las referencias.
- T_{k-1} : Polígono de apoyo no encontrado.
- E_k : Estado válido del sistema, posiciones y extremidades en posiciones válidas.
- T_k : Transición siempre válida.
- E_{k+1} : Asignación de nuevo set de ángulos para las extremidades.
- T_{k+1} : Transición siempre válida.
- E_{k+2} : Búsqueda de polígonos de apoyo para las nuevas posiciones de las extremidades.
- T_{k+3} : Polígono de apoyo valido encontrado.
- E_{k+3} : Movimiento de extremidades a posiciones nuevas.

Dicho bloque de Red de Petri, se repite tantas veces como movimientos tenga cada uno de los diferentes ciclos del patrón de locomoción. Otro segmento en la secuencia de ejecución en la Red de Petri para el MCPL de importancia, es el que describe el funcionamiento del controlador PI externo simultáneo, en el cual hasta que todos los controladores que se requieran utilizar no alcancen la referencia, no se abandona dicha subrutina de control. Se tiene la Figura 6.3 para describir dicho segmento de Red de Petri.

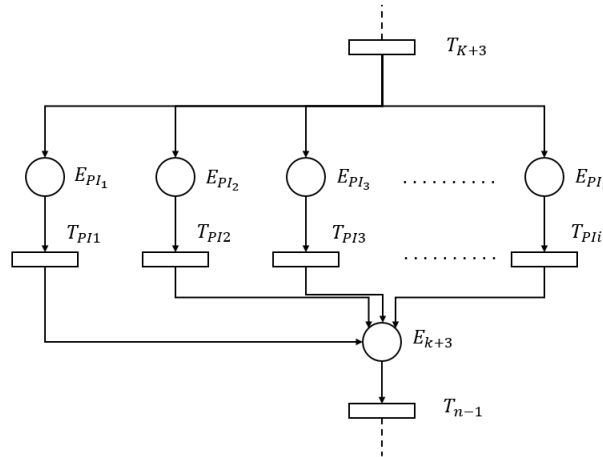


Figura 6.3: Bloque de Red de Petri para ejecutar el conjunto de controladores PI simultáneos. Fuente: Propia

Donde cada elemento y transición nuevos, se definen como:

- E_{PI1} : controlador PI1 externo en funcionamiento para mover actuador 1 seleccionado.
- T_{PI1} : Valor de referencia alcanzado por el controlador PI1 externo.

Descritas estas secciones de ejecución del código diseñado en *Matlab* para lograr el movimiento del robot a través de bloques de Redes de Petri, se tiene ya una idea de la secuencia del funcionamiento del código a la hora de ejecutar un patrón de locomoción completo. En la ejecución de cada patrón de locomoción se puede iniciar desde una posición previa en la que se haya encontrado el robot o simplemente desde de una posición inicial definida por el patrón de locomoción. Una vez el robot esté en la posición inicial, se procede a repetir los movimientos cíclicos tantas veces como se indique en los parámetros del MCPL. Terminada la ejecución del bloque cíclico de movimiento, se regresa al robot a la posición inicial o base del robot, bien sea para generar un nuevo patrón de locomoción o simplemente finalizar la simulación con el mímico.

Posterior a la ejecución del patrón de movimiento, se obtiene el conjunto de gráficas necesarias para describir el desempeño del movimiento total realizado.

6.2 Definición de tabla de movimiento

Para poder indicar y definir los movimientos a realizar por cada una de las extremidades según lo requiera el diseño de un patrón de locomoción en específico, es necesario desarrollar una forma en la cual se suministren de manera descriptiva los parámetros de funcionamiento de cada uno de los grados de libertad o actuadores a controlar. Como se podrá realizar movimientos de más de un grado de libertad o actuadore a la vez, dicha descripción deberá contemplar esta posibilidad. Para esto se propone el formato de Tabla 6.1 que describe cada conjunto de movimientos, bien de los actuadores de una sola extremidad o de varias a la vez, en cada una de las fases que componen un ciclo de locomoción.

Tabla 6.1: Tabla de referencia para descripción de movimientos del robot

Grado de libertad	Fase de movimiento		
	FASE 1	FASE 2 ...	FASE n
GLD n	Parámetros		
GLD 1	[(E1,E2....E6);(V1,V2,...V6);(ref1,ref2,...,ref6)]		
GLD 2	[(E1,E2....E6);(V1,V2,...V6);(ref1,ref2,...,ref6)]		
GLD 3	[(E1,E2....E6);(V1,V2,...V6);(ref1,ref2,...,ref6)]		

Donde se tiene el significado de cada valor como sigue:

- E_i , representa la extremidad para el grado de libertad seleccionado, es decir, si se tiene E1 en GLD 1, se refiere al primer grado de libertad de dicha extremidad.
- V_i , representa la velocidad de ese grado de libertad seleccionada para el controlador PI externo, es decir, si se selecciona V1 en GLD 1, E1, se refiere a que utilizará la velocidad 1 (definida como lenta) del controlador PI externo para ese grado de libertad.
- ref_i , representa el valor de referencia en posición angular que se desea alcanzar con dicho motor.

En el vector de parámetros, solo se describen las posiciones que se quieren modificar, las actuales del robot, no se presentan en la tabla ya que no representan acciones

futuras a ejecutar. Por ejemplo, si se desea mover de manera simultánea el grado de libertad de la extremidad 1, 3 y 5 con velocidad dos hasta el valor de referencia de 60 grados se tendría el siguiente vector de parámetros: $[(1,3,5);(2,2,2);(60,60,60)]$, y así sucesivamente para describir los movimientos en general para cualquier motor del robot.

6.3 Herramientas para el análisis de desempeño y validación de los patrones de locomoción.

El análisis del desempeño de los patrones de locomoción a diseñar, es requerido para poder apreciar si la ejecución de estos se está realizando en forma correcta. A pesar de contar con modelos para realizar la validación de las posiciones, el verdadero funcionamiento del patrón de locomoción se ve reflejado a la hora de poner en movimiento el prototipo del robot en la superficie de desplazamiento, una rutina de movimiento bien diseñada dará como resultado un desplazamiento aceptable para el robot, pero es necesario lograr cuantificar de alguna forma lo eficiente del movimiento en general. Dado que para la mayoría de las rutinas de movimiento a programar existen segmentos de estas que se repiten según sea el número de veces necesarias, el desplazamiento que logra en cada ciclo de estas es algo necesario a tomar en cuenta, debido a que se puede ir mejorando tanto posiciones de contacto como apertura de ángulos en cada actuador para obtener mejores resultados.

Desde el inicio de la ejecución de un patrón de locomoción hasta el final de este, el bloque de código correspondiente al MCPL de las rutinas programadas en *Matlab*, hacen mediciones de todas las posiciones de los objetos de interés o *Dummies* acoplados al cuerpo del robot respecto a cada intervalo de tiempo de control que transcurre. Haciendo uso de las funciones *tic* y *toc* de *Matlab* es posible muestrear de manera acertada la escala de tiempo en la que el robot ejecuta cualquier movimiento en su secuencia de desplazamiento. Posiciones del centro de la base, puntas de extremidades y la rotación de estas respecto al origen coordinado del escenario de simulación, permiten poder generar datos conjuntos en los cuales se puede apreciar la velocidad

de movimiento del robot, la trayectoria de desplazamiento y el giro que realiza su base, además de contar trazado de los polígonos de apoyo de sus extremidades como se ha observado anteriormente. Este conjunto de medidas da la posibilidad de poder desplegar gráficas respecto a planos y ejes de interés, con información acerca de desempeño en la ejecución del desplazamiento del robot.

Entre el conjunto de datos que se pueden medir de la estructura, se tienen las siguientes posibles herramientas o graficas que permiten observar y analizar los movimientos del robot:

1. **Gráfica de respuestas de los controladores PI externos discretos implementados:** Este grupo de gráficas permite corroborar el funcionamiento de los motores en el entorno de simulación de manera aislada, dando información importante respecto a las características velocidad y tiempo de asentamiento para alcanzar el valor de referencia, por cada uno de los controladores en cada grado de libertad de la extremidad. Lo que hace de estas gráficas una herramienta esencial para detectar fallas y poder observar el tiempo real de desempeño el movimiento de las articulaciones bajo un escenario distinto al del modelo matemático simulado aislado. (ver Figura 5.11)
2. **Gráfica de búsqueda y validación polígonos de apoyo:** Utilizadas para poder determinar si existen bases estables para el robot poder mantener la estructura de pie, como usan el modelo de cinemática directa para graficar las posiciones que componen los elementos del robot, sirve para detectar si se está asignando posiciones de extremidades que estén fueran de rango o no sean posibles alcanzar por la estructura de la extremidad. (ver Figura 5.22)
3. **Gráfica de evolución de polígonos de apoyo validos sobre la superficie:** Con esta gráfica se puede apreciar la evolución de los polígonos de apoyo que se forman en la superficie durante la ejecución de algún patrón de locomoción. Si los polígonos de apoyo se pueden agrupar de manera definida según el ciclo de locomoción, se puede apreciar por capas el desplazamiento que logra cada movimiento de dicho grupo de extremidades por separado, como se muestra en la

Figura 6.4. En dicha gráfica se define una secuencia de evolución para polígonos de apoyo de un ganeo trípode básico, en esta se puede observar en la Figura 6.4(a), como con cada polígono se va desplazando el centro o la base del robot respecto al plano horizontal XY, pero además si se quiere observar el desplazamiento en un eje en particular (X o Y), basta con alinear dicha gráfica respecto a ese eje y observar por capas el desplazamiento aportado individualmente por cada etapa de movimiento, en la Figura 6.4(b), se puede apreciar que los puntos denotados de color rojo en la capa inferior corresponden a la ubicación del centro de masa para el polígono de apoyo formado por las seis extremidades tocando la superficie, la segunda capa corresponde al centro de masa ubicado en el polígono de apoyo formado por el triángulo de las extremidades (2,4 y 6) y por último la capa superior que corresponde a la ubicación del centro de masa contenido en el polígono formado por las extremidades (1,3 y 5).

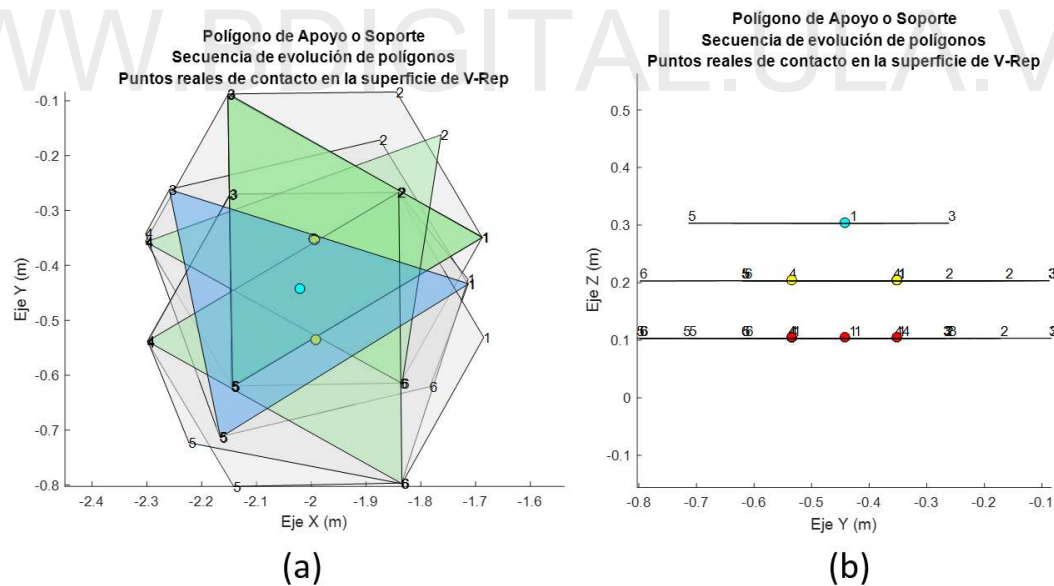


Figura 6.4: Gráfica de evolución de polígonos de apoyo del patrón de locomoción en ejecución. Fuente: Propia

4. **Gráfica de desplazamiento en el plano horizontal XY:** Utilizando las funciones disponibles para obtener la posición de la base de robot, en esta gráfica es posible obtener tres características esenciales para evaluar el desempeño del

movimiento del robot, la primera es la trayectoria que su centro de masa recorre en la en base a su proyección en el plano XY, con esto es posible determinar la distancia lineal entre el punto de inicio de ejecución del patrón de locomoción hasta su punto final, por último es posible determinar la velocidad promedio del robot al desplazarse entre estos dos puntos, dado que se conoce el tiempo que le tomó completar dicho trayecto. Con estos datos también es posible, de forma indirecta, obtener la distancia lograda por ciclos, dado que este número de ciclos es asignado, por tanto, se puede obtener qué tanto desplazamiento se logra en línea recta respecto a cada ciclo del patrón de locomoción. Se tiene la Figura 6.5, donde se describe el movimiento del centro de masa de la base, con las características antes mencionadas.

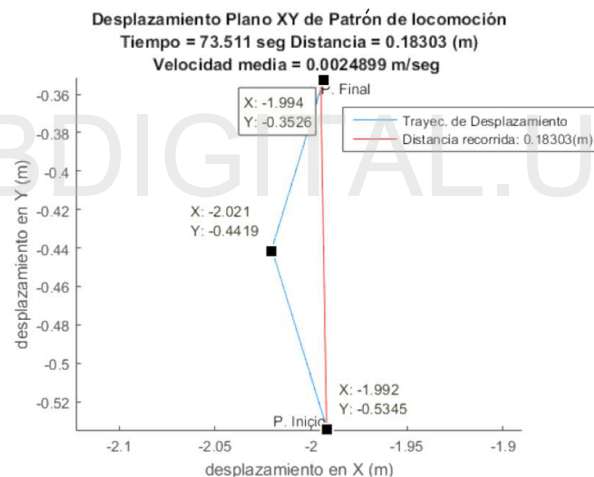


Figura 6.5: Gráfica de desplazamiento y trayectoria del centro de masa del robot en el plano XY. Fuente: Propia

5. **Gráfica de ángulo de giro respecto al eje Z:** Esta gráfica hace uso de los mismos puntos utilizados para medir el desplazamiento del robot en el plano horizontal XY, a diferencia que el ángulo de giro respecto al eje Z entra en juego como medida. En ella se procede a dibujar un sistema de referencia solidario al de la base del robot indicando el valor del ángulo de giro respecto al eje Z en cada punto, proporcionando dos puntos adicionales para corroborar, en caso de ser necesario, que la inclinación o cambio de este ángulo sea una medición correcta.

Su uso entra en juego a la hora de determinar si algún patrón de locomoción que, por ejemplo, deba hacer desplazamientos en línea recta, se está desviando de su camino dada la variación del ángulo inicial y el final de su trayectoria; dicha gráfica también es útil para poder describir la curvatura que se forma al momento de realizar patrones de locomoción que combinen desplazamiento y giro en una dirección a fin de lograr una curva, así como su uso para la representación simple del ángulo de giro logrado por una rutina de locomoción desarrollada para dicho fin. Se tiene la Figura 6.6 como ejemplo del patrón de locomoción descrito en la Figura 6.5.

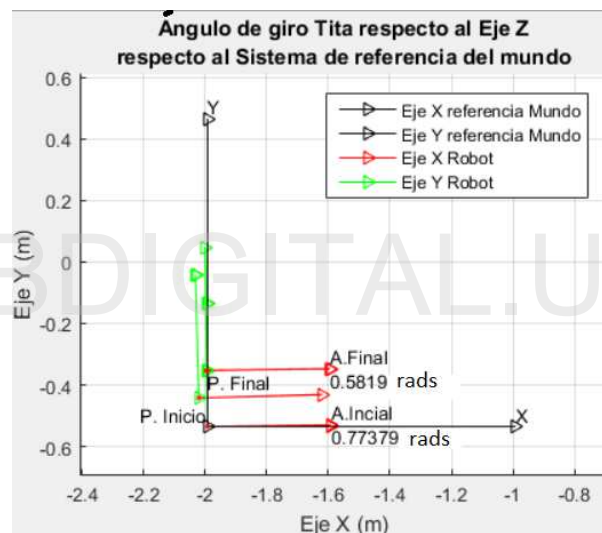


Figura 6.6: Gráfica representativa de ángulo de giro en el plano XY respecto al eje Z.

Fuente: Propia

- Simulación en tiempo real del mímico implementado en V-rep:** Por último, se tiene la simulación en tiempo real y de manera continua del robot o mímico implementado en *V-rep* controlado vía *Matlab*, en cual se puede observar la evolución del patrón de locomoción directamente sobre la superficie del escenario de simulación. En este entorno es posible observar la fluidez y armonía con la cual se desarrollan los patrones de locomoción diseñados, a fin de analizar si es necesario realizar ajustes para mejorar diversas características respecto a cada fase de movimientos.

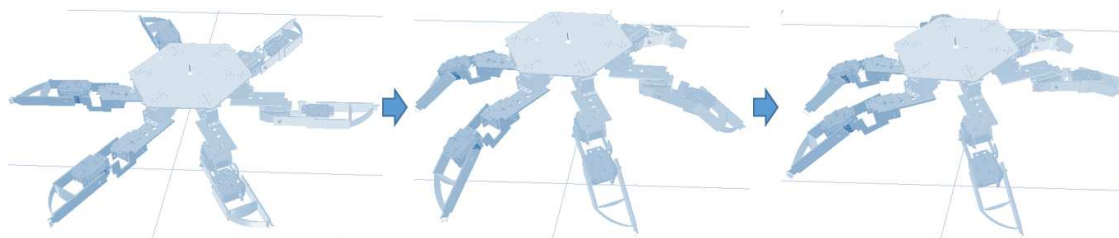


Figura 6.7: Evolución de secuencia de locomoción en *V-rep*. Fuente: Propia

De esta forma, con este conjunto de gráficas y mediciones es posible obtener valoraciones respecto a los resultados en los cuales el rendimiento y desempeño de los patrones de locomoción se pueden evaluar con bases fundamentadas e inclusive poder comparar diversos valores como la velocidad promedio de desplazamiento respecto a otros hexápodos y diversos patrones de locomoción.

6.4 Datos iniciales para el diseño de patrones de locomoción

Para iniciar el diseño de los patrones de locomoción a ejecutar por el robot, una base sólida respecto a diversos aspectos y características para los movimientos de las extremidades es necesaria, sobre todo si esta proviene de estudios realizados sobre seres vivos presentes en la naturaleza, ya que su estructura lleva en funcionamiento un considerable periodo de tiempo, garantizando de una u otra forma la supervivencia de la especie mediante la continua evolución y mejora de los patrones de locomoción en su entorno.

Tomando en cuenta un conjunto de investigaciones realizadas por entomólogos e institutos de zoología en diversas áreas, se puede lograr un nivel considerable de referencia respecto a estudio de especies de insectos en particular como lo son los insectos palo, cucarachas, grillos y hormigas que demuestran características únicas, de las cuales es posible obtener valores referenciales respecto al movimiento de sus extremidades en diversos escenarios de estudio, como lo son, los rangos angulares

de apertura para sus articulaciones, cantidad de movimiento tridimensional, fuerza aplicada por cada apéndice, entre otros; lo que sirve de base para poder seleccionar valores iniciales a la hora de diseñar un patrón de locomoción según un propósito definido.

Una de las ventajas primordiales de optar por una estructura caminante con seis extremidades y de base hexapodal, es la posibilidad de lograr polígonos de apoyo redundantes, como enuncia (Dean y Wendler, 1984, p.203), con esta base es posible además de tener una estructura estable trípole, poder efectuar patrones de locomoción para movimientos rápidos, aunque, en comparación con velocidades de desplazamiento lentas solo se esté con el polígono de apoyo trípole en contacto con el suelo por una fracción muy pequeña del tiempo ciclo de movimiento. Por otro lado, la ventaja que aporta este número de extremidades de manera adicional, respecto a la dinámica de movimiento, es que permite hacer pausas y reanudaciones en el ciclo de locomoción en cualquier instancia de la ejecución del patrón de locomoción.

Entorno a la redundancia de extremidades para formar un polígono estable de apoyo, se tienen un conjunto de ventajas a tomar en cuenta al momento de planificar y diseñar patrones de locomoción, dicha redundancia permite una plasticidad amplia en los posibles movimientos de las extremidades, lo que permite formar bases de apoyo tripodes, cuádruples y pentuples para habilitar el movimiento del resto de las extremidades a la hora de buscar de nuevos puntos de apoyo para continuar con el movimiento del robot, como lo enuncia Grabowska et al. (2012), el cual hace referencia a la presencia de indicios de patrones de movimiento cuádruples en la locomoción de insectos palos en diversas superficies.

De igual forma, la redundancia de extremidades permite garantizar que se puedan soportar pérdidas de las mismas por circunstancias no controladas como avería de motores o trabas en el funcionamiento de estos, problemas eléctricos y de comunicación al momento de implementar el robot. Esto se ve reflejado en el trabajo de investigación realizado por Steck et al. (2009), en el estudio del desempeño de movimiento de las

hormigas de la especie *Cataglyphis fortis*, al ser amputadas una o dos de sus extremidades para observar las variaciones en el patrón de locomoción desarrollado al compensar la pérdida de los apéndices. En casos particulares para implementaciones en robots, se denota el trabajo realizado por Moradian y Mohammadi (2011), al analizar los cambios necesarios a tomar al momento en que un robot tipo hexápodo pierda una extremidad, volviéndolo un pentápodo. Lo cual demuestra que se pueden adoptar diversas configuraciones a prueba de fallos para el robot, con posibilidades aún de seguir ejecutando patrones de locomoción para lograr desplazamiento.

Respecto a valores de operación para los distintos parámetros de las extremidades, se tiene un conjunto de investigaciones importantes a resaltar. Bums (1973), como parte de su trabajo en el estudio del movimiento libre de la especie de saltamontes *Schistocerca Gregaria*, describen los rangos de movimiento de las extremidades como se muestra en la Figura 6.8, donde el rango de movimiento de las extremidades frontales y media se describe en base al plano horizontal y vertical. Estas extremidades A y B, representan estructuras similares a las del robot diseñado, dado su múltiple uso para diversas tareas, por tanto, sus rangos de operación serán factor a tomar en cuenta a la hora de diseñar patrones de locomoción propios.

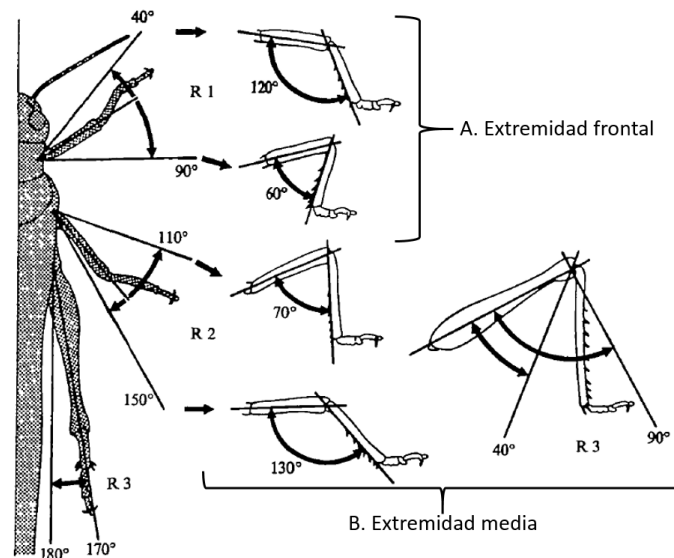


Figura 6.8: Rangos de movimientos para extremidades del saltamontes *Schistocerca Gregaria*, en modo de locomoción libre . Fuente: (Bums, 1973, p.48).

Los insectos palo han sido objeto de un número considerable de investigaciones respecto a la plasticidad de locomoción capaz de generar con sus extremidades, en base al trabajo de Cruse y Bartling (1995) y su forma de identificar, modelar y medir el funcionamiento los apéndices de insecto palo de la especie *Carausius morosus* se tienen valores y parámetros de las extremidades que sirven de guía al momento generar y efectuar desplazamientos en línea recta en la fase de apoyo del ciclo de locomoción, se tiene la Figura 6.9 en la que se muestran los valores de operación para los ángulos de la articulación coxa-troncal y la representación de dichos ángulos en un modelo de la extremidad.

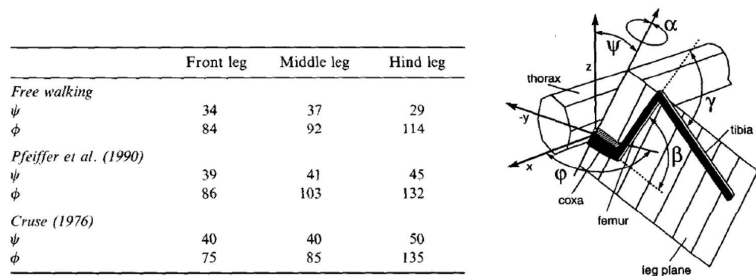


Figura 6.9: Rangos de movimientos para extremidades del insecto palo *Carausius morosus*, en modo de locomoción línea recta. Fuente: (Cruse y Bartling, 1995, p.765) .

Otra investigación en base a la locomoción de la misma especie de insectos palo, por parte de (Cruse, 1976, p.241), describe los rangos de movimiento para las extremidades en cuatro distintos escenarios, como se muestran en la Figura 6.10, en el cual el rango de operación de la articulación coxa-troncal presenta variaciones según la tarea realizada.

