



# **DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA STEWART COMO MODELO DE ROBOT PARALELO**

**Yesid Alfonso Borda Vivas  
Néstor Eduardo Rojas Moreno**

Universidad Pedagógica Nacional  
Facultad ciencia y tecnología, Departamento de tecnología  
Bogotá, Colombia

2017

# **DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA STEWART COMO MODELO DE ROBOT PARALELO**

**Yesid Alfonso Borda Vivas  
Nestor Eduardo Rojas Moreno**

Trabajo de grado presentado para optar a título de:  
**Licenciado En Electrónica**

Directora:  
Nubia Nathaly Sánchez Galvis M.Sc

Línea de Investigación:  
Robótica

Universidad Pedagógica Nacional  
Facultad ciencia y tecnología, Departamento de tecnología  
Bogotá, Colombia  
2017

## ***Dedicatoria***

*Dedicamos este trabajo de grado a nuestros padres, ya que son pilares dentro de nuestra formación como docentes. A todas las personas que nos acompañaron, apoyaron y estuvieron con nosotros en este proceso académico.*

*«El científico no tiene por objeto un resultado inmediato. Él no espera que sus ideas avanzadas sean fácilmente aceptadas. Su deber es sentar las bases para aquellos que están por venir y señalar el camino».*

*Nikola Tesla*

## **Agradecimientos**

Agradecemos a la profesora Nubia Nathaly Sánchez Galvis, magister en automatización industrial, la cual asesoró este trabajo de grado y fue de gran ayuda sus asesorías, a los docentes de la Universidad Pedagógica Nacional por su contribución a la formación de licenciados en electrónica y futuros educadores para el desarrollo de la ciencia y tecnología.

## RESUMEN


En este trabajo se desarrolla una plataforma Stewart partiendo de un análisis geométrico el cual permite la obtención de un modelo CAD (diseño asistido por computadora) mediante el software Solidworks, Posteriormente se realiza el ensamble físico que consta de dos plataformas de forma hexagonal unidas en paralelo por seis eslabones que son dirigidos por los actuadores eléctricos. A través de la plataforma en Matlab se calculan las variables para generar el pwm necesarias en cada uno de los actuadores, de tal forma que los seis servo motores puedan ser eficaces, Por último se genera una interfaz gráfica de usuario por medio del toolbox GUIDE–Matlab que permite el control del sistema mecánico en cuanto a posición y orientación de la plataforma superior en los ejes (X; Y; Z; Pitch; Yaw; Roll).

**Palabras clave:** plataforma móvil, plataforma base, eslabones, cinemática, grados de libertad.


## ABSTRACT

In this degree work is development a Stewart platform starting with a geometric analysis allowing obtained a CAD model (computer aided design) through Solidworks software. Subsequently, the physical assembly realized consists of two hexagonal platforms joined parallel by six links that are controlled by the electrical actuators. The Matlab platform calculates the variables to generate the required pwm for each actuators, so that the six servo motors can be effective. Finally, a graphical user interface is generated by means of the GUIDE-Matlab toolbox, which allows the control of mechanical system about position and orientation of the upper platform on X, Y, Z, Pitch, Yaw, Roll axis.

**Keywords:** (Mobile platform, base platform, links, kinematics, degrees of freedom.)

 <b>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL</b> <i>Enseñanza de la Pedagogía</i>	<b>FORMATO</b>	
	<b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
<b>Código: FOR020GIB</b>		<b>Versión: 01</b>
<b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>		<b>Página 7 de 110</b>

<b>1. Información General</b>	
<b>Tipo de documento</b>	Trabajo de Grado
<b>Acceso al documento</b>	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
<b>Título del documento</b>	Desarrollo E Implementación De Una Plataforma Stewart Como Modelo De Robot Paralelo
<b>Autor(es)</b>	Borda Vivas, Yesid Alfonso, Rojas Moreno, Néstor Eduardo
<b>Director</b>	Nubia Nathaly Sánchez Galvis M.Sc
<b>Publicación</b>	Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional, 2017, 100p.
<b>Unidad Patrocinante</b>	Universidad Pedagógica Nacional
<b>Palabras Claves</b>	PLATAFORMA MÓVIL, PLATAFORMA BASE, ESLABONES, CINEMÁTICA, GRADOS DE LIBERTAD.
<b>2. Descripción</b>	
<p>Trabajo de grado en el cual se desarrolla una plataforma Stewart partiendo de un análisis geométrico el cual permite la obtención de un modelo CAD (diseño asistido por computadora) mediante el software SolidWorks, Posteriormente se realiza el ensamble físico que consta de dos plataformas de forma hexagonal unidas en paralelo por seis eslabones que son dirigidos por los actuadores eléctricos. A través de la plataforma en Matlab se calculan las variables para generar el PWM necesarias en cada uno de los actuadores, de tal forma que los seis servo motores puedan ser eficaces, Por último se genera una interfaz gráfica de usuario por medio del TOOLBOX GUIDE–MATLAB que permite el control del sistema mecánico en cuanto a posición y orientación de la plataforma superior en los ejes (X; Y; Z; Pitch; Yaw; Roll).</p>	

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Encuentro de saberes</i>	<b>FORMATO</b>	
	<b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
<b>Código: FOR020GIB</b>	<b>Versión: 01</b>	
<b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>	<b>Página 2 de 110</b>	

3. Fuentes
<p>(s.f.).</p> <p>Acuña, h. g. (2009 ). <i>cinematica inversa y analisis del espacio de trabajo de una plataforma stewart</i> . bucaramanga,colombia .</p> <p>Adrián, c. h. (2013). <i>desarrollo de una plataforma stewart basada en micorcontroladores, para simular el comportamiento de una aeronave en tres grados de libertad</i>. mexico d.f.: instituto politécnico nacional .</p> <p>Ahlgren, d. (2002). an internacional view of robotics as an educational medium. <i>internacional conference on engenieering education (icee)</i>. manchester, uk .</p> <p>Benavides, p. k. (s.f.). recuperado el 08 de 2017, de <a href="http://www.kramirez.net/">http://www.kramirez.net/</a></p> <p>Blanco, j. l. (16 de 02 de 2013). <i>ciencia explicada</i> . recuperado el 2017, de <a href="http://www.ciencia-explicada.com/2013/02/parametrizacion-denavit-hartenberg-para.html">http://www.ciencia-explicada.com/2013/02/parametrizacion-denavit-hartenberg-para.html</a></p> <p>Claraco, j. l. (16 de febrero de 2013). <a href="http://www.ciencia-explicada.com">http://www.ciencia-explicada.com</a>. recuperado el 24 de julio de 2017, de <a href="http://www.ciencia-explicada.com/2013/02/parametrizacion-denavit-hartenberg-para.html">http://www.ciencia-explicada.com/2013/02/parametrizacion-denavit-hartenberg-para.html</a></p> <p>Comunicación, s. d. (s.f.). <a href="http://www.uv.es">http://www.uv.es</a>. obtenido de <a href="http://www.uv.es">http://www.uv.es</a>.</p> <p>Gonzáles, a. p. (05 de 12 de 2008). <i>enciclopedia virtual de ingeniería mecánica</i>. recuperado el 01 de 08 de 2017, de mecapeda: <a href="http://www.mecapeda.uji.es/formula_de_grubler.htm">http://www.mecapeda.uji.es/formula_de_grubler.htm</a></p> <p>Joe jhonson, r. p. (2016). <i>desing and kinematics analisis of a 6 - dof parallel manipulator for pharmaceutical application</i> . jcps .</p> <p>Justo, a. l. (2008). fundamentos del kbe. en j. a. ligero, <i>aplicación al diseño de engranajes</i> (págs. 42 - 49). sevilla .</p> <p>Lopez, m. j., saravia, d. b., &amp; riaz, h. f. (2009). Revisión del estado del arte de manipuladores paralelos. pereira: universidad tecnologica de pereira.</p> <p>Mario garcia sanz, m. m. (2015). <i>Herramientas para el estudio de robots de cinemática paralela: simulador y prototipo experimental</i> . pamplona,spain.</p> <p>Merlet, j. p. (s.f.). <i>Parallel robots</i>. inria,sophia-antipolis,france: g.m.l gladwell.</p>



Ozkol, i. (s.f.). *A study on the dinamic analysis and control off 6 - 3 stewart platform mechanism*. malak, istanbul, turkey : aeronautics and astronautics faculty i.t.u.

q., z. c. (2007). Recuperado el 2017, de  
[http://www.unrobotica.com/manuales/sesion\\_1\\_atmega8.pdf](http://www.unrobotica.com/manuales/sesion_1_atmega8.pdf)

viso, e. (19 de 01 de 2006). *Xataka ciencia* . recuperado el 26 de 07 de 2017, de  
<https://www.xatakaciencia.com/robotica/el-origen-de-la-palabra-robot>

Zamudio, p. m. (2009). *Análisis cinemático de un manipulador paralelo híbrido*. ciudad de méxico: universidad nacional autónoma de.

Zevallos, d. l. (2013). *Sistema de control de la cinemática de una*. lima.

#### 4. Contenidos

Introducción

Marco Teórico

Análisis Geométrico Del Sistema

Implementación Electrónica De La Plataforma Stewart

Cinemática

Desarrollo GUI


Posiciones básicas

- Movimiento eje X
- Movimiento eje Y
- Movimiento eje Z
- Movimiento Rotacional Yaw
- Movimiento Rotacional Roll
- Movimiento Rotacional Pitch

Conclusiones

Trabajo Futuro

#### 5. Metodología

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Encuentro de saberes</i>	<b>FORMATO</b>	
	<b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
<b>Código: FOR020GIB</b>	<b>Versión: 01</b>	
<b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>	<b>Página 3 de 110</b>	

6. Conclusiones
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con el modelo geométrico de la Plataforma Stewart se obtuvo las dimensiones de la estructura y la posición que debe tomar los actuadores respecto a los movimientos dentro de su espacio de trabajo.</li> <li>• Por medio del diseño CAD se logra modelar mecánicamente el sistema a implementar, con el fin de realizar modificaciones previas a la construcción.</li> <li>• Las herramientas computacionales son fundamentales para el desarrollo de los algoritmos del programa para modelar y simular la plataforma Stewart</li> <li>• La interfaz gráfica permite la interacción entre el usuario y la plataforma Stewart permitiendo la visualización de su comportamiento</li> </ul>

<b>Elaborado por:</b>	Borda Vivas, Yesid Alfonso; Rojas Moreno, Néstor Eduardo
<b>Revisado por:</b>	

<b>Fecha de elaboración del Resumen:</b>	23	08	2017
--	----	----	------

## CONTENIDO

RESUMEN.....	5
LISTADO DE ILUSTRACIONES:.....	13
LISTADO DE TABLAS.....	17
INTRODUCCIÓN.....	18
<b>1. Marco Teórico .....</b>	<b>20</b>
<b>1.1 Estado del arte.....</b>	<b>20</b>
1.1.1 Uso de la robótica.....	21
1.1.2 Robots seriales.....	21
1.1.3 Robots paralelos .....	22
<b>1.2 Grados de libertad (G.D.L) .....</b>	<b>28</b>
<b>1.3 Tipos de eslabones .....</b>	<b>30</b>
<b>1.4 Fundamentos matemáticos.....</b>	<b>30</b>
1.4.1 Ejes de coordenadas.....	31
<b>1.5 Modelos cinemáticos: .....</b>	<b>32</b>
1.5.1 La cinemática directa .....	33
1.5.2 La cinemática inversa .....	33
<b>1.6 Método geométrico.....</b>	<b>33</b>
1.6.1 Sistema biela manivela .....	34
1.6.2 Mecanismo de cuatro barras .....	36
<b>1.7 Metodología de Denavit-Hartenberg.....</b>	<b>38</b>
<b>2 ANÁLISIS GEOMÉTRICO DEL SISTEMA .....</b>	<b>40</b>
<b>2.1 Grados De Libertad (GDL).....</b>	<b>40</b>
2.1.1 ANÁLISIS GEOMÉTRICO DE ORIENTACIÓN .....	42
2.1.2 Basados en la geometría de un triángulo equilátero encontramos .....	43
2.1.3 Coordenadas X , Y para las juntas (plataforma móvil).....	45
<b>2.2 Diseño CAD Plataforma Stewart.....</b>	<b>46</b>
2.2.1 Plataforma Móvil.....	47
2.2.2 Plataforma Base .....	47
2.2.3 Eslabón .....	48
2.2.4 Servomotor diseño libre en CAD.....	50

<b>2.2.5</b>	<b>PLATAFORMA ACOPLADA EN SOLIDWORKS</b>	51
2.3	<b>Construcción</b>	52
<b>2.3.1</b>	<b>SERVOMOTORES</b>	58
<b>2.3.2</b>	<b>GIRO DEL SERVOMOTOR</b>	59
2.4	<b>Restricciones de la plataforma Stewart</b>	59
3	<b>Implementación Electrónica de la plataforma Stewart</b>	60
3.1	Microcontrolador	60
3.2	Fuente de alimentación	62
3.3	Software de desarrollo	63
4	<b>CINEMÁTICA</b>	65
4.1	CINEMÁTICA INVERSA POR MÉTODO GEOMÉTRICO	65
4.2	<b>Robot de 2GDL</b>	65
4.3	<b>Distancia eslabón principal</b>	72
4.4	<b>Distancia Eslabones Principales Eje X</b>	75
4.4.1	<b>Posicionamiento De La Plataforma Móvil En Eje Y</b>	78
4.4.2	<b>Posicionamiento De La Plataforma Móvil En Eje Z</b>	79
4.5	<b>Grados Del Motor</b>	81
4.5.1	<b>Simulación grados de los motores:</b>	81
4.5.2	<b>Programación:</b>	81
5	<b>Desarrollo GUI</b>	86
5.1	<b>Interfaz gráfica</b>	86
5.2	<b>Algoritmo</b>	94
5.3	<b>Conexión con la plataforma de desarrollo</b>	97
6	<b>Posiciones Básicas – Resultados</b>	98
6.1	Movimiento eje X	98
6.2	Movimiento eje Y	99
6.3	Movimiento eje Z	101
6.4	Movimiento Rotacional Yaw	102
6.5	Movimiento Rotacional Roll	104
6.6	Movimiento Rotacional Pitch	105
7.	<b>Conclusiones</b>	107
8.	<b>Trabajo futuro</b>	108

REFERENCIAS .....	109
-------------------	-----

## LISTADO DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1: Robot serie, Algunos derechos reservados al autor <a href="http://www.freepik.com">http://www.freepik.com</a>	22
Ilustración 2: plataforma de J.E. Gwinnett derechos reservados a PATRICIO MARTÍNEZ ZAMUDIO "Análisis Cinemático de un Manipulador Paralelo Híbrido Tipo Delta", Diciembre 2009.....	23
Ilustración 3: plataforma de Willard L.V. derechos reservados BABETH P. SARAIVA - H. LOPEZ - Q. RIAZA, REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE MANIPULADORES PARALELOS agosto de 2009. ....	23
Ilustración 4: Plataforma Gough derechos reservados a PATRICIO MARTÍNEZ ZAMUDIO "Análisis Cinemático de un Manipulador Paralelo Híbrido Tipo Delta", Diciembre 2009. ..	24
Ilustración 5: Plataforma Stewart - derechos reservados BABETH P. SARAIVA - H. LOPEZ - Q. RIAZA, REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE MANUPULADORES PARALELOS agosto de 2009	
Ilustración 6: Plataforma simulador de vuelo - K.L Capper, derechos reservados a PATRICIO MARTÍNEZ ZAMUDIO "Análisis Cinemático de un manipulador paralelo híbrido tipo delta", Diciembre 2009	
Ilustración 7 Plataforma Stewart Universidad politécnica de Madrid	27
Ilustración 8 plano tres grados de libertad - Conceptos y funciones de cinemática – Universidad de Huelva – Profesor Rafael Sánchez Sánchez .....	28
Ilustración 9 espacio con tres grados de libertad - Conceptos y funciones de cinemática – Universidad de Huelva – Profesor Rafael Sánchez Sánchez .....	29
Ilustración 10 esquemas, nombres y símbolos pares cinemáticos - Conceptos y funciones de cinemática – Universidad de Huelva – Profesor Rafael Sánchez Sánchez .....	29
Ilustración 11 articulación rotacional y prismática -inteligencia artificial y robótica - 2010 - Mg Samuel Oporto Díaz .....	30
Ilustración 12 eslabón y par cinemático – Autoría Propia .....	30
Ilustración 13 tipos de eslabones – Autoría Propia .....	30

Ilustración 14 ejes de coordenadas, GEOMETRÍA ANALÍTICA, Universidad Veracruzana, Profesor Antonio Herrera Escudero .....	31
Ilustración 15 Sistema polar, Geometría analítica plana, unam – (Lehmann - Dugas, Rene, A history of mechanics, Dover, NY, 1988).....	31
Ilustración 16 coordenadas esféricas -, Geometría analítica plana, unam – (Lehmann - (Dugas, Rene, A history of mechanics, Dover, NY, 1988) .....	32
Ilustración 17 Brazo robótico "codo arriba" con dos grados de libertad – Autoría Propia..	33
Ilustración 18 Brazo robótica "codo abajo", método geométrico.....	34
Ilustración 19 Movimientos biela manivela - Máquinas y mecanismos - <a href="http://vinuar75tecnologia.pbworks.com/f/máquinas+y+mecanismos+1%C2%BA+eso.pdf">http://vinuar75tecnologia.pbworks.com/f/máquinas+y+mecanismos+1%C2%BA+eso.pdf</a>	35
Ilustración 20 Movimiento Biela manivela - 2005 CEJAROSU - <a href="http://concurso.cnice.mec.es">http://concurso.cnice.mec.es</a> .....	35
Ilustración 21 biela manivela – Autoría Propia .....	36
Ilustración 22 capacidad de movilidad en un mecanismo de cuatro barras. – MECANISMOS - Elementos de Máquinas. Profesor: Dr. Ing. Marcelo Tulio Piovan .....	37
Ilustración 23 sistemas algebraico de un mecanismo de cuatro barras - MECANISMOS - Elementos de Máquinas. Profesor: Dr. Ing. Marcelo Tulio Piovan.....	37
Ilustración 24 - Robótica: control de robots manipuladores - Conversión Denavit- Harterberg para un manipulador - Figura 4.8 - Página 246 .....	38
Ilustración 25 Plataforma Base - <b>Coordenadas X , Y para los motores (plataforma base)</b> – Autoría Propia.....	42
Ilustración 26 Base con motores – Autoría Propia .....	43
Ilustración 27Plataforma móvil - coordenadas juntas– Autoría Propia.....	45
Ilustración 28 Plataforma móvil – Autoría Propia.....	47
Ilustración 29 Plataforma Base – Autoría Propia .....	48
Ilustración 30 Eslabones – Autoría Propia .....	49
Ilustración 31 Servo Motor – <a href="http://www.grabcad.com">www.grabcad.com</a> .....	50
Ilustración 32 plataforma Stewart Modelo CAD – Autoría Propia teniendo en cuenta el diseño de los motores son de <a href="http://www.grabcad.com">www.grabcad.com</a> .....	51
Ilustración 33 Madera Aglomerado - <a href="http://ajbermudez.com/3c/departamentos/ebanisteria/paneles/">http://ajbermudez.com/3c/departamentos/ebanisteria/paneles/</a> .....	52

Ilustración 34 Barrilla 0.5 mm - <a href="http://www.angelacolls.com/es_ES/media/3060100200_10.jpg_1_800_1_600_/varilla-acero-1250c.-200x3-mm.jpg">http://www.angelacolls.com/es_ES/media/3060100200_10.jpg_1_800_1_600_/varilla-acero-1250c.-200x3-mm.jpg</a> .....	52
Ilustración 35 terminales e cobre - <a href="http://www.icasa.com.ve/productos.php">http://www.icasa.com.ve/productos.php</a> .....	53
Ilustración 36 Motor Tower - <a href="http://www.datasheetcafe.com/sg-5010-datasheet-servo-motor/">http://www.datasheetcafe.com/sg-5010-datasheet-servo-motor/</a> .....	53
Ilustración 37 Tornillo .....	54
Ilustración 38 Plataforma móvil – Autoría Propia .....	54
Ilustración 39 Plataforma Base – Autoría Propia .....	55
Ilustración 40 Servo-motores– Autoría Propia .....	55
Ilustración 41 Unión terminal con barrilla de 0.5 mm – Autoría Propia .....	56
Ilustración 42 Plataforma ensamblada – Autoría Propia .....	57
Ilustración 43 <a href="http://www.datasheetcafe.com/sg-5010-datasheet-servo-motor/">http://www.datasheetcafe.com/sg-5010-datasheet-servo-motor/</a> .....	58
Ilustración 44 posiciones de un servo motor – <a href="http://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor">www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor</a> .....	59
Ilustración 45 Atmega 328p - <a href="http://www.atmel.com/avr">http://www.atmel.com/avr</a> .....	60
Ilustración 46 Atmega 328p <a href="http://www.atmel.com/avr">http://www.atmel.com/avr</a> .....	61
Ilustración 47 <b>fuentes ATX</b> <a href="http://www.electronicasi.com/como-funciona/fuentes-conmutadas/">http://www.electronicasi.com/como-funciona/fuentes-conmutadas/</a> .....	62
Ilustración 48 Gui Matlab <a href="https://www.mathworks.com/help/Matlab/creating_guis/about-the-simple-guide-gui-example.html">https://www.mathworks.com/help/Matlab/creating_guis/about-the-simple-guide-gui-example.html</a> .....	63
Ilustración 49 Plot3d Matlab <a href="https://www.mathworks.com/help/Matlab/creating_guis/about-the-simple-guide-gui-example.html">https://www.mathworks.com/help/Matlab/creating_guis/about-the-simple-guide-gui-example.html</a> .....	64
Ilustración 50 vista superior de un robot 2 G.D.L Universidad de Santiago de Chile - <a href="http://www.udesantiagoovirtual.cl/moodle2/mod/book/view.php?id=24918&amp;chapterid=295">http://www.udesantiagoovirtual.cl/moodle2/mod/book/view.php?id=24918&amp;chapterid=295</a> .....	65
Ilustración 51- Vista lateral de un robot de 2GDL codo abajo - Universidad de Santiago de Chile. <a href="http://www.udesantiagoovirtual.cl/moodle2/mod/book/view.php?id=24918&amp;chapterid=295">http://www.udesantiagoovirtual.cl/moodle2/mod/book/view.php?id=24918&amp;chapterid=295</a> .....	66
Ilustración 52 Eslabones y motor – Autoría Propia .....	66
Ilustración 53 Punto P - distancia entre el eje del motor y la unión con la plataforma móvil, vista de frente o alzado – Autoría Propia. ....	67
Ilustración 54 Ángulos respecto al eslabón 1 y el eslabón 3 – Autoría Propia .....	68
Ilustración 55 Ángulo Beta – Autoría Propia .....	70

Ilustración 56 Triangulo para hallar el ángulo $\theta_2$ – Autoría Propia .....	70
Ilustración 57 Angulo $\theta_1$ – Autoría Propia.....	72
Ilustración 58 Ortoedro con Pitágoras 3d - <a href="http://www.geometriadinamica.cl">http://www.geometriadinamica.cl</a> - 21 de julio de 2008 .....	72
Ilustración 59 Hipotenusa entre a y b.....	73
Ilustración 60 Hipotenusa 2 - Pitágoras 3d.....	73
Ilustración 61 Pitágoras 3d - hipotenusa 1- Plataforma Stewart – Autoría Propia.....	74
Ilustración 62 Eslabón principal - plataforma Stewart – Autoría Propia .....	75
Ilustración 63 eje X en 0 – Autoría Propia .....	77
Ilustración 64 Plataforma Movimiento en el eje Y – Autoría propia.....	79
Ilustración 65 Posicionamiento en el eje Z - Autoría propia.....	80
Ilustración 66 Plot del código – posición X=0 –eslabones 6 y 1 respectivamente – Autoría Propia .....	84
Ilustración 67 Plot eje x = 4 – Autoría Propia .....	85
Ilustración 68 Plot eje x = -4 – Autoría Propia .....	86
Ilustración 69 boceto GUI – Autoría Propia .....	87
Ilustración 70 Sliders, movimientos básicos – Matlab .....	88
Ilustración 71 Propiedades de los .....	88
Ilustración 72 Propiedades del slider - máximos y Mínimos Matlab.....	89
Ilustración 73 Títulos y sliders Matlab .....	89
Ilustración 74 Slider y Axes1 Matlab .....	91
Ilustración 75 Simulación Plataforma Stewart Matlab.....	92
Ilustración 76 referencia a los movimientos Yaw, Roll y Pitch - <a href="https://www.novatel.com/solutions/attitude/">https://www.novatel.com/solutions/attitude/</a> .....	92
Ilustración 77 Slider con los 6 grados de libertad Matlab .....	93
Ilustración 78 Gui Plataforma Stewart Matlab.....	94
Ilustración 79 Diagrama de Bloques .....	95
Ilustración 80 Algoritmo Para hallar los grados - de eslabones .....	96
Ilustración 81Imagen GUIDE-Matlab eje X= 4 Matlab .....	98
Ilustración 82Imagen GUIDE-Matlab eje X= -4 Matlab.....	99
Ilustración 83Imagen GUIDE-Matlab eje Y= 2.5 Matlab .....	100
Ilustración 84Imagen GUIDE-Matlab eje Y= -2.5 Matlab .....	100
Ilustración 85Imagen GUIDE-Matlab eje Z= 1.3 Matlab .....	101



Ilustración 86 Imagen GUIDE-Matlab eje Z= -1.3 Matlab .....	102
Ilustración 87 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Yaw= -20° Matlab .....	103
Ilustración 88 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Yaw= 20° Matlab.....	103
Ilustración 89 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Roll= -10° Matlab .....	104
Ilustración 90 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Roll= 10° Matlab .....	105
Ilustración 91 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Pitch= -10° Matlab .....	106
Ilustración 92 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Pitch= 10° Matlab.....	106

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Eslabones principales eje X.....	71
Tabla 2. Eslabones principales eje Y.....	72
Tabla 3 Eslabones principales eje Z .....	73

# INTRODUCCIÓN

La robótica ha sido estudiada y tratada como área de investigación para aplicaciones de gran interés, como es el caso de la industria, la aviación, automovilismo, etc. Los robots han atraído la atención del ser humano por su uso para realizar tareas complejas, de alta precisión y en donde sea necesario mantener la seguridad del operario, Además de generar una articulación entre la matemática, electrónica y sistemas de cómputo tanto de simulación como de programación. Por estos motivos se observa un crecimiento de esta área en el sector de la educación. La motivación de los estudiantes mejora en la medida en que los conceptos dejan de ser abstractos (Ahlgren, 2002).

La plataforma Stewart es un robot de topología paralela, este sistema de posicionamiento espacial es capaz de ubicarse dentro de cualquier punto en su espacio de trabajo, tanto en su eje traslacional como rotacional, en esta plataforma los actuadores funcionan entrelazados con cadenas cinemáticas cerradas para mejorar la fuerza, precisión y rigidez estructural. Actualmente se utilizan este tipo de plataformas en direccionamiento de antenas en sistemas de comunicación, tareas de alta precisión como intervenciones quirúrgicas, ubicación de paneles solares, pero inicialmente se originó con la finalidad de simulaciones de vuelo para la ayuda en el entrenamiento de los pilotos, debido a que pueden interactuar y tener reacciones físicas dentro de un espacio simulado.

En este documento se encuentra el marco teórico donde el lector puede hallar las diversas temáticas aplicadas al modelado, diseño, construcción de una plataforma Stewart además de encontrar descrito los tipos de plataforma existentes. También se aclara todas las temáticas que serán utilizados en el análisis matemático.

En el segundo capítulo se describe el análisis geométrico de la estructura con el cual obtendremos la orientación por coordenadas X, Y, Z, suficiente para dar inicio a un posterior análisis matemático, con estos parámetros geométricos desarrollados se genera el diseño CAD de la plataforma utilizando software Solidworks, la forma de la estructura de un robot paralelo con seis grados de libertad se desarrolló en el año 1965, por el ingeniero D.Stewart, la cual consta de dos plataformas hexagonales con sus respectivos

eslabones ensamblados en paralelo entre la plataforma móvil y la plataforma base, con este se busca posicionar la plataforma móvil en los ejes de rotación y traslación de manera controlada y basados en el modelo matemático encontrado, con el diseño asistido por computadora obtenemos una primera idea de los movimientos que puede tener este robot paralelo.

Para el tercer capítulo se realiza el análisis cinemático de la plataforma Stewart. Se utiliza el método geométrico el cual se basa en encontrar la mayor cantidad de relaciones trigonométricas. Para averiguar la distancia de los ejes del motor hasta las juntas y con ello obtener los valores de los ángulos que son aplicables para los actuadores respecto a la posición final de las juntas superiores.

Con el desarrollo estructural y matemático terminado se da inicio al capítulo cuarto en el que se posiciona la plataforma sobre sus seis ejes de movimiento (X, Y, Z, SPITCH, YAW, ROLL) respecto al centro de la plataforma base, con la ayuda del software Matlab se desarrolla un código acorde al movimiento deseado basándose en los análisis y datos suministrados del método geométrico nombrados anteriormente.

El Capitulo cinco se genera un diseño GUI (interfaz gráfica de usuario), para que una persona sin conocimientos en programación o electrónica sea capaz de controlar la movilidad de la plataforma Stewart, además el diseño GUI mejora el aspecto visual de los cálculos generados y que fueron aplicados al código, así volver icónica e interactiva la plataforma en su desarrollo computacional. Este diseño se realizó con el software Matlab – guide.

Al finalizar en el capítulo seis encontrará las conclusiones del desarrollo e implementación de la plataforma Stewart.

# 1.Marco Teórico

La robótica reúne un conjunto de disciplinas como la electrónica, mecánica, matemática, física e informática, convirtiéndose así en una de las más importantes a la hora de innovación y desarrollo industrial, a partir de esta ciencia se realiza estudios de estructuras, control, mecánica, operación, informática, la inteligencia artificial e instrumentación electrónica entre otras ramas. Según la federación internacional de robótica “IFR”, un robot es una máquina de manipulación con tres o más ejes de libertad automática y programable.

La plataforma Stewart posee los grados de libertad suficientes para simular el control de vuelo de un avión, por su morfología en paralelo el sistema es de respuesta rápida, así los pilotos pueden realizar pruebas en diversas situaciones que se puedan presentar en la vida real. Así mismo se usa en el posicionamiento de antenas, cirugías de precisión entre otras muchas más aplicaciones.

## 1.1 Estado del arte

Desde que la revolución industrial comenzó, el hombre ha incrementado la producción, generando una mayor contribución por parte de las máquinas, la misma manufactura ha hecho que se necesiten mayores velocidades y precisión en la construcción de los productos. Por tal motivo el desarrollo de la robótica se incrementó ya que éste logra suplir algunos problemas que no se podían solucionar tan fácilmente con la mano de obra humana, estos problemas se ven reflejados con el manejo repetitivo y la precisión que se debe tener en la construcción de algunas mercancías.

En la actualidad se han desarrollado estudios para dos tipos de robots industriales. Cada uno contiene características y versatilidades distintas teniendo en cuenta sus uniones y la cinemática (conjunto de elementos que producen movimiento y una fuerza) que conlleva cada uno en su construcción, a estos los podemos clasificar como robots serie y paralelo, los cuales están formados por cadenas cinemáticas, estas definidas como un conjunto de eslabones (elemento rígido “barra”) conectados por medio de juntas (unión); los robots tipo serie son aquellos que se encuentran ensamblados por medio de eslabones y juntas sin una terminal fija, mientras que los robots paralelos son aquellos que su cinemática está definida por medio de eslabones ensamblados por juntas saliendo y llegando a una misma base o terminal.

### **1.1.1 Uso de la robótica**

El hombre ha imaginado estructuras que le han servido para realizar diferentes actividades muy pesadas o repetitivas construyendo artefactos para este fin. Gracias al avance de la electrónica se comenzó a realizar máquinas autónomas y eficaces, pero todavía no se hablaba de un término en común para estas máquinas ya que se consideraban aparatos de asistencia para la industria por su gran tamaño. En el año 1921 se utilizó por primera vez la palabra robot cuyo significado es servidumbre o esclavo, utilizada en una obra de teatro llamada Rossum's Universal Robot. Por el escritor checo Karen Capek en el teatro nacional de Praga (Viso, 2006). La obra exaltaba a la luz una especie de andróides con aspecto humanoide que realizan trabajos físicos para sus jefes. Esto conlleva a que la palabra haga referencia a toda máquina que tenga aspecto antropomorfo se referencia como robot. La ciencia ficción ha impulsado dicha palabra para denotar a las máquinas de forma humanoide, en los libros y películas también podemos observar esta denotación a las máquinas que sirven a los protagonistas. El escritor ruso Isaac Asimov creo gracias a sus novelas las tres leyes de la robótica, estas han sido el pilar fundamental al programar o construir a los robots actuales.

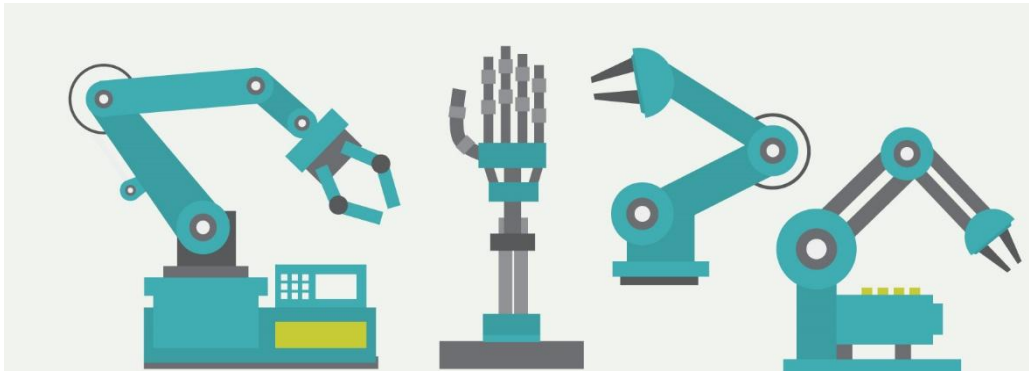
La construcción de dispositivos electrónicos más pequeños, ha hecho que la robótica sea cada vez más cómoda a la hora de su construcción, los avances que se han realizado desde la revolución industrial y el uso de la tecnología en diferentes ambientes se creció con la producción de artefactos, dispositivos y herramientas que hacen más fácil las tareas repetitivas. Estos, son mecanismos automáticos que ayudan y sustituyen la mano productora humana en oficios de alto riesgo o precisión.

