

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA**

Tesis previa a la obtención del Título  
de Ingeniero Electrónico

**“SISTEMA DE NAVEGACIÓN DE UN  
CUADRICÓPTERO GUIADO POR EL  
MOVIMIENTO DE LAS MANOS PARA  
OPERACIONES DE BÚSQUEDA Y RESCATE”**

**AUTORES:**

Roberto Carlos Guerrero Ochoa  
Francisco Xavier Coronel Arízaga

**DIRECTOR:**

Ing. Fernando Urgilés Msc.

Cuenca – Ecuador

2013

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo, son de exclusiva responsabilidad de los autores y autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana la misma con fines académicos.

Cuenca, Diciembre del 2013



---

Roberto Guerrero



---

Francisco Coronel

Ingeniero, Fernando Urgilés, Director de Tesis.

## CERTIFICO

Que la presente tesis ha sido desarrollada bajo todos los reglamentos estipulados por la UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA y ha cumplido con todos los requerimientos para su aprobación.

Atentamente

A handwritten signature in dark ink, appearing to be 'F. Urgilés', with a long horizontal stroke extending to the right.

---

Ing. Fernando Urgilés Msc.  
DIRECTOR DE TESIS

# JUSTIFICACIÓN

Ecuador es un país en donde las emergencias están a la orden del día ya sean estos de tránsito, fallos estructurales, incendios o catástrofes naturales, dichos sucesos constituyen un sin número de eventos en los cuales los organismos de socorro a menudo tienen que intervenir, solo en el último mes de abril del 2013 en el Austro ecuatoriano se registraron 481 incidentes en los que los Bomberos del Azuay tuvieron que actuar, muchos de estos acontecimientos tuvieron lugar en sitios de difícil acceso en los cuales la intervención humana para el rescate es cuestionada dado su alto nivel de peligro; es por eso la imperiosa necesidad de desarrollar un prototipo de navegación aérea no tripulada que pueda proporcionar imágenes de video en tiempo real y de esta manera tener una mejor percepción del siniestro en el que se vaya actuar antes de intervenir personal humano, y así salvaguardar la vida tanto de los rescatistas como de los rescatados.

El proyecto está dirigido a las unidades de rescate de la provincia, ya que este tipo de tecnología no existe en el país y no cuentan con un dispositivo no tripulado aéreo para operaciones de búsqueda y rescate como el que se realizará en este proyecto.

# OBJETIVOS

## **OBJETIVO ESPECIFICO**

- **“Diseñar un sistema de Navegación de un Cuadricóptero guiado por el movimiento de las manos para operaciones de búsqueda y rescate”**

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Investigar sobre los tipos de búsqueda – rescate, y estudio sobre los equipos a usar.
- Analizar y Diseñar una plataforma Simuladora de vuelo para entrenamiento.
- Realizar un programa que permita al usuarios operar mediante gestos de las manos la plataforma simuladora de vuelo y el Ar Drone
- Realizar pruebas de funcionamiento

***“Para empezar un gran proyecto, hace falta valentía. Para terminar un gran proyecto, hace falta perseverancia.”***

*Anónimo.*



# AGRADECIMIENTOS

*Es un honor para mí poder plasmar sobre este papel un agradecimiento para la gente que estuvo a mi lado en este largo proceso de aprendizaje y madurez de todo tipo, me faltaría papel para agradecer a todos, pero empezare por decir gracias a mi madre Diana que me apoyo desde el principio y a vencer todos los obstáculos, a mi familia y en especial a mi abuelito Julio(+) que nunca me dejo caer ante los problemas, a mi director de tesis Fernando, gracias por enseñarnos lo bueno, lo duro de esta carrera y no puedo dejar de lado a todos mis profesores que fueron la guía en esta larga travesía, al igual que mis amigos y compañeros presentes en la misma, un agradecimiento especial para mi compañero de tesis Roberto por que juntos hemos sabido sobrellevar este duro pero a la final satisfactorio camino.*

*Gracias a todos...*

*Francisco*

*Agradezco este trabajo de tesis en primer lugar a mis padres: Carmela que gracias a su apoyo incondicional siempre me dio fuerzas para seguir adelante y nunca rendirme ante nada. A mi padre Santiago pilar fundamental en mi vida, mi ejemplo a seguir, que a pesar de la distancia nunca me hizo sentir en ningún momento solo o abandonado, siempre brindándome su apoyo y creyendo en mí ciegamente, impulsándome con su cariño y afecto a salir adelante a pesar de las dificultades, a ti papá te dedico este trabajo con gran afecto y admiración.*

*A Mis Hermanos Juan y Diana, las palabras de agradecimiento que puedo brindarles son cortas para lo que me han dado, gracias por ser parte de mi vida, por siempre animarme los días, y por siempre ser lo que son unas personas increíbles sin las cuales no puedo vivir.*

*A Mi Abuelita Blanca, gracias por su apoyo incondicional y por desempeñar esa labor de madre que desinteresadamente me brindó durante toda mi vida, gracias por siempre estar presente y ayudar a formarme como persona, es por usted abuelita que estoy en esta oportunidad presentando mi trabajo de grado y a quien dedico todo el esfuerzo realizado.*

*A mi familia: Tíos, Primos, gracias por ser parte de mi vida y siempre darme palabras de aliento para mirar hacia el frente y lograr las metas que me proponga.*

*A mi director de tesis Fernando, gracias por guiarme a lo largo de este proyecto y ayudarme a formar como profesional.*

*A mis compañeros de universidad y amigos, gracias por compartir conmigo esos momentos inolvidables que los llevaré por siempre en mi mente.*

*Y un especial agradecimiento a mi amigo y compañero de tesis Pancho que sin importar los problemas con los que nos encontrábamos siempre me impulsaba a seguir adelante y no darnos por vencidos.*

*Roberto*

# RESUMEN

La presente tesis de grado es un sistema para operaciones de búsqueda y rescate que cuenta con un vehículo aéreo no tripulado, y una plataforma simuladora de vuelo para entrenamiento basada en el principio de una plataforma Stewart; para operar los dispositivos este sistema se basa en el Control por Gestos mediante un equipo que realiza un escaneo 3D de la mano llamado Leap Motion.

Para el diseño de la plataforma se utilizó el software Autodesk Inventor, Matlab para sus cálculos matemáticos y también su herramienta Simulink para la Simulación del modelo 3d.

Los software de control e interfaz con el usuario de la Plataforma Simuladora de Vuelo y el Vehículo Aéreo no Tripulados fueron programados en Labview.

Esta tecnología está dirigida directamente hacia unidades de Búsqueda y Rescate para colaborar con sus labores en los siniestros.

# INDICE GENERAL

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Tipos de Búsqueda –Rescate, Estudio de Equipos, Comunicaciones e Historia de los Robots Paralelos</b> | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Situación actual de búsqueda y rescate en la provincia del Azuay</b>                                 | <b>1</b>  |
| <b>1.1.1 Incendios forestales</b>                                                                           | <b>2</b>  |
| <b>1.1.2 Incendios en hogares</b>                                                                           | <b>2</b>  |
| <b>1.1.3 Inundaciones</b>                                                                                   | <b>2</b>  |
| <b>1.2 Tipos de búsqueda y rescate</b>                                                                      | <b>3</b>  |
| <b>1.2.1 Posición en línea o en fila</b>                                                                    | <b>3</b>  |
| <b>1.2.2 Posición en paralelo</b>                                                                           | <b>4</b>  |
| <b>1.2.3 Método tomando la victima bajo los brazos.</b>                                                     | <b>5</b>  |
| <b>1.2.4 Método de rescate utilizando una sábana o frazada.</b>                                             | <b>5</b>  |
| <b>1.2.5 Método de la silla.</b>                                                                            | <b>5</b>  |
| <b>1.2.6 Rescate deslizando la victima por una escalera.</b>                                                | <b>5</b>  |
| <b>1.3 Hardware</b>                                                                                         | <b>6</b>  |
| <b>1.3.1 Leap Motion</b>                                                                                    | <b>6</b>  |
| <b>1.3.2 Ar- Drone (Parrot)</b>                                                                             | <b>7</b>  |
| <b>1.3.2.1 Cámara HD</b>                                                                                    | <b>7</b>  |
| <b>1.3.2.2 Características Electrónicas</b>                                                                 | <b>7</b>  |
| <b>1.3.2.3 Estructura Mecánica</b>                                                                          | <b>8</b>  |
| <b>1.3.2.4 Motores</b>                                                                                      | <b>8</b>  |
| <b>1.3.3 Plataforma Simuladora de Vuelo</b>                                                                 | <b>9</b>  |
| <b>1.3.3.1 Servo Motores Hi -Tec HS 311</b>                                                                 | <b>9</b>  |
| <b>1.3.3.2 Tarjeta de adquisición de datos Xilinx 3e</b>                                                    | <b>10</b> |
| <b>1.4 Estudio de Comunicaciones</b>                                                                        | <b>11</b> |
| <b>1.4.1 Comunicación WIFI</b>                                                                              | <b>11</b> |
| <b>1.4.2 Comunicación USB</b>                                                                               | <b>11</b> |
| <b>1.5 Robot Paralelo</b>                                                                                   | <b>11</b> |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1.5.1 Historia del Robot Paralelo                                  | 11 |
| 1.5.2 Ventajas y Desventajas                                       | 14 |
| 1.5.3 Aplicaciones de los Robots Paralelos                         | 14 |
| 2. Análisis y Diseño de la Plataforma Simuladora de Vuelo          | 15 |
| 2.1 Modelo del Sistema                                             | 15 |
| 2.2 Elementos que conforman la plataforma                          | 18 |
| 2.3 Diseño                                                         | 19 |
| 2.3.1 Modelo Matemático                                            | 19 |
| 2.3.2 Cinemática Inversa                                           | 19 |
| 2.3.3 Diseño Mecánico                                              | 24 |
| 2.3.3.1 Diseño de la Base                                          | 25 |
| 2.3.3.2 Diseño Plataforma Móvil                                    | 26 |
| 2.3.3.3 Diseño de los eslabones                                    | 27 |
| 2.3.3.4 Diseño de las Articulaciones                               | 28 |
| 2.3.4 Diseño Electrónico                                           | 29 |
| 2.3.5 Software de Simulación                                       | 29 |
| 2.3.5.1 Conexión entre Inventor y Simulink                         | 30 |
| 2.3.5.2 Exportación del modelo desde Inventor a Simulink           | 31 |
| 2.3.5.3 Diseño del Software de Simulación                          | 34 |
| 2.3.5.4 Simulación de los ángulos de rotación y de desplazamiento. | 38 |
| 2.3.5.4.1 Simulación de Desplazamiento en el eje X                 | 38 |
| 2.3.5.4.2 Simulación de Desplazamiento en el eje Y                 | 39 |
| 2.3.5.4.3 Simulación de Desplazamiento en el eje Z                 | 39 |
| 2.3.5.4.4 Simulación de Rotación en el ángulo Alfa                 | 40 |
| 2.3.5.4.5 Simulación de Rotación en el ángulo Beta                 | 40 |
| 2.3.5.4.6 Simulación de Rotación en el ángulo Gama                 | 41 |

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3. Software de Control de la Plataforma Simulador de Vuelo y el Vehículo Aéreo no Tripulado</b> | <b>42</b> |
| <b>3.1 Instalación de dispositivos e Interface con el software de control</b>                      | <b>42</b> |
| <b>3.1.1 Leap Motion Controller Toolkit</b>                                                        | <b>42</b> |
| 3.1.1.1 Descargar el driver para el Leap Motion                                                    | 42        |
| 3.1.1.2 Instalar el driver                                                                         | 43        |
| 3.1.1.3 Comprobar funcionamiento                                                                   | 43        |
| 3.1.1.4 Descargar e Instalar Vi Package Manager                                                    | 44        |
| 3.1.1.5 Instalar el Toolkit de Leap Motion                                                         | 45        |
| 3.1.1.6 Verificar Instalación                                                                      | 46        |
| <b>3.1.2 FPGA Spartan 3E started Kit</b>                                                           | <b>46</b> |
| 3.1.2.1 Instalador FPGA                                                                            | 46        |
| 3.1.2.2 Verificar Instalación del driver para el FPGA                                              | 47        |
| 3.1.2.3 Conectar con Labview                                                                       | 47        |
| <b>3.1.3 Ar Drone Toolkit</b>                                                                      | <b>49</b> |
| 3.1.3.1 Descarga e Instalación                                                                     | 49        |
| 3.1.3.2 Toolkit en Labview                                                                         | 50        |
| <b>3.2 Descripción de los Toolkits</b>                                                             | <b>51</b> |
| 3.2.1 Leap Motion Controller Toolkit Vi                                                            | 51        |
| 3.2.2 Ar Drone Toolkit Vi                                                                          | 53        |
| <b>3.3 Diseño de los Software de Control</b>                                                       | <b>55</b> |
| 3.3.1 Software de Control Plataforma Simulador de Vuelo                                            | 55        |
| 3.3.2 Software de Control para el Vehículo Aéreo no Tripulado                                      | 59        |
| <b>4. Pruebas de Funcionamiento de la Plataforma Simuladora y el Vehículo Aéreo No Tripulado</b>   | <b>63</b> |
| <b>4.1 Pruebas de Funcionamiento de la Plataforma Simulador de Vuelo</b>                           | <b>63</b> |
| 4.1.1 Posición Inicial                                                                             | 63        |
| 4.1.2 Desplazamiento en el Eje x                                                                   | 65        |
| 4.1.2.1 Posición en -x                                                                             | 65        |



|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 4.1.1.2 Posición en x                                     | 66 |
| 4.1.3 Desplazamiento en el Eje y                          | 68 |
| 4.1.3.1 Posición en y                                     | 68 |
| 4.1.3.2 Posición en -y                                    | 69 |
| 4.1.4 Desplazamiento en el Eje z                          | 71 |
| 4.1.4.1 Posición en z =23cm                               | 71 |
| 4.1.4.2 Posición en z =28cm                               | 72 |
| 4.1.5 Angulo de Rotación Alfa                             | 74 |
| 4.1.5.1 Rotación del ángulo Alfa -15 grados               | 74 |
| 4.1.5.2 Rotación del ángulo Alfa 15 grados                | 75 |
| 4.1.6 Angulo de Rotación Beta                             | 77 |
| 4.1.6.1 Rotación del ángulo Beta 16 grados                | 77 |
| 4.1.6.2 Rotación del ángulo Beta -15 grados               | 78 |
| 4.1.7 Angulo de rotación Gama                             | 80 |
| 4.1.6.1 Rotación del ángulo Gamma 15 grados               | 80 |
| 4.1.6.1 Rotación del ángulo Gamma -15 grados              | 81 |
| 4.2 Cálculo del Error                                     | 83 |
| 4.3 Pruebas de Funcionamiento Vehículo Aéreo No tripulado | 87 |
| Conclusiones                                              | 89 |
| Bibliografía                                              | 91 |
| Anexos                                                    | 94 |

# INDICE DE FIGURAS

## CAPITULO 1

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Incendios y Otros siniestros en la ciudad de Cuenca | 1  |
| Figura 2. Posición en línea                                   | 4  |
| Figura 3. Posición en paralelo                                | 4  |
| Figura 4. Victima bajo los brazos                             | 5  |
| Figura 5. Rescate mediante una escalera                       | 6  |
| Figura 6. Leap Motion.                                        | 7  |
| Figura 7. Drone (Parrot)                                      | 8  |
| Figura 8. Dimensiones del Servomotor                          | 9  |
| Figura 9. Tarjeta de adquisición de datos                     | 10 |
| Figura 10. Primer robot paralelo                              | 11 |
| Figura 11. Robot paralelo 5 grados de libertad                | 12 |
| Figura 12. Plataforma de vuelo                                | 12 |
| Figura 13. Plataforma Stewart                                 | 13 |
| Figura 14. Aplicaciones Robots Paralelos                      | 14 |

## CAPITULO 2

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Figura 15. Diagrama de flujo modelo del sistema   | 15 |
| Figura 16. Diseño de la Plataforma en Papel       | 16 |
| Figura 17. Parámetros Geométricos                 | 17 |
| Figura 18. Elementos ensamblados de la plataforma | 18 |
| Figura 19. Geometría de la plataforma Stewart     | 19 |
| Figura 20. Dimensiones físicas.                   | 20 |
| Figura 21. Ángulos de rotación, y desplazamiento  | 21 |
| Figura 22. Ángulos de Euler.                      | 22 |
| Figura 23. Diseño de la base                      | 25 |
| Figura 24. Modelo 3D de la base                   | 25 |

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 25. Diseño de la plataforma móvil</b>                                                  | <b>26</b> |
| <b>Figura 26. Modelo 3d de la plataforma móvil</b>                                               | <b>26</b> |
| <b>Figura 27. Diseño del eslabón</b>                                                             | <b>27</b> |
| <b>Figura 28. Diseño 3d del eslabón</b>                                                          | <b>27</b> |
| <b>Figura 29. Diseño de la Articulación</b>                                                      | <b>28</b> |
| <b>Figura 30. Diseño 3d de la Articulación</b>                                                   | <b>28</b> |
| <b>Figura 31. Diseño mecánico de la Plataforma Stewart en 3D realizado en Autodesk Inventor.</b> | <b>29</b> |
| <b>Figura 32. SimMechanics Link</b>                                                              | <b>30</b> |
| <b>Figura 33. SimMechanics Link en Inventor.</b>                                                 | <b>31</b> |
| <b>Figura 34. Importar archivos .XML en Matlab</b>                                               | <b>31</b> |
| <b>Figura 35. Diagrama de bloques de la Plataforma</b>                                           | <b>32</b> |
| <b>Figura 36. Guardar Archivo .MDL Simulink</b>                                                  | <b>34</b> |
| <b>Figura 37. Matlab Funtion en Simulink</b>                                                     | <b>36</b> |
| <b>Figura 38. Actuadores de la Plataforma</b>                                                    | <b>37</b> |
| <b>Figura 39. Diagrama de Bloques para la simulación de la Plataforma</b>                        | <b>37</b> |
| <b>Figura 40. Plataforma Simuladora de Vuelo en Simulink</b>                                     | <b>38</b> |
| <b>Figura 41. Simulación del Desplazamiento de la Plataforma en el eje x</b>                     | <b>38</b> |
| <b>Figura 42. Simulación del Desplazamiento de la Plataforma en el eje y</b>                     | <b>39</b> |
| <b>Figura 43. Simulación del Desplazamiento de la Plataforma en el eje z</b>                     | <b>39</b> |
| <b>Figura 44. Simulación del Rotación de la Plataforma en el ángulo Alfa</b>                     | <b>40</b> |
| <b>Figura 45. Simulación de Rotación de la Plataforma en el ángulo Beta</b>                      | <b>40</b> |
| <b>Figura 46. Simulación de Rotación de la Plataforma en el ángulo Gama</b>                      | <b>41</b> |

## **CAPITULO 3**

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 47. Página para descargar el driver</b>             | <b>42</b> |
| <b>Figura 48. Asistente para instalar el driver</b>           | <b>43</b> |
| <b>Figura 49. Home de Airspace</b>                            | <b>43</b> |
| <b>Figura 50. Página para descargar el Vi Package Manager</b> | <b>44</b> |
| <b>Figura 51. Vi Package Manager</b>                          | <b>44</b> |

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 52. Leap Motion Controller Toolkit</b>                           | <b>45</b> |
| <b>Figura 53. Leap Motion Controller Toolkit Instalado</b>                 | <b>45</b> |
| <b>Figura 54. Ubicación del Leap Motion Controller toolkit en Labview</b>  | <b>46</b> |
| <b>Figura 55. Asistente para Instalar el Driver del FPG Sparatn 3E</b>     | <b>46</b> |
| <b>Figura 56. Dispositivo Xilinx instalado (Fpga)</b>                      | <b>47</b> |
| <b>Figura 57. Crear Nuevo Proyecto Labview</b>                             | <b>47</b> |
| <b>Figura 58. Nueva tarjeta o dispositivo</b>                              | <b>48</b> |
| <b>Figura 59. Nuevo Fpga</b>                                               | <b>48</b> |
| <b>Figura 60. FPGA conectado a Labview y Cargado al Proyecto</b>           | <b>49</b> |
| <b>Figura 61. Ar Drone Toolkit Vi Package Manager</b>                      | <b>50</b> |
| <b>Figura 62. Ar Drone Toolkit Instalado</b>                               | <b>50</b> |
| <b>Figura 63. Ar Drone Toolkit en Labview</b>                              | <b>51</b> |
| <b>Figura 64. Leap Motion Controller Toolkit Vi</b>                        | <b>51</b> |
| <b>Figura 65. Ar Drone Toolkit</b>                                         | <b>53</b> |
| <b>Figura 66. Open Vi</b>                                                  | <b>53</b> |
| <b>Figura 67. Control Drone Vi</b>                                         | <b>54</b> |
| <b>Figura 68. Read NavData Vi</b>                                          | <b>55</b> |
| <b>Figura 69. Software para controlar la Plataforma Simulador de Vuelo</b> | <b>58</b> |
| <b>Figura 70. Interfaz con el usuario Plataforma Simulador de Vuelo</b>    | <b>59</b> |
| <b>Figura 71. Software de Control para Vehículo Aéreo no Tripulado</b>     | <b>62</b> |
| <b>Figura 72. Interfaz con el usuario Vehículo Aéreo no Tripulado</b>      | <b>62</b> |

## **CAPITULO 4**

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 73. Datos Adquiridos y Enviados a la Posición Inicial</b> | <b>64</b> |
| <b>Figura 74. Posición Inicial Plataforma</b>                       | <b>64</b> |
| <b>Figura 75. Desplazamiento en el eje X -4cm</b>                   | <b>65</b> |
| <b>Figura 76. Desplazamiento de la plataforma en el eje x -4cm</b>  | <b>66</b> |
| <b>Figura 77. Desplazamiento en el eje X 4cm</b>                    | <b>67</b> |
| <b>Figura 78. Desplazamiento de la plataforma en el eje x 4cm</b>   | <b>67</b> |

|                                                                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 79. Desplazamiento en el eje y 4cm</b>                                                                               | <b>68</b> |
| <b>Figura 80. Desplazamiento de la plataforma en el eje y 4cm</b>                                                              | <b>69</b> |
| <b>Figura 81. Desplazamiento en el eje -y 4cm</b>                                                                              | <b>70</b> |
| <b>Figura 82. Desplazamiento de la plataforma en el eje -y 4cm</b>                                                             | <b>70</b> |
| <b>Figura 83. Desplazamiento en el eje z 23cm</b>                                                                              | <b>71</b> |
| <b>Figura 84. Desplazamiento de la plataforma en el eje z 23cm</b>                                                             | <b>72</b> |
| <b>Figura 85. Desplazamiento en el eje z 28cm</b>                                                                              | <b>73</b> |
| <b>Figura 86. Desplazamiento de la plataforma en el eje z 28cm</b>                                                             | <b>73</b> |
| <b>Figura 87. Rotación en alfa -15 grados</b>                                                                                  | <b>74</b> |
| <b>Figura 88. Rotación de la plataforma en -15 grados</b>                                                                      | <b>75</b> |
| <b>Figura 89. Rotación en Alfa 15 grados</b>                                                                                   | <b>76</b> |
| <b>Figura 90. Rotación en Alfa de la plataforma en 15 grados</b>                                                               | <b>76</b> |
| <b>Figura 91. Rotación en Beta 16 grados</b>                                                                                   | <b>77</b> |
| <b>Figura 92. Rotación de la plataforma en Beta 16 grados</b>                                                                  | <b>78</b> |
| <b>Figura 93. Rotación en Beta -15 grados</b>                                                                                  | <b>79</b> |
| <b>Figura 94. Rotación de la plataforma en Beta -15 grados</b>                                                                 | <b>79</b> |
| <b>Figura 95. Rotación en Gamma 15 grados</b>                                                                                  | <b>80</b> |
| <b>Figura 96. Rotación de la plataforma en Gamma 15 grados</b>                                                                 | <b>81</b> |
| <b>Figura 97. Rotación en Gamma 15 grados</b>                                                                                  | <b>82</b> |
| <b>Figura 98. Rotación de la plataforma en Gamma -15 grados</b>                                                                | <b>82</b> |
| <b>Figura 99. Gráfica del Error Porcentual de La Plataforma Controlada por Gestos</b>                                          | <b>84</b> |
| <b>Figura. 100 Grafica de Comparación entre el VE y VM de La Plataforma Controlada por Gestos</b>                              | <b>84</b> |
| <b>Figura. 101 Grafica del Error Porcentual de La Plataforma Controlada Mediante datos<br/>ingresados por el Teclado</b>       | <b>86</b> |
| <b>Figura. 102 Grafica De comparación del VE Y VM de La Plataforma Controlada Mediante datos<br/>ingresados por el Teclado</b> | <b>86</b> |
| <b>Figura. 103 Grafica comparativa entre el PE Mediante gestos y el PE con datos ingresados<br/>desde el teclado</b>           | <b>87</b> |

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 104. Posicionamiento global del lugar de pruebas del Drone con Google Earth</b> | <b>88</b> |
| <b>Figura 105. Captura de video de prueba de funcionamiento en una área urbana</b>        | <b>88</b> |

## INDICE DE TABLAS

|                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabla 1. Elementos de la plataforma</b>                                               | <b>18</b> |
| <b>Tabla 2. Descripción de los Bloques existentes en el Diagrama de Bloques</b>          | <b>33</b> |
| <b>Tabla 3. Parámetros de simulación</b>                                                 | <b>35</b> |
| <b>Tabla 4. Algoritmo del Software de control de la Plataforma</b>                       | <b>57</b> |
| <b>Tabla 5. Algoritmo del Software de control para el Drone</b>                          | <b>61</b> |
| <b>Tabla 6. Posición Inicial Plataforma</b>                                              | <b>63</b> |
| <b>Tabla 7. Posición en <math>-x</math> de la plataforma</b>                             | <b>65</b> |
| <b>Tabla 8. Posición en <math>x</math> de la plataforma</b>                              | <b>66</b> |
| <b>Tabla 9. Posición en <math>y</math> de la plataforma</b>                              | <b>68</b> |
| <b>Tabla 10. Posición en <math>-y</math> de la plataforma</b>                            | <b>69</b> |
| <b>Tabla 11. Posición en <math>z=23\text{cm}</math></b>                                  | <b>71</b> |
| <b>Tabla 12. Posición en <math>z=28\text{cm}</math></b>                                  | <b>72</b> |
| <b>Tabla 13. Plataforma en Alfa <math>-15</math> grados</b>                              | <b>74</b> |
| <b>Tabla 14. Plataforma en Alfa <math>= 15</math></b>                                    | <b>75</b> |
| <b>Tabla 15. Plataforma en Beta<math>=16</math></b>                                      | <b>77</b> |
| <b>Tabla 16. Plataforma en Beta<math>=-15</math></b>                                     | <b>78</b> |
| <b>Tabla 17. Plataforma en Gama <math>15</math> grados</b>                               | <b>80</b> |
| <b>Tabla 18. Plataforma en Gama <math>-15</math> grados</b>                              | <b>81</b> |
| <b>Tabla 19. Calculo del Error de la Plataforma Manipulada Mediante Gestos</b>           | <b>83</b> |
| <b>Tabla 20. Calculo del Error de la Plataforma Manipulada Mediante Datos Ingresados</b> |           |
| <b>Por el teclado</b>                                                                    | <b>85</b> |

# Capítulo 1

## Tipos de Búsqueda – Rescate, Estudio de Equipos, Comunicaciones e Historia de los robots paralelos

### 1.1 Situación actual de búsqueda y rescate en la provincia del Azuay

En la actualidad en el Ecuador los accidentes ya sean de origen natural o provocados por la gente se deben a diversas causas que son mencionados en la siguiente figura.

| SUB-CATEGORÍA DE INCIDENTES DE BOMBEROS<br>ECU-911 CENTRO ZONAL AUSTRO<br>Período del 01 al 30 de abril 2013 |                    |                  |                   |                  |                  |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|
| Categorías Bomberos                                                                                          | Tipo De Entrada    |                  |                   |                  | Total Incidentes | Porcentaje  |
|                                                                                                              | Llamada Telefónica | Video vigilancia | Agregada por Mano | Botón de Auxilio |                  |             |
| <b>Incendio</b>                                                                                              | <b>321</b>         | <b>61</b>        | <b>9</b>          |                  | <b>391</b>       | <b>81%</b>  |
| Incendios forestales                                                                                         | 217                | 34               | 8                 |                  | 259              | 54%         |
| Conato de incendio                                                                                           | 54                 | 27               |                   |                  | 81               | 17%         |
| Incendios estructurales                                                                                      | 44                 |                  |                   |                  | 44               | 9%          |
| Incendios vehiculares                                                                                        | 6                  |                  | 1                 |                  | 7                | 1%          |
| <b>Rescate</b>                                                                                               | <b>75</b>          | <b>1</b>         | <b>2</b>          |                  | <b>78</b>        | <b>16%</b>  |
| Fugas de gas                                                                                                 | 39                 |                  |                   |                  | 39               | 8%          |
| Inundaciones                                                                                                 | 8                  |                  |                   |                  | 8                | 2%          |
| Animales                                                                                                     | 6                  |                  | 1                 |                  | 7                | 1%          |
| Estructuras colapsadas                                                                                       | 7                  |                  |                   |                  | 7                | 1%          |
| Vehiculares                                                                                                  | 5                  |                  | 1                 |                  | 6                | 1%          |
| Ascensores                                                                                                   | 2                  | 1                |                   |                  | 3                | 1%          |
| Altura                                                                                                       | 2                  |                  |                   |                  | 2                | 0,4%        |
| Domicilios                                                                                                   | 2                  |                  |                   |                  | 2                | 0,4%        |
| Espacios confinados                                                                                          | 2                  |                  |                   |                  | 2                | 0,4%        |
| Materiales peligrosos que afectan a ser humano, ambiente, bienes                                             | 2                  |                  |                   |                  | 2                | 0,4%        |
| <b>Apoyo comunitario</b>                                                                                     | <b>12</b>          |                  |                   |                  | <b>12</b>        | <b>2%</b>   |
| Cerrar hidrante                                                                                              | 6                  |                  |                   |                  | 6                | 1%          |
| Abrir departamento                                                                                           | 4                  |                  |                   |                  | 4                | 1%          |
| Abastecimiento de agua                                                                                       | 2                  |                  |                   |                  | 2                | 0,4%        |
| <b>Total general</b>                                                                                         | <b>408</b>         | <b>62</b>        | <b>11</b>         | <b>0</b>         | <b>481</b>       | <b>100%</b> |

Fuente: Unidad de Estadística y Evaluación ECU-911 Centro Zonal Austro

23

Figura 1. Incendios y Otros siniestros en la ciudad de Cuenca. [1]

Como se observó en la figura anterior en nuestra provincia existen varios sucesos a los que acuden los bomberos, siendo los de mayor demanda son los incendios forestales y los incendios en viviendas.

### **1.1.1 Incendios forestales**

En el Ecuador, particularmente en la provincia del Azuay, los Incendios Forestales han sido y son una de las principales causas en acabar con nuestro ecosistema.

La época de incendios forestales, van de junio a diciembre, y las causas son en su totalidad producidas por el ser humano y por su irresponsabilidad al no saber convivir con el ecosistema que lo rodea [2]

### **1.1.2 Incendios en hogares**

Un incendio es fuego no controlado que puede afectar a algo que no está destinado a quemarse, afecta a estructuras y seres vivos sin distinción que pueden llevar a la muerte de estos por intoxicación o quemaduras de todo tipo.

Para que se inicie un fuego es necesario que se den conjuntamente tres componentes: combustible, oxígeno y calor o energía de activación.

Las causas más comunes para que se de un incendio son:

- Fallas en las instalaciones eléctricas
- El uso de velas dentro del hogar sin supervisión
- Accidentes en el hogar (cocina,planchas encendidas,etc)

En la actualidad este tipo de incendios en la ciudad de Cuenca y en la Provincia del Azuay se produce en un 50% por fallas eléctricas, y el otro 50% se da por accidentes en el hogar. [2]

### **1.1.3 Inundaciones**

Después de mencionar las 2 principales problemáticas a la que acuden los bomberos vamos a mencionar las inundaciones que se dan en la provincia por lo general ocurren en la época invernal y en el sector rural por la falta de servicios que no existen en esas zonas.

Las inundaciones son la tercera problemática ya que ocurre por año alrededor de 200 en la ciudad y los bomberos tienen que acudir para el rescate de gente o evitar el daño material en exceso.

Esta problemática es el 2% de los siniestros a los que acuden los bomberos y se ha tomado en cuenta para ser mencionado ya que nuestro objetivo es mostrar una solución viable en el desarrollo de un sistema de búsqueda y rescate para colaborar en todas estas situaciones. [2]

## **1.2 Tipos de búsqueda y rescate**

Para una búsqueda y rescate se deben tener muchos factores en cuenta pero hay 3 factores fundamentales para este tipo de eventos que son los siguientes:



1. Seguridad y protección de la vida, tanto de civiles como del personal de emergencia
2. Estabilización del incidente (que la emergencia no crezca en tamaño)
3. Conservación y protección de la propiedad (pública y privada)

Para un proceso de búsqueda y rescate se tomaran en cuenta algunos puntos que son:

1. Hora del día, depende mucho del horario para plantear la búsqueda y rescate.
2. Tipo de edificación
3. Tipo de construcción
4. Tamaño de la estructura
5. Ubicación aproximada del fuego
6. Puntos de ingreso y egreso del grupo de B & R
7. Establecer un grupo de B & R

Los Tipos de búsqueda y rescate son:

#### **1.2.1 Posición en línea o en fila**

Aquí dos o tres miembros se ubican uno tras otro para moverse en fila, la persona de adelante será la guía y nos ira mostrando el camino a seguir, pero tiene un problema que la superficie registrada va a ser mínima.