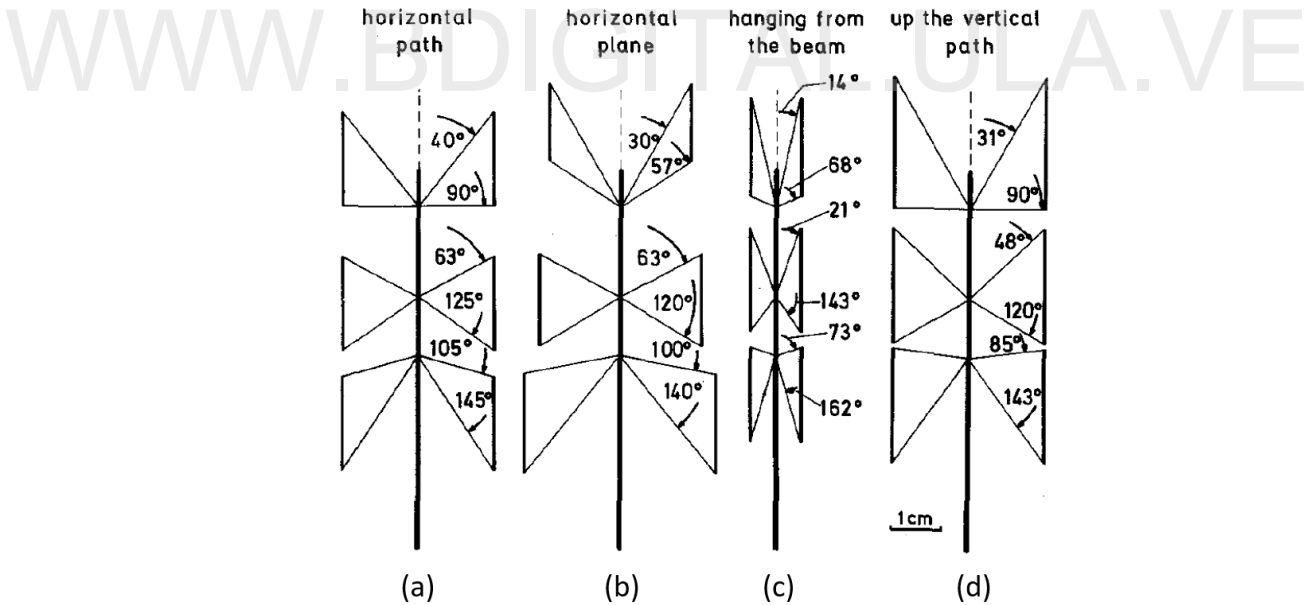


Figura 6.10: Rangos de movimientos para extremidades del insecto palo *Carausius morosus*, para los escenarios (a) Camino horizontal, (b) Plano horizontal, (c) Colgando de un hilo, (d) Camino vertical en ascenso. Fuente: (Cruse, 1976, p.241).

Un conjunto de investigaciones relizadas por Zollikofer (1994b,a,c), en la cuales describe la influencia de factores como la velocidad, curvatura de movimiento, la

morfología y la carga del cuerpo, en el desarrollo de los patrones de locomoción de las hormigas de la especie *Cataglyphis fortis*, brinda información adicional del posible comportamiento y ubicación del centro de masa de la estructura al momento de que los factores descritos se hacen presentes, lo que hace de esta información un elemento primordial en la planificación y diseño de los patrones de locomoción del robot para que sean estables.

Por último, se tiene a modo de referencia, los rangos de movimiento para las articulaciones de una cucaracha perteneciente a la especie *Blaberus discoidalis*, medidos por parte de Kram et al. (1997) en un estudio realizado en torno a la cinemática de los apéndices durante la fase de locomoción rápida o de carrera de una cucaracha; además logra medir mediante sensores de presión ubicados en el escenario de prueba, la contribución de cada par de extremidades durante este movimiento, donde las extremidades posteriores por su morfología y cantidad de musculatura superior respecto a los dos pares previos supera por gran porcentaje a los demás apéndices. Se tiene la Figura 6.11 donde se describe una tabla de los rangos de movimiento y los porcentajes de contribución de desplazamiento por extremidad. Esto da la noción de que con extremidades diseñadas de manera simétrica los ángulos de movimiento y contribución en el desplazamiento serán similares o iguales, siempre que se mantenga la simetría en la ejecución del patrón de locomoción.

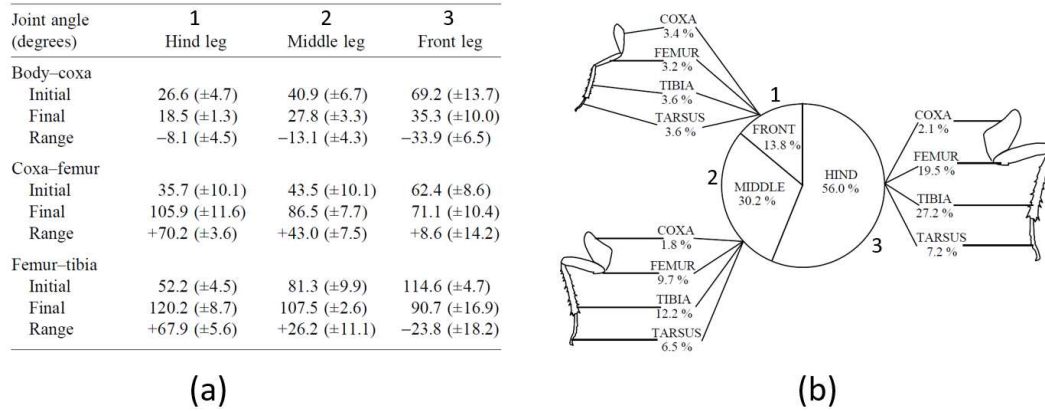


Figura 6.11: Rangos de movimientos para extremidades para cucaracha de la especie *Blaberus discoidalis*, para los escenarios (a) Rangos de movimiento para cada articulación, (b) Descripción porcentual de contribución por al desplazamiento por extremidad.

Con los datos suministrados en las investigaciones mencionadas anteriormente, se pueden proponer patrones de locomoción que tomen en cuenta de manera conjunta lo antes descrito junto con las características del robot diseñado a fin de lograr diseñar e implementar patrones de locomoción funcionales.

6.5 Propuesta de patrones de locomoción

En base los conceptos consolidados, se procede a proponer un conjunto de patrones de locomoción que le permitan al robot desplazarse por una superficie plana. Considerando el número de extremidades del mismo y la plasticidad de las extremidades, el conjunto de movimientos que se puede agrupar para lograr un ciclo de secuencias de acciones para posicionar los apéndices en el espacio puede llegar a ser muy amplio, por tanto, se proponen patrones de locomoción simples para realizar desplazamientos básicos pero funcionales. Entre estos patrones de locomoción, se planea lograr proponer aquellos que permitan desplazar al robot en línea recta hacia cualquier dirección y girar respecto a su base, gracias a que la simetría radial de la estructura brinda la capacidad de poder orientar o ejecutar dichos movimientos respecto a cualquier cara o conjunto de extremidades del robot, es decir, se puede

empezar la ejecución con un grupo de extremidades A, mientras que el grupo B sirve de base de apoyo para el movimiento y viceversa.

Dado que la superficie de desplazamiento del robot, en primera instancia, es plana y las puntas de contacto de las extremidades y el suelo del escenario de simulación generan suficiente fricción entre sí, se garantiza un agarre y contacto óptimo sin deslizamiento, garantizando esto en el entorno de simulación, mediante diversos ajustes en *V-rep*, los patrones de locomoción a diseñar simétricos y semejantes entre sí. El diseño de estos patrones de locomoción garantiza lograr, en la mayoría de los casos, un contacto parejo con la superficie, además de garantizar siempre un polígono estable para poder realizar el siguiente paso en la secuencia de movimiento.

Los patrones de locomoción a diseñar se ejecutan en base al modelo cinemático directo, es decir, se asignan un conjunto de ángulos diseñados específicamente para grado de libertad de las extremidades, a fin de lograr posicionarlas según un esquema de movimiento que contempla la posición del robot en general, en el cual las extremidades del robot puedan ir alcanzando consecuentemente nuevas posiciones de avance en la superficie de contacto y una futura base de apoyo válida y estable. Para el correcto diseño de cada uno de estos patrones de locomoción, se toman en cuenta cada una de las características de la estructura del robot, como por ejemplo, los rangos máximos de movimiento de cada grado de libertad y las posiciones conocidas posibles de las extremidades respecto a su área de trabajo.

Todos los patrones de locomoción comienzan desde una posición inicial del robot establecida, en la que la estructura se encuentra completamente dispuesta sobre la superficie de contacto, con todos los motores en posición angular cero, como se muestra en la Figura 6.12. De este punto en adelante, el MCPL específico para cada patrón de locomoción, se encarga de llevar la robot a la posición inicial para la fase de movimiento.

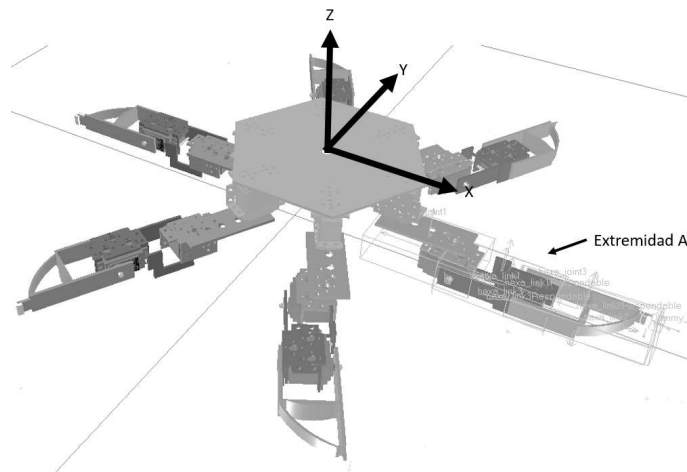


Figura 6.12: Posición inicial base para el robot simulado en *V-rep*. Fuente: Propia

Para la ejecución de cada fase de movimiento diseñada para cada ciclo de los patrones de locomoción, se hace uso del MCPL para su correcta ejecución, garantizando de manera sucesiva que se logre conseguir un polígono estable para el siguiente movimiento. Cada uno de los patrones de locomoción diseñados se logró mediante la planificación y corrección continua al visualizar la ejecución de los movimientos. Se procede a describir los patrones de locomoción básicos diseñados.

6.5.1 Gateo trípole para desplazamiento en línea recta versión 1

Este es el patrón de locomoción básico desarrollado por los insectos en la naturaleza, en el cual se hace uso de la garantía de tener siempre una base estable con tres puntos de contacto, que proporciona la estabilidad estática para el robot mediante el uso de tres extremidades para generar el polígono de apoyo válido mientras que se alcanzan nuevos puntos de contacto con las tres extremidades restantes, en fase de balanceo, para hacer contacto con la superficie y poder formar el próximo polígono de apoyo válido. Durante el desarrollo de este patrón de locomoción, pueden formarse polígonos de apoyo de tres y seis puntos mientras se realizan las secuencias de desplazamiento, dado que, para levantar tres extremidades del suelo se necesita por un periodo de tiempo en el que las

otras tres estén simultáneamente haciendo contacto con la superficie. Dicho patrón de locomoción, se ejecuta en sentido del eje Y positivo respecto a la base o sistema de referencia del robot, como se muestra en la Figura 6.13.

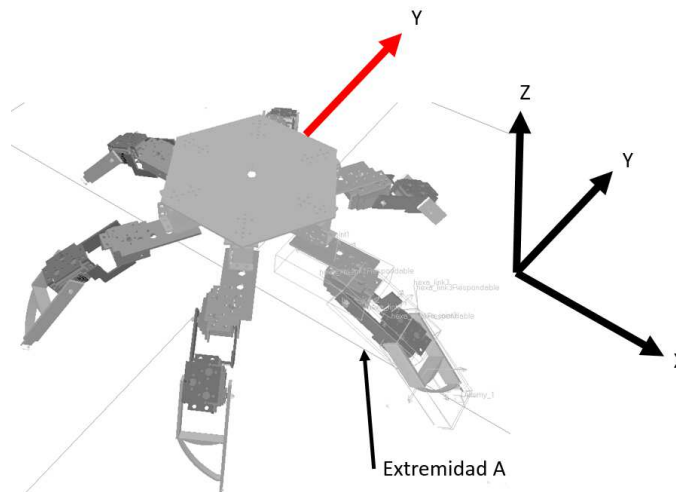


Figura 6.13: Sentido de movimiento para patrón de locomoción trípode de desplazamiento en línea recta, dirección eje Y. Fuente: Propia

La posición inicial de este tipo de patrón de locomoción está definida por un conjunto de valores, denominados en el código *rise2* y *rise3* para denotar los ángulos de los servomotores dos y tres de cada una de las extremidades para elevar el punto de contacto del suelo; *land2* y *land3*, para volver a hacer contacto con el suelo, esto mantiene una simetría en la altura para cada una de las extremidades, garantizando que todas las extremidades en cualquiera de las fases lleguen al mismo punto o altura que sus pares. Por otro lado, para el grado de libertad uno, se tiene dos posibles valores, uno para realizar la protracción (*protrac*) y otro para la retracción (*retrac*), de igual forma para mantener una simetría en el movimiento de las extremidades. (Nota: $retrac = -protrac$).

El fin y uso del diseño de este patrón de locomoción está dado únicamente para realizar movimientos en línea recta, logrando así mover al robot a nuevas posiciones en la superficie. El desplazamiento que logra el robot con dicho patrón no es controlado en base a la distancia deseada de movimiento, el robot se desplaza tanto como la

secuencia de movimiento lo permita en el número de ciclos definido para el patrón de locomoción en general.

Se tienen las Tablas 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 para definir los movimientos de este patrón, en base a lo programado para la rutina del MCPL que le define:

Tabla 6.2: Tabla 1 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de gateo trípode de desplazamiento en línea recta

Grado de libertad	Fase de movimiento	
	FASE 0	FASE 1
GLD n	Parámetros	
GLD 1	[(1,2,3,4,5,6);(3);(0)]	[(1,3,5);(2);(protrac,0,retrac)]
GLD 2	[(1,2,3,4,5,6);(3);(land2)]	[(1,3,5);(3);(rise2)]
GLD 3	[(1,2,3,4,5,6);(3);(land3)]	[(1,3,5);(3);(rise3)]

Tabla 6.3: Tabla 2 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de gateo trípode de desplazamiento en línea recta

.Fase 2	Fase 3	Fase 4
.[N/A]	[(1,3,5);(2);(0,ptrac,0)]	[(2,4,6);(2);(0,rtrac,ptrac)]
.[(1,3,5);(3);(land2)]	[(2,4,6);(3);(rise2)]	[(2,4,6);(3);(land2)]
.[(1,3,5);(3);(land3)]	[(2,4,6);(3);(rise3)]	[(2,4,6);(3);(land3)]

Tabla 6.4: Tabla 3 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de gateo trípode de desplazamiento en línea recta

.Fase 5	Fase 6*	Fase 7*
.[(2,4,6);(2);(rtrac,0,0)]	[(1,3,5);(2);(0,0,0)]	[(2,4,6);(2);(0,0,0)]
.[(2,4,6);(3);(rise2)]	[(1,3,5);(3);(land2)]	[(2,4,6);(3);(rise2)]
.[(2,4,6);(3);(rise3)]	[(1,3,5);(3);(land3)]	[(2,4,6);(3);(rise3)]

Tabla 6.5: Tabla 4 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de gateo trípode de desplazamiento en línea recta

.Fase 8*	Fase 0 (fin)
.[N/A]	[(1,2,3,4,5,6);(3);(0)]
.[(2,4,6);(3);(land2)]	[(1,2,3,4,5,6);(3);(land2)]
.[(2,4,6);(3);(land3)]	[(1,2,3,4,5,6);(3);(land3)]

Las fases de movimientos indicadas como Fase i^* , representan las fases de finalización de locomoción, es decir, si se ejecutan dos ciclos de movimiento para este patrón de locomoción en específico se tiene que la secuencia a ejecutar sería: Fase 0, Fase 1, Fase 2, Fase 3, Fase 4, Fase 5, Fase 1, Fase 2, Fase 3, Fase 4, Fase 5, Fase 6*, Fase 7*, Fase 8* y por último la Fase 0; con esto se define que la secuencia cíclica del movimiento del robot para este patrón de locomoción en particular está dada por las fases 1,2...5, finalizando con las fases 6,7,8 y 0, siendo la Fase 0 también la de inicio.

Con esta secuencia de movimientos diseñada, queda definir cuáles serán los valores de *protrac*, *retrac*, *rise2*, *rise3*, *land2* y *land3*, que han sido dejados a conveniencia paramétricamente para poder observar el desempeño de diversas configuraciones de estos para el robot. Con distintos arreglos de estos parámetros se pueden modificar características del robot, como su altura, desplazamiento obtenido por ciclo y por ende la velocidad de movimiento.

Escenario 1

Se definen los valores para el MCPL como del patrón de locomoción trípode versión 1, escenario 1 en la Tabla 6.6:

Tabla 6.6: Parámetros MCPL gateo trípode V1 Escenario 1

Parámetro	Valor (grados)
<i>protrac</i>	30
<i>retrac</i>	-30
<i>land2</i>	20
<i>land3</i>	-25
<i>rise2</i>	15
<i>rise2</i>	-15

Obteniendo como primer resultado a analizar, la evolución de los polígonos de apoyo desarrollada por este patrón de locomoción, para un solo ciclo. Ver Figura 6.14, 6.15, 6.16 y 6.17

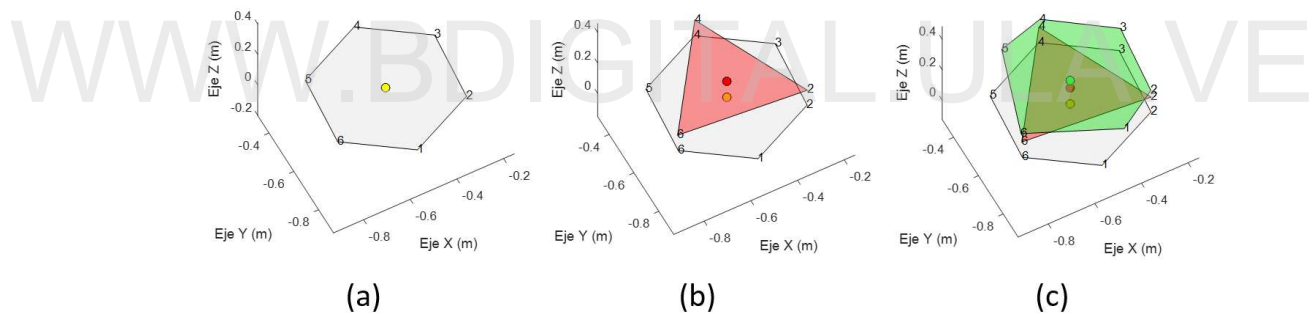


Figura 6.14: Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para gateo trípode versión 1, escenario 1. (a) Fase 0, (b) Fase 1, (c) Fase 2. Fuente: Propia

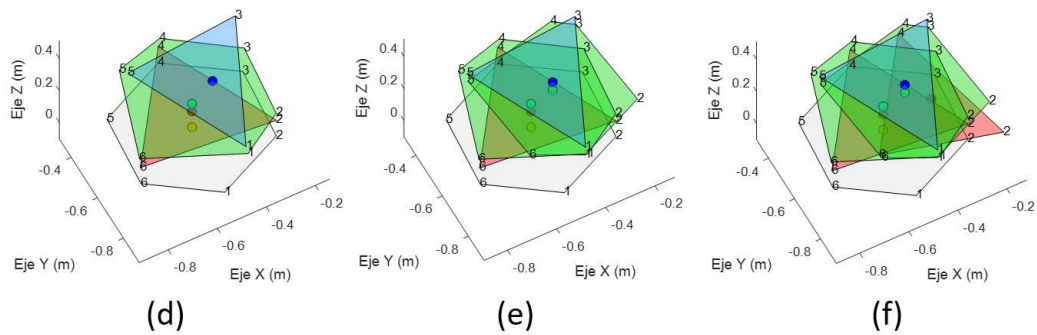


Figura 6.15: Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para ganeo trípode versión 1, escenario 1. (d)Fase 3, (e)Fase 4, (f)Fase 5 Fuente: Propia

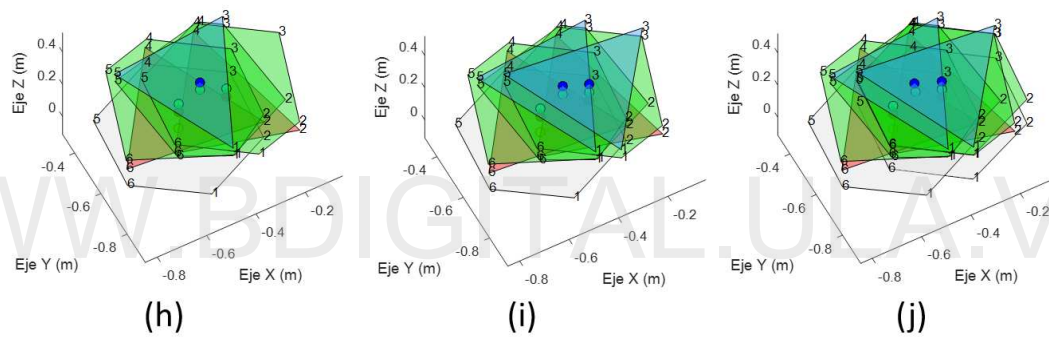


Figura 6.16: Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para ganeo trípode versión 1, escenario 1. (h)Fase 6*, (i)Fase 7*, (j)Fase 8* . Fuente: Propia

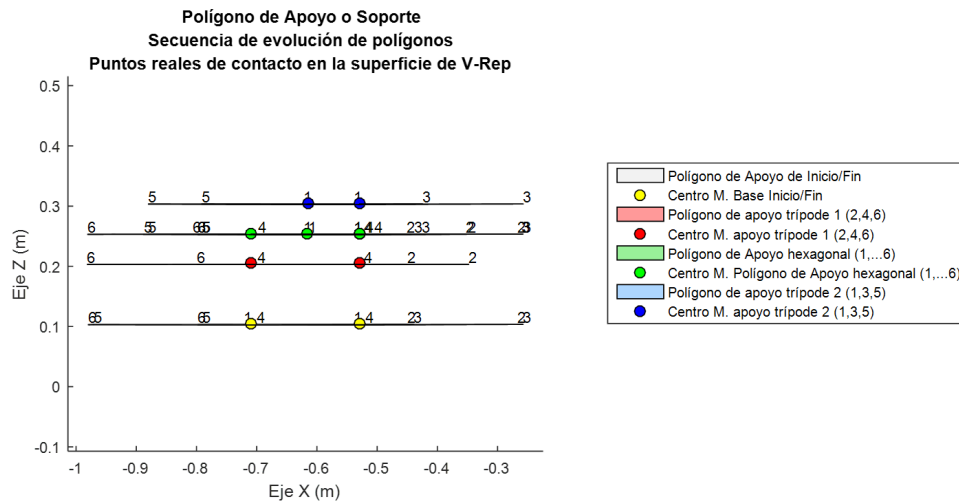


Figura 6.17: Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para gateo trípode versión 1, plano ZX. Fuente: Propia

Con las posiciones de apoyo bien diseñadas es posible lograr la ejecución del patrón de locomoción, para un gateo trípode en línea recta como lo demuestra su evolución de polígonos de apoyo. Un análisis más detallado se puede apreciar en las gráficas de la Figura 6.17, donde con cada paso de la secuencia de movimiento se puede observar cómo se va desplazando el centro de masa del robot, generando así un desplazamiento cuantificable. De acuerdo al desplazamiento de la base se procede a observar las gráficas de desempeño de dicho patrón. Se tienen las gráficas de la Figura 6.18. En la Figura 6.18(a), se tiene la trayectoria dibujada por el centro de masa del robot, así como la distancia en línea recta total recorrida por este; respecto al tiempo de ejecución de dicho patrón de locomoción es posible obtener la velocidad promedio de 0.00307 m/seg, y un recorrido en línea recta de 0.1818 m. Respecto a la gráfica de la figura 6.18(b), se puede notar que el patrón de locomoción durante su ejecución no varió de manera considerable su giro respecto al eje Z, lo que reafirma un diseño correcto de la secuencia de movimiento de las extremidades.