### **1.1.2 Robots seriales**

Para entender el funcionamiento de cada uno de los tipos de robots manipuladores (serie y paralelo). Los hombres siempre han tenido una fascinación por las máquinas que puedan recrear los movimientos de los seres vivos. Los robots tienen múltiples aplicaciones a nivel industrial y educativo y han sido objeto de estudio en los últimos años evolucionando continuamente, uno de los campos más investigados en lo que se refiere a robótica ha sido en el diseño de robots manipuladores tipo serie, ya que su estructura y análisis es más sencilla; en este campo se puede hallar una cantidad mayor de información que en el campo de los robots manipuladores paralelos, podemos establecer que cada uno tiene sus ventajas y desventajas a la hora de diseñar, construir y aplicar.

Los robots serie pueden tener unas características que lo hace útil en algunos ambientes industriales como académicos por su morfología claramente antropológica, teniendo una cadena cinemática de lazo abierta y al poseer una serie de eslabones y uniones crean una articulación que puede asemejarse a las extremidades superiores del ser humano,

estas posibilitan un alcance mayor, en algunos casos pueden tener en sus extremos un manipulador mecánico con el cual sujetar algún objeto, como se puede observar en la ilustración 1, en la industria se utilizan como ayudantes de procesos en donde se necesite sostener elementos que estén muy calientes o en extremo fríos, en investigaciones químicas o de corrosión, activadas que el ser humano no puede realizar por el peligro que estas pueden conllevar; también los podemos ver en industrias de armado colocando piezas o ajustando elementos en una cadena de producción, entre otras tareas.



*Ilustración 1: Robot serie, Algunos derechos reservados al autor <http://www.freepik.com>*

Las desventajas que podemos encontrar en este tipo de robot serial (manipulador) son las siguientes:

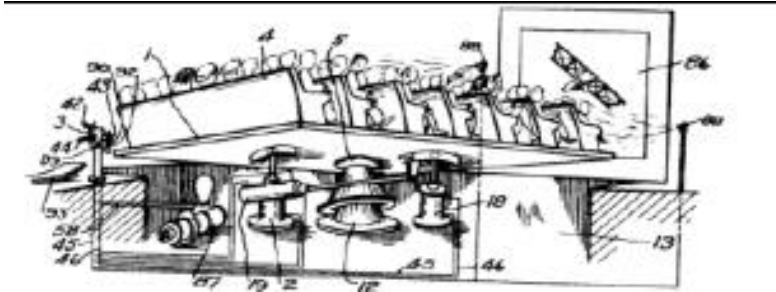
- Velocidades de desplazamientos muy bajas por la distancia que deben recorrer.
- Imposibilidad al manipular elementos muy pesados.

### 1.1.3 Robots paralelos

Por otro lado, existen los robots manipuladores paralelos, este tipo de robot contiene varias cadenas cinemáticas de lazo cerrado, en su construcción se derivan dos plataformas una fija que llamaremos base “fija” y una plataforma móvil “órgano terminal” que será ubicada al extremo contrario de la fija estando estas unidas por eslabones y juntas creando varias cadenas cinemáticas de lazo cerrado, este tipo de diseño lo podemos observar principalmente en simuladores de vuelo, simuladores de movimiento horizontal, en la industria farmacéutica, en el campo de la medicina de rehabilitación “tratamiento fisioterapéutico” y actualmente se está implementando cada vez más en las industrias por sus características y ventajas como su mayor velocidad, mayor precisión en los movimientos para ejecutar tareas y capacidad de sostener un peso mayor gracias a la distribución entre sus actuadores.

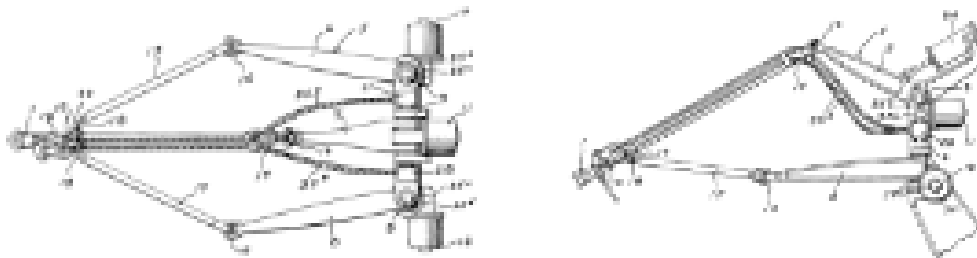
Si nos remontamos a la historia se puede observar que algunos documentos se refieren al primer mecanismo tipo paralelo data desde 1931 y se trataba de un mecanismo diseñado

para el entretenimiento espacial ilustración 2, patentada por James E. Gwinnett, esta máquina no tuvo la oportunidad de salir a la luz, solo se demostró en planos.



*Ilustración 2: plataforma de J.E. Gwinnett derechos reservados a PATRICIO MARTÍNEZ ZAMUDIO "Análisis Cinemático de un Manipulador Paralelo Híbrido Tipo Delta", Diciembre 2009.*

En 1940 aparece el primer robot paralelo industrial creado por Willard L.V. Pollard, este diseño fue presentado como un robot que puede operar con 5 grados de libertad el cual fue destinado a operaciones con pintura con spray, en la ilustración 3 podemos observar a un manipulador construido con tres brazos cada uno unido por medio de dos eslabones y una junta universales, estos saliendo de una base fija y finalizando en una base más pequeña. Hay tres actuadores en la base fija los cuales manejaban la posición de la base móvil permitiendo el libre movimiento de la herramienta de pintura.



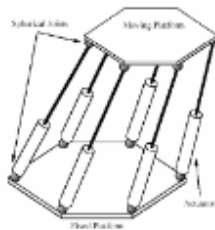
*Ilustración 3: plataforma de Willard L.V. derechos reservados BABETH P. SARAVIA - H. LOPEZ - Q. RIAZA, REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE MANIPULADORES PARALELOS agosto de 2009.*

Por otro lado han existido diversas plataformas con sus respectivos desarrollos para este tipo de robots, por tal motivo solo vamos a reseñar la plataforma Stewart, esta es una de las más importantes, la plataforma tiene seis grados de libertad con seis actuadores lineales formando una estructura de octaedro hexápodo, creada por el doctor Eric Gough en 1947, ilustración 4, esta plataforma creaba presión en diferentes ejes y así comprobar la calidad de los neumáticos que se fabricaban en la empresa Dunlop, de esta forma simulaba el aterrizaje de un avión y como esto puede afectar al neumático.

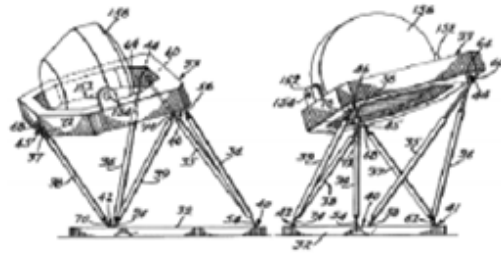


*Ilustración 4: Plataforma Gough derechos reservados a PATRICIO MARTÍNEZ ZAMUDIO "Análisis Cinemático de un Manipulador Paralelo Híbrido Tipo Delta", Diciembre 2009.*

Gracias a este diseño en la actualidad se sigue utilizando en las industrias con el nombre de MAST (Multi Axis Simulation Table), por otro lado, en 1967 el ingeniero K. L. Cappel patentó un simulador de vuelo utilizando la estructura de la plataforma de Gough, ilustración 6, mientras en 1965 se presentaba un documento en donde se observaba una plataforma de seis grados de libertad como simulador de vuelo, presentado por Mr Stewart. Ilustración 5.



*Ilustración 5 Plataforma Stewart - derechos reservados BABETH P. SARAVIA - H. LOPEZ - Q. RIAZA, REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE MANIPULADORES PARALELOS agosto de 2009*



*Ilustración 6 Plataforma Simulador de Vuelo - K.L Cappel, derechos reservados a PATRICIO MARTÍNEZ ZAMUDIO "Análisis Cinemático de un Manipulador Paralelo Híbrido Tipo Delta", Diciembre 2009.*

No se nos puede olvidar la plataforma delta creada por Reymond Clavel en 1990, esta fue realizada modificando algunos parámetros de la plataforma Stewart que presentaba un análisis cinemático más difícil, de ahí nació la plataforma de 3 y 4 grados de libertad llamada plataforma Delta siendo más fácil de diseñar en cuanto a parámetros cinemáticos se refiere y su costo de producción. En la ilustración 7, se puede observar dos tipos diferentes de dicha plataforma; Está construida con una base fija y otro móvil, unidas por tres cadenas cinemáticas de lazo cerrado permitiendo más rapidez y acceso para su fácil limpieza. Este tipo de plataforma es utilizada en impresoras 3d permitiendo construcciones más rápidas y precisas, también las encontramos en la industria alimenticia.





*Ilustración 7: Plataforma Delta, derechos reservados BABETH P. SARAVIA - H. LOPEZ - Q. RIAZA, REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE MANIPULADORES PARALELOS agosto de 2009*

En la actualidad existen una variedad de robots paralelos cada uno diferenciado en sus grados de libertad o número de cadenas cinemáticas, además existen plataformas muy utilizadas en la industria como el robot Delta, el robot Tricept y la plataforma Gough.

“

2. El robot Delta desarrollado por R. Clavel del cual se calcula que existen más de 4000 unidades en funcionamiento a nivel mundial, y es utilizado especialmente en industrias de manipulación de alimentos.
3. El robot Tricept patentado por K.N. Neumann del cual se estima que existen cerca de 300 unidades, el cual es utilizado en máquinas herramientas de media precisión e incursionando en el campo de la medicina.
4. Plataforma de Gough, la cual es el manipulador paralelo más construido con cerca de 20000 unidades y la cual es utilizada para orientación de antenas, telescopios, paneles solares, aislamiento y producción de vibraciones, posicionamiento de microscopios y pacientes, simuladores de vuelo de avión, vehículos elevadores, ensamble de componentes, posicionamiento de piezas y como máquina herramienta de precisión media.

“ (Lopez, Saravia, & Rianza, 2009)

Los manipuladores paralelos se pueden clasificar en tres tipos:

- Planares
- Esféricos
- Espaciales

De acuerdo con sus características de movimiento y sus grados de libertad (Marlet, 1997), ilustración 9 representación de los tipos de robots paralelos.



*Ilustración 8: Tipos de plataformas, a) Planares, b) esféricas, c) espaciales - CROMWELL STEVEN ANCHANTE GUIMARAES - MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DINÁMICA DEL MECANISMO PARALELO TIPO PLATAFORMA DE STEWART-GO - 2009*

La plataforma planar se caracteriza por tener dos grados de libertad en un plano de dos dimensiones, esto quiere decir que sus movimientos son uno rotacional en el eje perpendicular y el otro de traslación en el plano. El segundo caso el movimiento se puede generar en las tres dimensiones pudiendo tener entre 3 a 4 grados de libertad, tres en los ejes axiales y uno rotacional, por último, la plataforma de tipo espacial puede tener de 5 a 6 grados de libertad.

Se clasifica por medio de sus características estructurales como asimétricos o simétricos, “Un manipulador paralelo es llamado simétrico si cumple las siguientes condiciones:

- El número de eslabonamientos debe ser igual al número de grados de libertad de la plataforma móvil.
- El tipo y número de articulaciones en todos los eslabonamientos deben estar arreglados en un modelo idéntico.
- El número y localización de las articulaciones actuadoras deben ser los mismos.

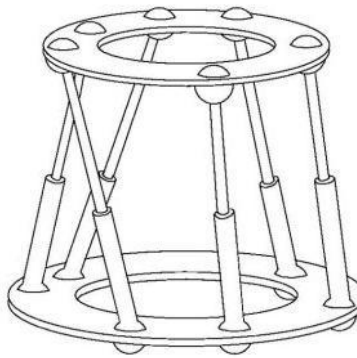
Si las coordenadas antes mencionadas no llegan a cumplirse, entonces el manipulador es llamado asimétrico “ (ZAMUDIO, 2009)

Se puede obtener una plataforma simétrica si el número de eslabones ( $m$ ) es igual al número total de cadenas cinemáticas ( $L$ ) y este a su vez es igual al número de grados de libertad ( $F$ ), se puede expresar como ( $m = L = F$ ). Sin embargo, existen muchas configuraciones paralelas, algunas con bastante documentación como las planares, mientras que las espaciales su documentación es más escasa ya que esta presenta un nivel de diseño más complejo.

#### 1.4 Plataforma Stewart

(Merlet define un manipulador paralelo como un mecanismo de lazo cerrado en el cual un extremo es conectado por lo menos a 2 cadenas cinemáticas independientes, él también define un manipulador completamente paralelo como un “manipulador de lazo cerrado con  $n$  grados de libertad (GDL) conectados a una base de  $n$  cadenas independientes, el cual tiene como máximo 2 enlaces y se acciona por un actuador rotativo”) (Adrián, 2013)

Este tipo de estructura se basa en dos plataformas una móvil sostenida por 6 eslabones ensamblados por medio de juntas esféricas, al extremo de los eslabones se encuentran conectados con 6 actuadores unidos por medio de juntas esféricas sostenidos por una plataforma fija. Hay tres puntos en la plataforma superior, los cuales se encuentran conectados a cada punto dos juntas esféricas de las 6 conectadas, permitiendo una movilidad en los ejes axiales y rotacionales; de dichas juntas se enlazan seis eslabones prismáticos uno por cada junta hacia los actuadores y la base fija. Ilustración 8



*Ilustración 5 Plataforma Stewart Universidad politécnica de Madrid 2007*

Gracias a sus seis eslabones uniformemente distribuidos las cargas que puede mover la plataforma “móvil” de esta plataforma se distribuyen por cada una de ellas, permitiendo que el peso soportado no recaiga en un solo eslabón deformando la plataforma. Gracias a este sistema su velocidad puede aumentar ya que todos los actuadores trabajan bajo el mismo peso y no son esforzados; además de tener una precisión de movimientos y un nivel de fricción menor. Además, tengamos en cuenta que la reducción del peso por actuador reduce la cantidad de potencia requerida por cada uno de ellos.

Las desventajas de este tipo de manipulador son: la escasa área en la que puede operar la plataforma móvil, su estructura le permite tener 6 (seis) grados de libertad, además, su

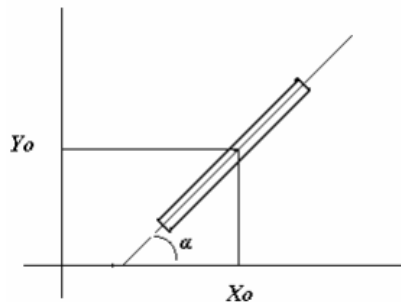
diseño resulta bastante complejo cuando se desarrolla por tener más de dos cadenas cinemáticas independientes.

Si observamos los criterios de la mecánica que se debe tener en cuenta para su construcción, procedemos a organizar de forma metódica los criterios matemáticos, geométricos y cinemáticos, estos en conjunto forman la estructura, los modelos geométricos nos ayudan al análisis de del tamaño que se deben tener en las bases fija y móvil, los modelos cinemáticos los realizamos para observar los ángulos que la plataforma puede alcanzar teniendo en cuenta los ejes axiales y rotacionales. Se puede observar que la altura depende de los procesos que se realicen en la cinemática.

## 1.2 Grados de libertad (G.D.L)

Los grados de libertad en un mecanismo (sistema que transmite movimientos) es el número de variables independientes que definen su posición en el espacio en cualquier instante de tiempo, esto nos indica la movilidad que el robot obtendrá por cada parámetro independiente.

En un plano se requiere de tres grados de libertad para contener un eslabón con coordenadas  $(x,y)$  y una coordenada angular.



*Ilustración 6 plano tres grados de libertad - Conceptos y funciones de cinemática – Universidad de Huelva – Profesor Rafael Sánchez Sánchez*

En la ilustración 11 se observa un eslabón dentro de un espacio con seis grados de libertad, tres de distancia ( $x_o$ ,  $y_o$ ,  $z_o$ ) y tres angulares (alfa, beta y gamma).

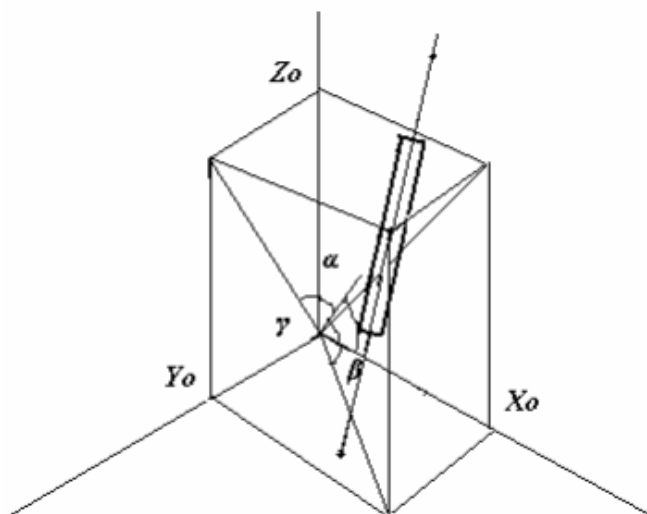


Ilustración 7 espacio con tres grados de libertad - Conceptos y funciones de cinemática – Universidad de Huelva – Profesor Rafael Sánchez Sánchez









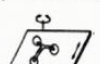


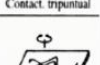

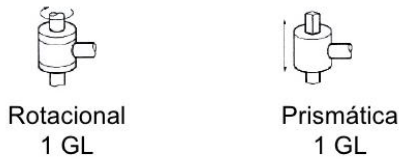
Grado de libertad	Esquemas, nombres y símbolos de pares cinemáticos			
I	 Par de revolución $R$	 Par prismático $P$	 Par helicoidal $H$	 Contact. pentapuntual
II	 Par cilíndrico $C$	 Par esférico ranurado	 Par de leva $L$	 Contact. tetrapuntual
III	 Par esférico $E$	 Par plano $PI$	 P. cilíndrico ranurado	 Contact. tripuntual
IV	 Par esfera cilindro $E_c$	 Par plano cilindro $P_c$	 Contacto bipuntual	 Contacto bipuntual
V	 Par esfera plano $E_p$	 Par esfera $E_s$		

Ilustración 8 esquemas, nombres y símbolos pares cinemáticos - Conceptos y funciones de cinemática – Universidad de Huelva – Profesor Rafael Sánchez Sánchez

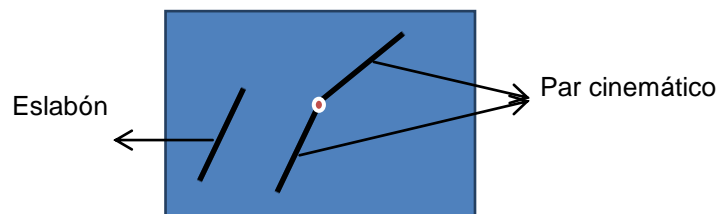
Las articulaciones rotacionales y prismáticas tienen un solo grado de libertad.



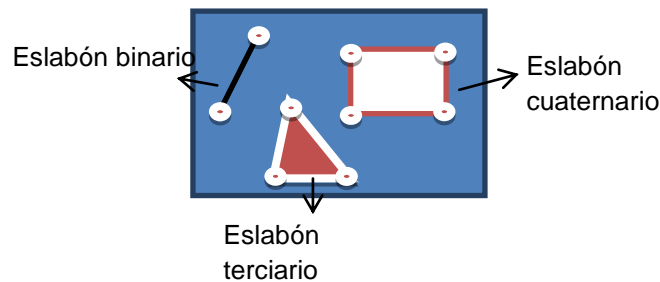
*Ilustración 9 articulación rotacional y prismática -inteligencia artificial y robótica - 2010 - Mg Samuel Oporto Díaz*

### 1.3 Tipos de eslabones

Un eslabón está conformado por un cuerpo rígido que posee como mínimo dos nodos. Cada nodo es un punto que sirve como unión entre los eslabones, si existe más de un eslabón uniéndose se conoce como par cinemático, esta unión forma movimientos gracias a uniones o juntas en el nodo. Existen varios tipos de eslabones en la ilustración 13 se muestran algunos de ellos.



*Ilustración 10 eslabón y par cinemático – Autoría Propia*



*Ilustración 11 tipos de eslabones – Autoría Propia*

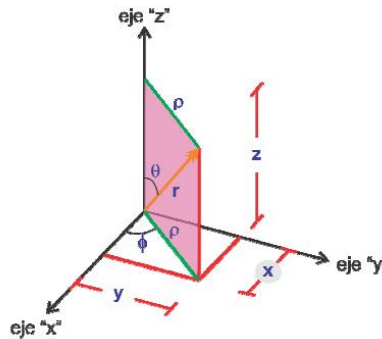
### 1.4 Fundamentos matemáticos

Los fundamentos matemáticos de esta estructura han sido sugeridos desde hace mucho tiempo, podríamos hablar de los trabajos hechos por los matemáticos geométricos franceses e ingleses que se basaron en los poliedros y como estos pueden solucionar este tipo de estructuras. Pero esto no soluciono de forma inmediata los movimientos de la plataforma, en 1940 se diseñó por primera vez un robot paralelo de 5 grados de libertad,

surgido una base no tan clara pero mínimamente necesaria para los primeros análisis cinemáticos de la historia.

### 1.4.1 Ejes de coordenadas

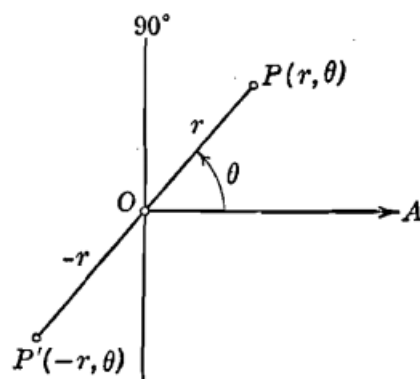
Las coordenadas cartesianas son aquellas que nos ayudan a posicionar un punto en el espacio, mientras que los ejes de coordenadas son rectas que se cruzan entre sí de forma perpendicular partiendo de su origen.



*Ilustración 12 ejes de coordenadas, GEOMETRÍA ANALÍTICA, Universidad Veracruzana, Profesor Antonio Herrera Escudero*

La ilustración 10 nos deja observar tres ejes de coordenadas rectangulares que representan las longitudes (X, Y, Z) en un plano de tres dimensiones. Estos son representados por unos vectores unitarios.

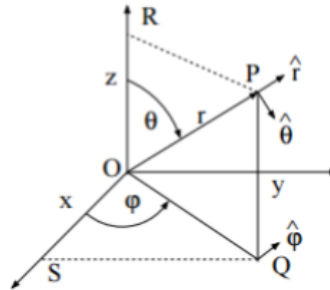
Existen un tipo de coordenadas llamadas polares, estas se puede utilizar cuando obtenemos ángulos en el plano cartesiano además de una distancia desde el origen.



*Ilustración 13 Sistema polar, Geometría analítica plana, unam – (Lehmann - Dugas, Rene, A history of mechanics, Dover, NY, 1988)*

La ilustración 11 muestra un ángulo theta y una distancia r estas utilizadas para hallar los puntos P, de acuerdo a fórmulas trigonométricas, este tipo de plano se utiliza para hallar determinadas posiciones de un punto.

Las coordenadas esféricas son una forma de controlar la posición de un punto, utilizando ángulos, además de la distancia del vector ( $r$ ) esto se puede observar en la ilustración 12.



*Ilustración 14 coordenadas esféricas - Geometría analítica plana, unam – (Lehmann - (Dugas, Rene, A history of mechanics, Dover, NY, 1988)*

## 1.5 Modelos cinemáticos:

Los modelos cinemáticos permiten estudiar el movimiento del sistema excluyendo la acción de fuerzas y aceleraciones. Estos modelos se basan en fundamentos matemáticos que soportan el análisis posicional de los robots seriales y paralelos, estos modelos consisten en obtener la posición y ubicación del extremo final del robot, esto con respecto a un sistema referencia de coordenadas cartesianas ( $x, y, z$ ).

La idea de crear un modelo cinemático de un robot paralelo difiere del creado para los robots seriales ya que no contiene la misma característica de movimientos, en estos se observa el modelo de Denavit Hartenberg para la cinemática directa y funciona bastante bien para los robots tipo seriales o los métodos numéricos reforzados con la geometría necesaria. Esto no quiere decir que se deban descartar completamente ya que de estos se pueden derivar nuevos procedimientos que ayuden a desarrollar el análisis de los robots paralelos.

La cinemática es el proceso por el cual podemos encontrar los movimientos que realiza un robot respecto a un sistema de referencia, esto quiere decir que se encontrará la descripción del movimiento con respecto al tiempo, teniendo en cuenta una relación de las articulaciones con la correlación a la localización final del robot. Existen dos métodos diferentes llamados cinemática directa y cinemática inversa, para encontrar incógnitas distintas como los grados de una articulación o los puntos de coordenadas de cada efector. Cada tipo de cinemática puede emplear las mismas operaciones matemáticas, pero su análisis es completamente diferente, además, se deben complementar ya que como se dijo con anterioridad cada método resuelve una incógnitas distintas.

La cinemática que se emplea puede ser directa o inversa, esto no quiere decir que al emplear alguno de los métodos se pueda contar con un solo tipo de solución, estas



pueden cambiar y tener varias soluciones dependiendo del tipo de robot. Para cada tipo de cinemática se puede emplear ciertos tipos de métodos como los geométricos, matrices homogéneas, desacoplamiento cinemático, parámetros D-H, álgebra de tornillo, cuaterniones duales entre otros.

### 1.5.1 La cinemática directa

Este tipo de cinemática obtiene la posición (eje de coordenadas) del efector final, por medio de análisis geométrico u otro tipo. Para desarrollar esta se debe describir los ángulos que cada articulación obtendrá al realizar un movimiento.

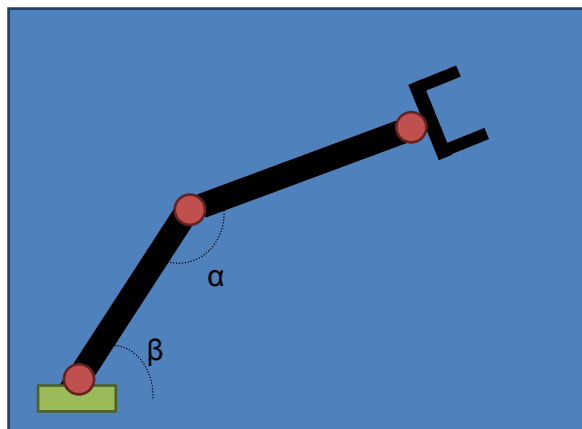
### 1.5.2 La cinemática inversa

Con este tipo de cinemática podemos obtener los ángulos de los efectores que interactúan en el robot, esto quiere decir que por medio de una serie de coordenadas específicas se podrá hallar la posición y orientación del extremo del robot, así obtenido los ángulos necesarios que posicionarán cada articulación.

## 1.6 Método geométrico

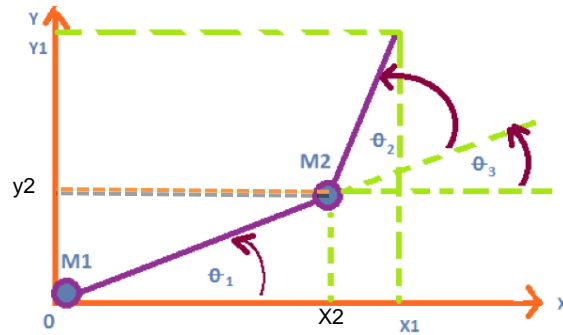
El método geométrico es uno de los más utilizados, esto por tener un análisis más claro y fácil de emplear, este consiste en desarrollar modelos teniendo en cuenta las funciones trigonométricas.

Se desea obtener los ángulos que tomarán cada articulación del robot como se muestra a la imagen siguiente.



*Ilustración 15 Brazo robótico "codo arriba" con dos grados de libertad – Autoría Propia*

Para obtener los ángulos se deberá realizar algunos cálculos trigonométricos simples, estos se pueden obtener con la ayuda de la ilustración 11.



*Ilustración 16 Brazo robótica "codo abajo", método geométrico*

Utilizando propiedades trigonométricas:

$\Theta_1$  = Angulo eslabón 1, este se puede hallar de la siguiente forma:

$$\Theta_1 = \text{Atang}\left(\frac{y_2}{x_2}\right)$$

$\Theta_2$  = es el ángulo que se desea obtener para el eslabón dos.

$$\Theta_2 = \text{Atang}\left(\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}\right) - \Theta_3$$

$\Theta_3$  = siendo este ángulo la conformación del nuevo eje x del eslabón 1 con respecto al eje anterior.

Para realizar este método debemos tener los puntos de partida del brazo y el punto de finalización de los eslabones, además de la longitud de estos.

### 1.6.1 Sistema biela manivela

Este tipo de sistema está formado por una manivela y una barra (biela), la manivela se encuentra articulada por un extremo a la biela y por el otro a un eje transmisor de movimiento, la biela en su extremo contrario a la unión con la manivela se encuentra en un punto determinado en el espacio.

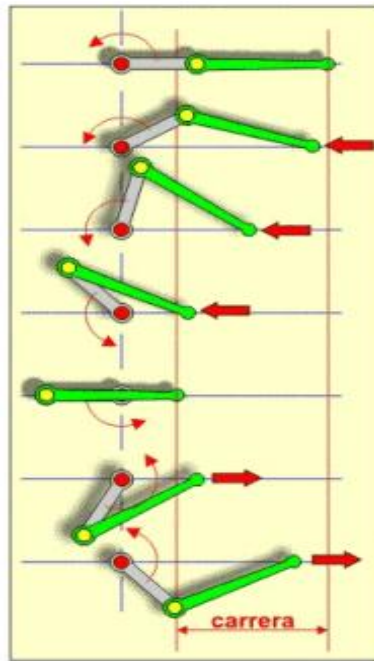


Ilustración 17 Movimientos biela manivela - Máquinas y mecanismos - <http://vinuar75tecnologia.pbworks.com/f/máquinas+y+mecanismos+1%C2%BA+eso.pdf>

Este tipo de mecanismos transforma el movimiento circular de la manivela en un movimiento lineal gracias al desplazamiento de la biela. Este tipo de sistema también funciona a la inversa es decir transforma el movimiento lineal de la biela en movimiento circular hacia la manivela.

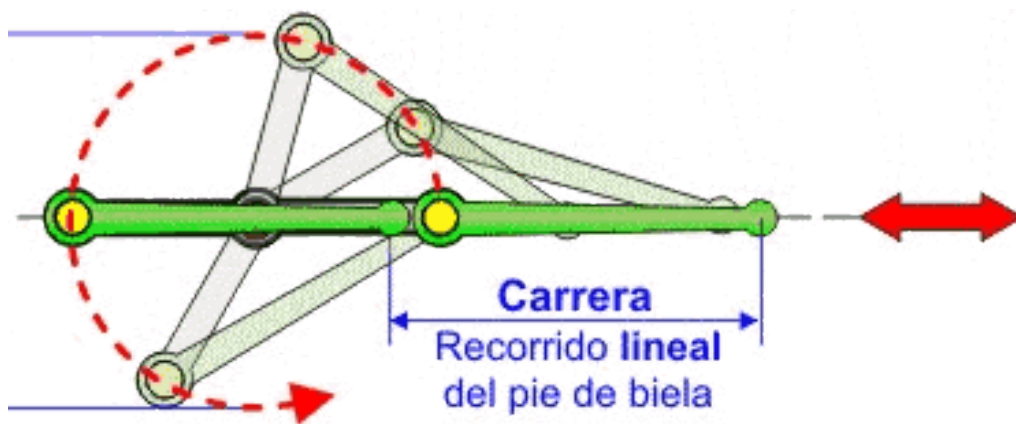
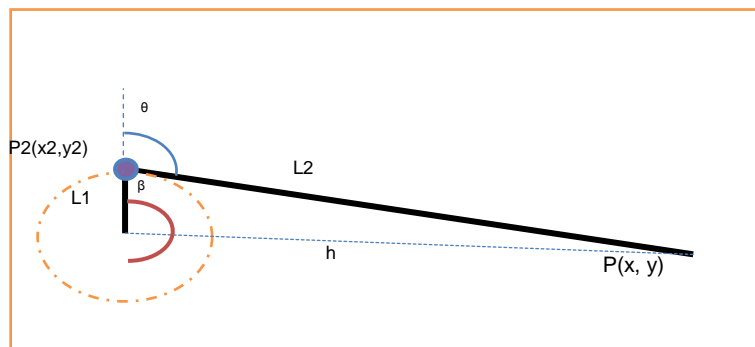


Ilustración 18 Movimiento Biela manivela - 2005 CEJAROSU - <http://concurso.cnice.mec.es>

Este tipo de sistema se puede representar matemáticamente de la siguiente manera.