**Figura 2. Posición en línea [3]**

### **1.2.2 Posición en paralelo**

Con el miembro guía del grupo en contacto con el muro, los otros integrantes utilizando una cuerda se ubicaran paralelo al primero. Así podrán cubrir más espacio el rato de un rescate y también con su otra mano llevar artefactos para realizar estas operaciones.



**Figura 3. Posición en paralelo [3]**

### **1.2.3 Método tomando la víctima bajo los brazos.**

Este tipo de método es para personas de no mucho peso ni estatura y se sujeta a la víctima bajo los brazos para proceder a la evacuación.



**Figura 4. Víctima bajo los brazos [3]**

#### **1.2.4 Método de rescate utilizando una sábana o frazada.**

Lo practican 2 rescatistas y se coloca una sábana en el centro para poder trasladar a la víctima.

#### **1.2.5 Método de la silla.**

Dos rescatistas posicionan a la víctima sentándola en una silla. Uno tomara la silla por las patas y el otro por el respaldo. Este método es muy útil para subir o bajar victimas por las escaleras.

#### **1.2.6 Rescate deslizando la víctima por una escalera.**

Utilizando una escalera se transportara a la víctima desde una ventana o techo hacia abajo, las piernas van sobre el hombro del rescatista y lo lleva lentamente hacia abajo.



**Figura 5. Rescate mediante una escalera [3]**

### **1.3 Hardware**

Los equipos usados en la implementación del sistema, sus características tanto electrónicas como mecánicas son los siguientes.

#### **1.3.1 Leap Motion**

Leap Motion es una compañía de desarrollo que ha creado un dispositivo que detecta movimientos para la interacción persona- PC.

El controlador de movimiento Leap es un pequeño dispositivo USB que está diseñado para ser colocado en un escritorio. [4]

El uso de dos cámaras de infrarrojos y tres LEDs , permiten al dispositivo escanear, a una distancia de aproximadamente 1 metro cualquier tipo de movimiento que se realice con las manos en un área determinada, con una precisión de aproximadamente 0,01 mm.

Es decir realiza un escaneo 3D de las manos permitiendo así realizar muchas actividades para suplir prácticamente al mouse, en este caso operar un simulador de vuelo y un vehículo aéreo



**Figura 6. Leap Motion. [5]**

El área de observación es más pequeña y de mayor resolución en comparación al sensor Kinect<sup>1</sup> que también realiza un escaneo 3D pero de todo el cuerpo, la ventaja del Leap Motion es que nos entrega mayor cantidad de datos para poder procesar ya que interactúa directamente con las manos y hace que el sistema sea más preciso.

### **1.3.2 Ar- Drone (Parrot)**

Es un dispositivo inalámbrico presentado por la marca Parrot, que tiene 4 hélices de allí su nombre de Cuadricóptero, creado inicialmente para ser controlado mediante Smartphone y disponible para Sistemas Operativos Android e IO's. [6]

#### **1.3.2.1 Cámara HD**

Mientras vuela, la cámara frontal del Parrot AR.Drone 2.0 transmite en directo lo que ve el Cuadricóptero en la pantalla del dispositivo del piloto.

Tiene una resolución de video 1280 x 720, en alta definición.

Su Angulo de visión es de 92 grados y se transmite en tiempo real.

#### **1.3.2.2 Características Electrónicas**

- ❖ Cuenta con un procesador ARM Cortex A8 de 32 bits de 1 Ghz
- ❖ Sistema Operativo Linux 2.6.32
- ❖ Puerto USB 2.0 de alta velocidad para grabación WIFI
- ❖ Giroscopio de 3 ejes
- ❖ Acelerómetro de 3 ejes
- ❖ Magnetómetro de 3 ejes más
- ❖ Sensor de presión a 80cm a nivel del mar
- ❖ Sensor de ultrasonido para medición de la altitud
- ❖ Cámara vertical de 60fps para medición de la velocidad con respecto al suelo.

---

<sup>1</sup> **Kinect:** es un dispositivo que sirve para interactuar con una persona de una manera libre sin necesidad de tener contacto físico con algún controlador.

### 1.3.2.3 Estructura Mecánica

Tiene un material muy resistente a caídas está formado de tubos de fibra de carbono con un peso total de 380g con el casco de protección exterior y 420g con el casco de protección interior cuenta con piezas de plástico y espuma para aislar el centro de inercia de las vibraciones de los motores, los cascos son de polipropileno y tiene nano revestimiento repelente a los líquidos en los sensores ultrasonidos y todas su piezas pueden ser reemplazadas.



Figura 7. Ar-Drone (Parrot) [7]

### 1.3.2.4 Motores

- ✕ 4 motores de rotor internos de 14.5W de potencia y 28,5W suspendido en el aire
- ✕ Tiene rodamiento de bolas en miniatura
- ✕ Engranajes de bajo ruido
- ✕ Eje de Hélices de acero templado
- ✕ Alta fuerza de propulsión de las hélices
- ✕ Micro controlador AVR de 8mips para control de motores
- ✕ Batería Recargable de litio de 1000 mAh
- ✕ Controlador del motor reprogramable
- ✕ Resistente al agua

Estas son las principales características y utilidades del Ar Drone que sea utilizado en la tesis para cumplir los objetivos planteados ya que cuenta con lo que necesitamos para realizar el prototipo de investigación.

### 1.3.3 Plataforma Simuladora de Vuelo

#### 1.3.3.1 Servo Motores Hi -Tec HS 311

Ese tipo de servomotores se usaron para el control de la plataforma simuladora de vuelo y tienen las siguientes características:

Engranajes: Nylon

Voltaje: 4.8V

Velocidad: 0.19sec/60° sin carga

Torque 42 oz/in. (3 kg.cm)

Dimensiones del Servomotor

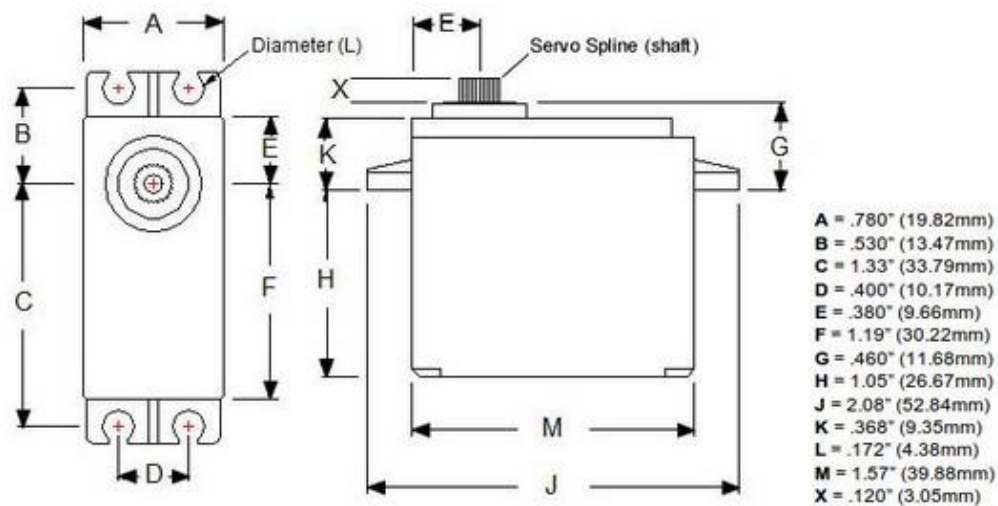


Figura 8. Dimensiones del Servomotor [8]

### 1.3.3.2 Tarjeta de adquisición de datos Xilinx 3e

La tarjeta de adquisición de datos Spartan III de Xilinx está conformada por un conjunto de Bloques Lógicos Configurables rodeados por un perímetro de Bloques Programables de entrada/salida llamados IOBs.

Los elementos funcionales programables que la componen son los siguientes:

- Bloques de entrada/salida IOBs: Controlan el flujo de datos entre los pines de entrada/salida y la lógica interna del dispositivo.
- Bloques Lógicos configurables (Configurable Logic Blocks – CLBs): Contienen Look-Up Tables basadas en tecnología RAM (LUTs) para implementar funciones lógicas y elementos de almacenamiento que pueden ser usados como *flip-flops* o como *latches*.
- Bloques de memoria RAM (Block RAM): Proveen almacenamiento de datos en bloques de 18 Kbits con dos puertos independientes cada uno.
- Bloques de multiplicación que aceptan dos números binarios de 18 bit como entrada y entregan uno de 36 bits.
- Administradores digitales de reloj (Digital Clock Managers – DCMs): Estos elementos proveen funciones digitales auto calibradas, las que se encargan de distribuir, retrasar arbitrariamente en pocos grados, desfazar en 90, 180, y 270 grados, dividir y multiplicar las señales de reloj de todo el circuito. [9]



Figura 9. Tarjeta de adquisición de datos



## **1.4 Estudio de Comunicaciones**

### **1.4.1 Comunicación WIFI [10]**

WIFI es la abreviación de Wireless Fidelity que quiere decir una comunicación segura sin cables y tiene diferentes protocolos de comunicación de los cuales usamos los siguientes para nuestro propósito:

- El protocolo 802.11b que transmite a 2.4 GHz y maneja hasta 11 megabits de datos por segundo, utilizando codificación CCK.
- El protocolo 802.11g transmite también a 2.4 GHz, pero es mucho más rápido que el anterior. Y puede manejar hasta 54 megabits de datos por segundo.

### **1.4.2 Comunicación USB**

USB es un bus de datos usado para comunicar y proveer de alimentación eléctrica entre computadores, periféricos y dispositivos electrónicos.

Los dispositivos USB se clasifican en cuatro tipos según su velocidad de transferencia de datos: [11]

- **Baja velocidad (1.0)**
- **Velocidad completa (1.1)**
- **Alta velocidad (2.0)**
- **Súper alta velocidad (3.0)**

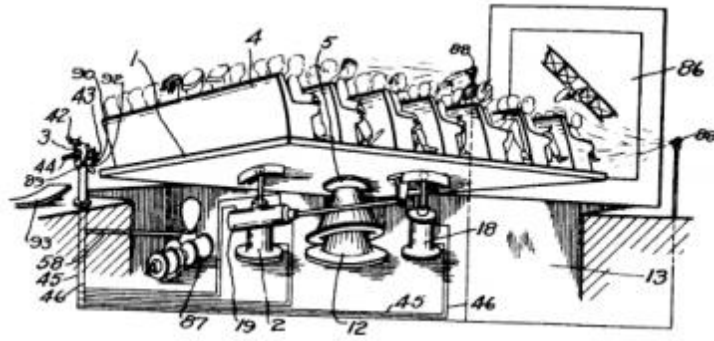
El tipo de USB a utilizar será el 2.0 ya que con este puerto cuentan nuestras computadoras y el equipo reconocedor de gestos.

## **1.5 Robot Paralelo**

Un robot paralelo es aquel cuya estructura mecánica está formada por un mecanismo de cadena cerrada en el que el efector final se une a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes.

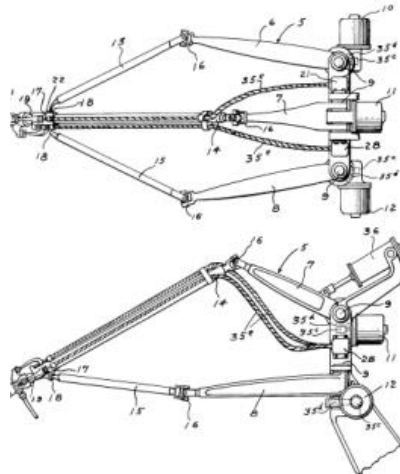
### **1.5.1 Historia del Robot Paralelo**

EL primer robot paralelo del que se tiene conocimiento fue patentado en 1931 como plataforma de movimiento para el entretenimiento.



**Figura 10. Primer robot paralelo [13]**

El primer robot industrial paralelo construido fue en 1940 por Williard L.V. Pollard quien presentó un robot de 5 grados de libertad que se utilizó en operaciones de pintura con spray.



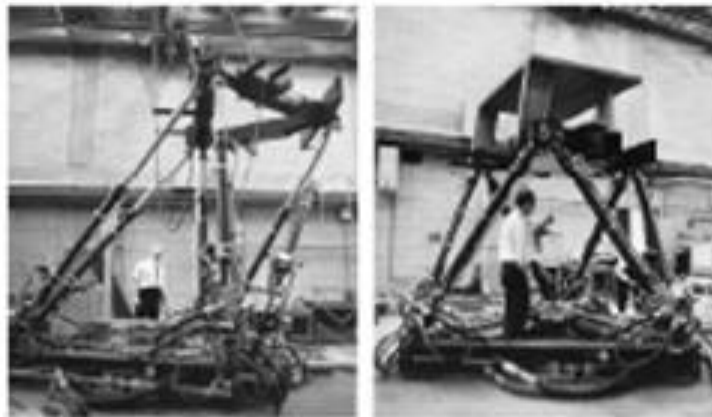
**Figura 11. Robot paralelo 5 grados de libertad [13]**

En 1947 Gough ideó un robot paralelo con seis actuadores lineales en forma de octaedro para el ensayo de neumáticos de aviación de la empresa Dunlop.



**Figura 12. Plataforma de vuelo [13]**

En 1965 se creó la plataforma de Stewart con 6 grados de libertad que se usó como un simulador de vuelo. En esa misma época Cappel exactamente en 1967 patentó un simulador de movimiento basado en un hexápodo.



**Figura 13. Plataforma Stewart [13]**

## 1.5.2 Ventajas y Desventajas

### VENTAJAS DE LOS ROBOTS PARALELOS

- Los accionamientos de potencia conectan directamente el eslabón final a la base del robot.
- Las estructuras paralelas son mecanismos que ofrecen alta rigidez y bajo peso.
- Elevadas velocidades de operación, en comparación con cualquier otro tipo de estructura robótica.

### DESVENTAJAS DE LOS ROBOTS PARALELOS

- La Cinemática de los mecanismos paralelos es más compleja.
- El espacio de trabajo suele ser pequeño con respecto a otros robots y su cálculo no es sencillo ya que la posición y orientación están muy acopladas.
- No existe como en los de serie un modelo dinámico general para los mismos.

## 1.5.3 Aplicaciones de los Robots Paralelos

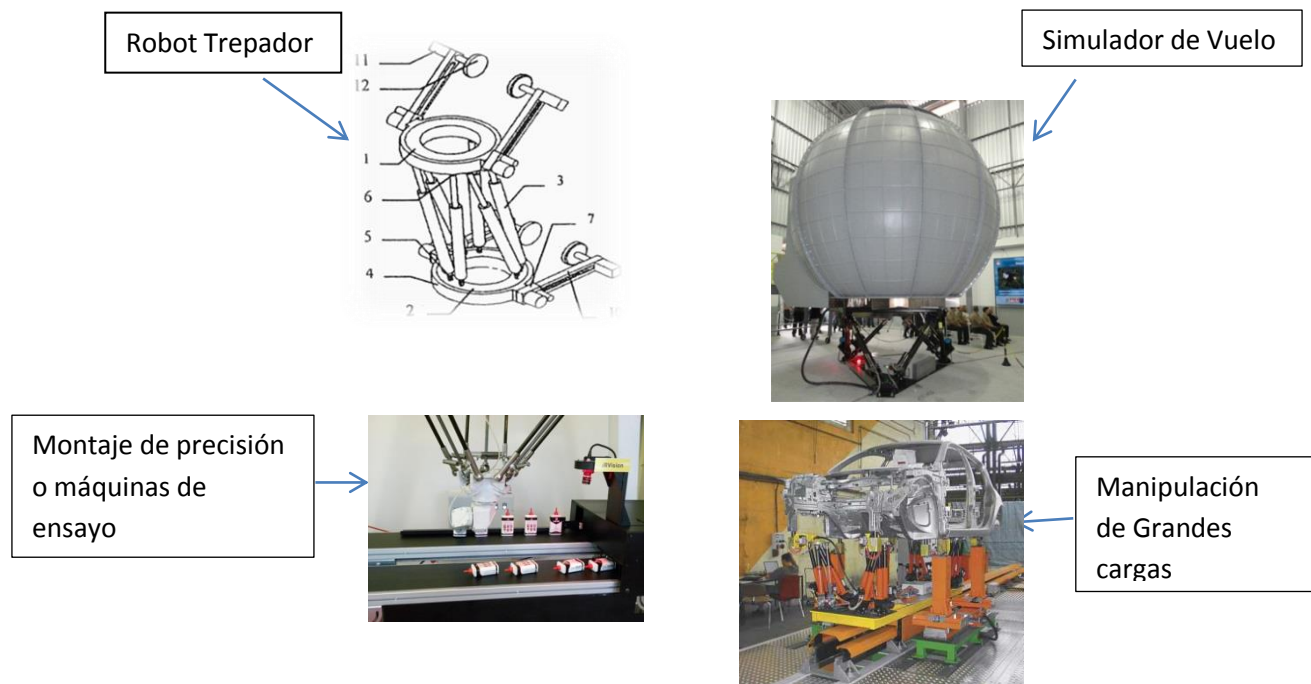


Figura 14. Aplicaciones Robots Paralelos [12] [1]

# CAPITULO 2

## Análisis y Diseño de la Plataforma Simuladora de Vuelo

### 2.1 Modelo del Sistema

El sistema para la construcción de la plataforma se puede describir como la figura 15, en ella se observa de una manera detallada los procesos para la construcción, simulación y modelado de la plataforma.

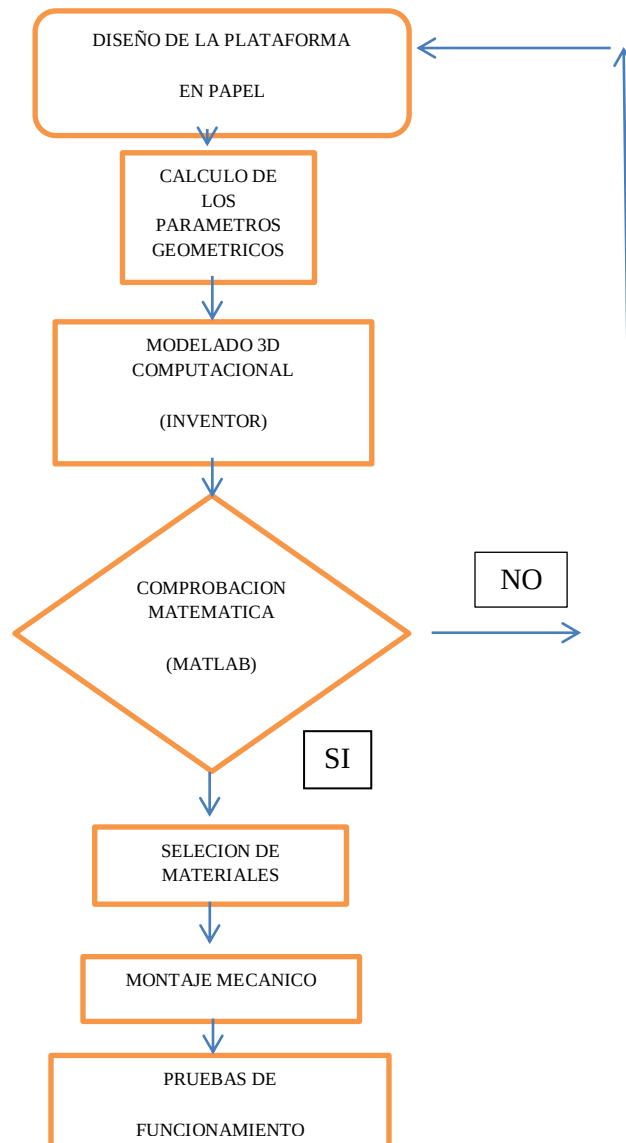
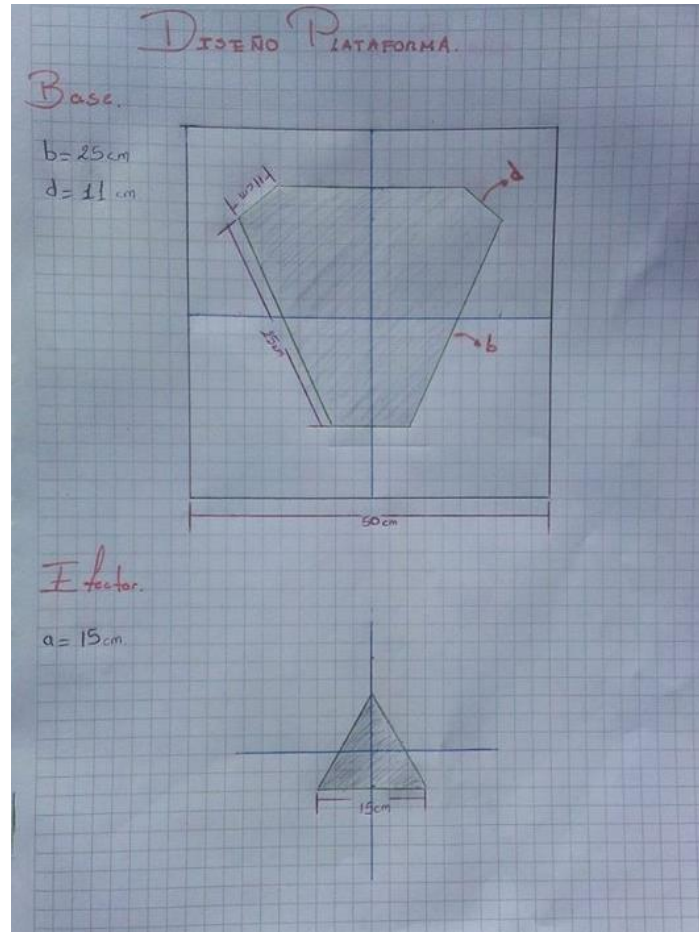


Figura 15. Diagrama de flujo modelo del sistema

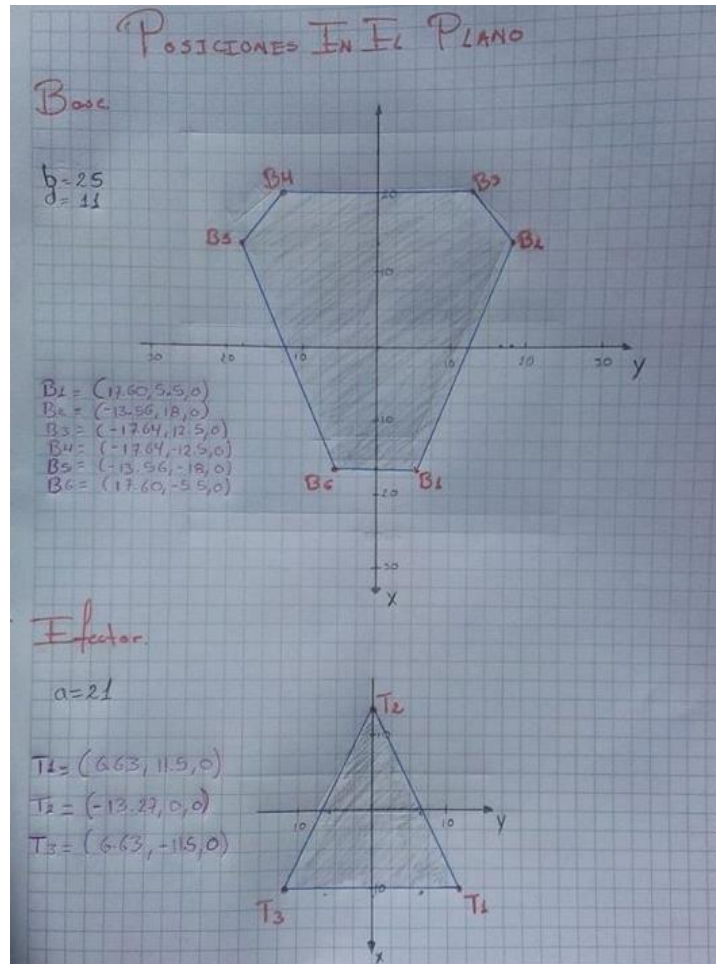
La explicación del diagrama de flujo es el siguiente:

**Diseño de la plataforma en papel.-** Se debe realizar los bocetos iniciales de la plataforma en papel para tener una percepción del espacio físico a ocupar.



**Figura 16. Diseño de la Plataforma en Papel**

**Calculo de los parámetros geométricos.-** Una vez obtenido el boceto inicial se realiza el cálculo de los parámetros geométricos para obtener las dimensiones de la plataforma superior como inferior, esto permite desarrollar más fácilmente la cinemática inversa como se expone más adelante.



**Figura 17. Parámetros Geométricos**

**Modelado 3D computacional (inventor).**- Con el cálculo de los parámetros geométricos se realiza el modelado 3D de la plataforma tomando en cuenta las dimensiones.

**Comprobación matemática.**- Mediante la cinemática inversa y el software de Matlab se realiza la simulación, y si esta tiene efectos positivos se sigue al siguiente paso dentro del proceso

**Selección de materiales.**- Con los parámetros geométricos calculados se procede a la selección de materiales para construir la plataforma.

**Montaje mecánico.**- tomando en cuenta el dimensionamiento de la plataforma así como los cálculos previamente de la plataforma se realiza el montaje mecánico.

**Pruebas de funcionamiento.**- Esta es la etapa final del proceso, aquí se realizan las pruebas a la plataforma ya armada y se comprueban con las simulaciones computacionales.

## 2.2 Elementos que conforman la plataforma

| ELEMENTO             | DESCRIPCION                                                 |
|----------------------|-------------------------------------------------------------|
| PLATAFORMA SUPERIOR  | O efector es la plataforma móvil del sistema                |
| PLATAFORMA INFERIOR  | Es la base de la plataforma en donde se sostiene el sistema |
| ESLABONES            | Sistema mecánico para desplazar a la plataforma móvil       |
| ARTICULACIONES       | Juntas que permiten la movilidad al sistema                 |
| ACTUADORES           | Llevan la fuerza motora a los eslabones                     |
| TARJETA CONTROLADORA | Permite controlar a los actuadores (FPGA)                   |
| SOPORTES             | En donde se empotran los actuadores                         |

Tabla 1. Elementos de la plataforma

En la figura 18 se muestran los elementos ensamblados en la plataforma

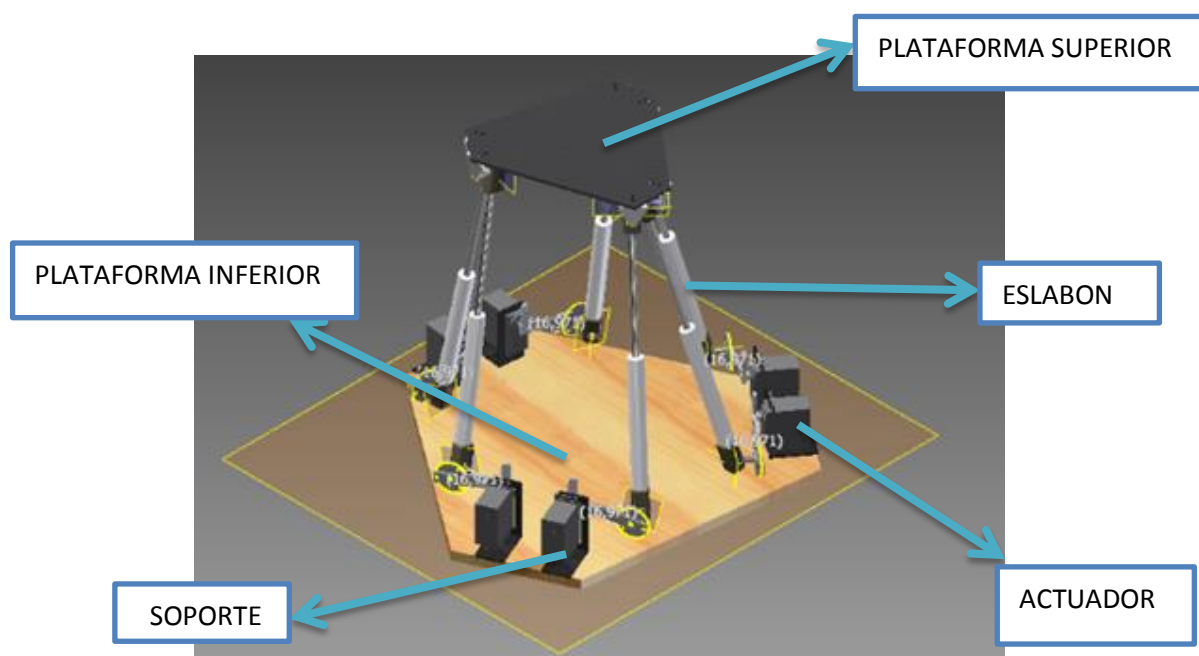


Figura 18. Elementos ensamblados de la plataforma



## 2.3 Diseño

En esta sección se estudiará todos los detalles que posteriormente llevará a la conclusión de la plataforma; la plataforma Stewart es un mecanismo creado a base de un modelo matemático mediante álgebra lineal y geometría analítica con el objetivo de definir la cinemática para el movimiento en el espacio.

En los siguientes puntos se expondrá todas las teorías del diseño necesarias para llegar a la conclusión de la plataforma Stewart.

### 2.3.1 Modelo Matemático

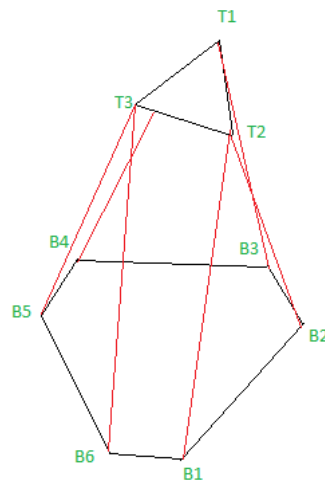
El modelo matemático es la base para desarrollar una plataforma Stewart, ya que de aquí se deriva la cinemática inversa y el dimensionamiento geométrico.

El modelo matemático en el que está basada esta plataforma es el expuesto por los doctores Kai Liu, Jhon M. Fitzgerald y Frank L. Lewis, miembros del instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos de la IEEE.

Este modelo matemático antes mencionado se utilizó por que permite encontrar la cinemática inversa de una manera más sencilla y eficaz que otros métodos expuestos, además que se puede dimensionar para cualquier tamaño de plataforma.

### 2.3.2 Cinemática Inversa

La plataforma se basa en la configuración que se observa en la figura 19 tomando en cuenta el modelado matemático antes mencionado.



**Figura 19. Geometría de la plataforma Stewart**

Las dimensiones físicas de la plataforma serían:

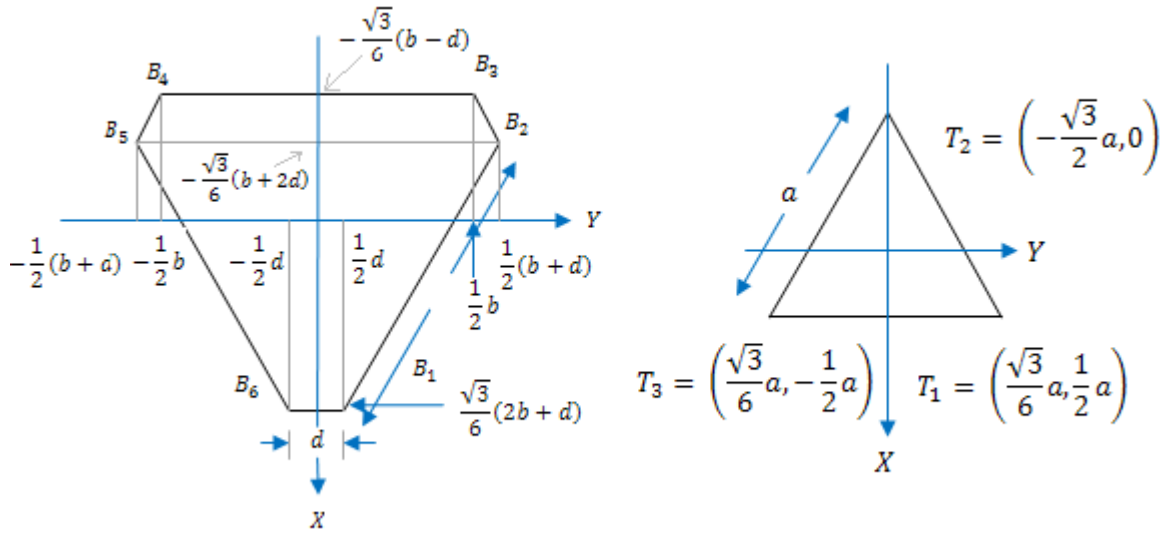


Figura 20. Dimensiones físicas. [14]

Donde:

**b** y **d** son los lados de la plataforma inferior para calcular los puntos **B1**, **B3**, **B3**, **B4**, **B5**, **B6** de la base.

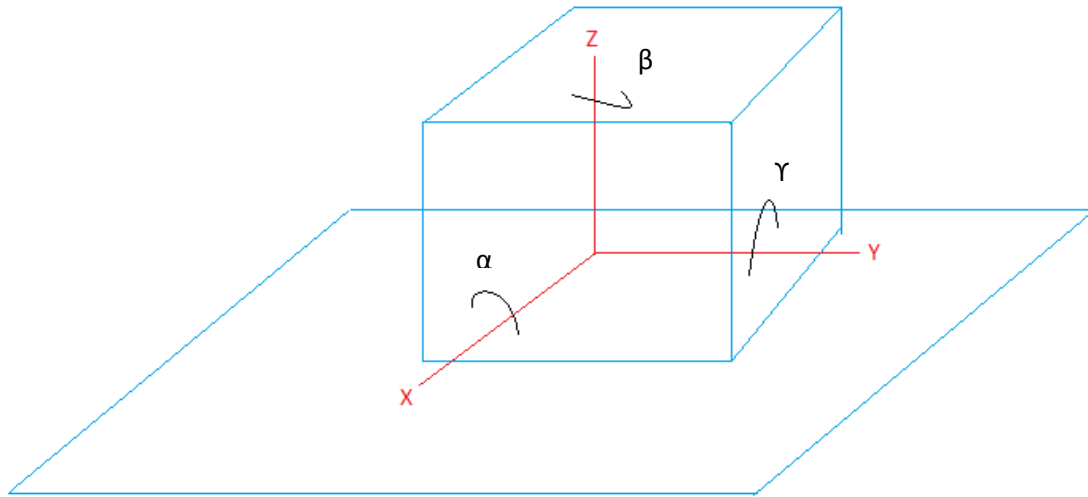
**a** es el lado de la plataforma superior que de la misma manera permite calcular **T1**, **T2**, **T3**.

Generalizando

$$T_i = \begin{bmatrix} T_{ix} \\ T_{iy} \\ T_{iz} \end{bmatrix}$$

$$i = 1, 2, 3$$

La plataforma tiene 6 grados de libertad que son:  $[x, y, z]$  de desplazamiento, y  $(\alpha, \beta, \gamma)$  de rotación como se muestra en la figura (21).



**Figura 21. Ángulos de rotación, y desplazamiento**

Los ángulos de rotación denotan la posición final del efector, pero no son los ángulos de Euler<sup>2</sup> comúnmente utilizados en robótica para la matriz de rotación en una relación de uno a uno, sino más bien, dado que es una cadena cinemática cerrada en algún momento un ángulo va a depender del otro obligando a utilizar unos ángulos de Euler que no giren normalmente con respecto a Z, si de no que gire con respecto a los dos ejes Z tanto de la plataforma inferior como superior.

De esta manera los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$  definen el (pitch, roll) cabeceo, balanceo, y el ángulo  $\gamma$  define el (yaw) o torsión.

Cabe recalcar que los valores que tomen cada ángulo no pueden sobredimensionar a la plataforma o se obtendrán valores imaginarios o erróneos.

De esta manera la matriz de posición y orientación queda de la siguiente manera:

$$X_0 = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$$

---

<sup>2</sup> Ángulos de Euler.- Constituyen un conjunto de tres coordenadas angulares que sirven para especificar la orientación de un sistema de referencia de ejes ortogonales, normalmente móvil, respecto a otro sistema de referencia de ejes ortogonales normalmente fijos [15]

Calcular la cinemática directa en una plataforma Stewart es muy compleja, ya que como se expuso anteriormente ángulos y valores de desplazamientos dependen el uno del otro en algún momento (Cadena cinemática cerrada); es por eso que en este proyecto solo se calculó la cinemática inversa dando puntos en el espacio para obtener los valores de los 6 actuadores.

La cinemática inversa se calcula mediante la Matriz de transformación Homogénea<sup>3</sup>, para ello primero se calcula la Matriz de rotación con los ángulos de Euler antes mencionados.

La siguiente figura muestra los Ángulos de Euler para la Plataforma Stewart.

$$\begin{aligned}
 R_{11} &= \cos \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \\
 R_{12} &= -\cos \beta \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \\
 R_{13} &= \cos \alpha \sin \beta \\
 R_{21} &= \cos \alpha \sin \gamma \\
 R_{22} &= \cos \alpha \cos \gamma \\
 R_{23} &= -\sin \alpha \\
 R_{31} &= -\sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma \\
 R_{32} &= \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma \\
 R_{33} &= \cos \alpha \cos \beta
 \end{aligned}$$

**Figura 22. Ángulos de Euler. [16]**

Con estos ángulos la Matriz de Rotación es la siguiente:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

---

<sup>3</sup> Matriz de transformación Homogénea.- Es una matriz de 4x4 que sirve para representar un sistemas de coordenado homogéneo en otro, ya sea desplazado, rotado o ambos.

La Matriz de Transformación Homogénea viene dada por:

$$T_H = \begin{bmatrix} R_{3*3} & P_{3*1} \\ f_{1*3} & w_{1*1} \end{bmatrix}$$

Dónde:

$R_{3*3}$ = Matriz de rotación

$P_{3*1}$ = Vector de translación  $[x \ y \ z]^T$

$f_{1*3}$ = Transformación de perspectiva, por lo general  $[0 \ 0 \ 0]$

$w_{1*1}$ = Escalamiento generalmente **1**

Entonces la TH sería:

$$T_H = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Obviamente esta Matriz de Transformación Homogénea está en función de los ángulos de rotación y translación de la plataforma móvil; así mismo, para obtener la nueva posición de la plataforma superior, solo hace falta relacionar los términos de la plataforma móvil con la inferior de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} T_{0ix} \\ T_{0iy} \\ T_{0iz} \\ 1 \end{bmatrix} = T_H * \begin{bmatrix} T_{ix} \\ T_{iy} \\ T_{iz} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$i = 1,2,3$$

Una vez que se obtienen los nuevos puntos rotados y trasladados de la plataforma móvil se pueden calcular las longitudes a las cuales deberían estar los eslabones para llegar a dicha posición.

Las longitudes de los 6 eslabones son las siguientes [14]:

$$L1 = \sqrt{\left(T_01x - \frac{d}{2 * \sqrt{3}} - \frac{b}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(T_01y - \frac{d}{2}\right)^2 + T_01z^2}$$

$$L2 = \sqrt{\left(T_01x - \frac{d}{2 * \sqrt{3}} + \frac{b}{2 * \sqrt{3}}\right)^2 + \left(T_01y - \frac{d}{2} - \frac{b}{2}\right)^2 + T_01z^2}$$

$$L3 = \sqrt{\left(T_02x + \frac{d}{\sqrt{3}} + \frac{b}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(T_02y - \frac{b}{2}\right)^2 + T_02z^2}$$

$$L4 = \sqrt{\left(T_02x + \frac{d}{\sqrt{3}} + \frac{b}{2 * \sqrt{3}}\right)^2 + \left(T_02y + \frac{b}{2}\right)^2 + T_02z^2}$$

$$L5 = \sqrt{\left(T_03x - \frac{d}{2 * \sqrt{3}} + \frac{b}{2 * \sqrt{3}}\right)^2 + \left(T_03y + \frac{d}{2} + \frac{b}{2}\right)^2 + T_03z^2}$$

$$L6 = \sqrt{\left(T_03x - \frac{d}{2 * \sqrt{3}} - \frac{b}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(T_03y + \frac{d}{2}\right)^2 + T_03z^2}$$

Con estas ecuaciones se obtiene la cinemática inversa.

Ahora solo queda relacionar las longitudes de los eslabones con el movimiento rotacional de los actuadores (servos), para ello se utilizó una relación lineal mediante una regla de 3 simple como se puede observar en al final del **Anexo 1** del código en Matlab.

También cabe recalcar que para los actuadores pares (2, 4, 6) el movimiento es tipo espejo con respecto a los actuadores (1, 2, 3) es por eso que se debe restar 180 grados menos el ángulo obtenido (**Anexo 1**).

### 2.3.3 Diseño Mecánico

El diseño mecánico es parte fundamental del modelado matemático, así como también para el armado de la estructura física de la plataforma. El diseño mecánico es realizado en el Software Autodesk de Inventor con la finalidad de obtener los planos y dimensiones de la plataforma.

### 2.3.3.1 Diseño de la Base

La base de la plataforma se realizó en madera por su bajo peso y durabilidad, en este punto se debe tomar en cuenta las coordenadas para las bases de los actuadores como se observó en la **figura 20** donde  $b=25\text{cm}$  y  $d=11\text{cm}$ .

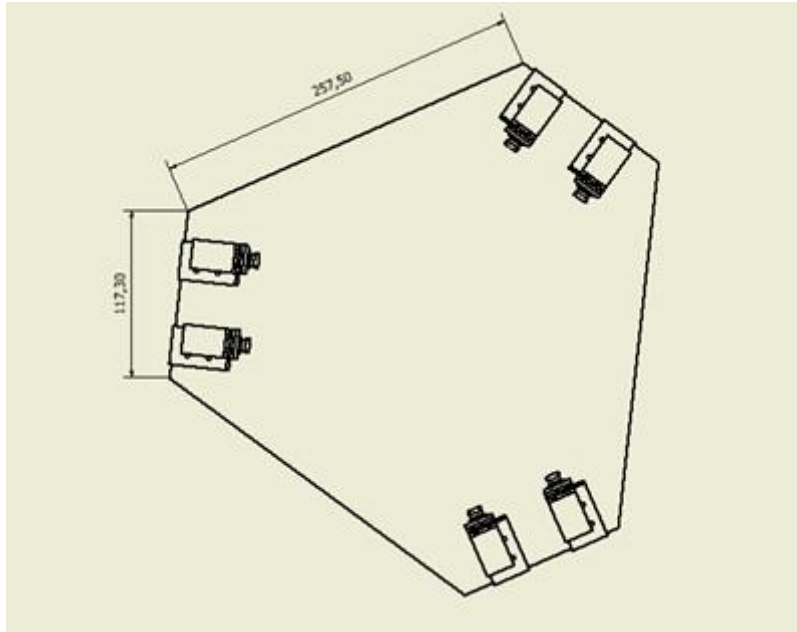


Figura 23. Diseño de la base

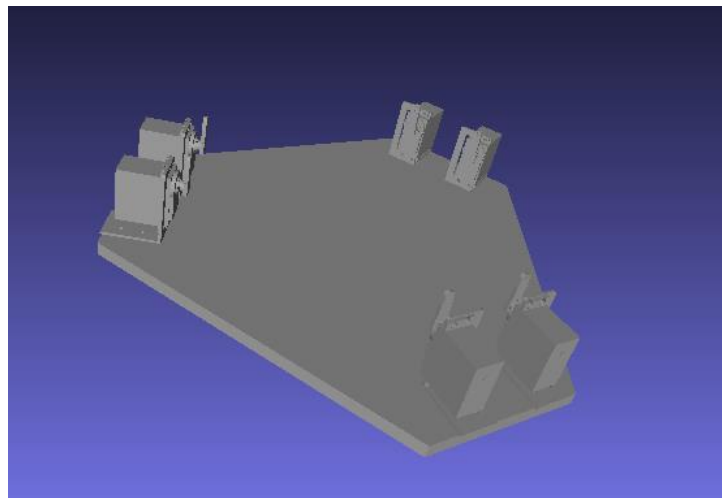


Figura 24. Modelo 3D de la base





### 2.3.3.3 Diseño de los eslabones

Los eslabones utilizados son Muelles Hidráulicos<sup>4</sup>, esto muelles fueron usados no por sus propiedades de deformarse, si no por sus articulaciones esféricas en los extremos que permiten a la plataforma tomar posiciones que de otra manera sería imposible.

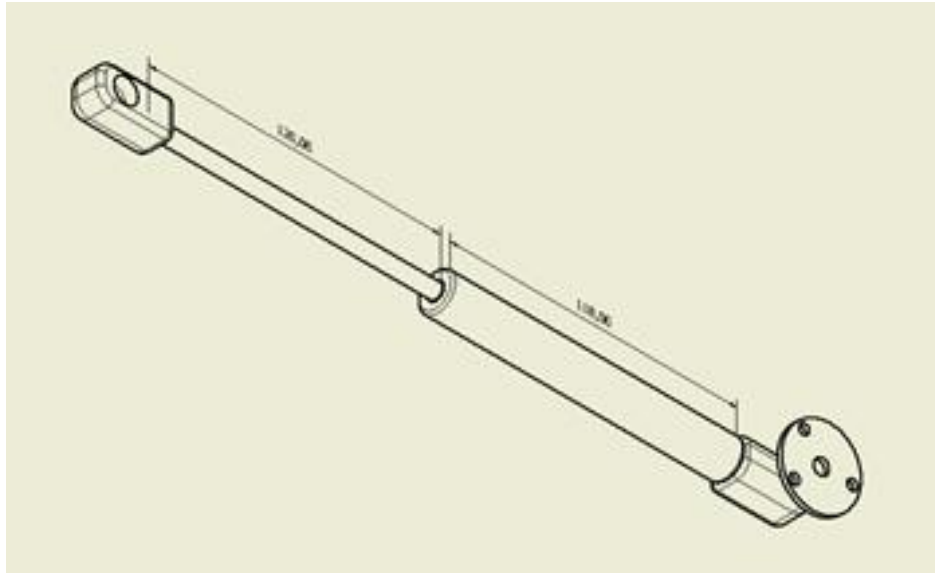


Figura 27. Diseño del eslabón



Figura 28. Diseño 3d del eslabón

---

<sup>4</sup> Muelles Hidráulicos.- Elemento mecánico que puede deformarse de manera no permanente absorbiendo energía elástica, para después restituirla, total o parcialmente, en función de su característica de amortiguamiento. [17]

#### 2.3.3.4 Diseño de las Articulaciones

Las articulaciones son del tipo esféricas permitiendo a la plataforma moverse en cualquier dirección posible.

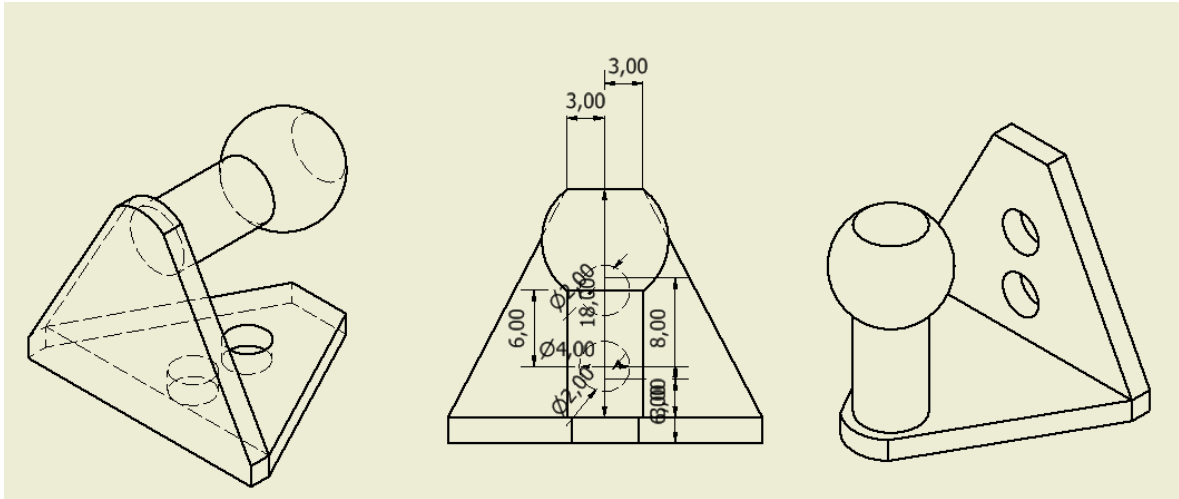


Figura 29. Diseño de la Articulación

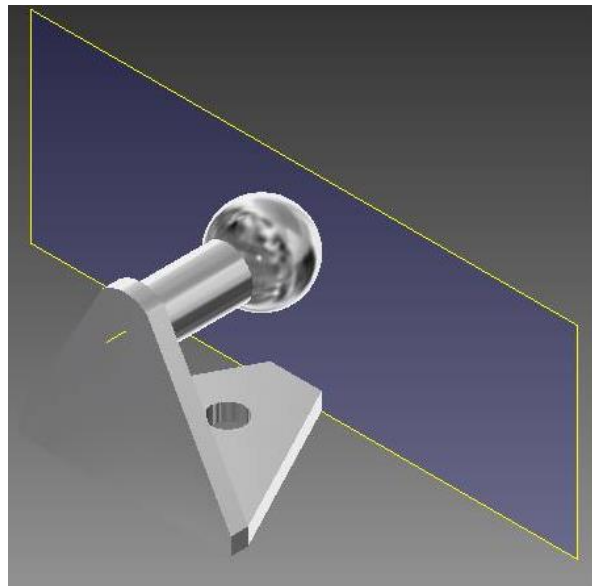
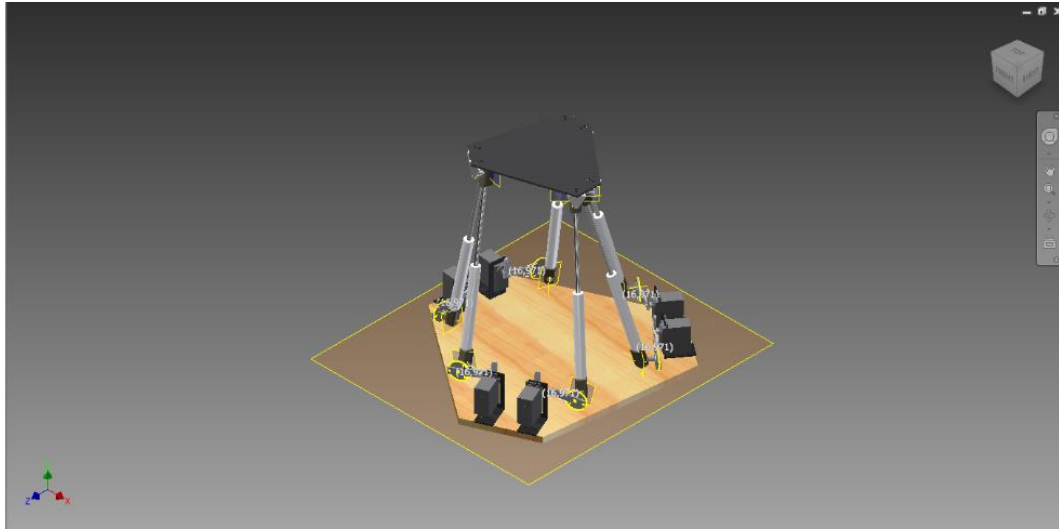


Figura 30. Diseño 3d de la Articulación

También la plataforma está conformada por piezas más pequeñas como el servomotor con sus extensiones y soportes que en conjunto forman la plataforma Stewart.



**Figura 31. Diseño mecánico de la Plataforma Stewart en 3D realizado en Autodesk Inventor.**

### **2.3.4 Diseño Electrónico**

El diseño electrónico consta de una tarjeta electrónica FPGA y una fuente de alimentación de 5 voltios.

Se utilizan las salidas digitales del Fpga para variar la frecuencia y así controlar las posiciones de cada servomotor (actuador).

Todo el control para generar las frecuencias esta realizado en el software de Labview tomando como referencia el datasheet de la Xilinx[ 18].

### **2.3.5 Software de Simulación**

El software para la simulación del modelo 3d de la plataforma se realizó en Simulink<sup>5</sup> de Matlab.

---

<sup>5</sup> **Simulink.**- Es un entorno para simulación multidominio y diseño basado en modelos para sistemas dinámicos y embebidos. Proporciona un entorno grafico interactivo y un conjunto de bibliotecas que permite diseñar, simular e implementar variables en el tiempo de un sistema incluidas el procesamiento de señales, control, comunicaciones, procesamiento de video entre otras .[6]

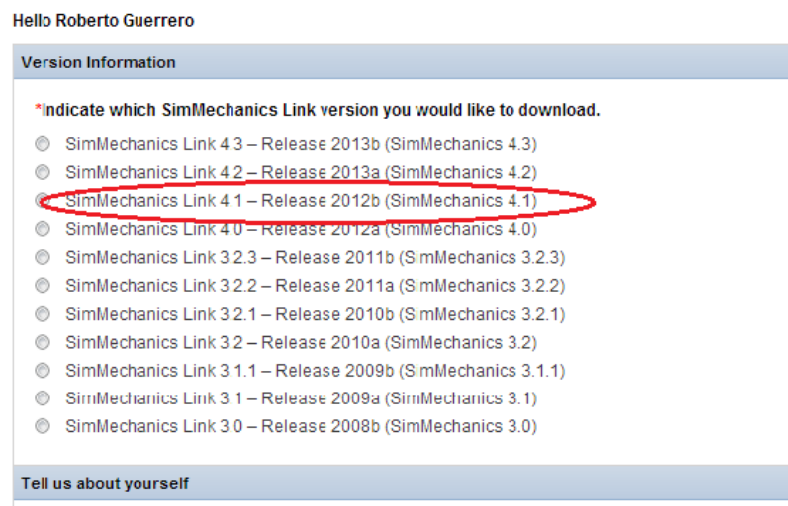
### 2.3.5.1 Conexión entre Inventor y Simulink

Para poder exportar un modelo 3d desde Inventor a Simulink es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Identificar las versiones del *software* con los que se dispone, tanto del Matlab como del Inventor.
2. Una vez identificado los software es necesario descargar un traductor entre estos dos programas; el mismo que se encuentra en la página de Internet de Mathworks :

[https://www.mathworks.com/products/simmechanics/download\\_smlink.html](https://www.mathworks.com/products/simmechanics/download_smlink.html)

En este caso en específico se utilizó la versión SimMechanics link 4.1



**Figura 32. SimMechanics Link**

3. Los 2 Archivos que se descargan (install\_addon.m y el smlink.r2012b.win32) se copian en la carpeta de Matlab en mis documentos.
4. **Abrir como Administrador el Matlab** para permitir que se hagan cambios al sistema.
5. En la ventana de código ingresar “addon\_install(‘ **la ubicación donde se encuentran los archivos.zip**’)
6. Para verificar que el enlace entre Inventor y Matlab se haya realizado correctamente se ingresa el código: “smlink\_linkinv”.
7. Para finalizar se abre un archivo de ensamble en Inventor y se comprueba la conexión como se muestra en la figura 31.

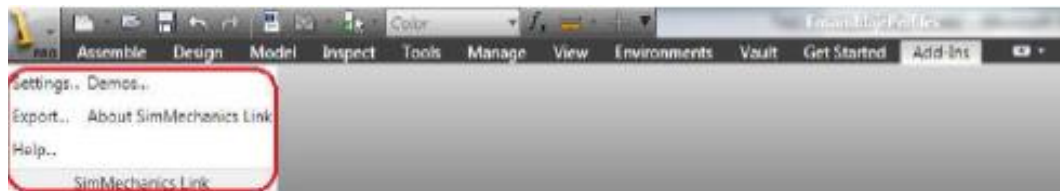


Figura 33. SimMechanics Link en Inventor.

### 2.3.5.2 Exportación del modelo desde Inventor a Simulink

Una vez que se haya realizado correctamente la conexión entre Inventor Y Matlab, el siguiente paso lógico sería realizar la exportación del modelo 3d; para eso es necesario seguir los pasos que se detallan a continuación.

1. Comprobar que el Robot se encuentre en la posición inicial cero y que las restricciones estén de acuerdo a lo requerido.
2. A continuación se guarda una copia del modelo y sus partes ensambladas en el formato .STL para que SimMechanics pueda interpretarlos y usar dentro de la simulación.
3. Ahora bien, una vez guardada la copia del archivo en formato .STL se debe exportar el modelo, para eso vamos al menú de SimMechanics y seleccionamos la opción **Export** ; si no hay problemas aparecerá un mensaje afirmando la exportación y se guardara una copia del archivo en formato .XML
4. Abrir Matlab y en la ventana de programación introducir el siguiente comando”  
`mech_import( 'dirección donde se encuentra el archivo .XML.xml')`”entonces aparecerá una ventana como la siguiente:

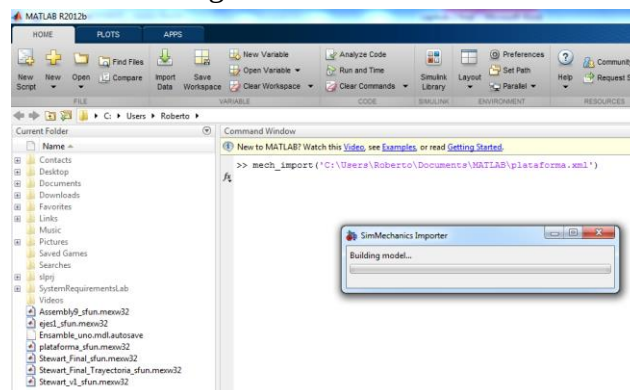
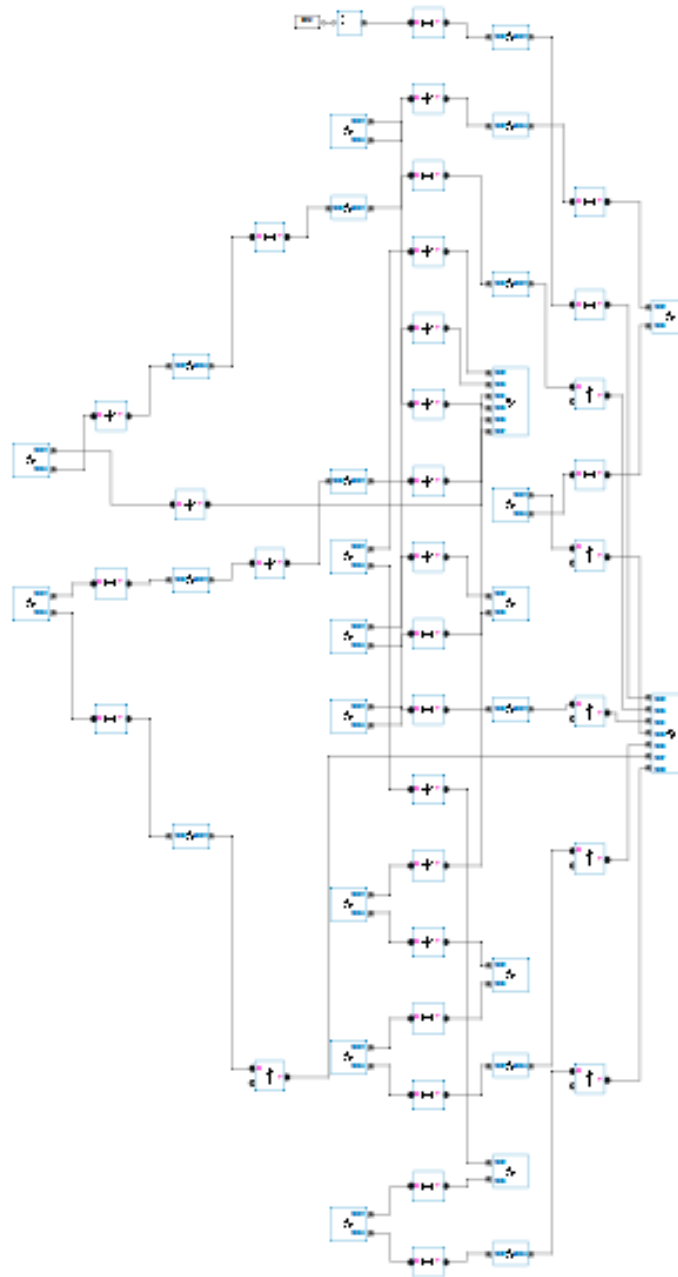


Figura 34. Importar archivos .XML en Matlab

**Cabe recalcar que todos los archivos .STL Y .XML deben estar dentro de la carpeta MATLAB en mis documentos**

5. Si la importación es correcta aparecerá el diagrama de bloques correspondiente al modelo 3d realizado en Inventor, en este caso es el siguiente:



**Figura 35. Diagrama de bloques de la Plataforma**

Una vez generado el diagrama de bloques se puede observar que contiene diferentes tipos de bloques los cuales se describen a continuación:

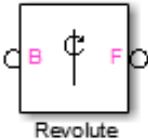
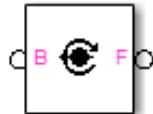
| BLOQUE                                                                             | DESCRIPCION                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>BODY.-</b> Es la representación en bloques de un cuerpo o elemento sólido                                                                                          |
|   | <b>REVOLUTE.-</b> Es una junta de revolución entre dos pares geométricos. En este bloque se pueden definir el ángulo de giro, velocidad angular y aceleración angular |
|   | <b>WELD.-</b> O soldadura define una unión entre dos cuerpos con cero grados de libertad                                                                              |
|  | <b>SPHERICAL.-</b> Define la unión entre dos cuerpos con tres grados de libertad                                                                                      |

Tabla 2. Descripción de los Bloques existentes en el Diagrama de Bloques

- Como último paso se guarda el archivo en formato .MDL que es el formato de Simulink.

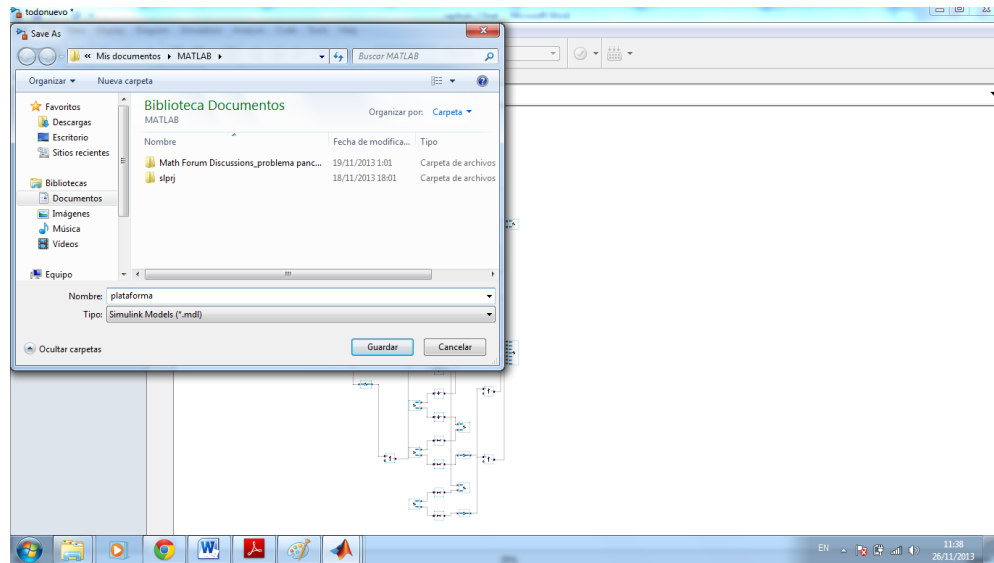


Figura 36. Guardar Archivo .MDL Simulink

### 2.3.5.3 Diseño del Software de Simulación

Para poder realizar la simulación del Modelo 3d en Simulink es necesario conocer algunas herramientas o bloques necesarios para lograrlo.

En la siguiente tabla se especifican cada una de ellas:

| Bloque                                                                                          | Descripción                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Constant | <b>Constant.-</b> Genera un valor constante real o imaginario.                                                                                                                 |
|              | <b>Slider Gain.-</b> Se usa para variar una ganancia escalar utilizando un deslizador.<br> |



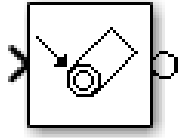
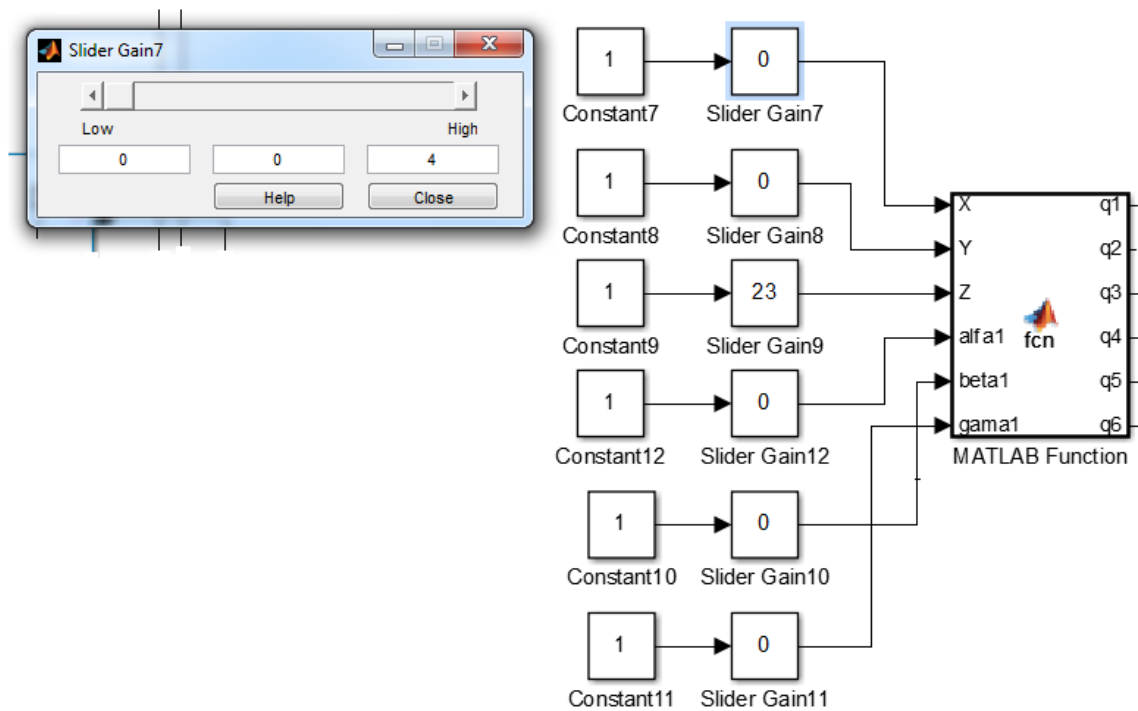
|                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Description</b></p>  <p>MATLAB Function</p> | <p><b>MATLAB Function.-</b> Este bloque de programación permite correr programas embebidos de Matlab en Simulink para la simulación de Modelos.</p> <p><b>Function</b>[y1,y2,...,yn]=fcn(u1,u2,...,un)</p> |
|                                                   | <p><b>Display.-</b> Permite Visualizar los datos</p>                                                                                                                                                       |
|                                                   | <p><b>Derivative.-</b> Encuentra la derivada de una función u respecto al Tiempo t</p> $\frac{du}{dt},$                                                                                                    |
|                                                   | <p><b>Mux.-</b> Combina varios datos de entrada en un solo vector de salida.</p>                                                                                                                           |
|  <p>Joint Actuator</p>                           | <p><b>Join Actuator.-</b> Aplica Fuerza o movimiento a una junta primitiva del robot variando parámetros como el ángulo, velocidad angular y aceleración angular.</p>                                      |

Tabla 3. Parámetros de simulación

Ahora bien, una vez que se tiene claro las funciones de cada uno de los Bloques a utilizar, con la ayuda de Simulink realizamos la programación de la simulación en forma gráfica.

Lo primero que se necesita simular es el valor de cada uno de los 6 servomotores (**Revolute**) para que la plataforma llegue a la posición deseada; para esto utilizamos el Bloque **Matlab Function** en donde copiamos el código correspondiente a la cinemática inversa previamente obtenida en Matlab [**anexo 1**].



**Figura 37. Matlab Funtion en Simulink**

Se utiliza 6 Slider Gain para Variar los parámetros de entrada (X, Y, Z, ALFA, BETA, GAMA); y de esta manera obtener la posición de los ángulos (q1, q2, q3, q4, q5, q6) para posicionar la plataforma.

Con los valores de los ángulos calculados el siguiente paso obvio es enviarlos a los diferentes servomotores, para eso es necesario utilizar el bloque **Join Actuator**; este Bloque requiere de tres parámetros para su funcionamiento (ángulo de rotación (q), velocidad angular y aceleración angular) para lo cual es necesario derivar en el caso de la velocidad angular el ángulo q1, y en el caso de la aceleración angular derivar dos veces q1, como se muestra a continuación:

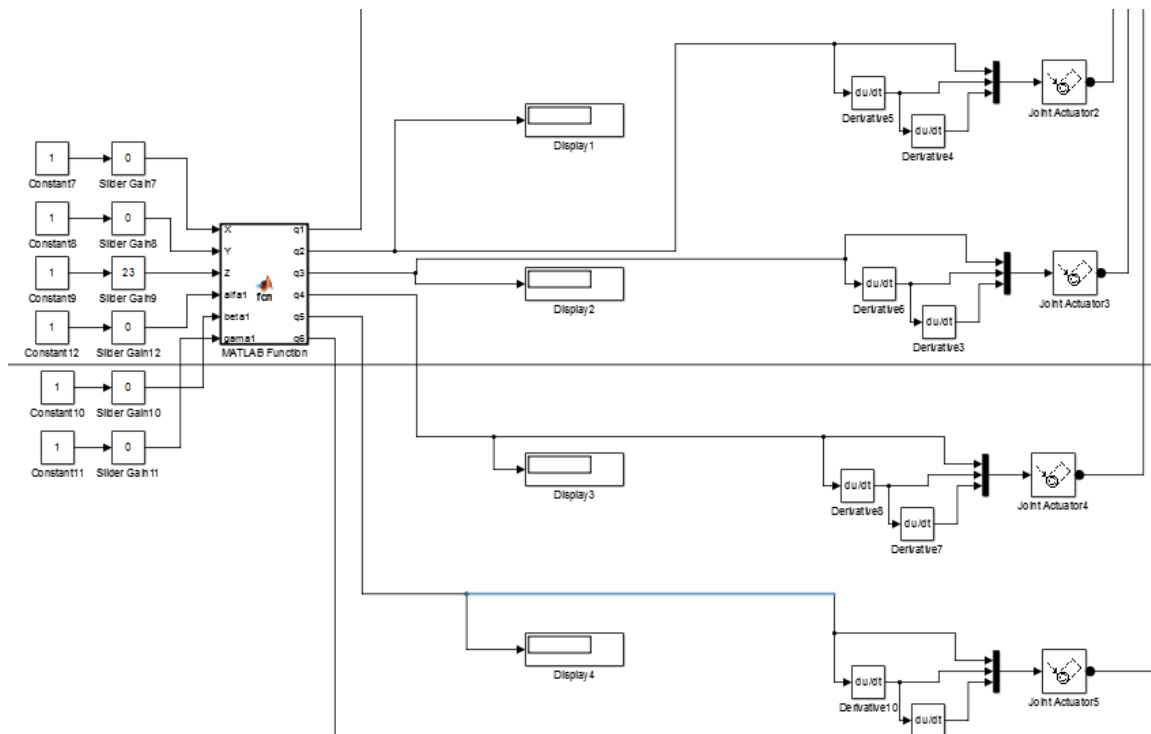


Figura 38. Actuadores de la Plataforma

Los datos de Salida de los Bloques **Joint Actuator** se envían a los 6 **Revolute** que representan a los servomotores en el diagrama.

Una vez ordenado todos los bloques el programa para la simulación es el siguiente:

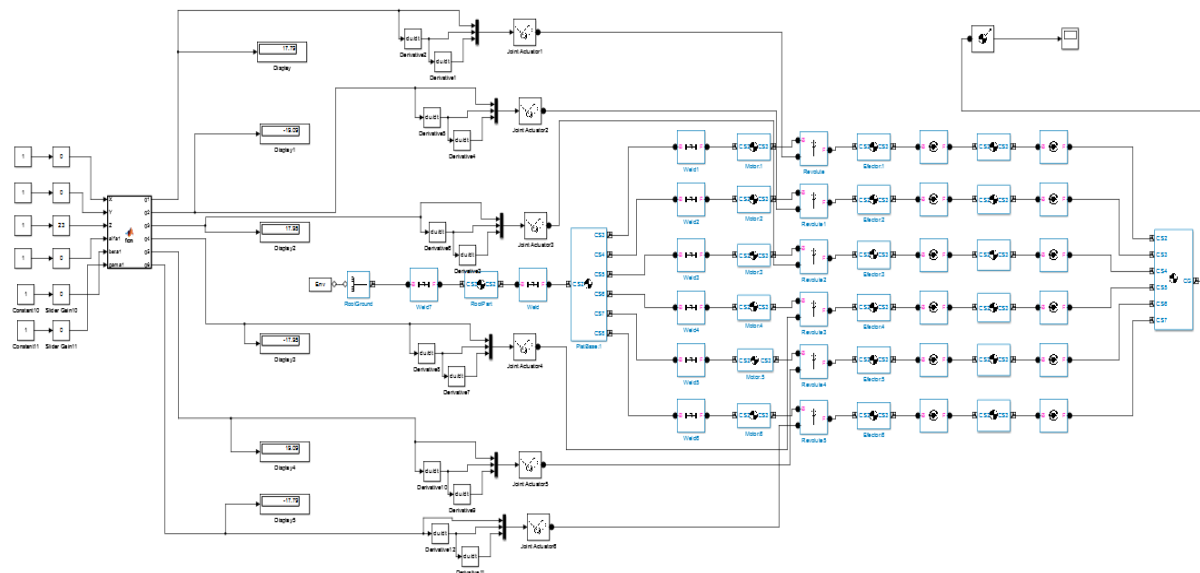


Figura 39. Diagrama de Bloques para la simulación de la Plataforma

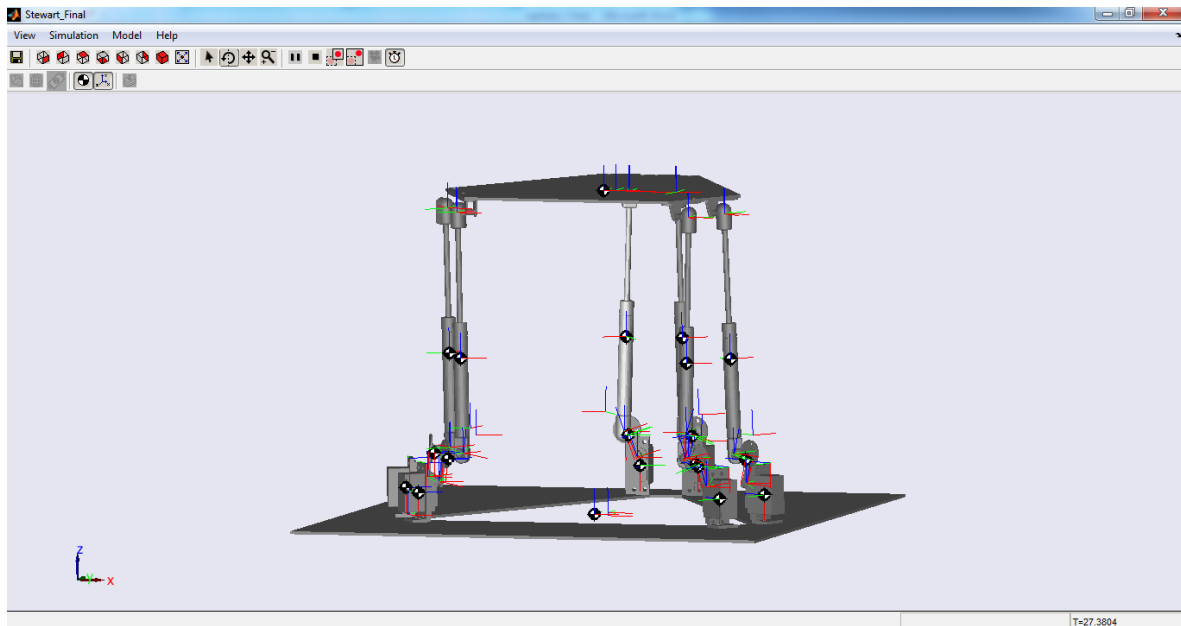


Figura 40. Plataforma Simuladora de Vuelo en Simulink

#### 2.3.5.4 Simulación de los ángulos de rotación y de desplazamiento.

Para la Simulación de la posición de la Plataforma utilizamos el sistema embebido (**Matlab Function**) y con la ayuda de los **Slider Gain** variamos x, y, z, alfa, beta, gama para obtener la posición deseada.

##### 2.3.5.4.1 Simulación de Desplazamiento en el eje X

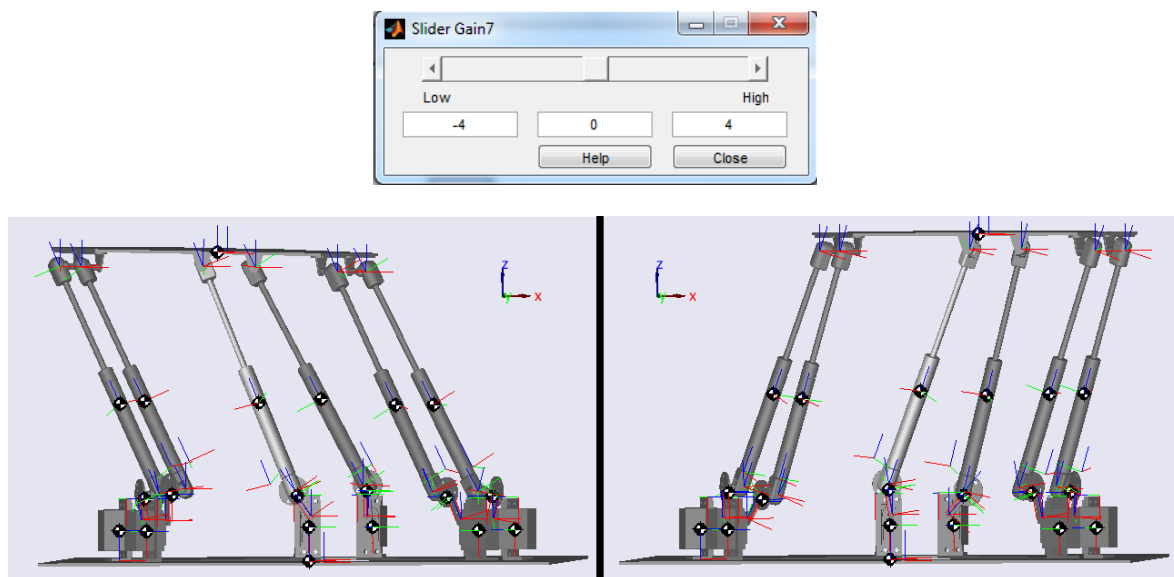


Figura 41. Simulación del Desplazamiento de la Plataforma en el eje x

#### 2.3.5.4.2 Simulación de Desplazamiento en el eje Y

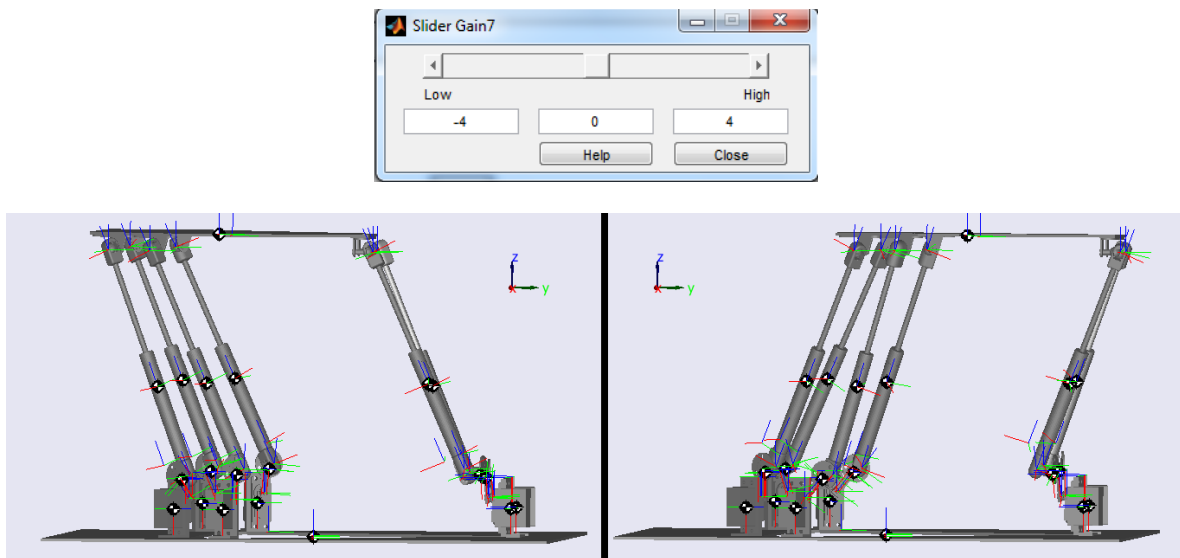


Figura 42. Simulación del Desplazamiento de la Plataforma en el eje y

#### 2.3.5.4.3 Simulación de Desplazamiento en el eje Z

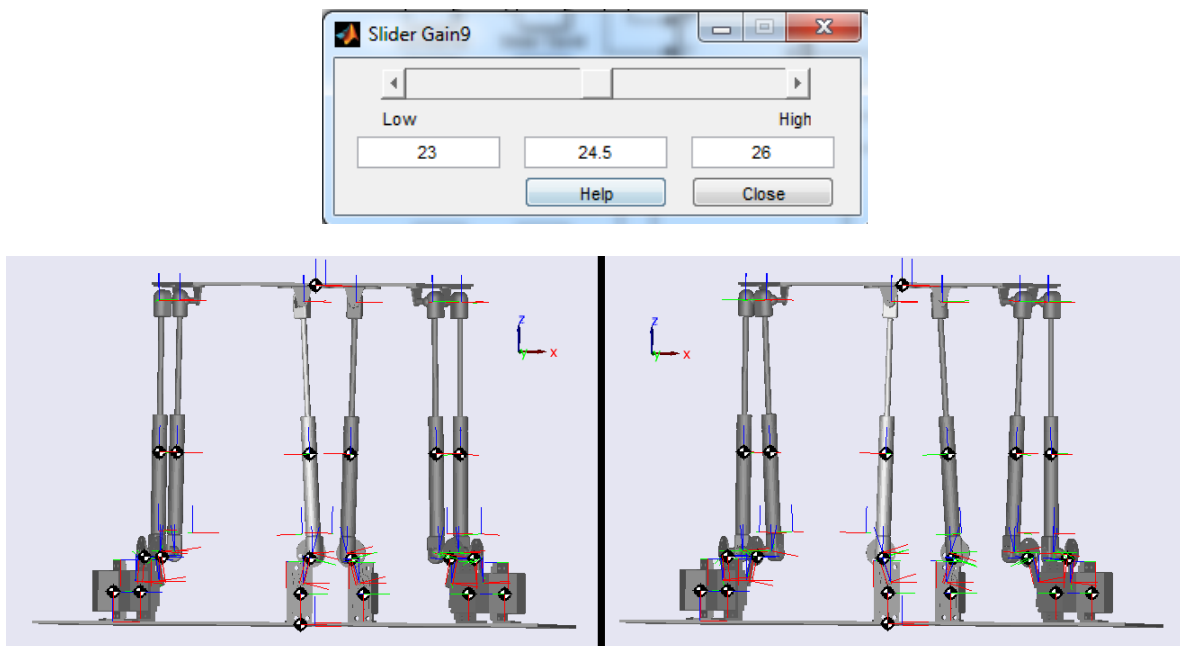


Figura 43. Simulación del Desplazamiento de la Plataforma en el eje z

#### 2.3.5.4.4 Simulación de Rotación en el ángulo Alfa

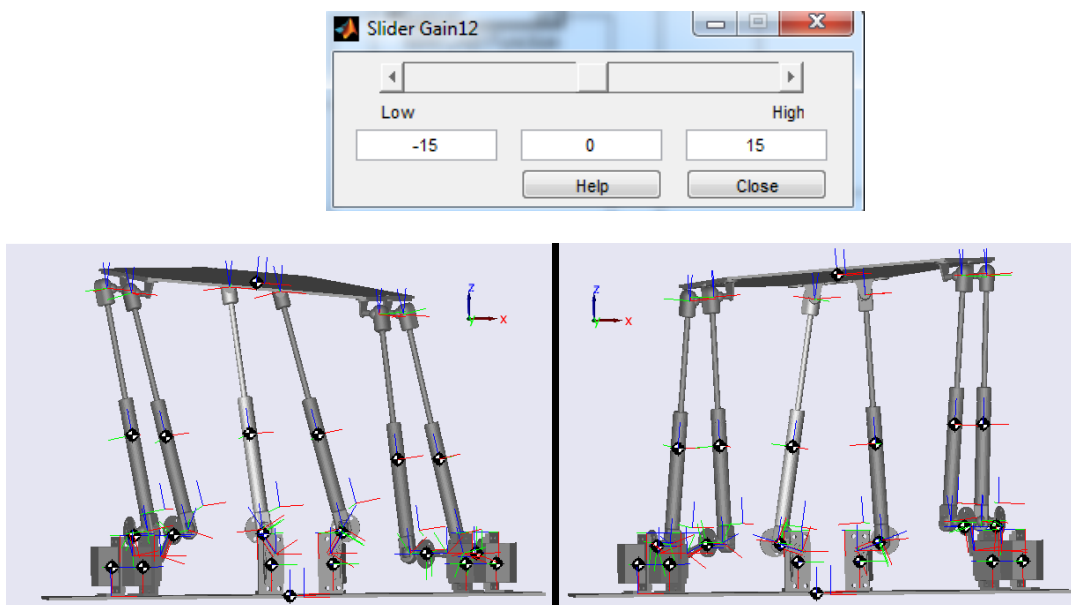


Figura 44. Simulación del Rotación de la Plataforma en el ángulo Alfa

#### 2.3.5.4.5 Simulación de Rotación en el ángulo Beta

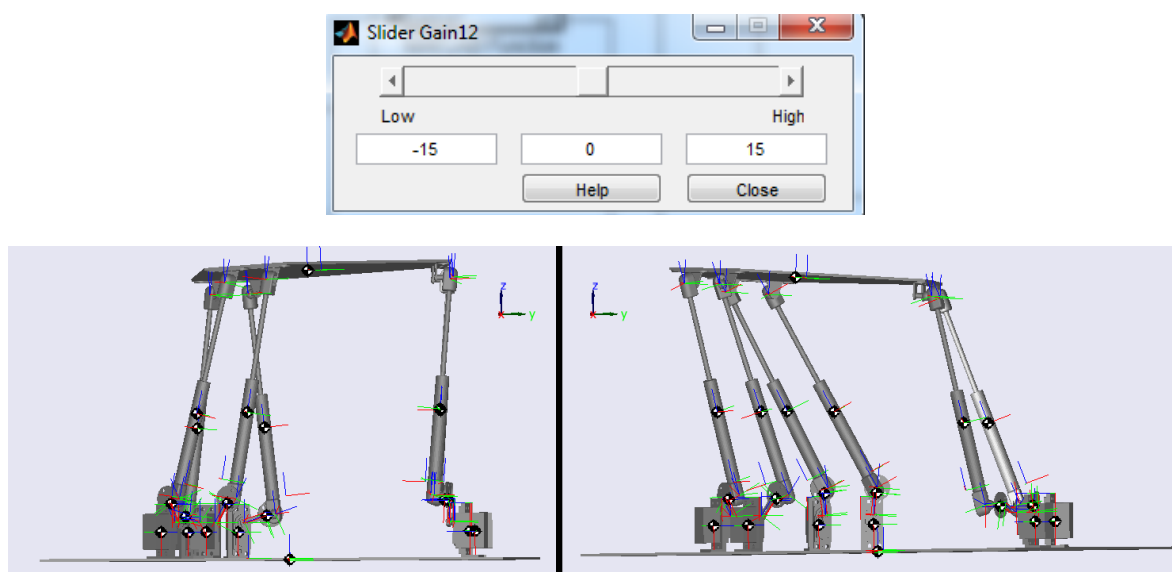


Figura 45. Simulación de Rotación de la Plataforma en el ángulo Beta

#### 2.3.5.4.6 Simulación de Rotación en el ángulo Gama

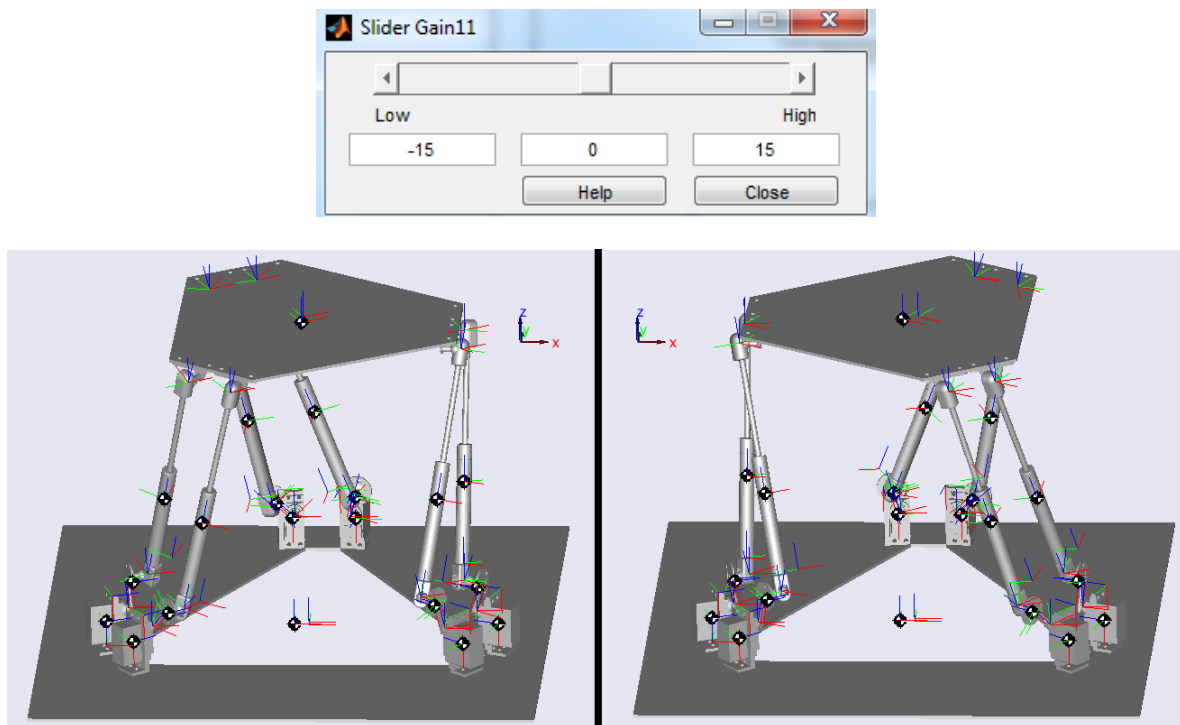


Figura 46. Simulación de Rotación de la Plataforma en el ángulo Gama

# CAPITULO 3

## Software de Control de la Plataforma Simulador de Vuelo y el Vehículo Aéreo no Tripulado

### 3.1 Instalación de dispositivos e Interface con el software de control

Para el control por gestos de la plataforma simuladora de vuelo y el Vehículo Aéreo no tripulado se necesita un sin número de programas y Toolkits<sup>6</sup> para su correcto funcionamiento.

A continuación se detalla cada uno de ellos, y como se realiza su instalación paso a paso.

#### 3.1.1 Leap Motion Controller Toolkit

Como se pudo observar en el Capítulo 1, Leap Motion es un dispositivo que nos permite realizar un escaneo 3d de la mano e interpretar los datos en el computador; para lograr que funciones es necesario instalar **Leap Motion Controller Toolkit**.

Los pasos a seguir son los que se detallan a continuación:

##### 3.1.1.1 Descargar el driver para el Leap Motion

Este driver se encuentra en la misma página de la empresa <https://www.leapmotion.com/setup>; elegimos la versión de Windows en este caso.

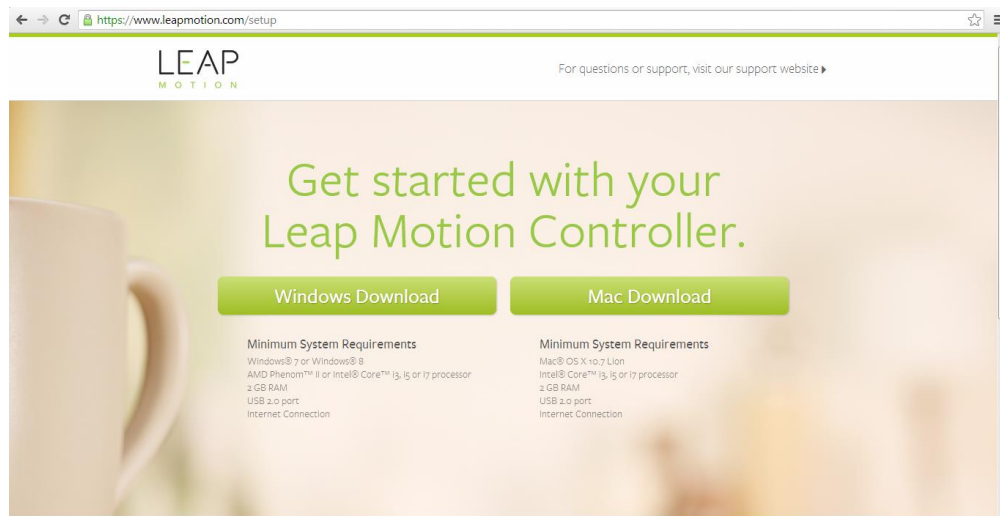


Figura 47. Página para descargar el driver

<sup>6</sup> Toolkits.- Herramientas de Labview para el control de dispositivos



### 3.1.1.2 Instalar el driver

Instalar el driver con las características específicas de nuestro ordenador, el asistente guiará a lo largo del proceso



Figura 48. Asistente para instalar el driver

### 3.1.1.3 Comprobar funcionamiento

Abrir la aplicación de Orientación que viene por defecto en el Airspace<sup>7</sup>; si todo está bien se visualizará las manos en el ordenador acorde a la aplicación.

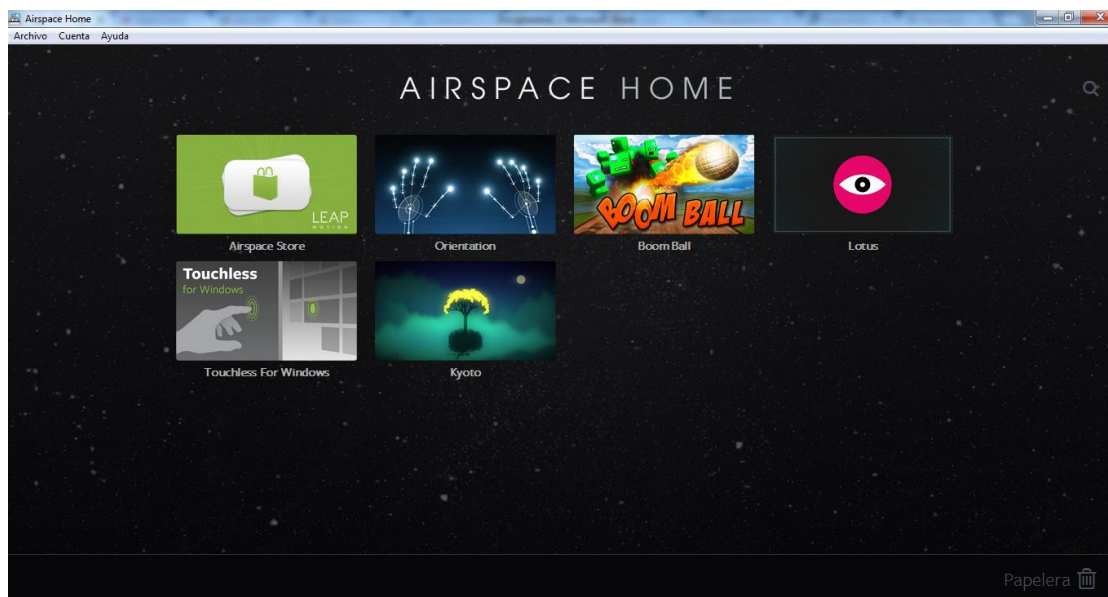


Figura 49. Home de Airspace

<sup>7</sup> **Airspace.-** Tienda de aplicaciones de Leap Motion

### 3.1.1.4 Descargar e Instalar Vi Package Manager<sup>8</sup>

El Vi Package manager se descarga de la siguiente página: <http://jki.net/vipm/download>, una vez descargado el archivo se procede a la instalación del mismo

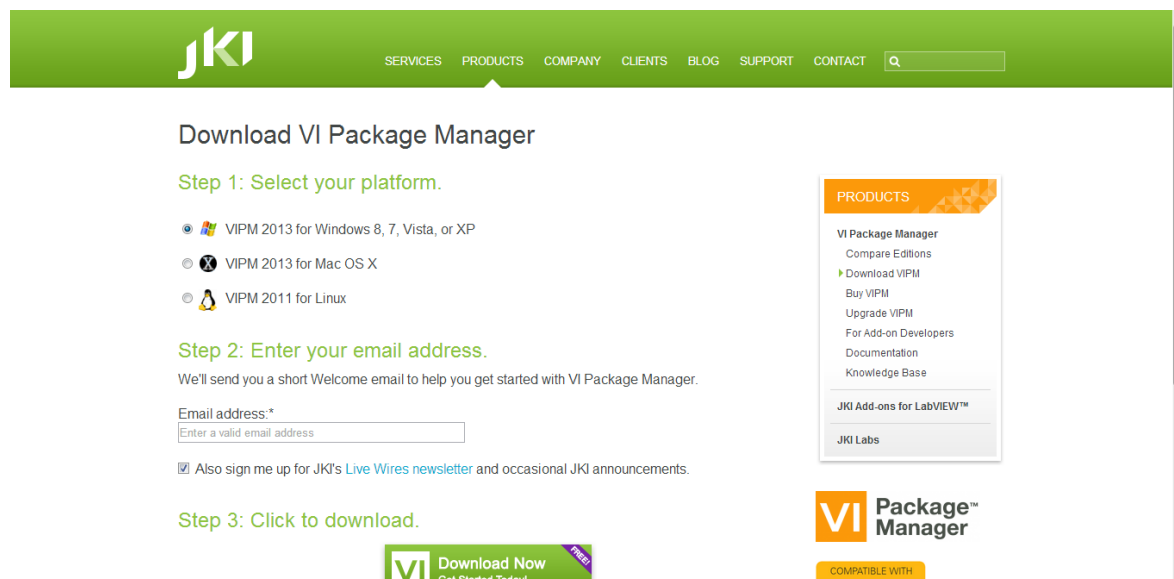


Figura 50. Página para descargar el Vi Package Manager

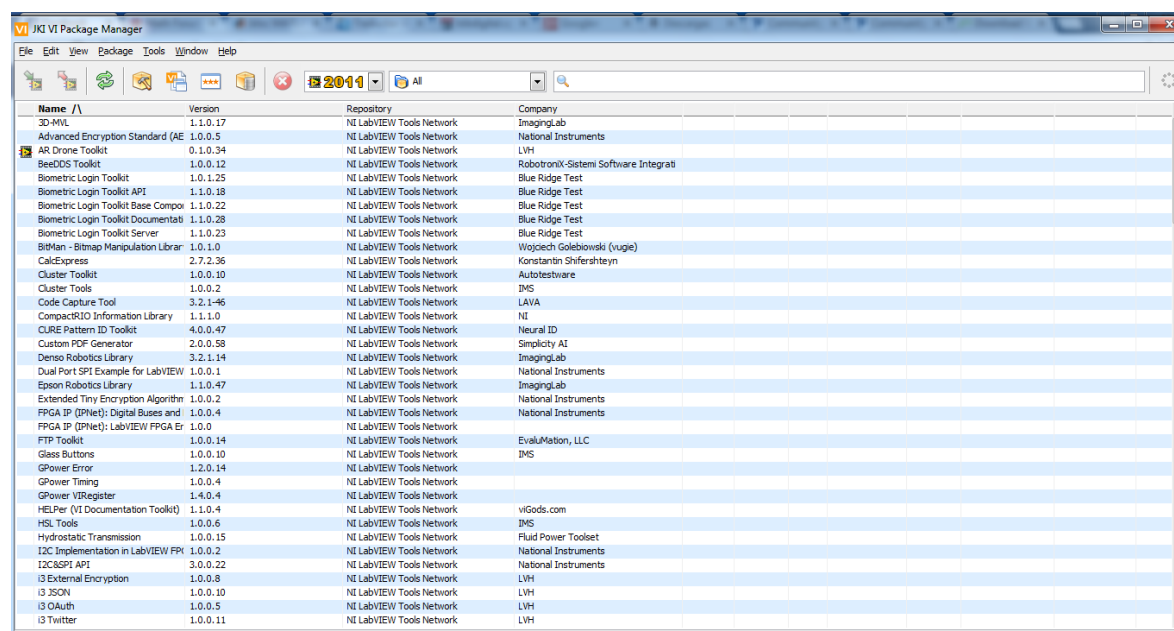


Figura 51. Vi Package Manager

<sup>8</sup> Vi package manager.- Es un programa administrador de Toolkits para Labview

### 3.1.1.5 Instalar el Toolkit de Leap Motion

En este paso seleccionamos la versión de Labview que tenemos y buscamos dentro del directorio el **Leap Motion Controller Toolkit**.

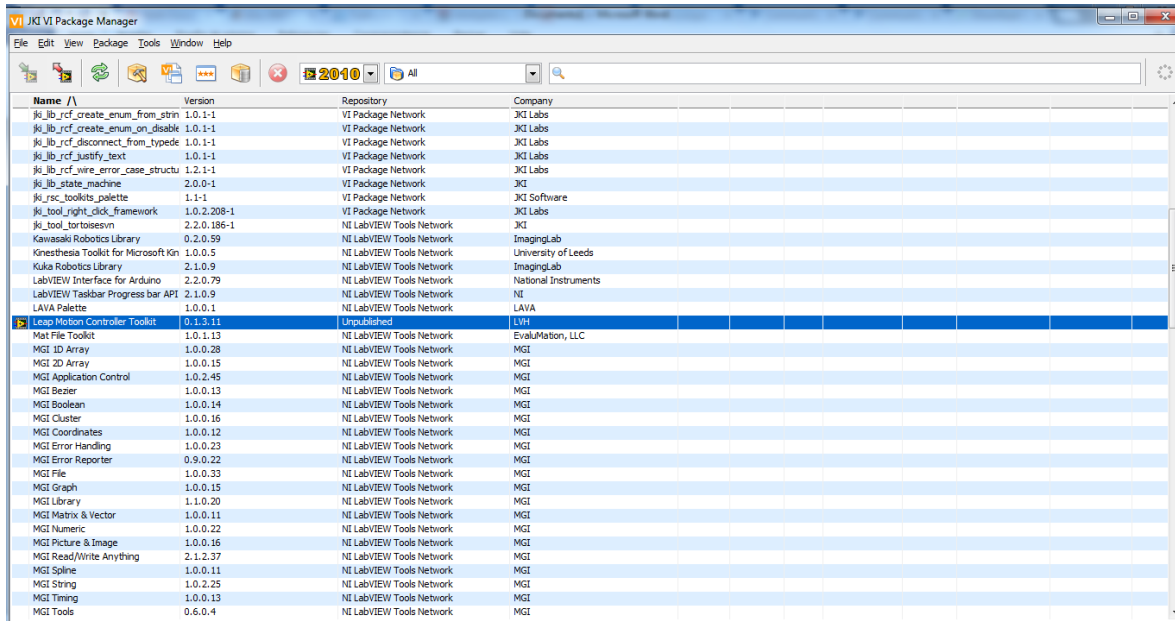


Figura 52. Leap Motion Controller Toolkit

A continuación se da doble click sobre el mismo para proceder a la instalación. Una vez terminado el proceso aparecerá la siguiente ventana, en donde se puede ejecutar ejemplos para comprender las funciones del Toolkit.

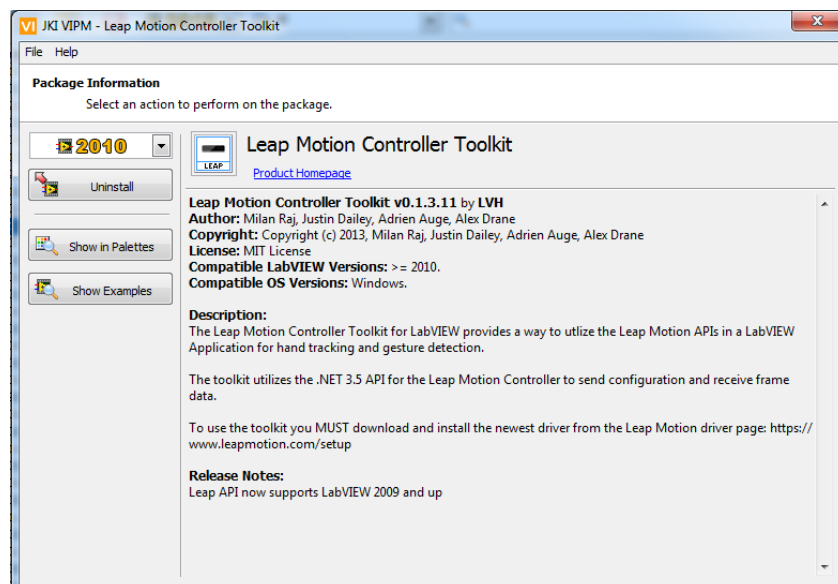


Figura 53. Leap Motion Controller Toolkit Instalado

### 3.1.1.6 Verificar Instalación

Para verificar la instalación es necesario abrir Labview y constatar que el Toolkit se encuentre disponible en las herramientas como se muestra en la figura ().

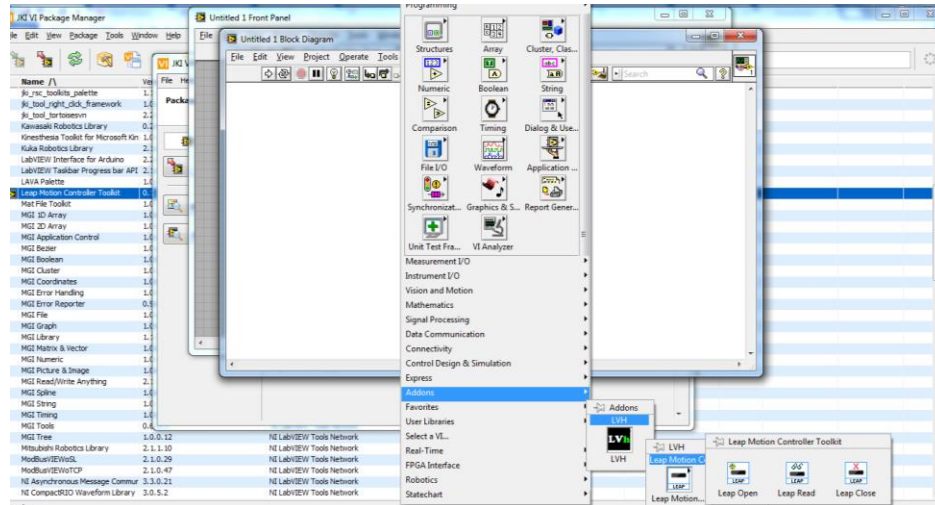


Figura 54. Ubicación del Leap Motion Controller toolkit en Labview

### 3.1.2 FPGA Spartan 3E started Kit

El FPGA es el que controla los servomotores en la plataforma y para instalarlo hay que seguir detalladamente las siguientes instrucciones:

#### 3.1.2.1 Instalador FPGA

El driver para poder utilizar el FPGA Spartan 3E Started Kit solo funciona con Labview 2010 o menores; el mismo se encuentra en el cd de respaldo para este proyecto de tesis.



Figura 55. Asistente para Instalar el Driver del FPG Spartan 3E

### 3.1.2.2 Verificar Instalación del driver para el FPGA

Si el driver de esta bien instalado el asistente para la instalación de nuevos dispositivos periféricos de Windows no debería dar ningún problema como se observa en la figura ().

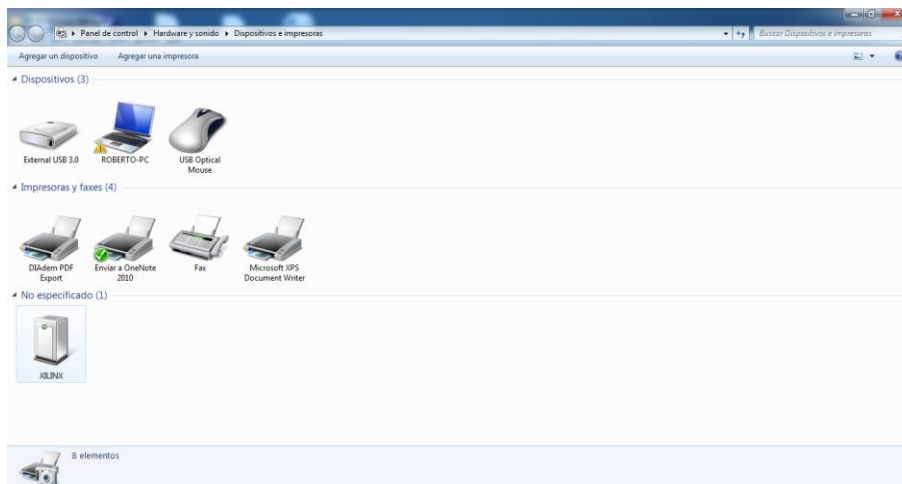


Figura 56. Dispositivo Xilinx instalado (Fpga)

### 3.1.2.3 Conectar con Labview

Para conectar el Fpga con labview es necesario crear un nuevo proyecto, como se observa en la figura 56

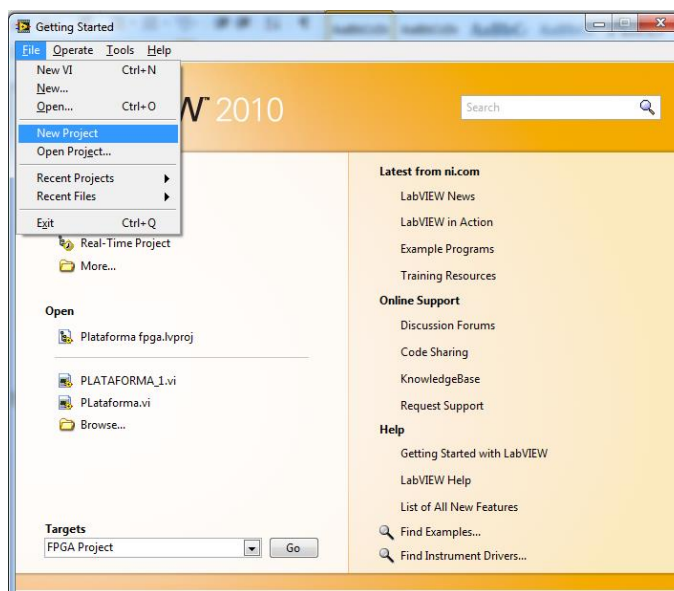
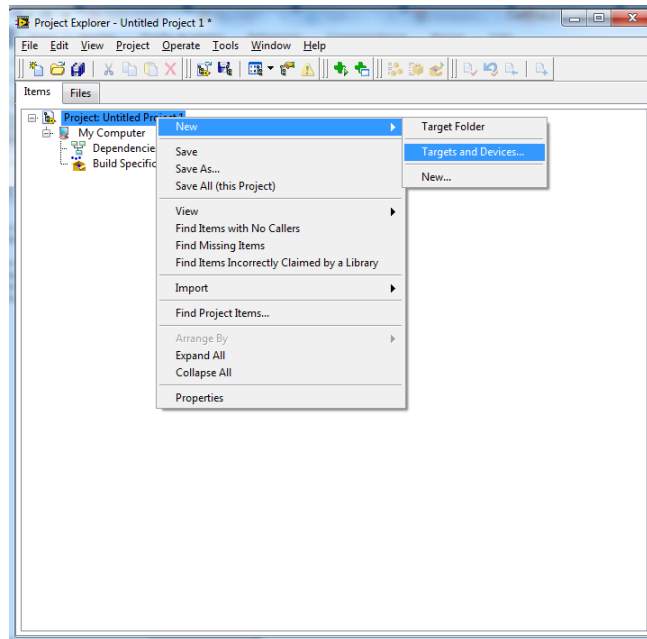


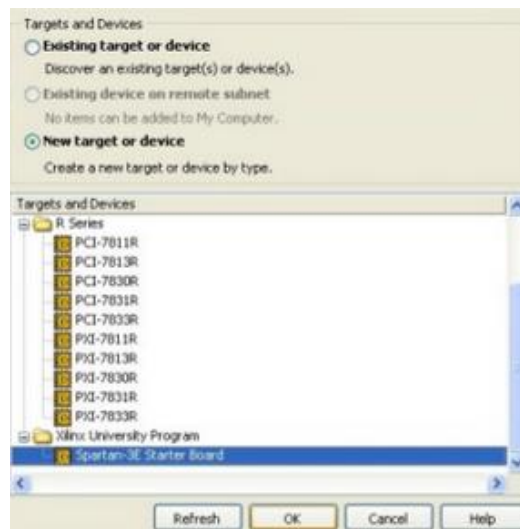
Figura 57. Crear Nuevo Proyecto Labview

Para importar el FPGA damos click derecho sobre el proyecto y seleccionamos New Targets and Devices como se observa en la figura 58



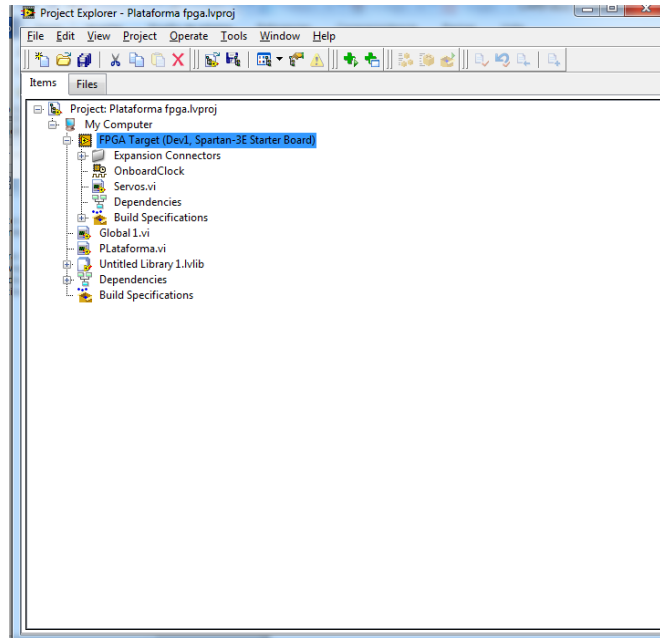
**Figura 58. Nueva tarjeta o dispositivo**

Se selecciona la opción de New Target or Devices y seguido con doble click sobre el Fpga.



**Figura 59. Nuevo Fpga**

Una vez seleccionado el Fpga este se carga directamente a nuestro proyecto.



**Figura 60. FPGA conectado a Labview y Cargado al Proyecto**

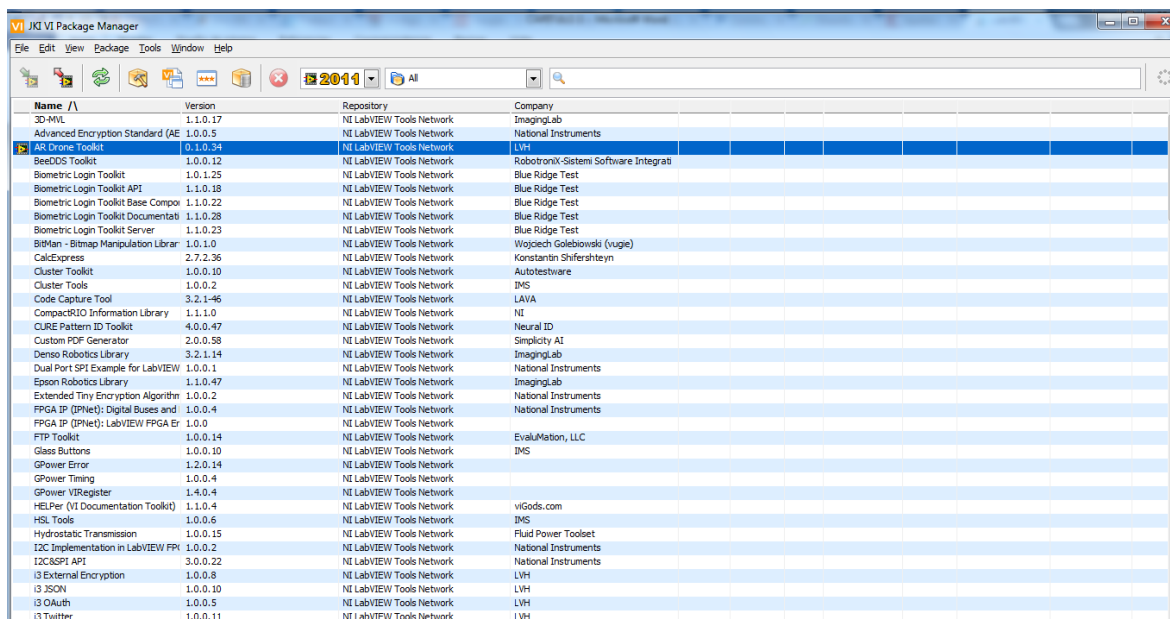
### **3.1.3 Ar Drone Toolkit**

El software para conectar al computador con el vehículo aéreo no tripulado es Labview; este software si bien posee herramientas para controlar la tarjeta Wifi del computador, carece de implementos para poder manejar a voluntad el Drone, es por eso necesario instalar el AR DRONE TOOLKIT, el mismo que además de conectar al Drone con el computador permite interpretar los datos que este recoge del entorno como son: Altura, Velocidad, Presión, Tiempo de vuelo etc. Necesarios para la navegación

A continuación se detallan los pasos para la instalación

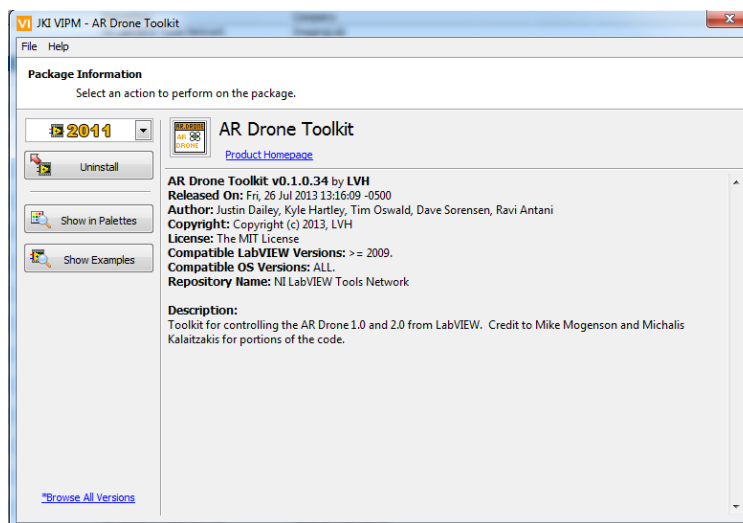
#### **3.1.3.1 Descarga e Instalación**

Al igual que en el Toolkit anterior del Leap Motion; para poder descargar el Ar Drone Toolkit es necesario utilizar el Vi Package Manager. En este caso seleccionamos nuestra versión de Labview y buscamos dentro del directorio el **AR DRONE TOOLKIT**.



**Figura 61. Ar Drone Toolkit Vi Package Manager**

Una vez instalado aparecerá la siguiente ventana **figura 62**, en la que se podrá ejecutar algunos ejemplos de la herramienta adquirida.



**Figura 62. Ar Drone Toolkit Instalado**

### 3.1.3.2 Toolkit en Labview

Es necesario conocer la ubicación del Ar Drone Toolkit **figura 63** para que se pueda utilizar en Labview.



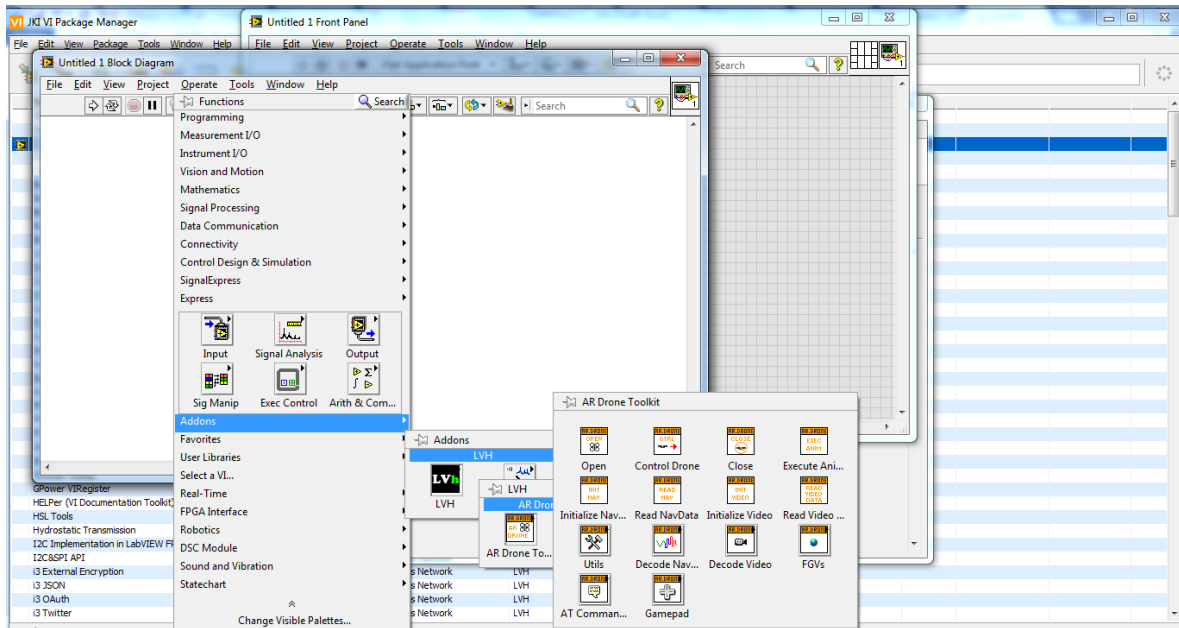


Figura 63. Ar Drone Toolkit en Labview

## 3.2 Descripción de los Toolkits

### 3.2.1 Leap Motion Controller Toolkit Vi

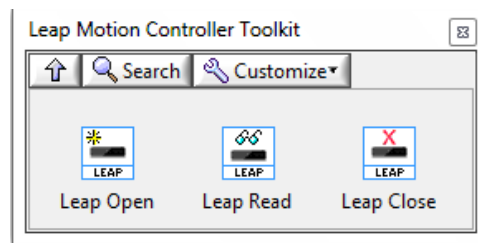
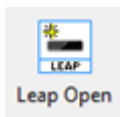
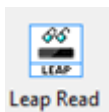


Figura 64. Leap Motion Controller Toolkit Vi

El Leap Motion Controller Toolkit consta de 3 Vi's para su funcionamiento:



**Leap Open.-** Este Vi abre una sesión para el Leap Motion y devuelve una referencia que habrá de superar para la siguiente sesión.

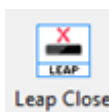


**Leap Read.-** Devuelve información del dispositivo en forma de estructura; esta estructura devuelve información de la mano, objetos o gestos para ser interpretados.

La información que ofrece el Leap Read es la siguiente:

**Estructura:**

- **ID.-** Dato numérico sobre el número de manos u objetos
- **Timestamp.-** Dato numérico sobre los cuadros por segundo a los que se está recibiendo la información.
- **Hands.-** Es un arreglo de datos que contiene información sobre la manos captadas por el dispositivo
  - **Hand.-** Devuelve información sobre la posición de la mano, la normal ángulo de giro etc.
  - **Pointables.-** Devuelve información sobre los números de dedos de la mano reconocidos por el dispositivo.
- **Key Tap Gestures.-** Contiene información sobre gestos de tecleo o pulso, ya sea de una mano u objeto.
- **Screen Tap Gestures.-** Contiene información de gestos realizados como si fuera una pantalla
- **Cicle Gestures.-** Contiene información de gestos que simulan a un círculo ya sea utilizando un dedo o un objeto.
- **Swipe Gestures.-** Contiene información sobre gestos hechos sobre el dispositivo en forma de ráfagas.



**Leap close.-** Este Vi se utiliza para cerrar la sesión del Leap Motion

### 3.2.2 Ar Drone Toolkit Vi

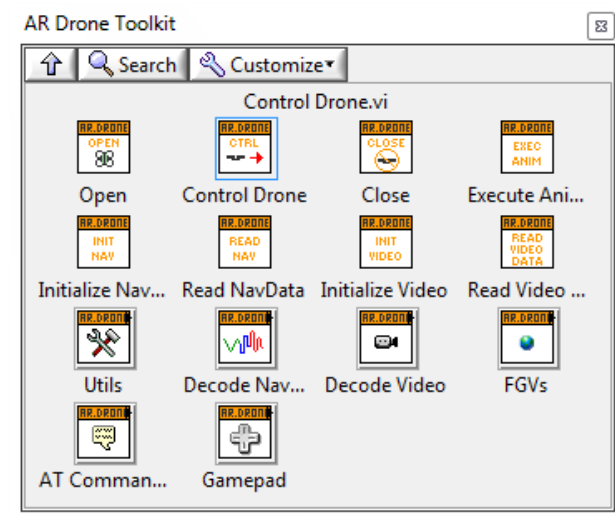


Figura 65. Ar Drone Toolkit

El Ar Drone Toolkit está conformado por 14 Vi's cada uno con una función específica y que en conjunto permiten manipular y recibir datos del Drone. Para controlar al vehículo aéreo no tripulado mediante gestos y recibir información del mismo no es necesario utilizar todos los Vi's disponibles, basta con los que se explicará a continuación:

**Open.-** Abre una nueva sesión y realiza la conexión de red inalámbrica con el Ar Drone; además en él se pueden configura aspectos como: distancia máxima de vuelo, tipo de carcasa ya sea para interiores o exteriores, velocidad de vuelo, máximo ángulo de giro etc. Que permite al usuario un mayor control del dispositivo.

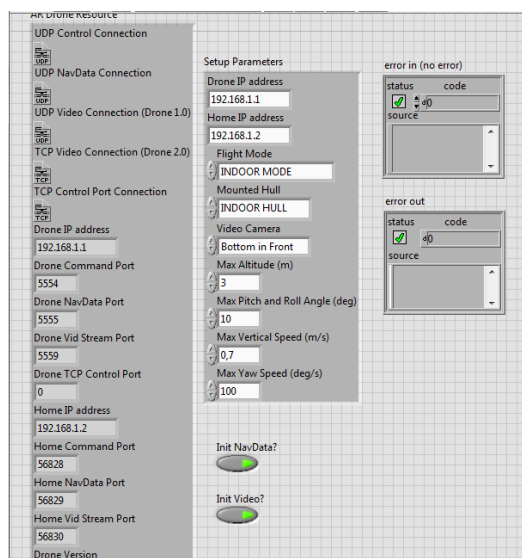
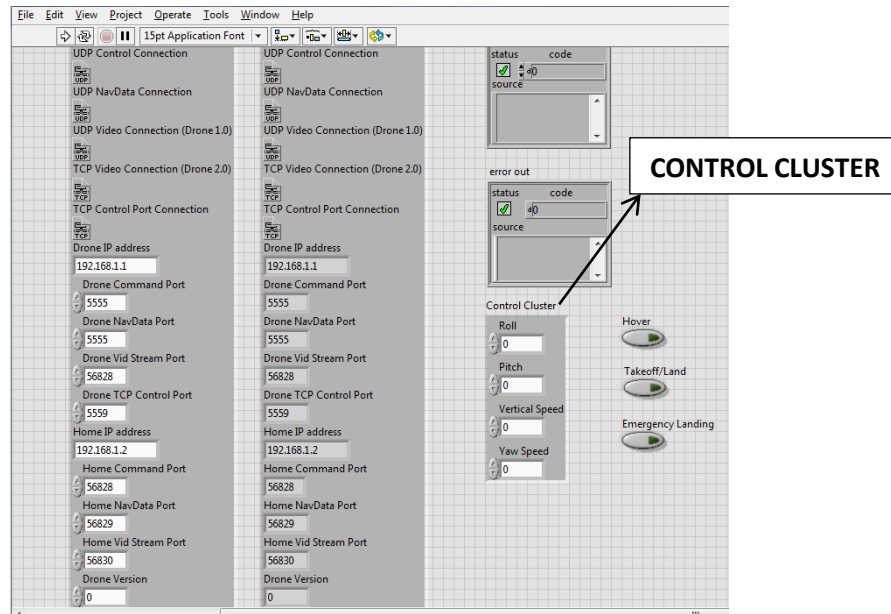


Figura 66. Open Vi

**Control Drone.-** Envía comandos básicos al Drone para poder controlarlo en el vuelo como son: **roll** (derecha, izquierda), **pitch** (adelante, atrás), **vertical speed** (regula la altura), **yaw speed** (giros en el mismo eje,) **Take Off y Landing**<sup>9</sup> y **Emergency Landing**(parada de emergencia).

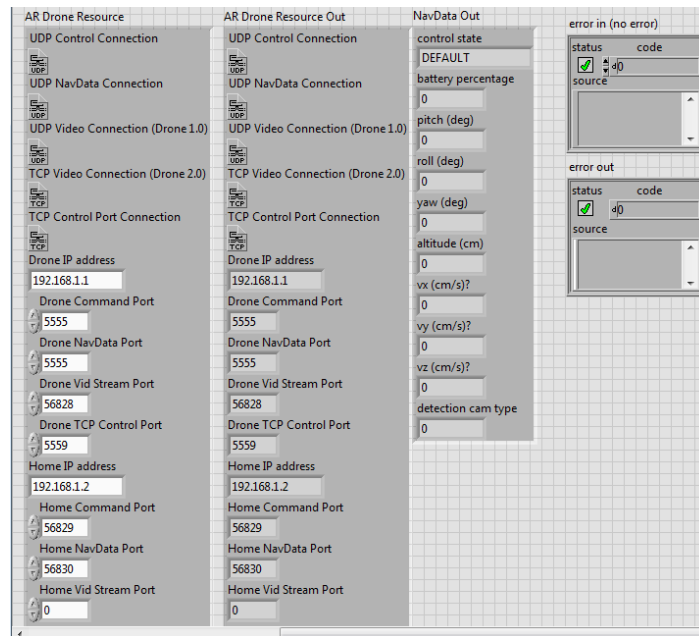
Los datos que recibe este Vi son en forma de datos agrupados o **CLUSTERS**



**Figura 67. Control Drone Vi**

**Read NavData.-** Este Vi permite recibir información de todos los sensores que dispone el Drone tales como: porcentaje de la batería, velocidad del viento en los tres ejes, ángulos de giro, estado de vuelo y otros según el operador lo requiera.

<sup>9</sup> **Take Off y Landing.-** Inicia y Termina las sesiones de vuelo del Drone



**Figura 68. Read NavData Vi**

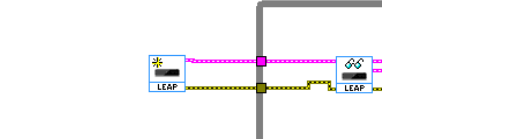
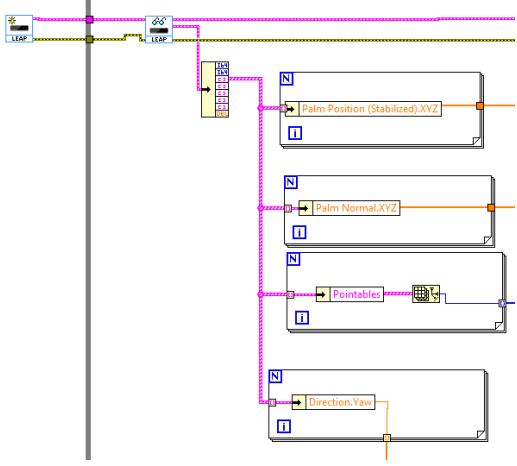
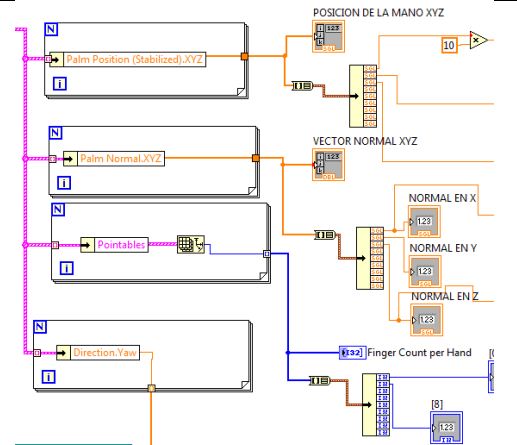
### 3.3 Diseño de los Software de Control

El diseño de los Software para el control de la Plataforma Simulador de Vuelo y del Drone como se ha visto hasta ahora se desarrolló en su totalidad con el software de Labview 2010 y 2011 de la National Instruments que gracias a su entorno grafico permite al programador desarrollar aplicaciones más rápidas y eficientes que otros lenguajes de programación; además Labview dispone de herramientas propias para los dispositivos periféricos que se quiere controlar

A continuación se explica los dos Software de Control desarrollados.

#### 3.3.1 Software de Control Plataforma Simulador de Vuelo

Debido a la programación en forma gráfica que se realiza en Labview, es imposible dar una explicación línea por línea de lo desarrollado; es por eso que a manera de manual se ha desarrollado una tabla con capturas de partes de la programación y su respectiva descripción.

| PROGRAMACION                                                                        | DESCRIPCION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>Insertamos un bucle while para correr el programa de forma continua y poder llevar registros de los dispositivos conectados.</p>                                                                                                                                                                                                                                                             |
|    | <p>Inicializamos y leemos los datos numéricos del escaneo 3d de la mano realizado por el Leap Motion con los Vi's <b>Leap Open</b> y <b>Leap Read</b></p>                                                                                                                                                                                                                                       |
|   | <p>Con la ayuda de la Herramienta <b>Unbundle</b> desagrupamos los datos obtenidos por el Lepa motion de forma individual; para esta aplicación en específico los datos de: Palm Position, Palm Normal, Pointables y el Dirección Yaw.</p> <p>Cabe recalcar que para poder acceder a los datos se necesitó de un <b>Bucle for</b> para cada uno, ya que los datos están en forma de vector.</p> |
|  | <p>Después de utilizar el <b>Bucle for</b> los datos quedan en forma de arreglos; para poder separarlos utilizamos la herramienta <b>array to cluster</b> seguido por un <b>unbundle</b> y de esta manera los datos son separados individualmente para ser procesados.</p>                                                                                                                      |



El software completo se observa en la figura (69)

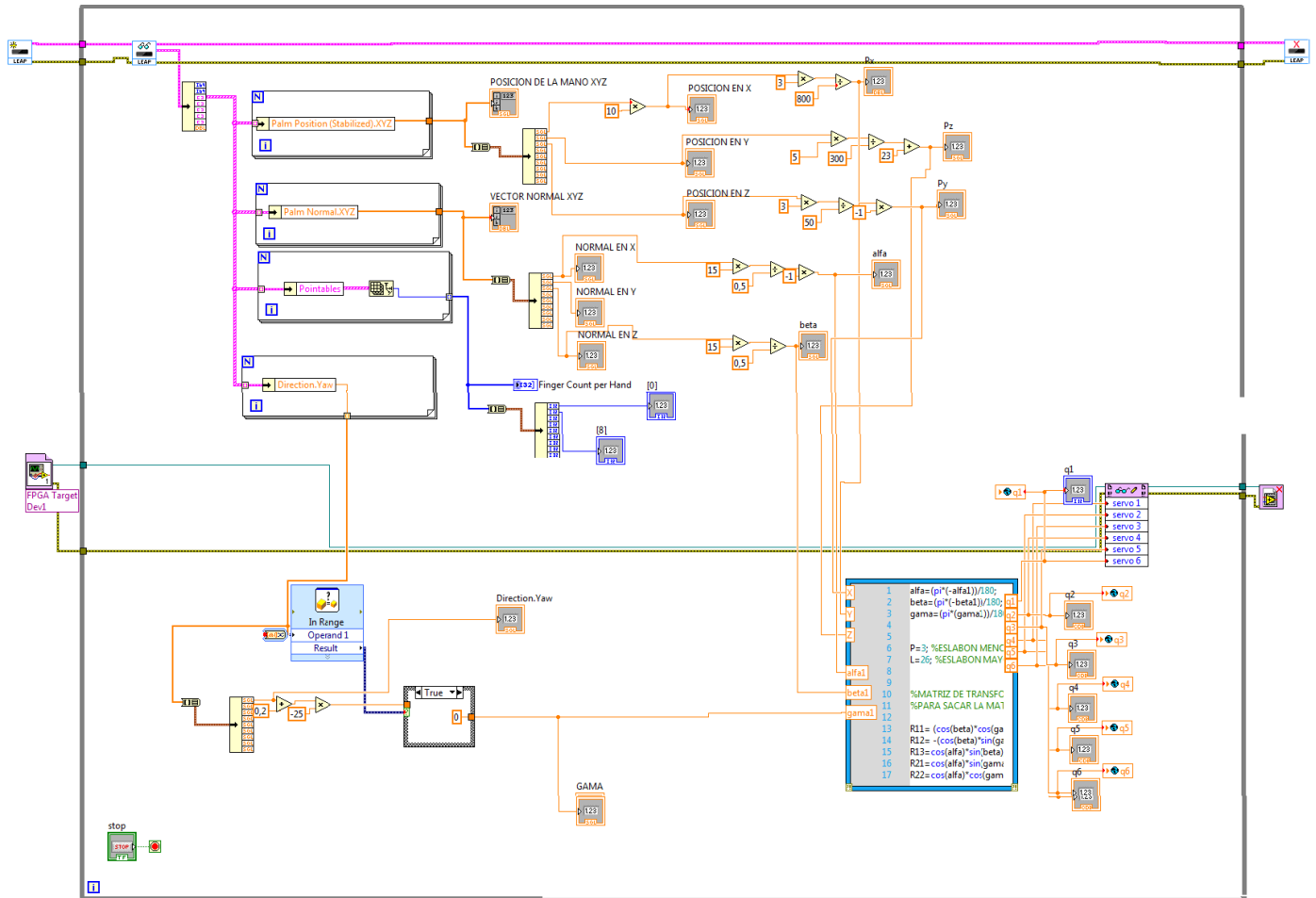


Figura 69. Software para controlar la Plataforma Simulador de Vuelo



La interfaz con el usuario es la siguiente:

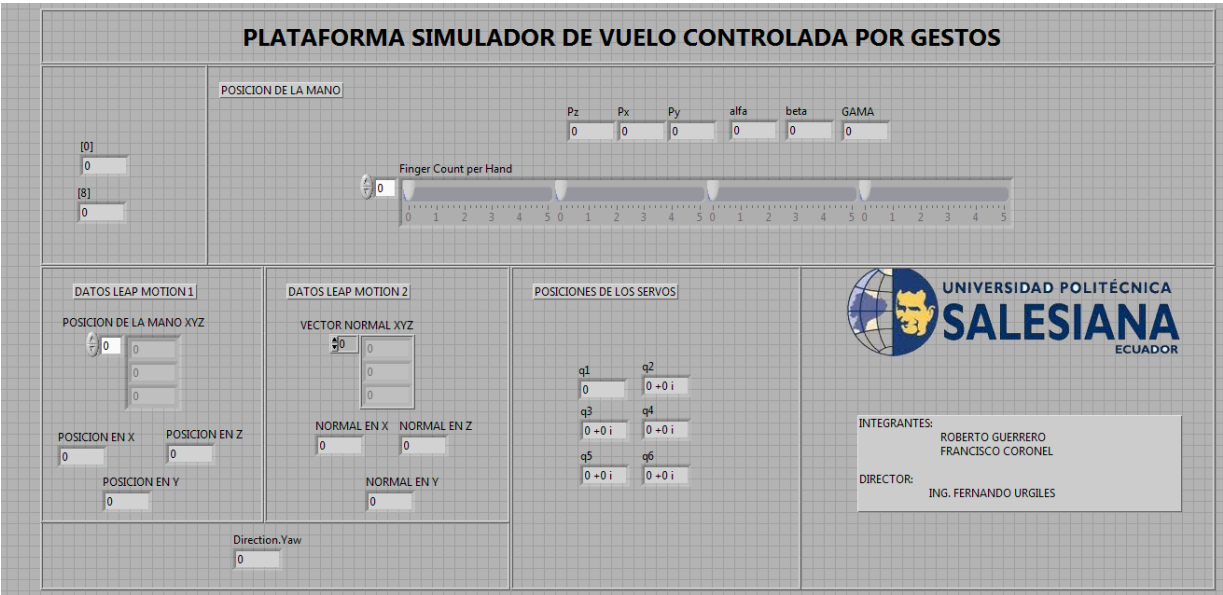
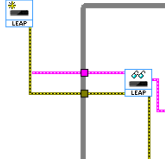
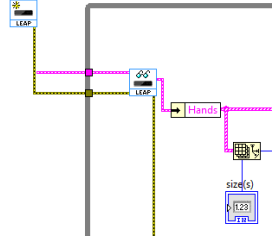
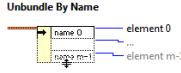
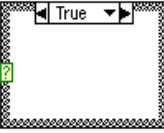
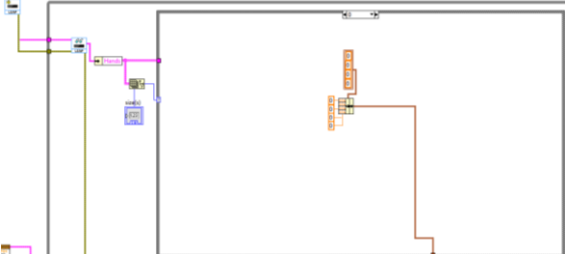
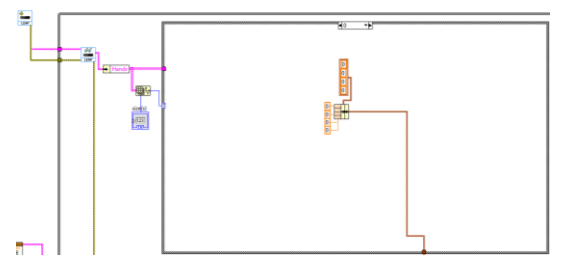


Figura 70. Interfaz con el usuario Plataforma Simulador de Vuelo

3.3.2 Software de Control para el Vehículo Aéreo no Tripulado

Al igual que con el software de control para la plataforma la explicación de la programación se realizara utilizando el recurso de una tabla como sigue a continuación:

| PROGRAMACION | DESCRIPCION                                                                                                                  |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | Insertamos un bucle while para correr el programa de forma continua y poder llevar registros de los dispositivos conectados. |

|                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                            | <p>Inicializamos y leemos los datos numéricos del escaneo 3d de la mano realizado por el Leap Motion con los Vi's <b>Leap Open</b> y <b>Leap Read</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                            | <p>Con la herramienta <b>Unbundle By Name</b>  se desagrupa solamente el dato requerido, en este caso se obtiene información solo de la mano.</p> <p>Con la herramienta <b>Array Size</b>  obtenemos un dato numerico que representa la cantidad de manos u objetos identificados por el Leap Motion</p> |
| <p style="text-align: center;"><b>Case Structure</b></p>  | <p>Los datos obtenidos de la mano son ingresados a un <b>Case Structure</b> donde la cantidad de manos u objetos determinaran acciones que permitirán controlar al Drone</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                          | <p style="text-align: center;"><b>Caso 0</b></p> <p>Cuando el Leap Motion no detecte ninguna mano u objeto, los datos enviado al Drone son 0; esto provoca que el Drone permanezca en la última posición dada.</p>                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                          | <p style="text-align: center;"><b>Caso 2</b></p> <p>Al igual que en caso 0 al detectarse dos o más objetos o manos el Drone se permanece en la última posición dada</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

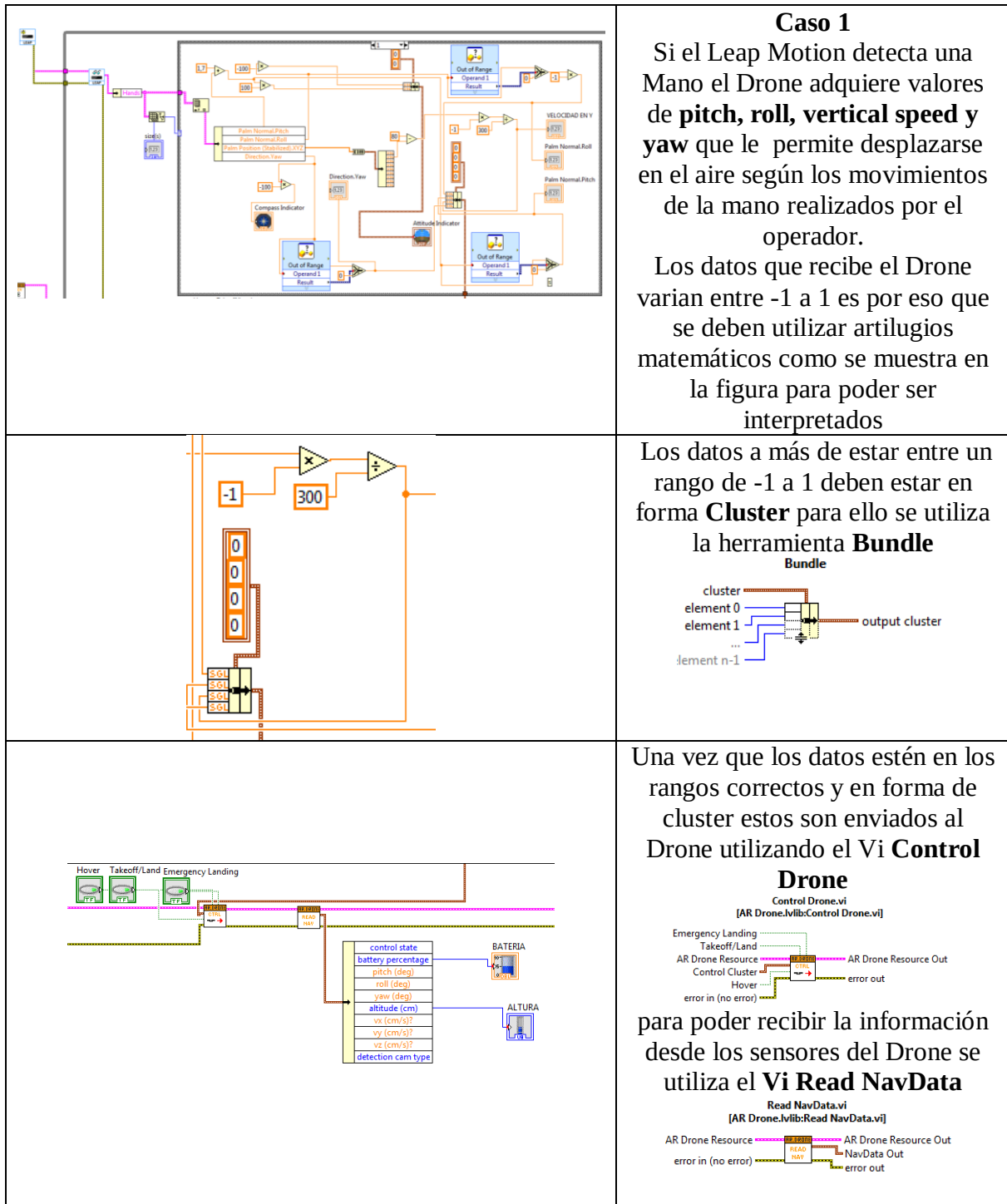


Tabla 5. Algoritmo del Software de control para el Drone

El software final para el control del Drone es el siguiente:

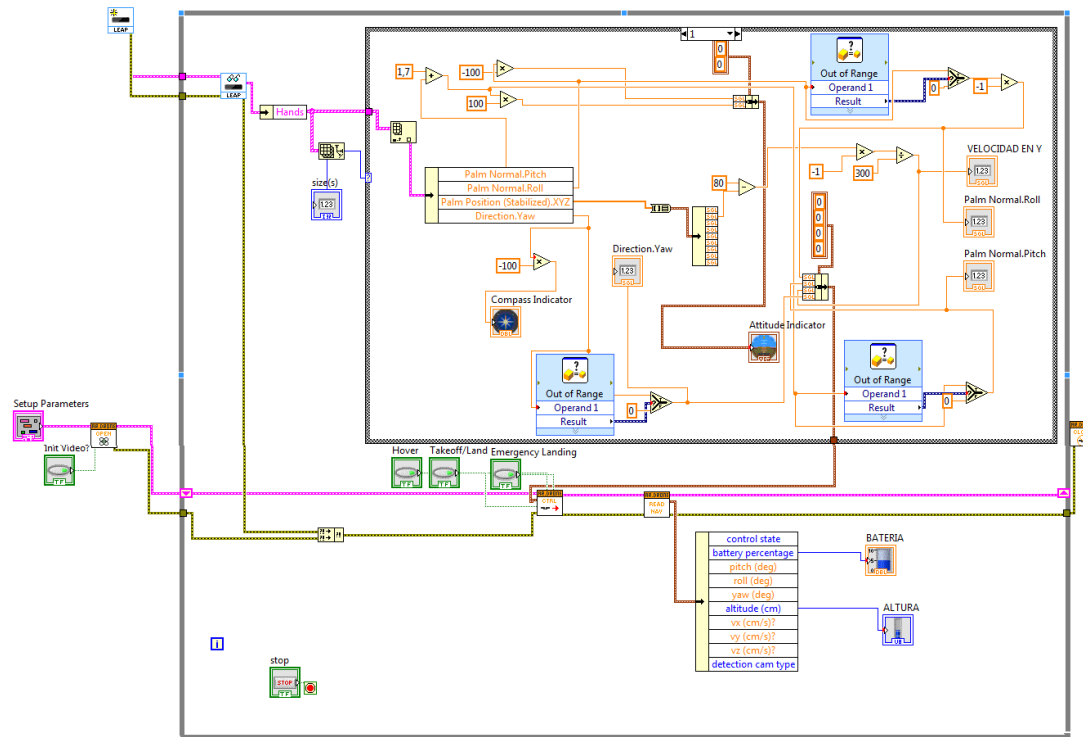


Figura 71. Software de Control para Vehículo Aéreo no Tripulado

La interfaz con el usuario se observa en la figura 72



Figura 72. Interfaz con el usuario Vehículo Aéreo no Tripulado

# CAPITULO 4

## Pruebas de Funcionamiento de la Plataforma Simuladora de Vuelo y el Vehículo Aéreo no Tripulado

### 4.1 Pruebas de Funcionamiento de la Plataforma Simulador de Vuelo

En el presente capitulo se muestra en imágenes la medición los ángulos de rotación (**alpha, beta, gama**) y los desplazamientos (**x,y,z**) que la plataforma toma cuando se le controla mediante los gestos de la mano.

Para medir los desplazamientos de la plataforma se utiliza un láser posicionándolo sobre un plano cartesiano en la base.

Y en el caso de los ángulos de rotación se utiliza la aplicación (Angle Metter) de un Smartphone (Iphone).

#### 4.1.1 Posición Inicial

La posición inicial de la plataforma es:

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=0                              | X=0                                             | Q1=12.95                 |
| Y=0                              | Y=0                                             | Q2=156.05                |
| Z=0                              | Z=0                                             | Q3=12.90                 |
| Normal x=0                       | ALFA=0                                          | Q4=156.02                |
| Normal y=0                       | BETA=0                                          | Q5=12.87                 |
| Yaw =0                           | GAMA=0                                          | Q6=155.97                |

Tabla 6. Posición Inicial Plataforma

**Z=23.-** Es la altura a la que se encuentra la plataforma en cm

| PLATAFORMA SIMULADORA DE VUELO CONTROLADA POR GESTOS                                                                                      |  |                                                                                                                                                      |  |                                                                                                              |  |                                                                                                                                                                                 |  |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
| [0]<br>0<br>[8]<br>0                                                                                                                      |  | POSICION DE LA PLATAFORMA<br>Pz Px Py alfa beta gama<br>23 0 -0 -0 0 0<br>Finger Count per Hand<br>0 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 |  |                                                                                                              |  |                                                                                                                                                                                 |  |  |  |
| DATOS LEAP MOTION 1<br>POSICION DE LA MANO XYZ<br>0 0 0<br>POSICION EN X POSICION EN Z<br>0 0<br>POSICION EN Y<br>0<br>Direction.Yaw<br>0 |  | DATOS LEAP MOTION 2<br>VECTOR NORMAL XYZ<br>0 0 0<br>NORMAL EN X NORMAL EN Z<br>0 0<br>NORMAL EN Y<br>0                                              |  | POSICIONES DE LOS SERVOs<br>q1 q2<br>12,9501 156,056<br>q3 q4<br>12,9066 156,025<br>q5 q6<br>12,8765 155,973 |  |  INTEGRANTES:<br>ROBERTO GUERRERO<br>FRANCISCO CORONEL<br>DIRECTOR:<br>ING. FERNANDO URGILES |  |  |  |

**Figura 73. Datos Adquiridos y Enviados a la Posición Inicial**



**Figura 74. Posición Inicial Plataforma**

### 4.1.2 Desplazamiento en el Eje x

Sobre la plataforma se colocó una muesca para apreciar el movimiento en x y en la siguiente tabla se observa los datos extraídos del software de programación.

#### 4.1.2.1 Posición en -x

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=-1082.20                       | X=-4.05                                         | Q1=43.04                 |
| Y=121.582                        | Y=-0.204                                        | Q2=117.59                |
| Z=3.4025                         | Z=25.02                                         | Q3=68.43                 |
| Normal x=0.2700                  | ALFA=-8.1                                       | Q4=146.71                |
| Normal y=-0.95                   | BETA=-2.84                                      | Q5=21                    |
| Yaw =-0.129                      | GAMA=0                                          | Q6=142.26                |

Tabla 7. Posición en -x de la plataforma

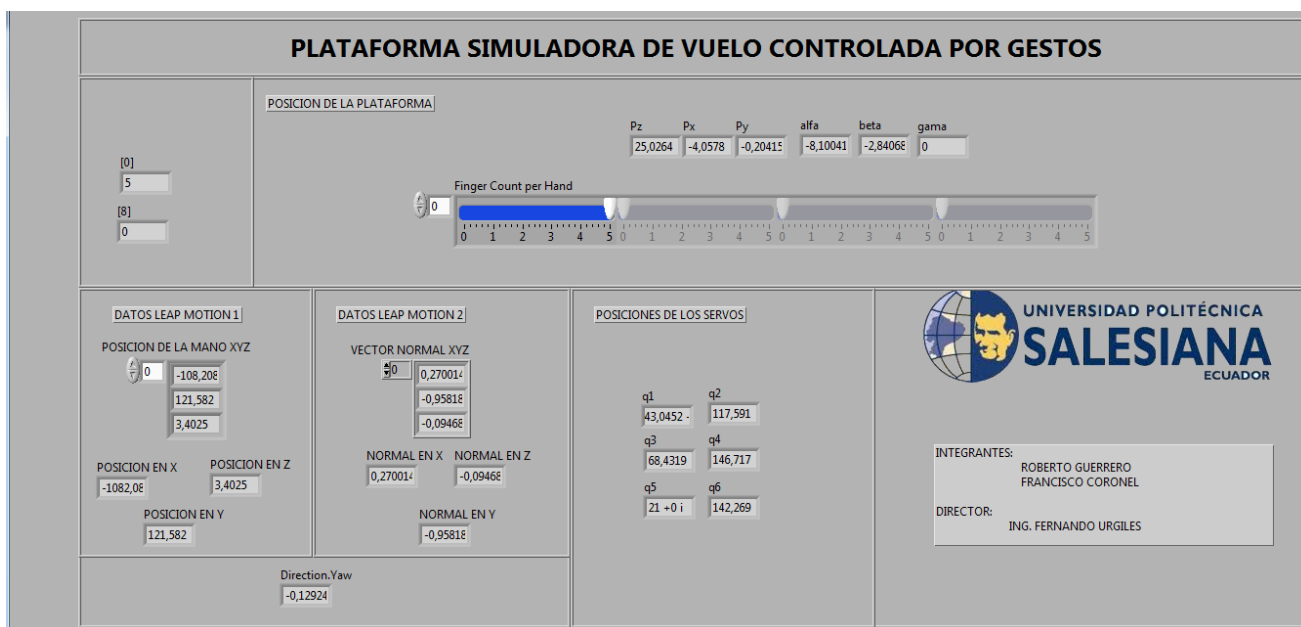


Figura 75. Desplazamiento en el eje X -4cm

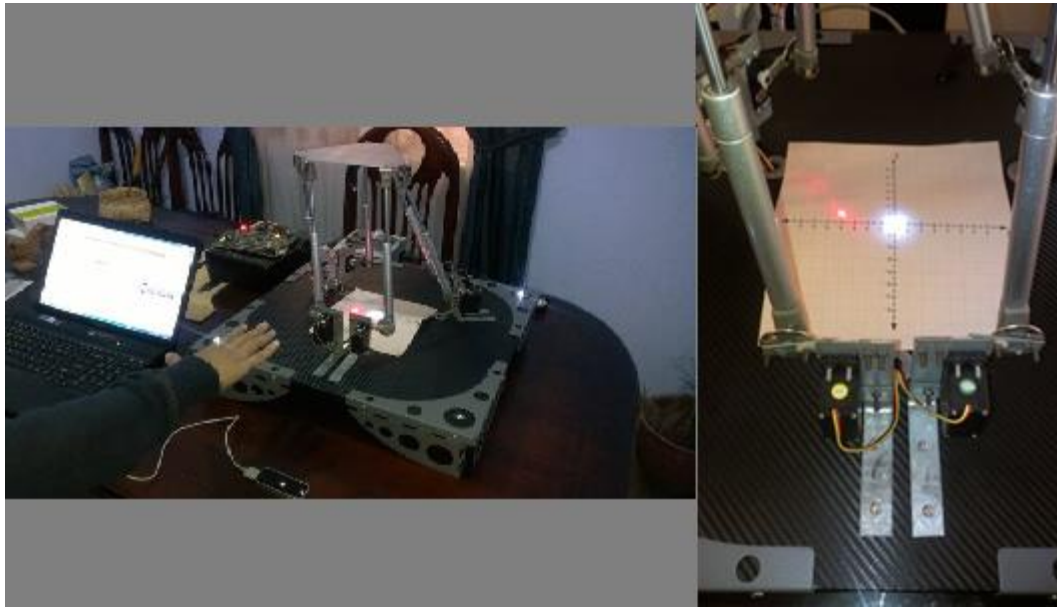


Figura 76. Desplazamiento de la plataforma en el eje x -4cm

#### 4.1.2.2 Posición en x

En la siguiente tabla se observa los datos extraídos del software de programación.

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=1106.14                        | X=4.14                                          | Q1=72.86                 |
| Y=193.34                         | Y=0.61                                          | Q2=129.07                |
| Z=-10.27                         | Z=26.22                                         | Q3=40.58                 |
| Normal x=-0.02                   | ALFA=0.72                                       | Q4=104.23                |
| Normal y=-0.99                   | BETA=0.13                                       | Q5=59.53                 |
| Yaw =-0.101                      | GAMA=0                                          | Q6=133.66                |

Tabla 8. Posición en x de la plataforma





Figura 77. Desplazamiento en el eje X 4cm

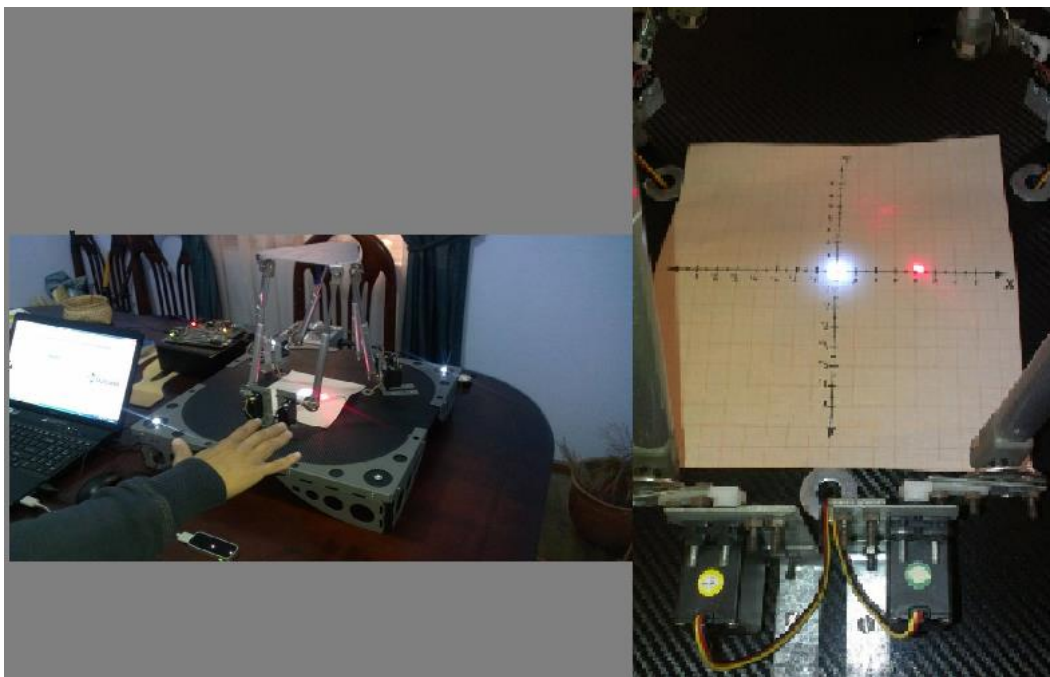


Figura 78. Desplazamiento de la plataforma en el eje x 4cm

### 4.1.3 Desplazamiento en el Eje y

#### 4.1.3.1 Posición en y

En la siguiente tabla se encuentra la posición en +y de la plataforma

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=-290.41                        | X=-1.08                                         | Q1=77.57                 |
| Y=196.13                         | Y=4.62                                          | Q2=131.48                |
| Z=-77.01                         | Z=26.26                                         | Q3=62.24                 |
| Normal x=0.06                    | ALFA=-1.97                                      | Q4=127.008               |
| Normal y=-0.98                   | BETA=3.79                                       | Q5=37.68                 |
| Yaw =-0.092                      | GAMA=0                                          | Q6=103.49                |

Tabla 9. Posición en y de la plataforma

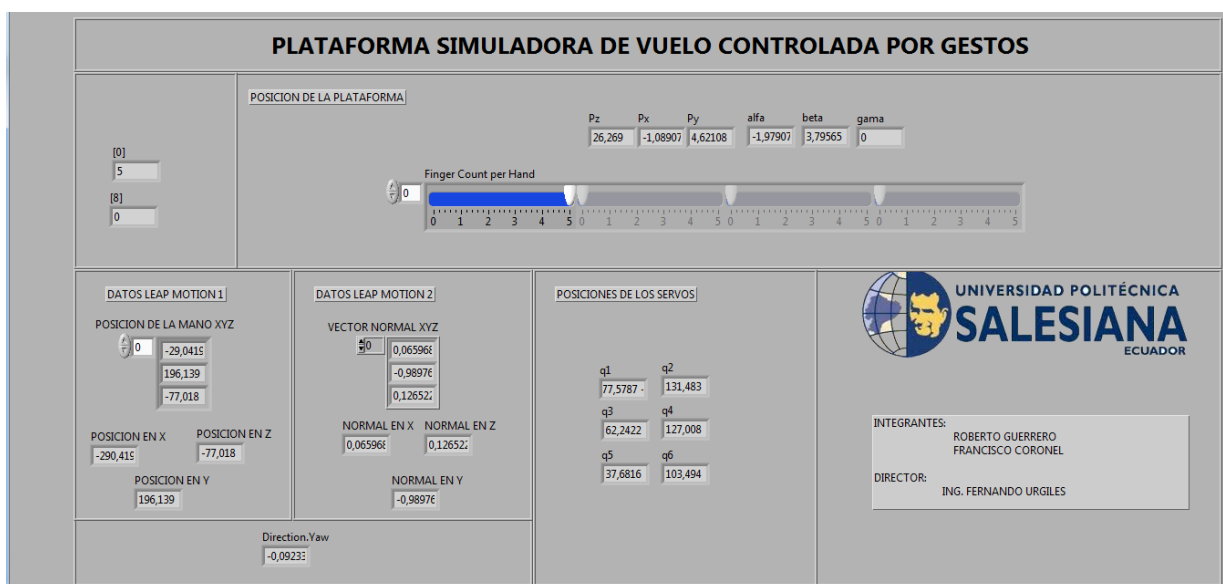


Figura 79. Desplazamiento en el eje y 4cm

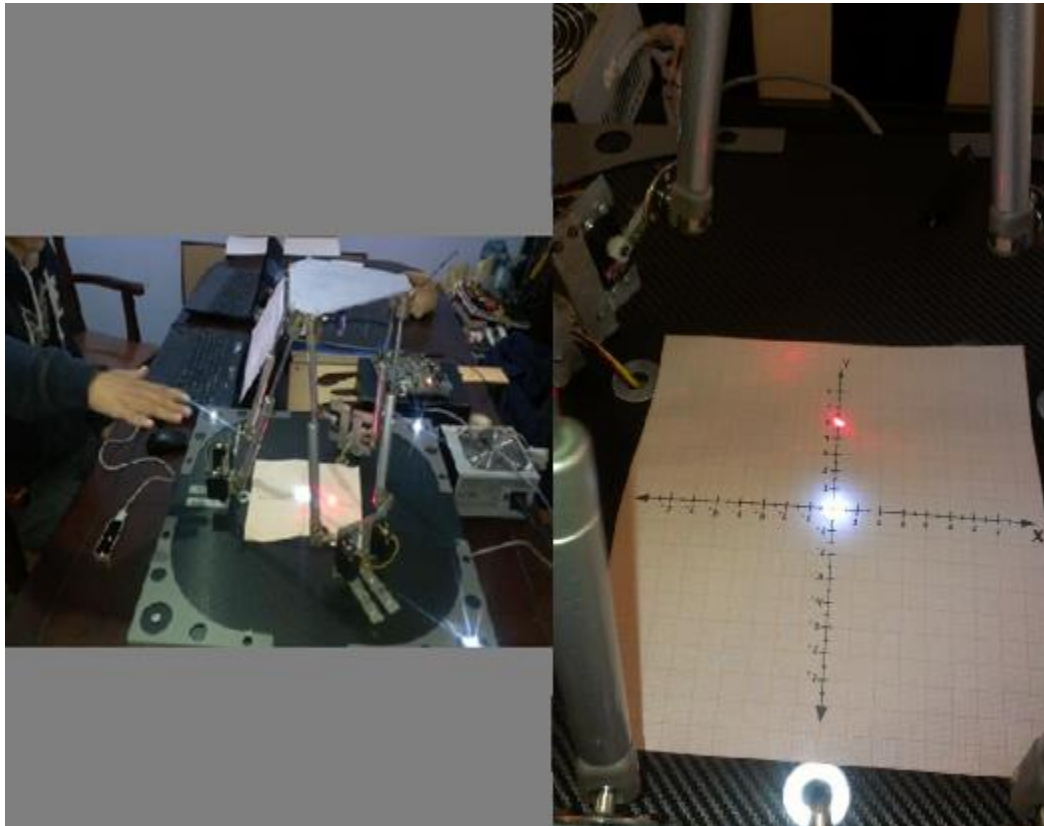


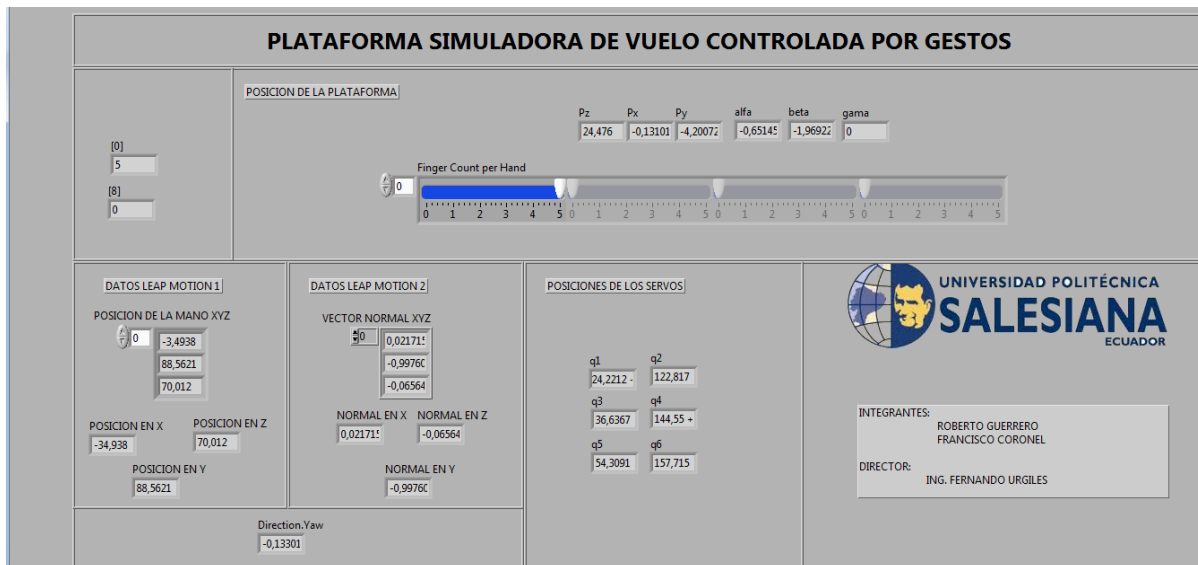
Figura 80. Desplazamiento de la plataforma en el eje y 4cm

#### 4.1.3.2 Posición en -y

En la siguiente tabla se encuentra la posición en -y de la plataforma

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y<br>desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------|
| X=-34.93                         | X=-0.13                                            | Q1=24.22                 |
| Y=88.56                          | Y=-4.20                                            | Q2=122.81                |
| Z=70.01                          | Z=24.476                                           | Q3=36.63                 |
| Normal x=0.02                    | ALFA=-0.65                                         | Q4=144.55                |
| Normal y=-0.99                   | BETA=-1.96                                         | Q5=54.30                 |
| Yaw =-0.13                       | GAMA=0                                             | Q6=157.71                |

Tabla 10. Posición en -y de la plataforma



**Figura 81. Desplazamiento en el eje -y 4cm**



**Figura 82. Desplazamiento de la plataforma en el eje -y 4cm**

#### 4.1.4 Desplazamiento en el Eje z

##### 4.1.4.1 Posición en z =23cm

En la siguiente tabla se encuentra la posición z=23cm.

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=49.19                          | X=-0.18                                         | Q1=18.73                 |
| Y=47.60                          | Y=0.03                                          | Q2=148.65                |
| Z=-0.59                          | Z=23.79                                         | Q3=19.59                 |
| Normal x=-0.03                   | ALFA=1.15                                       | Q4=144.95                |
| Normal y=-0.99                   | BETA=-0.06                                      | Q5=23.04                 |
| Yaw =0.055                       | GAMA=-6.38                                      | Q6=143.82                |

Tabla 11. Posición en z=23cm

La posición en z por la disposición y geometría de la plataforma no puede ser negativa, y el rango va desde 23cm de la posición inicial a 28cm.

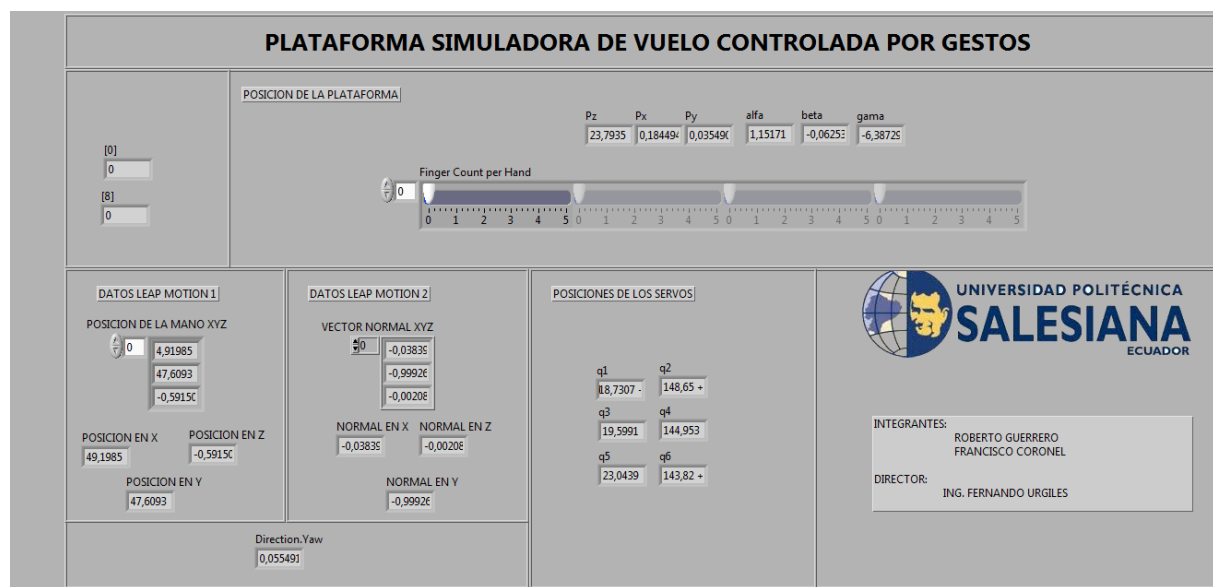


Figura 83. Desplazamiento en el eje z 23cm



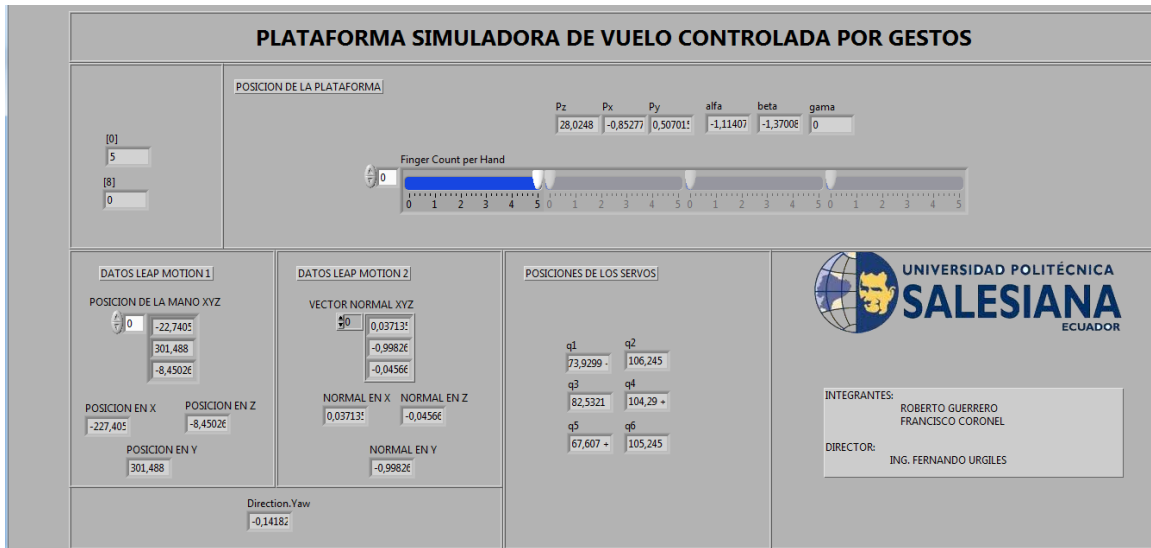
Figura 84. Desplazamiento de la plataforma en el eje z 23cm

#### 4.1.4.2 Posición en z =28cm

En la siguiente tabla se encuentra la posición z=28cm.

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=-227.40                        | X=-0.85                                         | Q1=73.92                 |
| Y=301.48                         | Y=0.50                                          | Q2=106.24                |
| Z=-8.45                          | Z=28.02                                         | Q3=82.53                 |
| Normal x=-0.03                   | ALFA=-1.11                                      | Q4=104.29                |
| Normal y=-0.99                   | BETA=-1.37                                      | Q5=67.60                 |
| Yaw =0.055                       | GAMA=0                                          | Q6=105.24                |

Tabla 12. Posición en z=28cm



**Figura 85. Desplazamiento en el eje z 28cm**



**Figura 86. Desplazamiento de la plataforma en el eje z 28cm**



## 4.1.5 Angulo de Rotación Alfa

### 4.1.5.1 Rotación del ángulo Alfa -15 grados

Para comprobar el correcto funcionamiento de la plataforma según los ángulos de rotación se utilizó un Smartphone, que gracias a su sensor de giroscopio permite medir la inclinación del dispositivo; y por ende de la plataforma

En la siguiente tabla se muestra los datos del ángulo de rotación en alfa -15 grados

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=-229.64                        | X=-0.86                                         | Q1=64.20                 |
| Y=131.07                         | Y=-0.99                                         | Q2=103.821               |
| Z=16.603                         | Z=25.18                                         | Q3=53.71                 |
| Normal x=0.48                    | ALFA=-14.61                                     | Q4=133.76                |
| Normal y=-0.86                   | BETA=-3.42                                      | Q5=11.21                 |
| Yaw =-0.12                       | GAMA=0                                          | Q6=174.726               |

Tabla 13. Plataforma en Alfa -15 grados

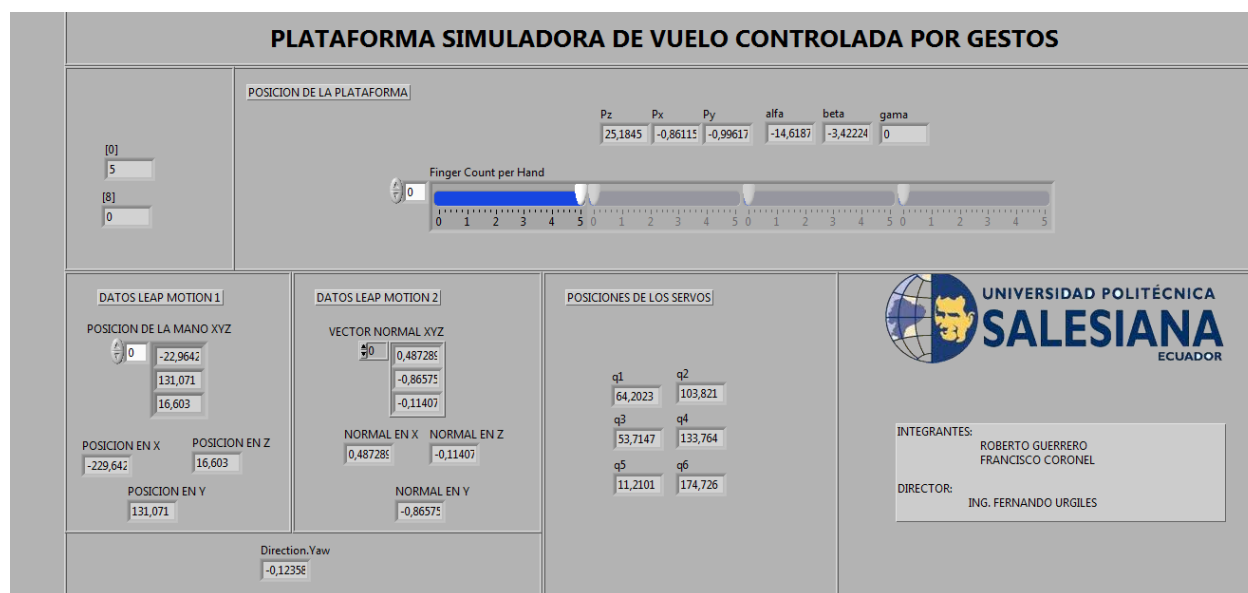
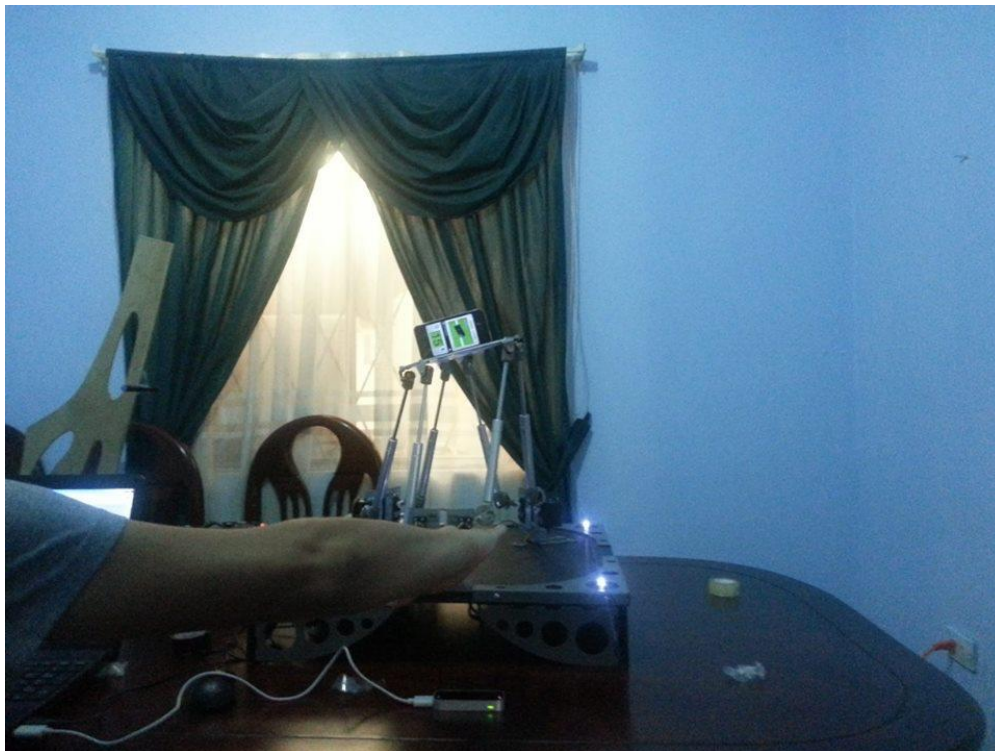


Figura 87. Rotación en alfa -15 grados





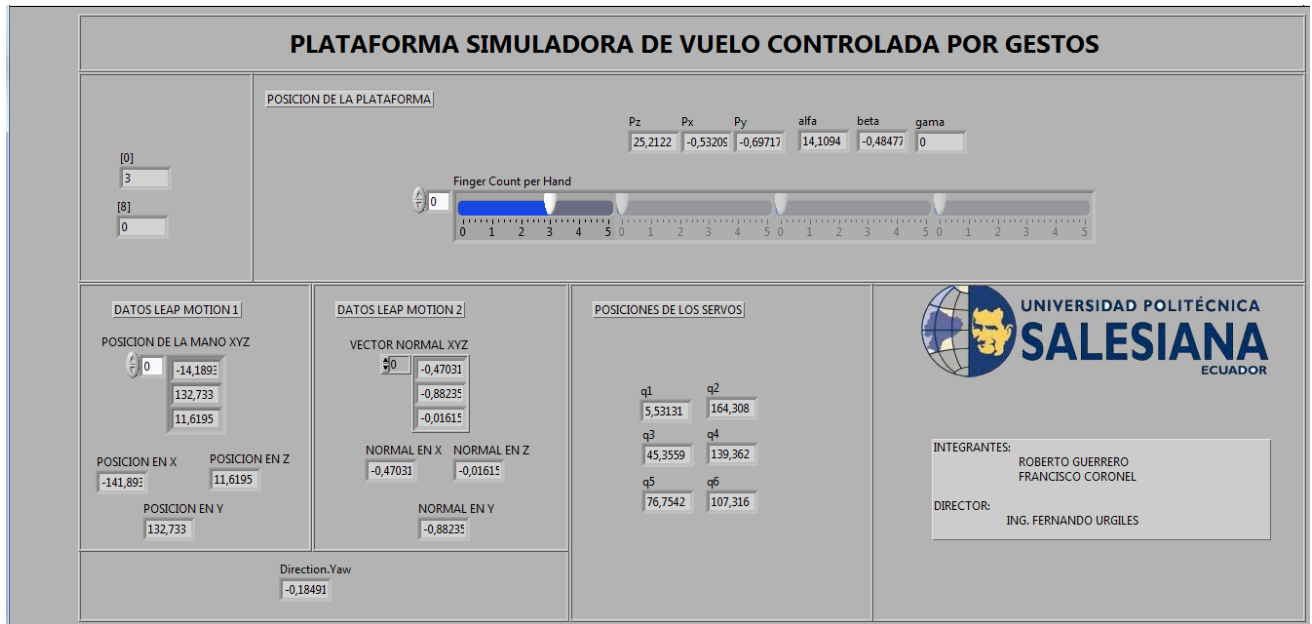
**Figura 88. Rotación de la plataforma en -15 grados**

#### **4.1.5.2 Rotación del ángulo Alfa 15 grados**

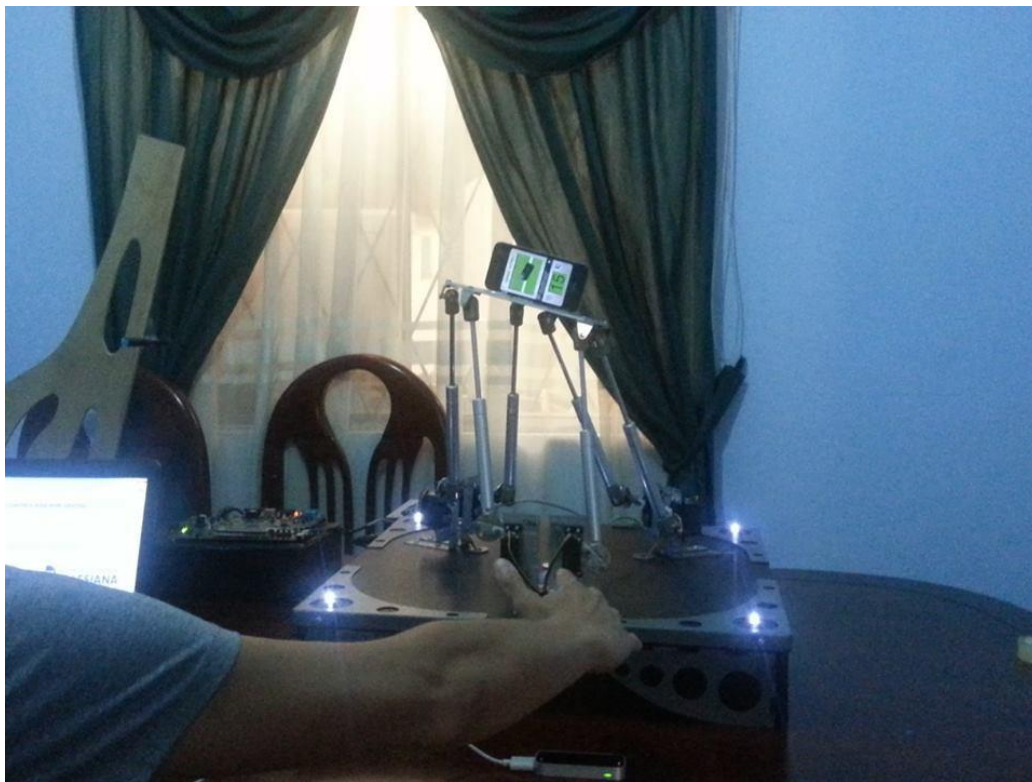
En la siguiente tabla se observa la rotación los datos para la rotación en alfa +15 grados

| <b>Datos Recibidos<br/>(Leap Motion)</b> | <b>Datos Procesados<br/>(Ángulos y desplazamientos)</b> | <b>Datos Enviados (Motores)</b> |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|
| X=-141.89                                | X=-0.53                                                 | <b>Q1=5.53</b>                  |
| Y=132.73                                 | Y=-0.69                                                 | <b>Q2=164.308</b>               |
| Z=11.61                                  | Z=25.18                                                 | <b>Q3=45.35</b>                 |
| Normal x=-0.47                           | ALFA=-14.10                                             | <b>Q4=139.36</b>                |
| Normal y=-0.88                           | BETA=-0.48                                              | <b>Q5=76.75</b>                 |
| Yaw =-0.18                               | GAMA=0                                                  | <b>Q6=107.31</b>                |

**Tabla 14. Plataforma en Alfa = 15**



**Figura 89. Rotación en Alfa 15 grados**



**Figura 90. Rotación en Alfa de la plataforma en 15 grados**

## 4.1.6 Angulo de Rotación Beta

### 4.1.6.1 Rotación del ángulo Beta 16 grados

Al igual que en el ángulo Alfa, para poder medir la rotación se utilizó la aplicación del Smartphone.

En la siguiente tabla se observa los datos de rotación en Beta de la plataforma

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=-174.14                        | X=-0.65                                         | Q1=54.53                 |
| Y=136.75                         | Y=-1.87                                         | Q2=110.32                |
| Z=31.17                          | Z=25.27                                         | Q3=12.33                 |
| Normal x=0.022                   | ALFA=-0.67                                      | Q4=174.11                |
| Normal y=-0.91                   | BETA=12.33                                      | Q5=65.93                 |
| Yaw =-0.10                       | GAMA=0                                          | Q6=123.76                |

Tabla 15. Plataforma en Beta=16

En esta posición se puede observar un error de 3 grados respecto de lo medido y lo enviado

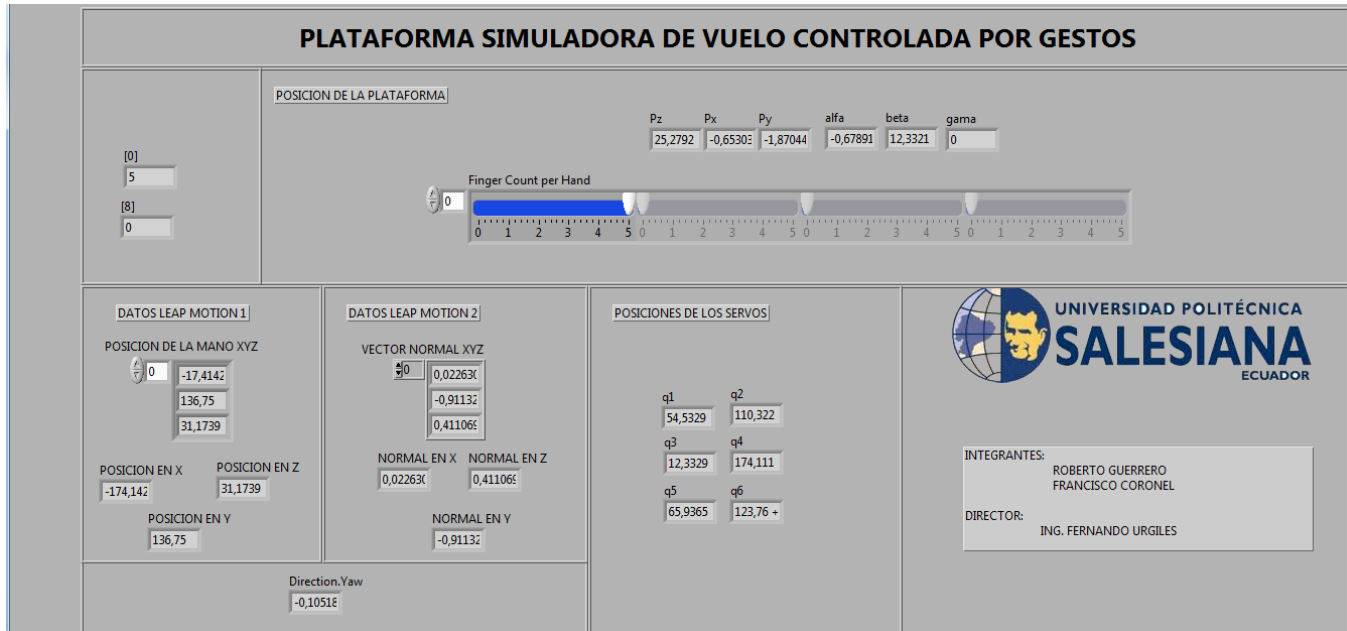


Figura 91. Rotación en Beta 16 grados



Figura 92. Rotación de la plataforma en Beta 16 grados

#### 4.1.6.2 Rotación del ángulo Beta -15 grados

En la siguiente tabla se observa los datos de rotación en Beta negativo de la plataforma

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=-96.51                         | X=-0.36                                         | Q1=-0.063                |
| Y=93.82                          | Y=-1.89                                         | Q2=164.93                |
| Z=31.59                          | Z=24.56                                         | Q3=81.75                 |
| Normal x=0.100                   | ALFA=3.00                                       | Q4=101.134               |
| Normal y=-0.78                   | BETA=-18.52                                     | Q5=26.73                 |
| Yaw =-0.034                      | GAMA=0                                          | Q6=164.299               |

Tabla 16. Plataforma en Beta=-15

Al igual que en Beta=-16, en Beta=15 existe un error de 3 grados respecto a lo enviado con lo medido.





**Figura 93. Rotación en Beta -15 grados**



**Figura 94. Rotación de la plataforma en Beta -15 grados**

#### 4.1.7 Angulo de rotación Gama

##### 4.1.7.1 Rotación del ángulo Gamma 15 grados

El desplazamiento en Gama no puede ser medido en la plataforma, dado que no existe una herramienta adecuada; sin embargo en las capturas se pueden apreciar el movimiento de -15 y 15 grados

En la siguiente tabla se observa la rotación los datos para la rotación en Gamma +15 grados

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=-23.94                         | X=-0.08                                         | Q1=44.01                 |
| Y=86.40                          | Y=-0.93                                         | Q2=160.33                |
| Z=15.55                          | Z=24.44                                         | Q3=61.29                 |
| Normal x=-0.010                  | ALFA=0.31                                       | Q4=150.17                |
| Normal y=-0.98                   | BETA=-4.32                                      | Q5=49.99                 |
| Yaw =-0.14                       | GAMA=15.23                                      | Q6=168.88                |

Tabla 17. Plataforma en Gama 15 grados

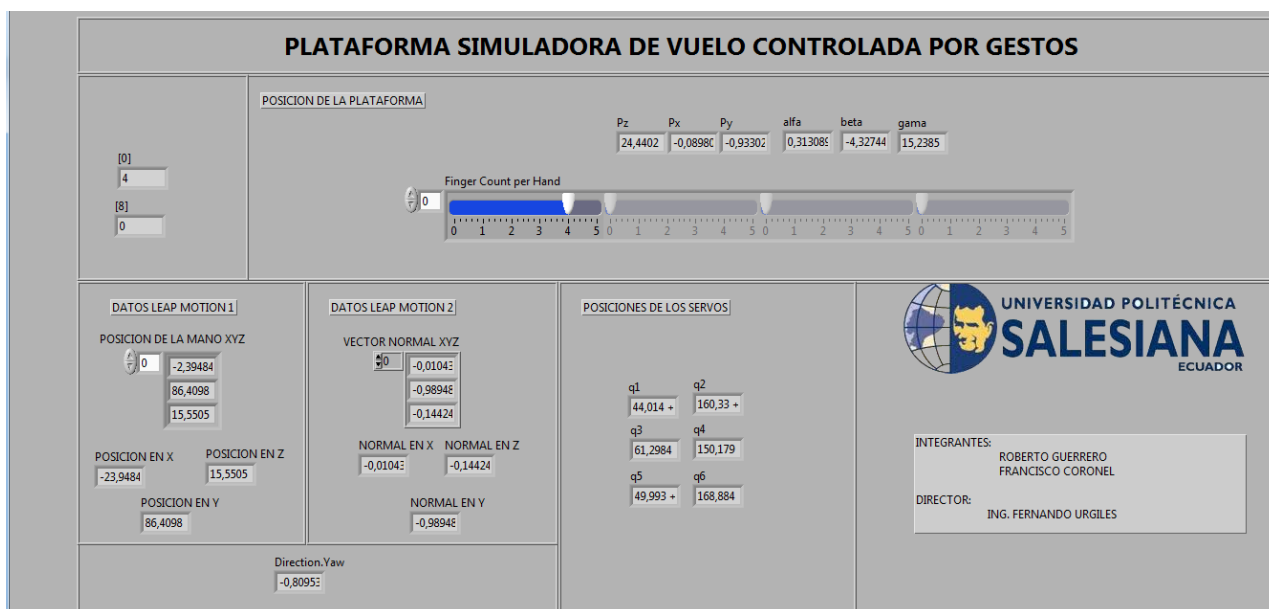


Figura 95. Rotación en Gamma 15 grados



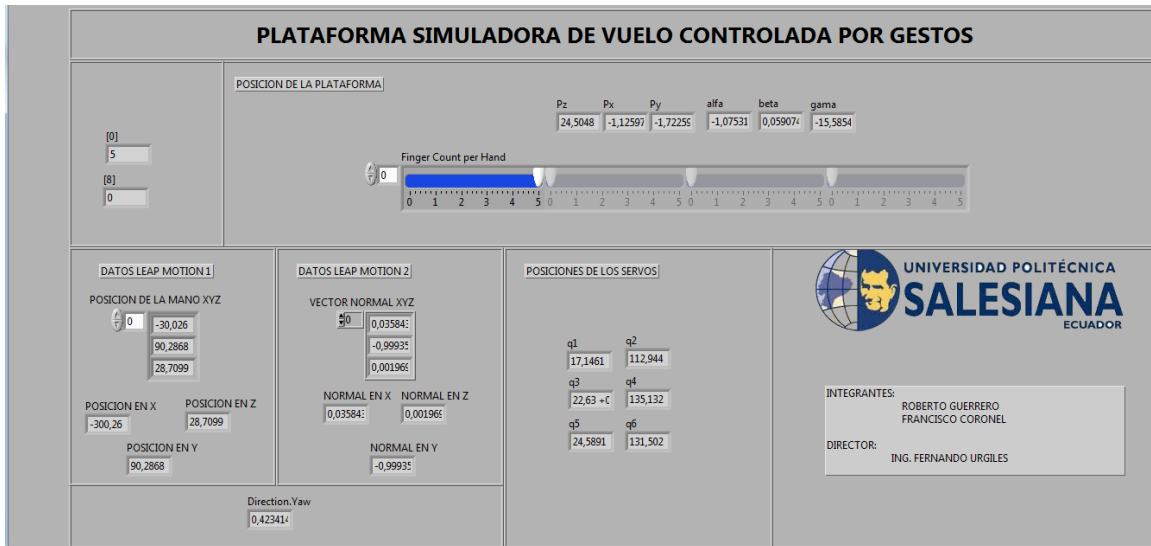
Figura 96. Rotación de la plataforma en Gamma 15 grados

#### 4.1.7.2 Rotación del ángulo Gamma -15 grados

En la siguiente tabla se observa la rotación los datos para la rotación en Gamma -15 grados

| Datos Recibidos<br>(Leap Motion) | Datos Procesados<br>(Ángulos y desplazamientos) | Datos Enviados (Motores) |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| X=-300.26                        | X=-1.11                                         | Q1=17.14                 |
| Y=90.26                          | Y=-1.72                                         | Q2=112.94                |
| Z=28.70                          | Z=24.50                                         | Q3=22.63                 |
| Normal x=0.035                   | ALFA=-1.07                                      | Q4=135.13                |
| Normal y=-0.99                   | BETA=0.059                                      | Q5=24.58                 |
| Yaw =0.42                        | GAMA=-15.58                                     | Q6=131.50                |

Tabla 18. Plataforma en Gama -15 grados



**Figura 97. Rotación en Gamma 15 grados**



**Figura 98. Rotación de la plataforma en Gamma -15 grados**



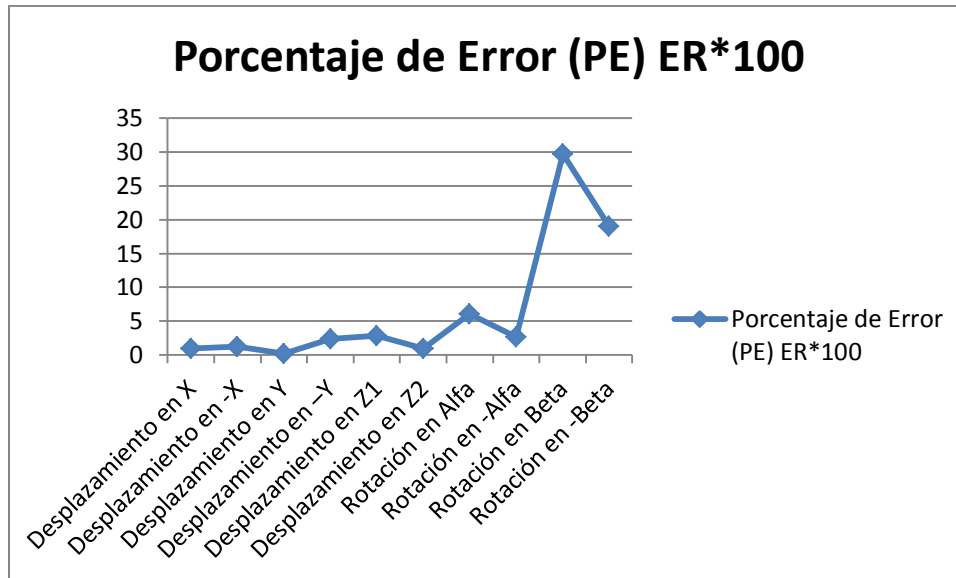
## 4.2 Cálculo del Error

A continuación se realiza el cálculo del error para cada uno de los grados de libertad de la plataforma; para ello se toma como referencia los datos recibidos del escaneo de la mano y los datos ingresados mediante el teclado comparado con las mediciones realizadas con el Smartphone y el Laser.

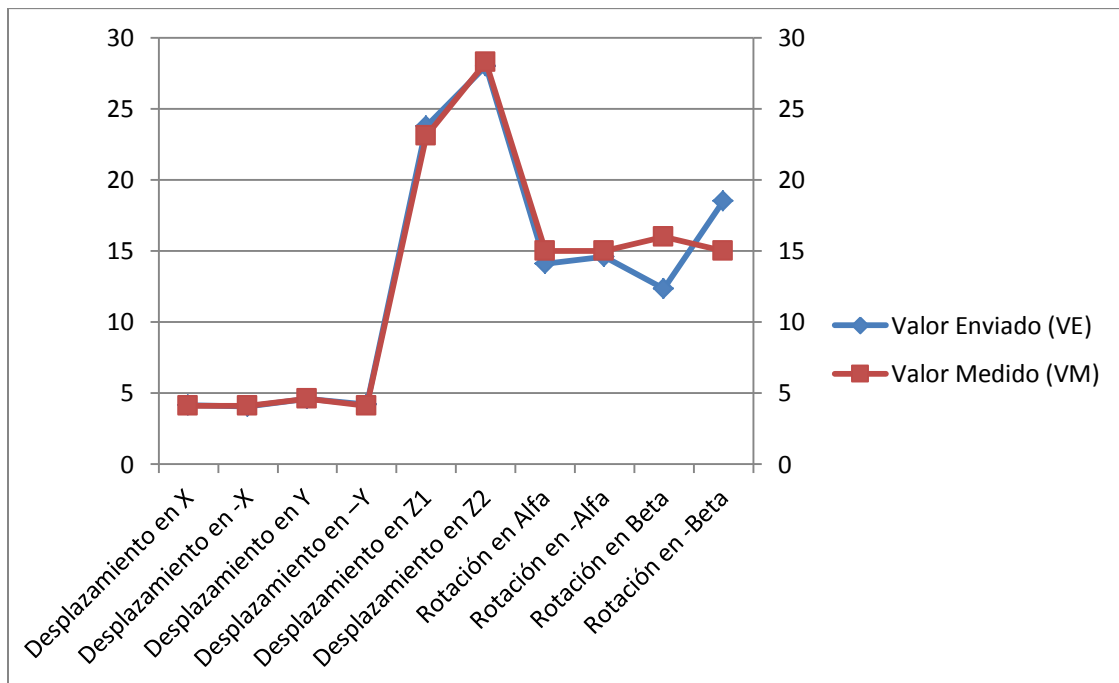
Se debe considerar que el error existente al momento de controlar la plataforma con los gestos será mucho mayor que al ingresar los datos directamente del teclado; dado que la mano no se puede situar en un solo eje o ángulo.

|                                 | <b>Valor<br/>Enviado<br/>(VE)</b> | <b>Valor<br/>Medido<br/>(VM)</b> | <b>Error<br/>Absoluto<br/>(EA)<br/> VM-VE </b> | <b>Error<br/>Relativo<br/>(ER)<br/>EA/VE</b> | <b>Porcentaje<br/>de Error<br/>(PE)<br/>ER*100</b> |
|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Desplazamiento<br/>en X</b>  | 4.14                              | 4.1                              | 0.04                                           | 0.00966                                      | 0.966                                              |
| <b>Desplazamiento<br/>en -X</b> | 4.05                              | 4.1                              | 0.05                                           | 0.0123                                       | 1.23                                               |
| <b>Desplazamiento<br/>en Y</b>  | 4.61                              | 4.6                              | 0.01                                           | 0.0021                                       | 0.21                                               |
| <b>Desplazamiento<br/>en -Y</b> | 4.20                              | 4.1                              | 0.1                                            | 0.023                                        | 2.38                                               |
| <b>Desplazamiento<br/>en Z1</b> | 23.79                             | 23.1                             | 0.69                                           | 0.029                                        | 2.90                                               |
| <b>Desplazamiento<br/>en Z2</b> | 28.02                             | 28.3                             | 0.28                                           | 0.0099                                       | 0.99                                               |
| <b>Rotación en<br/>Alfa</b>     | 14.104                            | 15                               | 0.86                                           | 0.060                                        | 6.09                                               |
| <b>Rotación en<br/>-Alfa</b>    | 14.61                             | 15                               | 0.39                                           | 0.026                                        | 2.66                                               |
| <b>Rotación en<br/>Beta</b>     | 12.33                             | 16                               | 3.67                                           | 0.29                                         | 29.7                                               |
| <b>Rotación en<br/>-Beta</b>    | 18.52                             | 15                               | 3.52                                           | 0.19                                         | 19.00                                              |
| <b>Rotación en<br/>Gama</b>     | -                                 | -                                | -                                              | -                                            | -                                                  |
| <b>Rotación en<br/>-Gama</b>    | -                                 | -                                | -                                              | -                                            | -                                                  |

**Tabla 19. Calculo del Error de la Plataforma Manipulada Mediante Gestos**



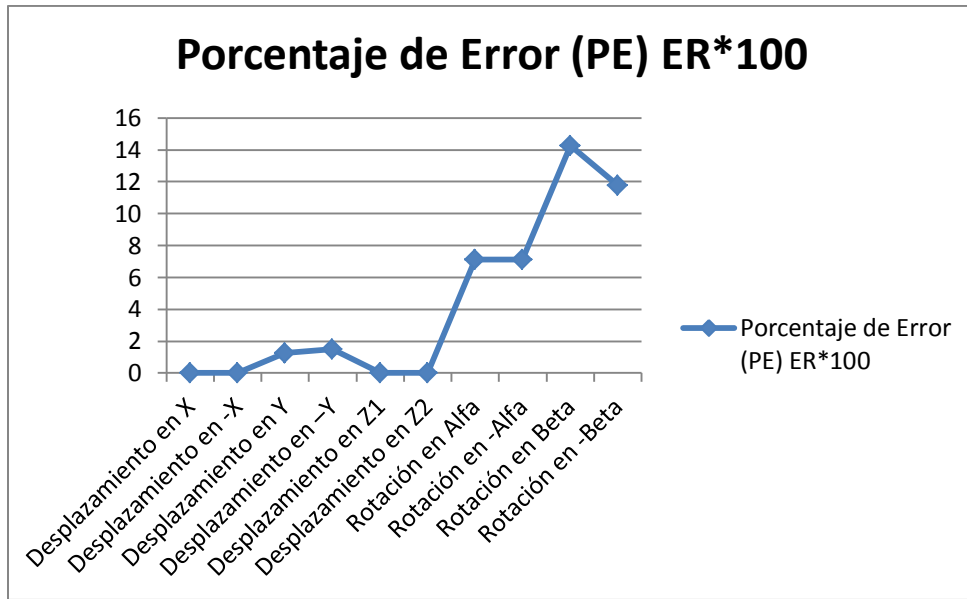
**Figura. 99 Grafica del Error Porcentual de La Plataforma Controlada por Gestos**



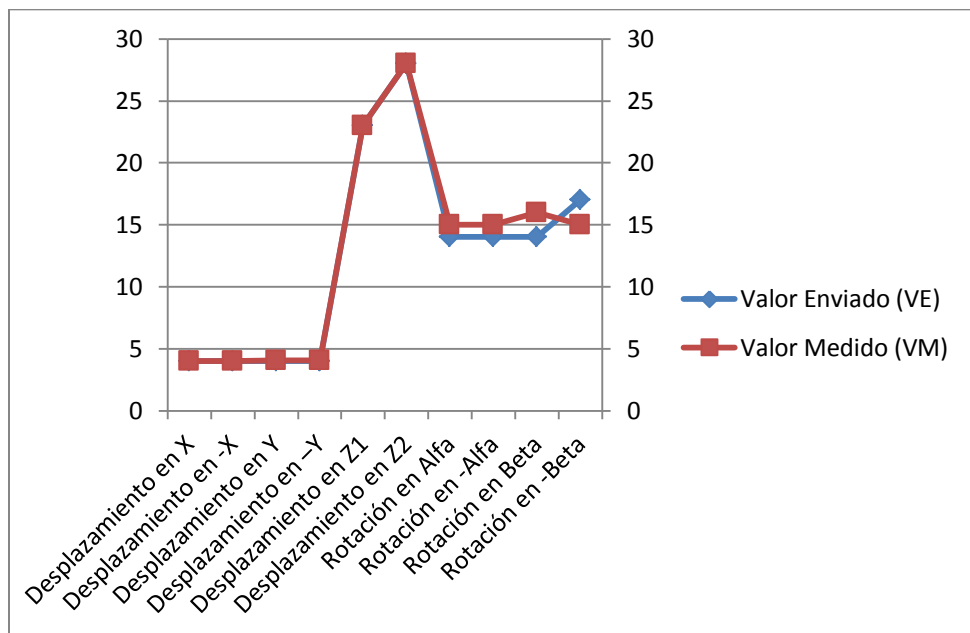
**Figura. 100 Grafica de Comparación entre el VE y VM de La Plataforma Controlada por Gestos**

|                                 | <b>Valor<br/>Enviado<br/>(VE)</b> | <b>Valor<br/>Medido<br/>(VM)</b> | <b>Error<br/>Absoluto<br/>(EA)<br/> VM-VE </b> | <b>Error<br/>Relativo<br/>(ER)<br/>EA/VE</b> | <b>Porcentaje<br/>de Error<br/>(PE)<br/>ER*100</b> |
|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Desplazamiento<br/>en X</b>  | 4                                 | 4                                | 0                                              | 0                                            | 0                                                  |
| <b>Desplazamiento<br/>en -X</b> | 4                                 | 4                                | 0                                              | 0                                            | 0                                                  |
| <b>Desplazamiento<br/>en Y</b>  | 4                                 | 4.05                             | 0.05                                           | 0.0125                                       | 1.245                                              |
| <b>Desplazamiento<br/>en -Y</b> | 4                                 | 4.06                             | 0.06                                           | 0.015                                        | 1.5                                                |
| <b>Desplazamiento<br/>en Z1</b> | 23                                | 23                               | 0                                              | 0                                            | 0                                                  |
| <b>Desplazamiento<br/>en Z2</b> | 28                                | 28                               | 0                                              | 0                                            | 0                                                  |
| <b>Rotación en<br/>Alfa</b>     | 14                                | 15                               | 1                                              | 0.0714                                       | 7.14                                               |
| <b>Rotación en<br/>-Alfa</b>    | 14                                | 15                               | 1                                              | 0.0714                                       | 7.14                                               |
| <b>Rotación en<br/>Beta</b>     | 14                                | 16                               | 2                                              | 0.1428                                       | 14.28                                              |
| <b>Rotación en<br/>-Beta</b>    | 17                                | 15                               | 2                                              | 0.1176                                       | 11.76                                              |
| <b>Rotación en<br/>Gama</b>     | -                                 | -                                | -                                              | -                                            | -                                                  |
| <b>Rotación en<br/>-Gama</b>    | -                                 | -                                | -                                              | -                                            | -                                                  |

**Tabla 20. Calculo del Error de la Plataforma Manipulada Mediante Datos Ingresados Por el teclado**

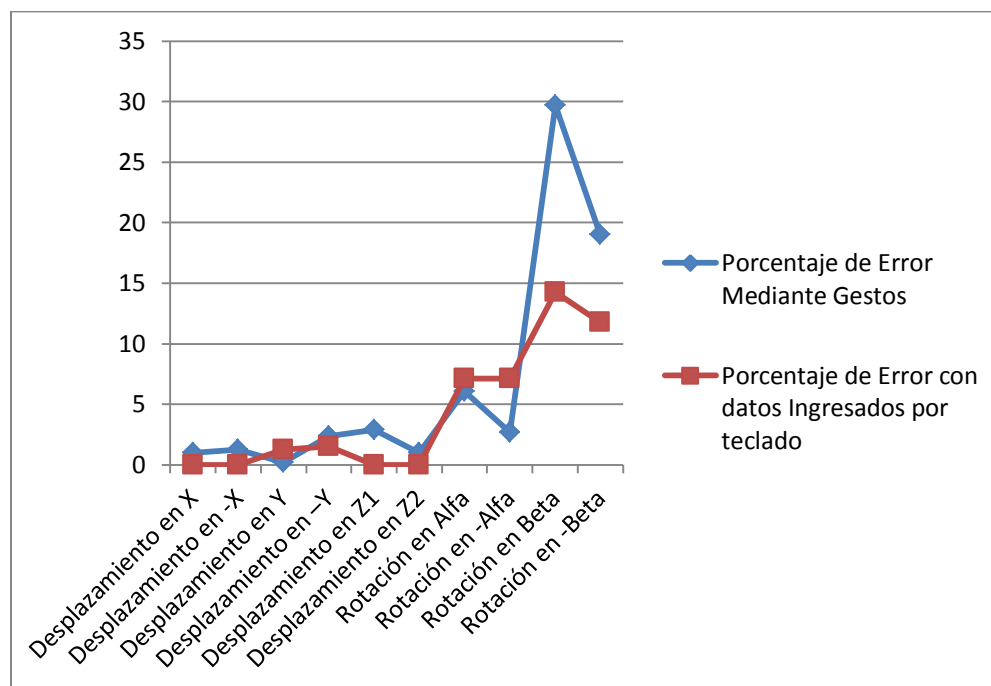


**Figura. 101 Grafica del Error Porcentual de La Plataforma Controlada Mediante datos ingresados por el Teclado**



**Figura. 102 Grafica De comparación del VE Y VM de La Plataforma Controlada Mediante datos ingresados por el Teclado**

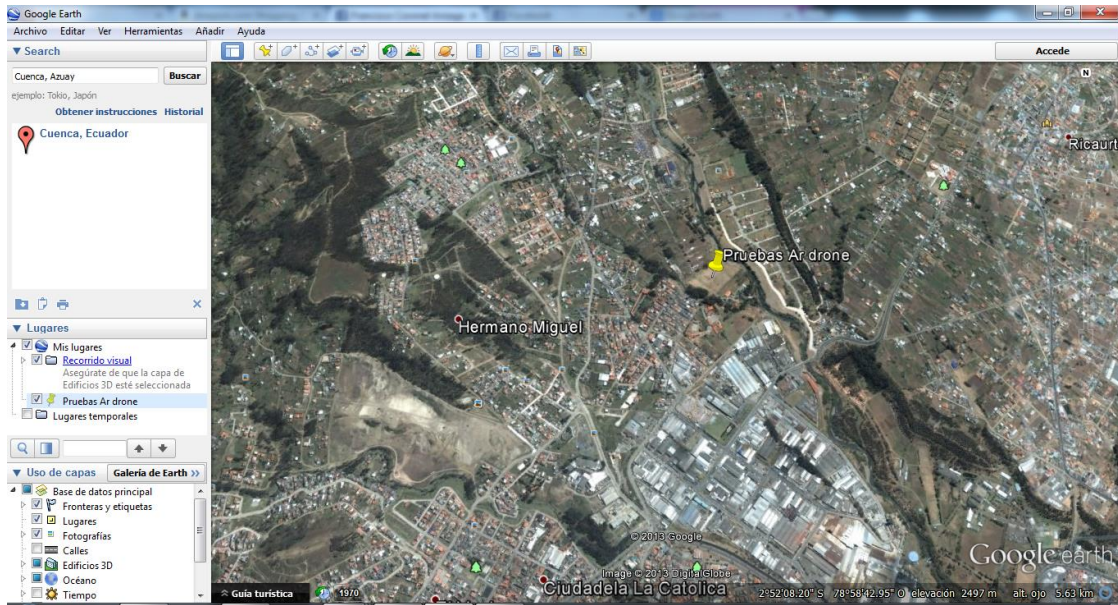
La Figura 103 muestra una gráfica comparativa en la cual se puede apreciar el porcentaje de error de la plataforma controlada mediante los gestos de la mano y el porcentaje de error de la plataforma controlada mediante el ingreso de datos por el teclado.



**Figura. 103** Grafica comparativa entre el PE Mediante gestos y el PE con datos ingresados desde el teclado

### 4.3 Pruebas de Funcionamiento Vehículo Aéreo No tripulado

Para las pruebas de funcionamiento del Ar Drone se buscó un espacio abierto el cual permitiera realizar todos los movimientos posibles sin comprometer la integridad del equipo, el lugar elegido se muestra en la figura (104)



**Figura 104. Posicionamiento global del lugar de pruebas del Drone con Google Earth<sup>10</sup>**

En el respaldo en digital de esta tesis se encuentra el video en donde se realizaron las pruebas de funcionamiento del Vehículo aéreo no tripulado.

También se realizaron pruebas de funcionamiento en áreas urbanas la **figura 105** corresponde a una captura de un video realizado en los patios de la Universidad Politécnica Salesiana.



**Figura 105. Captura de video de prueba de funcionamiento en una área urbana**

<sup>10</sup> **Google Earth.-** Es un programa informático que muestra un globo virtual que permite visualizar múltiple cartografía, con base en la fotografía satelital.[22]

# CONCLUSIONES

El Control de una plataforma para simulación de vuelo resulto ser un procedimiento complejo, debido a su modelamiento matemático de Cadena Cinemática cerrada como se expuso en esta tesis; es por eso que para su elaboración se optó por procesos matemáticos generalizados y comprobados que faciliten su cálculo y elaboración.

Para el Diseño de la plataforma se siguió un procedimiento previamente establecido, que asegure la culminación de la misma; desde el boceto en Papel, hasta la simulación 3D cada paso proporcionaba datos útiles y también inconvenientes a tomar en consideración al momento de diseñar, controlar y construir la plataforma.

La Plataforma Stewart Como Simulador de vuelo, al poseer 6 grados de libertad, resulta ser una herramienta primordial al momento de realizar prácticas ya que puede tomar cualquier posición posible que ocurriese en un Vuelo Real.

Las Pruebas de Funcionamiento permitieron calcular el error en la posición existente al momento de operarla con los gestos de la mano. El Error porcentual es inferior al 5% en la mayoría de los casos a excepción del ángulo Beta en el que llega casi al 30% como se puede observar en la figura 100, esto es debido a que en este ángulo en específico a la plataforma se la llevo a su límite de área de trabajo, en donde por sus características físicas le es imposible tomar ciertas posiciones y en consecuencia aumentar el error.

Las Pruebas de funcionamiento controlando a la plataforma mediante Gestos presentaron un porcentaje mayor de error en comparación con el control de la plataforma mediante los datos ingresados por el teclado (**figura 103**), esto se debe a que la mano no puede situarse en un solo plano o ángulo de rotación aumentando así el error calculado

La Respuesta de la plataforma es prácticamente en Tiempo Real como se pudo constatar en las pruebas realizadas, por lo cual no se necesitó controlador alguno; tampoco se necesitó realizar pruebas de torsión ni aceleración debido a que la plataforma se desarrolló con fines investigativos más no Industriales.

La Plataforma como simulador de Vuelo para el Vehículo Aéreo no Tripulado permite al operador sin ningún tipo de experiencias Adaptarse a la tecnología de Control Por Gestos y conocer las diferentes posiciones que tomara el Drone al momento de realizar el vuelo.

Las pruebas de funcionamiento realizadas con el Vehículo Aéreo se desarrollaron en un campo abierto para poder manipularlo a voluntad, dado que el Drone si bien posee controladores para estabilizarlo, al momento de operarlo con gestos es sumamente complicado y en un espacio cerrado pueden ocurrir colisiones que lo afecten gravemente.

El proyecto realizado constó de dos partes: El control del simulador de vuelo (Plataforma) y el control del vehículo aéreo no tripulado; si bien se logró cumplir con el objetivo de Operar el Cuadricóptero únicamente con gestos de las manos, en el transcurso de la investigación se pudo constatar que al ser el AR DRONE un vehículo aéreo diseñado para uso didáctico y no para uso

industrial, era muy difícil de operar en situaciones de alto riesgo como incendios, inundaciones, deslaves por nombrar algunos; recomendando así para futuros proyectos contar con un equipo más robusto y diseñado para estos fines.

Para poder operar el Cuadricóptero con Gestos de la mano se recomienda practicar en campos abiertos y tomar en consideración la velocidad del viento y la inercia propia del Equipo al momento de cambiar drásticamente de dirección.

Algunos aspectos a considerar al momento de operar el Cuadricóptero para futuros proyectos son los que se describen a continuación:

1. El Tiempo de duración de las baterías es demasiado corto, este aspecto se debe de tomar muy en consideración al momento de realizar vuelos en lugares de difícil acceso, ya que el equipo puede quedar en lugares en donde no se lo pueda recuperar.
2. El alcance del Drone está limitado por su conexión WIFI a 50 metros aproximadamente en espacio abierto.
3. Las ráfagas de viento verticales perjudican considerablemente el vuelo del Cuadricóptero, recomendando en este caso no iniciar el dispositivo.
4. Cuando se vuela en espacios abiertos amplios es recomendable utilizar la carcasa pequeña, dado que permite el mejor control del dispositivo
5. La altura máxima predeterminada del dispositivo es de 3mñ en el caso de que se necesite volar a mas altitud, en la configuración del equipo se puede cambiar a la altura que uno desee.

El Control Por Gestos al ser una tecnología relativamente nueva en nuestro medio, no ha sido muy explorado ni aprovechado como debería, se espera que con esta tesis se incentive más a los alumnos y profesores de esta universidad a ahondar más en este tema que a además de ser muy interactiva tiene una infinidad de aplicaciones aun por desarrollar.



## **BIBLIOGRAFIA**

**1. Unidad de estadísticas y evaluación ECU911 centro zonal Austro, Disponible: Junio 2013**

**2. Desastres naturales, Disponible Julio 2013**

<http://www.bomberos.gob.ec/informacion-tecnica/Los-Incendios-Forestales/35>

**3. Tipos de búsqueda y rescate, Disponible Junio 2013**

<http://www.sisman.utm.edu.ec/libros/FACULTAD%20DE%20CIENCIAS%20DE%20LA%20SALUD/CARRERA%20DE%20PARAM%C3%89DICO/02/Practica%20en%20accidente%20y%20rescate/BUSQUEDA%20Y%20RESCATE.pdf>

**4. Leap Motion, Disponible Marzo 2013:**

[http://translate.google.com.ec/translate?hl=es-419&sl=en&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Leap\\_Motion&prev=/search%3Fq%3Dleap%2Bmotion%26lr%3D%26newwindow%3D1%26sa%3DX%26biw%3D1366%26bih%3D667%26tbs%3Dlr:lang\\_1es-419](http://translate.google.com.ec/translate?hl=es-419&sl=en&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Leap_Motion&prev=/search%3Fq%3Dleap%2Bmotion%26lr%3D%26newwindow%3D1%26sa%3DX%26biw%3D1366%26bih%3D667%26tbs%3Dlr:lang_1es-419)

**5 Imagen Leap Motion, Disponible Julio 2013**

[https://www.google.com.ec/search?q=leap+motion&lr=&newwindow=1&tbs=lr:lang\\_1es-](https://www.google.com.ec/search?q=leap+motion&lr=&newwindow=1&tbs=lr:lang_1es-)

**6. Ar- Drone Parrot, Disponible Marzo 2013**

<http://ardrone-2.es/wp-content/uploads/2012/04/especificaciones-ar-drone-2-2.jpg>

**7. Imagen Ar- Drone, Disponible Marzo 2013**

[http://www.google.com.ec/search?q=ar+drone&hl=es&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=6RJtUbiqBZSc9QSDp4HAAQ&sqi=2&ved=0CAcQ\\_AUoAQ&biw=1366&bih=667#imgsrc=5pq9Cqjs3WlvHM%3A%3B1a2MdiG5Js1frM%3Bhttp%253A%252F%252Fblog.fnac.es%252Fwpcontent%252Fuploads%252F2010%252F11%252FParrot.AR-Drone-2.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fblog.fnac.es%252Fexperto%252Fparrot-ar-drone%252F%3B600%3B316](http://www.google.com.ec/search?q=ar+drone&hl=es&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=6RJtUbiqBZSc9QSDp4HAAQ&sqi=2&ved=0CAcQ_AUoAQ&biw=1366&bih=667#imgsrc=5pq9Cqjs3WlvHM%3A%3B1a2MdiG5Js1frM%3Bhttp%253A%252F%252Fblog.fnac.es%252Fwpcontent%252Fuploads%252F2010%252F11%252FParrot.AR-Drone-2.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fblog.fnac.es%252Fexperto%252Fparrot-ar-drone%252F%3B600%3B316)

**8. Servomotores, Disponible Noviembre 2013**

[http://www.dynamoelectronics.com/dynamo-tienda-virtual.html?page=shop.product\\_details&category\\_id=110&flypage=dynamo.tpl&product\\_id=193](http://www.dynamoelectronics.com/dynamo-tienda-virtual.html?page=shop.product_details&category_id=110&flypage=dynamo.tpl&product_id=193)

## **9. FPGA, Disponible Noviembre 2013**

[https://www.google.com.ec/search?q=spartan+3e+starter+kit+adc&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=fFeCUtbhGM21kAed8IH4DQ&ved=0CAcQ\\_AUoAQ&biw=1360&bih=587#facrc=\\_&imgdii=aF4q9Qrn1B6dUM%3A%3Bb0JkRe67yOYsWM%3BaF4q9Qrn1B6dUM%3A&imgsrc=aF4q9Qrn1B6dUM%3A%3BzEKtMtBq8ZZBjM%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.linear.com.cn%252Fimage%252FSpartan%2525203%252520Generation.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.linear.com.cn%252Fdesigntools%252Freference\\_design%252Fxilinx.php%3B574%3B590](https://www.google.com.ec/search?q=spartan+3e+starter+kit+adc&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=fFeCUtbhGM21kAed8IH4DQ&ved=0CAcQ_AUoAQ&biw=1360&bih=587#facrc=_&imgdii=aF4q9Qrn1B6dUM%3A%3Bb0JkRe67yOYsWM%3BaF4q9Qrn1B6dUM%3A&imgsrc=aF4q9Qrn1B6dUM%3A%3BzEKtMtBq8ZZBjM%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.linear.com.cn%252Fimage%252FSpartan%2525203%252520Generation.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.linear.com.cn%252Fdesigntools%252Freference_design%252Fxilinx.php%3B574%3B590)

## **10. Comunicación WiFi, Disponible Agosto 2013**

[http://es.wikipedia.org/wiki/Universal\\_Serial\\_Bus](http://es.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus)

## **11. Comunicación USB, Disponible Agosto 2013**

<http://www.aulaclie.es/articulos/wifi.html>

**12.”Fundamentos de Robótica”,** Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñin, Carlos Balaguer, Rafael Aracil, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, MC-GRAW HILL.

## **13. Aplicaciones Actuales de robots Paralelos, Disponible Noviembre 2013**

<http://www.imem.unavarra.es/isidro/articles/Zabalza-Cuzco.pdf>

**14. “Diseño e Implementación de una Plataforma de Stewart”,** John Andrés Gómez Portilla, José Vicente Guacaneme González, UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

## **15. Ángulos de Euler, Disponible Noviembre 2013**

[http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81ngulos\\_de\\_Euler](http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81ngulos_de_Euler)

**16.”Fundamentos de Robótica”,** Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñin, Carlos Balaguer, Rafael Aracil, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, MC-GRAW HILL.

## **17. Partes Mecánicas Definición, Disponible Noviembre 2013**

<http://diccionario.motorgiga.com/diccionario/muelle-definicion-significado/gmx-niv15-con194898.htm>

## **18. Generadores de Frecuencia, Disponible Noviembre 2013**

[http://www.xilinx.com/products/boards/s3estarter/files/s3esk\\_frequency\\_generator.pdf](http://www.xilinx.com/products/boards/s3estarter/files/s3esk_frequency_generator.pdf)

## **19. Guía Matlab, Disponible Noviembre 2013**

<http://www.mathworks.com/products/simulink/index.html?sec=apps>

**20. Instalación Leap Motion, Disponible Julio 2013**

<https://www.leapmotion.com/setup>

**21. Package Manager, Disponible Julio 2013**

<http://jki.net/vipm/download>

**22. Google Earth, Disponible Diciembre 2013**

[http://es.wikipedia.org/wiki/Google\\_Earth](http://es.wikipedia.org/wiki/Google_Earth)

# ANEXOS

## ANEXO 1

### CALCULO DE LA CINEMATICA INVERSA MATLAB

alfa=(pi\*(-alfa1))/180;

beta=(pi\*(-beta1))/180;

gama=(pi\*(gama1))/180;

P=3; %ESLABON MENOR R en la figura

L=26; %ESLABON MAYOR L en la figura

%MATRIZ DE TRANSFORMACION HOMOGENEA

%PARA SACAR LA MATRIZ HOMOGENEA PRIMERO NECESITAMOS A MATRIZ DE ROTACION

R11= (cos(beta)\*cos(gama))+(sin(alfa)\*sin(beta)\*sin(gama));

R12= -(cos(beta)\*sin(gama))+(sin(alfa)\*sin(beta)\*sin(gama));

R13=cos(alfa)\*sin(beta);

R21=cos(alfa)\*sin(gama);

R22=cos(alfa)\*cos(gama);

R23=-sin(alfa);

R31=-(sin(beta)\*cos(gama))+(sin(alfa)\*cos(beta)\*sin(gama));

R32=(sin(beta)\*sin(gama))+(sin(alfa)\*cos(beta)\*cos(gama));

R33=cos(alfa)\*cos(beta);

%MATRIZ DE ROTACION

Rtot=[R11 R12 R13;R21 R22 R23;R31 R32 R33]

%MATRIZ DE TRANSFORMACION HOMOGENEA

T=[R11 R12 R13 -X;R21 R22 R23 Y;R31 R32 R33 Z;0 0 0 1]

%UNA VEZ QUE TENEMOS LA MATRIZ HOMOGENE PODEMOS CALCULAR  
LOS NUEVOS PUNTOS

%TRANSLADADOS Y ROTADOS, PARA ESO PRIMERO INGRESAMOS Ti

%DONDE i=1,2,3 PERTENECIENTES A CADA VERTICE DE LA PLATAFORMA

%cinematica inversa prueba 3

a=20;

t1=[6.63;11.5;0;1];

t2=[-13.27;0;0;1];

t3=[6.63;-11.5;0;1];

%PARA ENCONTRAR LOS NUEVOS PUNTOS TRANSLADADOS Y ROTADOS  
MULTIPLICAMOS

%LA MATRIZ DE TRANSFORMACION HOMOGENEA POR CADA PUNTO

%cinematica inversa prueba 3

[t11]=T\*t1

[t22]=T\*t2

[t33]=T\*t3

% CINEMATICA INVERSA PRUEBA 3

b=20;

d=6;

%q1

%con la ecuaciones de longitud expuestas en el capitulo se procede a calcular las

%distancias de los eslabones y el angulo de cada motor

$$l1=((t11(1,1)-(d/(2*(3)^{(1/2)}))-(b/(3)^{(1/2)}))^2+(t11(2,1)-(d/2))^2+(t11(3,1))^2)^{(1/2)}$$

l11=l1-23.9;

$$q1=((l11*90)/7.4)*10$$

%q2

$$l2=((t11(1,1)-(d/(2*(3)^{(1/2)})))+(b/(2*(3)^{(1/2)})))^2+(t11(2,1)-(d/2)-(b/2))^2+(t11(3,1))^2)^{(1/2)}$$

$$l22=l2-23.9;$$

$$q22=((l22*90)/7.4)$$

$$q2=(180-q22)*10$$

$$\%q3$$

$$l3=((t22(1,1)+(d/(3)^{(1/2)})+(b/(2*(3)^{(1/2)})))^2+(t22(2,1)-(b/2))^2+(t22(3,1))^2)^{(1/2)}$$

$$l33=l3-23.9;$$

$$q3=((l33*90)/7.4)*10$$

$$\%q4$$

$$l4=((t22(1,1)+(d/(3)^{(1/2)})+(b/(2*(3)^{(1/2)})))^2+(t22(2,1)+(b/2))^2+(t22(3,1))^2)^{(1/2)}$$

$$l44=l4-23.9;$$

$$q44=((l44*90)/7.4)$$

$$q4=(180-q44)*10$$

$$\%q5$$

$$l5=((t33(1,1)-(d/(2*(3)^{(1/2)})))+(b/(2*(3)^{(1/2)})))^2+(t33(2,1)+(b/2)+(d/2))^2+(t33(3,1))^2)^{(1/2)}$$

$$l55=l5-23.9;$$

$$q5=((l55*90)/7.4)*10$$

$$\%q6$$

$$l6=((t33(1,1)-(d/(2*(3)^{(1/2)})))-(b/(3)^{(1/2)}))^2+(t33(2,1)+(d/2))^2+(t33(3,1))^2)^{(1/2)}$$

$$l66=l6-23.9;$$

$$q66=((l66*90)/7.4)$$

$$q6=(180-q66)*10$$