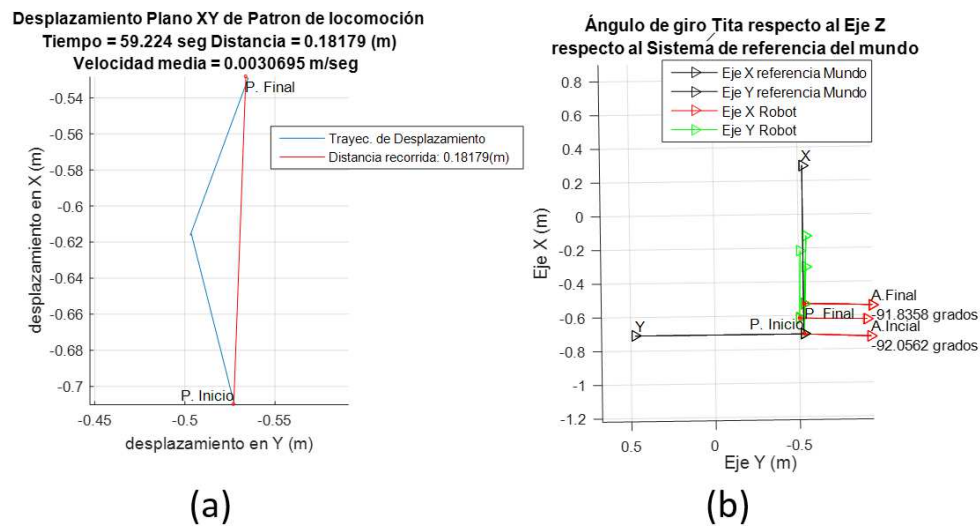


Figura 6.18: Gráficas de desempeño del patrón de locomoción trípede de línea recta versión 1, escenario 1, (a) Gráfica de desplazamiento en plano XY (b) Gráfica de desplazamiento y giro en torno al eje Z, plano XY. Fuente: Propia

A modo de prueba se procede a desarrollar el patrón de locomoción versión 1, con los mismos parámetros del escenario 1 para el MCPL para 2 ciclos y para 5 ciclos a fin de obtener una medida comparativa entre la ejecución de ciclos de ejecución concatenados del patrón del locomoción. Se tiene la siguiente secuencia de evolución de polígonos y de desplazamiento del centro de masa del robot. Para poder apreciar una gráfica sin saturación de polígonos se elimina el polígono de apoyo hexagonal de las gráficas de evolución de polígonos. Se tienen las gráficas de las Figuras 6.19 y 6.20.

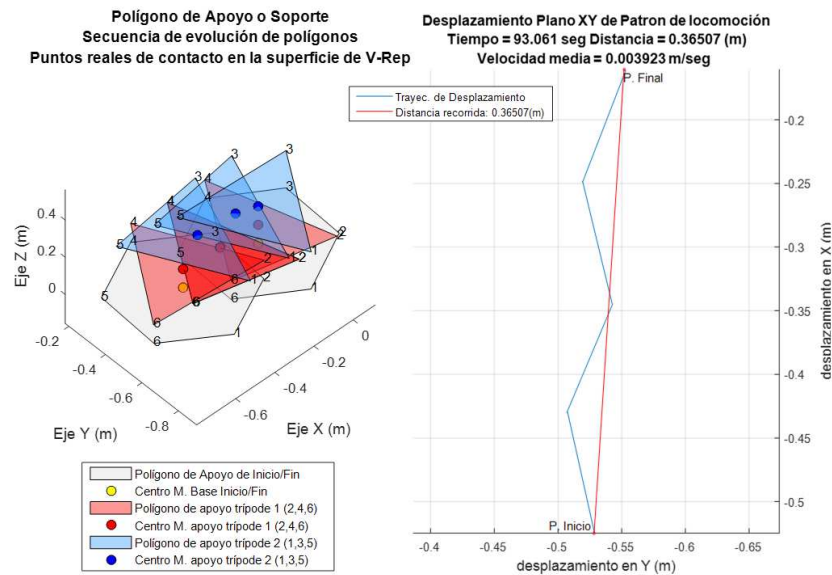


Figura 6.19: Gráficas de desempeño del de locomoción tripode de línea recta versión 1, para dos ciclos. Fuente: Propia

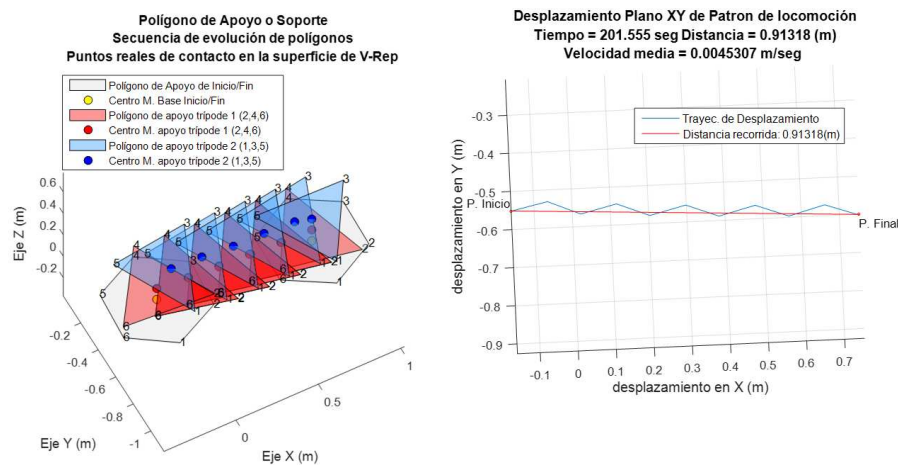


Figura 6.20: Gráficas de desempeño del patrón de locomoción tripode de línea recta versión 1, para cinco ciclos. Fuente: Propia

Con estas pruebas realizadas se puede formar la Tabla comparativa 6.7, en base a la variación del desempeño según el número de ciclos, para analizar el funcionamiento del patrón de locomoción.

Tabla 6.7: Tabla comparativa de desempeño según el número de ciclos para patrón de locomoción de gateo trípedo con valores del MCPL escenario uno.

Escenario	Núm. ciclos	Distancia (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/s)	Distancia/ciclo	Desv. θ_z (grados)
MCPL V1	1	0.1818	59.240	0.00307	0.1818	0.2204
MCPL V1	2	0.3651	93.061	0.003923	0.18253	1.0235
MCPL V1	5	0.9132	201.550	0.00453	0.18263	2.2988
MCPL V1	15	2.7310	566.182	0.00482	0.1820	0.4050

En la Tabla 6.7, se puede apreciar que existe una variación considerable respecto a la velocidad promedio de desplazamiento en línea recta entre la ejecución de patrones de locomoción con un número reducido de ciclos, esto se debe a que se toma en consideración el tiempo para finalizar la ejecución del patrón de locomoción en las fases 8* y 0, que es de aproximadamente 20 segundos, dependiendo de las velocidades asignadas a los motores. La distancia recorrida por ciclo se mantiene fija, con ligeras variaciones que pueden ser despreciadas. Por último, el ángulo de giro o desviación respecto al eje Z, para los casos de un número de ciclos reducido, se tiene el indicio de que se pueda estar ejecutando de manera errada el patrón de locomoción, pero luego de ejecutar más ciclos dicho patrón de manera repetida, se tiene que este error se debe a reacciones respecto al roce de las extremidades en ciertos puntos de la superficie de simulación en la cual se ejecuta el patrón de movimiento, de igual forma, el valor puede ser despreciado como se observa según el resultado para 15 ciclos.

Dado el desempeño y funcionamiento correcto de este patrón de locomoción, se procede a modificar los valores del MCPL para el gateo trípedo para observar las variaciones entre las posibles configuraciones que puede tomar el robot para desplazarse con un mismo esquema de movimiento. Se procede a mantener la velocidad de los controladores, modificando solo los parámetros de *rise2* y *rise3* que influyen directamente en la altura alcanzada por la base del robot. Dado que a menor brazo de giro se espera obtener menos desplazamiento por ciclo; el beneficio de este tipo de modificaciones se ve reflejado en ejecuciones de patrones de locomoción concatenados. Se plantean los siguientes escenarios para los valores MPCL:

- *MPCL escenario 0:*

$protrac = 30$ grados, $retrac = -30$ grados, $rise2 = 10$ grados, $rise3 = 0$ grados, $land2 = 10$ grados, $land3 = -10$ grados, $Ciclos = 15$.

- *MPCL escenario 1:*

$protrac = 30$ grados, $retrac = -30$ grados, $rise2 = 15$ grados, $rise3 = -15$ grados, $land2 = 20$ grados, $land3 = -25$ grados, $Ciclos = 15$.

- *MPCL escenario 2:*

$protrac = 30$ grados, $retrac = -30$ grados, $rise2 = 45$ grados, $rise3 = -45$ grados, $land2 = 60$ grados, $land3 = -30$ grados, $Ciclos = 15$.

- *MPCL escenario 3:*

$protrac = 30$ grados, $retrac = -30$ grados, $rise2 = 75$ grados, $rise3 = -15$ grados, $land2 = 89$ grados, $land3 = 0$ grados, $Ciclos = 15$.

Se obtiene la Tabla 6.8, para apreciar los resultados de las pruebas realizadas para cada escenario del MPCL.

Tabla 6.8: Comparación entre diferentes valores de operacion del MCPL para patrón de locomoción de gateo trípede versión 1

Escenario	Núm. ciclos	Distancia (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/s)	Distancia/ciclo	Desv. θ_z (grados)	Altura C.M Base (m)
MPCL Esc. 0	15	2.998	514.400	0.00580	0.1999	2.3	0.1212
MPCL Esc. 1	15	2.731	566.182	0.00482	0.1820	2.3	0.1705
MPCL Esc. 2	15	1.426	583.646	0.00244	0.095	3.8	0.2400
MPCL Esc. 3	15	0.9155	570.303	0.0016	0.0610	4.1	0.2496

Dado estos resultados de la Tabla 6.8, se puede observar que son diversas variaciones de los ángulos de operación para los dos últimos grados de libertad influyen de manera directa en el desempeño de cada patrón de locomoción, lo que da la característica de alcanzar, por ejemplo, diversas alturas de la base, realizar movimientos más finos o lograr una velocidad considerable. Tomando solo en cuenta la variación de los ángulos de operación, es posible cambiar el desempeño, pero se puede mejorar en base al diseño de distintos controladores que hagan más lento o más rápido el movimiento de los motores.

6.5.2 Giro en torno al eje base del robot

Otro movimiento esencial a diseñar para poder desplazarse sobre una superficie plana, es el de girar la base del robot respecto a su propio eje. A pesar de que el robot está diseñado para ser capaz de realizar movimientos omnidireccionales, puede que sea necesario girar la base para poder orientar la posición de una extremidad respecto a algún objetivo o punto en el espacio. Como se demuestra con el patrón de locomoción de gateo trípode para desplazamientos en línea recta, el avance del centro de masa del robot depende mucho de la altura que se logre alcanzar con la base respecto a los valores angulares asignados para los grados de libertad dos y tres; comportamientos similares son observados para el caso particular de patrones de locomoción al momento de realizar giros, mientras mayor es el grado de apertura de la extremidad respecto al cuerpo mayor es el giro logrado para cada de protracción o retracción.

Para realizar giros respecto al eje Z del robot alineado con su base, se procede a mantener de igual forma tres extremidades como base estable y tres extremidades en la fase de balanceo para alcanzar las nuevas posiciones.

Dada la simetría radial de la estructura del robot en la disposición de sus extremidades, los giros pueden ser realizados de diversas formas. Se procede a plantear el diseño de dos tipos de giro, contrastando su uso respecto a la cantidad de desplazamiento angular que le aportan a la estructura.

Patrón de locomoción para giro en un tiempo

Partiendo del hecho de tener una base estable en cada paso de la secuencia de locomoción a diseñar, se hace uso de la analogía de movimiento de extremidades utilizado para el desplazamiento trípode en línea recta, a diferencia de que ahora no se pretende generar desplazamiento longitudinal del centro de masa si no rotacional respecto al eje Z de este. Respecto al nombre de giro en un tiempo, se define así por el hecho de utilizar un solo giro conjunto de uno de los triángulos de apoyo para rotar el centro de masa de la estructura, bien sea el polígono formado por las extremidades (1,3,5) o por el (2,4,6). Se proponen en las Tablas 6.9 6.10 la definición de los valores

para generar el movimiento del robot.

Tabla 6.9: Tabla 1 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de giro en un tiempo

.Fase 0	Fase 1*	Fase 2*
.[(1,2,3,4,5,6);(3);(0)]	[(2,4,6);(3);(giro)]	[N/A]
.[(1,2,3,4,5,6);(3);(land2)]	[(1,3,5);(3);(rise2)]	[(1,3,5);(3);(land2)]
.[(1,2,3,4,5,6);(3);(land3)]	[(1,3,5);(3);(rise3)]	[(1,3,5);(3);(land3)]

Tabla 6.10: Tabla 2 de Definición de movimientos para patrón de locomoción de giro en un tiempo

.Fase 3*	Fase 4*	Fase 0
.[(2,4,6);(3);(0)]	[N/A]	[(1,2,3,4,5,6);(3);(0)]
.[(2,4,6);(3);(rise2)]	[(2,4,6);(3);(land2)]	[(1,2,3,4,5,6);(3);(land2)]
.[(2,4,6);(3);(rise3)]	[(2,4,6);(3);(land3)]	[(1,2,3,4,5,6);(3);(land3)]

Donde las fases i^* , representan fases cíclicas para el MCPL y se pueden ejecutar tantas veces como sea necesario. Los valores de *land2*, *land3*, *rise2* y *rise3* representan los valores de operación al igual que para el patrón de locomoción trípode; el valor de *giro* hace las fases ángulo de giro a generar por las extremidades, es de manera similar el valor *protrac* de los patrones de locomoción de giro, este valor es el asignado a las articulaciones de los grados de libertad uno para generar la rotación de la base mediante las extremidades que hacen contacto con la superficie.

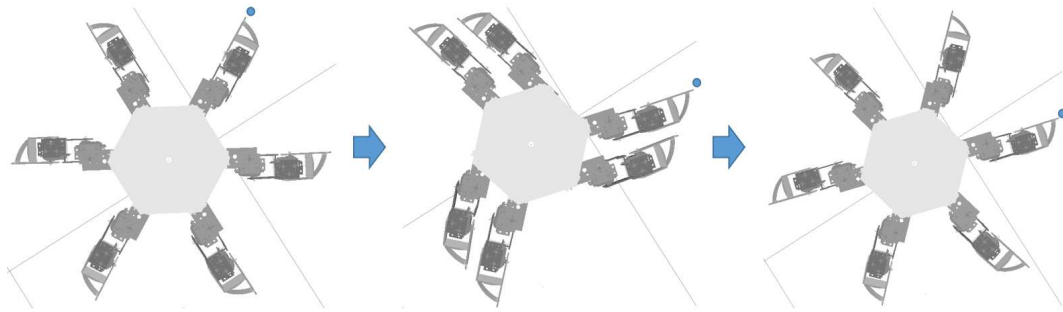


Figura 6.21: Secuencia de desarrollo de giro en un tiempo para el mímico en *V-rep*

Fuente: Propia

Se procede a demostrar la secuencia de evolución de polígonos de apoyo formados por las extremidades durante la ejecución de este patrón de locomoción. Para esto se asigna un primer escenario de parámetros para el MCPL, denominado MCPL escenario 0, para este patrón de locomoción, definido por la Tabla 6.11.

Tabla 6.11: Parámetros MCPL giro en un tiempo escenario 1

Parámetro	Valor (grados)
<i>giro</i>	60
<i>land2</i>	15
<i>land3</i>	-15
<i>rise2</i>	10
<i>rise2</i>	-10

Se tiene la siguiente evolución de polígonos de apoyo, para el patrón de locomoción para el MCPL de giro en un tiempo, con los parámetros de la Tabla 6.11.

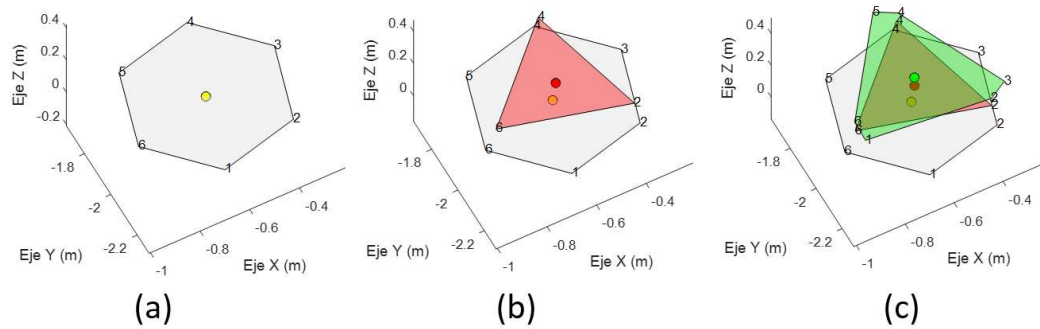


Figura 6.22: Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para giro de base en un tiempo, escenario 1. (a) Fase 0, (b) Fase 1*, (c) Fase 2*. Fuente: Propia

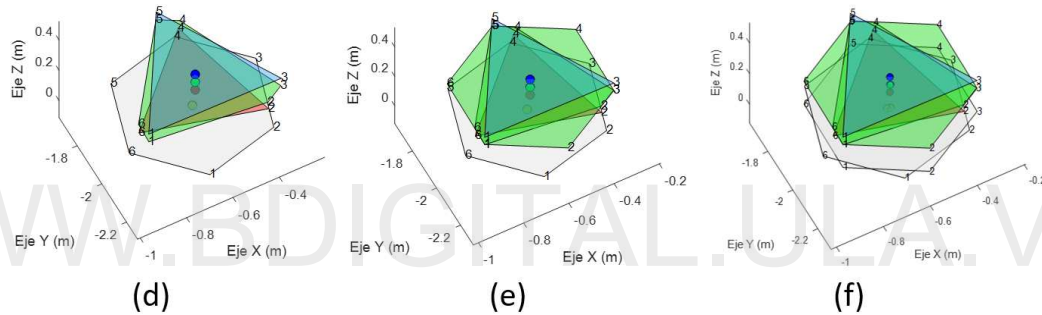
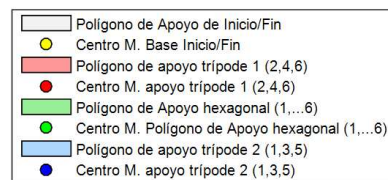
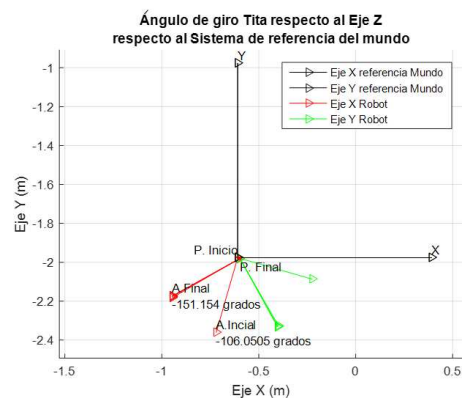


Figura 6.23: Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para giro de base en un tiempo, escenario 1. (d) Fase 3*, (e) Fase 4*, (f) Fase 0. Fuente: Propia



(h)



(i)

Figura 6.24: (h) Leyenda de polígonos de evolución para giro en un tiempo escenario 1, (i) Gráfica representativa de giro en eje Z por el robot. Fuente: Propia

Mediante las gráficas de las Figuras 6.22, 6.23 y 6.24 se puede apreciar cómo evoluciona el patrón de locomoción para realizar el giro en un tiempo, siempre conservando una base estable formada por polígonos de tres y seis puntos durante su desarrollo. En la Figura 6.24, se puede observar que en los patrones seleccionados para el escenario cero del MCPL se logra un giro total de aproximadamente 45 grados para la posición de movimiento de las extremidades; a modo de comparación se procede a crear nuevos escenarios para el MCPL para probar la variación la posible cantidad angular a girar si se modifica la altura del robot respecto a los valores angulares asignados a los dos últimos grados de libertad de las extremidades.

Manteniendo los valores angulares para los servomotores dos y tres de los escenarios de gateo trípode versión 1, se procede a comparar el resultado de desempeño en la ejecución de cada patrón de locomoción para los valores específicos de parámetros del MCPL. La Tabla 6.12.

Tabla 6.12: Tabla de parámetros para los diferentes escenarios de ejecución para el MCPL

Escenario	Giro (grados)	<i>rise2</i>	<i>rise3</i>	<i>land2</i>	<i>land3</i>
MCPL Esc. 0	60	10	0	10	-10
MCPL Esc. 1	60	15	-15	20	-25
MCPL Esc. 2	60	45	-45	60	-30
MCPL Esc. 3	60	75	-15	89	0

Ejecutando solo un ciclo de giro se tiene la Tabla 6.13.

Tabla 6.13: Desempeño para patrón de locomoción de giro en un tiempo, para varios parámetros del MCPL

Escenario 0	Giro θ_z (grados) obtenido	tiempo (seg)	Error desplazamiento horizontal (m)
MCPL Esc. 0	44.241	24.605	0.01282
MCPL Esc. 1	43.480	28.960	0.01102
MCPL Esc. 2	34.0	33.639	0.00542
MCPL Esc. 3	28.30	32.75	0.0052

Con estos resultados se puede apreciar como varia el giro total logrado respecto a las posiciones que adoptan las extremidades en los grados de libertad dos y tres. A menor altura o valores angulares asignados a las articulaciones dos y tres se lograr obtener más cantidad de giro, respecto al valor asignado para el grado de libertad uno.

6.5.3 Patrón de locomoción para giro en dos tiempos

Al igual que con la ejecución del patrón de locomoción para giros en un tiempo, en el giro de dos tiempos se hace uso de las características de polígonos trípodes estables utilizadas por el patrón de locomoción de movimiento en línea recta, basándose en polígonos triangulares de apoyo para hacer girar el centro de masa del robot respecto a la posición en la superficie de sus extremidades de contacto. El término giro en dos tiempos, se refiere a que se realiza un giro respecto a la base con cada uno de los dos posibles polígonos de apoyo a formar, es decir, teniendo las extremidades alienadas respecto a su eje de referencia para el grado de libertad uno, se realiza un giro inicialmente con el triángulo formado por las extremidades (2,4,6) y luego con las extremidades que forman el polígono (1,3,5) se realiza el giro siguiente, permitiendo aprovechar aproximadamente el rango completo de funcionamiento de cada servomotor acoplado a la coxa para girar la base del robot.

Se procede a describir las fases de movimientos para la ejecución de este patrón de locomoción. Se tienen las Tablas 6.14, 6.15 y 6.16.

Tabla 6.14: Definición de movimientos para patrón de locomoción de giro en dos tiempos

.Fase 0	Fase 1*	Fase 2*
.[(1,2,3,4,5,6);(3);(0)]	[(2,4,6);(2);(giro)]	[N/A]
.[(1,2,3,4,5,6);(3);(land2)]	[(1,3,5);(3);(rise2)]	[(1,3,5);(3);(land2)]
.[(1,2,3,4,5,6);(3);(land3)]	[(1,3,5);(3);(rise3)]	[(1,3,5);(3);(land3)]

Tabla 6.15: Definición de movimientos para patrón de locomoción de giro en dos tiempos

.Fase 3*	Fase 4*	Fase 5*
.[(1,3,5);(2);(giro)]	[(2,4,6);(2);(0)]	[(1,3,5);(2);(0)]
.[(2,4,6);(3);(rise2)]	[(2,4,6);(3);(land2)]	[(1,3,5);(3);(rise2)]
.[(2,4,6);(3);(rise3)]	[(2,4,6);(3);(land3)]	[(1,3,5);(3);(rise3)]

Tabla 6.16: Definición de movimientos para patrón de locomoción de giro en dos tiempos

.Fase 0
.[(1,2,3,4,5,6);(2);(0)]
.[(1,2,3,4,5,6);(3);(land2)]
.[(1,2,3,4,5,6);(3);(land3)]

De donde en esta secuencia de movimientos, las fases denotadas como i^* , representan las fases cíclicas del patrón de locomoción. Se mantienen los valores paramétricos de la posición de operación de los servomotores, a fin de poder asignarlos o modificarlos en caso de ser necesario. Para tener una idea general del movimiento de la estructura o del mímico implementado en *V-rep*, se tiene la siguiente secuencia de movimientos de la Figura 6.25.

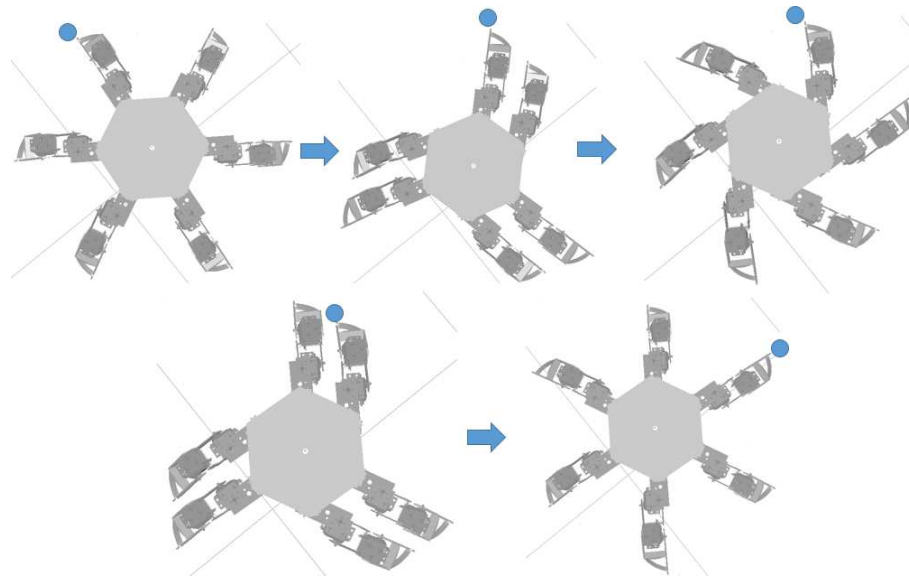


Figura 6.25: Secuencia de movimientos para patron de locomoción de giro en dos tiempos. Fuente: Propia

Utilizando los mismos parámetros de operación del MCPL para el escenario 1 del giro en un tiempo, se tiene la Tabla 6.17 para generar la secuencia de evolución de polígonos de apoyo para el patrón de locomoción de giro en dos tiempos.