*Ilustración 19 biela manivela – Autoría Propia*

Para determinar los grados de la biela y la manivela se procede a realizar los siguientes cálculos:

$$\beta = \text{atan}\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$h = \sqrt{l_2^2 - l_1^2}$$

$$\theta = 180 - \text{acos}\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - h^2}{2 * l_1 * l_2}\right)$$

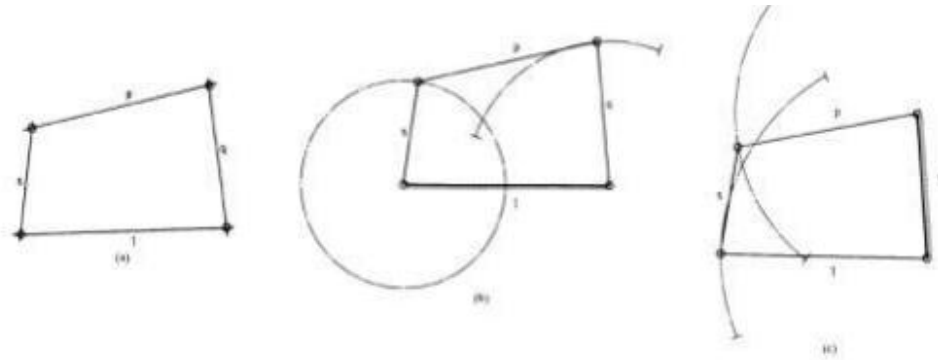
Debemos tener en cuenta que para sacar theta el eje de referencia será P2 ya que al desplazar l1 este será indicador de las nuevas coordenadas (x,y).

### 1.6.2 Mecanismo de cuatro barras

Este tipo de mecanismos se basa en cuatro barras, tres barras son móviles y una fija, unidas mediante juntas articulares, a este tipo de mecanismos usualmente se les suele enumerar de la siguiente manera:

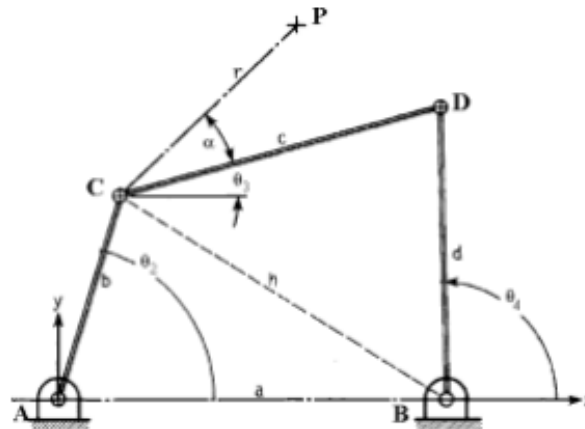
- Barra 1. Barra a imaginaria que vincula la unión entre la barra 2 con la unión de la cuarta barra y tierra.
- Barra 2. Barra b que proporciona movimiento al mecanismo, ubicada en el costado izquierdo de la ilustración 22 (a)
- Barra 3. Barra c o superior.
- Barra 4. Barra d que recibe el movimiento.

Existen diferentes tipos de soluciones para este mecanismo entre ellas la geométrica, la ley de Grasho



*Ilustración 20 capacidad de movilidad en un mecanismo de cuatro barras. – MECANISMOS - Elementos de Máquinas. Profesor: Dr. Ing. Marcelo Tulio Piován*

Como se mencionó con anterioridad este tipo de mecanismo se puede solucionar de forma geométrica determinando los puntos de posición y el grado de libertad específico, este proceso se describirá a continuación teniendo en cuenta la *barra b* de la ilustración 22 (a) como principal, debemos tener en cuenta que este método puede tener inconvenientes ya que se debe utilizar funciones trigonométricas inversas, estas funciones al ser resueltas en computadoras o calculadoras no se tendrá en cuenta la ubicación del cuadrante y en consecuencia los puntos y ángulos pueden afectar el movimiento.



*Ilustración 21 sistemas algebraico de un mecanismo de cuatro barras - MECANISMOS - Elementos de Máquinas. Profesor: Dr. Ing. Marcelo Tulio Piován*

Para obtener la ubicación de las barras **b**, **c** y **d** de la ilustración 23. se emplean los ángulos ( $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$ ), de tal manera que la posición del punto c está dada por:

$$\begin{aligned} C_x &= b \cdot \cos[\theta_2] \\ C_y &= b \cdot \sin[\theta_2] \end{aligned}$$

Las coordenadas C y D están asociadas, por tal motivo se utiliza el teorema de Pitágoras

$$c^2 = (D_x - C_x)^2 + (D_y - C_y)^2$$

$$d^2 = (D_x - a)^2 + (D_y)^2$$

Se reemplaza  $d^2$  en  $c^2$  se obtiene

$$D_x = \frac{b^2 - c^2 + d^2 - a^2}{2(C_x - a)} - \frac{C_y D_y}{(C_x - a)} = S - \frac{C_y D_y}{(C_x - a)}$$

Si sustituimos  $D_x$  en  $d^2$  se obtiene

$$D_y = \frac{-Q \pm \sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P}$$

Las ecuaciones que se han obtenido son:

$$S = \frac{b^2 - c^2 + d^2 - a^2}{2(C_x - a)}, \quad R = (a - S)^2 - d^2, \quad P = 1 + \frac{C_y^2}{(C_x - a)^2}, \quad Q = \frac{2C_y(a - S)}{(C_x - a)}$$

$$\theta_4 = \text{ArcTan} \left[ \frac{D_y}{D_x - a} \right] \quad \theta_5 = \text{ArcTan} \left[ \frac{D_y - C_y}{D_x - C_x} \right]$$

Se observa que ya aparecen los ángulos, debemos tener en cuenta en los ángulos el signo negativo. Las formulas anteriores son obtenidas del documento MECANISMOS - Elementos de Máquinas. Profesor: Dr. Ing. Marcelo Tulio Piovan.

## 1.7 Metodología de Denavit-Hartenberg

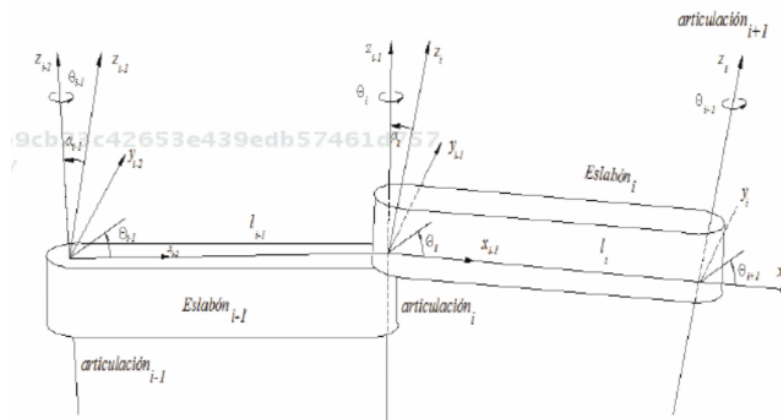


Ilustración 22 - Robótica: control de robots manipuladores - Conversión Denavit-Hartenberg para un manipulador -  
Figura 4.8 - Página 246

El sistema matricial de DH permite obtener la ubicación de un sistema de eslabones articulados, ya sea prismáticos o de revolución. Esta metodología define cuatro parámetros para cada eslabón que se encuentre en la cadena cinemática.

Los pasos que se verán a continuación son obtenidos de la metodología DH.

- Localizar la dirección de los ejes  $z_0, z_1, \dots, z_{n-1}$ .
- Establecer el sistema de referencia cartesiano fijo  $\sum 0 (x_0, y_0, z_0)$  cuyo origen es colocado sobre el sistema de referencia en la base del robot. Los ejes  $x_0$  y  $y_0$  son determinados de acuerdo a la regla de la mano derecha.

Una vez que el sistema de referencia  $\sum 0 (x_0, y_0, z_0)$  ha sido establecido, se inicia un proceso iterativo en el cual se define el sistema de referencia  $\sum i (x_i, y_i, z_i)$  usando el sistema de referencia  $\sum i-1 (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  iniciando con el sistema de referencia  $\sum 1 (x_1, y_1, z_1)$ .

- Localizar el origen  $o_i$  en la intersección de la normal común que une el eje  $z_i$  con el eje  $z_{i-1}$ . Si el eje  $z_i$  intercepta al eje  $z_{i-1}$  colocar  $o_i$  en la intersección. Para el caso que los ejes  $z_i$  y  $z_{i-1}$  son paralelos:
  - Si la articulación  $i$  – ésima es rotacional, colocar el origen  $o_i$  sobre la articulación  $i$  – ésima, tal que  $d_i = 0$
  - Si la articulación  $i$  – ésima es prismática. Colocar el origen  $o_i$  en un punto límite físico de la articulación  $i$  – ésima. Por ejemplo en un punto extremo.
- Seleccionar el eje  $x_i$  a lo largo de la normal común que une a los ejes  $z_{i-1}$  y  $z_i$  en dirección de la articulación  $i - 1$  hacia la articulación  $i$ .
- Determinar  $y_i$  por la regla de la mano derecha
- Establecer el sistema de referencia del extremo final  $\sum n (x_n, y_n, z_n)$ 
  - Si la articulación es  $n$  – ésima rotatoria, entonces alinear el eje  $z_n$  con el eje  $z_{n-1}$
  - Si la articulación  $n$  – ésima es prismática, entonces seleccionar el eje  $z_n$  de forma arbitraria. El eje  $x_n$  debe cumplir el paso 4
- Establecer los parámetros  $l_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$  de los eslabones
- Obtener las matrices de transformación homogéneas

La cinemática directa es la forma general de transformaciones homogéneas que concatena los sistemas de referencia cartesianos asociados a los eslabones del robot. Todos relativos al sistema de referencia fijo  $\sum 0$ . (Fernando, 2011)

## 2 ANÁLISIS GEOMÉTRICO DEL SISTEMA

Para la elaboración de la plataforma Stewart es indispensable el análisis matemático de su estructura, ya que por medio de estos resultados se establece las medidas adecuadas para ubicar los motores, juntas y eslabones respectivamente en la plataforma móvil y plataforma base. Uno de los aspectos determinantes del diseño son los parámetros geométricos debido a la funcionalidad para determinar la orientación de la plataforma, así generar un sistema de coordenadas idóneo para el análisis cinemático del sistema.

### 2.1 Grados De Libertad (GDL)

La plataforma Stewart se caracteriza por ser un mecanismo con topología hexagonal y morfología paralela con respecto a sus actuadores, la cual forma nodos con cadenas cinemáticas cerradas, conteniendo así un número calculable de GDL.

Para este trabajo de grado se utilizó la ecuación de GRÜBLER debido a que la plataforma cuenta con eslabones de tamaños fijos, podemos contar el número de juntas y de esta manera hallar el número de grados de libertad correspondiente a esta.

ECUACIÓN GRÜBLER (González, 2008)

$$m = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j Fi - If$$

Siendo:

$m$  = Número de GDL del sistema

$\lambda$  = Espacio de trabajo del mecanismo

$n$  = Número de cuerpos o eslabones del sistema (todos)

$j$  = Número de juntas del mecanismo

$Fi$  = Grados de libertad por junta

$If$  = GDL pasivos del sistema



Reemplazando en la ecuación de Grübler, se obtiene el resultado de los grados de libertad, la cual determina la cantidad de movimientos que va a realizar la plataforma respecto a su mecanismo, gracias a esta se pueden realizar un control de los ángulos que obtendrá los actuadores, de tal manera que la plataforma móvil se desplace dentro de su espacio de trabajo en forma de rotación y traslación sobre los ejes coordenados.

$$m = 6 (14 - 18 - 1) + \sum_{i=1}^{12} 3 + \sum_{i=1}^6 1 - 6$$

$$m = 6 \text{ GDL}$$

$\lambda = 6$ ; sus movimientos en el eje de coordenadas (X, Y, Z, Pitch, Yaw, Roll).

$n = 14$ ; 6 bielas + 6 manivela + 2 plataformas "fija y móvil".

$j = 18$ ; 6 juntas con la manivela + 6 juntas rotacionales plataforma móvil + 6 juntas rotacionales superiores en los eslabones.

$F_i$  = las juntas esféricas tienen 3 GDL y las rotacionales 1 GDL

$I_f$  = 6 grados de libertad pasivos

No se utiliza la ecuación de Kutzbach ya que el mecanismo no posee semijuntas es decir las medidas de los eslabones fijos son todos iguales. Sin embargo la distancia entre el eje central del actuador y las juntas móviles varían según el posicionamiento deseado en la plataforma.

### 2.1.1 ANÁLISIS GEOMÉTRICO DE ORIENTACIÓN

Se realiza un sistema de coordenadas en la plataforma Stewart cuyo origen está situado en el centro de la plataforma base como se observa en la ilustración 1, respecto a esta se hallan las respectivas ecuaciones para determinar la posición de los motores.

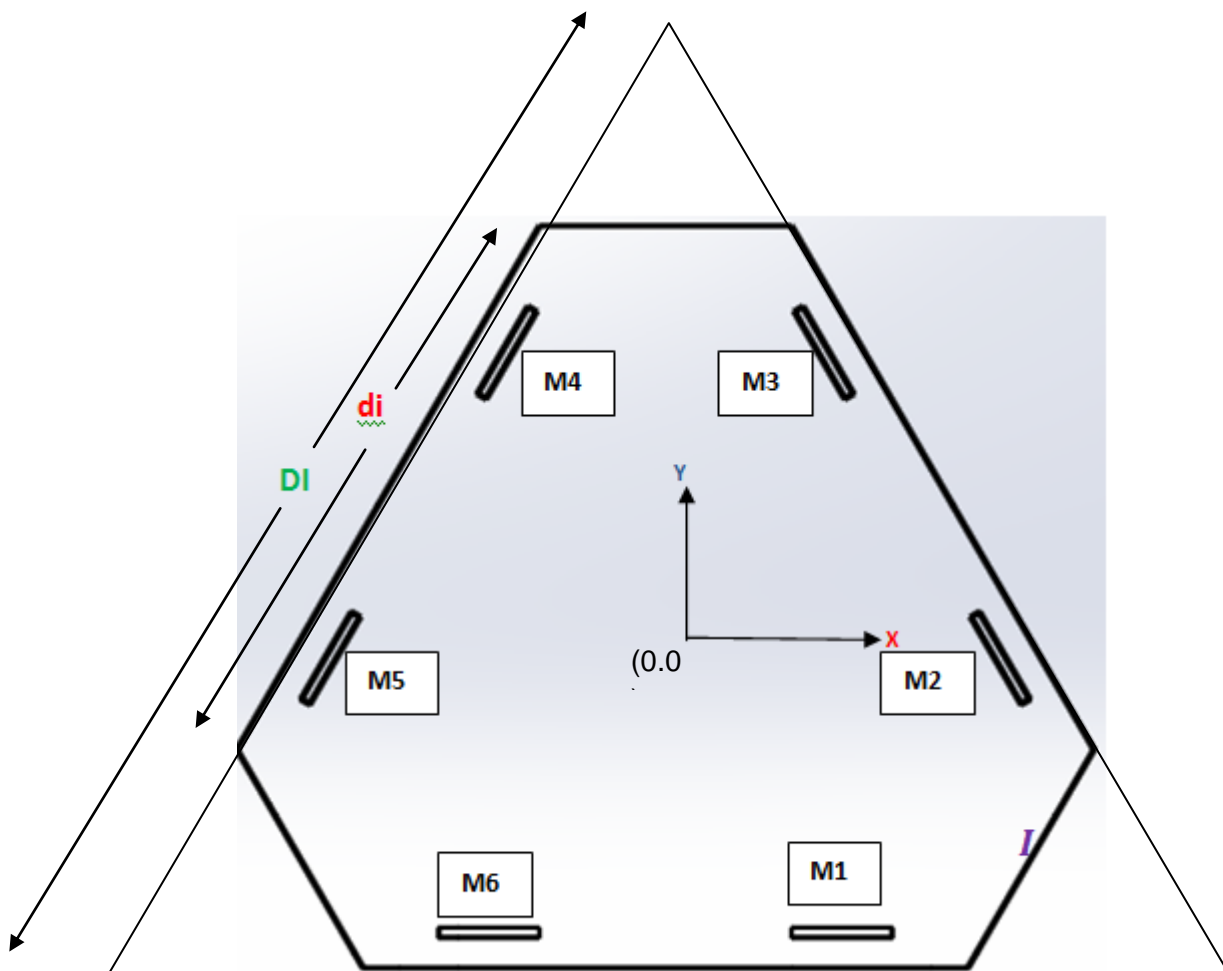


Ilustración 23 Plataforma Base - Coordenadas  $X, Y$  para los motores (plataforma base) – Autoría Propia

$DI$  = distancia entre los puntos extremos del triángulo equilátero

$di$  = distancia entre los puntos de la cara mayor del hexaedro

$l = \text{distancia entre los puntos de la cara menor del hexaedro}$

### 2.1.2 Basados en la geometría de un triángulo equilátero encontramos

$ap = \frac{\sqrt{3}}{6} * DI$  Apotema de un triángulo equilátero

$h = \frac{\sqrt{3}}{2} * DI$  Altura de un triángulo equilátero

$r = \frac{2}{3} * h$  Distancia entre el centro del triángulo y su punta superior

$DI = \frac{\sqrt{3}}{2} * r$  Medida de uno de los lados del triángulo equilátero

Una vez se escoja el tamaño deseado para la plataforma en su construcción, realizamos un corte en las puntas del triángulo este será acorde a el diseño que se desee, debido a que ese espacio es muy cerrado y las juntas superiores quedarían rosándose en los movimientos a realizar, véase ilustración 25.

Los motores se ubican de forma simétrica en las caras más anchas de la plataforma base y con esto generar un asiento sólido para la plataforma móvil. Las ecuaciones para los motores M1 a M6 respecto al eje coordenado central son:

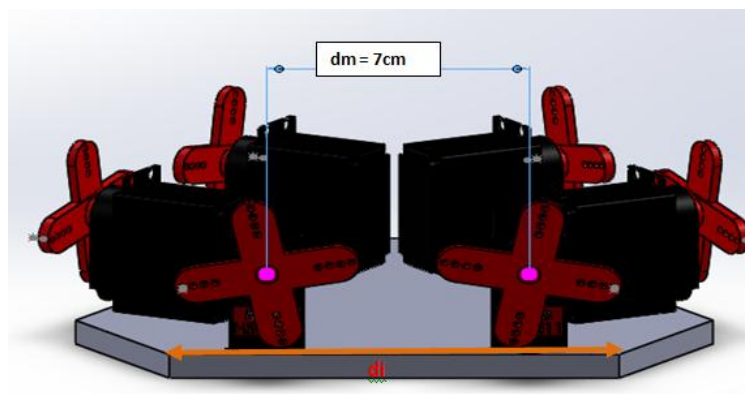


Ilustración 24 Base con motores – Autoría Propia

$$M1 = \left[ \frac{DI}{2} - I - n; -\frac{-\sqrt{3}}{6} * DI \right]$$

$$M2 = \left[ \frac{DI}{2} - \frac{I}{2} - (n * \cos 60^\circ); -\frac{-\sqrt{3}}{6} * DI + (I * \sin 60^\circ) + (n * \sin 60^\circ) \right]$$

$$M3 = \left[ \frac{I}{2} + (n * \cos 60^\circ); \frac{2}{3} * h - (I * \sin 60^\circ) - (n * \sin 60^\circ) \right]$$

$$M4 = \left[ \frac{DI}{2} + (n * \cos 60^\circ); \left( \frac{2}{3} * h \right) - (I * \sin 60^\circ) - (n * \sin 60^\circ) \right]$$

$$M5 = \left[ -\frac{DI}{2} + \frac{I}{2} + (n * \cos 60^\circ); \left( -\frac{-\sqrt{3}}{6} * DI \right) + (I * \sin 60^\circ) + (n * \sin 60^\circ) \right]$$

$$M6 = \left[ -\frac{DI}{2} + \frac{I}{2} + (n * \cos 60^\circ); \left( -\frac{-\sqrt{3}}{6} * DI \right) + (I * \sin 60^\circ) + (n * \sin 60^\circ) \right]$$

- Donde  $n$  = distancia entre el borde de la cara ancha hasta el eje del motor [ $n = di/2 - dm/2$ ]  $n = 2.5 \text{ cm}$
- $Dm$  = distancia entre los ejes de los motores para este diseño se utilizó  $Dm = 7 \text{ cm}$
- Con estas coordenadas [X ; Y] de posición se realizará el análisis matemático, de esta manera obtener la distancia entre el eje central del motor y la junta superior.
- La coordenada Z se genera a partir de la altura según el diseño que se desee, teniendo en cuenta que la biela del motor junto con la manivela o eslabón sean lo suficientemente largas para alcanzar el posicionamiento deseado en la plataforma móvil.

### 2.1.3 Coordenadas X , Y para las juntas (plataforma móvil)

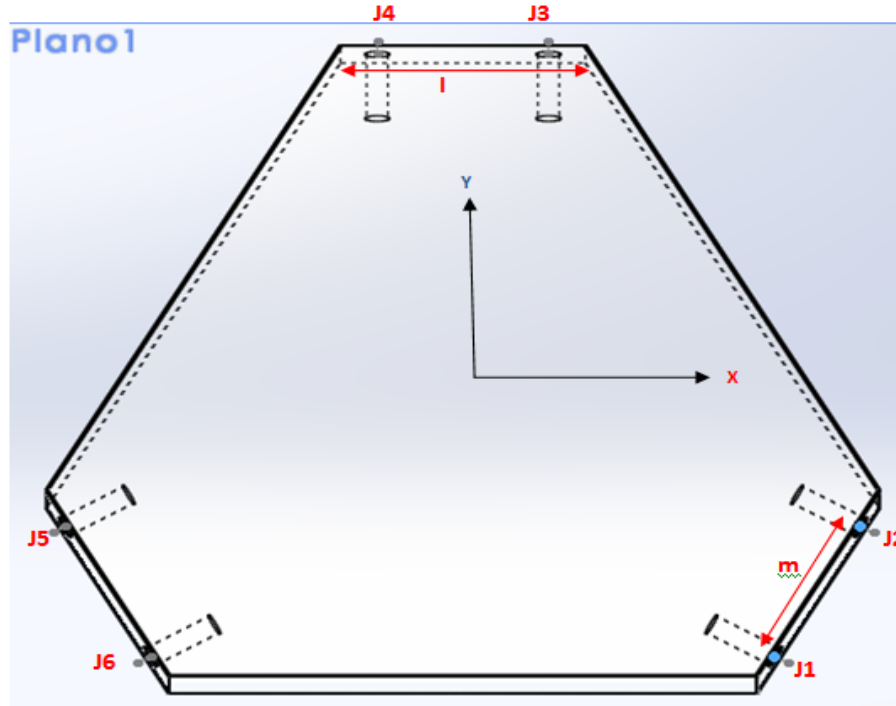


Ilustración 25 Plataforma móvil - coordenadas juntas— Autoría Propia

Las ecuaciones para las juntas de la plataforma móvil se realizan a partir de un eje coordenado [X;Y], donde su origen se encuentra en el apotema del triángulo equilátero y respecto a esto sus puntos coordenados serán positivos o negativos teniendo relación con el cuadrante generado.

Las ecuaciones de las juntas son:

$$J1 = \left[ \frac{DI}{2} - I + (t * \cos 60^\circ); \left( -\frac{\sqrt{3}}{6} * DI \right) + (t * \sin 60^\circ) \right]$$

$$J2 = \left[ \frac{DI}{2} - \frac{I}{2} - (t * \cos 60^\circ); \left( -\frac{\sqrt{3}}{6} * DI \right) + (I * \sin 60^\circ - t * \sin 60^\circ) \right]$$

$$J3 = \left[ \frac{I}{2} - 2(t * \cos 60^\circ); \left( -\frac{2}{3} * h \right) - (I * \sin 60^\circ) \right]$$

$$J4 = \left[ -\frac{I}{2} + 2(t * \cos 60^\circ); \left( -\frac{2}{3} * h \right) - (I * \sin 60^\circ) \right]$$

$$J5 = \left[ -\frac{DI}{2} + \frac{I}{2} + (t * \cos 60^\circ); \left( -\frac{\sqrt{3}}{6} * DI \right) + (I * \sin 60^\circ) - (t * \sin 60^\circ) \right]$$

$$J6 = \left[ -\frac{DI}{2} + I - (t * \cos 60^\circ); \left( -\frac{\sqrt{3}}{6} * DI \right) + (t * \sin 60^\circ) \right]$$

Dónde:

- $t = \frac{I}{2} - \frac{m}{2}$ , la distancia t se genera del extremo de la cara corta del hexágono hasta el punto m. Para el diseño de esta plataforma  $t = \frac{5}{2} - \frac{3}{2} = 1$  cm
- $m = 3$  cm, distancia entre las juntas
- La distancia entre las juntas en la cara menor del hexágono debe ser simétrica y se dejó un espacio suficiente para poder realizar orificios sin que su estructura se fragmente
- Las juntas en la plataforma móvil se enumeran desde J1 hasta J6 comenzando por la junta derecha inferior como se muestra en la ilustración 3,

## 2.2 Diseño CAD Plataforma Stewart

El diseño asistido por computadora CAD se da paso en la ingeniería a mediados de los 60 por el ingeniero Ivan E. Sutherland en un laboratorio del (MIT) (justo, 2008) . para la implementación de este prototipo se simuló la plataforma Stewart en el software SOLIDWORKS (versión estudiantil) para realizar el ensamble de los componentes: plataforma superior, plataforma inferior, eslabones y motores, este modelo CAD nos permite ver si los eslabones tienen algún rozamiento que no permita el movimiento de las articulaciones de una manera adecuada para el mecanismo, es decir que el mecanismo sea funcional y no tenga problemas con los grados de libertad deseados, de esta manera poder desplazar la plataforma en su espacio de trabajo.

### 2.2.1 Plataforma Móvil

Esta plataforma tiene dos agujeros en los costados de las caras de menor longitud del hexágono, con el fin de poder insertar en ellas un tornillo para fijar los eslabones y hacer que la plataforma sea más rígida estructuralmente, el material usado para la plataforma móvil es madera aglomerado por ser liviana.

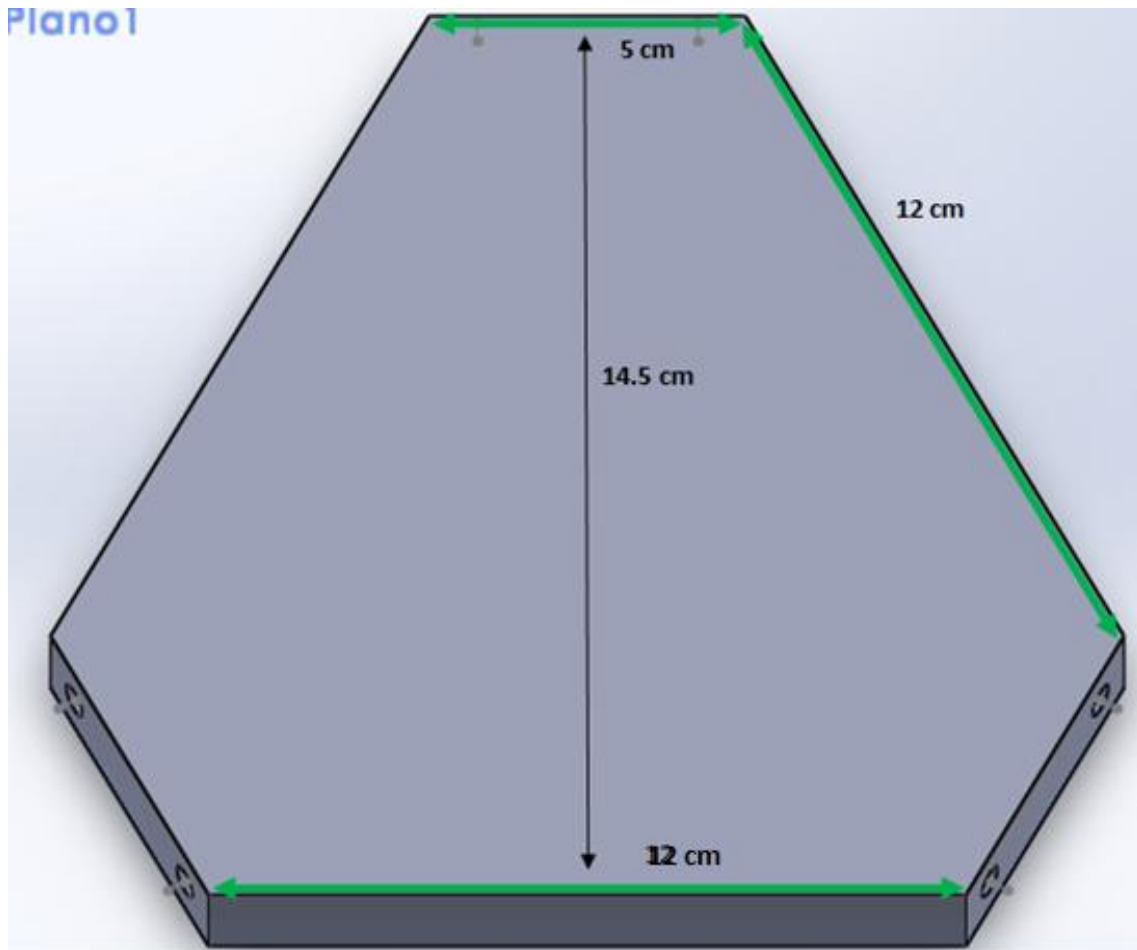
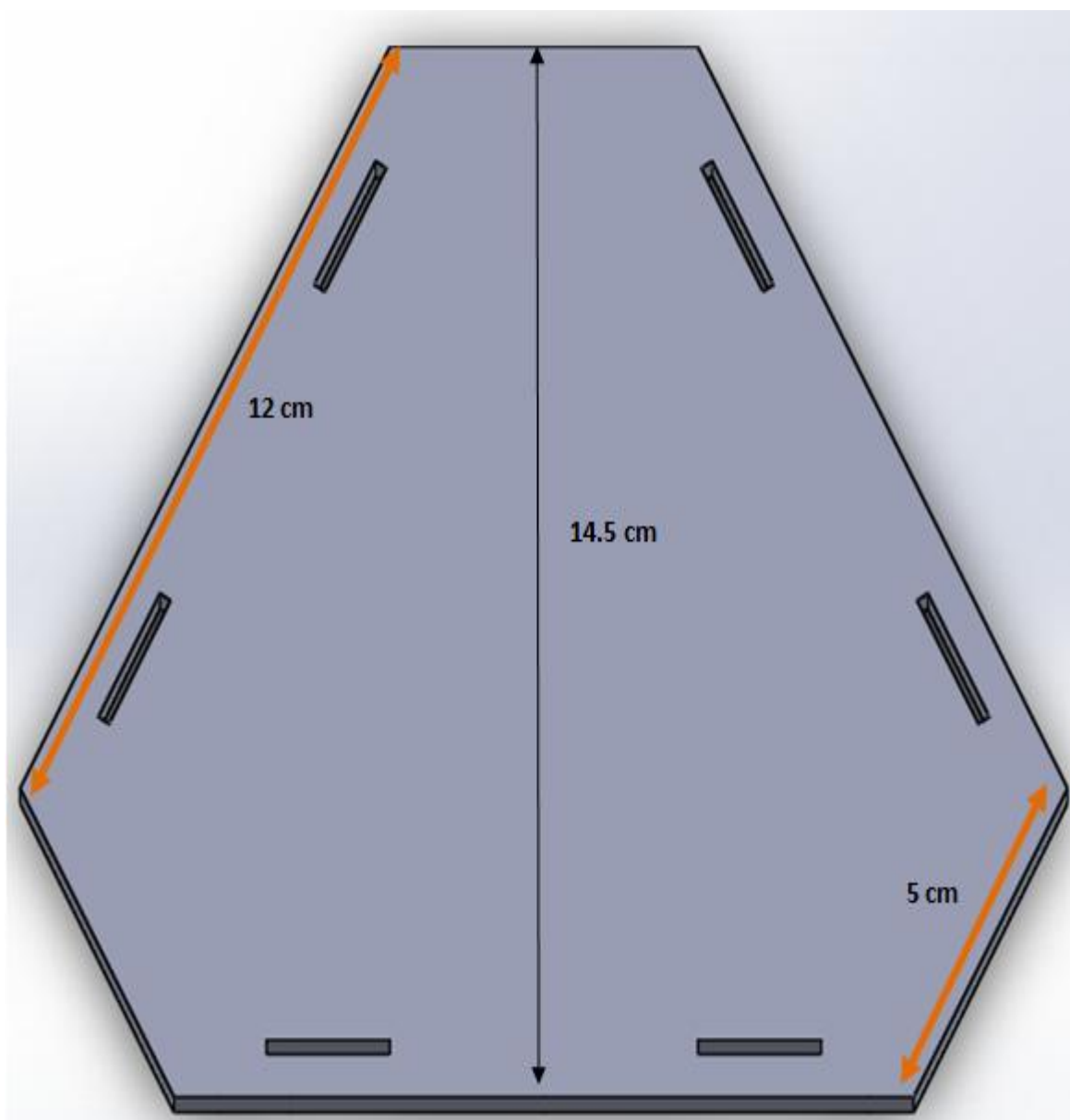


Ilustración 26 Plataforma móvil – Autoría Propia

### 2.2.2 Plataforma Base

La plataforma base tiene las mismas dimensiones que la plataforma móvil, los motores van ensamblados en cada una de las guías, las cuales están puestas de manera simétrica para que la plataforma móvil quede nivelada. El material usado en esta base es el mismo de la plataforma móvil.