Tabla 6.17: Parámetros MCPL giro en dos tiempo escenario 1

Parámetro	Valor (grados)
<i>giro</i>	60
<i>land2</i>	15
<i>land3</i>	-15
<i>rise2</i>	10
<i>rise2</i>	-10

Obteniendo la siguiente secuencia de polígonos en las gráficas de la Figuras 6.26, 6.27 y 6.28.

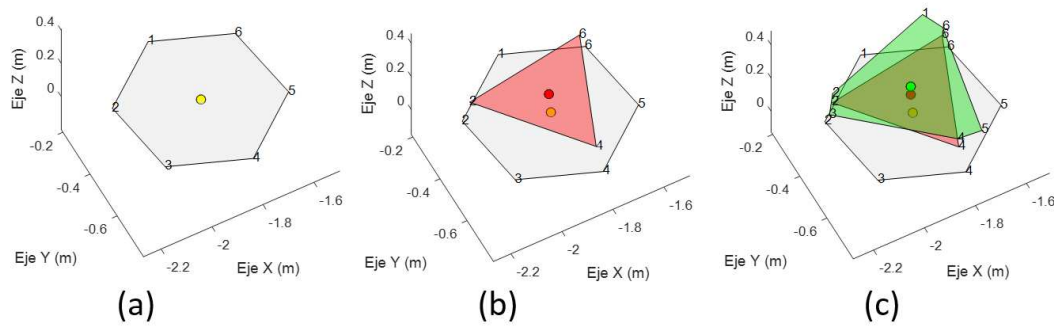


Figura 6.26: Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para giro de base en dos tiempos, escenario 1. (a) Fase 0, (b) Fase 1*, (c) Fase 2*. Fuente: Propia

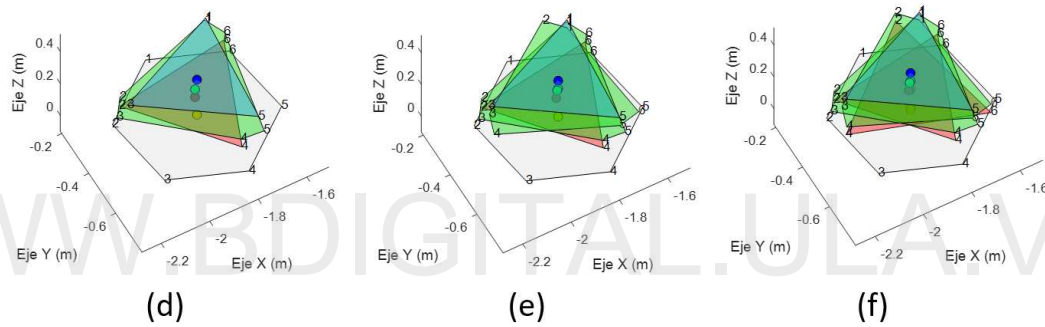


Figura 6.27: Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para giro de base en dos tiempos, escenario 1. (d) Fase 3*, (e) Fase 4*, (f) Fase 5*. Fuente: Propia

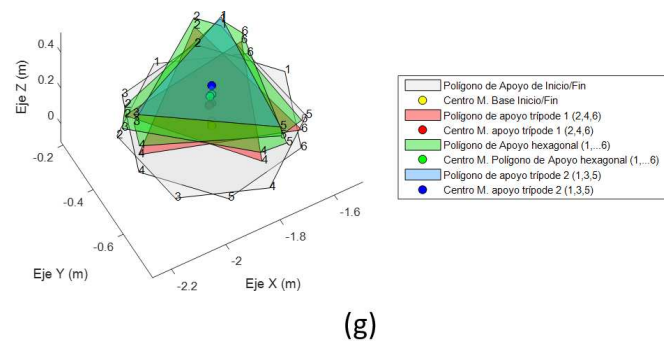


Figura 6.28: Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para giro de base en dos tiempos, escenario 1. (g) Fase 0 final. Fuente: Propia

Con esto se demuestra que el patrón de locomoción logra ejecutarse de manera correcta. Ahora se procede a utilizar los mismos escenarios para los parámetros del

MCPL que en el giro en un tiempo, para demostrar el desempeño del patrón de locomoción de giro en dos tiempos. Se tiene la Tabla 6.18

Tabla 6.18: Tabla de parámetros para los diferentes escenarios de ejecución para el MCPL del patrón de locomoción de giro en dos tiempos

Escenario	Giro (grados)	<i>rise2</i>	<i>rise3</i>	<i>land2</i>	<i>land3</i>
MCPL Esc. 0	60	10	0	10	-10
MCPL Esc. 1	60	15	-15	20	-25
MCPL Esc. 2	60	45	-45	60	-30
MCPL Esc. 3	60	75	-15	89	0

Ejecutando los movimientos en el robot implementado en *V-rep*, se obtienen los resultados de la Tabla 6.19.

Tabla 6.19: Desempeño para patrón de locomoción de giro en un tiempo, para varios parámetros del MCPL

Escenario 0	Giro θ_z (grados) obtenido	tiempo (seg)	Error desplazamiento horizontal (m)
MCPL Esc. 0	86.64	38.691	0.0223
MCPL Esc. 1	85.85	44.418	0.0186
MCPL Esc. 2	68.59	47.952	0.0131
MCPL Esc. 3	54.81	45.903	0.0124

Con los resultados de la Tabla 6.19, se puede apreciar cómo varia, el ángulo total de giro obtenido respecto al eje Z, de igual forma que para el patrón de locomoción de giro en un tiempo; a mayor altura de las extremidades menor giro y viceversa, aspectos a tener en cuenta para el uso giro con estas rutinas de movimiento.

6.5.4 Patrón de locomoción para caminata lateral o caminata de tipo cangrejo

Morfológicamente los cangrejos cuentan con ocho extremidades a diferencia de las seis de los insectos, pero los patrones de locomoción desarrollados por estos invertebrados

pueden llegar a ser muy ventajosos al momento de desplazarse por el terreno. Al igual que los insectos, su método de desplazamiento se basa en múltiples puntos de contacto discreto con la superficie, a diferencia que las extremidades suelen estar alineadas a los laterales del cuerpo o centro de masa. Esta posición de las extremidades puede ser útil si se presenta la ocasión de desplazarse por entornos donde el camino o trayectoria a seguir presenta espacios reducidos, por lo que se propone el diseño de un patrón de locomoción que utilice una distribución de las extremidades por las que está formado el prototipo.

Para este patrón de locomoción se distribuyen las extremidades de tal forma que los apéndices uno y cuatro definen los laterales de la estructura, desplazándose en sentido al que apunta la primera extremidad. Para efectuar el movimiento de la estructura no se utiliza movimiento del motor de la coxa o servomotor uno, sino que se hace uso de elevaciones de las extremidades, de tal forma que solo impulsan el movimiento mediante los motores dos y tres de todas las extremidades. Para tener una idea del desarrollo de este patrón de locomoción se puede observar la Figura 6.29.

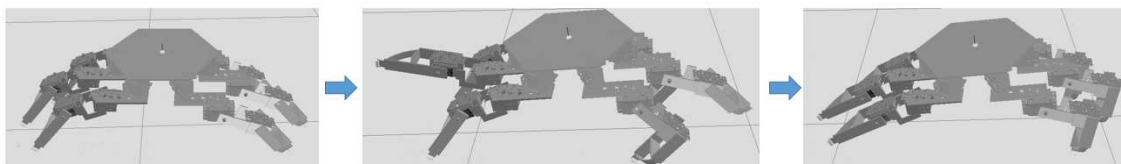


Figura 6.29: Secuencia de evolución de patrón de locomoción para caminata tipo cangrejo. Fuente: Propia

Para este patrón de locomoción se definen los parámetros descritos en la Tabla 6.20, para el MCPL.

Tabla 6.20: Descripción de parámetros utilizados para el patrón de locomoción
Crab-Walking o caminata tipo cangrejo

Parámetro	Significado	valor para MCPL (grados)
<i>land2</i>	Valor para hacer contacto con la superficie de GLD 2	20
<i>land3</i>	Valor para hacer contacto con la superficie de GLD 3	-30
<i>rise2</i>	Valor para hacer levantar el contacto con la superficie de GLD 2	15
<i>rise3</i>	Valor para hacer levantar el contacto con la superficie de GLD 2	-15
<i>protract2</i>	Valor de impulso de avance para servomotor 2	5
<i>protract3</i>	Valor de impulso de avance para servomotor 3	-85
<i>retract2</i>	Valor de regreso de servomotor 2	-35
<i>retract3</i>	Valor de regreso de servomotor 3	0
<i>lift2</i>	Valor utilizado para levante ligero de la extremidad en servomotor 2	5
<i>lift3</i>	Valor utilizado para levante ligero de la extremidad en servomotor 3	0
<i>grnd2</i>	Valor para servomotor 2 para fase 7* de movimiento	40
<i>grnd3</i>	Valor para servomotor 3 para fase 7* de movimiento	-30

Se tiene la descripción de cada una de las fases de movimiento para este patrón de locomoción en las Tablas 6.21, 6.22, 6.23, 6.24, 6.25, 6.26 y 6.27.

Tabla 6.21: Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo

.Fase 1	Fase 2	Fase 3
[(2,6);(-60,60);(2)]	[(2,6);(-60,60);(2)]	[(3,5);(-60,60);(2)]
[(2,6);(rise2);(3)]	[(2,6);(land2);(3)]	[(3,5);(rise2);(3)]
[(2,6);(rise3);(3)]	[(2,6);(nad3);(3)]	[(3,5);(rise3);(3)]

Tabla 6.22: Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo

.Fase 4	Fase 5*
[(N/A)]	[(N/A)]
[(3,5);(land2);(3)]	[(1,2,6,3,4,5);(3);(land2)]
[(3,5);(land3);(3)]	[(1,2,6,3,4,5);(3);(protract3,protract3,protract3,retract3,retract3, retract3)]

Tabla 6.23: Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo

.Fase 6*	Fase 7*	Fase 8*
[(N/A)]	[(N/A)]	[(N/A)]
[(1,3,5);(3);(lift2,-20,-20)]	[(2,4,6);(3);(grnd2+10, lift2-20, grnd2+10)]	[(1,3,5);(3);(land2)]
[(1,3,5);(3);(lift3,-80,-80)]	[(2,4,6);(3);(protrac3, lift3, protrac3)]	[(1,3,5);(3);(land3)]

Tabla 6.24: Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo

.Fase 9*	Fase 10*	Fase 11*
[(N/A)]	[(N/A)]	[(N/A)]
[(4);(3);(-20)]	[(1);(3);(35)]	[(2,6);(3);(land2)]
[(4);(3);(-70)]	[(1);(3);(-60)]	[(N/A)]

Tabla 6.25: Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo

.Fase 12*	Fase 13*	Fase 14*
[(N/A)]	[(N/A)]	[(N/A)]
[(2,6);(3);(land2)]	[(2);(3);(0)]	[(1,4);(3);(land2)]
[(2,6);(3);(land3)]	[(3);(3);(-90)]	[(1,4);(3);(land3)]

Tabla 6.26: Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo

.Fase 17*	Fase 18*	Fase 19*
[(N/A)]	[(N/A)]	[(N/A)]
[(2,4,6);(3);(rise2)]	[(2,4,6);(3);(land2)]	[(1,3,5);(3);(rise2)]
[(2,4,6);(3);(rise3)]	[(2,4,6);(3);(land3)]	[(1,3,5);(3);(rise3)]

Tabla 6.27: Definición de movimientos para patrón de locomoción de tipo cangrejo

.Fase 20*
.[(N/A)]
.[(1,3,5);(3);(land2)]
.[(1,3,5);(3);(land3)]

Las fases descritas por Fase i*, son fases cíclicas dentro del MCPL, que se repiten tanto ciclos como se señale para ejecutar dicha forma de desplazamiento.

Se tiene la gráfica de los polígonos de apoyo válidos de la Figura 6.30, para hacer una comparación rápida respecto a los polígonos formados por los patrones de locomoción trípodas. Según los polígonos de apoyo válidos obtenidos, se observa que el polígono de contacto para las seis extremidades es de menor área y los desplazamientos son más cortos por ciclo a comparación del ganeo trípode normal. A pesar de denominarse caminata tipo cangrejo, el polígono de avance utilizados siempre es un triángulo, este es el modo más eficiente de realizar desplazamientos.

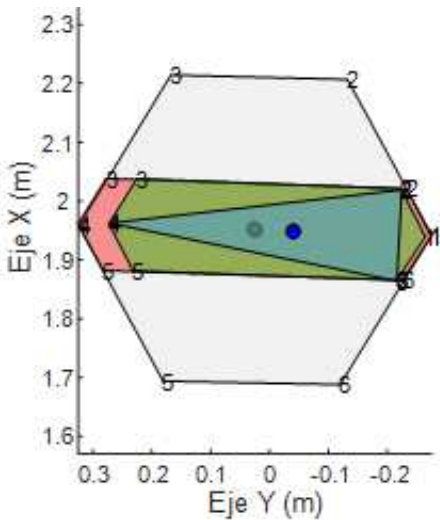


Figura 6.30: Secuencia de evolución de polígonos de apoyo para caminata trípode, hasta la fase 4 en la secuencia de movimientos.. Fuente: Propia

El patrón de locomoción descrito por la secuencia de movimientos previa, respecto

a los patrones de locomoción diseñados anteriormente para movimientos en línea recta tipo trípode y giros, presentan un poco más de complejidad en el movimiento dada la forma de desplazamiento. Al igual que todos los patrones de locomoción definidos parte de una posición inicial o Fase 0 y termina en esta también. Respecto a la velocidad y desempeño se tiene la Tabla 6.28, para tener una referencia de comparación entre los demás modos de desplazamiento; a diferencia del gateo trípode, este patrón de locomoción no posee escenarios de prueba dado a que los valores de sus parámetros son específicos para su funcionamiento, por tanto, solo se tiene una forma de ejecutar. Utilizando los parámetros descritos en las tabla de definición de movimiento, se procede a realizar dos pruebas respecto al número de ciclos para tener comparaciones similares en base a este parámetro.

Tabla 6.28: Desempeño del patrón de locomoción para caminata tipo cangrejo

Escenario	Núm. ciclos	Distancia (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/s)	Distancia/ciclo	Desv. θ_z (grados)	Altura C.M Base (m)
Prueba 1	5	0.6993	346.792	0.00202	0.13986	6	0.1770
Prueba 2	15	1.8558	969.865	0.00191	0.1237	8	0.1770

De esta forma, se tiene que es posible adoptar morfologías y configuraciones de las extremidades para lograr cumplir diferentes tareas, según sea necesario.

6.5.5 Patrón de locomoción cuádruple, modo de trabajo de doble extremidad

Como se desea que se cumpla la característica de diseño de poseer una estructura capaz de lograr utilizar una o dos de sus extremidades como herramientas, alcanzando puntos en el espacio de sus respectivas áreas de trabajo, se propone el diseño de un patrón de locomoción en el cual la estructura se apoye en solo cuatro extremidades, dando lugar a que se pueda tener libre control de dos extremidades de manera simultánea para poder hacer uso de estas a modo de herramienta conjunta, en caso de ser necesario. Se seleccionan dos extremidades contiguas, en este caso las extremidades dos y tres o b y c, a fin de designar las extremidades uno, cuatro, cinco y seis para brindar soporte y poder efectuar desplazamientos en la medida de lo posible.

Dicha base de apoyo lograda permite hacer uso tanto de la cinemática inversa como de la directa, a fin de lograr utilizar las extremidades que no tendrán contacto con la superficie, logrando así brindar la posibilidad de realizar tareas más complejas y añadiendo funcionalidad extra al robot. Definir el polígono de apoyo para lograr la estabilidad estática en una estructura que no dispone, en principio, de un diseño en el cual sus extremidades puedan formar un polígono de apoyo estable con geometría cuadrilátera, dada la disposición contigua de sus extremidades, es un reto de diseño al momento de lograr conseguir la posición correcta a la hora de posicionar los apéndices. Factores como el peso de las dos extremidades que no hacen contacto con la superficie pueden afectar la estabilidad de la estructura, dado que el centro de masa cambia radicalmente de posición. En respuesta a esto, haciendo referencia al estudio realizado por Zollikofer (1994b), donde estudia el desplazamiento y cambios de postura de una hormiga al cargar con objetos pesados con sus mandíbulas, se procede a diseñar las siguientes posiciones para las extremidades de soporte.

Para lograr un polígono de apoyo estable, que sea aceptado por el MCPL, conteniendo la proyección vertical del centro de masa en el área del polígono de apoyo, se procede a posicionar las extremidades de la forma como se indica en la Figura 6.31. Donde se parte de la posición original de inicio o fase 0, similar a la utilizada en los demás patrones de locomoción, como se muestra en la Figura 6.31(a), donde el polígono de apoyo logra de manera exacta contener la proyección del centro de masa sobre la superficie, pero no sería estable por el peso de la extremidades, por tanto, se procede a desplazar la extremidades uno y cuadro hasta una posición que permita extender hacia adelante el perímetro de cuadrilátero de apoyo, como se muestra en la Figura 6.31(b), brindando la posibilidad de formar el polígono de apoyo trípode mostrado en la Figura 6.31(c), necesario para poder coordinar secuencias para realizar desplazamientos sobre la superficie.

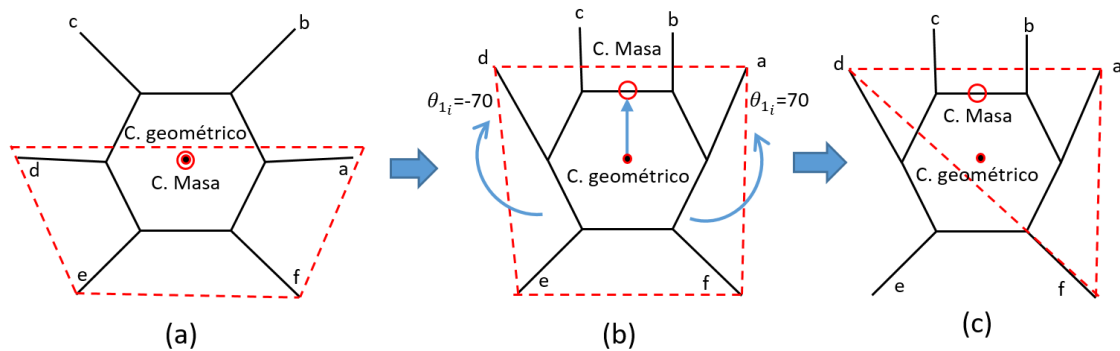


Figura 6.31: Redistribución de posiciones de extremidades, para formar polígono de apoyo estable cuadrilátero. Fuente: Propia

Realizando las pruebas pertinentes para determinar si dichas posiciones proporcionan estabilidad o no, se implementaron estas posiciones para determinar si la masa de las extremidades que no hacen contacto con la superficie afectaba la dinámica del movimiento, con resultados exitosos, en los cuales dicha posición sí proporciona la suficiente estabilidad para poder hacer uso de las extremidades dos y tres, o b y c, a modo de herramientas; se puede apreciar este resultado en la Figura 6.32, del mímico implementado en *V-rep*.

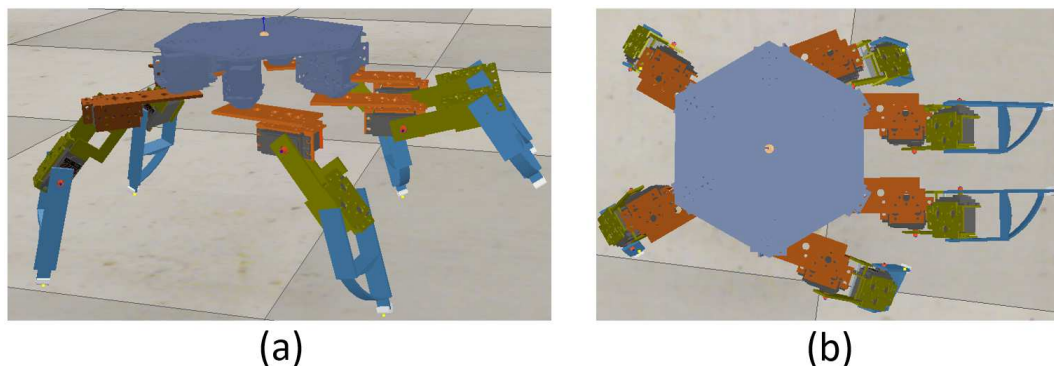


Figura 6.32: Prueba de soporte para la posición diseñada de la extremidades en polígono de apoyo cuádruple. (a) Vista lateral, (b) Vista superior. Fuente: Propia

Desplazamiento con cuatro extremidades

Con una posición de trabajo validada para estas extremidades asignadas a modo de herramientas, se procede a diseñar un patrón de locomoción que permita movilizar

la estructura, en caso de que se necesite desplazarse por la superficie con estas cuatro extremidades designadas para soporte. Se utilizan los valores de *land2*, *land3*, *rise2* y *rise3* para denotar los movimientos de los grados de libertad dos y tres para hacer contacto con la superficie, mientras que los valores asignados a los grados de libertad uno de cada extremidad son específicos del patrón de locomoción para mantener la estabilidad. El desplazamiento o movimiento de la estructura se realiza con el movimiento de la coxa, manteniendo un polígono de apoyo trípode en todo momento. Partiendo y finalizando el patrón de locomoción en la fase 0, al igual que los demás diseños, se tiene definidas las fases de movimiento para poder ejecutar este patrón de locomoción de caminata cuádruple mediante el MCPL, en las Tablas 6.29, 6.30, 6.31, 6.32, 6.33, 6.34, 6.35 y 6.36.

Tabla 6.29: Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple

.Fase 1	Fase 2	Fase 3
.[(2,4);(3);(30,-70)]	[(N/A)]	[(1,3);(2);(70,-30)]
.[(2,4);(3);(rise2)]	[(2,4);(3);(land2)]	[();();()]
.[(2,4);(3);(rise3)]	[(2,4);(3);(land3)]	[();();()]

Tabla 6.30: Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple

.Fase 4	Fase 5	Fase 6*
.[(N/A)]	[(2,3);(Vel. OP);(Mov. OP)]	[(6);(2);(55)]
.[(1,3);(3);(land2)]	[(2,3);(Vel. OP);(Mov. OP)]	[(6);(3);(rise2)]
.[(1,3);(3);(land3)]	[(2,3);(Vel. OP);(Mov. OP)]	[(6);(3);(rise3)]

Tabla 6.31: Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple

.Fase 7*	Fase 8*	Fase 9*
.[(N/A)]	[(1,4,6,5);(3);(45,-45,0,-55)]	[(N/A)]
.[(6);(3);(land2)]	[(5);(3);(rise2)]	[(5);(3);(land2)]
.[(6);(3);(land3)]	[(5);(3);(rise3)]	[(5);(3);(land3)]

Tabla 6.32: Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple

.Fase 10*	Fase 11*	Fase 12*
.[(6);(2);(55)]	[(N/A)]	[(4);(2);(-70)]
.[(6);(3);(rise2)]	[(6);(3);(land2)]	[(4);(3);(rise2)]
.[(6);(3);(rise3)]	[(6);(3);(land3)]	[(4);(3);(rise3)]

Tabla 6.33: Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple

.Fase 13*	Fase 14*	Fase 15*
.[(N/A)]	[(1);(2);(70)]	[(N/A)]
.[(4);(3);(land2)]	[(1);(3);(rise2)]	[(1);(3);(land2)]
.[(4);(3);(land3)]	[(1);(3);(rise3)]	[(1);(3);(land3)]

Tabla 6.34: Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple

.Fase 16*	Fase 17*	Fase 18*
.[(1,4,5,6);(2);(45,-45,0,55)]	[(N/A)]	[(5);(2);(-55)]
.[(6);(3);(rise2)]	[(6);(3);(land2)]	[(5);(3);(rise2)]
.[(6);(3);(rise3)]	[(6);(3);(land3)]	[(5);(3);(rise3)]

Tabla 6.35: Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple

.Fase 19*	Fase 20*	Fase 21*
.[(N/A)]	[(1);(2);(70)]	[(N/A)]
.[(5);(3);(land2)]	[(1);(3);(rise2)]	[(1);(3);(land2)]
.[(5);(3);(land3)]	[(1);(3);(rise3)]	[(1);(3);(land3)]

Tabla 6.36: Definición de movimientos para patrón de locomoción cuádruple

.Fase 22*	Fase 23*
.[(4);(2);(-70)]	[(N/A)]
.[(4);(3);(rise2)]	[(4);(3);(land2)]
.[(4);(3);(rise3)]	[(4);(3);(land3)]

Utilizando los valores de $land2 = 50$, $land3 = -25$, $rise2 = 40$ y $rise3 = -15$, para los parámetros del MCPL, se obtienen los siguientes resultados de desempeño para esta secuencia de movimiento para cinco y quince ciclos, reflejados en la Tabla 6.37.

Tabla 6.37: Desempeño del patrón de locomoción para caminata cuádruple

Escenario	Núm. ciclos	Distancia (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/s)	Distancia/ciclo	Desv. θ_z (grados)	Altura C.M Base (m)
Prueba 1	5	0.4832	641.384	0.000753	0.09664	7.2	0.2290
Prueba 2	15	1.3102	1861.865	0.000703	0.09336	11.6	0.2290

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Capítulo 7

Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones

7.1 Análisis de resultados

En base a la investigación realizada en la literatura y bibliografías disponibles, fue posible definir términos específicos utilizados a la hora de diseñar y describir los elementos de robots caminantes, en este caso específico robots del tipo hexápodos. Con este respaldo bibliográfico, fue posible utilizar con fundamento teórico cada uno de los términos para poder describir los componentes del robot, analogías, movimientos y modelos, que definen al robot hexápodo propuesto.