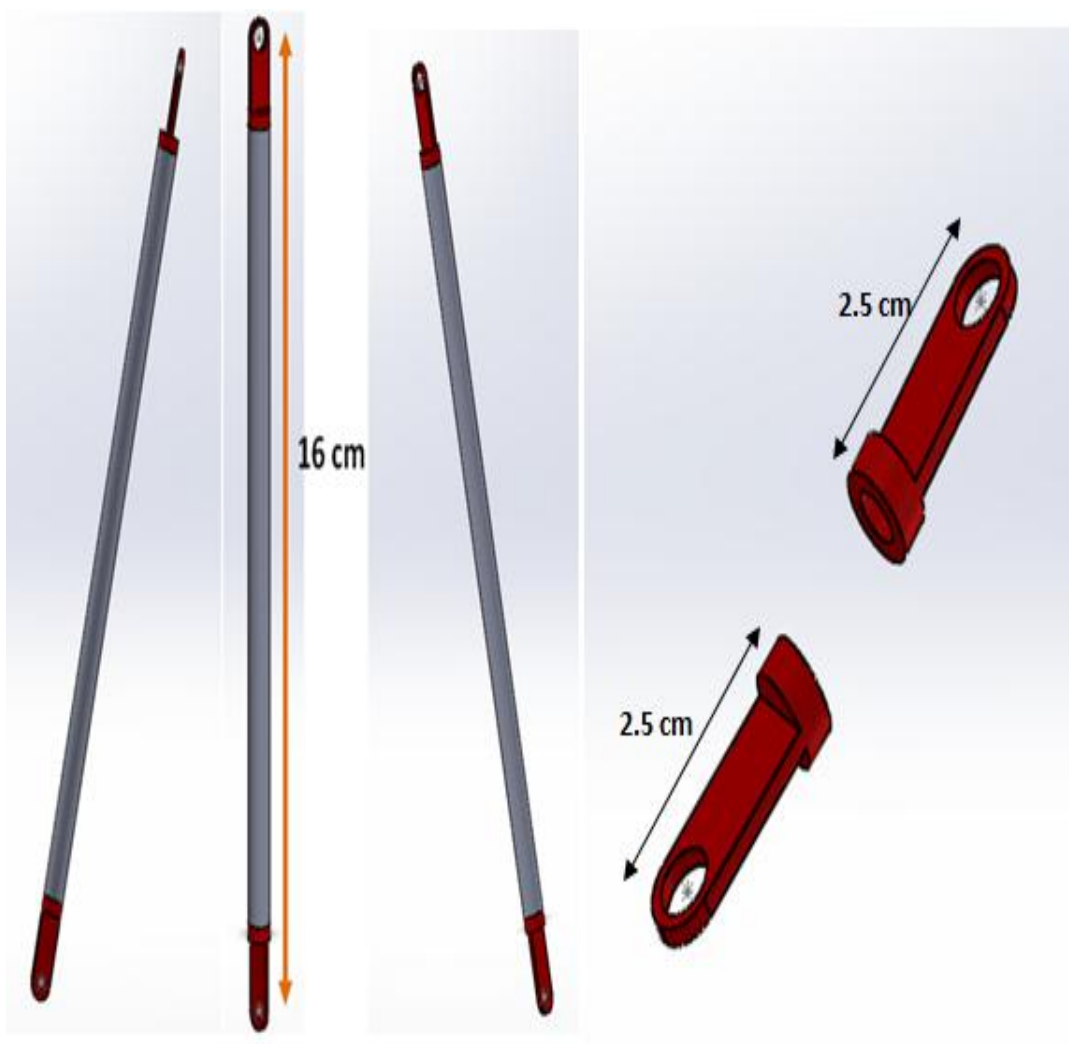


*Ilustración 27 Plataforma Base – Autoría Propia*

### 2.2.3 Eslabón

Los eslabones tienen una medida de 16 cm en su totalidad correspondientes a los datos del análisis geométrico, las uniones tienen una medida de 2.5 cm y sus orificios son del diámetro adecuado para el tornillo que va tanto en la junta como en el horn del servomotor. El material usado en los eslabones es varilla de 0.5 cm de grosor y las uniones son en cobre. La unión que se forma entre la varilla y la terminal de cobre se comporta como una junta universal.

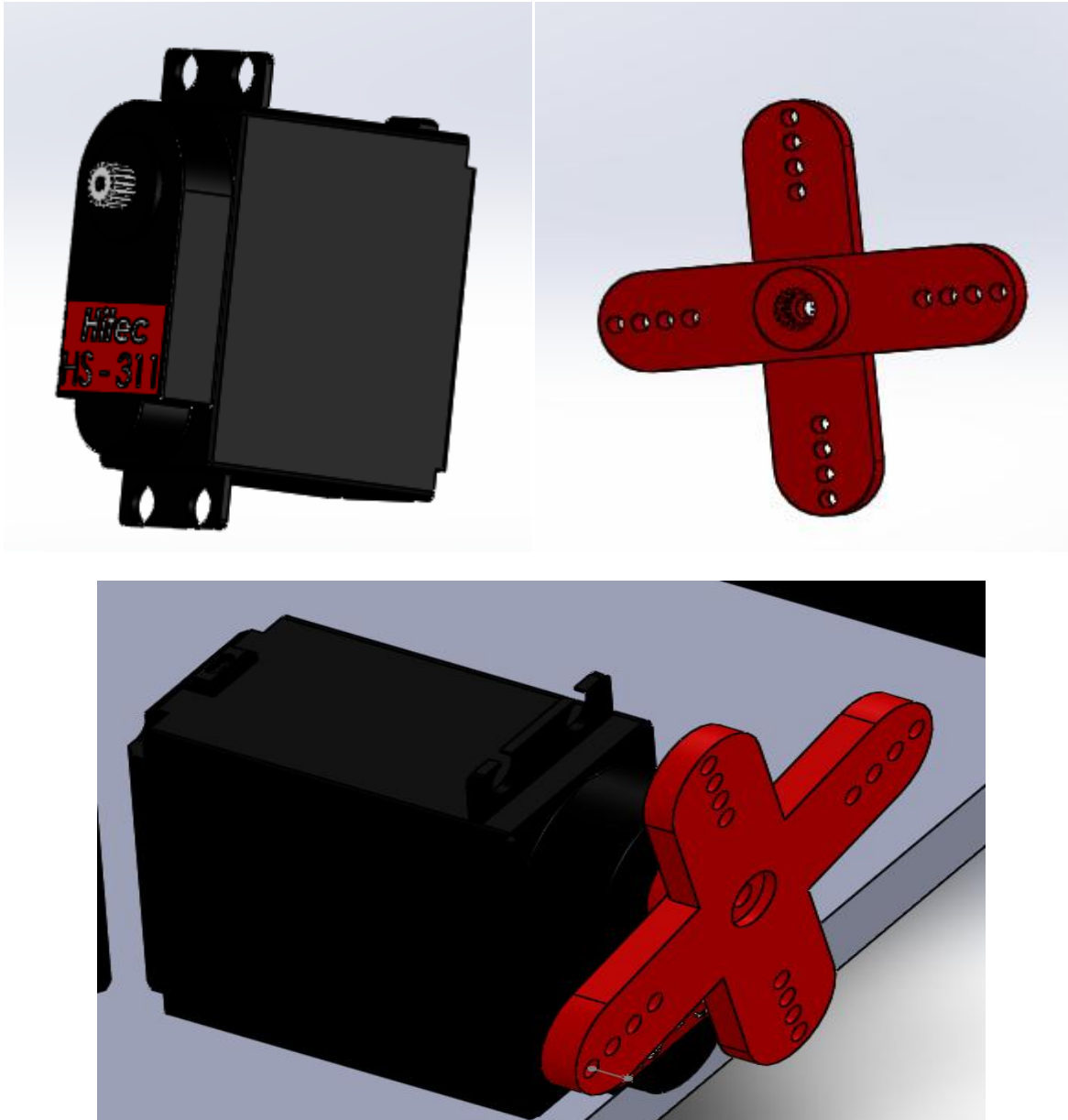




*Ilustración 28 Eslabones – Autoría Propia*

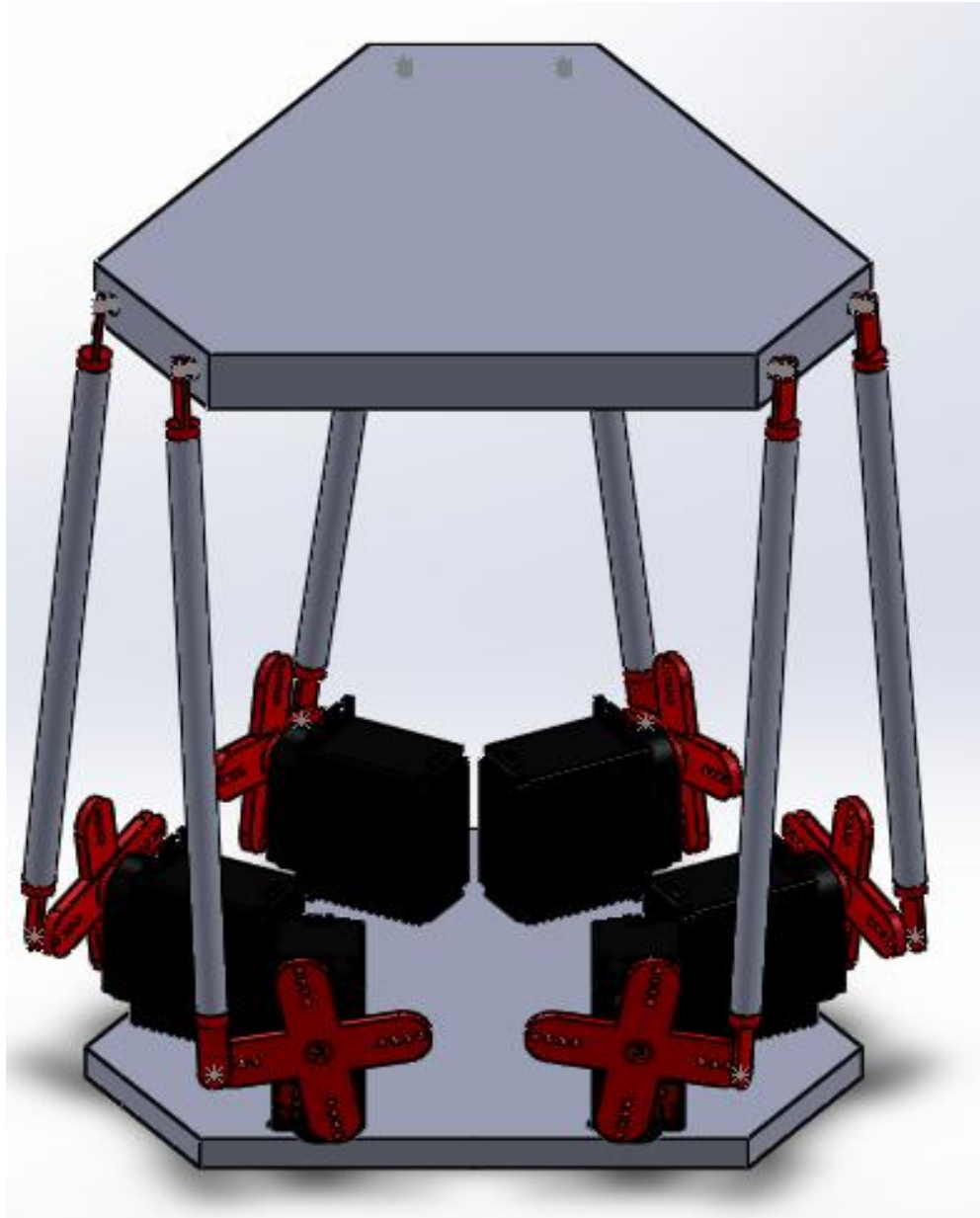
### 2.2.4 Servomotor diseño libre en CAD

Las especificaciones de los servomotores usados en la plataforma física real se encuentran enunciadas en el ítem de construcción. Para el diseño CAD del servomotor y su respectivo Horn se utilizó un modelo ya preestablecido de uso libre que se encuentra disponible en [www.Grabcad.com](http://www.Grabcad.com) y que cuenta con los tamaños del servomotor TOWER PRO SG5010.



*Ilustración 29 Servo Motor – [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com)*

## 2.2.5 PLATAFORMA ACOPLADA EN SOLIDWORKS



*Ilustración 30 plataforma Stewart Modelo CAD – Autoría Propia teniendo en cuenta el diseño de los motores son de [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com)*

Imagen tomada del software de simulación CAD, con el que se desea ver los movimientos iniciales de la plataforma, de esta manera corroboramos que el mecanismo es estructuralmente estable y que las medidas de los eslabones nos permiten movimientos

sin que se generen fuerzas contrarias que hagan destruir la forma física de la plataforma Stewart.

## 2.3 Construcción

Para la construcción de la plataforma Stewart se utilizaron los siguientes materiales:

- Madera Aglomerada de tamaño 22x50x1 c.c.



*Ilustración 31 Madera Aglomerado - <http://ajbermudez.com/3c/departamentos/ebanisteria/paneles/>*

- Barrilla de 0.5 mm grosor y 1 metro de largo



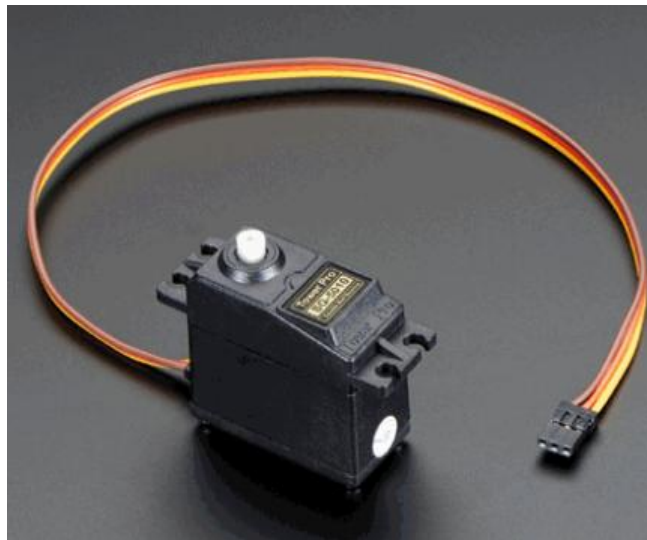
*Ilustración 32 Barrilla 0.5 mm - [http://www.angelacolls.com/es\\_ES/media/3060100200\\_10.jpg\\_1\\_800\\_1\\_600\\_/varilla-acero-1250c.-200x3-mm.jpg](http://www.angelacolls.com/es_ES/media/3060100200_10.jpg_1_800_1_600_/varilla-acero-1250c.-200x3-mm.jpg)*

- Terminales de cobre



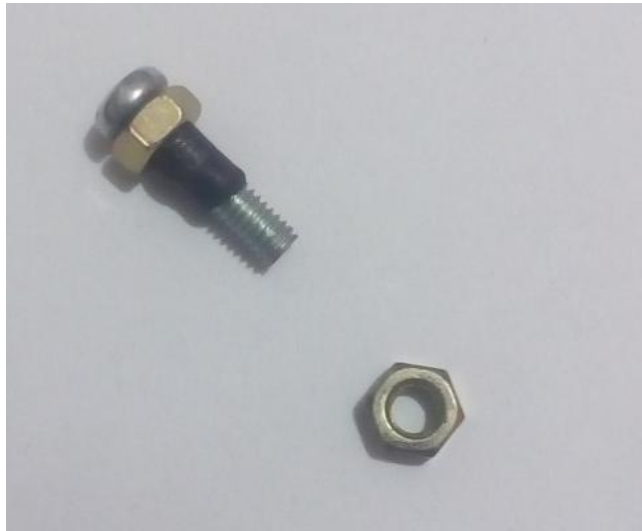
*Ilustración 33 terminales e cobre - <http://www.icasa.com.ve/productos.php>*

- Servo-Motores TOWER PRO SG5010



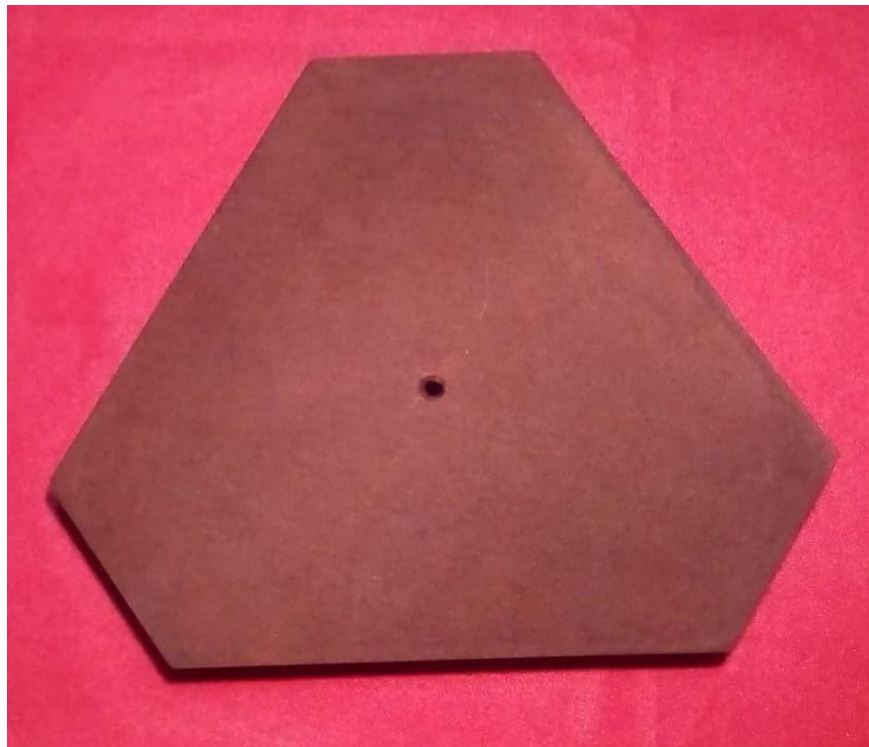
*Ilustración 34 Motor Tower - <http://www.datasheetcafe.com/sg-5010-datasheet-servo-motor/>*

- Tornillo de 0.5 cm de grosor, largo 1 cm y 1.5 cm's con su respectivas tuercas. Se realiza una modificación mecánica para mejorar el funcionamiento y evitar ruidos por fricción entre los materiales, este tornillo se recubrió con plástico termoencogible.



*Ilustración 35 Tornillo*

Se comienza cortamos las tablas de acuerdo al análisis que se realizó en la geometría.



*Ilustración 36 Plataforma móvil – Autoría Propia*



*Ilustración 37 Plataforma Base – Autoría Propia*

Colocamos los motores en las coordenadas correspondientes



*Ilustración 38 Servo-motores– Autoría Propia*



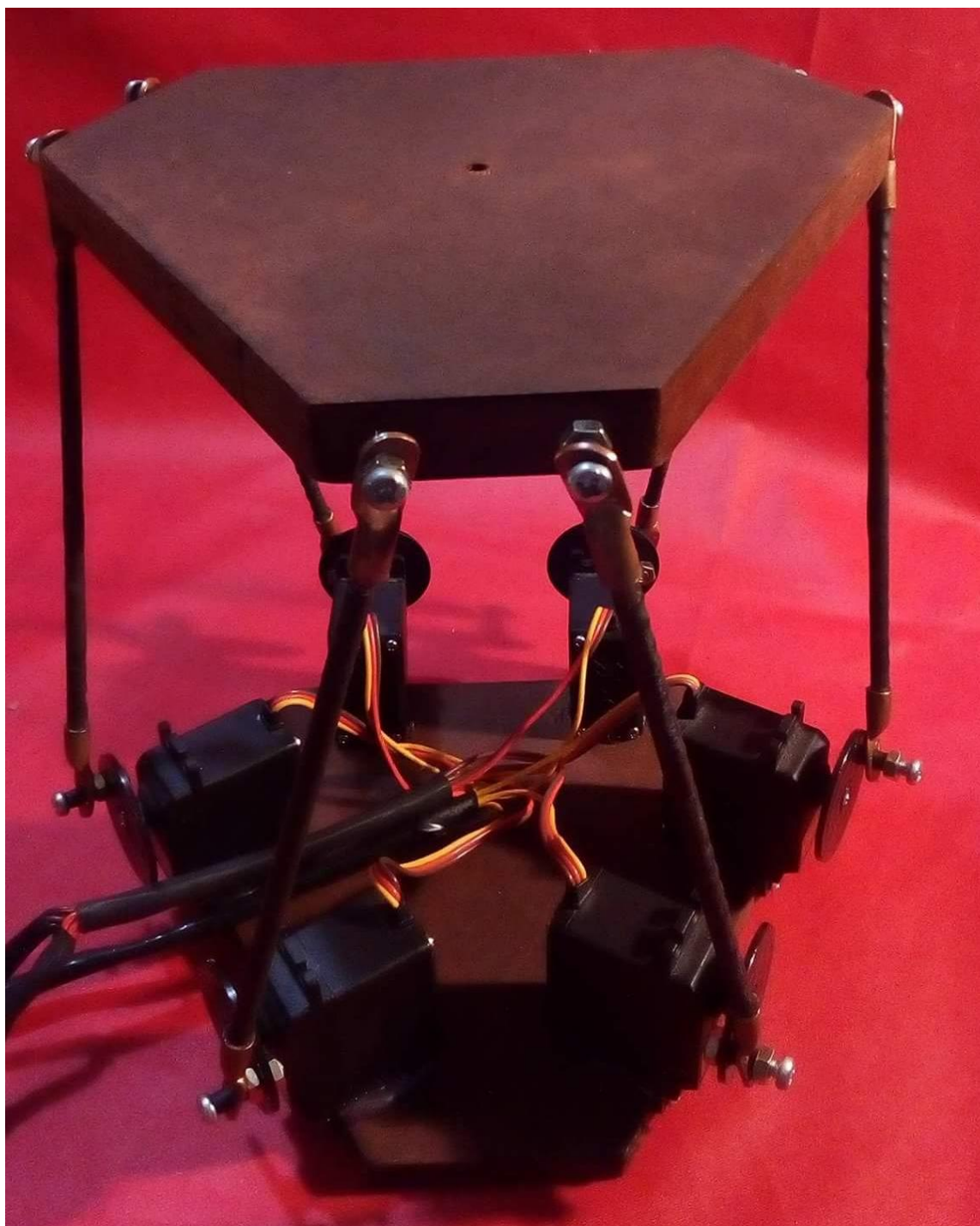
Unimos las terminales a la barrilla, estas deben tener una distancia de 14 cm, la varilla se recubre con plástico termoencogible, para mejorar su diseño.



*Ilustración 39 Unión terminal con barrilla de 0.5 mm – Autoría Propia*

Una vez tenemos todos los componentes anteriormente nombrados ensamblamos la plataforma, la ilustración 18 nos muestra esta plataforma terminada.





*Ilustración 40 Plataforma ensamblada – Autoría Propia*

### 2.3.1 SERVOMOTORES

Para el desarrollo de la plataforma se utilizan seis servomotores TOWER PRO SG5010 los cuales pueden girar 180° grados, tiene la facilidad de ser controlados por cualquier servo código o hardware para posicionarlos según se necesite, esto ahorra el realizar un controlador de motor, para esta plataforma se controlan atreves de Matlab-Arduino por PWM modulación por ancho de pulso, con una onda cuadrada en la que se varia el pulso por tiempo en el que se encuentra en alto o máximo y tiempo del pulso en bajo o mínimo.

Por su precio se escogieron, sin embargo los engranajes internos son de plástico por lo que se debe tener mayor cuidado al momento de trabajar con estos.

Especificaciones:

- Potencia: 4.8V - 6V DC max (5V funciona bien)
- Velocidad media: 0.2sec / 60degree (@ 4.8V), 0.16sec / 60degree (@ 6V)
- Peso: 39g (1.37 onzas)
- Torque: A 5V, 5.5kg-cm / 76oz-in ya 6V 6.5kg-cm / 90oz-in.
- Tamaño mm: (L x An x Al) 40 x 20,0 x 38 mm
- Tamaño en: (L x P x H) 1.60x.79 x 1.50
- Número de splines: 25

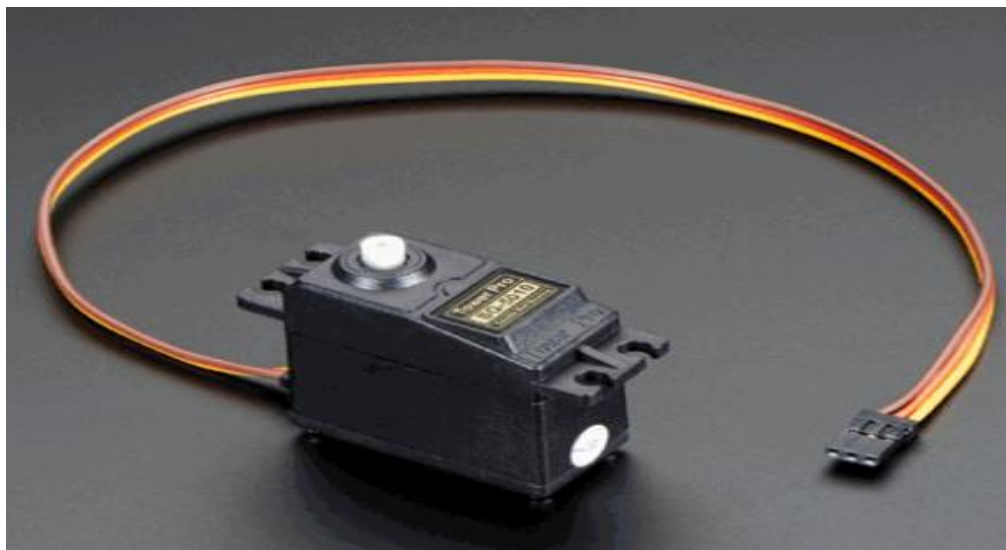
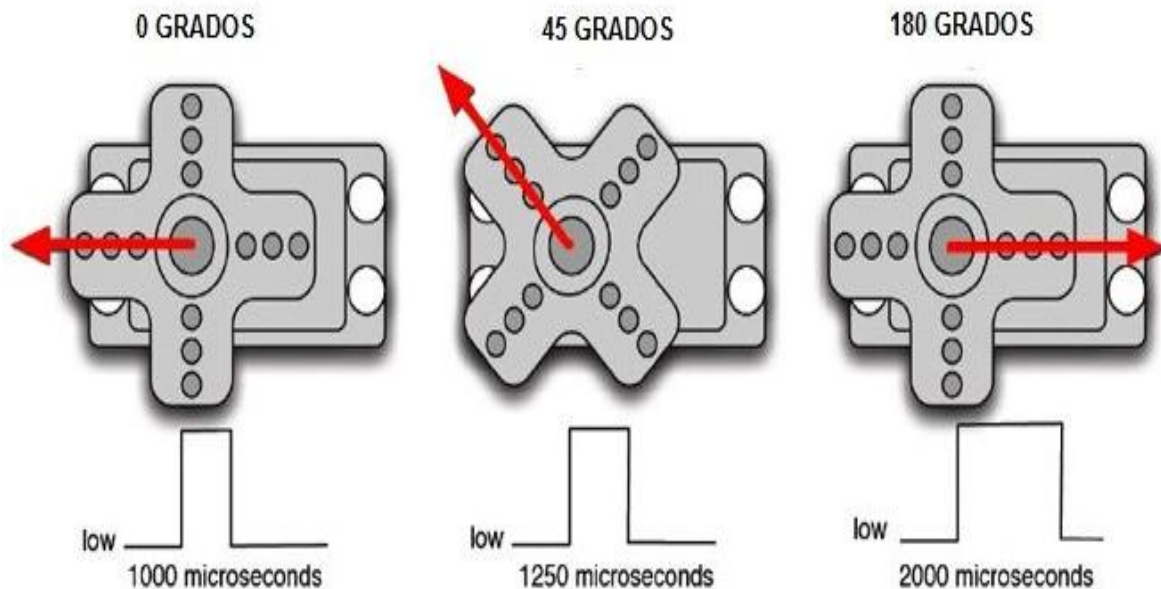


Ilustración 41 <http://www.datasheetcafe.com/sq-5010-datasheet-servo-motor/>

### 2.3.2 GIRO DEL SERVOMOTOR



*Ilustración 42 posiciones de un servo motor – [www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor](http://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor)*

Se puede observar en la imagen la posición que toma la biela del motor según el ancho de pulso determinado por tiempo en microsegundos, en caso de trabajar en el máximo y mínimo del motor este genera un zumbido dentro de él, lo cual no es recomendable ya que puede generar una falla en los engranajes internos del motor.

## 2.4 Restricciones de la plataforma Stewart

A través del análisis matemático se realizó el diseño mecánico, aun así se encuentran limitaciones como: la distancia que puede alcanzar la plataforma en los ejes cartesianos debido a su tamaño, el tiempo de respuesta entre rotaciones. La precisión de la plataforma móvil es un factor que altera el control de las posiciones y esto es debido a que los actuadores utilizados son eléctricos rotacionales y no hidráulicos con morfología prismática, lo cual mejoraría substancialmente el prototipo, una de las limitaciones físicas que se encuentra es el voltaje con el que se puede controlar los actuadores debido a que los servomotores son eficaces en el rango de 4.8V a 6V DC Max. El rango de valores que se debe tener en cada una de las rotaciones. El prototipo solo permite movimientos a la derecha en 4 cm y hacia la izquierda en -4 cm un rango de 9 valores, mientras que en el eje Z solo se desplaza 2.6 cm. Otro factor que se debe tener en cuenta en el prototipo de Stewart realizado es el uso del software Matlab ya que se vuelve indispensable como

recurso computacional ya que desde el control del sistema hasta la interfaz gráfica de usuario está realizada en este software.

## 3 Implementación Electrónica de la plataforma Stewart

### 3.1 Microcontrolador

Es un circuito integrado el cual posee diversas entradas y salidas programables tanto digitales como análogas, temporizadores, memorias, contadores, entre otras. Se maneja con comunicación serial, Para el control del sistema mecánico de la plataforma se manejó el microcontrolador ATMEL de 8 bits cuya referencia es ATmega328 el cual se conforma de 14 entradas y salidas digitales, seis con pwm, las cuales son para el control de los seis servo motores ubicados en la plataforma base, su voltaje de operación es de 5 voltios el cual concuerda con el voltaje requerido para los motores aunque para la alimentación de estos se dispuso de una fuente externa.

El microcontrolador es un circuito integrado de muy alta escala de integración que contiene las partes funcionales de un computador (Q., 2007).

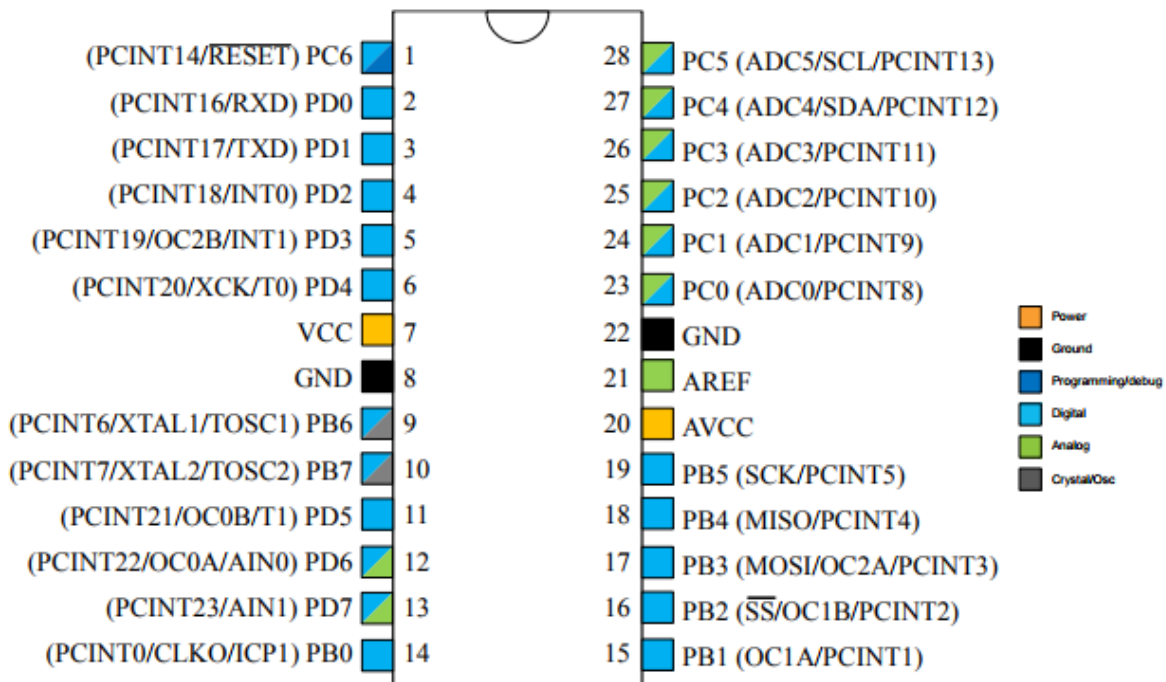


Ilustración 43 Atmega 328p - <http://www.atmel.com/avr>.

Figure 5-4. 32-pin MLF Top View

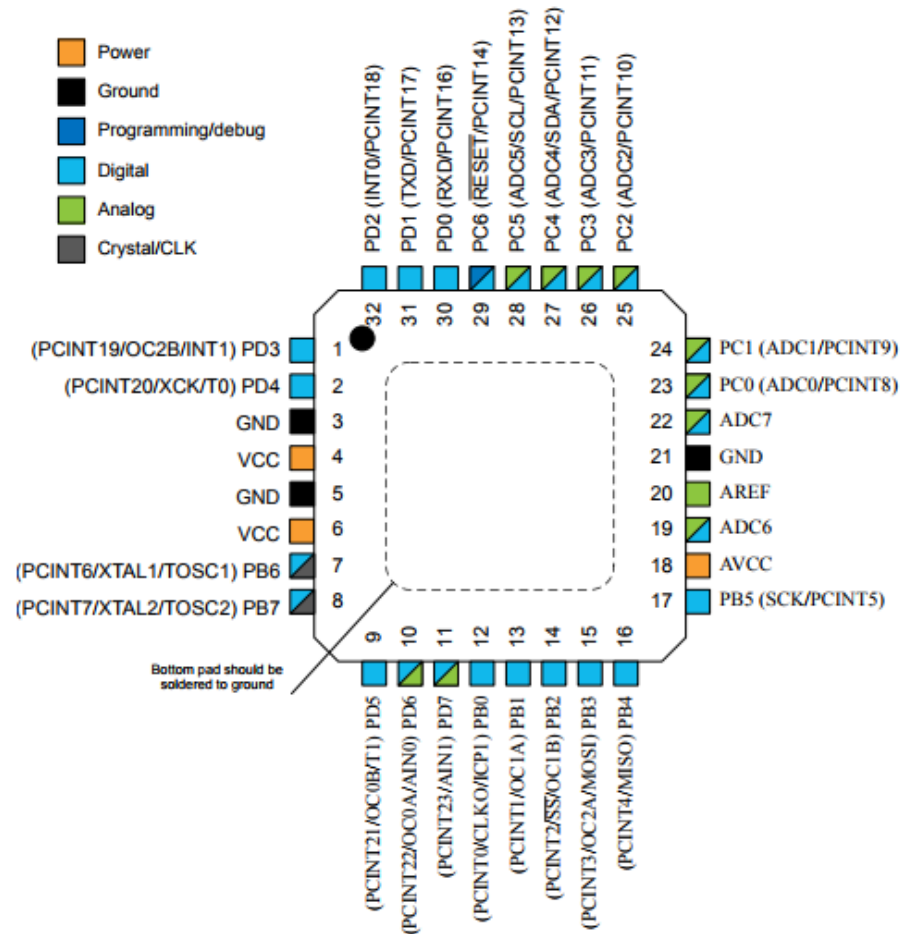


Ilustración 44 Atmega 328p <http://www.atmel.com/avr>.

### Especificaciones:

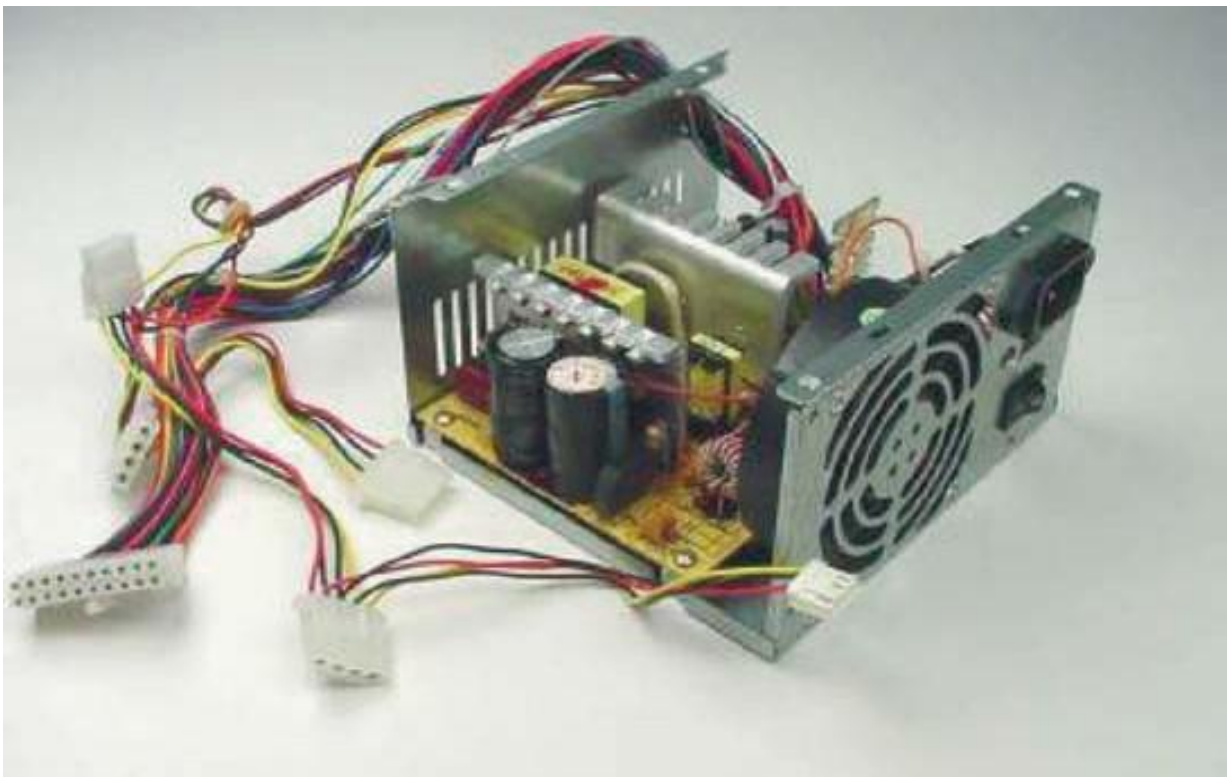
- Tipo de memoria del programa: Flash
- Memoria de programa: 32 KB
- Velocidad de la CPU: 20 MIPS
- Bytes de RAM: 2,048 B
- Datos EEPROM: 1024 (bytes)
- Periféricos de comunicación digital: 1- UART, 2- SPI, 1-I2C
- Periféricos de captura/ comparación/ PWM: 1 captura de entrada, 1CCP, 6PWM
- Temporizadores: 2 x 8 bits, 1 x 16 bits
- Comparadores: 1
- Rango de temperatura: -40 a 85 °C
- Rango de voltaje de funcionamiento: 1,8 a 5,5 V



- Numero de pin: 32
- Canales cap touch: 16

## 3.2 Fuente de alimentación

Es un dispositivo electrónico que convierte la corriente alterna AC a corriente directa DC. Existen diversas fuentes de alimentación algunas con salidas múltiples y voltaje regulables dentro de su clasificación existe fuentes lineales y fuentes conmutadas, según el requerimiento del diseño en el prototipo de la plataforma Stewart se utilizó una fuente conmutada ya que podemos variar su voltaje y dejarlo óptimo para los motores, los demás componentes electrónicos utilizados se pueden alimentar con esta misma fuente. Para plataforma se utiliza esta fuente conmutada ya que el voltaje de operación de los componentes es bajo comparado con una red de voltaje doméstica.



*Ilustración 45 fuente ATX <http://www.electronicasi.com/como-funciona/fuentes-conmutadas/>*

### 3.3 Software de desarrollo

El uso de herramientas computacionales en ingeniería y otros campos de la ciencia es fundamental a la hora de explicar comportamientos, analizar o diseñar sistemas. Para la plataforma Stewart facilita el control y movimiento del sistema mecánico. Aunque existen diversos software de cálculo se escoge Matlab ya que facilita el cálculo de variables, visualización de datos, además cuenta con toolboxes preinstalados como el GUIDE-Matlab con el que se genera un panel para realizar GUI (interfaz gráfica de usuario) y se puede integrar botones, pulsadores, etc.

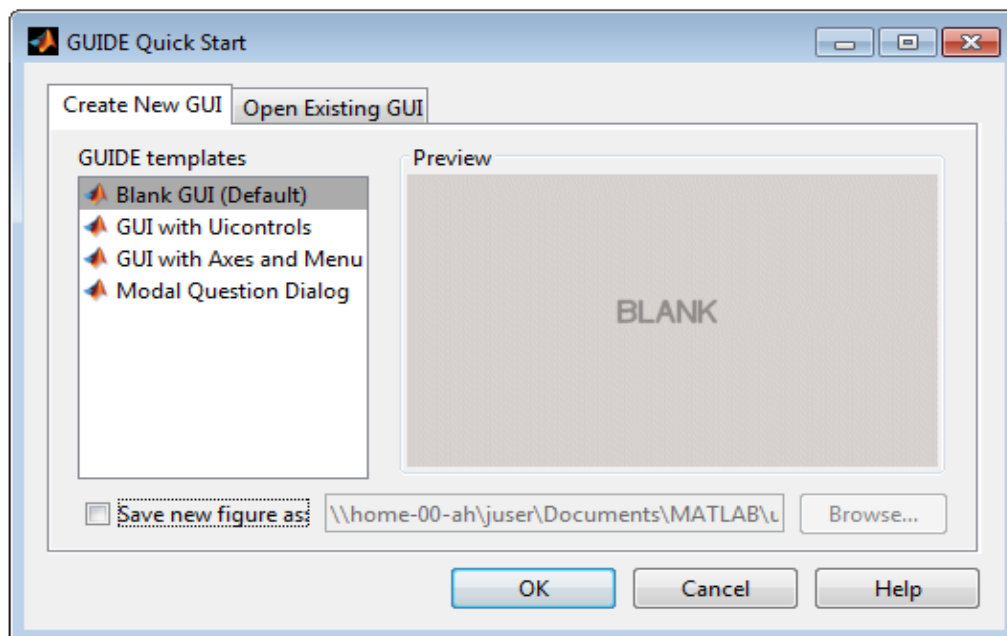


Ilustración 46 Gui Matlab [https://www.mathworks.com/help/Matlab/creating\\_guis/about-the-simple-guide-gui-example.html](https://www.mathworks.com/help/Matlab/creating_guis/about-the-simple-guide-gui-example.html)

En la imagen se visualiza un panel por defecto y en sus opciones diversos ejemplos de GUI prediseñadas para el uso libre de desarrollo en aplicaciones, al terminar un desarrollo visual se pueden generar gráficos, interactuar o hacer cambio de variables de manera sencilla con las diversos algoritmos dentro de las características de la programación visual que se hayan aplicado en la interfaz gráfica de usuario.

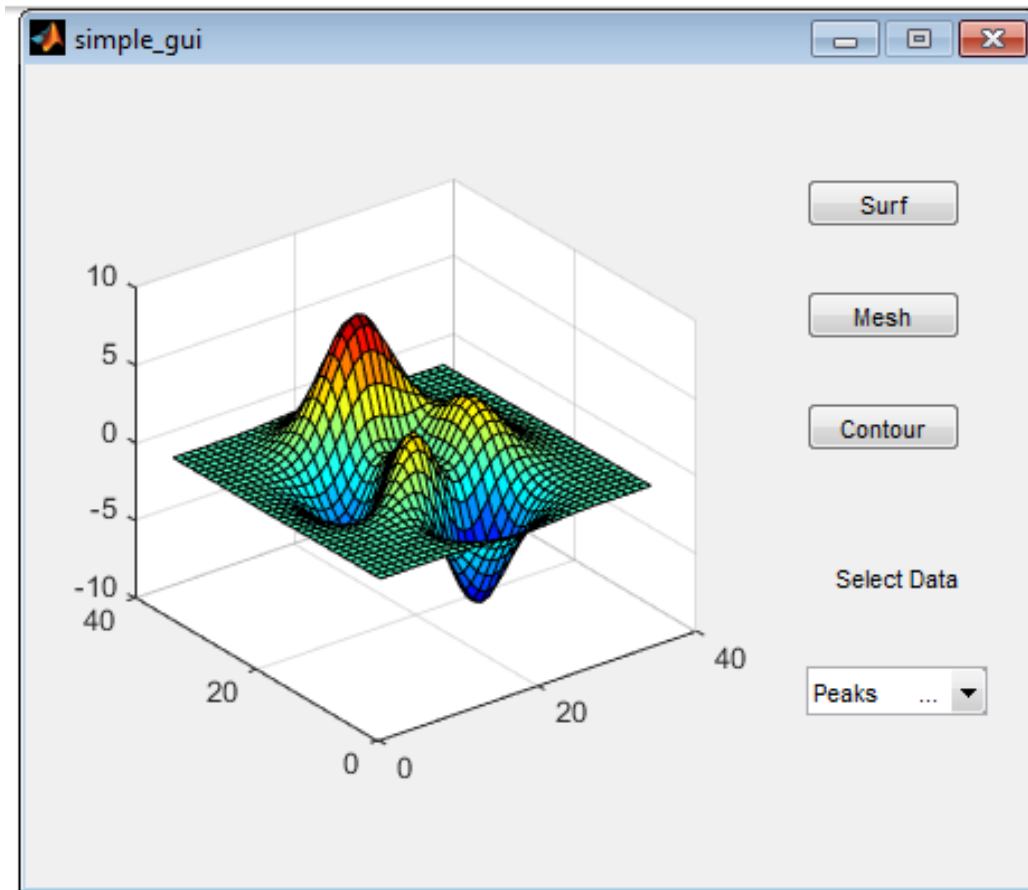


Ilustración 47 Plot3d Matlab [https://www.mathworks.com/help/Matlab/creating\\_gui/about-the-simple-guide-gui-example.html](https://www.mathworks.com/help/Matlab/creating_gui/about-the-simple-guide-gui-example.html)

Esta imagen representa un primer ejemplo de cómo puede quedar finalizada una aplicación interactiva y visual de fácil manejo. Recordando que Matlab utiliza código basado en matrices una forma de expresar el mundo de manera computacional.



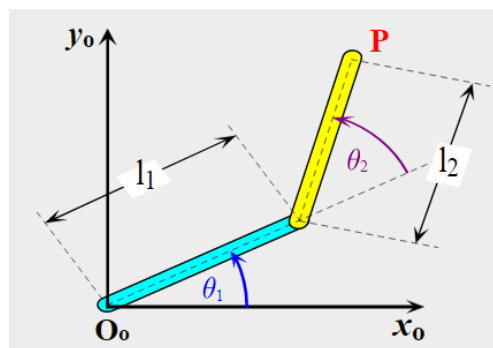
## 4 CINEMÁTICA

### 4.1 CINEMÁTICA INVERSA POR MÉTODO GEOMÉTRICO

El presente capítulo presenta el método y análisis geométrico para la plataforma Stewart, se comenzó con el análisis geométrico utilizado en robots de pocos grados de libertad, no obstante el método a desarrollar es la base con que se comenzará a desarrollar en la plataforma Stewart ya que este permite seleccionar la parte del robot en la que queremos enfatizar. De tal manera encontrar los ángulos deseados en el mecanismo sin necesidad de tener un análisis general del sistema. Debido a la morfología en paralelo que posee la plataforma, se aclara que cualquier movimiento que realice en uno de los seis motores puede generar cambios en las demás cadenas cinemáticas por lo tanto desequilibrar la plataforma móvil.

Se basa en relacionar de manera geométrica el horn (biela) del servo y el eslabón con el ángulo que debe tener el eje del motor respecto a la posición que se desea para generar cualquier movimiento dentro de su espacio de trabajo, con la ayuda de este método geométrico también se encuentra las limitaciones físicas que se presentan debido al tamaño escogido y las direcciones en las que la plataforma superior no alcanza lograr.

### 4.2 Robot de 2GDL



*Ilustración 48 vista superior de un robot 2 G.D.L. Universidad de Santiago de Chile - <http://www.udesantiagovirtual.cl/moodle2/mod/book/view.php?id=24918&chapterid=295>*

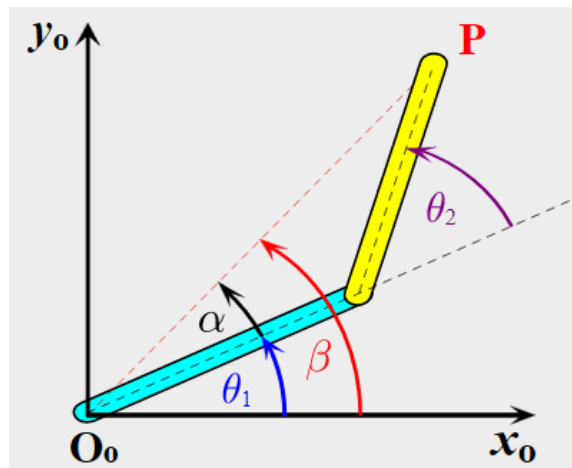


Ilustración 49- Vista lateral de un robot de 2GDL codo abajo - Universidad de Santiago de Chile -  
<http://www.udesantiagoovirtual.cl/moodle2/mod/book/view.php?id=24918&chapterid=295>

Este tipo de análisis se presenta para obtener de manera adecuada los ángulos de cada eslabón, como se puede observar en la ilustración 4. Se tomara en cuenta los siguientes parámetros matemáticos para hallar los grados de esta:

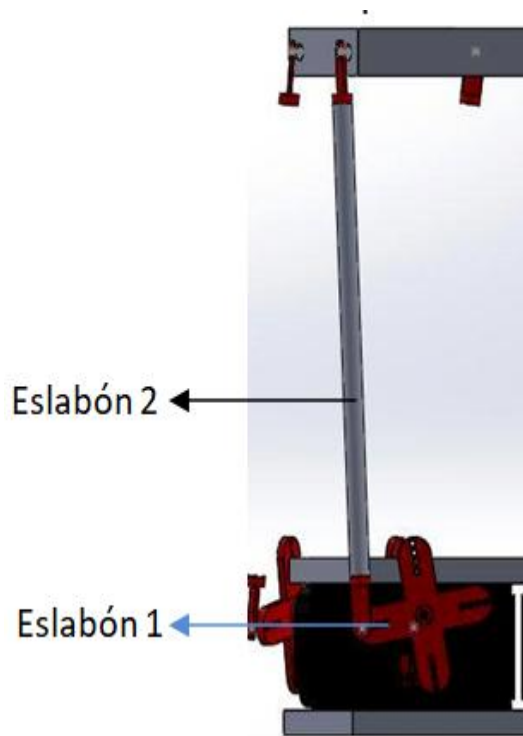
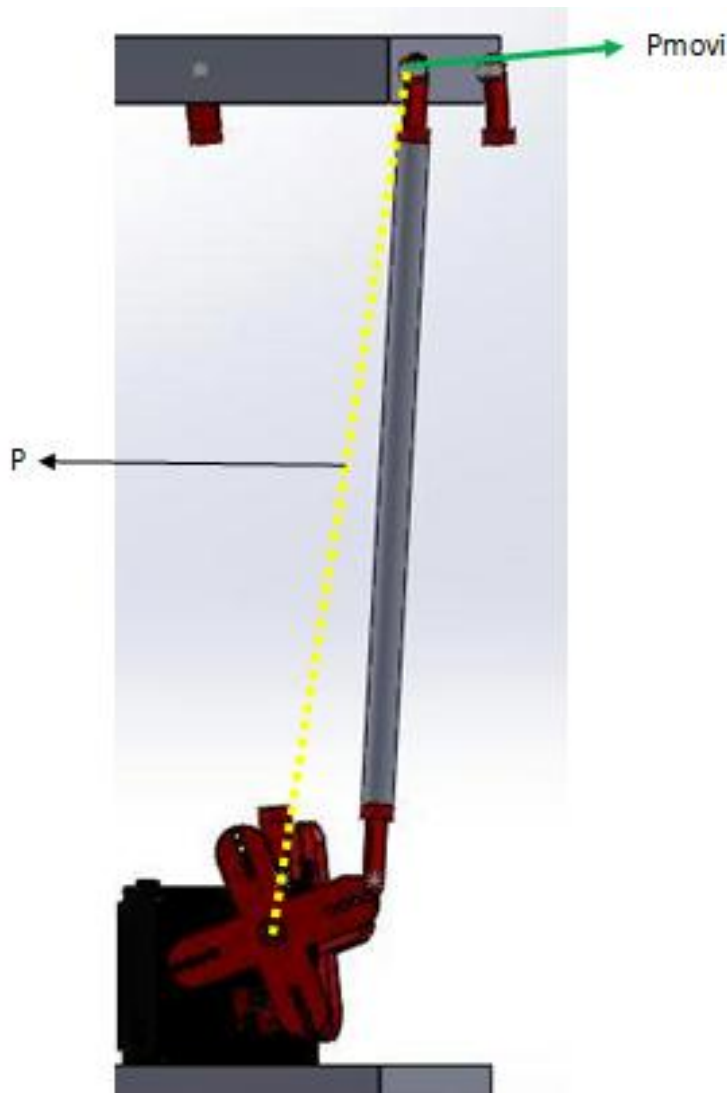


Ilustración 50 Eslabones y motor – Autoría Propia



*Ilustración 51 Punto P - distancia entre el eje del motor y la unión con la plataforma móvil, vista de frente o alzado – Autoría Propia.*

En el análisis geométrico de orientación localizamos las coordenadas del punto (**Pmovil**) gracias al diseño geométrico del capítulo anterior, con el Pmovil y el punto del eje del motor podemos obtener la distancia (**P**) o eslabón 3 de acuerdo a la vista de frente o alzado, esta es conformada por la unión del eslabón 2 con la plataforma móvil y la unión del eslabón 1 con el eje del motor, este eslabón se define como el principal por estar unido directamente entre el eje del motor y la plataforma móvil.

$$P^2 = Pmovil(x)^2 + Pmovil(z)^2 \quad \text{Ecuación de la distancia.}$$

Debemos tener en cuenta que el (Pmovil) tiene tres coordenadas (x,y,z) al igual que el eje del motor. Luego de obtener esta distancia (P) o eslabón (3) se aplica la ley del coseno  $a^2 = b^2 + c^2 - 2ab * \cos A$  para obtener una relación entre el Angulo Theta2 ( $\theta_2$ ) y el eslabón (P).

$$P^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2(-\cos\theta_2) \quad \text{Ley de coseno}$$

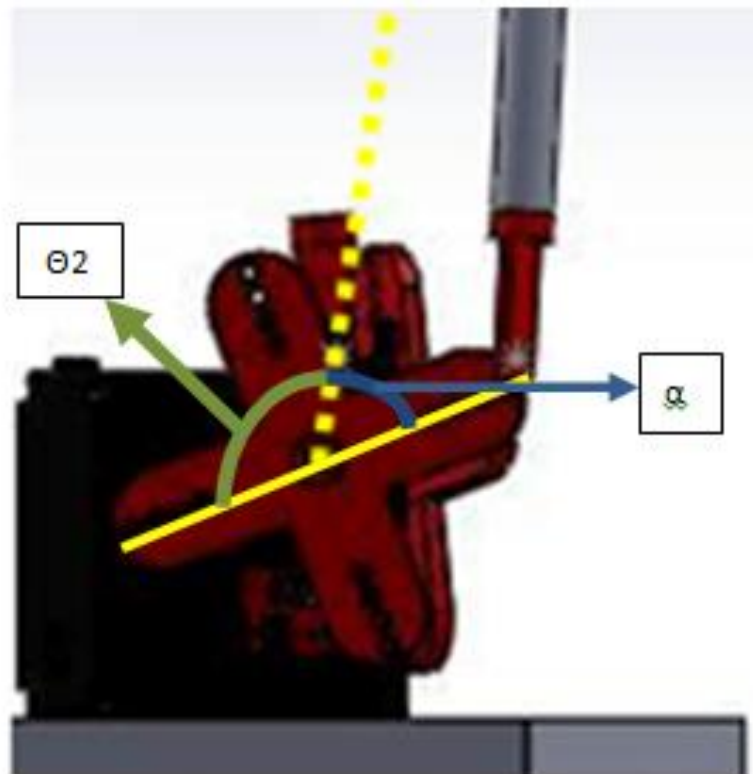
$l_1$  = eslabón 1

$l_2$  = eslabón 2

$P$  = eslabón 3

Obteniendo la siguiente ecuación

$$P_{movil}(x)^2 + P_{movil}(z)^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2(\cos\alpha)$$



*Ilustración 52 Ángulos respecto al eslabón 1 y el eslabón 3 – Autoría Propia*

Como se observa en la ilustración 54 despejamos  $\cos(\theta_2)$  de la siguiente manera teniendo en cuenta :

$$\cos(180 - \theta_2) \quad \text{diferencia de ángulos en coseno}$$

$$\cos\alpha = \cos(180 - \theta_2) = \cos 180^\circ \cos \theta_2 + \sin 180^\circ \sin \theta_2$$

$$\cos\alpha = -\cos \theta_2$$

De la  $(P_{movil}(x)^2 + P_{movil}(z)^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2(\cos\alpha))$  se reemplaza  $\cos\alpha$  por  $-\cos\theta_2$

$$P_{movil}(x)^2 + P_{movil}(z)^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2(-\cos\theta_2)$$

Despejamos  $\cos\theta_2$

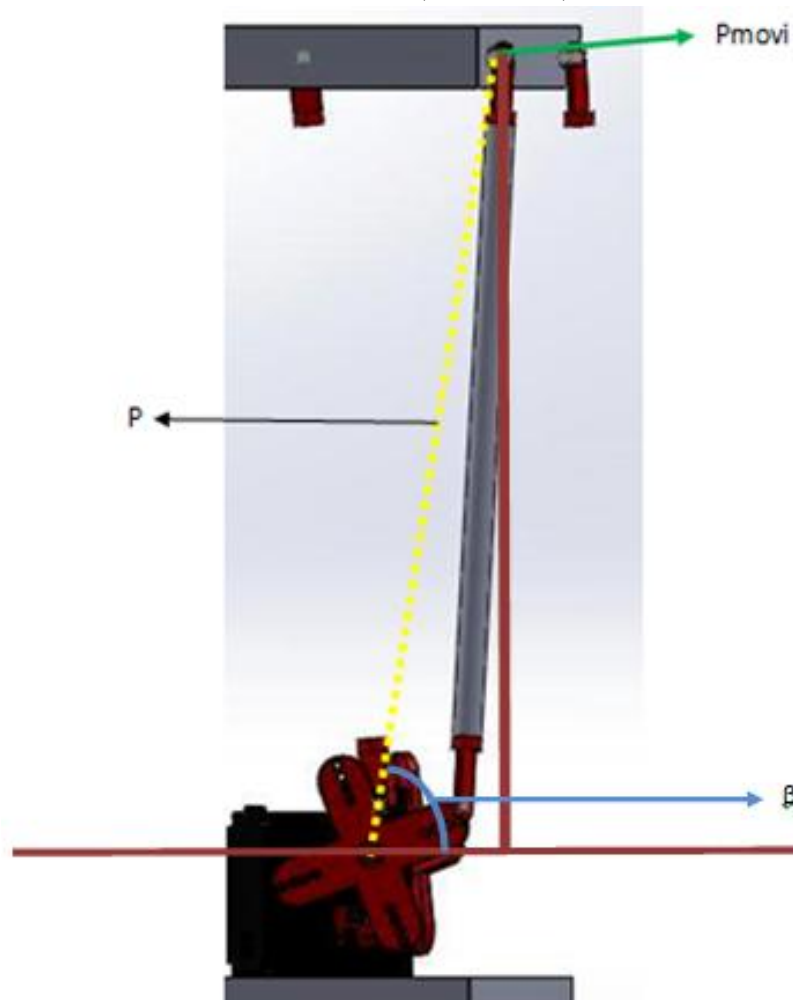
$$\cos\theta_2 = \frac{P_{movil}(x)^2 + P_{movil}(z)^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} = M$$

Según la identidad

$$\sin\theta_2 = \sqrt{1 - \cos^2\theta_2}$$

Utilizando propiedades relacionadas con la tangente de un ángulo y despejando  $\theta_2$  encontramos:

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{(\sqrt{1 - \cos^2\theta_2})}{M}\right)$$



*Ilustración 53 Ángulo Beta – Autoría Propia*

Hallamos el ángulo  $\beta$ :

$$\tan\beta = \frac{l_1}{z_1}$$

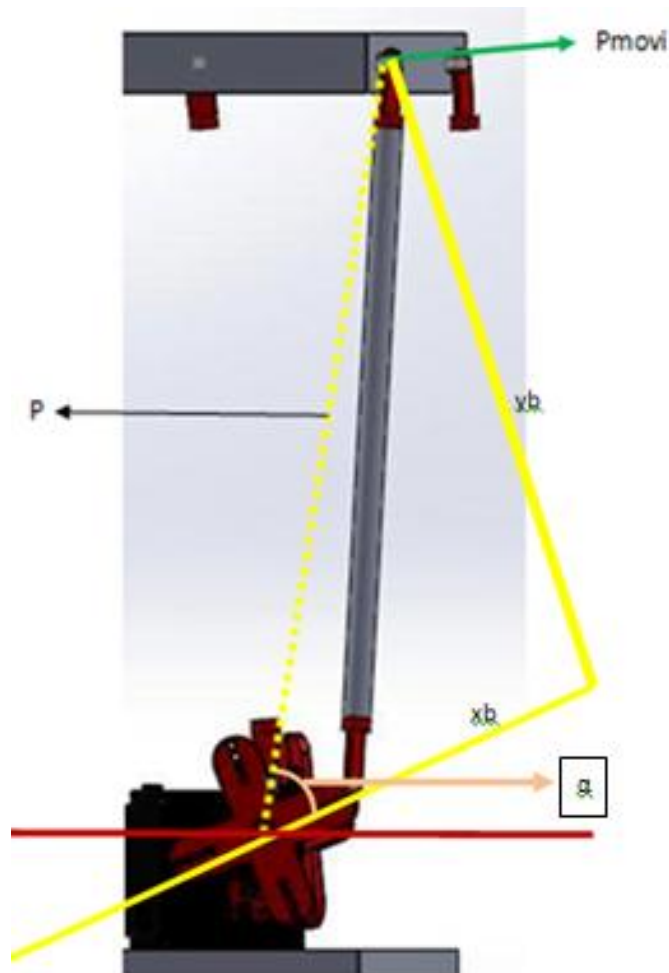
$$\beta = \tan^{-1} \frac{l_1}{z_1}$$

Donde =

$Z_1$  = es la distancia del eje a la plataforma móvil

$L_1$  = eslabón 1

Teniendo en cuenta el triángulo formado por la región punteada y  $L_1$  procedemos hallar el ángulo  $\theta_1$ :

*Ilustración 54 Triangulo para hallar el ángulo  $\theta_2$  – Autoría Propia*

$$xb = l2 * \cos\theta2$$

$$yb = l2 * \sin\theta2$$

Por lo tanto la medida total del triángulo punteado en X

$$X = xb + l1$$

$$\tan \alpha = \frac{l2 * \sin\theta2}{xb + l1}$$

$$\tan \alpha = \frac{l2 * \sin\theta2}{l2 * \cos\theta2 + l1}$$

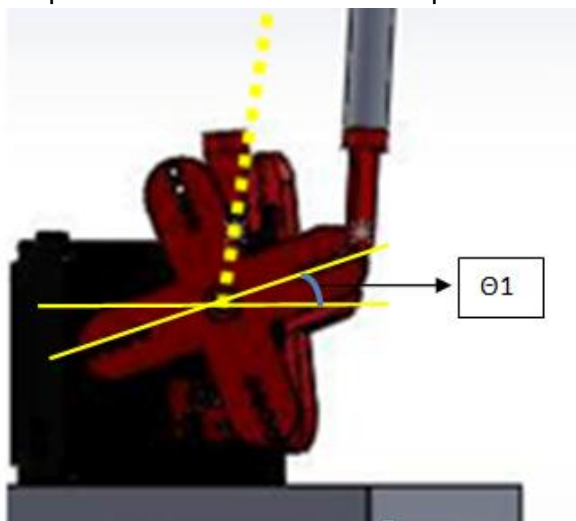
$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{l2 * \sin\theta2}{l2 * \cos\theta2 + l1} \right)$$

Ya que se tienen los valores de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  podemos hacer la relación con  $\theta_2$  y de esta manera obtener al ángulo adecuado que debe tener el actuador según la posición que se desee llegar con la junta superior.

$$\theta1 = \beta - \alpha$$

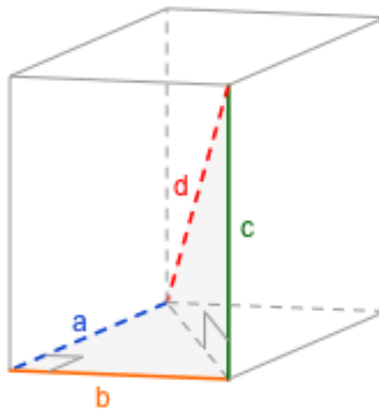
$$\theta1 = \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{l2 * \sin\theta2}{l2 * \cos\theta2 + l1} \right)$$

Se debe tener claro que este análisis se debe realizar para cada eslabón y que con ayuda de diversos métodos como el de mecanismos de cuatro barras se realizó el análisis completo del sistema de la plataforma superior respecto a la inferior.



### 4.3 Distancia eslabón principal

Para obtener la posición del eslabón principal el cual se basa en la distancia entre el eje del motor y el punto de conexión con la plataforma móvil, este se halla con las tres coordenadas (x,y,z) ya que no se puede obtener como si fuera una figura planar, vista de frente o alzado como se realizó con los grados, esta medida es afectada por los tres ejes de coordenadas, para poder solucionar y hallar esta distancia debemos tener en cuenta el teorema de Pitágoras 3d. La ilustración 9 y 10 demuestran en donde se debe aplicar estas operaciones.

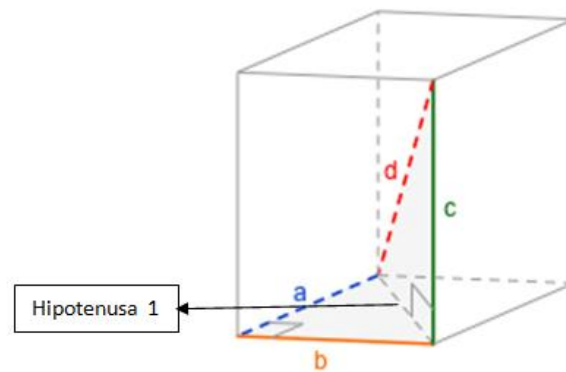


*Ilustración 56 Ortoedro con Pitágoras 3d - <http://www.geometriadinamica.cl> - 21 de julio de 2008*

El teorema de Pitágoras 3d se realiza para obtener la hipotenusa o alguno de los catetos que se desconozcan en una figura tridimensional como se demuestra en la ilustración 9. Este teorema se puede simplificar de la siguiente forma:

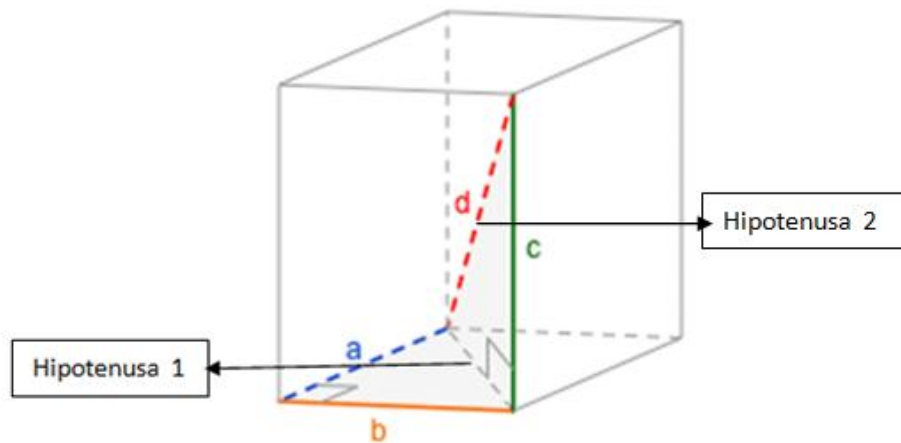
1. Dividir la figura en dos áreas planares para realizar de manera cómodo el procedimiento matemático.
2. En la primera figura planar se deberá encontrar la hipotenusa<sup>1</sup> por medio de Pitágoras, observando que ya se tengan los catetos.