Gracias al análisis de las morfologías de los hexápodos presentes en la naturaleza, robots comerciales y desarrollados por instituciones de investigación, proyectos universitarios y aficionados, se logró conciliar el concepto de diseño de un robot funcional, en el que sus extremidades tienen una plasticidad amplia por estar conformada con tres grados de libertad cada una; el movimiento conjunto de estas permiten el posicionamiento adecuado de la plataforma o base del robot al momento de ejecutar cualquier patrón de locomoción, haciendo posible a su vez mantener la característica de estabilidad estática para brindarle un soporte seguro a la estructura.

Se logró un diseño de base funcional, de manera aislada, es decir, además servir de plataforma para el anclaje de las extremidades, la forma y el material seleccionados permiten el acople de diversas piezas necesarias para el funcionamiento autónomo futuro en caso de implementar el robot, como se muestra en la Figura 3.17 de prototipo construido en cartón a fin de acomodar y posicionar los componentes de mayores dimensiones tomando como referencia las medidas de la Figura 3.16; planos disponibles en el Apéndice A, pieza número 1.

Teniendo como guía la bio-inspiración, se seleccionó la posición de anclaje de las extremidades en la parte inferior de la estructura, como se denota en capítulo 3 sección 3.3, brindando así una ubicación correcta para lograr posicionar las extremidades en un rango amplio al momento de hacer contacto con superficie de desplazamiento, beneficiando directamente a la plasticidad de los posibles patrones de locomoción propuestos.

Respecto al material seleccionado, en caso de realizarse la futura implementación, el aluminio brinda la resistencia necesaria para lograr construcciones de este tipo de robots, con 3 mm de espesor en la lámina, se puede lograr construir estructuras rígidas y resistentes para poder obtener las piezas propuestas para el prototipo diseñado, logrando un peso que los servomotores logren soportar.

Tomando como punto de partida para el diseño de las extremidades, la bioinspiración y factores como los rangos de movilidad de las extremidades, las posiciones y orientaciones de las articulaciones, y los planos de acción de cada una de estas, respecto a los posibles movimientos realizados por extremidades de invertebrados. Se logró crear un diseño de extremidad con solo tres grados de libertad funcional, en donde cada articulación funciona como una articulación rotacional, con un solo grado de libertad. Gracias a esto se seleccionó para su implementación servomotores a modo de actuadores, logrando un grado de amplio rango de plasticidad, como el mostrado en la Figura 3.10, permitiéndole a la extremidad alcanzar posiciones arriba y abajo de la coxa o base de la extremidad; rango de movimiento necesario

para poder utilizar las extremidades como apéndices para el desplazamiento sobre la superficie y como herramientas de posicionamiento en cualquier punto en el espacio.

Posteriormente, dado el peso posible aproximado de la estructura y la carga a soportar por las tres extremidades bases para obtener un polígono de apoyo estable, se selecciona el servomotor *HITEC HS-5645MG*. Tomando en cuenta las características y especificaciones de funcionamiento de este actuador, principalmente su torque máximo, se obtienen las longitudes de los eslabones en base al torque requerido por cada articulación; utilizando como regla principal para la selección de dichas longitudes proporciones encontradas en la naturaleza a fin de tener un primer indicio de la relación entre los tamaños de la coxa, fémur y tibia; obteniendo un primer diseño prototipo para la extremidad del robot como el obtenido en la figura 3.21, denominado prototipo 1 de extremidad.

Con las longitudes de los eslabones establecidas y las características del servomotor conocidas, fue posible determinar el peor caso de funcionamiento de la extremidad, como se indica en la Tabla 3.8, donde se determina que el peor caso está definido por la posición en la que los servomotores 2 y 3 están en la posición de cero grados y se intenta realizar un movimiento de elevación únicamente con el servomotor dos, sugiriendo con este resultado no implementar secuencias de movimiento en las que se deba iniciar un desplazamiento de los actuadores desde esta posición para las extremidades. Es recomendable primero retraer el servomotor 3 y luego el servomotor 2 a fin reducir el torque necesario para el movimiento de ambos grados de libertad; logrando de igual forma no deteriorar de manera tan abrupta los mecanismos internos de cada actuador.

Por último, con respecto al diseño de la estructura y extremidades del robot, se proponen un diseño prototipo de cada una de las piezas que le componen, para poder formar la estructura completa del robot Hexapodv1. Para esto se hizo uso de las bases del servomotor mostradas en la Figura 3.14, como pieza clave para el diseño de las extremidades y la unión estática entre los elementos que la componen.

Utilizando el aluminio como material base y su propiedad de fácil manipulación, poco peso y resistencia, como referencia para diseñar los eslabones y piezas necesarias para crear la extremidad completa del robot, se obtienen los eslabones acoplados a sus respectivos actuadores, como se puede apreciar en las Figuras 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28; con mayor detalle en la sección de apéndices sección B. Con dichos diseños propuestos, se obtienen las Tablas 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12, para definir las características del prototipo. Comparando las especificaciones descritas en las tablas anteriores, se puede hacer referencia a la Tabla 1.1 de (Tedeschi y Carbone, 2014, p.187), donde robots hexápodos como el *Tum*, *Bill-Ant-p* y *RISE* poseen características similares respecto al peso y número de actuadores de prototipo propuesto; por otro lado, en comparación con el robot referencial *Phoenix* se obtiene un robot de casi el doble de las proporciones, tanto en peso como en longitudes.

El área de trabajo completa del robot está determinada implícitamente por la unión del área de trabajo de cada una de sus extremidades de manera individual. Gracias al diseño propuesto de las extremidades, se obtuvo un área de trabajo, que individualmente para cada extremidad, permite alcanzar un rango amplio de movimiento como se muestra en las Figuras 3.30(a) y 3.30(b), logrando un área de trabajo común entre extremidades contiguas como se denota en las Figuras 3.31(a) y 3.31(b), que le permiten al robot utilizar, en caso de ser necesario, dos extremidades a modo de herramienta.

Mediante el modelado de Denavit-Hatenberg se logra obtener un modelo representativo de la estructura del robot, específicamente de sus extremidades. Dicho modelo replicado a cada uno de los apéndices dispuestos de manera simétrica radial alrededor de la estructura, logran un representación completa del robot, como se demuestra en la capítulo 4, sección 4.1. Con este modelo se logra posicionar cualquiera de las extremidades, dentro del rango de operación de sus actuadores, en cualquier punto del espacio deseado para lograr posicionar las extremidades de manera conjunta o individual para realizar diversas tareas. Se logra validar dicho modelo, haciendo un conjunto de pruebas sencillas utilizando los valores angulares para las extremidades

dispuestos en la Tabla 4.4 y posteriormente corroborando la posición de la extremidad visualmente en el mímico implementado en *Matlab*, como se muestra en la Figura 4.7, logrando acertar en todas las posiciones requeridas.

El modelo de solución geométrica diseñado para resolver el problema cinemático inverso para las extremidades del robot, logra de manera correcta acertar a los puntos deseados en el espacio para cada una de las extremidades. Utilizando el conjunto de casos de selección para las posibles posiciones de la extremidad, se logra obtener al menos un resultado válido siempre que el punto esté dentro del área de trabajo de la extremidad. Dicho modelo cinemático inverso es validado mediante el conjunto de puntos de prueba de la Tabla 4.5, en la que se logra acertar de acuerdo a la posición deseada de la rodilla, cada punto seleccionado en el espacio, probando un caso particular para cada extremidad alrededor de la base, como se puede observar en la Figura 4.23, donde haciendo uso del concepto desarrollado de esfera de aceptación, para aceptar o rechazar el resultado de la modelo de cinemática inversa, se logra apreciar que se alcanza de manera satisfactoria cada uno de los seis puntos de prueba introducidos en el modelo.

Gracias a las operaciones de traslación y rotación de la matrices de transformacional homogéneas, ambos modelos, tanto el cinemático directo como el de solución geométrica para la cinemática inversa, son posibles de utilizar en base a cualquier sistema de referencia que sea solidario a la base del robot, siempre que se conozca la posición de la misma y el ángulo de giro de la base respecto al eje vertical Z, como se demuestra en la Figura 4.24, donde se traslada y rota el robot en base a un nuevo sistema de referencia distinto al de su base, logrando representar cada una de las extremidades en su posición respectiva de acuerdo al desplazamiento y rotación del vector V_{offset} y θ_{offset} .

El modelo obtenido del servomotor seleccionado, *HITEC HS-5645MG* haciendo uso del método de modelado utilizado por Rivas, J. (2012) para este tipo de actuadores, se logra proporcionar una respuesta aceptable que corresponde con las características

de funcionamiento del fabricante, como se muestra en la respuesta del mismo en las gráficas de la Figura 4.28, corroborando de esta forma que se hizo una selección adecuada de los parámetros y constantes electromecánicas necesarias para el modelo.

Como se puede observar en la sección 4.3 del Capítulo 4, la decisión de hacer el modelado de forma independiente de cada articulación y su carga a modo de péndulo simple, como se muestra en la Figura 4.29, da como resultado modelos cuyas respuestas son acertadas al comportamiento de cada grado de libertad de manera individual, en los cuales se consideran las inercias correspondientes para cada subsistema, a modo de hacer más precisa la respuesta de los modelos en torno al peor caso de carga que se pueda presentar para cada uno. A pesar de obtener dos modelos matemáticos del tipo no lineal, haciendo uso de la linealización Jacobiana, se logra su análogo lineal que representa de manera aproximada el comportamiento del sistema. Cada una de las respuestas de estos sistemas se observa en las Figuras 4.34 para el modelo lineal del servomotor o GLD 1, las Figuras 4.36 y 4.37 para el modelo linealizado del servomotor o GLD 2 y las Figuras 4.39 y 4.40 para el servomotor o GLD 3, en las cuales se es posible determinar la necesidad de implementación de una etapa de control externa, debido a los errores obtenidos en los estados estacionarios de las respuestas, así como las oscilaciones de su etapa transitoria.

Mediante la transformación de las ecuaciones en espacios de estados a funciones de transferencia, de cada uno de los sistemas actuador-eslabón, descritos en el Capítulo 4 sección 4.2, y su posterior reducción de orden a sistemas de segundo orden, se hizo posible diseñar controladores PI externos mediante el método de asignación de polos por el lugar de las raíces y la ecuación para el error de velocidad, a fin de modificar la dinámica de la respuesta según los requisitos de operación y funcionamiento para cada grado de libertad. Se diseñaron tres controladores para cada sistema, uno de velocidad lenta, velocidad media y rápida, como se muestra en las Tablas 4.7, 4.8 y 4.9 para los sistemas 1, 2 y 3 respectivamente, con el fin de obtener respuestas diferentes en base al tiempo de asentamiento de cada sistema, para poder utilizar variaciones de velocidad para obtener movimientos armónicos de las extremidades como resultado final. La

respuesta de los sistemas, con cada uno de sus respectivos controladores, presenta un comportamiento acertado respecto a las especificaciones de diseño requeridas a lograr para no afectar de manera negativa o deteriorar las piezas mecánicas de los actuadores, tales como: una respuesta sobreamortigada, reducción de la velocidad de acción del sistema original y seguimiento de la referencia; obteniendo las gráficas de las Figuras 4.47 para el sistema 1, 4.49 para el sistema 2 y 4.51 para el sistema 3; donde se observa que se logran las especificaciones de funcionamiento.

El modelo desarrollado para la validación de polígonos de apoyo, necesario para conseguir un soporte estable en las fases de postura que garanticen la estabilidad estática del robot, permite de manera satisfactoria hallar en caso de que existan, al menos un polígono cerrado según las posiciones en las cuales se encuentren las extremidades del robot, sin importar que se haga contacto con la superficie con el extremo del apéndice o punta de contacto del eslabón tres, con la coxa o con la rodilla. Como se muestra en las Figuras 4.56, 4.58 y 4.60 para los tres casos de prueba descritos, se consiguen diversos polígonos de apoyo, para cada un de los posibles casos contemplados en el algoritmo, logrando de esta forma obtener un medio de validar el desarrollo y evolución de cualquier patrón de locomoción a ejecutar; sin importar si se tiene una configuración regular o irregular de las extremidades respecto a la superficie.

Haciendo uso de la plataforma de *V-rep*, se logró implementar una representación virtual de la estructura del robot que corresponde en las medidas, pesos e inercias descritas en el Capítulo 3 de diseño. Dicho modelo sirve como paso de validación para determinar si los movimientos requeridos para ejecutar cualquier acción por el robot están siendo efectuados de manera correcta. En el modelo implementado en *V-rep*, de igual forma, fue posible añadir diversas características de funcionamiento para los actuadores, como el torque máximo posible, velocidad y modo de control, logrando obtener un modelo representativo del prototipo propuesto para el robot hexápodo HexapodV1, ver Figura 5.3 y Figura 5.2(b).

Se logró establecer la comunicación entre los dos programas necesarios para la

simulación dinámica de los movimientos de la estructura, *Matlab* y *V-rep*, mediante un la *API* diseñada por *Coppelia Robotics* para dicho fin. Para poder lograr un funcionamiento correcto, se seleccionó un tiempo de comunicación del tipo asíncrono, en el cual solo se ejecutaran acciones en *V-rep* cuando se enviaran comandos desde *Matlab*, por lo que el tiempo de discretización o T_o jugó un papel importante en el control del mímico implementado.

Dado que la comunicación entre los programas se hace a tiempo discreto, fue necesario determinar el menor y el mayor tiempo de comunicación a la hora de ejecutar comandos de movimientos en *V-rep* desde *Matlab*, determinando así que el T_o o tiempo muestreo estaba dado por 0.02 segundos como se denota en la sección 5.2 del Capítulo 5. Con esto fue necesario hacer la discretización de los controladores PI externos del robot, para poder tener control sobre cada grado de libertad, en base a la mayor frecuencia de muestreo para mantener una discretización uniforme en los controladores; como se describe en la Tabla 5.1, en la cual se determina que el menor tiempo de muestreo entre los sistemas es el del sistema 3, donde se obtiene un T_o de 0.043 seg según el teorema de Shanon. Dado que la frecuencia de la comunicación entre los dos programas es de 0.02 seg que es más rápido que la velocidad más rápida de discretización de los controladores, se es posible implementar los controladores PI externos sin ningún inconveniente, obteniendo los resultados para cada una de las discretizaciones en las gráficas de las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8, en las cuales se puede validar que el intervalo de discretización seleccionado es el correcto, al comparar las respuestas que se obtienen entre los sistemas discretos y continuos para cada caso de los controladores PI externos.

Debido a que la implementación de los controladores PI discretos se hace en tiempo real y las rutinas o secuencia de ejecución de movimientos pueden requerir mover más de un grado de libertad a las vez, fue necesario implementar y diseñar un algoritmo que permitiera ejecutar de manera paralela varios controladores PI externos, como se demuestra en el diagrama de la Figura 5.9, en la que se mantiene activa la ejecución de todos los controladores en uso hasta que todos alcancen la referencia asignada;

de igual forma como se necesitan ejecutar diversas secuencias de movimiento para poder completar la ejecución de un patrón de locomoción, fue necesario implementar un método para detener un bloque de ejecución controladores PI paralelos de manera local utilizando una banda de aceptación de error, como se denota en la sección 5.3.2 del Capítulo 5, Figura 5.10, en la que se define un porcentaje de error aceptable para cada grado de libertad y sus respectivos controladores, logrando así detener la ejecución prolongada de una sola rutina de controladores.

Con los controladores PI externos discretizados, el modelo virtual del robot implementado en *V-rep*, fue posible corroborar y validar los movimientos de cada grado de libertad de las extremidades del robot haciendo uso de un conjunto de rutinas implementadas en *Matlab*. Haciendo uso de las funciones descritas en la sección 5.2 del Capítulo 5, es posible obtener la posición de los articulaciones mientras su movimiento es controlado por los PI discretos externos, haciendo posible la comparación del desempeño de estos en el entorno de simulación de *V-rep* respecto a sus análogos de los sistemas simulados en *Matlab*, obteniendo resultados satisfactorios para los tres grados de libertad y cada una de las velocidades para sus controladores PI externos discretos, como se demuestra en los casos de pruebas de las gráficas de las Figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, y 5.19.

Una vez comprobado el funcionamiento de los controladores PI externos discretos, se logra corroborar el funcionamiento del modelo de validación de polígonos de apoyo mediante el mímico implementado en *V-rep* y un conjunto de rutinas de código en *Matlab* como se describe en la sección 5.4 del Capítulo 5. Para hacer esta comprobación se hace uso de una gráfica denominada secuencia de evolución de polígonos de apoyo, que refleja el polígono válido conseguido para cada movimiento en cada fase en una secuencia de locomoción. Los polígonos de apoyo obtenidos mediante el modelo de validación se pueden ver reflejados de manera análoga en las gráficas de evolución de polígonos de apoyo, al desplazar al robot sobre la superficie, como se puede observar en el conjunto de Figuras 5.20, 5.23, 5.21, 5.24, 5.22 y 5.25, para seis fases de movimiento de un patrón de locomoción de gateo trípode básico.

De igual forma, que con los polígonos de apoyo validados para la locomoción, que hacen uso del modelo cinemático directo, se logra realizar la validación del modelo geométrico para la solución de problema cinemático inverso para el mímico implementado en *V-rep*. Como se demuestra en la sección 5.5 del Capítulo 5, haciendo uso de la transformación necesaria al sistema solidario de referencia del robot en el entorno de simulación de *V-rep*, se disponen un conjunto de ángulos a introducir en el modelo cinemático directo (ver Tabla 5.3) para obtener un grupo de puntos en el espacio o área de trabajo de la extremidad a del robot; posteriormente se ejecuta el algoritmo para obtener los valores angulares para cada punto en con diversas posiciones de rodilla, obteniendo un resultado satisfactorio de lograr alcanzar 6/6 puntos en el área de trabajo, como se demuestra en la Figura 5.27.

Para poder realizar el diseño e implementación de patrones de locomoción en el modelo virtual o mímico implementado en *V-rep*, se desarrollaron dos herramientas necesarias para describir y hacer funcionar cada una de las fases de movimiento presentes en una secuencia de locomoción completa. Se define un concepto en conceptos generales, el denominado MCPL o Manejador Central de Patrones de Locomoción (sección 6.1 Capítulo 6), que permite controlar la ejecución secuencial de las distintas fases de movimiento que describen un patrón de locomoción en específico. Cada una de estas fases se definen mediante el formato denotado como tabla de movimiento en la cual se describe, en la secuencia de evolución del patrón de locomoción, donde se moverá cada grado de libertad, de qué extremidad y con qué velocidad, como se puede observar en el ejemplo de la Tabla 6.1. Adicional a esto se implementa otro conjunto de herramientas para poder analizar el desempeño en la ejecución de cada patrón de locomoción, descritas en la sección 6.3 del Capítulo 6, como lo son las gráficas de desplazamiento horizontal para medir el desplazamiento, trayectoria y velocidad del centro de masa del robot (Ver Figura 6.5) y la gráfica de ángulo de giro respecto al eje Z, utilizada para determinar el giro relativo a la base del robot (Ver Figura 6.6).

Con este conjunto de herramientas para describir, analizar y validar los movimientos realizados por el robot, se proponen diversos patrones de locomoción básicos para lograr ejecutar desplazamientos de la estructura sobre una superficie plana. Gracias a las investigaciones realizadas sobre los patrones de locomoción utilizados con mayor frecuencia en varias especies de hexápodos en la naturaleza se determinó que el patrón de locomoción más común para desplazarse sobre cualquier tipo de superficie es el denominado gateo trípode, como se indica en la sección 6.4 del Capítulo 6. implementando la secuencia de movimiento según las Tablas 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5, variando en número de ciclos de ejecución para el MCPL y utilizando los parámetros de la Tabla 6.6, se obtiene la Tabla 6.7, en la que es posible apreciar que el tiempo de ejecución para el inicio y fin de ejecución del patrón de locomoción está dado por más de 20 segundos, lo que afecta una medición en base al número de ciclos, pero se logra el cometido del desplazamiento en línea recta de la estructura. Por otro, lado se propone variar los parámetros del MCPL, manteniendo el número de ciclos fijo para determinar que configuración permite obtener un mejor desempeño, dando como resultado la Tabla 6.8, donde se obtienen resultados interesantes que relacionan la altura y posición de las extremidades respecto a la velocidad de desplazamiento; mientras mayor sea la altura de la base, menor será el desplazamiento en línea recta y viceversa, esto debido a que cuando las extremidades están más extendidas, un giro en el servomotor 1 o articulación de la coxa cubre más terreno respecto a una extremidad que esta totalmente elevada; obteniendo como velocidad máxima de desplazamiento 0.0058 m/seg, que en comparación de desempeño respecto a robots de similares especificaciones como el *Bill-Ant-p* de la Tabla 1.1 tiene un desempeño aceptable.

Con respecto a los patrones de locomoción para el giro de la estructura en torno al eje base del robot, se obtuvo resultados satisfactorios respecto a los dos tipos de giro implementados, giro en un tiempo y en dos tiempos, rutinas necesarias para orientar la base del robot respecto a un ángulo definido para poder completar una trayectoria. Para ambos patrones de locomoción con distintos parámetros para el MCPL se obtuvieron los resultados de las Tablas 6.13 y 6.19, en las que se logró un rendimiento de giro mayor por ciclo mientras más extendidas estuviesen las extremidades, logrando

el doble de desplazamiento angular con el giro en dos tiempos para el caso de mejor resultado con 86.64 grados por ciclo para los parámetros del escenario 0 del MCPL a comparación del giro en un tiempo para el mismo escenario en el que se obtuvo como giro máximo por ciclo 44.241 grados.

La implementación del patrón de locomoción de caminata tipo cangrejo o *Crab Walking* en la estructura del robot hexápodo, descrito en la sección 6.5.4 del Capítulo 6, reflejó un desempeño con diversas características a su favor y en contra. Debido a la complejidad de movimientos, dado el número de fases que se deben ejecutar para posicionar las extremidades en posiciones estables para la estructura, se logra una velocidad de desplazamiento promedio muy baja de aproximadamente 0.00191 m/seg, con un rendimiento de 0.1237 cm/ciclo de locomoción, lo que hace eficiente a este patrón de locomoción en su uso solo para avanzar en superficies donde el ancho de las extremidades obstaculice el desplazamiento; a pesar de esto se logra observar una altura del centro de masa considerablemente baja, junto con polígonos estables que garantizan una buena estabilidad durante la ejecución del patrón de locomoción.

Para poder utilizar una o dos extremidades a modo de herramientas de manera conjunta o individual se consiguió posicionar las extremidades del robot de tal forma que se formase una base con cuatro puntos de apoyo o base cuádruple, que le permiten tener la libertad de dejar libre dos apéndices en todos los momentos para alcanzar cualquier punto en el espacio con ellos, como se muestra en la Figura 6.32, permitiendo cumplir con la especificación de diseño de lograr un robot capaz de utilizar extremidades a modo de herramientas multipropósito. Una vez conseguida una base estable se logró plantear un diseño de patrón de locomoción, haciendo uso únicamente de las cuatro extremidades en la superficie como se describe en las Tablas de movimiento 6.29, 6.30, 6.31, 6.32, 6.33, 6.34, 6.35 y 6.36; obteniendo bases estables para la transición de movimientos entre las distintas fases descritas como se muestra en las Figuras 6.31 donde siempre se logra mantener la proyección del centro geométrico dentro del polígono de apoyo formado por los apéndices, sin importar que este haya sido desplazado hacia la parte frontal por el peso de las extremidades que ahora no hacen

contacto con el suelo. El desempeño obtenido para este patrón de locomoción en línea recta, es aceptable, tomando en consideración que la posición de las extremidades no es la más conveniente para ejecutar un patrón de locomoción, logrando una velocidad promedio máxima de 0.00075 m/seg que se considera muy baja pero logra el cometido de desplazar la estructura.

En general los resultados obtenidos en base a: diseños de la estructura, modelado de la misma y desempeño para poder ejecutar diversos patrones de locomoción, dan como resultado un prototipo de robot hexápodo funcional capaz de moverse sobre una superficie plana, como se demuestra mediante el conjunto de validaciones para la simulación del mímico implementado en *V-rep*, comprobando de manera general que la implementación del prototipo de robot hexápodo HexapodV1 logra cumplir con las especificaciones de diseño de lograr una estructura estable, con capacidad omnidireccional y poseer una plasticidad de movimiento amplia de sus extremidades y base, a fin de poder ser utilizado como plataforma móvil multipropósito.

7.2 Conclusiones

El prototipo de robot hexápodo obtenido, basando su diseño principalmente en conceptos morfológicos biológicos presentes en insectos y demás invertebrados, logra cumplir con el objetivo de conciliar con una estructura funcional capaz de desplazarse sobre superficies planas y lograr posicionar las extremidades en un rango amplio de posiciones, resaltando su capacidad de plasticidad en los movimientos posibles; asentando bases conceptuales y teóricas para cada característica de diseño, fundamentadas en trabajos previos respecto a las dimensiones del robot y su locomoción, por diversos autores y por definiciones y consideraciones propias descritas en el desarrollo del proyecto. Como se demuestra en el conjunto de pruebas de movimiento efectuadas para la estructura, el diseño propuesto para el robot hexápodo Hexapodv1, es un diseño versátil, capaz de ejecutar patrones de locomoción con un grado considerable de plasticidad, donde cada patrón de locomoción es justificado y tiene un objetivo de específico.

Como se demuestra en el conjunto de simulaciones realizadas, haciendo uso de la cinemática directa e inversa, las extremidades del robot pueden posicionarse de tal forma, que estas pueden ser utilizadas a modo de apéndices para ejecutar patrones de locomoción y como herramientas individuales o de trabajo conjunto, lo que amplía su funcionalidad como plataforma móvil. Su base hexagonal representa una plataforma estable capaz de cargar, de así ser necesario, con una carga útil o extra de 500 gramos, lo que amplía su funcionalidad haciendo posible la incorporación de cualquier tipo de sensor o herramienta, como dispositivos de visión, censado de parámetros ambientales, detectores de químicos, equipos de posicionamiento y comunicación diversas plataformas, para completar tareas específicas; estas características combinadas con las ventajas de poder efectuar patrones de locomoción discretos sobre cualquier superficie hacen del diseño propuesto un prototipo de robot versátil, con un campo amplio de implementación en diversas áreas.

El diseño propuesto de la estructura, hace de su implementación una opción factible, dado a que los componentes tanto electrónicos como mecánicos son fáciles de encontrar. En base a los dispositivos electrónicos necesarios, la selección de la unidad central de procesamiento, como lo es la plataforma *Raspberry PI*, brinda una capacidad amplia de expansión y acople con demás dispositivos gracias a sus puertos para la integración y conexión con tarjetas periféricas como el controlador de servos y unidades de procesamiento como placas de la plataforma *Arduino*. En base a la observación del desempeño de prototipos similares contruidos comercialmente, la selección de los actuadores HITEC HS-5645MG y las baterías descritas, dan lugar a un nivel de autonomía de funcionamiento considerable que se puede ampliar aún más, gracias a la posibilidad de acarrear con los 500 gramos de carga útil. Conjuntamente la selección del aluminio como material de construcción para los eslabones, permite lograr la futura implementación de una estructura firme y resistente.

Los modelos de interés elaborados para la descripción de la estructura espacial y de operación, logran proporcionar la información necesaria para poder controlar y

posicionar cada uno de los actuadores y elementos de interés como lo son los eslabones de cada extremidad y base del robot. El uso de técnicas de modelado para robots articulados como lo es el algoritmo de Denavit-Hatenber para lograr desarrollar un modelo representativo y descriptivo de las extremidades, junto a la proposición de agregar un grado de libertad adicional a estas, hizo posible obtener un modelo completo estático de la estructura con el cual poder obtener la posición exacta de cada elemento en base al sistema de referencia propio del robot, y luego haciendo uso de transformaciones espaciales, respecto a cualquier otro sistema que se requiriera solidario a su base. Los modelos dinámicos obtenidos para el comportamiento y respuesta de los subsistemas asilados actuador-eslabón mediante el modelado de Euler-Lagrange, en conjunto con el modelado dinámico del sistema para el servomotor, hicieron posible el control aceptable de cada grado de libertad mediante el uso de controlador PI discretos externos implementados en *Matlab*, dando como resultado la ejecución de movimientos armónicos, analizados y validados en el prototipo implementado del mímico en *V-rep*.

Haciendo uso de los controladores PI externos paralelos, fue posible proponer diversos patrones de locomoción con usos específicos y variedad de desempeños amplia. Gracias a estos controladores, el movimiento de más de un grado de libertad, dieciocho en caso de ser necesario, hizo posible realizar movimientos complejos y simultáneos de la estructura, logrando así completar secuencias con movimientos múltiples de extremidades para lograr desarrollar patrones de locomoción funcionales y versátiles, con una ejecución armónica y suave dinámicamente. Con estos patrones propuestos, es posible desplazar la estructura del robot a través de superficies planas en línea recta, girar la base del robot para orientar su eje de movimiento, moverse por espacios reducidos del tamaño del ancho de su base y hacer uso de las extremidades a modo de herramientas, garantizando siempre la estabilidad estática de la estructura mediante la validación de los movimientos haciendo uso de los algoritmos de validación de polígonos de apoyo antes de ejecutar cada fase de movimiento por parte del MCPL específico de cada patrón de locomoción.

Por último, la validación en la ejecución de cualquier movimiento del robot, fue posible gracias a las diversas herramientas elaboradas para observar el posicionamiento de los elementos de la estructura, funcionamiento de controladores y la respuesta de cada uno de los actuadores y la observación del movimiento del mímico implementado en *V-rep*. Este conjunto de herramientas hizo posible la planificación y diseño de los patrones de locomoción descritos, corroborando su funcionamiento en cada una de las etapas, a fin de lograr una evolución fluida del movimiento conjunto de las extremidades, obteniendo a la final resultados de desempeño satisfactorios para el prototipo HexapodV1 propuesto.

Como resultado final, se logró proponer el diseño de un robot tipo hexápodo terrestre no volador, capaz de desarrollar diversos patrones de locomoción para poder desplazarse sobre superficies planas. Este tipo de robots puede ser utilizado para completar diversas tareas, gracias a las capacidades de movilidad de sus extremidades y la distribución de las mismas sobre respecto a su base. Campos de implementación y uso como: exploración en zonas no accesibles para vehículos con ruedas como zonas volcánicas, áreas de desastres naturales en modo de vehículo de reconocimiento de terreno, investigación de zonas inaccesibles por humanos, portando sensores para realizar medidas ambientales o niveles de químicos nocivos; además de servir como plataforma de carga para muestras y diversas recolecciones gracias al diseño para transportar carga útil.

7.3 Recomendaciones

Seleccionar componentes adecuados, entorno al concepto de peso y dimensiones, a la hora de hacer la implementación del prototipo, tratando de no exceder el peso de carga útil o máximo para el cual está diseñado el robot, a fin de no sacrificar la movilidad y plasticidad de las extremidades.

Desarrollar un modelo para la solución del problema cinemático inverso para el

posicionamiento de la base de la estructura del robot, respecto a las posiciones de las extremidades al estar en contacto con la superficie, para poder tener control de esta de manera conjunta mientras se ejecutan patrones de locomoción.

Plantear técnicas de implementación de patrones de locomoción a través del modelo cinemático inverso, haciendo uso del conjunto de herramientas para la validación de movimientos de la estructura, al realizar movimientos sobre superficies irregulares.

Al momento de implementar el prototipo, seleccionar o diseñar un dispositivo capaz de lograr hacer las mediciones angulares del funcionamiento de los actuadores de manera precisa, para poder tener un control acertado respecto al movimiento general de la estructura.

Proponer e implementar controladores externos más eficientes y rápidos que mantenga una respuesta sobreamortiguada de las articulaciones, a fin de lograr mayor rapidez en la ejecución de las rutinas de los patrones de locomoción.

Implementar una interfaz que permita visualizar en tiempo real, según las fases de locomoción ejecutadas, la evolución de los polígonos de apoyo, posición de las extremidades y desplazamiento del centro de masa de la estructura.

Construir un prototipo basándose en la teoría planteada y desarrollada en este trabajo de grado y de ser necesario aportar posibles detalles o consideraciones no tomadas en cuenta en este documento.

Desarrollar y plantear un modelo de la estabilidad dinámica de la estructura, a fin de poder ejecutar patrones de locomoción más eficientes y versátiles que le permitan hacer uso al robot de todo el rango de movimiento de sus extremidades.

Proponer secuencias de locomoción compuestas haciendo uso de los patrones de locomoción descritos en este trabajo.

A modo de trabajo futuro, escribir o traducir los algoritmos diseñados e implementados en *Matlab* a lenguajes de programación como *Python*, *C++* o *JavaScript* según sea la plataforma de implementación de los mismos.

Desarrollar algoritmos de seguimiento y planeación de trayectorias, para trazar caminos por los cuales pueda desplazarse el robot, utilizando algún dispositivo de reconocimiento visual.

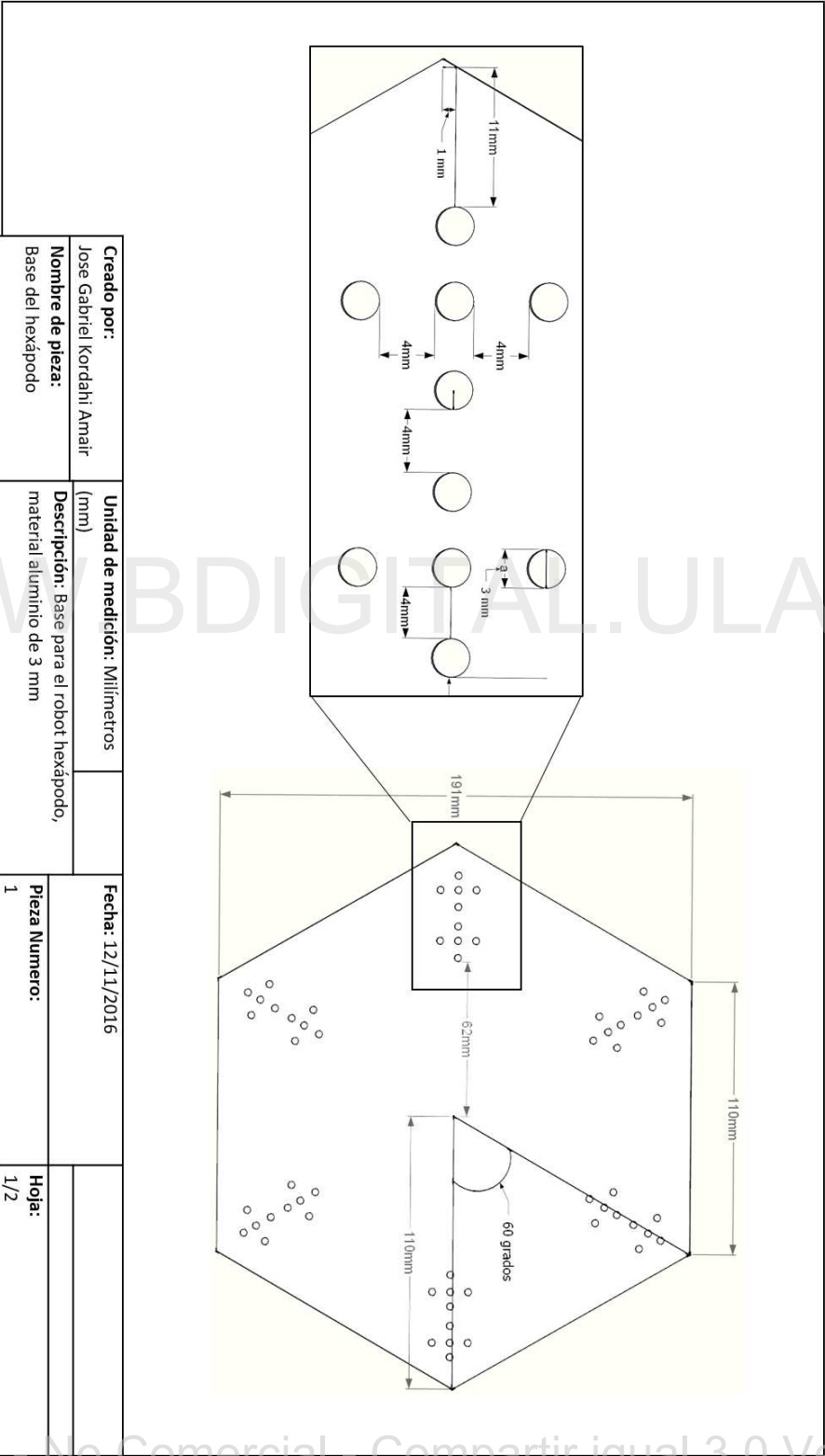
Mejorar el diseño virtual de las piezas mecánicas del robot, para conseguir un acabado visual más estilizado; con la posibilidad de lograr reducir el peso de la estructura a beneficio del funcionamiento de los actuadores.

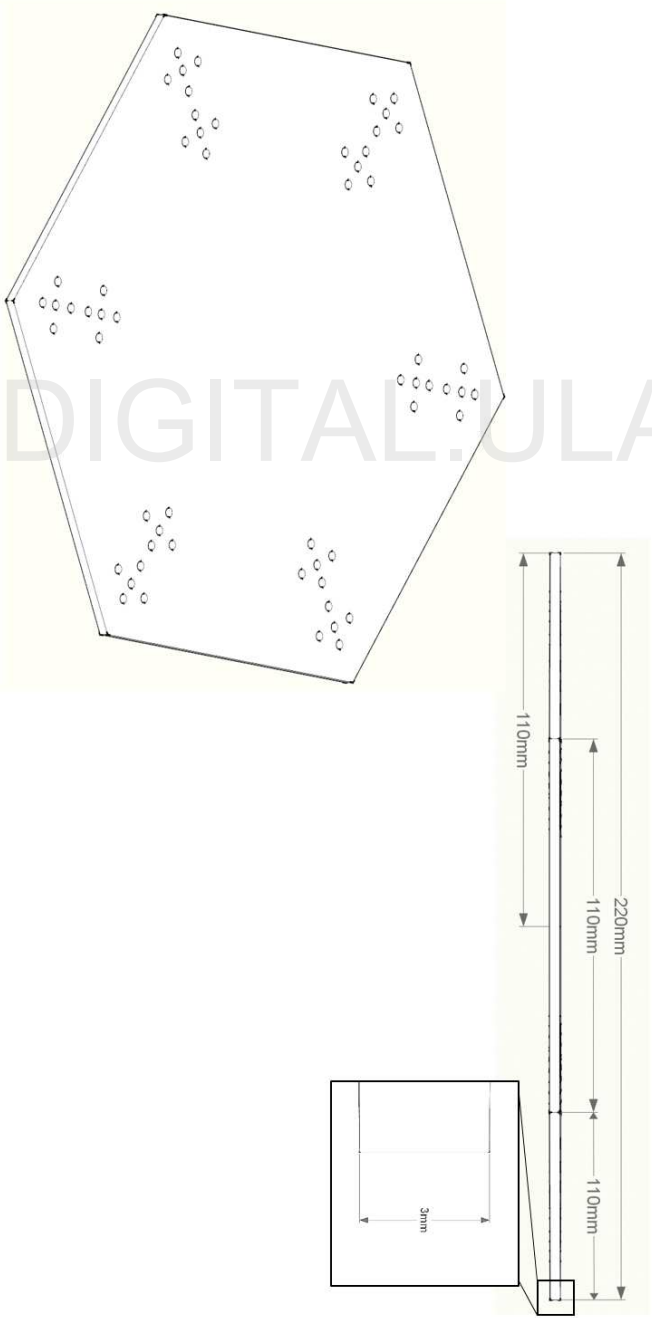
WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Apéndice A

Planos isométricos de cada una de las piezas diseñados para el robot prototipo hexápodo Hexapodv1.

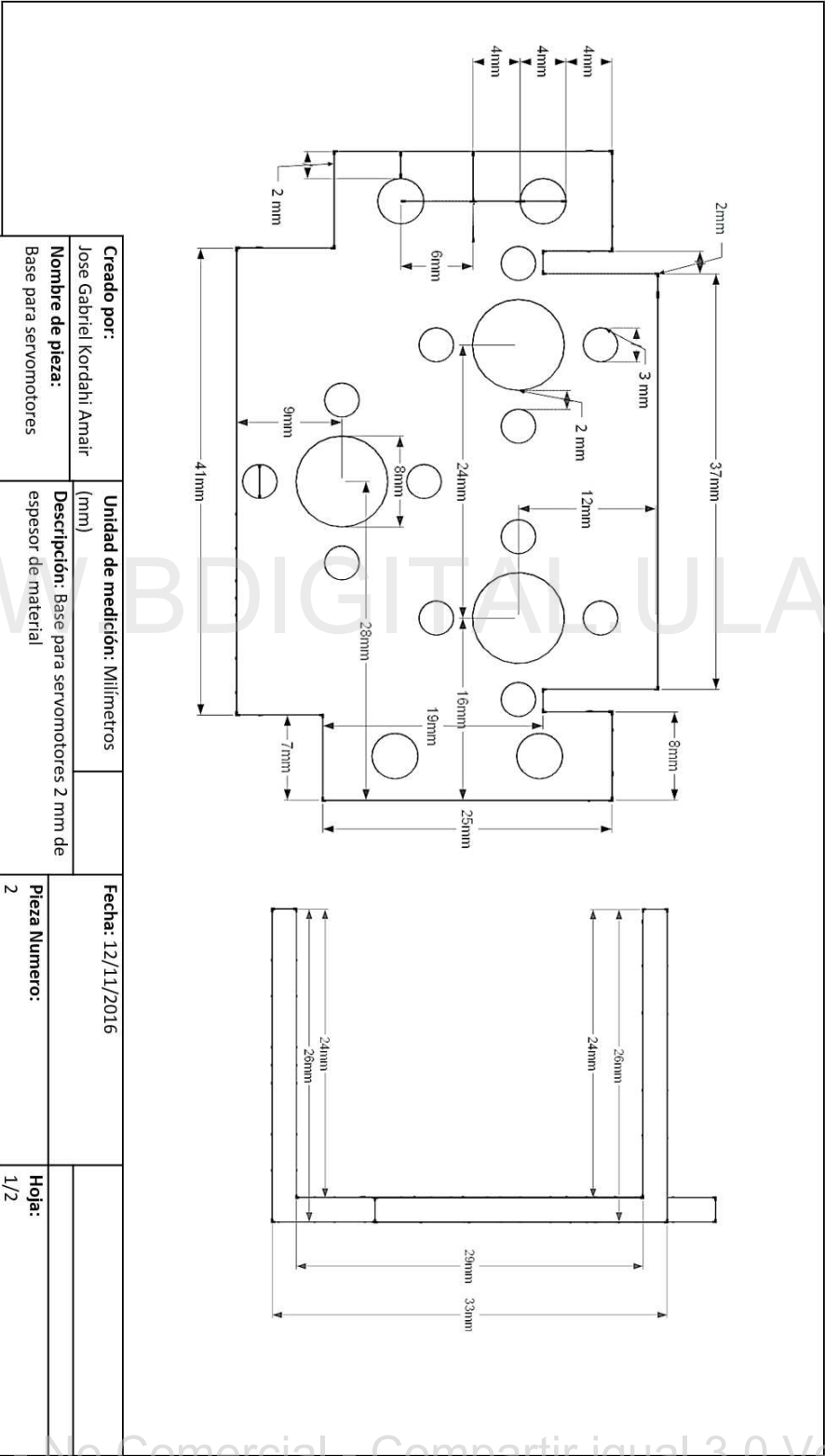
Este apéndice muestra el conjunto de planos para todas las piezas diseñadas del robot hexápodo prototipo. En el se describen cada una de las piezas que conforman las extremidades y sus eslabones, así como la base de la estructura y la base individual de cada uno de los servomotores. Todos los planos están medidos en escala milimétrica. Se tiene la siguiente secuencia de planos isométricos para las piezas del robot.