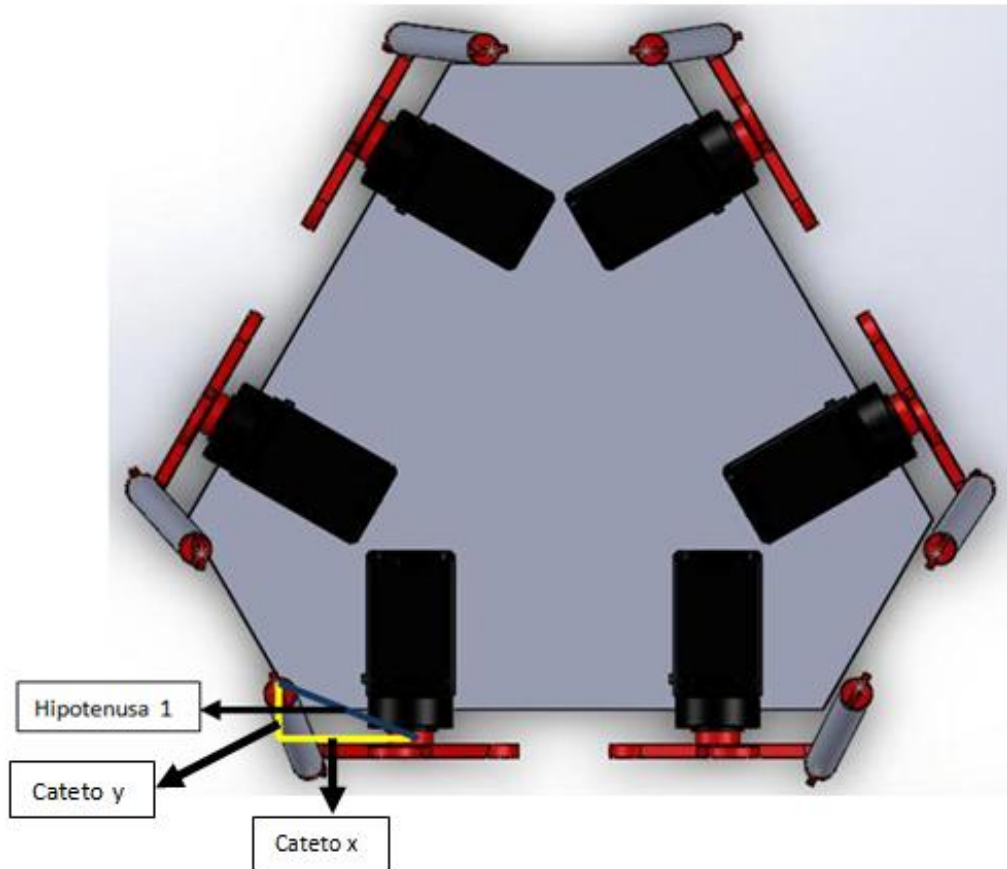
*Ilustración 57 Hipotenusa entre a y b*

3. Una vez obtenida se halla la hipotenusa 2 que se forma en diagonal en la figura a lo alto.



*Ilustración 58 Hipotenusa 2 - Pitágoras 3d*

Teniendo en cuenta la solución anterior procedemos a llevar a cabo el proceso para obtener la medida del eslabón principal por medio de este método.



*Ilustración 59 Pitágoras 3d - hipotenusa 1- Plataforma Stewart – Autoría Propia*

1. Se observa la ubicación de la hipotenusa 1 con respecto a la plataforma en la ilustración 1.

El cateto en x se obtiene de la diferencia entre el punto xEje de la plataforma base y el punto x del efector final.

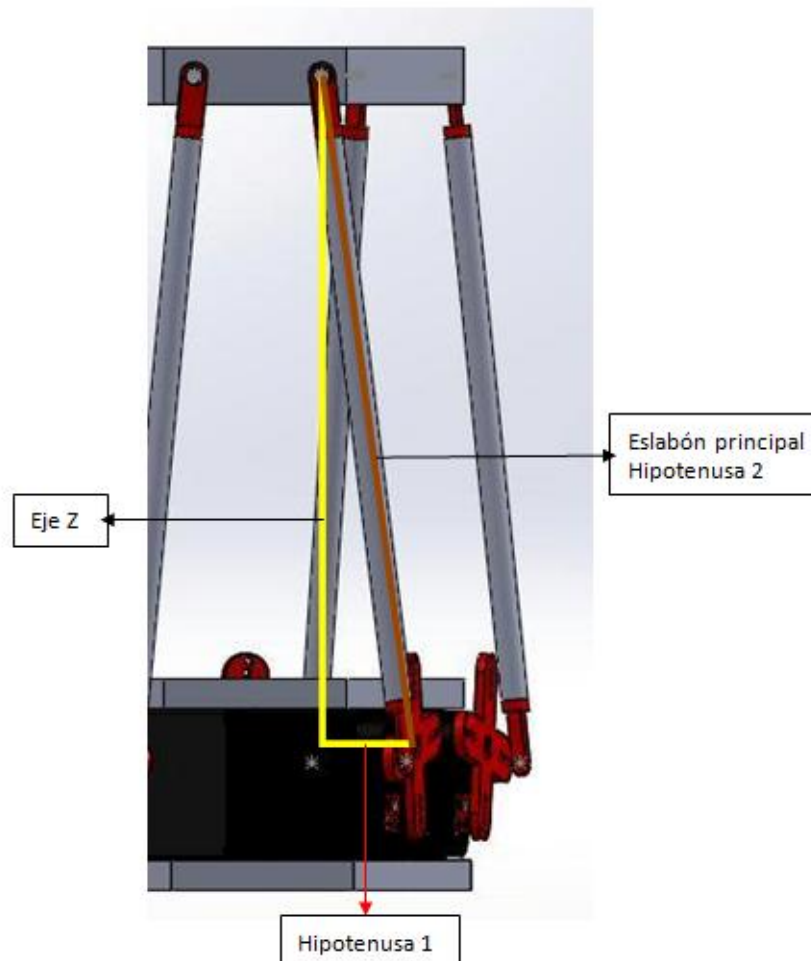
$$x = \sqrt{P_{movil}^2 - P_{base}^2} \quad \text{Ecu18}$$

Dónde:

$P_{movil}$  = se refiere a la posición en X de la plataforma móvil con respecto a la unión de esta con el eslabón 2

$P_{base}$  = se refiere a la posición X del eje del motor ubicado en la plataforma base, este debe ser congruente con el eslabón 1 de la misma cadena cinemática del punto anterior.

2. Una vez se obtiene la hipotenusa 1, se procede a conseguir la hipotenusa 2



*Ilustración 60 Eslabón principal - plataforma Stewart – Autoría Propia*

$$\text{Eslabón principal o hipotenusa 2} = \sqrt{\text{Hipotenusa 1}^2 - \text{Pbase}^2} \quad \text{Ecu19}$$

Una vez se hallan estos procedimientos se comienza a encontrar cada uno de los eslabones principales en los movimientos básicos.

#### 4.4 Distancia Eslabones Principales Eje X

Pxb= plataforma base en X = P1base(x)

Pyb= plataforma base en Y = P1base(y)

Pxm= plataforma móvil en X = P1movil(x)

Pym= plataforma móvil en Y = P1movil (y)

H (a)= hipotenusa 1

H (b)= hipotenusa respecto al eje Z o eslabón principal

Eje z = distancia que hay entre la plataforma base y el eje del motor.

Con las siguientes ecuaciones encontramos la distancia entre el eje del actuador y la junta de la plataforma móvil:

$$H(a) = \sqrt{(Pxb - Pxm)^2 - (Pyb - Pym)^2} \quad \text{Ecu18}$$

$$H(b) = \sqrt{(H(a))^2 - (\text{Distancia } z)^2} \quad \text{Ecu19}$$

La siguiente tabla1 muestra los eslabones principales para cada cadena cinemática encontrada en la plataforma Stewart, tengamos en cuenta que cada motor con eje de unión en la plataforma móvil por medio de los eslabones es una cadena cinemática. El procedimiento para el eje Y y Z son exactamente iguales, lo único que cambia son los puntos de coordenadas en la plataforma móvil.

Legs	Eslabón cm	Pxb- Pxm	Pyb- Pxm	H (a)	Eje z	H (b)	Posición X
<b>L1</b>	16	3	2.5	3.9	15.5	15.95	0
<b>L2</b>	16	0.4	4.1	4.11	15.5	16.03	0
<b>L3</b>	16	3.4	1	3.54	15.5	15.89	0
<b>L4</b>	16	3.3	1.2	3.51	15.5	15.89	0
<b>L5</b>	16	0.3	4.1	4.11	15.5	16.03	0
<b>L6</b>	16	3	2.5	3.9	15.5	15.95	0
<b>L1</b>	16	1	0.8	1.28	14.5	14.55	-4

<b>L2</b>	16	4.2	5.5	6.92	14.5	16.06	-4
<b>L3</b>	16	7.4	0.5	7.41	14.5	16.28	-4
<b>L4</b>	16	0.8	0.4	0.89	14.5	14.52	-4
<b>L5</b>	16	3.5	5.6	6.60	14.5	15.93	-4
<b>L6</b>	16	7	1	7.07	14.5	16.13	-4
<b>L1</b>	16	7	1	7.07	14.5	16.13	4
<b>L2</b>	16	3.6	5.5	6.57	14.5	15.91	4
<b>L3</b>	16	0.8	0.5	0.94	14.5	14.53	4
<b>L4</b>	16	7.5	0.5	7.51	14.5	16.32	4
<b>L5</b>	16	4.3	5.5	6.98	14.5	16.09	4
<b>L6</b>	16	1	0.8	1.28	14.5	14.55	4

Tabla 1 Eslabones principales eje X

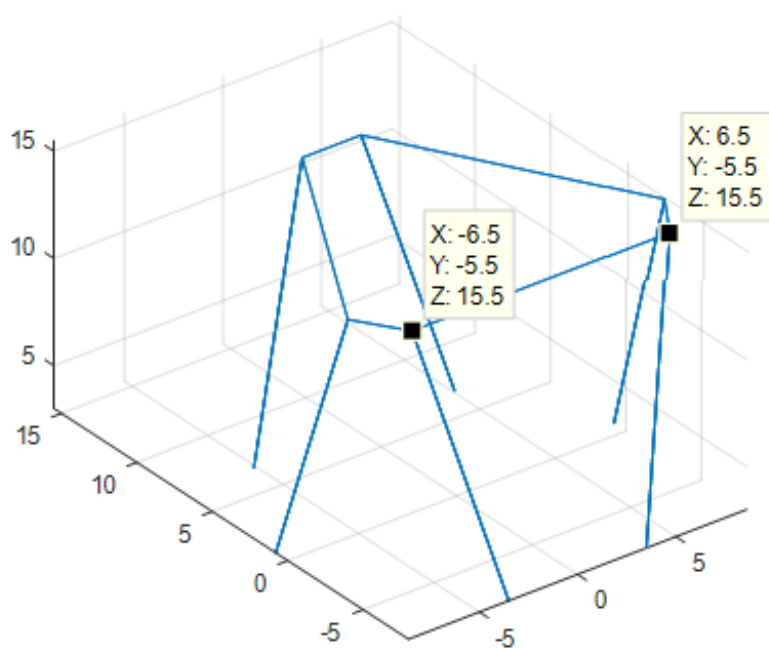


Ilustración 61 eje X en 0 – Autoría Propia

Los eslabones que se observan son los obtenidos por medio de Pitágoras 3d estas distancias son del eje del motor con respecto a junta de la plataforma móvil.

#### 4.4.1 Posicionamiento De La Plataforma Móvil En Eje Y

Pxb= plataforma base en X

Pyb= plataforma base en Y

Pxm= plataforma móvil en X

Pym= plataforma móvil en Y

H (a)= hipotenusa respecto al eje X

H (b)= hipotenusa respecto al eje Z o eslabón principal.

Con las siguientes ecuaciones encontramos la distancia entre el eje de los actuadores y la junta de la plataforma móvil.

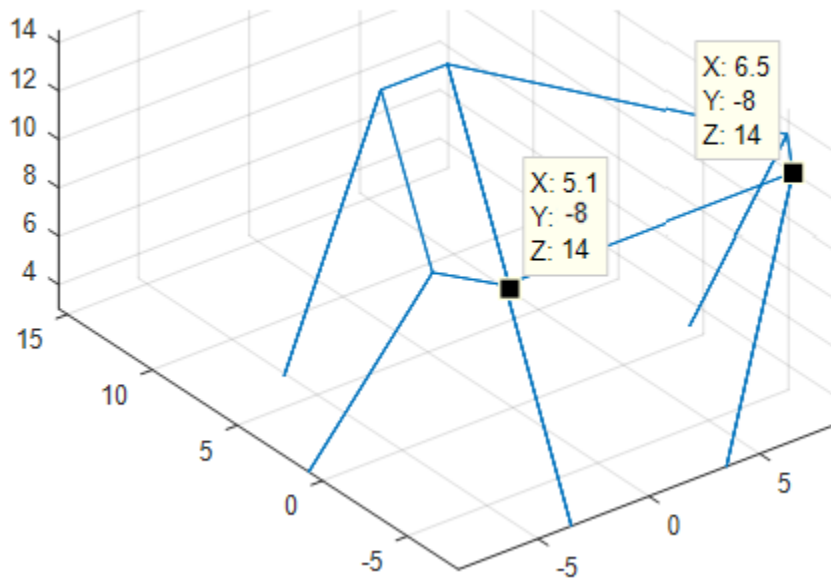
$$H(a) = \sqrt{(Pxb - Pxm)^2 - (Pyb - Pym)^2}$$

$$H(b) = \sqrt{(H(a))^2 - (Eje z)^2}$$

	Eslabón	Pxb- Pxm	Pyb - Pym	H (a)	Eje z	H (b)	Posición Y
<b>L1</b>	16 cm	3	0.2	3	15	15.29	-2.5
<b>L2</b>	16 cm	0.6	6.5	6.52	15	15.44	-2.5
<b>L3</b>	16 cm	3.5	1	3.64	15	15.43	-2.5
<b>L4</b>	16 cm	3.5	1	3.64	15	15.43	-2.5
<b>L5</b>	16 cm	0.6	6.5	6.52	15	15.44	-2.5
<b>L6</b>	16 cm	3	0.2	3	15	15.29	-2.5
<b>L1</b>	16 cm	3	4.9	5.74	15	16.06	2.5
<b>L2</b>	16 cm	0.6	1.3	1.43	15	15.06	2.5
<b>L3</b>	16 cm	3.5	3.9	5.24	15	15.8	2.5
<b>L4</b>	16 cm	3.5	3.9	5.24	15	15.8	2.5
<b>L5</b>	16 cm	0.6	1.3	1.43	15	15.06	2.5
<b>L6</b>	16 cm	3	4.9	5.74	15	16.06	2.5

Tabla 1 Eslabones principales eje Y

## Ejemplo de Posicionamiento en el eje Y



*Ilustración 62 Plataforma Movimiento en el eje Y – Autoría propia*

#### 4.4.2 Posicionamiento De La Plataforma Móvil En Eje Z

La plataforma varía en el eje Z respecto al tamaño del HORN del motor, para el caso de este prototipo la variación será de 16.8 cm en su altura máxima y 14.2cm en su mínimo. La altura de la plataforma está establecida a través de los eslabones físicos, que se hallaron con el análisis matemático.

Pxb= plataforma base en X

Pyb= plataforma base en Y

Pxm= plataforma móvil en X

Pym= plataforma móvil en Y

H (a)= hipotenusa respecto al eje X

H (b)= hipotenusa respecto al eje Z

Con las siguientes ecuaciones encontramos la distancia entre el eje de los actuadores y la junta de la plataforma móvil.

$$H(a) = \sqrt{(Pxb - Pxm)^2 - (Pyb - Pym)^2}$$

$$H(b) = \sqrt{(H(a))^2 - (\text{Eje } z)^2}$$

Legs	Eslabón cm	Pxb-Pxm	Pyb-Pxm	H (a)	Eje z	H (b)	Posición Z
L1	16	3	2.5	3.9	15.5	15.98	0
L2	16	0.4	4.1	4.11	15.5	16.03	0
L3	16	3.4	1	3.54	15.5	15.89	0
L4	16	3.3	1.2	3.51	15.5	15.89	0
L5	16	0.3	4.1	4.11	15.5	16.03	0
L6	16	3	2.5	3.9	15.5	15.98	0
L1	16	3	2.5	3.9	14.2	14.7	-2.6
L2	16	0.4	4.1	4.11	14.2	14.78	-2.6
L3	16	3.4	1	3.54	14.2	14.63	-2.6
L4	16	3.3	1.2	3.51	14.2	14.62	-2.6
L5	16	0.3	4.1	4.11	14.2	14.78	-2.6
L6	16	3	2.5	3.9	14.2	14.7	-2.6
L1	16	3	2.5	3.9	16.8	17.24	2.6
L2	16	0.4	4.1	4.11	16.8	17.29	2.6
L3	16	3.4	1	3.54	16.8	17.16	2.6
L4	16	3.3	1.2	3.51	16.8	17.16	2.6
L5	16	0.3	4.1	4.11	16.8	17.29	2.6
L6	16	3	2.5	3.9	16.8	17.24	2.6

Tabla 1 Eslabones principales eje Z

Ejemplo posicionamiento en el eje Z

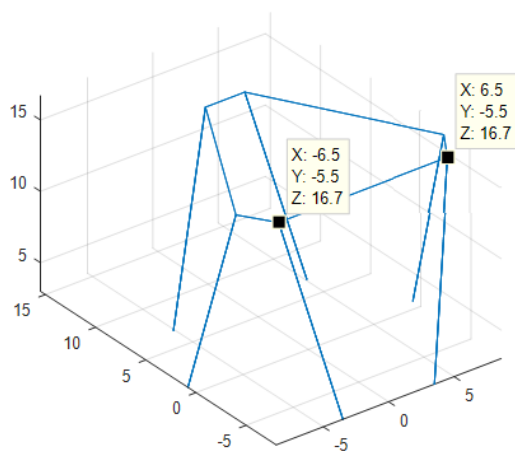


Ilustración 63 Posicionamiento en el eje Z - Autoría propia



## 4.5 Grados Del Motor

Teniendo en cuenta lo anterior se ha realizado la programación necesaria para observar la validación de las ecuaciones preliminares por medio del programa Matlab. Se ha tenido en cuenta las características y dimensiones del diseño que se ha realizado en el capítulo 2 análisis geométrico estructura. Para realizar la debida visualización de los eslabones se utilizó denavit hartenberg ya que este nos permite tener al efector final en las coordenadas que se desee.

Se ha implementado el siguiente código para hallar los ángulos de cada eslabón principal teniendo en cuenta el sistema de coordenadas planar (x, z).

### 4.5.1 Simulación grados de los motores:

El siguiente código de programación se realiza para todas las posiciones teniendo en cuenta cada posición (X,Y,Z) está referida con un determinado intervalo dependiendo la que se desee. El eje X puede ubicarse en una posición de (-/+) 4 centímetros. El eje Z puede ubicarse en (+/-) 2.5 centímetros y el eje Y de (+/-) 2.6 centímetros.

Programación general: esta contiene la cinemática inversa y el sistema matricial denavit hartenberg para poder obtener la visualización correcta de los eslabones, este código contiene la cadena cinemática de los eslabones 6 y 1 respectivamente, debemos tener en cuenta que para las otras dos cadenas cinemáticas se realiza el mismo procedimiento.

Cadena cinemática 1	Eslabón 1	Eslabón 6
Cadena cinemática 2	Eslabón 2	Eslabón 5
Cadena cinemática 3	Eslabón 3	Eslabón 4

### 4.5.2 Programación:

```
x = 0;

a11 = 1.5;
a22 = 16;
partimos de la posición que se desea obtener
P6base = [-3.5; -8; 3]; % punto fijo inferior izquierdo
P1base = [3.5; -8; 3]; % punto fijo inferior derecho
P6movil = [x-3; -5.5-(abs(x)*1.5)/4; 15.5-(abs(x)/4)];
h1 = sqrt((P6base(1)-P6movil(1))^2+(P6base(2)-P6movil(2))^2);
h2 = sqrt((h1)^2+(P6movil(3))^2); % eslabón principal
x6 = P6movil(1);
y6 = P6movil(3);
alfa = atan2d(P6movil(3),P6movil(1));
M = ((P6movil(1)^2+P6movil(3)^2-a11^2-a22^2)/(2*a11*a22));
```

```

s = -sqrt(1-M^2);
theta1 = atan2d(s,M);
beta = atan2d ((a22*s), (a11+a22*M));
ang16 = alfa - beta;
ang26 = theta1; % es 180 - theta
h = plot(x6,y6,'r');
hold on;
axis equal
axis([-18 18 -18 18])
grid
theta6= 180; % Primera Art
alpha6=0;
d6=0;
a6=3.5;
theta66= ang16 - 180; % Segunda Art
alpha66=0;
d66=0;
a66=a11;
theta666= ang26; % Tercera Art
alpha666=0;
d666=0;
a666=a22;
T6=[cosd(theta6) -cosd(alpha6)*sind(theta6)
sind(alpha6)*sind(theta6) a6*cosd(theta6)
sind(theta6) cosd(alpha6)*cosd(theta6) -
sind(alpha6)*cosd(theta6) a6*sind(theta6)
0 sind(alpha6) cosd(alpha6)
d6
0 0 0
1];
T66=[cosd(theta66) -cosd(alpha66)*sind(theta66)
sind(alpha66)*sind(theta66) a66*cosd(theta66)
sind(theta66) cosd(alpha66)*cosd(theta66) -
sind(alpha66)*cosd(theta66) a66*sind(theta66)
0 sind(alpha66) cosd(alpha66)
d66
0 0 0
1];
T666=[cosd(theta666) -cosd(alpha666)*sind(theta666)
sind(alpha666)*sind(theta666) a666*cosd(theta666)
sind(theta666) cosd(alpha666)*cosd(theta666) -
sind(alpha666)*cosd(theta666) a666*sind(theta666)
0 sind(alpha666) cosd(alpha666)
d666
0 0 0
1];
TT6 = T6*T66*T666;
X16 = T6*[0 0 0 1]';
X26 = T6*T66*[0 0 0 1]';
X36 = TT6*[0 0 0 1]';
h.XData = [X16(1) X26(1) X36(1)];
h.YData = [X16(2) X26(2) X36(2)];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% eslabon 1%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Plmovil = [x+3; -5.5-(abs(x)*1.5)/4; 15.5-(abs(x)/4)];
h3 = sqrt((Plmovil(1)-Plbase(1))^2+(Plbase(2)-Plmovil(2))^2);

```

```

h4 = sqrt((h3)^2+(Plmovil(3))^2);
x1 = Plmovil(1);
y1 = Plmovil(3);
alfa1 = atan2d(Plmovil(3),Plmovil(1));
M1 = ((Plmovil(1)^2+Plmovil(3)^2-a11^2-a22^2)/(2*a11*a22));
s1 = sqrt(1-M1^2);
theta11 = atan2d(s1,M1);
beta1 = atan2d((a22*s1),(a11+a22*M1));
ang11 = alfa1 - beta1;
ang21 = theta11; % es 180 - theta
h = plot(x1,y1,'r');
hold on;
axis equal
axis([-18 18 -18 18])
grid
theta1= 0; % Primera Art
alpha1=0;
d1=0;
a1=3.5;
theta11= ang11; % Segunda Art
alpha11=0;
d11=0;
a11=a1;
theta111= ang21; % Tercera Art
alpha111=0;
d111=0;
a111=a22;
T1=[cosd(theta1) -cosd(alpha1)*sind(theta1)
sind(alpha1)*sind(theta1) a1*cosd(theta1)
sind(theta1) cosd(alpha1)*cosd(theta1) -
sind(alpha1)*cosd(theta1) a1*sind(theta1)
0 sind(alpha1) cosd(alpha1)
d1 0 0 0
1];

T11=[cosd(theta11) -cosd(alpha11)*sind(theta11)
sind(alpha11)*sind(theta11) a11*cosd(theta11)
sind(theta11) cosd(alpha11)*cosd(theta11) -
sind(alpha11)*cosd(theta11) a11*sind(theta11)
0 sind(alpha11) cosd(alpha11)
d11 0 0 0
1];

T111=[cosd(theta111) -cosd(alpha111)*sind(theta111)
sind(alpha111)*sind(theta111) a111*cosd(theta111)
sind(theta111) cosd(alpha111)*cosd(theta111) -
sind(alpha111)*cosd(theta111) a111*sind(theta111)
0 sind(alpha111) cosd(alpha111)
d111 0 0 0
1];

TT1 = T1*T11*T111;
X11 = T1*[0 0 0 1]';
X21 = T1*T11*[0 0 0 1]';

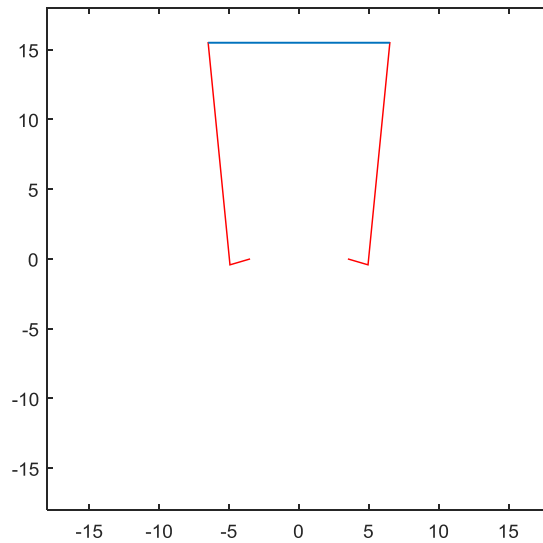
```

```

X31 = TT1*[0 0 0 1]';
h.XData = [X11(1) X21(1) X31(1)];
h.YData = [X11(2) X21(2) X31(2)];

%%%%%%%%
N = 50;
coordX = [ linspace(x-6.5, x+6.5, N)];
coordY = [ linspace(15.5-(abs(x)/4), 15.5-(abs(x)/4), N) ];
plot(coordX,coordY,'LineWidth',1);

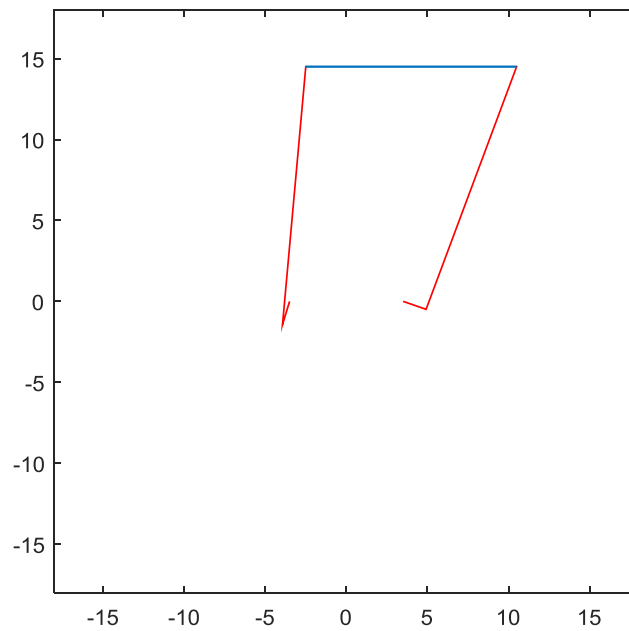
```



*Ilustración 64 Plot del código – posición X=0 –eslabones 6 y 1 respectivamente – Autoría Propia*

Grados eslabón 1 =  $73.594^{\circ}$  grados  
 Grados eslabón 6 =  $73.594^{\circ}$  grados

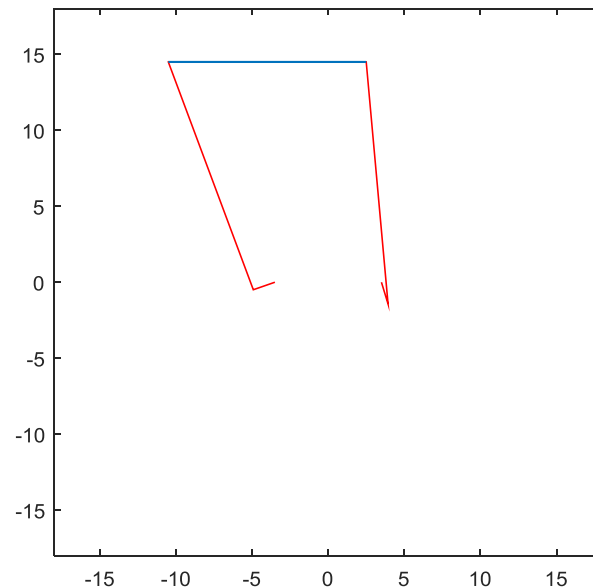
Eje X en posición 4



*Ilustración 65 Plot eje x = 4 – Autoría Propia*

Grados eslabón 2 =  $70.768^{\circ}$  grados  
Grados eslabón 5 =  $136.138^{\circ}$  grados

En la ilustración 15 se puede observar como las posiciones de los eslabones cambian con respecto a la ilustración 14. Este movimiento se realiza hacia la el costado derecho 4 centímetros.



*Ilustración 66 Plot eje x = -4 – Autoría Propia*

Grados eslabón 3 =  $16.861^{\circ}$  grados  
Grados eslabón 4 =  $109.23^{\circ}$  grados

En la ilustración 15 se puede observar como las posiciones de los eslabones cambian con respecto a la ilustración 14. Este movimiento se realiza hacia la el costado derecho 4 centímetros.

De la misma manera se realiza el procedimiento para los ejes Y y Z.

## 5 Desarrollo GUI

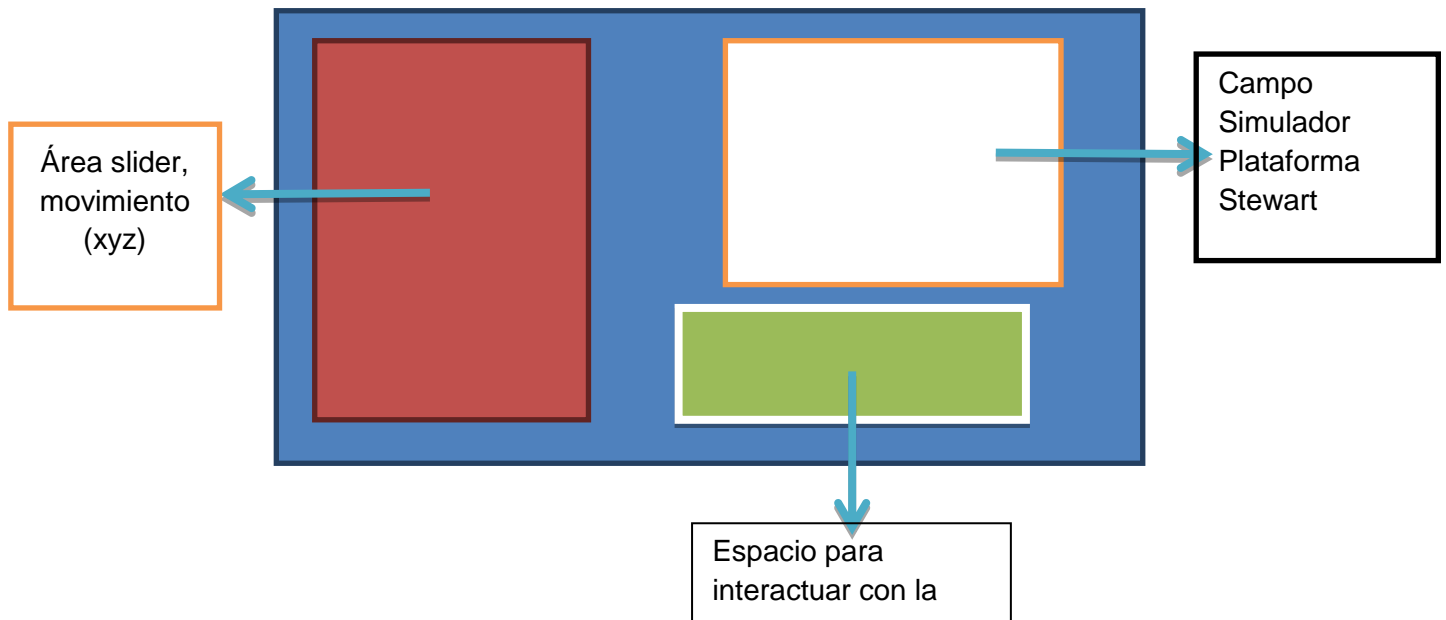
Para el desarrollo de la interfaz gráfica se tuvo en cuenta los parámetros y análisis estructural de los capítulos anteriores, Con respecto a lo hallado se realiza el diseño y presentación de la guide en Matlab, los procesos matemáticos que se han desarrollado, además se realizó una gráfica en 3d que simulo el comportamiento de la plataforma con los eslabones principales. Esta GUI simplifico la cantidad de información que puede suministrar el código en un solo botón fácil de reconocer.

### 5.1 Interfaz gráfica

De acuerdo con los fundamentos y las posiciones obtenidas se realiza una interfaz gráfica en la cual se pueda observar los datos más relevantes, esta permitirá interactuar con la plataforma real y la simulada verificando así el funcionamiento adecuado de las mismas.

Esta interfaz se realizará por medio de Matlab y se pretende visualizar las posiciones de la plataforma junto a los datos que el usuario va ingresando creando un entorno amigable para la interacción con la plataforma y el exterior.

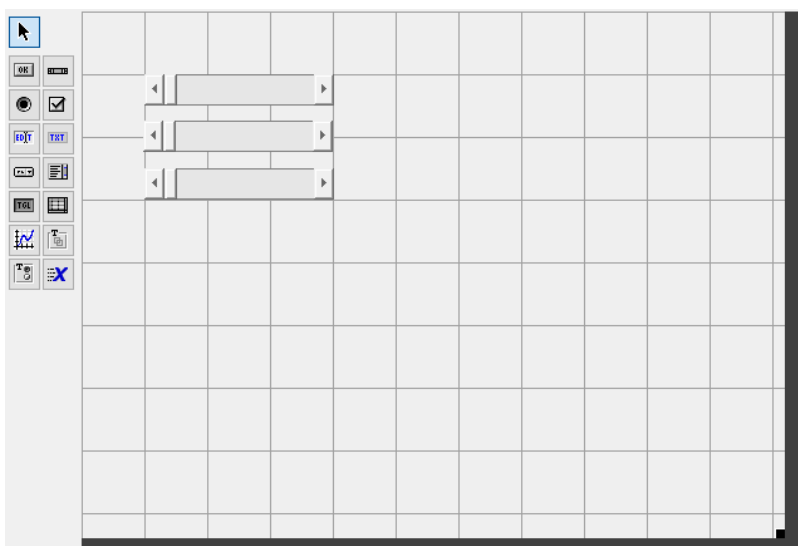
Para construir esta interfaz se realizó un boceto adecuado para determinar qué tipo de botones y slider se consideraban colocar y la función de estos. Ilustración 1.



*Ilustración 67 boceto GUI – Autoría Propia*

Una vez realizado el boceto se procederá a la implementación de la interfaz gracias al software de Matlab el cual contiene una aplicación llamada Guide en la cual se puede realizar este tipo de procedimientos.

Se comienza con la implementación de los slider que conformaran los 6 movimientos o grados de libertad mediante la GUI de la siguiente forma:



*Ilustración 68 Sliders, movimientos básicos – Matlab*

Los primeros slider que se han colocado y hacen referencia a los ejes (x, y, z), con estos se comenzó a realizar las pruebas de reconocimiento y obtención de datos por medio de estos, una vez colocados se cambió los nombres de cada uno, para un mayor entendimiento a la hora de programar y ejecutar el código, teniendo en cuenta que cada eslider se rige por una ecuación característica.

HandleVisibility	on
HorizontalAlignment	center
Interruptible	<input checked="" type="checkbox"/> On
KeyPressFcn	
KeyReleaseFcn	
ListboxTop	1.0
Max	1.0
Min	0.0
Position	[9,8 26,462 30,2 1,923]
SliderStep	[1x2 double array]
String	Slider
Style	slider
Tag	slider1
TooltipString	
UIContextMenu	<None>
Units	characters
UserData	
Value	0.0

*Ilustración 69 Propiedades de los*

*Slider Matlab*



Como se puede observar en la ilustración 3 cada slider posee una serie de parámetros que se pueden modificar para una mayor funcionalidad, en este caso se cambiara el nombre del elemento (Tag) y título de este por algo más fácil de reconocer.

- Tag = Slider
- String = EjeX

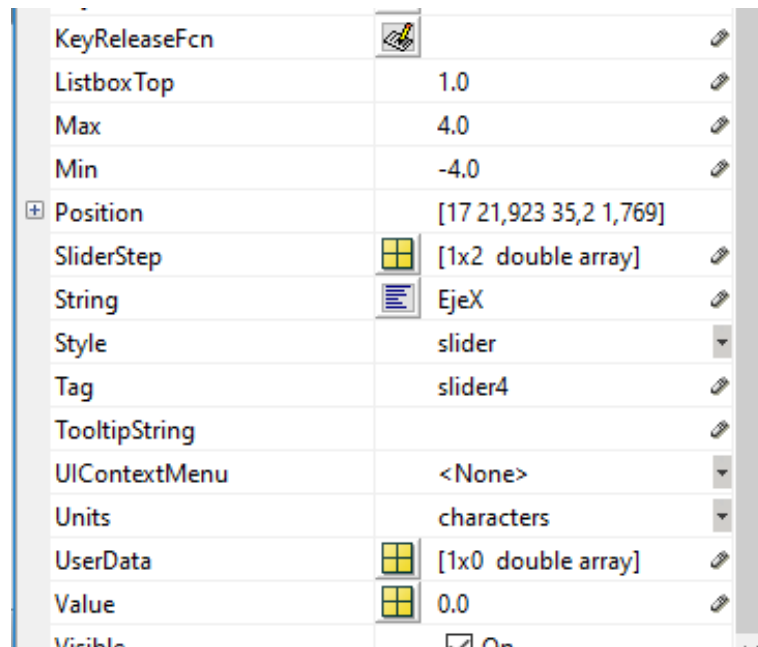


Ilustración 70 Propiedades del slider - máximos y Mínimos Matlab

Cada slider cuenta con un rango de funcionamiento, un máximo y un mínimo para operar, este debe comenzar por un número negativo hacia un positivo, estas opciones no permite que el usuario puede colocar números mayores a cero.

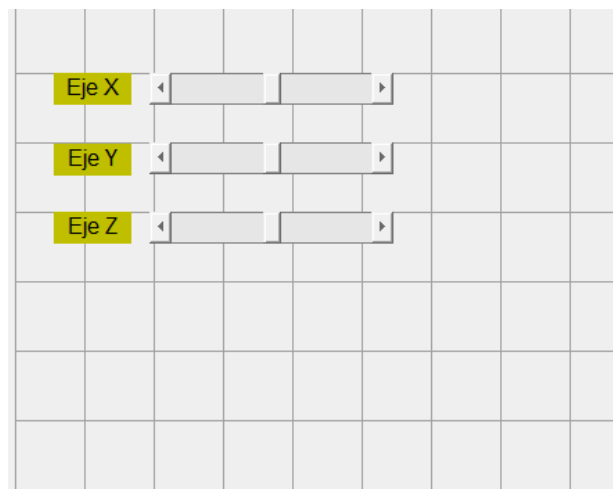


Ilustración 71 Títulos y sliders Matlab

Como se observa se coloca un título para cada slider, esto genera un mayor entendimiento par al usuario, este proceso se llevó a cabo para cada acción que se realiza en la GUIDE, ahora que se reconoce cada slider se procede a realizar su respectiva programación. El siguiente código solo representa una parte del Eje X, este procedimiento se realizar para los demás ejes, tengamos en cuenta que parte del código ya se había realizado en capítulos anteriores.

### Código en Matlab

```

1. function slider4_Callback(hObject, eventdata, handles)
2.
3. var = get(hObject,'value')
4. set(handles.Ejextexto,'String',var)
5.
6.     x = 0;
7.     y = 0;
8.     z = 0;
9.     if (var >= -4) && (var <= 4)
10.    x = var;
11.    var1 = 1;
12.    else
13.    x = 0;
14.    end
15.    a11 = 1.5;
16.    a22 = 16;
% puntos fijos ejes del motor
17.    P6base = [-3.5; -8; 3];
18.    P1base = [3.5; -8; 3];
19.    P2base = [8.6; 0.8; 3];
20.    P5base = [-8.6; 0.8; 3];
21.    P3base = [5.1; 6.8; 3];
22.    P4base = [-5.1; 6.8; 3];
% puntos superiores ubicados en la plataforma móvil.
23.    P11movil = [x+6.5; -5.5+y-(abs(x)*1.5)/4; 15.5-(abs(x)/4)-(abs(y)/2.5)*1.5+z];
24.    P21movil = [x+8; -3.2+y-(abs(x)*1.5)/4; 15.5-(abs(x)/4)-(abs(y)/2.5)*1.5+z];
25.    P31movil = [x+1.5; 8.3+y-(abs(x)*1.5)/4; 15.5-(abs(x)/4)-(abs(y)/2.5)*1.5+z];
26.    P41movil = [x-1.5; 8.3+y-(abs(x)*1.5)/4; 15.5-(abs(x)/4)-(abs(y)/2.5)*1.5+z];
27.    P51movil = [x-8; -3.2+y-(abs(x)*1.5)/4; 15.5-(abs(x)/4)-(abs(y)/2.5)*1.5+z];
28.    P61movil = [x-6.5; -5.5+y-(abs(x)*1.5)/4; 15.5-(abs(x)/4)-(abs(y)/2.5)*1.5+z];
% El siguiente código es réplica del realizado en el capítulo 4.
Cinématica con el cual se desea obtener los ángulos de los motores además
de las eslabones primarios.
29.    %%%%%%%%%%% eslabón 1 %%%%%%%%%%%

```

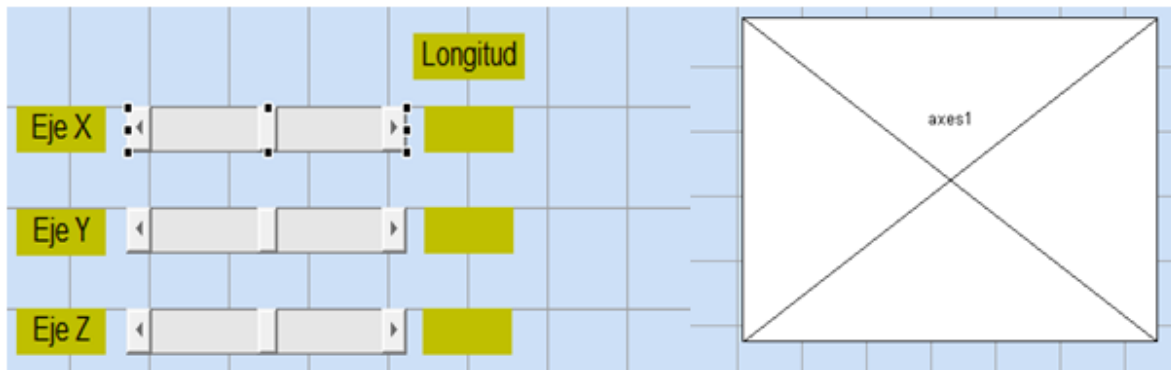
```

30.      h3 = sqrt((Plmovil(var1)-Plbase(var1))^2+(Plbase(2)-
      Plmovil(2))^2);
31.      h4 = sqrt((h3)^2+(Plmovil(3))^2);
%%%% Se considera los ejes principales de la plataforma móvil de cada
eslabón
32.      x1 = Plmovil(1);
33.      y1 = Plmovil(2);
34.      z1 = Plmovil(3);
%%%% El código se interrumpe ya que en el capítulo 4 se realiza con mas
profundidad.

```

El código anterior se realizó para cada slider que se utilizó, este debe ser modificado para cada cadena cinemática.

Una vez tengamos los tres códigos de prueba, se utilizó un axes con el que se puede visualizar de manera adecuada los parámetros que se han encontrado anteriormente.



*Ilustración 72 Slider y Axes1 Matlab*

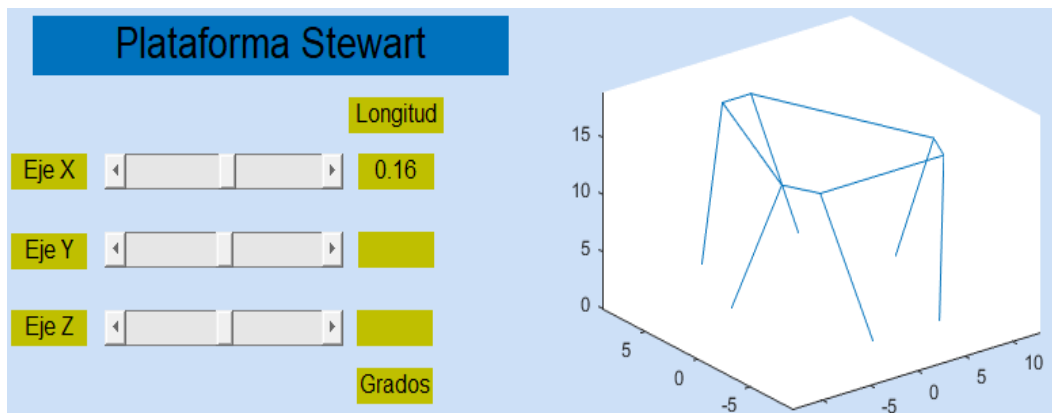
Para observar debidamente la simulación se llevará a cabo el siguiente código, este al igual que el anterior se deberá incluir en cada posición (x,y,z).

```

1. pts = [P6base';P6lmovil'; P1lmovil'; Plbase'; P1lmovil';
      P2lmovil'; P2base';
2. P2lmovil'; P3lmovil'; P3base'; P3lmovil'; P4lmovil'; P4base';
      P4lmovil';
3. P5lmovil'; P5base'; P5lmovil'; P6lmovil'; P6base'];
4. line(pts(:,1), pts(:,2), pts(:,3))
5. plot3(pts(:,1), pts(:,2), pts(:,3))
6. axis ([-13 13 -9 9 0 19])

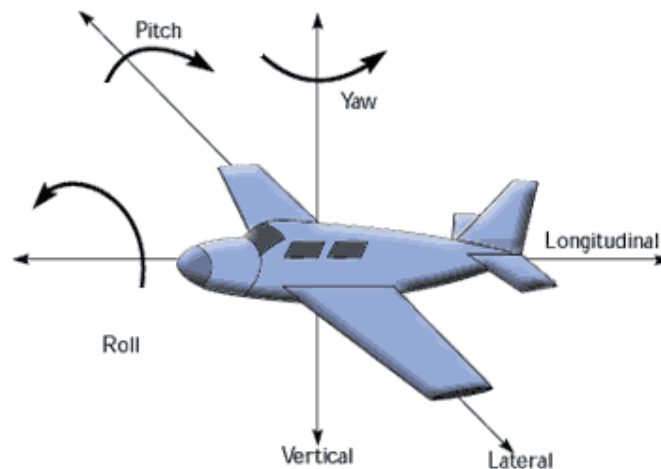
```

Una vez se terminó el desarrollo del código de simulación se creó un cuadro de texto para visualizar la longitud con la que se moverá la plataforma en diferentes sentidos, además un texto como título para ir identificando la Guide que puede contener.



*Ilustración 73 Simulación Plataforma Stewart Matlab*

Una vez visualizado y verificado el código, se procede a colocar los demás slider, estos para los movimientos Yaw, Roll y Pitch respectivamente, los movimientos se pueden observar de manera clara en la ilustración 76,



*Ilustración 74 referencia a los movimientos Yaw, Roll y Pitch - <https://www.novatel.com/solutions/attitude/>*

Cada movimiento que se desee realizar debe ir acompañado con la estructura y programación necesaria, como se realizó con anterioridad en los ejes X,Y,Z, para este tipo de movimientos se debe tener en cuenta que se realizan en grados y no en distancia como los anteriores, el siguiente código muestra cómo se realizó la conversión de movimiento lineales en grados, debemos tener en cuenta que cada movimiento que se realizó en este trabajo primero se verificó en el programa Solidworks ya que por medio de este se tuvieron en cuenta las limitaciones y el alcance que puede tener la plataforma. Gracias a este se pudo obtener de manera sencilla la cantidad de grados y movimientos lineales que la plataforma podía alcanzar.

```
a11 = 1.5; % distancia eslabón 1
a22 = 16;  % distancia eslabón 2
```

```

%partimos de la posición que se desea obtener

P1base = [3.5; -8; 3]; % punto fijo inferior eje del motor 1
P2base = [8.8; 1; 3]; % punto fijo inferior eje del motor 2
P3base = [5.5; 7.2; 3]; % punto fijo inferior eje del motor 3
P4base = [-5.5; 7.2; 3]; % punto fijo inferior eje del motor 4
P5base = [-8.8; 1; 3]; % punto fijo inferior eje del motor 5
P6base = [-3.5; -8; 3]; % punto fijo inferior eje del motor 6

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% eslabón 6 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

P6movil = [x-6.5; -5.5-(abs(x)*1.5)/4; 15.5-(abs(x)/4)]; % punto de
coordenada del eje del motor hasta el punto móvil del eslabón
plataforma móvil
% Se realizó Pitágoras 3d
h1 = sqrt((P6base(1)-P6movil(1))^2+(P6base(2)-P6movil(2))^2);
h2 = sqrt((h1)^2+(P6movil(3))^2);
x6 = P6movil(1);
y6 = P6movil(3);
alfa = atan2d(P6movil(3),P6movil(1));
M = ((P6movil(1)^2+P6movil(3)^2-a11^2-a22^2)/(2*a11*a22));
s = -sqrt(1-M^2);
thetal = atan2d(s,M);
beta = atan2d((a22*s),(a11+a22*M));
angl6 = alfa - beta;
ang26 = thetal; % es 180 - theta

```

Ilustración 75 Slider con los 6 grados de libertad Matlab

La ilustración 9 contiene los 6 grados de libertad que posee la plataforma Stewart. Para visualizar los datos que van generando los slider se utilizó el comando Set y su respectiva sintaxis para ser ejecutado en Matlab.

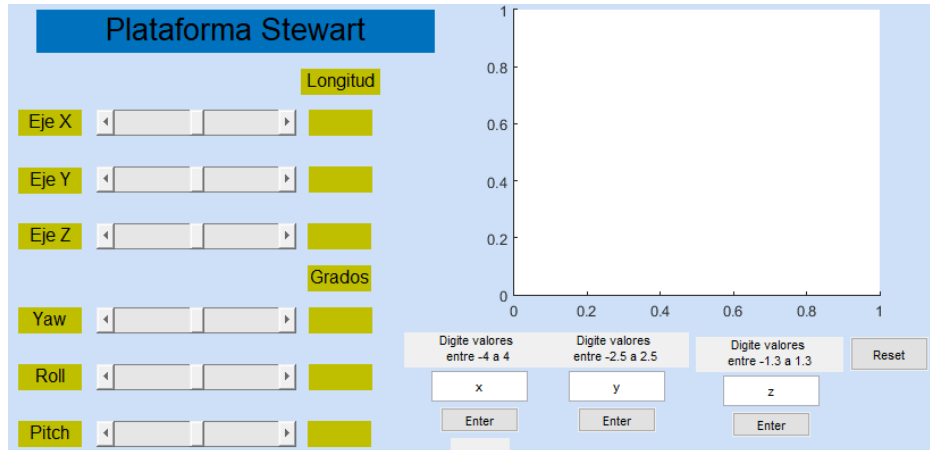


Ilustración 76 Gui Plataforma Stewart Matlab

La ilustración 10 contiene la Beta del Gui que interactuará con la plataforma real además de mostrar los datos en tiempo real. Se puede observar los parámetros deslizantes slider y las cajas para introducir la distancia y el movimiento que se desee ver. El código de estos se verá a continuación.

```
1. uncton pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
2. vard = get(handles.xeje, 'String' );
3. set(handles.caja1, 'String', vard)
```

## 5.2 Algoritmo

Se presenta a continuación el algoritmo implementado para la plataforma, cada uno de los bloques pretende dar información relevante del debido accionar. Este genera el tamaño del eslabón principal y los grados que deben tomar los motores para realizar la traslación o rotación que se desee en la plataforma móvil.

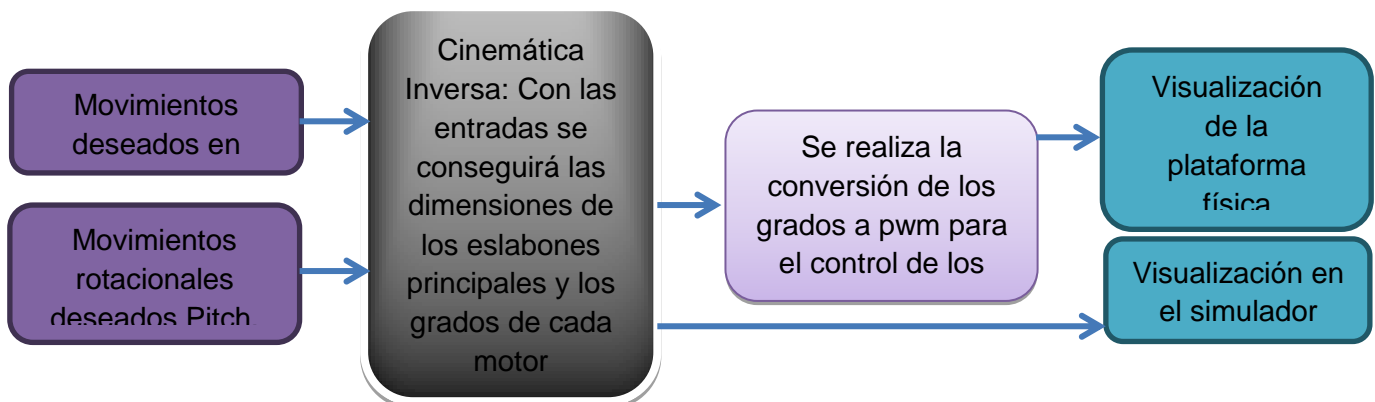
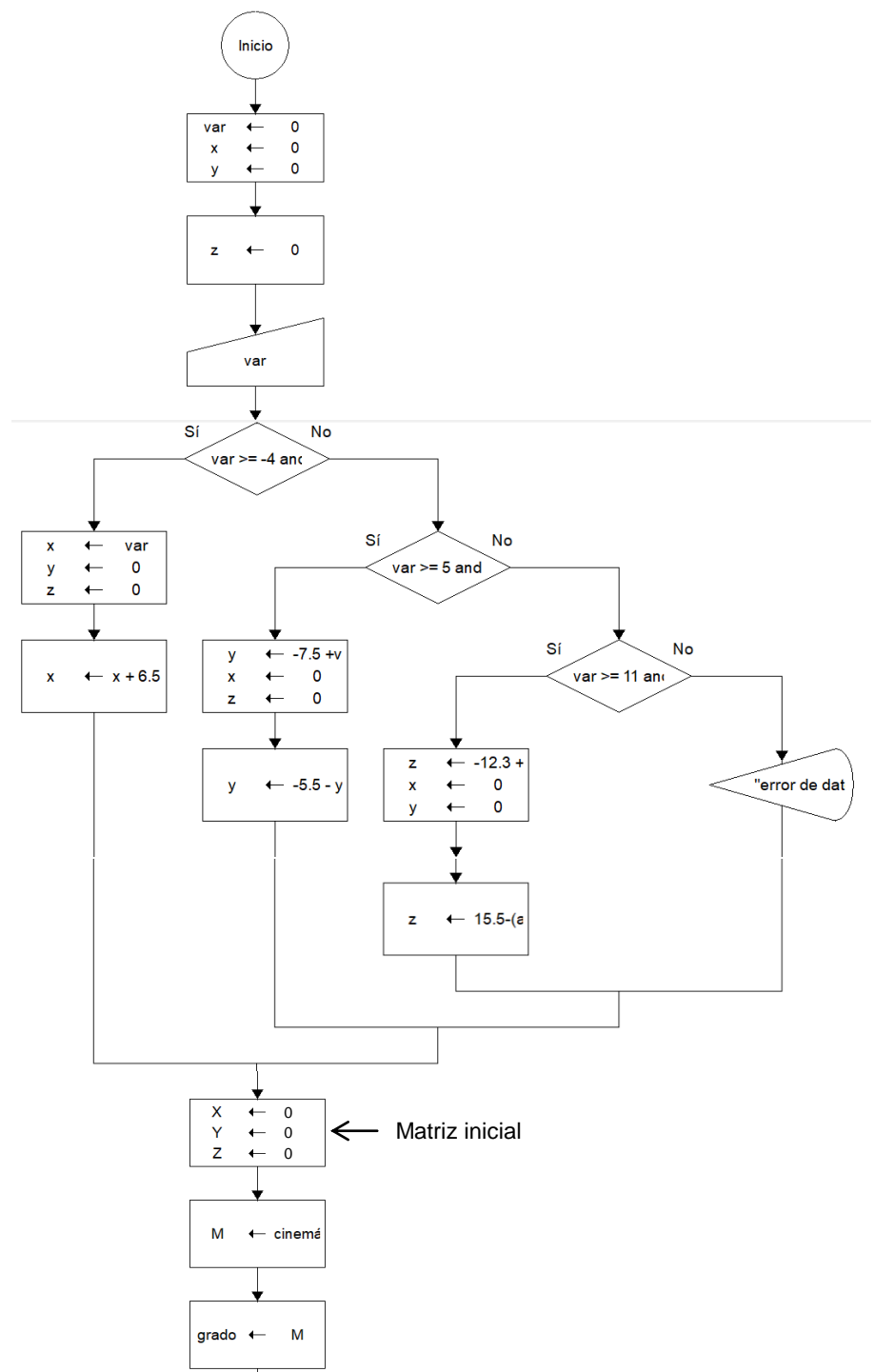


Ilustración 77 Diagrama de Bloques

El siguiente algoritmo se realiza para hallar los grados que tomará el motor para obtener la posición final de las juntas de la plataforma móvil, Según el valor que ingrese el usuario para los diferentes movimientos que tomara la plataforma.

Los resultados que se hallaron con el análisis matemático se guardan en una matriz la cual sirve como dato inicial para el análisis de la cinemática inversa. Teniendo las medidas de los eslabones principales y los resultados de la cinemática inversa podremos ejercer control sobre los actuadores por medio del PWM que se refleja en grados de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .



*Ilustración 78 Algoritmo Para hallar los grados - de eslabones*

```

clc, clear all
x = 0;
y = 0;
z = 0;
var = 13.5; % x = -4 a 4
           % y = 5 a 10
           % z = 11 a 13.5
if (var >= -4) && (var <= 4)
    x = var;
    var1 = 1;
else
    x = 0;
end
if (var >= 5) && (var <= 10)
    y = -7.5 + var;
    var1 = 2;
else
    y = 0;
end
if (var >= 11) && (var <= 14)
    z = -12.3 + var;
    var1 = 1;
end
a11 = 1.5;
a22 = 16;

P6base = [-3.5; -8; 3]; % punto fijo inferior izquierdo
P1base = [3.5; -8; 3]; % punto fijo inferior derecho
P2base = [8.6; 0.8; 3]; % punto fijo inferior antes x era 8.8
P5base = [-8.6; 0.8; 3]; % punto fijo inferior izquierdo
P3base = [5.1; 6.8; 3]; % punto fijo inferior antes x era 8.8
P4base = [-5.1; 6.8; 3]; % punto fijo inferior izquierdo

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% eslabon 6 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

P6movil = [x-3; -5.5-y-(abs(x)*1.5)/4; 15.5-(abs(x)/4) -
(abs(y)/2.5)+z]; % ese tres es porque estamos midiendo del eje del motor
hasta el unto movil del eslabon
h1 = sqrt((P6base(var1)-P6movil(var1))^2+(P6base(2)-P6movil(2))^2);
h2 = sqrt((h1)^2+(P6movil(3))^2);
x6 = P6movil(1);
y6 = P6movil(2);
z6 = P6movil(3);
alfa = atan2d(P6movil(3),P6movil(1));
M = ((P6movil(var1)^2+P6movil(3)^2-a11^2-a22^2)/(2*a11*a22));
s = -sqrt(1-M^2);

```



```
theta1 = atan2d(s,M);  
beta = atan2d ((a22*s), (a11+a22*M));  
ang16 = alfa - beta;  
ang26 = theta1; % es 180 - theta
```

Código Matlab para obtener los grados del motor.

### 5.3 Conexión con la plataforma de desarrollo.

El microprocesador Attmaga 328p se puede conectar de manera adecuada con el software Matlab, este nos permite realizar un protocolo sencillo para la comunicación que se realizara con rl computador y los servomotores, de esta manera poder realizar y ejecutar acciones desde la Guide, los protocolos de conexión se verán a continuación:

```
z = arduino('com3','UNO','Libraries','Servo');  
l11 = servo(z,'D13');  
l22 = servo(z,'D12');  
l33 = servo(z,'D11');  
l44 = servo(z,'D10');  
l55 = servo(z,'D9');  
l66 = servo(z,'D8');
```

Se debe tener instaladas las librerías para que los códigos puedan funcionar de manera adecuada, estas contiene los protocolos de comunicación entre el computador y la plataforma de desarrollo.

Esto procedimiento se debe ejecutar cada vez que se desee utilizar Guide con la plataforma Stewart. Gracias a este protocolo podemos mover de manera fácil los servomotores gracias a que Matlab contiene los protocolos para este tipo de motores, debemos tener en cuenta que los resultados obtenidos para mover estos se encuentran en grados y Matlab envía estos grados entre 0 y 1, siendo 1 los 180 grados. Para esto se realiza una conversión o regla de tres y hallar la cantidad de números decimales correspondientes a los grados obtenidos en la cinemática inversa. El siguiente código contiene las líneas para la transmisión de datos hacia la plataforma de desarrollo.

```
1. f = 1-(T(1)*1)/180  
2. a = (T(2)*1)/180  
3. b = (T(3)*1)/180  
4. c = (T(4)*1)/180  
5. d = 1-(T(5)*1)/180  
6. e = (T(6)*1)/180  
  
7. writePosition(l11, a);  
8. writePosition(l22, b);
```

```
9. writePosition(l33, c);  
10.      writePosition(l44, d);  
11.      writePosition(l55, e);  
12.      writePosition(l66, f);
```

Cada letra representa uno de los seis motores. Para finalizar la programación en Matlab se realiza por medio de scripts y no en forma de pseudocódigo o diagramas de flujo, estos son un conjunto de comandos concatenados.

## 6 Posiciones Básicas – Resultados

Con la interfaz gráfica terminada se pueden observar los movimientos tanto rotacionales como trasnacionales que puede tener la plataforma Stewart respecto a los seis grados de libertad que posee en su espacio de trabajo y con el cual se puede interactuar a través de la GUI por medio de sus respectivos sliders, paneles de ubicación de la plataforma móvil.

### 6.1 Movimiento eje X

Los límites establecidos en este movimiento son -4 cm hacia la izquierda y 4 cm hacia la derecha, dentro de la GUI cambiando los valores correspondientes bien sea con el slider o con su panel de texto se verá la figura de la siguiente manera.

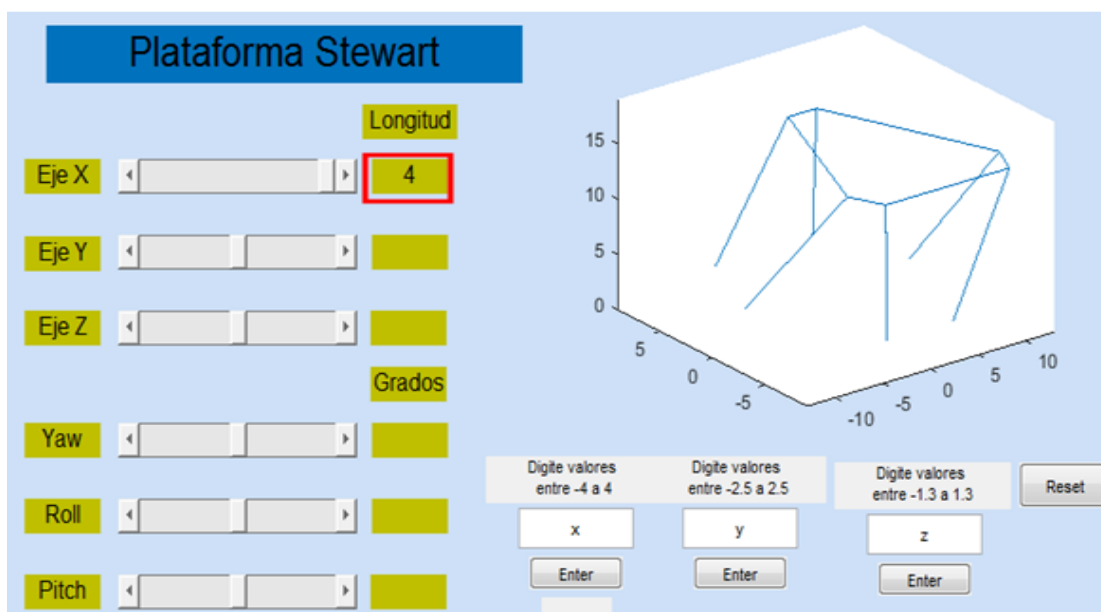


Ilustración 79 Imagen GUIDE-Matlab eje X= 4 Matlab

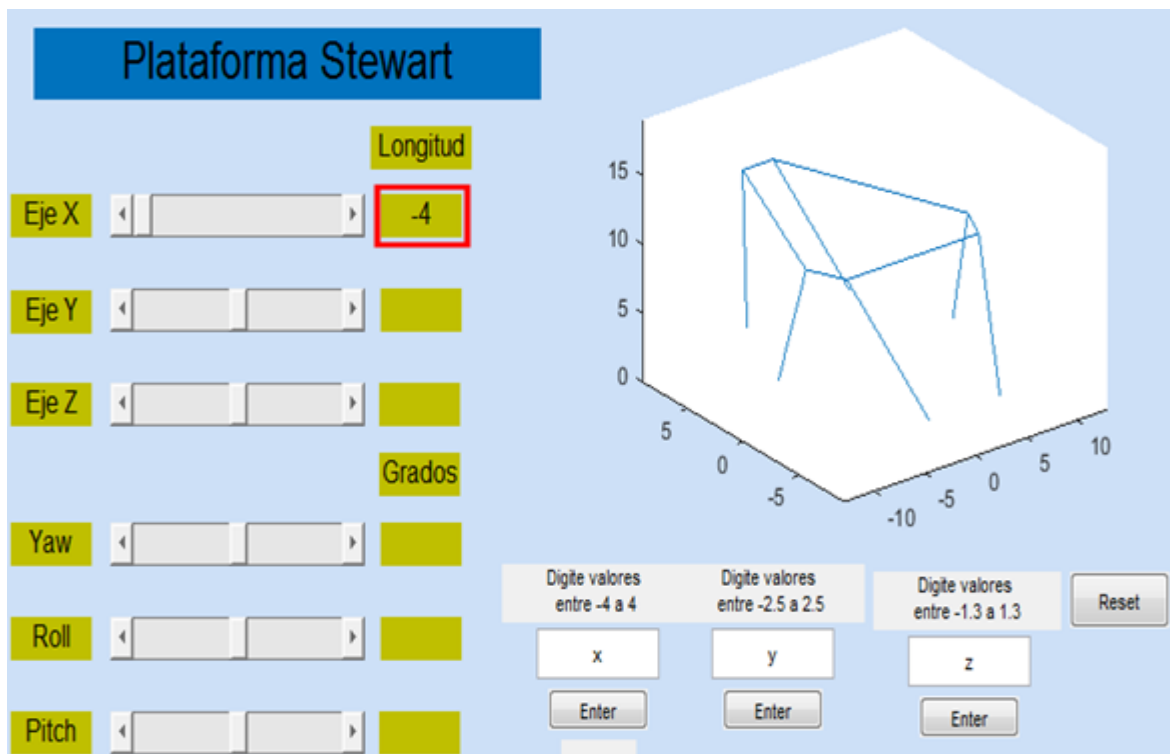


Ilustración 80 Imagen GUIDE-Matlab eje X= -4 Matlab

Este movimiento en X no es un movimiento solo plano como inicialmente se deliberaba y se analizaba en el modelo matemático. Por aspectos físicos y mecánicos la plataforma se desplaza 1.5 cm hacia el eje Y, realizando así un movimiento complejo que involucra dos ejes de coordenadas, los puntos referentes para este movimiento se realizaron inicialmente en bosquejos y plantillas para ser después programados en Matlab y poder interactuar con los datos obtenidos.

## 6.2 Movimiento eje Y

El movimiento en el eje Y se limita en la plataforma desde 2.5 cm hacia el frente y -2.5 cm hacia atrás de la cara de referencia respecto a las coordenadas de orientación que se establecieron en el análisis geométrico estructural del capítulo 2, este movimiento en el eje Y se convierte en un movimiento integrado con eje Z ya que por aspectos mecánicos se debe hacer una leve variación en este eje coordenado para que los eslabones principales y físicos alcancen a llevar la plataforma móvil al punto deseado de posicionamiento.

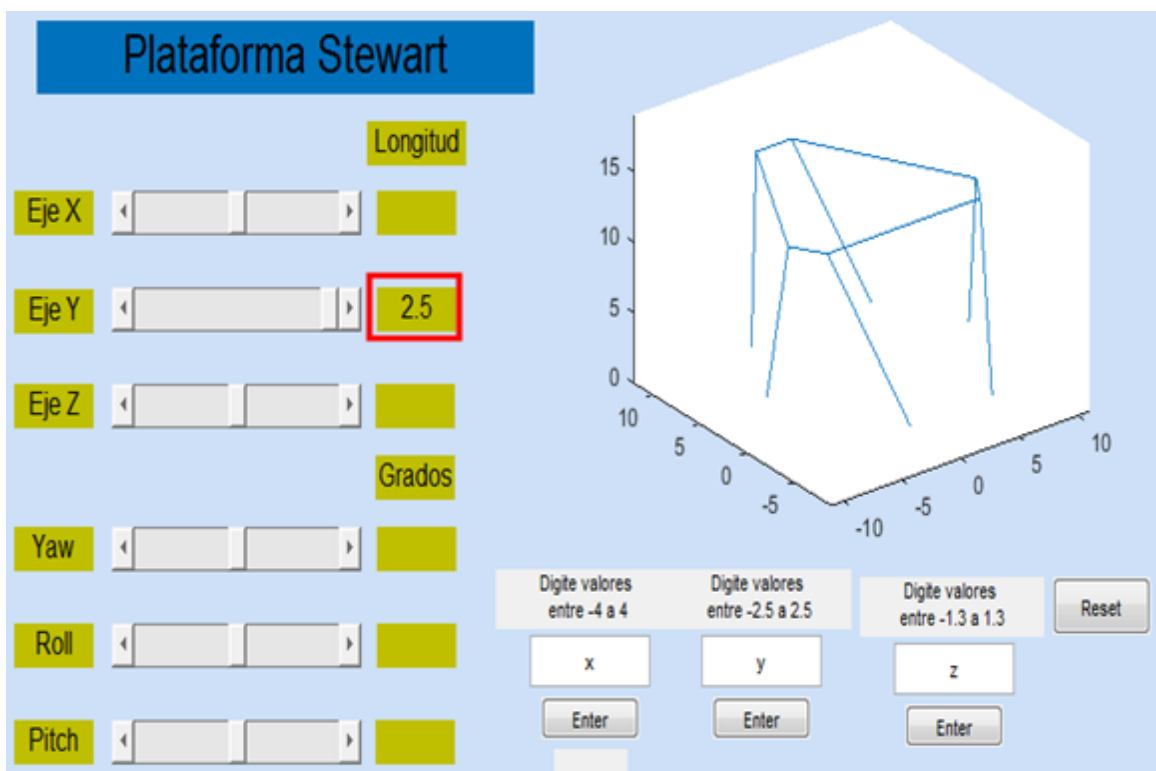


Ilustración 81 Imagen GUIDE-Matlab eje Y= 2.5 Matlab

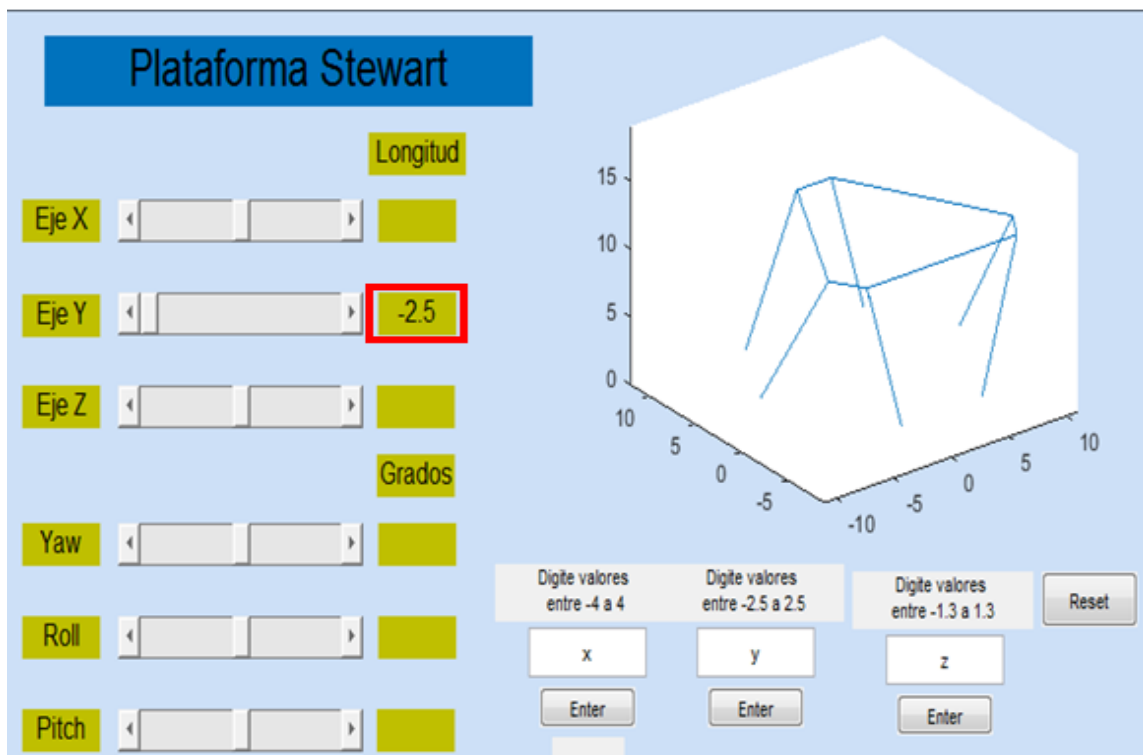


Ilustración 82 Imagen GUIDE-Matlab eje Y= -2.5 Matlab

Con la posición Y se busca que la plataforma se mueva según lo requerido adelante o atrás siempre teniendo en cuenta que debe estar nivelada para no generar variaciones en el eje X o máximas variaciones en Z, la respuesta del sistema mecánico y de software son complementarios no solo se realiza en la GUIDE sino que físicamente también es logrado.

### 6.3 Movimiento eje Z

Para este movimiento coordenado se establece el límite de -1.3 a 1.3 respecto al tamaño del HORN del motor el cual genera su máximo y mínimo valor en Z ya que está articulado con el eslabón en físico realizado en la construcción del capítulo 2. Este movimiento no involucra ninguno de los demás ejes coordenados ya que el sistema mecánico funciona perfecto, también es notorio los movimientos de los actuadores que generan  $180^\circ$  con los cuales se desplaza la plataforma móvil.

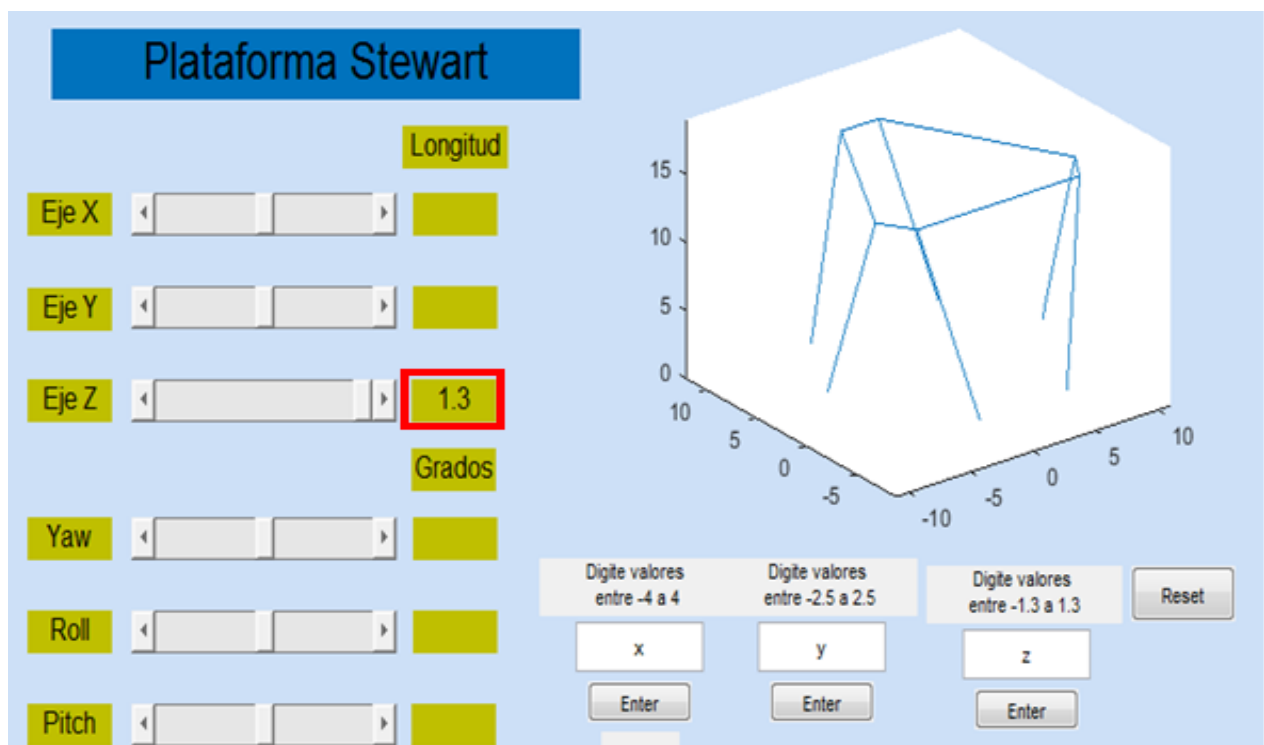


Ilustración 83 Imagen GUIDE-Matlab eje Z= 1.3 Matlab

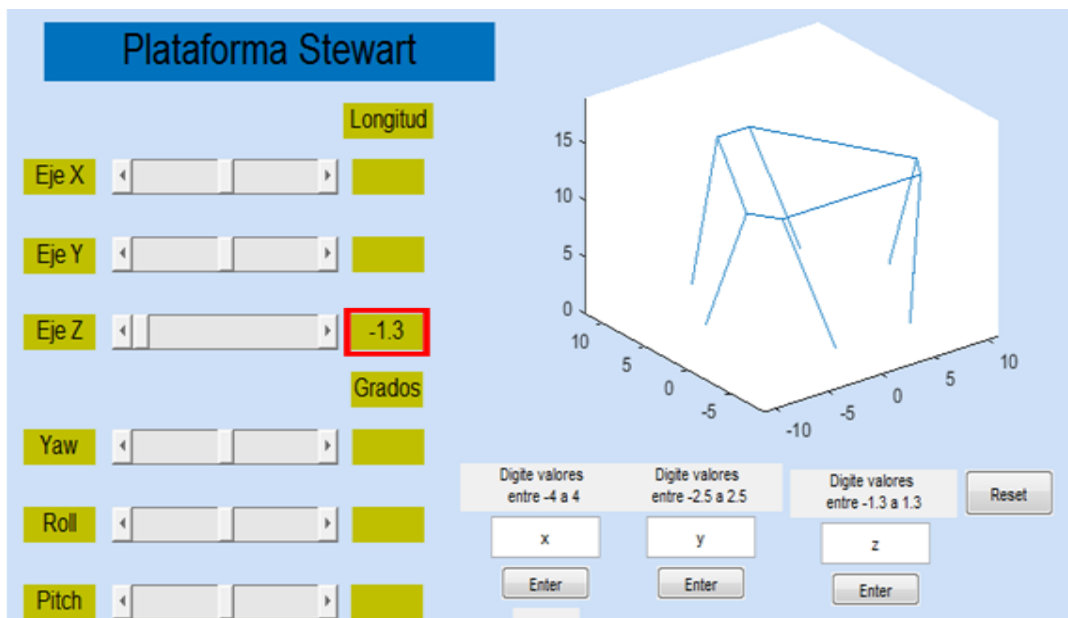


Ilustración 84 Imagen GUIDE-Matlab eje Z= -1.3 Matlab

## 6.4 Movimiento Rotacional Yaw

Este tipo de movimiento Yaw comprende un ajuste entre los ejes Y y X, con la variación de estos dos ejes coordenados se realiza un movimiento en forma de espiral hacia la derecha  $-20^\circ$  y hacia la izquierda  $20^\circ$ , se debe tener presente no desnivelar la plataforma ya que cualquier variación en el eje Z afectaría directamente el análisis matemático previo a la realización de la GUI. Para generar el análisis de este movimiento se realizó bosquejos y plantillas para entender el comportamiento del sistema respecto a los puntos de posición que debía alcanzar.

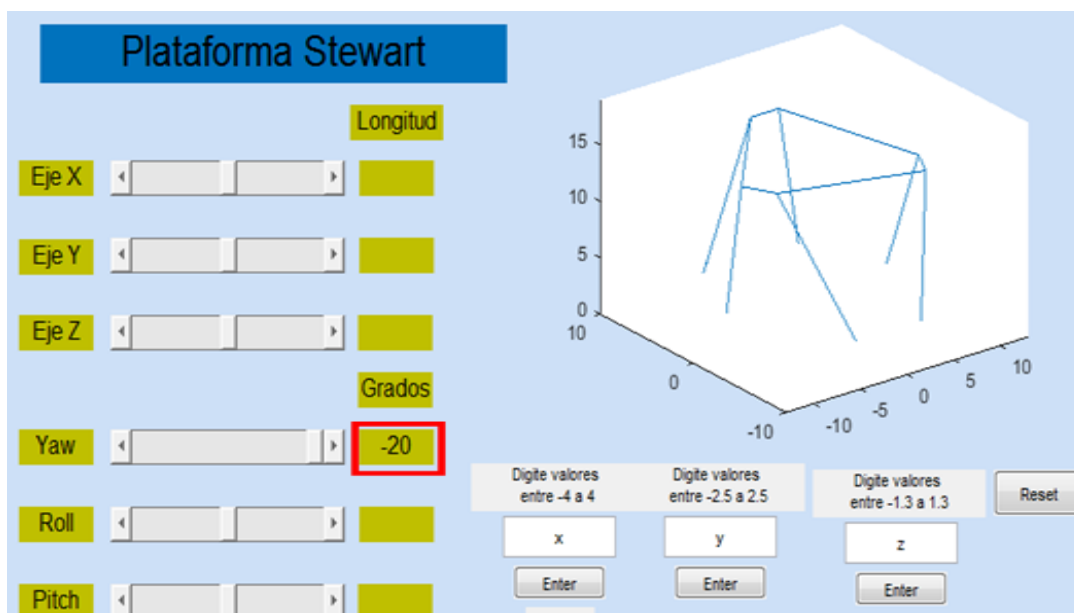


Ilustración 85 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Yaw= -20° Matlab

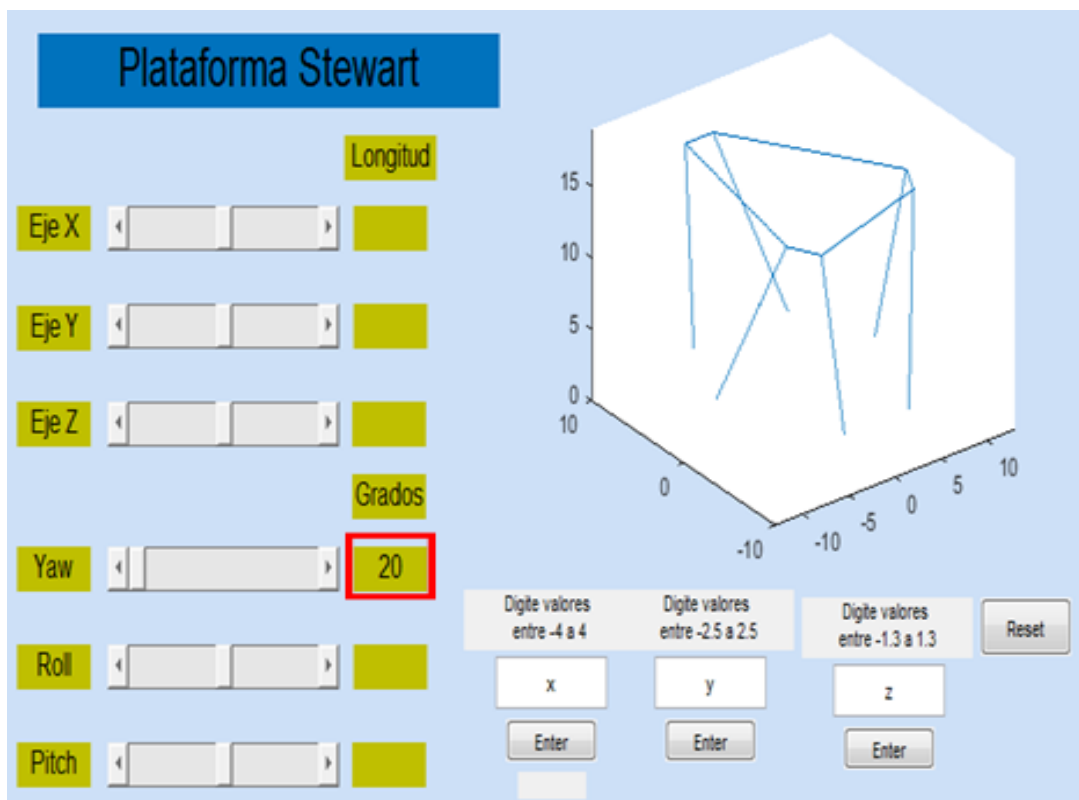


Ilustración 86 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Yaw= 20° Matlab

Se toman los valores de los ángulos  $20^\circ$  y  $-20^\circ$  en sentido anti horario, movimiento complementado por los ejes X y Y proporcionalmente.

## 6.5 Movimiento Rotacional Roll

Este movimiento rotacional se relaciona entre el eje Z de cada eslabón de acuerdo al movimiento deseado la medida de los eslabones principales varia. El valor del ángulo con el que varía la plataforma móvil es de  $-10^\circ$  y  $10^\circ$ , para ello se trabajó con las cadenas cinemáticas cerradas de los eslabones 1 y 6; 2 y 5; 3 y 4. Teniendo esto, la variación de los ángulos es mayor en la cadena cinemática con eslabones 1 y 6 que la ejecutada por los eslabones 3 y 4.

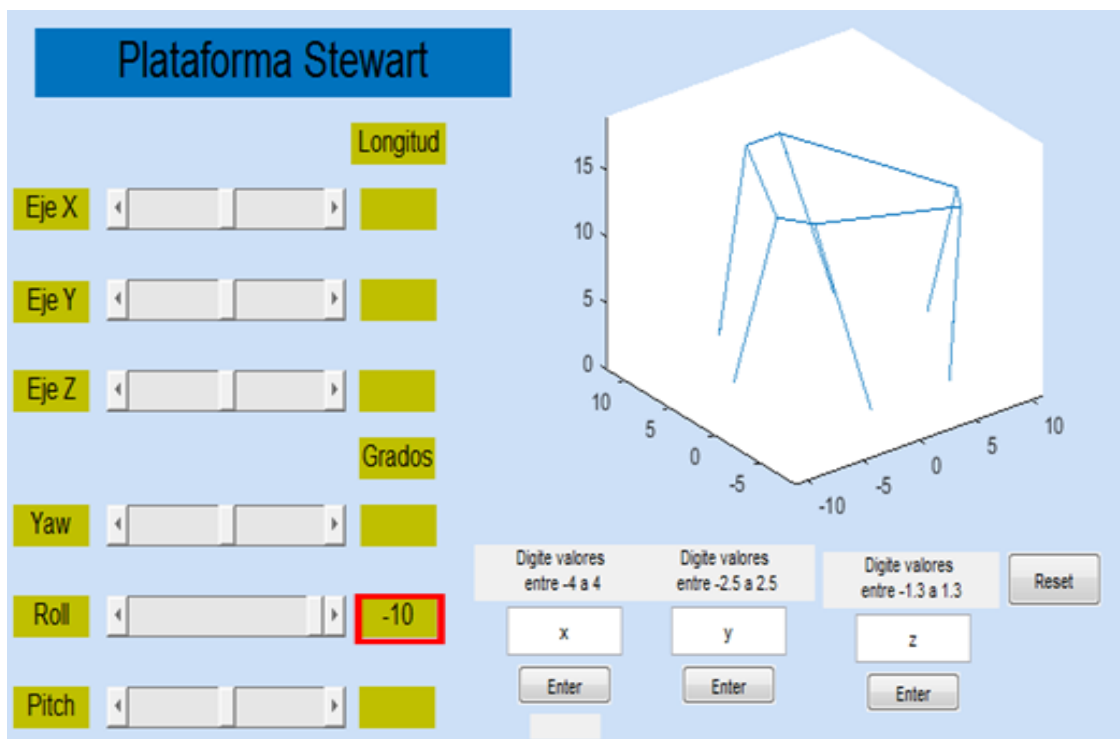


Ilustración 87 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Roll=  $-10^\circ$  Matlab



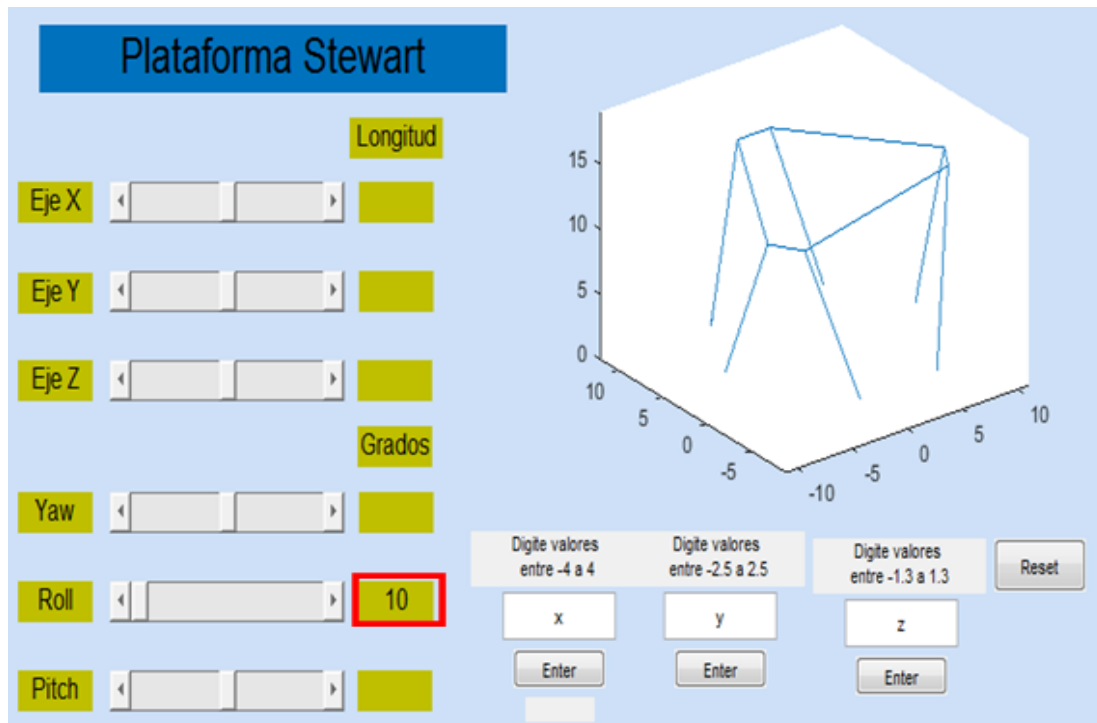


Ilustración 88 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Roll= 10° Matlab

## 6.6 Movimiento Rotacional Pitch

Este movimiento genera la inclinación máxima y mínima a la cual se puede someter la plataforma Stewart, es un movimiento complementado entre el eje Z de cada eslabón, para este prototipo no se incluyo los ejes Y y X para generar el movimiento rotacional Pitch sus puntos limites se encuentran entre  $-10^\circ$  y  $10^\circ$  la altura máxima y mínima es consecuente al tipo de HORN usado en los actuadores eléctricos.

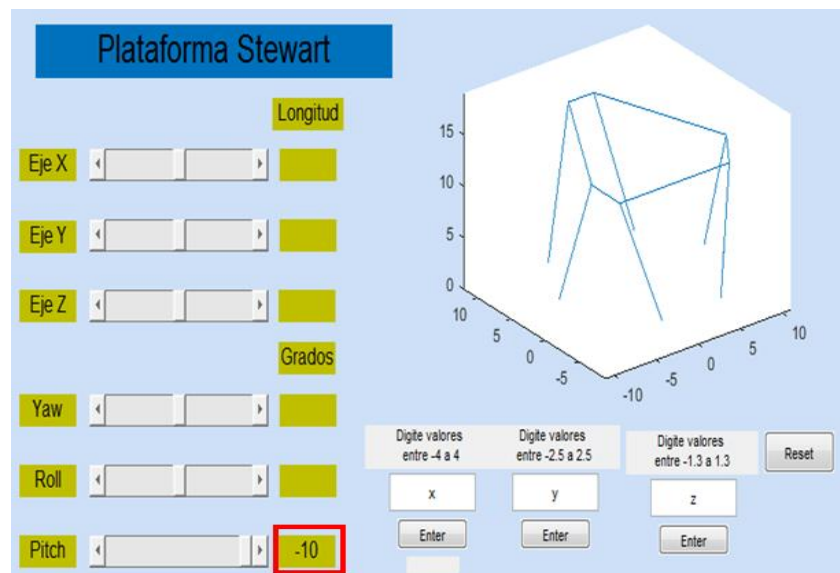


Ilustración 89 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Pitch= -10° Matlab

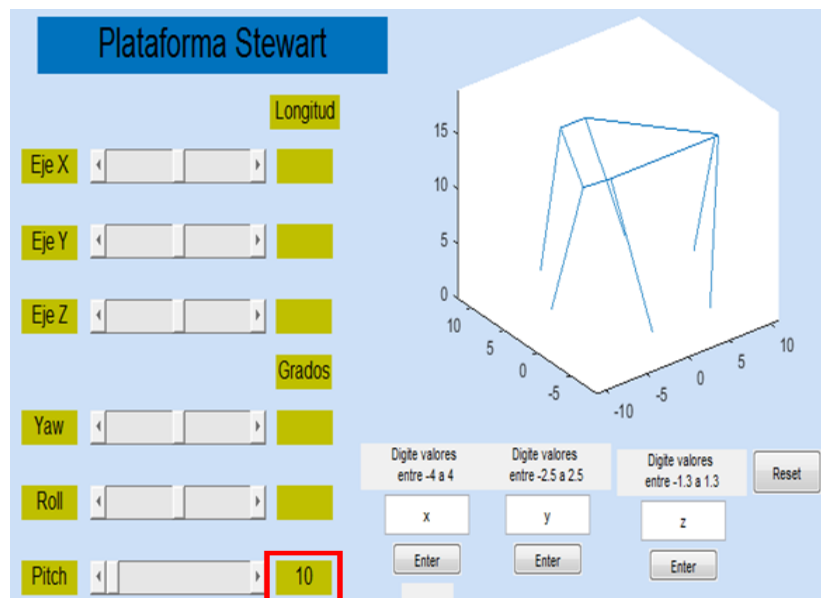


Ilustración 90 Imagen GUIDE-Matlab movimiento rotacional Pitch= 10° Matlab

## 7.Conclusiones

- Con el modelo geométrico de la Plataforma Stewart se obtuvo las dimensiones de la estructura y la posición que debe tomar los actuadores respecto a los movimientos dentro de su espacio de trabajo.
- Por medio del diseño CAD se logra modelar mecánicamente el sistema a implementar, con el fin de realizar modificaciones previas a la construcción.
- Las herramientas computacionales son fundamentales para el desarrollo de los algoritmos del programa para modelar y simular la plataforma Stewart
- La interfaz gráfica permite la interacción entre el usuario y la plataforma Stewart permitiendo la visualización de su comportamiento

## 8.Trabajo futuro

Este trabajo de grado se deja de manera libre para el desarrollo complementario no solo de la cinemática que ya se examinó, sino también de la dinámica. El encontrar variables físicas como velocidad y aceleración contribuyen a un mejor diseño, el uso de dispositivos electrónicos como joystick proporcionaría otra manera diferente de control sobre la plataforma móvil.

Si el mecanismo de la plataforma Stewart se lleva a una escala mayor se puede generar un espacio de diseño e interactividad en 3D, para que el usuario lo utilizara con ayuda de gafas de realidad aumentada y de esta manera simular los seis grados de libertad actuando sobre él en un entorno con situaciones de la vida cotidiana, como se ha venido implementando este tipo de plataformas en simuladores de vuelo, automovilismo entre otros.

Se puede ajustar en su plataforma móvil un módulo solar para uso de energías libres ya que sus seis grados de libertad facilitarían el constante aprovechamiento de la radiación solar, según el posicionamiento del área donde se encuentre. De esta manera contribuir con el cuidado del medio ambiente y el uso de energías alternas

## REFERENCIAS

(s.f.).

acuña, H. G. (2009 ). *Cinematica inversa y analisis del espacio de trabajo de una plataforma stewart* . bucaramanga,Colombia .

Adrián, C. H. (2013). *Desarrollo de una plataforma stewart basada en micorcontroladores, para simular el comportamiento de una aeronave en tres grados de libertad*. Mexico D.F.: Instituto Politécnico Nacional .

Ahlgren, D. (2002). An Internacional View of Robotics as an Educational Medium. *Internacional Conference on Engenieering Education (ICEE)*. Manchester, UK .

Benavides, P. K. (s.f.). Recuperado el 08 de 2017, de <http://www.kramirez.net/>

Blanco, J. L. (16 de 02 de 2013). *ciencia explicada* . Recuperado el 2017, de <http://www.ciencia-explicada.com/2013/02/parametrizacion-denavit-hartenberg-para.html>

Claraco, J. L. (16 de febrero de 2013). <http://www.ciencia-explicada.com>. Recuperado el 24 de Julio de 2017, de <http://www.ciencia-explicada.com/2013/02/parametrizacion-denavit-hartenberg-para.html>

comunicación, S. d. (s.f.). <http://www.uv.es>. Obtenido de <http://www.uv.es>.

Fernando, R. C. (2011). *Robótica: Control de robots manipulador*. Mexico : AlfaOmega - Grupo editorial S.A.

Gonzáles, A. P. (05 de 12 de 2008). *enciclopedia virtual de ingeniería mecánica*. Recuperado el 01 de 08 de 2017, de mecapedia: [http://www.mecapedia.uji.es/formula\\_de\\_Grubler.htm](http://www.mecapedia.uji.es/formula_de_Grubler.htm)

Joe Jhonson, R. P. (2016). *Desing and kinematics analisis of a 6 - DOF Parallel manipulator for pharmaceutical application* . JCPS .

justo, A. L. (2008). FUNDAMENTOS DEL KBE. En J. A. Ligeró, *APLICACIÓN AL DISEÑO DE ENGRANAJES* (págs. 42 - 49). Sevilla .

Lopez, M. J., Saravia, D. B., & Riaza, H. F. (2009). REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE MANIPULADORES PARALELOS. Pereira: Universidad Tecnologica de Pereira.

Mario Garcia sanz, m. m. (2015). *HERRAMIENTAS PARA EL ESTUDIO DE ROBOTS DE CINEMÁTICA PARALELA: SIMULADOR Y PROTOTIPO EXPERIMENTAL* . PAMPLONA,SPAIN.

Merlet, J. P. (s.f.). *Parallel Robots*. Inria,sophia-antipolis,France: G.M.L Gladwell.

Ozkol, I. (s.f.). *A study on the dinamic analysis and control off 6 - 3 Stewart Platform mechanism*. Malak, Istanbul, turkey : Aeronautics and astronautics faculty I.T.U.

Q., Z. C. (2007). Recuperado el 2017, de  
[http://www.unrobotica.com/manuales/SESSION\\_1\\_ATMEGA8.pdf](http://www.unrobotica.com/manuales/SESSION_1_ATMEGA8.pdf)

Viso, E. (19 de 01 de 2006). *xataka ciencia* . Recuperado el 26 de 07 de 2017, de  
<https://www.xatakaciencia.com/robotica/el-origen-de-la-palabra-robot>

ZAMUDIO, P. M. (2009). *Análisis Cinemático de un Manipulador Paralelo Híbrido*. Ciudad de México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE.

Zevallos, D. L. (2013). *SISTEMA DE CONTROL DE LA CINEMÁTICA DE UNA*. Lima.