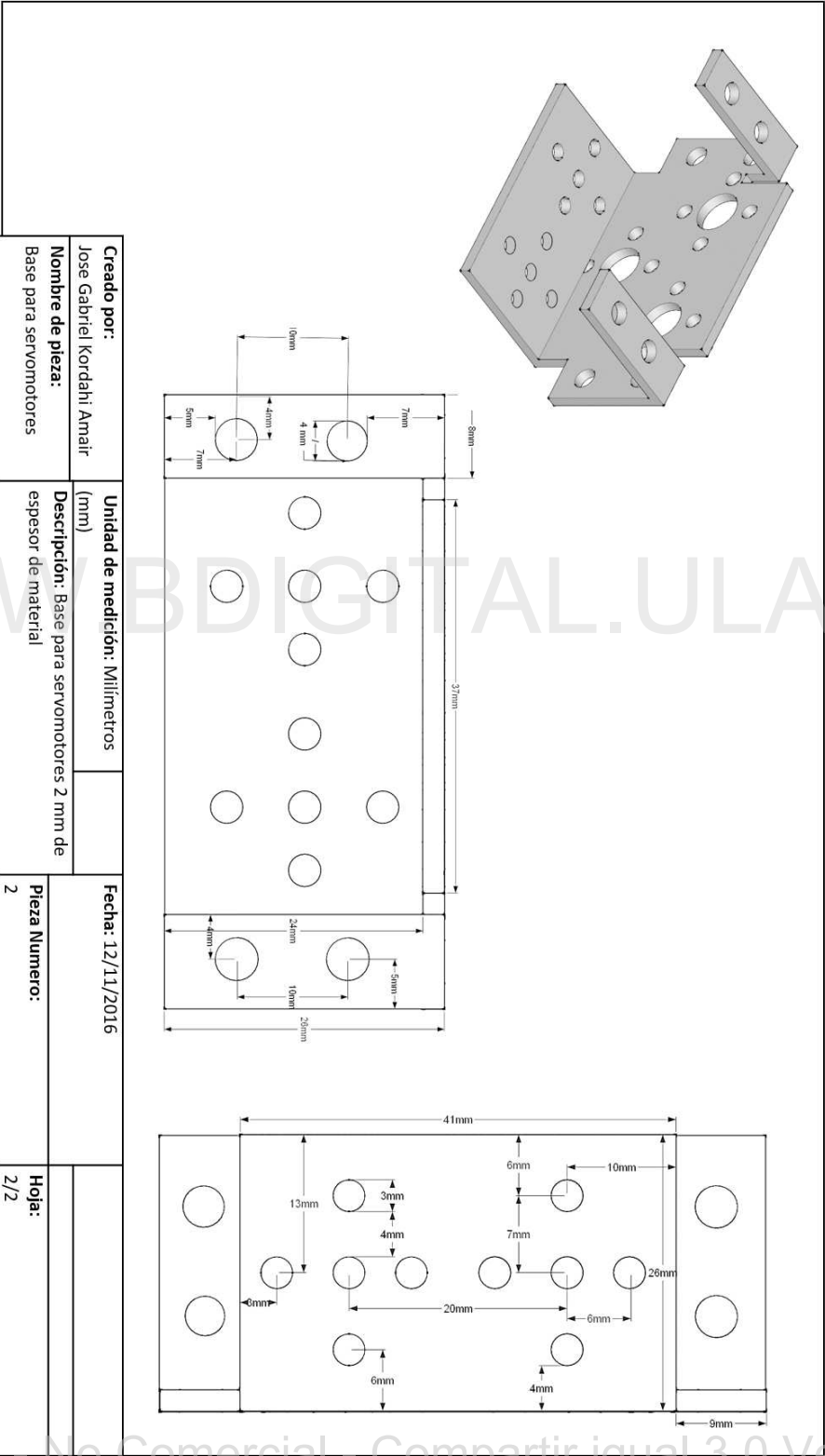


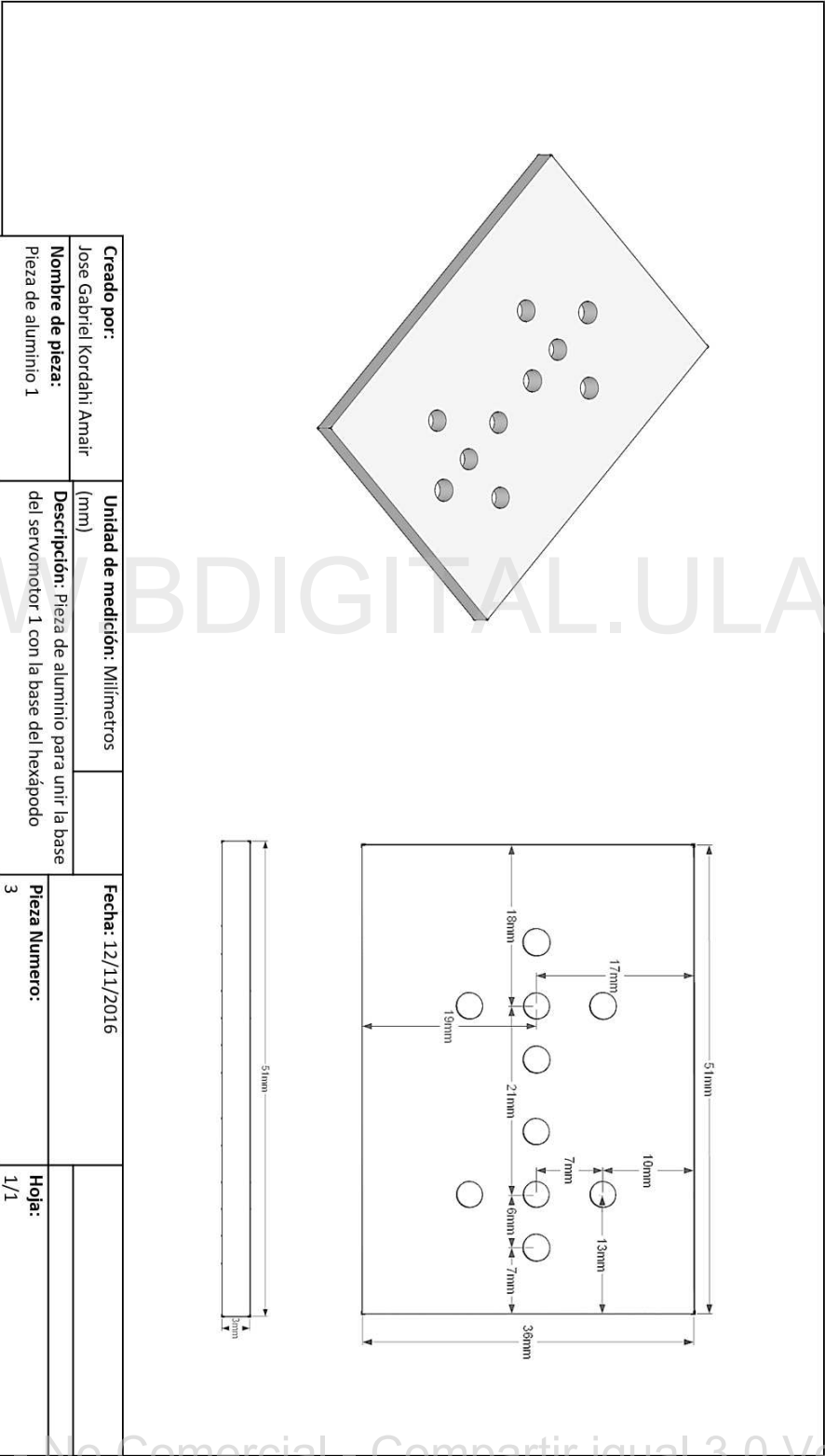


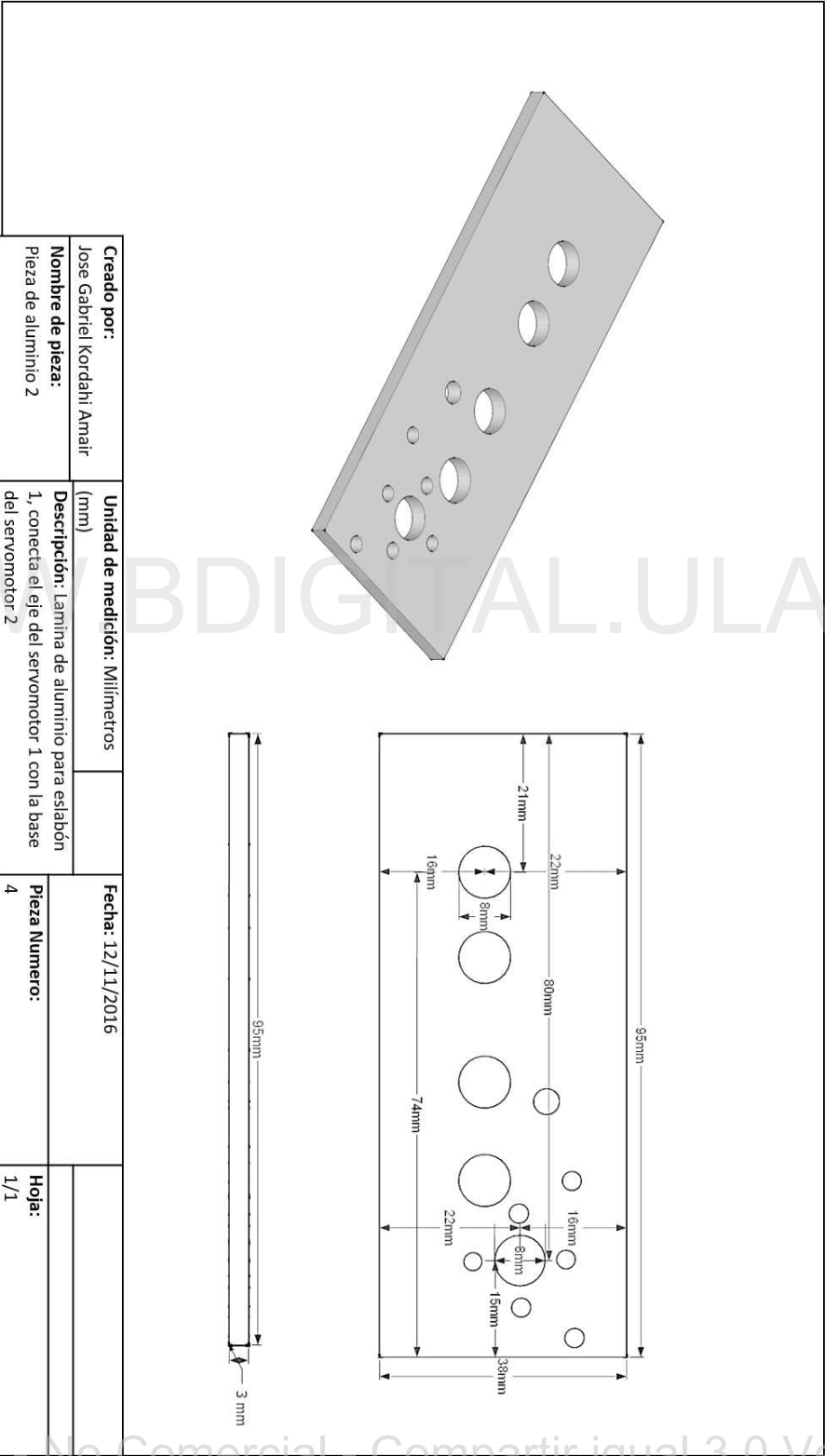
Technical drawing of a hexapod base. The top view shows a hexagon with six groups of three circular holes each. The side view shows a rectangular profile with dimensions: total width 220mm, two 110mm segments, and a 3mm thickness.

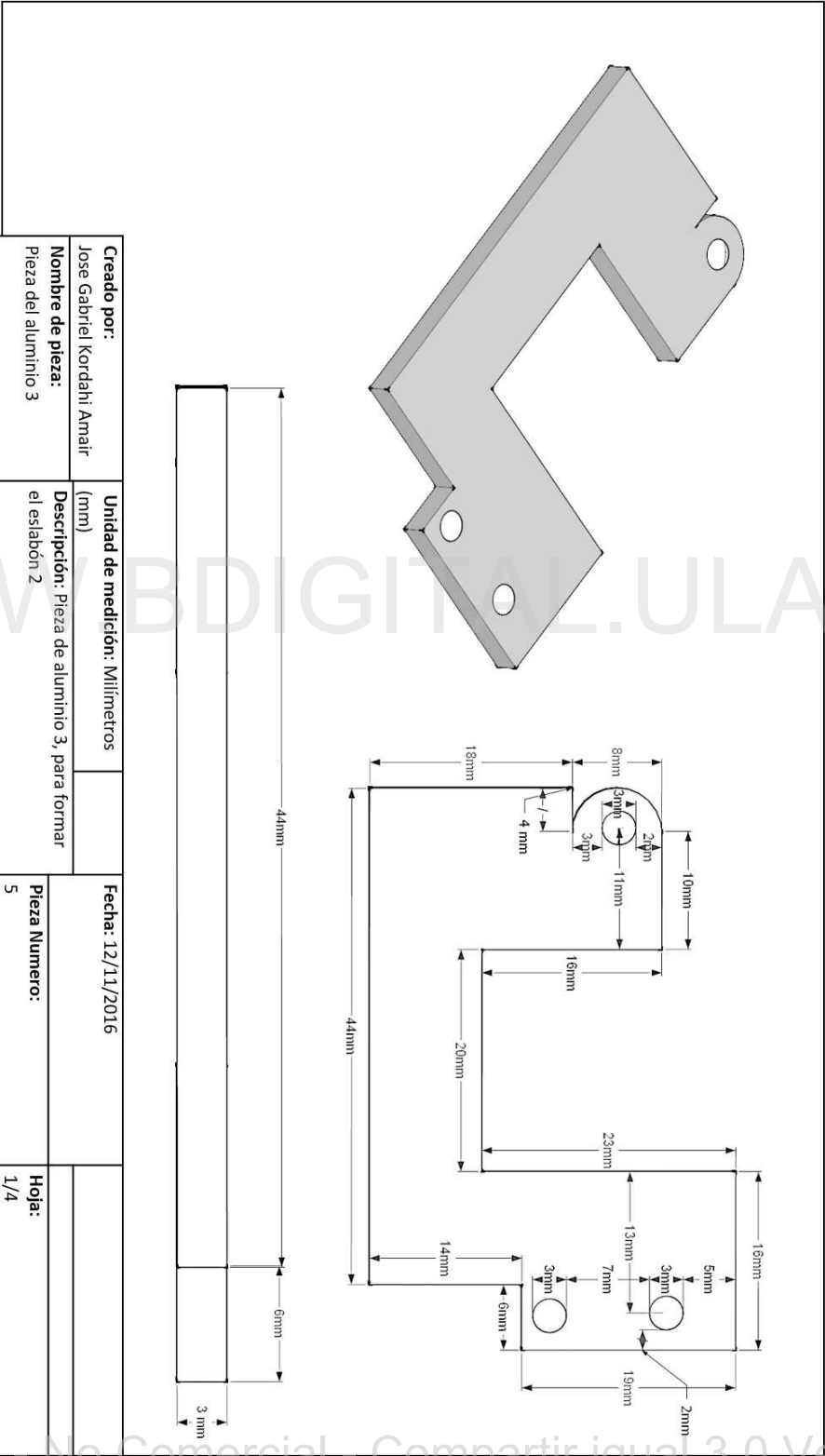
Creado por: Jose Gabriel Kordahi Amair	Unidad de medición: Milímetros	Fecha: 12/11/2016
Nombre de pieza: Base del hexápodo	Descripción: Base para el robot hexápodo, material aluminio de 3 mm	Pieza Numero: 1
		Hoja: 2/2

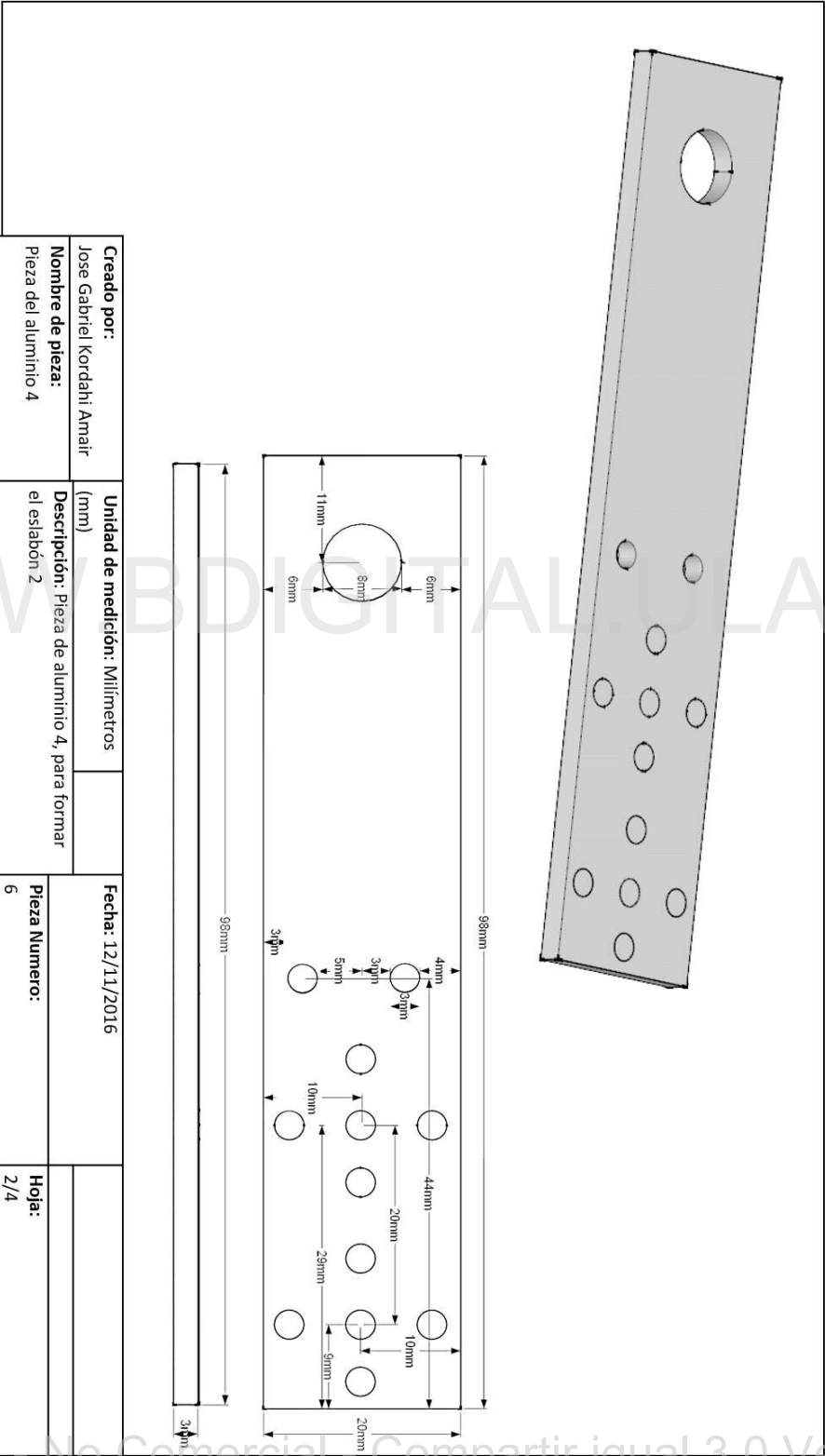


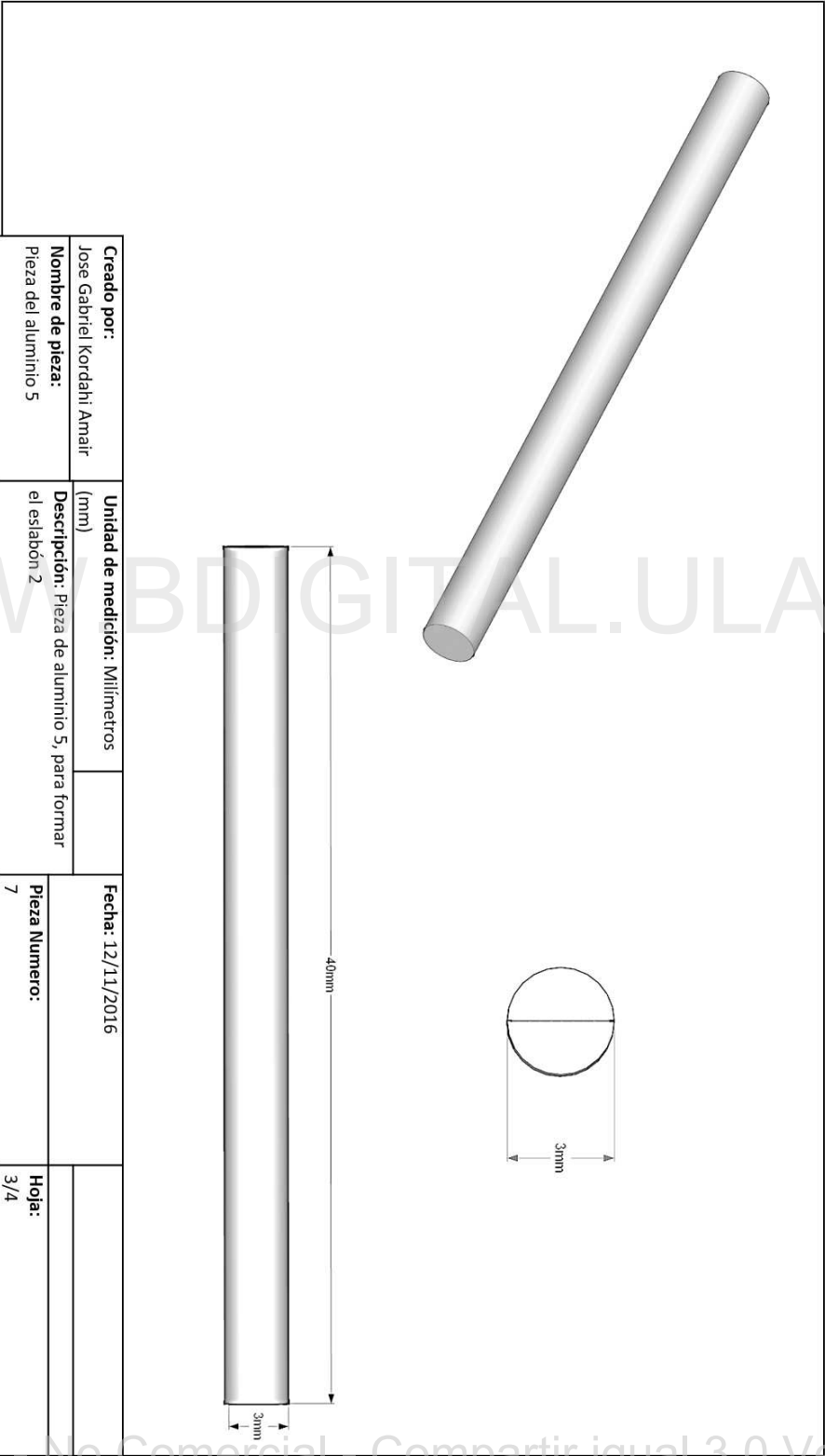


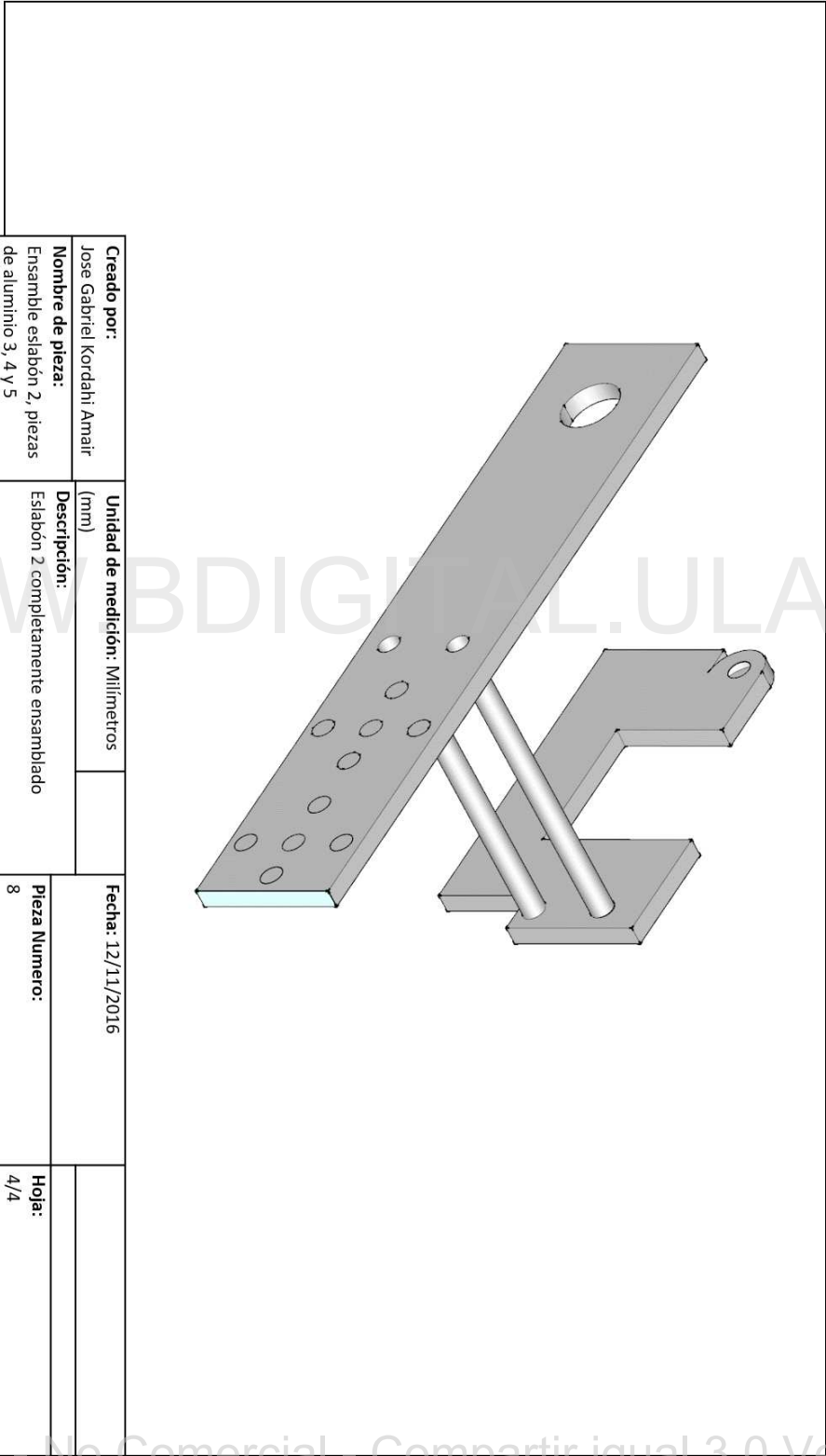




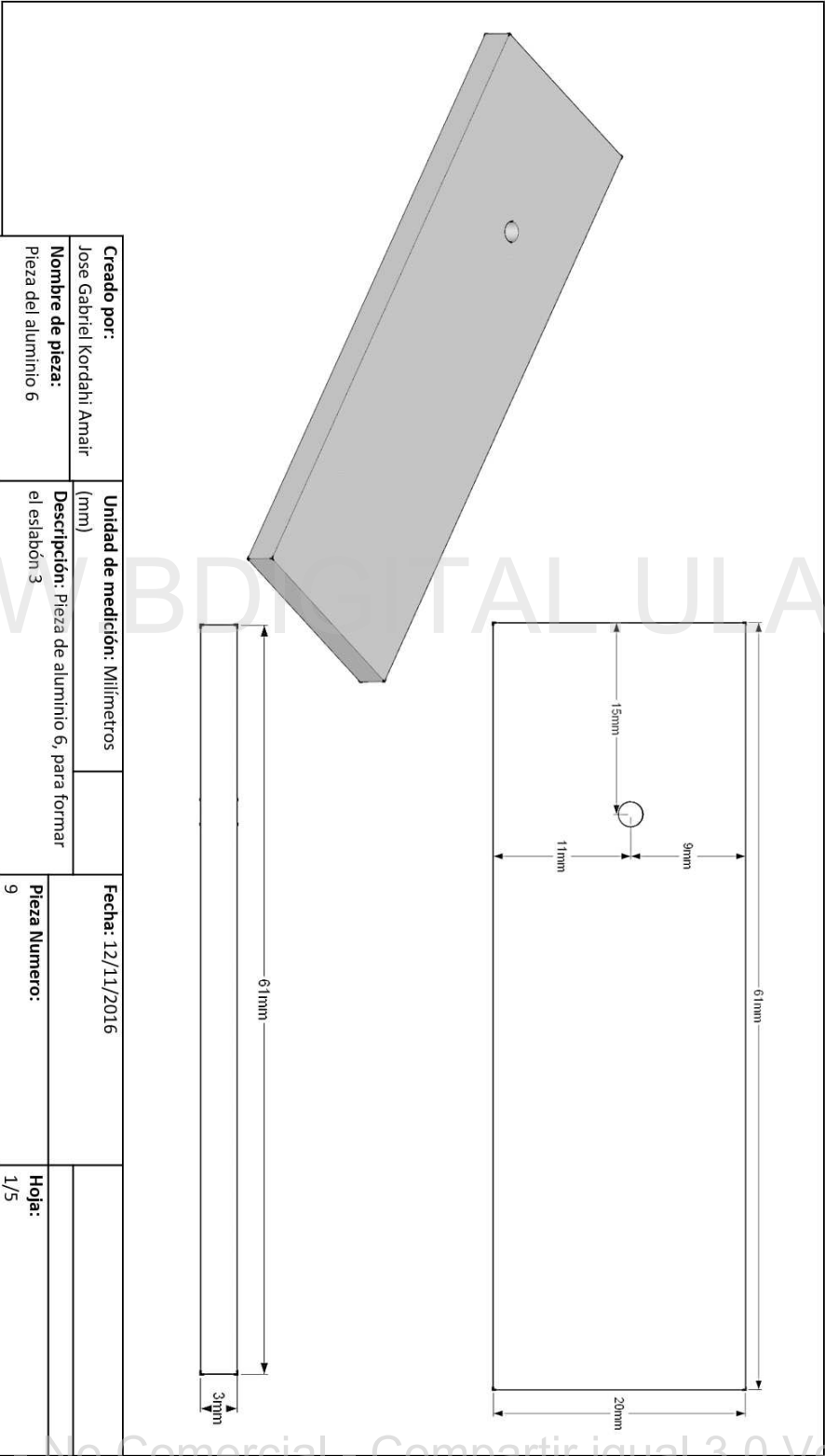


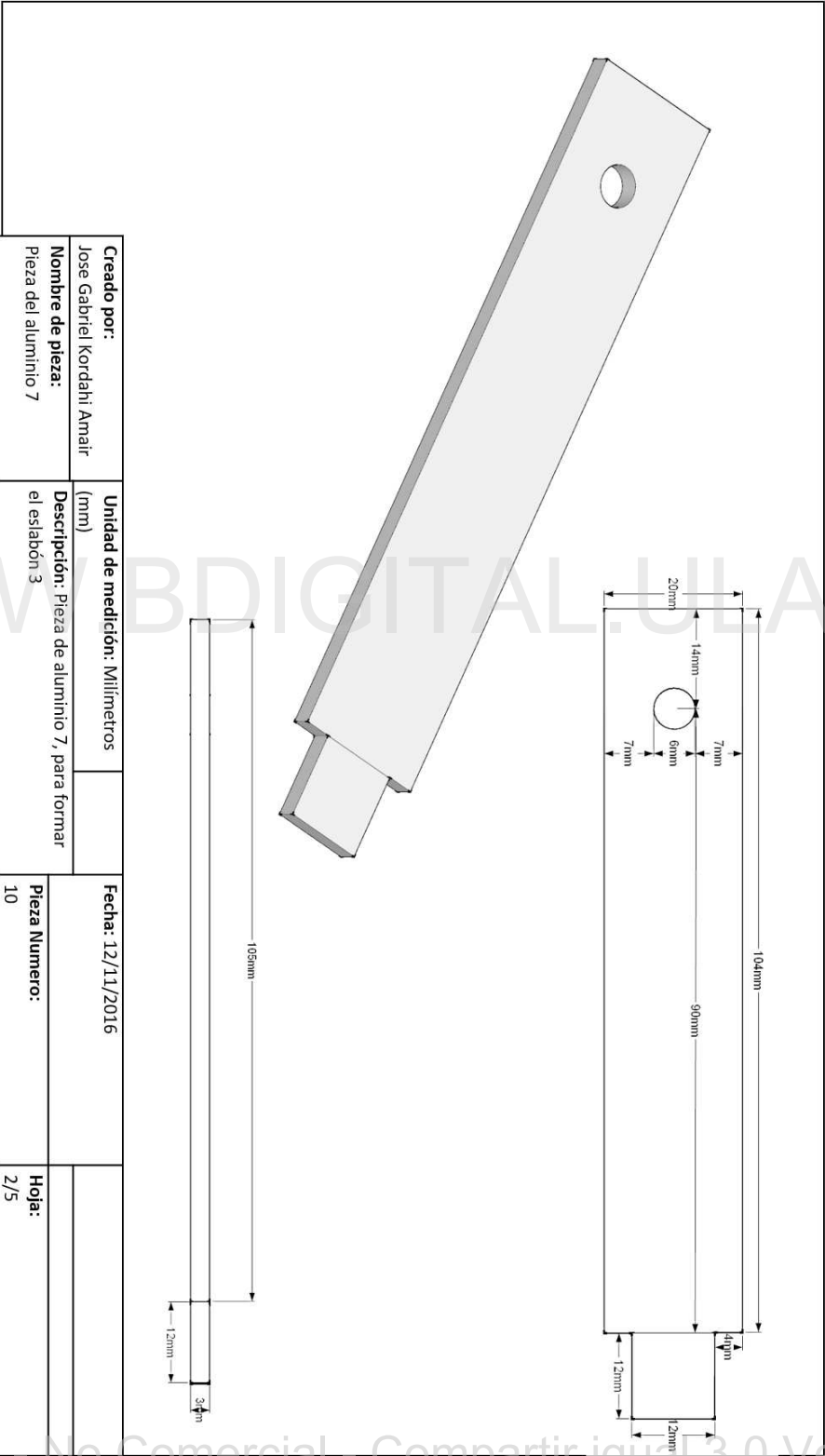


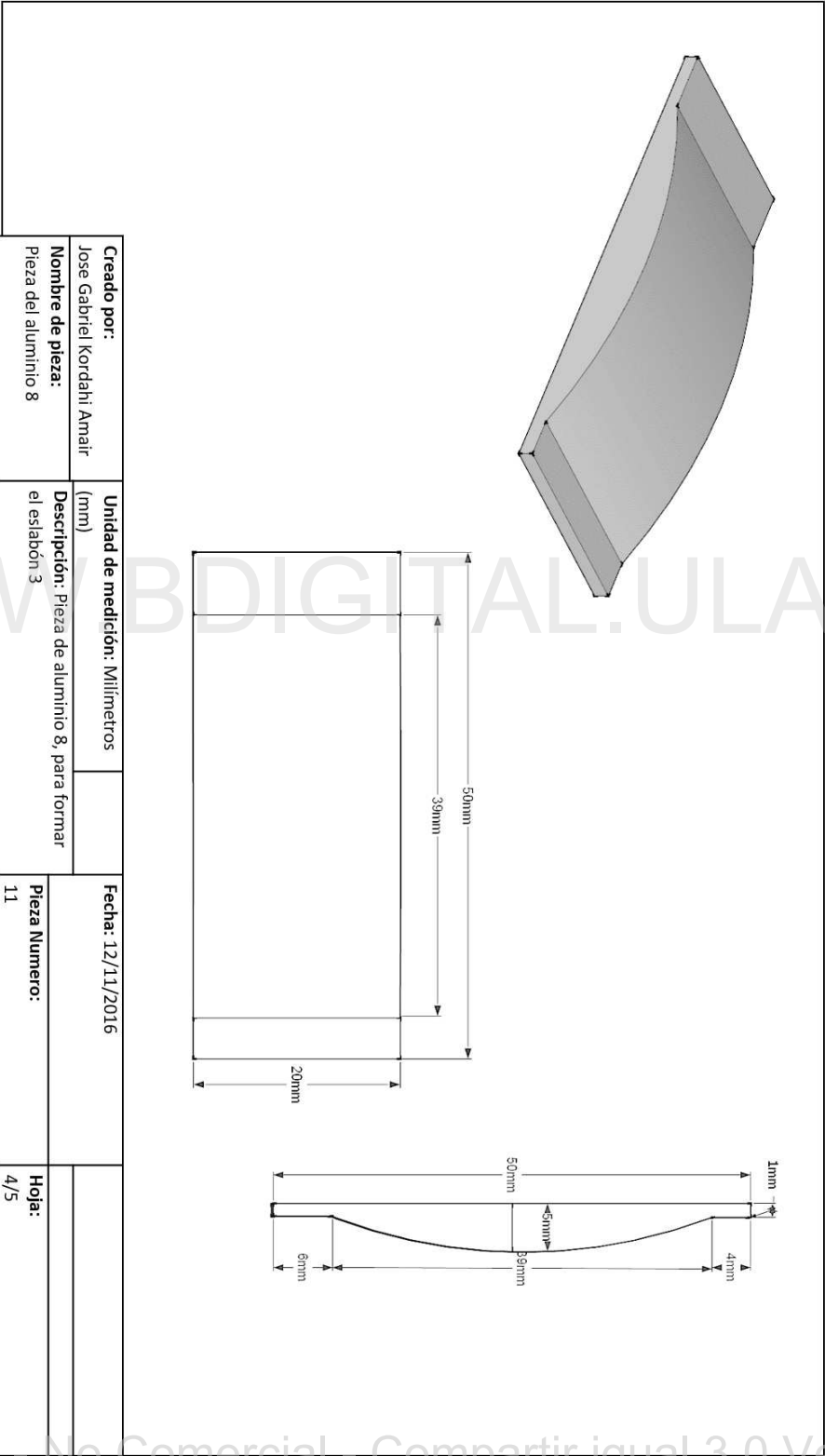


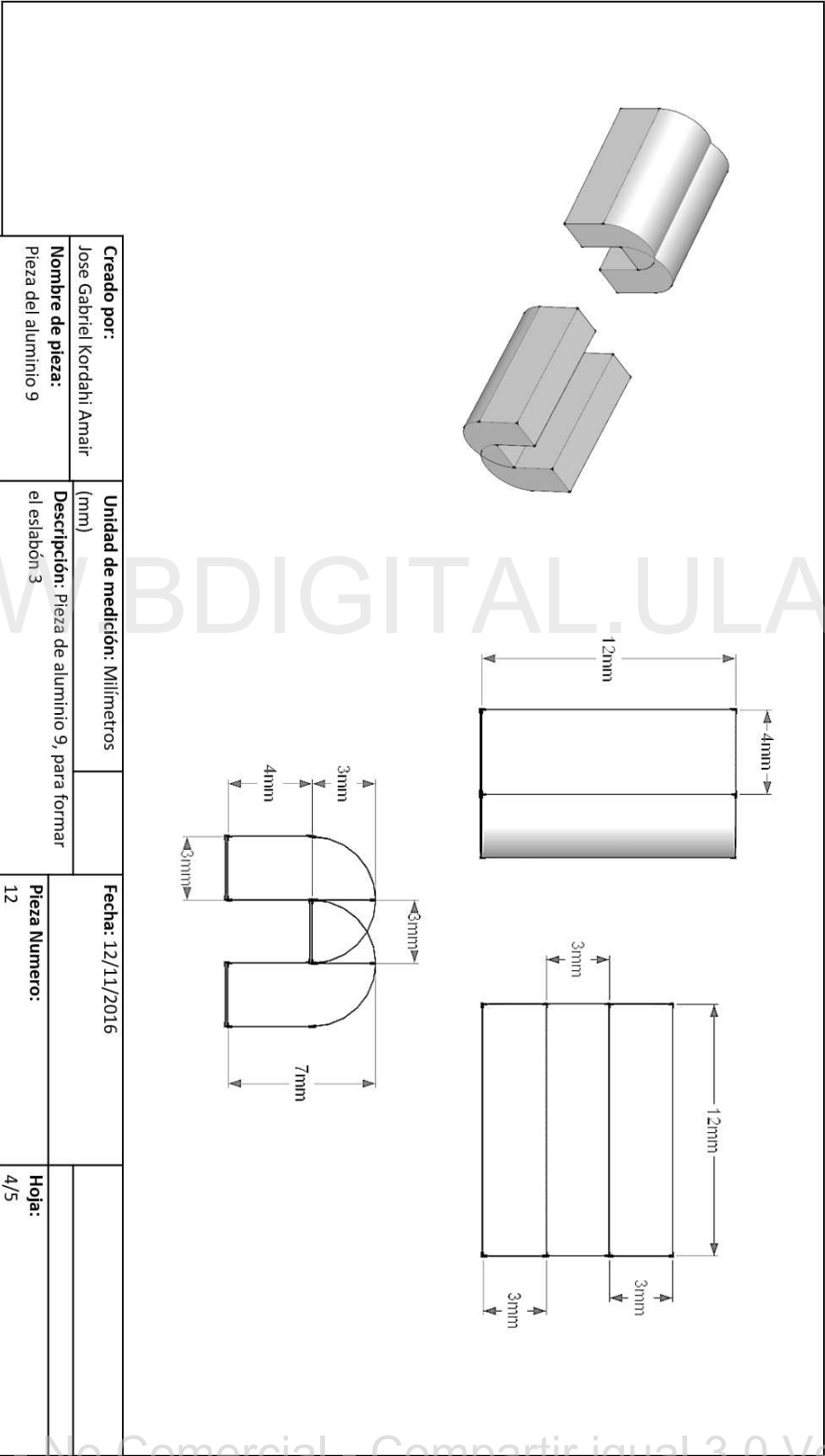


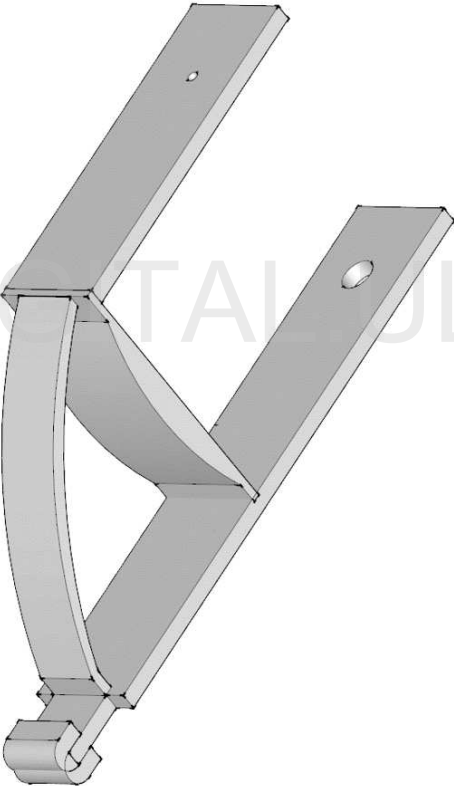
Creado por: Jose Gabriel Kordahi Amair	Unidad de medición: Milímetros	Fecha: 12/11/2016
Nombre de pieza: Ensamble eslabón 2, piezas de aluminio 3, 4 y 5	Descripción: Eslabón 2 completamente ensamblado	Pieza Numero: 8
		Hoja: 4/4









			
Creado por: Jose Gabriel Kordahi Amair	Unidad de medición: Milímetros	Fecha: 12/11/2016	
Nombre de pieza: Ensamble de eslabón 3, piezas de aluminio 6,7,8 y 9	Descripción: Eslabón 3 completamente ensamblado	Pieza Numero: 13	Hoja: 5/5

Pieza 1

Pieza 2

Pieza 3

Pieza a

Pieza 4

Pieza 8

Pieza 13

Pieza número	Descripción
1	Base del robot
2	Base de soporte para servomotor
3	Lamina entre base del robot y servomotor
4	Lamina de eslabón 1
8	Eslabón 2 ensamblado
13	Eslabón 3 ensamblado
a	Servomotor HS5645MG

Creado por: Jose Gabriel Kordahi Amair	Unidad de medición: Milímetros	Fecha: 12/11/2016
Nombre de pieza: Ensamble general de piezas	Descripción: Ensamble de todas las piezas	Pieza Numero:
		Hoja: 1/1

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Bibliografía

Arango, A. y Satizabal, H. (2003). *Diseño e implementación de un robot móvil hexápodo*. Tesis de doctorado, Tesis de Grado. Universidad del Valle, Colombia.

Araujo, L. (2009). Servomotor Modeling with SimMechanics and SimElectronics. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25847-servomotor-modeling-with-simmechanics-and-simelectronics>. Recuperado el 19 de marzo de 2016.

Arruga, S. (2011). *Control de Posicionamiento de la plataforma Hexapod*. Tesis de Pregrado de Ingeniería Industrial. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), Departamento de Matemática Aplicada III. España, Barcelona.

Barrientos, A., Peñín, F., Balaguer, C., y Aracil, R. (1997). Fundamentos de robótica. *España: Editorial McGraw-Hill*.

Bricard, R. (2010). Memoir on the theory of the articulated octahedron. *E.A. Coutsiass, Mathematics Drep, University of New Mexico*.

Bums, M. (1973). The control of walking in orthoptera. i. leg movements in normal waiking. *J. Exp. Biol*, 58:45–58.

Cerrada, M. (2010). Diseño de controladores PI. <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/claudiag/Control2.htm>. Recuperado el 02 de marzo de 2016.

Coppelia Robotics (2016a). V-rep Virtual Robot Experimentation Platform. <http://www.coppeliarobotics.com/>. Recuperado el 25 de mayo de 2016.

Coppelia Robotics (2016b). V-rep Virtual Robot Experimentation Platform, Building a clean model tutorial. <http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/buildingAModelTutorial.htm>. Recuperado el 25 de mayo de 2016.

Coppelia Robotics (2016c). V-rep Virtual Robot Experimentation Platform, Hexapod tutorial. <http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/hexapodTutorial.htm>. Recuperado el 25 de mayo de 2016.

Coppelia Robotics (2016d). V-rep Virtual Robot Experimentation Platform, Importing and exporting shapes. <http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/importExport.htm>. Recuperado el 25 de mayo de 2016.

Coppelia Robotics (2016e). V-rep Virtual Robot Experimentation Platform, Remote API matlab. <http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/remoteApiOverview.htm>. Recuperado el 25 de mayo de 2016.

Cruse, H. (1976). The function of the legs in the free walking stick insect, *carausius morosus*. *Journal of Comparative Physiology*, 112(2):235–262.

Cruse, H. y Bartling, C. (1995). Movement of joint angles in the legs of a walking insect, *carausius morosus*. *Journal of Insect Physiology*, 41(9):761–771.

Dagalakis, N., Albus, J., Goodwin, K., Lee, J., y Tsai, T.-M. (1989). Robot crane technology (final report), nist technical note 1267. structures division, center for building technology. *National Institute of Standards and technology*, 180(15).

Dapena, E. (2015). Robótica industrial, morfología de un robot industrial. Laboratorio de Sistemas discretos, automatización e integración.

Dean, J. y Wendler, G. (1984). Stick insect locomotion on a wheel: patterns of stopping and starting. *Journal of experimental biology*, 110(1):203–216.

Dorf, R. (2001). *Sistemas de Control Moderno 3ª Edición*. Editorial Prentice Hall.

- Escobar, M. y Silva, J. (2011). *Diseño de sistema electrónico jerárquico mediante comandos para robot hexápodo*. Tesis de doctorado, Pontificia universidad javeriana. Facultad de ingeniería, Bogotá d.c. Escuela de ingeniería electronica.
- Escuela Politécnica Superior de Albacete (2010). EL SERVOMOTOR. <http://www.info-ab.uclm.es/labelec/solar/electronica/elementos/servomotor.htm>. Recuperado el 6 de agosto de 2016.
- FANUC (2005). Fanuc Robotics F-200iB-Datasheet. <http://www.fanucrobotics.com/cmsmedia/datasheets/F-200iB> Recuperado el 18 de septiembre de 2015.
- FANUC (2015). FANUC America Corporation CNC, Robot and ROBOMACHINE. <http://www.fanucamerica.com/>. Recuperado el 17 de septiembre de 2015.
- Forest Industries Network (2005). John Deere Tractor Walking Harvester. <http://forestindustry.com/feature-article/world-s-first-prototype-walking-forest-machine-displayed-john-deere-pavilion>. Recuperado el 10 de agosto de 2015.
- Garcia, F. y Nuñez, M. (2009). Diseño y Construcción de un Microrobot Bailarin. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/181/1/38T00169.pdf>. Recuperado el 20 de marzo de 2016.
- Gillott, C. (2005). *Entomology*. Springer Science & Business Media.
- Gillott, C. (2013). *Entomology*. Springer Science & Business Media.
- Grabowska, M., Godlewska, E., Schmidt, J., y Daun-Gruhn, S. (2012). Quadrupedal gaits in hexapod animals—inter-leg coordination in free-walking adult stick insects. *Journal of Experimental Biology*, 215(24):4255–4266.
- Gullan, J. y Cranston, P. (2014). *The insects: an outline of entomology*. John Wiley & Sons.
- Halvorsen, K. (2015). Zenta Robotic Crearions, Blog. <http://zentasrobots.com/robot-projects/>. Recuperado el 14 de septiembre de 2015.

- Hibbeler, R. C. (2004). *Mecánica vectorial para ingenieros: estática*. Pearson Educación.
- Hitec Multiplex (2016). HS-5645MG High Torque, Metal Gear Digital Sport Servo . <http://hitecrcl.com/products/servos/sport-servos/digital-sport-servos/hs-5645mg-high-torque-metal-gear-servo/product>. Recuperado el 22 de septiembre de 2016.
- Iñaki, A. (2011). *Análisis y Descripción de Técnicas de Automatización*. Talleres Gráficos Universitarios Mérida.
- Iserman, R. (1989). *Digital control System, volumen 1: Fundamentals, deterministic control*. Springer.
- Kaiser, D. (2006). Fundamentals of Servo Control Motion. <http://www.compumotor.com/whitepages/ServoFundamentals.pdf>. Recuperado el 20 de marzo de 2016.
- Khalil, W. y Dombre, E. (2004). *Modeling, identification and control of robots*. Butterworth-Heinemann.
- Khatib, O. (2010). Introduction to Robotics, Stanford University Courses. . <http://cs.stanford.edu/groups/manips/teaching/cs223a/>. Recuperado el 6 de febrero de 2016.
- Koch, P., Kesteven, M., Nishioka, H., y Jiang, H. (2009). The amiba hexapod telescope mount. *Australia Telescope National Facility*.
- Kram, R., Wong, B., y Full, R. (1997). Three-dimensional kinematics and limb kinetic energy of running cockroaches. *Journal of Experimental Biology*, 200(13):1919–1929.
- Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático, Séptima edición*. Prentice Hall Hispanoamericana SA.
- Kuyvenhoven, N. (2002). Pid tuning methods, an automatic pid tuning study.

L3 Link Simulation and Training (2012). SIMULATORS THE FUTURE OF TRAINING. Simulator solutions for civilian and military. Rotary Wing Simulation. <https://www.link.com/military/simulation/pages/rotary-wing-simulation.aspx>. Recuperado el 11 de septiembre de 2015.

Latombe, J.-C. (1990). Robot motion planning (the kluwer international series in engineering and computer science).

Lynxmotion (2015). CH3-R Walking Robot. <http://www.lynxmotion.com/c-101-ch3-r.aspx>. Recuperado el 15 de septiembre de 2015.

MapleSoft (2016). Maple 17 Software download. <http://www.maplesoft.com/downloads/SelectPlatform.aspx?hash=D6D02E94B9A4C0CF7D7A59>. Recuperado el 20 febrero de 2016.

Martinez, N. y Fernández, P. (2003). *Robot Hexápodo*. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela de Ingeniería técnica en Electrónica Industrial.

MathWorks (2016). Matlab Download Software Section. <https://www.mathworks.com/downloads/downloads?> Recuperado el 1 de enero de 2016.

Mellado, M. (2013). *Robótica*. Limusa, UNiversidad Politécnica de Valencia.

Merchant, M. (2013). Identifying household ants. <http://citybugs.tamu.edu/factsheets/household/ants-house/ent-2013/>. Recuperado el 22 de junio de 2016.

Mikrolar Inc (2002). Parallel Robotic System, The Hexapod platform over the history. <http://prsko.com/hexapod.html>. Recuperado el 11 de septiembre de 2015.

Moradian, S. y Mohammadi, K. (2011). The algorithm of fault tolerant locomotion of pentapod robot. En *Systems Engineering (ICSEng), 2011 21st International Conference on*, p. 175–179. IEEE.

- MRPT (2013). MRPT Denavit Hartenberg Robotic Arm Kinematics GUI. <http://www.mrpt.org/list-of-mrpt-apps/application-robotic-arm-kinematics/>. Recuperado el 20 febrero de 2016.
- NASA (2005). LIDS Low Impact Docking Station Platform, Engineering Human Space Exploration, Johnson Space Center Engineering Projects. <http://www.nasa.gov/>. Recuperado el 01 de agosto de 2015.
- NASA (2009). The ATHLETE Rover. Division of Jet Propulsion Laboratory, ATHLETE. <https://www-robotics.jpl.nasa.gov/systems/system.cfm?System=11>. Recuperado el 15 de septiembre de 2015.
- Nise, N. (2004). *Control System Engineering, Fourth Edition*. Jhon Weley and Sons.
- Nonami, K., Barai, R. K., Irawan, A., y Daud, M. R. (2014). *Hydraulically actuated hexapod robots*. Springer.
- Ogata, K. (1998). *ingeniería de Control Moderna. 3ª Edición*. Editorial Prentice Hall.
- Oxford Living Dictionaries (2016). Common Definitions of Engineering. <https://en.oxforddictionaries.com/definition/robot>. Recuperado el 8 de marzo de 2016.
- ParallelMIC (2003). The True Origins of Parallel Robots. <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>. Recuperado el 5 de agosto de 2015.
- Patete, A. (2015). Unidad ii: Modelado de sistemas mecánicos y electromecánicos. <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/apatete/Archivos/Modelado/Clase>. Recuperado el 6 de agosto de 2016.
- Perez, J. (2009). *Generación de locomoción de un robot hexápodo usando dos células neuronales analógicas*. Tesis de doctorado, Tesis de maestría en Ciencias. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca, Morelos, México.
- Rivas, J., Patete, A., y Iñaki, A. (2012). *Diseño e Implementación de un Controlador en Lazo Cerrado para el Sistema ?Spring Inchworm Robot?*. Tesis de doctorado,

- IX Congreso Internacional Electrónica y Tecnologías de Avanzada, Colombia, 2012. ISBN: 978-958-99876-5-0.
- Rivas, J. (2012). *Diseño e Implementación de un Controlador en Lazo Cerrado para el Sistema ?Spring Inchworm Robot?*. Tesis de doctorado, Universidad de los Andes, Departamento de Control y automatización. Venezuela, Merida.
- Robot Shop (2016). Lynxmotion Phoenix 3DOF Hexapod Robot Kit (BotBoarduino). <http://www.robotshop.com/en/lynxmotion-phoenix-3dof-hexapod-robot-kit-botboarduino.html>. Recuperado el 30 de septiembre de 2016.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., y Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press.
- Snodgrass, R. E. et al. (1935). Principles of insect morphology. *Principles of Insect Morphology*.
- Steck, K., Wittlinger, M., y Wolf, H. (2009). Estimation of homing distance in desert ants, *cataglyphis fortis*, remains unaffected by disturbance of walking behaviour. *Journal of Experimental Biology*, 212(18):2893–2901.
- Stewart D. (1965). A platform with six degrees of freedom. *Proc. Instn. Engers.*, 180(15).
- Tedeschi, F. y Carbone, G. (2014). Design issues for hexapod walking robots. *Department DICEM, University of Cassino and Southern Lazio*, 180(15).
- Thales Training and Simulation (2015). SIMULATORS THE FUTURE OF TRAINING. Simulator solutions for civilian and military. <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/aerospace/case-study/simulators-future-training>. Recuperado el 11 de septiembre de 2015.
- TrossenRobotics (2015). Hexapod PhantomX AX Mark II. <http://www.trossenrobotics.com/phantomx-ax-hexapod.aspx>. Recuperado el 15 de septiembre de 2015.

- Vandier, K. (2011). Introduction to lagrange with examples, MIT Engineering Dynamics. <https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/>. Recuperado el 11 enero de 2016.
- Zollikofer, C. (1994a). Stepping patterns in ants-influence of body morphology. *Journal of experimental biology*, 192(1):107–118.
- Zollikofer, C. (1994b). Stepping patterns in ants-influence of load. *Journal of experimental biology*, 192(1):119–127.
- Zollikofer, C. (1994c). Stepping patterns in ants-influence of speed and curvature. *Journal of experimental biology*, 192(1):95–106.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE