

**DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DE ESTABILIZACIÓN PARA UNA CÁMARA
PANORÁMICA**

JONATHAN NEIRA GONZÁLEZ
MILTON FABIAN MANRIQUE GODOY

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2014

**DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DE ESTABILIZACIÓN PARA UNA CÁMARA
PANORÁMICA**

JONATHAN NEIRA GONZÁLEZ
MILTON FABIAN MANRIQUE GODOY

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

Ing. Jorge Enrique Meneses Flórez

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

A Dios porque él sabe lo que nos conviene y si a veces las cosas no salen como uno quiere él nos fortalece. Porque ha reflejado su gran amor en mi hermosa familia de la que estoy orgulloso, y con sus enseñanzas me ha dado herramientas para enfrentar momentos difíciles.

A mi madre, porque nos enseñó cómo enfrentar de la vida e infundió grandes valores, porque ha entregado su vida a nosotros sus hijos, y porque sé que nadie me ama más que ella, este triunfo es por ella y para ella la amo con toda mi alma.

A mi padre por el amor y confianza que me brindan en todo momento.

A mi hermano Luis Alejandro por creer en mí en todo momento, por ser mi principal confidente y colaborador incondicional.

A mi compañero de proyecto Milton por ser paciente, positivo y tolerante.

A mis amigos Leonardo, Angie, Brayan y Alexandra que los considero mis hermanos, y serán mis panas en todo lo que emprenda de aquí en adelante.

AGRADECIMIENTO

A la universidad industrial de Santander.

Al grupo de electrónica y robótica avanzada (ERA) por brindarnos su asesoría.

Al profesor jorque Enrique Meneses por confiar en nosotros e incentivarnos a la investigación y al desarrollo de temas novedosos en la UIS.

Al grupo de grupo de Geomática, gestión y optimización de sistemas.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 22 |
| 1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 23 |
| 1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA | 23 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA..... | 24 |
| 1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO | 25 |
| 1.3.1 Objetivo general | 25 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 25 |
| 2 REQUERIMIENTOS INICIALES, GENERACION DE ALTERNATIVAS Y QFD | 27 |
| 2.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO | 27 |
| 2.2 REQUERIMIENTOS | 27 |
| 2.2.1 Requerimiento de seguridad..... | 27 |
| 2.2.2 Requerimiento de funcionalidad | 28 |
| 2.2.3 Requerimientos de apariencia | 29 |
| 2.2.4 Requerimiento de costo..... | 29 |
| 2.2.5 Requerimientos de manufactura..... | 30 |
| 2.3 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS | 31 |
| 2.4 GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN | 32 |
| 2.4.1 Giroestabilizador..... | 32 |
| 2.4.2 Plataforma Stewart | 33 |
| 2.4.3 Suspensión activa | 34 |
| 2.4.4 Suspensión pasiva | 35 |
| 2.5 DESPLIEGUE DE FUNCIÓN DE CALIDAD QFD | 35 |
| 2.6 SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA | 37 |
| 2.6.1 Matriz de selección de concepto método Pahl Beitz | 38 |
| 2.6.2 Matriz de selección de concepto método Pugh | 39 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | DESCRIPCIÓN GENERAL | 40 |
| 3.1 | MODELO GRÁFICO..... | 41 |
| 3.2 | MODELO ANALÍTICO | 42 |
| 3.3 | MODELO FÍSICO | 43 |
| 4 | ANÁLISIS FUNCIONAL DEL ESTABILIZADOR..... | 47 |
| 4.1 | DIRECCIÓN DE ESTABILIZACIÓN | 47 |
| 4.1.1 | Cabeceo (pitch) | 48 |
| 4.1.2 | Alabeo (roll) | 48 |
| 4.1.3 | Guiñado (yaw) | 48 |
| 5 | MODELO MATEMÁTICO..... | 49 |
| 6 | DISEÑO DETALLADO CAD Y CAE DEL ESTABILIZADOR | 55 |
| 6.1 | DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD)..... | 55 |
| 6.1.1 | Arquitectura del diseño | 56 |
| 6.1.2 | Medición distancia focal..... | 59 |
| 6.2 | INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR (CAE) | 60 |
| 6.2.1 | Criterio máximo de tensión de Von Mises | 61 |
| 6.2.2 | Resultados y trazados del torque y la potencia | 70 |
| 7 | SIMULACIÓN DINÁMICA DEL ESTABILIZADOR | 72 |
| 7.1 | SIMMECHANICS..... | 73 |
| 7.2 | DESARROLLO DE LA INTERFAZ SOLIDWORKS – SIMULINK | 74 |
| 7.3 | DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES BLOQUES..... | 76 |
| 7.3.1 | Machine Environment..... | 76 |
| 7.3.2 | RootGround..... | 77 |
| 7.3.3 | Weld | 77 |
| 7.3.4 | Ensan | 77 |
| 7.3.5 | Custom joint..... | 78 |
| 7.3.6 | Revolute | 79 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.4 | SISTEMA DE BLOQUES..... | 79 |
| 7.5 | DESARROLLO DE BLOQUES PARA LA SUPERFICIE DE MOVIMIENTO | 80 |
| 7.6 | DESARROLLO DE BLOQUES PARA LA VISUALIZACIÓN DE MOVIMIENTO..... | 82 |
| 7.7 | DESARROLLO DE BLOQUES PARA LA CAPTURA DE DATOS | 83 |
| 7.8 | INICIO Y CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN | 84 |
| 7.9 | MUESTREO DE DATOS | 85 |
| 8 | INTERFAZ HOMBRE- MÁQUINA (HMI)..... | 88 |
| 8.1 | DESARROLLO DEL VI PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 89 |
| 8.2 | DESARROLLO DEL SUBVI PARA EL CÁLCULO DE LOS ÁNGULOS EULER..... | 90 |
| 8.3 | DESARROLLO DEL VI PARA GRAFICAR LA FIGURA 3D | 94 |
| 8.4 | DESARROLLO DEL VI PARA LA VISUALIZACIÓN DE LA ORIENTACIÓN | 95 |
| 8.5 | DESARROLLO DEL VI PARA EL CONTROL DE ESTABILIZACIÓN | 96 |
| 8.6 | DESARROLLO DEL SUBVI PARA LA COMUNICACIÓN SERIAL CON LA PLACA ARDUINO..... | 97 |
| 8.7 | PROGRAMACIÓN EN ARDUINO | 98 |
| 8.7.1 | Desarrollo del programa Arduino..... | 100 |
| 9 | CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO | 102 |
| 9.1 | SELECCIÓN DE COMPONENTES | 102 |
| 9.1.1 | Sensores | 103 |
| 9.1.2 | Cable FTDI | 106 |
| 9.1.3 | Arduino MEGA 2560..... | 107 |
| 9.1.4 | Servomotores | 107 |
| 9.1.5 | Base estructural de la maquina | 108 |
| 9.2 | DISEÑO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL | 109 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 9.3 | CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE..... | 110 |
| 9.3.1 | Control servomotor | 111 |
| 9.3.2 | Conexión cable FTDI | 112 |
| 9.3.3 | Conexión Arduino | 113 |
| 9.4 | INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN, OPERACIÓN PARA EL PROTOTIPO EXPERIMENTAL | 114 |
| 10 | EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO..... | 116 |
| 10.1 | DEFINICIÓN DE LA CAPACIDAD DE GIRO..... | 116 |
| 10.1.1 | Medición de los ángulos generales por el servomotor..... | 117 |
| 10.2 | RESPUESTA EN EL TIEMPO DEL SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN EN CONTROL DE LAZO ABIERTO | 118 |
| 10.3 | RESPUESTA EN EL TIEMPO DEL SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN EN CONTROL DE LAZO CERRADO | 120 |
| 11 | ECONOMÍA Y DESARROLLO DEL PROYECTO | 124 |
| 11.1 | MODELO DE COSTOS DEL PROYECTO | 124 |
| 11.2 | DESARROLLO DEL PROYECTO | 126 |
| 12 | CONCLUSIONES..... | 127 |
| 13 | RECOMENDACIONES | 128 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 130 |
| | ENLACES..... | 131 |
| | ANEXOS..... | 132 |

TABLA DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Estructura básica de un giroestabilizador. | 32 |
| Ilustración 2. Modelos básicos de la Plataforma Stewart. | 33 |
| Ilustración 3. Sistema simplificado de una plataforma de estabilización de suspensión activa. | 34 |
| Ilustración 4. Sistema de estabilización de la plataforma de estabilización con suspensión pasiva. | 35 |
| Ilustración 5. Metodología de diseño de la plataforma de estabilización. | 40 |
| Ilustración 6. Diseño gráfico y componentes. | 41 |
| Ilustración 7. Funcionamiento del diseño. | 41 |
| Ilustración 8. Esquema simplificado de la plataforma de estabilización. | 42 |
| Ilustración 9. a) Prototipo SolidWorks, b) programación en Simulink c) Prototipo en Simulink. | 43 |
| Ilustración 10. Modelo físico SolidWorks y real. | 43 |
| Ilustración 11. Sensor de orientación con comunicación serial, IMU CHR-UM6. | 44 |
| Ilustración 12. Ilustración simplificada del Hardware del proyecto. | 45 |
| Ilustración 13. Prototipo experimental de la plataforma de estabilización. | 46 |
| Ilustración 14. Comprensión básica del sistema. | 47 |
| Ilustración 15. Comprensión ilustrativa de los ángulos de navegación. | 48 |
| Ilustración 16. Comprensión ilustrativa del sistema. | 48 |
| Ilustración 17. Esquema simplificado de la plataforma de estabilización. | 49 |
| Ilustración 18. Modelo CAD de la plataforma de estabilización. | 55 |
| Ilustración 19. Modelo CAD con un soporte de amortiguación. | 57 |
| Ilustración 20. Esquema explosión del sistema. | 57 |
| Ilustración 21. Giro roll. | 58 |
| Ilustración 22. Giro pitch. | 58 |
| Ilustración 23. Modelo de la plataforma de estabilización explosión. | 59 |
| Ilustración 24. Vistas modelo plataforma de estabilización. | 59 |
| Ilustración 25. Determinación de la visión angular del modelo CAD. | 59 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 26. Forma de la malla. | 61 |
| Ilustración 27. Distribución de fuerzas. | 62 |
| Ilustración 28. Trazado del torque, potencia y velocidad angular para el motor 1. | 70 |
| Ilustración 29. Trazado del torque, potencia y velocidad angular para el motor 2. | 71 |
| Ilustración 30. Entorno Simulink Matlab. | 72 |
| Ilustración 31. Principio del modelo para la simulación en Simulink. | 74 |
| Ilustración 32. Desarrollo para el inicio, de la interfaz SolidWorks -Simulink. | 75 |
| Ilustración 33. Programación en bloques Simulink. | 75 |
| Ilustración 34. Análisis de bloques de Simulink. | 76 |
| Ilustración 35. Configuración del bloque machine Environment. | 76 |
| Ilustración 36. Configuración del bloque RootGround. | 77 |
| Ilustración 37. Configuración del bloque Weld. | 77 |
| Ilustración 38. Configuración del bloque Ensan para la representación del cuerpo rígido. | 78 |
| Ilustración 39. Bloques Custom joint y Revolute. | 78 |
| Ilustración 40. Configuración del Custom joint. | 78 |
| Ilustración 41. Configuración del bloque Revolute. | 79 |
| Ilustración 42. Sistema de bloques. | 79 |
| Ilustración 43. Configuración de bloques para Counter Limited. | 80 |
| Ilustración 44. Generación de excitación para Simulink. | 80 |
| Ilustración 45. Subsistema de movimiento. | 81 |
| Ilustración 46. Configuración del subsistema de superficie al movimiento del motor. | 81 |
| Ilustración 47. Configuración del subsistema del movimiento de los motores al programa. | 82 |
| Ilustración 48. Programa de bloque completo. | 82 |
| Ilustración 49. Bloques de visualización del sistema. | 83 |
| Ilustración 50. Programa completo (visualización, captura de datos y movimiento). | 83 |
| Ilustración 51. Bloques para captura de datos. | 84 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 52. Animación de la simulación. | 84 |
| Ilustración 53. Graficas de posición en el tiempo de los motores. | 85 |
| Ilustración 54. Configuración para la captura de datos (Body sensor, to workspace). | 85 |
| Ilustración 55. Entorno de la captura de datos..... | 86 |
| Ilustración 56. Posición de los motores..... | 87 |
| Ilustración 57. Velocidad de los motores. | 87 |
| Ilustración 58. Aceleración de los motores. | 87 |
| Ilustración 59. Entorno programa diseñado en LabVIEW. | 88 |
| Ilustración 60. Entorno programación en diagrama de bloque Labview..... | 88 |
| Ilustración 61. Detalles de la recepción de datos en Labview..... | 89 |
| Ilustración 62. Detalles del envió de datos en Labview..... | 90 |
| Ilustración 63. Programación con Match pattern para separación de la trama datos. | 91 |
| Ilustración 64. Separación del string de datos. | 92 |
| Ilustración 65. Tratamiento de datos de cada uno de los ángulos. | 92 |
| Ilustración 66. Algoritmo para el tratamiento de datos en LabVIEW. | 93 |
| Ilustración 67. Programación necesaria para definir el cuadro 3D..... | 94 |
| Ilustración 68. Cuadro de muestreo 3D. | 95 |
| Ilustración 69. Programación en bloques para definir las dimensiones del cuadro 3D. | 95 |
| Ilustración 70. Indicador de actitud para mostrar los ángulos Roll y el Pitch. | 96 |
| Ilustración 71. Panel frontal del control de los servomotores..... | 96 |
| Ilustración 72. Diagrama de bloques del control de los servomotores..... | 97 |
| Ilustración 73. Panel frontal de la comunicación serial con la Arduino..... | 98 |
| Ilustración 74. Diagrama de bloque para armar la trama de datos de la Arduino. . | 98 |
| Ilustración 75. Algoritmo para el tratamiento de datos en Arduino..... | 99 |
| Ilustración 76. Prototipo experimental de la plataforma de estabilización..... | 102 |
| Ilustración 77. Sensor de orientación con comunicación serial, IMU CHR-UM6.´ | 104 |
| Ilustración 78. Interfaz de configuración de la IMU CHR-UM6..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 79. Cable FTDI para la comunicación serial. | 106 |
| Ilustración 80. Asignación de colores para los pines de comunicación..... | 106 |
| Ilustración 81. Placa Arduino MEGA 2560. | 107 |
| Ilustración 82. Modelo prototipo experimental..... | 110 |
| Ilustración 83. Ilustración simplificada del Hardware del proyecto. | 111 |
| Ilustración 84. Ancho de pulso según la posición. | 112 |
| Ilustración 85. Conexiones del hardware. | 112 |
| Ilustración 86. Plano detallado del Hardware del proyecto. | 114 |
| Ilustración 87: Interfaz serial Ch Robotics, configuración inicial. | 114 |
| Ilustración 88. Interfaz Ch Robotics, comandos de configuración..... | 115 |
| Ilustración 89. Inclinação máxima del ángulo Roll del prototipo experimental. ... | 116 |
| Ilustración 90. Inclinação máxima del ángulo Pitch del prototipo experimental.... | 117 |
| Ilustración 91. Error relativo de la medida tomada, con respecto al instrumento de referencia. | 118 |
| Ilustración 92. Respuesta dinámica de la inclinación Roll frente a señal en escalón, prueba 1..... | 119 |
| Ilustración 93. Respuesta dinámica de la inclinación Roll frente a una señal en escalon prueba 2. | 119 |
| Ilustración 94. Respuesta dinámica del ángulo Pitch frente a una señal en escalón prueba 3..... | 119 |
| Ilustración 95. Respuesta dinámica del ángulo Pitch frente a una señal en escalón prueba 4..... | 120 |
| Ilustración 96. Respuesta en el tiempo Roll (señal senoidal)..... | 121 |
| Ilustración 97. Respuesta en el tiempo Pitch (señal senoidal). | 121 |
| Ilustración 98. Respuesta en el tiempo Roll (señal senoidal)..... | 121 |
| Ilustración 99. Respuesta en el tiempo Pitch (señal senoidal). | 122 |
| Ilustración 100. Respuesta en el tiempo Roll (señal diente de sierra). | 122 |
| Ilustración 101. Respuesta en el tiempo Pitch (señal diente de sierra)..... | 122 |
| Ilustración 102. Respuesta en el tiempo Roll (señal triangular). | 123 |
| Ilustración 103. Respuesta en el tiempo Pitch (señal triangular). | 123 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Análisis de requerimientos. | 31 |
| Tabla 2. Matriz QFD. | 37 |
| Tabla 3. Análisis de concepto método Pahl Beitz. | 38 |
| Tabla 4. Calificación por desempeño del método Pahl Beitz. | 39 |
| Tabla 5. Análisis de conceptos método Pugh. | 39 |
| Tabla 6. Nomenclatura del modelo matemático. | 50 |
| Tabla 7. Especificaciones de ingeniería del diseño. | 54 |
| Tabla 8. Unidades del análisis. | 60 |
| Tabla 9. Análisis eje motor 1. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad. | 63 |
| Tabla 10. Análisis base cámara. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad. | 64 |
| Tabla 11. Análisis eje motor 2. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad. | 64 |
| Tabla 12. Análisis base motor 2. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad. | 66 |
| Tabla 13. Análisis módulo de movimiento. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad. | 67 |
| Tabla 14. Análisis soporte. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad. | 68 |
| Tabla 15. Análisis base. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad. | 69 |
| Tabla 16. Estructura del paquete de datos de la IMU. | 90 |
| Tabla 17. Información de la trama de datos para el Arduino. | 98 |
| Tabla 18. Comparación de los algunos sensores de inclinación. | 103 |
| Tabla 19. Parámetros habilitados de la IMU. | 104 |
| Tabla 20. Servo motor Futaba S3003. | 108 |
| Tabla 21. Servo motor polulo MG946r. | 108 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 22. Matriz comparativa sobre el material de la estructura..... | 109 |
| Tabla 23. Tabla de costos generales del proyecto..... | 125 |
| Tabla 24. Desarrollo en periodos del proyecto..... | 126 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| ANEXO A.GENERACIÓN Y DESARROLLO DE PROYECTO (Ver archivo adjunto en el CD)..... | 133 |
| ANEXO B. MODELO CAD SOLIDWORKS (Ver archivo adjunto en el CD)..... | 133 |
| ANEXO C. SIMULACIÓN MATLAB - SOLIDWORKS (Ver archivo adjunto en el CD). | 133 |
| ANEXO D. HMI LABVIEW (Ver archivo adjunto en el CD). | 133 |
| ANEXO E. FOTOS CONEXIÓN (Ver archivo adjunto en el CD)..... | 133 |
| ANEXO F. DATASHEET DE SENSORES Y CONEXIONES (Ver archivo adjunto en el CD)..... | 133 |
| ANEXO G.VÍDEOS PLATAFORMA EXPERIMENTAL (Ver archivo adjunto en el CD). | 133 |

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DE ESTABILIZACIÓN PARA UNA CÁMARA PANORÁMICA¹

AUTORES:

JONATHAN NEIRA GONZÁLEZ

MILTON FABIAN MANRIQUE GODOY ²

PALABRAS CLAVE:

Estabilización, IMU, cámara.

DESCRIPCIÓN

El objetivo de este proyecto es realizar el diseño de una plataforma que permita estabilizar de forma independiente la estructura robótica donde está montada una cámara panorámica. Dicho diseño se encuentra a la vez montado sobre un vehículo móvil terrestre. La estabilización permite compensar y atenuar las variaciones de giros en dos ángulos que definen el movimiento del vehículo móvil, que son: pitch (Ángulo de elevación) y roll (Ángulo de alabeo). Para el cumplimiento objetivo de cada etapa se realizaron tareas específicas que contribuyeron en la eficacia del proceso, de tal modo que en cada etapa se efectuó lo siguiente.

DISEÑO CONCEPTUAL: Para la toma de decisiones sobre el desarrollo de la plataforma de estabilización, se tiene en cuenta, se evalúan varios conceptos para priorizar de manera rápida las características del producto que se pretende diseñar. Con ello se consigue ver los puntos fuertes y limitaciones que presentan las posibles alternativas.

DISEÑO DETALLADO: La generación del modelo CAD en SolidWorks permite visualizar virtualmente el diseño, analizar sus dimensiones y desarrollar un estudio de ingeniería para adaptarlo a las necesidades del cliente. La simulación comprende un modelo CAD y una interfaz de este diseño en Matlab para un estudio dinámico.

FABRICACIÓN Y ENSAMBLE: Para cumplir con el control de plataforma, se construye una plataforma experimental capaz de efectuar movimientos horizontales en dos grados de libertad. El sensor utilizado para detectar las variaciones de giros es una unidad de medición inercial o IMU que se comunica con un PC mediante comunicación UART. El acondicionamiento de datos, monitoreo de la posición y el control para ejecutar el movimiento de los actuadores (servomotores) se realiza en una interfaz de usuario desarrollada en LabVIEW.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de ingeniería físico – Mecánica. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Jorge Enrique Meneses Flórez.

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN OF A STABILIZATION PLATFORM FOR A PANORAMIC CAMERA³

AUTHOR:

JONATHAN GONZALEZ NEIRA
MILTON FABIAN MANRIQUE GODOY⁴

KEYWORDS:

Stabilization, IMU, camera.

DESCRIPTION

The objective of this project is to design a platform to stabilize independently robotic structure where the panoramic camera is, this design is placed on a ground mobile vehicle. Variations of spins are compensated and mitigated through stabilization in two angles defining the attitude of the moving vehicle, which are: pitch (elevation angle) and roll (bank angle). To fulfill target specific tasks at each stage contributing in process efficiency, such that at each stage was carried out as follows were performed.

CONCEPTUAL DESIGN: In making decisions about the development of the platform stabilization is taken into account, several concepts are evaluated to quickly prioritize product features you plan to draw. This is done to see the strengths and limitations of the alternatives.

DETAILED DESIGN: Generation of a CAD model in SolidWorks allows displaying virtually the design, analyzing its dimensions and developing an engineering study to adapt it to customer needs. The simulation includes a CAD model and an interface of this design in Matlab for a dynamic study.

MANUFACTURING & ASSEMBLY: To comply with the control platform, an experimental platform capable of performing horizontal movements in two degrees of freedom is constructed to meet the platform control requirements. The sensor used to detect variations of spins is an inertial measurement unit, or IMU communicated with a PC via UART communication. The data conditioning, position monitoring and actuators movement execution control (servomotors) is performed in a user interface developed in LabVIEW.

³ Degree Work

⁴ Physic-mechanical Faculty. School of mechanical Engineering. Project director: Jorge Enrique Meneses Flórez.

INTRODUCCIÓN

Gracias a la incorporación de nuevas características tecnológicas, que permiten tener en la actualidad sensores con prestaciones que difícilmente eran posibles en el pasado. Los acelerómetros y los giróscopos hacen parte de esta clase de dispositivos pertenecientes a la nueva generación de electrónica. Es así como, a partir de las funciones incorporadas ya sea en unidades separadas o conjuntas, se han logrado desarrollos novedosos como las unidades de medición inercial (IMU por sus siglas en inglés) que hoy en día se encuentran en aplicaciones de diversas áreas como el entrenamiento, la investigación biomédica, la robótica, entre otras.

Un área de gran dinamismo investigativo y tecnológico que saca provecho de dispositivos como las IMU es la de plataformas de estabilización. En este trabajo se presenta el diseño e implementación de una plataforma experimental que servirá de base para el desarrollo de una plataforma de estabilización para una cámara panorámica. En este contexto y en particular al poner una cámara fijamente sobre la superficie de un automóvil; es normal que las imágenes que esta ofrezca se vean afectadas por la posición en la que se encuentre el automóvil en un momento determinado ya que si esta se encuentra en un soporte rígido, obviamente el ángulo de visión dependerá de la posición del mismo automóvil. De acuerdo a esto, se pretende implementar una plataforma giroestabilizada por medio de la IMU, que permita hacer correcciones automáticas de tal forma que se mantenga horizontalmente ante cualquier tipo de perturbación del medio. Para lograr este cometido se ha elegido una IMU que se apoya en un giróscopo y un acelerómetro para determinar con mayor precisión ángulo de posición que corresponde a la inclinación del cuerpo sensado con un mayor grado de certeza; además los controles basados en giróscopos son de vital importancia en lo referente a plataforma de estabilización, ya que se usan para detectar y controlar los movimientos en los tres ángulos de orientación típicos. Estos movimientos se denominan técnicamente “pitch” (cabeceo), “yaw” (guiño) y “roll” (alabeo).

1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Identificación del problema

Ladybug3 es un sistema digital de alta resolución con seis cámaras de 12MP de la empresa canadiense *POINT GREY*⁵, que permiten recoger vídeo en un entorno panorámico. Esta es una solución ideal para aplicaciones que requieren de muy alta resolución, resistencia a la intemperie, conexión *Freire* directa o la capacidad de sincronización con otros dispositivos, en el cual se realizan tratamientos, análisis e interpretación de información geográfica, propio para realizar procesos integrales de Geomática⁶. El *grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas* ha adquirido este sistema digital y requiere que esté anclado a una camioneta 4X4, para que se desarrollen futuras exploraciones sobre el territorio santandereano.

La geografía santandereana está compuesto por terrenos abruptos, y en algunos casos, zonas pronunciadas, lo que puede ocasionar fallas en los componentes electrónicos y una imagen de poca calidad. Esta distorsión es debida a las continuas vibraciones a las que podría estar expuesta. Por esta razón, se optó por implementar una solución viable para proteger esta cámara de las vibraciones y, además, mantener la cámara en una posición óptima.

En consecuencia, para asegurar un funcionamiento continuo de la cámara de forma segura se deben especificar requerimientos restrictivos para un soporte como son:

- El soporte deberá contar con un dispositivo de estabilización mecánica.
- Las vibraciones no deberán ocasionar daños a la cámara.

⁵ GREY, P. (2012). *POINT GREY innovation in imaging*. Retrieved marzo 10, 2013, from http://www.ptgrey.com/products/ladybug3/ladybug3_360_video_camera.asp

⁶ El término «Geomática» está compuesto por dos ramas "GEO" (Tierra), y "MATICA" (Informática). Es decir, el estudio de la superficie terrestre a través de la informática (tratamiento automático de la información). Este término, nacido en Canadá, ya es parte de las normas de estandarización ISO.

- La cámara Ladybug3 es un componente que se podrá montar y desmontar en cualquier momento sin que esto afecte la seguridad de la misma.

1.2 Justificación del problema

Mantener una cámara totalmente inmóvil sobre un automóvil en movimiento es prácticamente imposible, ya que el más mínimo movimiento supone una imagen movida y desenfocada. En este proyecto de grado se diseña una plataforma de estabilización para la cámara panorámica que está siendo utilizada por el grupo de investigación Geomática de la escuela de ingeniería civil, lo que ayudaría a que cámara tenga un funcionamiento apropiada y de forma segura.

El diseño de este equipo se prefiere ante la compra del mismo en el mercado por tres razones principales:

- La dependencia del grupo de investigación Geomática de la escuela de ingeniería civil para con el proveedor en el momento de la realización de mantenimientos y/o cambios de componentes.
- La no existencia de un equipo en el mercado nacional que cumpla satisfactoriamente con las necesidades y requerimientos que este proyecto debe tener en el área de control, regulación de vibraciones y estabilización de la imagen.
- El elevado costo que este tipo de productos tiene en el mercado internacional.

El desarrollo de este proyecto de grado constituye un aporte importante al mejoramiento de la adquisición, compilación y análisis de datos geográficos que viene gestionando el grupo de investigación Geomática de la escuela de ingeniería civil, sin obviar el vínculo que este proyecto tiene como una buena aplicación en la estabilización de otros tipos de componentes sometidos a vibraciones y movimientos inestables, que podrían ocurrir en cualquier tipo de dispositivo móvil, por ejemplo como automóviles, aviones, etc.

Además, los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander tienen las aptitudes y habilidades necesarias para el diseño de esta clase de sistemas, caracterizando el espíritu investigativo y creativo del profesional UIS.

1.3 Objetivos del trabajo de grado

1.3.1 Objetivo general

Aportar al desarrollo de la misión de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander en formar personas con gran capacidad profesional, mediante el diseño de una plataforma de estabilización para una cámara panorámica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar una plataforma de estabilización para una cámara panorámica, requerida por el grupo de investigación de Geomática de la escuela de ingeniería civil, cuyo desarrollo comprenderá:
 - Diseñar un modelo virtual de la estructura de la plataforma, empleando herramientas computacionales de soporte CAD Y CAE, en programas especializados como SolidWorks o ANSYS, teniendo en cuenta las siguientes especificaciones:
 - ✓ Dimensiones aproximadas:
Altura: 600 a 1000 mm.
Área: 500X500 mm.
 - ✓ Rango de giro:
Angulo roll: - 30° a 30°.
Angulo pitch: - 30° a 30°.
 - ✓ Peso de carga útil:
2714 gr (peso de la cámara Ladybug3).
 - Desarrollar un modelo cinemático y dinámico para simular y evaluar los diseños de la plataforma de estabilización mediante la herramienta computacional Simulink.

- Diseñar y construir un prototipo experimental a escala 1:2 de las rangos establecidos, que permita corroborar aspectos básicos de diseño dinámico y cinemático. Cuyo desarrollo comprenderá:
 - Seleccionar una tarjeta de control embebida basada en un microcontrolador ATmega que controle los movimientos de autoestabilización del prototipo.
 - Seleccionar una unidad inercial IMU que incorpore los sensores básicos, acelerómetros y giroscopios, la cual permitirá informar al microcontrolador acerca de la velocidad, orientación e inclinación de la plataforma de estabilización de forma fácil y segura.
 - Lograr que el prototipo tenga como mínimo 2 grados de libertad, estos son: alabeo (roll) y cabeceo (pitch).

2 REQUERIMIENTOS INICIALES, GENERACION DE ALTERNATIVAS Y QFD

Después de haber desarrollado entrevistas al grupo de enfoque de este proyecto (grupo de investigación Geomática de la escuela de ingeniería civil), haber revisada la publicación de datos de mercado (hábitos usos y tendencias) y haber escuchado preferencias y críticas del consumidor frente a productos similares; hemos desarrollado una serie de requerimientos que serán tomados en cuenta para el diseño de la plataforma de estabilización de la cámara panorámica. Frente a los requerimientos se generan diferentes alternativas que son evaluados mediante la metodología QFD para su desarrollo.

2.1 Consideraciones de diseño

- Nivel de esfuerzo
- Resistencia mecánica
- Tasa de desgaste
- Corrosión
- Seguridad
- Confiabilidad
- Fricción
- Facilidad de uso
- Utilidad
- Costo
- Peso y volumen
- Nivel de ruido
- Ergonomía
- Forma geométrica
- Forma de control
- Mantenimiento
- Durabilidad
- Capacidad/ rendimiento

2.2 Requerimientos

Los requerimientos los dividimos en varios segmentos según entorno, entre los segmentos que utilizamos están los de seguridad, funcionalidad, apariencia, costo y manufactura. Para cada uno de los segmentos se incluyen los requerimientos del cliente.

2.2.1 Requerimiento de seguridad.

La plataforma debe garantizar la seguridad de los elementos electrónicos y mecánicos que la conforman. Para esto se requiere que la plataforma disponga

de una superficie resistente a diferentes factores de esfuerzo, para de esta manera extender su vida útil.

2.2.1.1 Bajo nivel de vibraciones

Los terrenos abruptos o zonas onduladas son la principal fuente de vibraciones mecánicas, las cuales se transmiten a lo largo de la estructura. Dependiendo de la magnitud y frecuencia de las vibraciones mecánicas, el conjunto estructural puede verse afectado por el fenómeno de resonancia. Es importante que la estructura disponga de un sistema de amortiguación, que disipe la energía generada por las vibraciones.

2.2.1.2 Alta resistencia mecánica

Una condición importante en la construcción de la estructura de la plataforma de estabilización debe ser su gran capacidad para tolerar altos esfuerzos estructurales, los cuales son impuestos principalmente cuando se presentan impactos. Esta situación puede conducir a la deformación, fractura o desprendimiento de un componente estructural, ocasionándole un daño temporal o permanente según su grado de severidad. Dependiendo de la selección y calidad de los materiales empleados en la fabricación de la estructura se logra una mayor o menor capacidad de absorción de la energía de deformación.

2.2.1.3 Alta resistencia ambiental

La estructura debe tener una protección ambiental (recubrimientos), debido a que va estar expuesta a la intemperie con diferentes condiciones climáticas que ocasionan deterioro superficial. Además, los dispositivos electrónicos y mecánicos deben estar protegidos de estas condiciones climáticas (vientos, lluvias, sol y otras alteraciones climáticas).

2.2.2 Requerimiento de funcionalidad

El empleo normal de la plataforma de estabilización debe estar basado en los siguientes requerimientos operativos.

2.2.2.1 Ajuste de inclinación

La estabilidad de la plataforma se logra mediante la introducción de dispositivos de amortiguamiento y una óptima sintonización con un sistema de estabilización.

2.2.2.2 Capacidad de carga

La ventaja que otorga el transporte de una adecuada carga útil, permite la adecuación de diferentes tipos de sensores y dispositivos electrónicos (cámara panorámica, sensores, micro-controladores etc.) en la plataforma, destinados a aplicaciones específicas.

2.2.2.3 Fácil manipulación

La selección de un lenguaje computacional sencillo de comprender y con variadas alternativas de programación de los parámetros involucrados en el funcionamiento de la plataforma de estabilización contribuye a facilitar las tareas del programador.

2.2.3 Requerimientos de apariencia

Los aspectos de apariencia se suman a los intereses que debe tener, hoy en día un proyecto innovador.

2.2.3.1 Diseño aerodinámico

La forma geométrica dada en la fase de diseño a los componentes estructurales de la plataforma de estabilización contribuye a aumentar o disminuir su resistencia aerodinámica, la cual es producida cuando las diferentes superficies del cuerpo se ven expuestas al flujo del aire.

2.2.3.2 Diseño estético

Se contempla como un requerimiento importante, ya que permite la realización de un producto atractivo, práctico y funcional, provisto de una excelente terminación y acabado.

2.2.3.3 Espacio reducido de almacenamiento

La facilidad para almacenar y trasladar cómodamente los componentes estructurales de la plataforma de estabilización requiere que el espacio para realizar estas tareas sea lo más reducido posible, lo cual se logra con un diseño compacto.

2.2.4 Requerimiento de costo

En los aspectos económicos necesarios para la compra de materias primas y equipos deben contemplarse en los siguientes requerimientos.

2.2.4.1 Bajo costo de inversión

Los bajos precios comerciales de insumos, materias primas y equipos electrónicos seleccionados hacen que el presupuesto total se ajuste a los requerimientos económicos del operador, lo cual hace asequible su compra.

2.2.4.2 Reducción de costo de manufactura

El proceso de manufactura realizado íntegramente a nivel local, contribuye a una reducción significativa en el costo total de la fabricación de la plataforma de estabilización, en comparación con los modelos realizados en el exterior.

2.2.4.3 Fácil instalación ajuste y mantenimiento

La capacidad de instalar y poner a punto cada una de los componentes de la estructura de la plataforma de estabilización puede ser mejorada mediante un diseño que permita la realización de esta labor de una manera rápida y confiable. La forma y el método con el cual se ensamblan y desensamblan cada uno de los elementos estructurales, puede disminuir además del costo de instalación, ajuste y mantenimiento.

2.2.5 Requerimientos de manufactura

Para el diseño se deben tener los siguientes requerimientos de fabricación y ensamble.

2.2.5.1 Bajo peso

Con el objetivo de aumentar la eficiencia de los actuadores y dispositivo mecánicos (motor, amortiguación), la estructura de la plataforma de estabilización debe poseer como característica física su bajo peso, lo cual puede lograrse mediante el empleo de materiales ligeros de baja densidad. Un diseño liviano de la estructura concede a la plataforma de estabilización unas características de funcionalidad óptimas, ya que el grupo de actuadores mecánicos requieren de menos capacidad de carga.

2.2.5.2 Diseño modular

Los componentes principales de las estructuras de la plataforma de estabilización deben cumplir con el requerimiento de modularidad cuando son diseñados por secciones, las cuales al ensamblarse, conforman un conjunto

final. Esto permite que la fabricación de cada sección sea realizada empleando varias matrices, dando la posibilidad de reparaciones modulares.

2.2.5.3 Fácil adquisición de insumos y respuesta

La alta disponibilidad de insumos y materias primas en empresas y almacenes tanto a nivel local como nacional, empleados en el proceso de fabricación de las piezas para la estructura, facilita el proceso de adquisición de los mismos. Para equipos o dispositivos electrónicos tales como motores, controles de velocidad y baterías, que son ofrecidos por proveedores extranjeros, deben disponer del servicio de compra en línea a través de diferentes páginas de internet.

2.3 Análisis de requerimientos

Tabla 1. Análisis de requerimientos.

| Demandas primarias | Demandas secundarias | Demandas terciarias |
|--------------------|---|--|
| 1. Seguridad | A. Bajo nivel de vibraciones | Amortiguación |
| | B. Alta resistencia mecánica | Materiales de alta resistencia, para un diseño robusto. |
| | C. Alta resistencia ambiental | Protección de los componentes electrónicos, Protección de la superficie de la estructura. |
| | D. Capacitación en operación y mantenimiento. | |
| 2. Funcionalidad | A. Ajuste de inclinación | |
| | B. Capacidad de carga | |
| | C. Fácil manipulación | |
| | D. Fácil instalación | |
| 3. Apariencia | A. Diseño aerodinámico | Geometría favorable para un mínimo contacto entre la superficie y el viento. |
| | B. Diseño estético | Recubrimientos y diseño elegante. |
| | C. Espacio | |
| 4. Costo | A. Bajo costo de inversión | Optimizar la razón beneficio costo |
| | B. Reducción de costo en los procesos de manufactura. | Bajos precios en la compra de insumos y equipos. |
| | C. Fácil ajuste y mantenimiento | |
| 5. Manufactura | A. Bajo peso | Materiales de baja densidad |
| | B. Diseño modular | Fácil montaje y fácil embalaje |
| | C. Fácil adquisición de repuestos | Materiales en el mercado local |

2.4 Generación de alternativas de solución

2.4.1 Giroestabilizador

El objetivo de la aplicación es que la plataforma mantenga a la cámara apuntando a un lugar fijo, absorbiendo los movimientos del móvil en donde está ubicada, las vibraciones, y cualquier otro tipo de ruido que pueda desestabilizar la señal de vídeo. Las plataformas giroestabilizadas utilizan giróscopos que miden velocidades y desplazamientos angulares, en torno a un eje fijo. La posición de la plataforma también es importante ya que puede estar puesta de diferentes formas: colgada, sostenida de costado, apoyada, etc. Todos estos casos hacen variar el problema de la estabilización.

Ilustración 1. Estructura básica de un giroestabilizador.



Esta estabilización mecánica se utiliza para reducir la distorsión de una imagen asociada con el movimiento de una cámara durante la grabación. Específicamente, se compensa el giro e inclinación (movimiento angular, equivalente a la guiñada y cabeceo) de una cámara o de otro dispositivo de imagen⁷.

⁷ Se utiliza en estabilizadas imágenes binoculares, cámaras fotográficas y de vídeo, y los telescopios astronómicos.

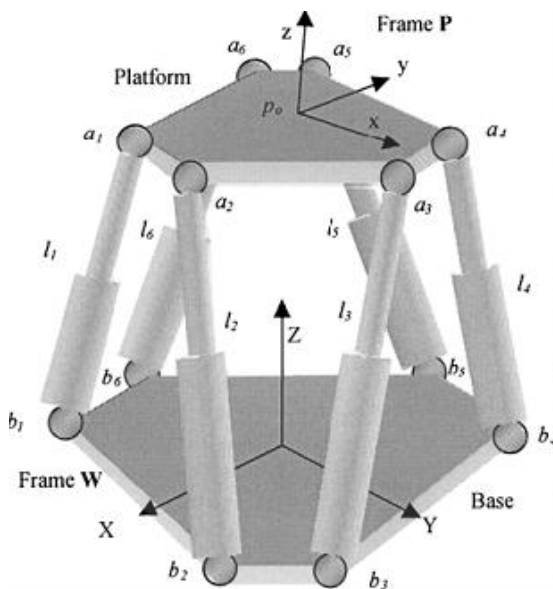
Para controlar una plataforma de este tipo se requiere trabajar a una frecuencia de tiempo real⁸ de manera tal que no se pierdan datos de entrada y que al momento de actuar no sea demasiado tarde.

Las fuerzas armadas, las fuerzas de seguridad, entre otros, están incorporando a sus vehículos (helicópteros, lanchas, etc.) plataformas giroestabilizadas que les permite apoyar una cámara de vídeo de manera tal que puedan obtener una señal libre de vibraciones y ruidos.

2.4.2 Plataforma Stewart

Presentada originalmente por Stewart (1965), es una estructura paralela cinemática que se puede utilizar para controlar o generar movimientos en seis grados de libertad, lo que permite realizar translaciones y rotaciones en los tres ejes, tiene aplicaciones en diversos procesos de fabricación y las tareas de precisión. El mecanismo consta de una placa estacionaria (base) y una móvil que se encuentre conectada a la base por 6 enlaces.

Ilustración 2. Modelos básicos de la Plataforma Stewart.



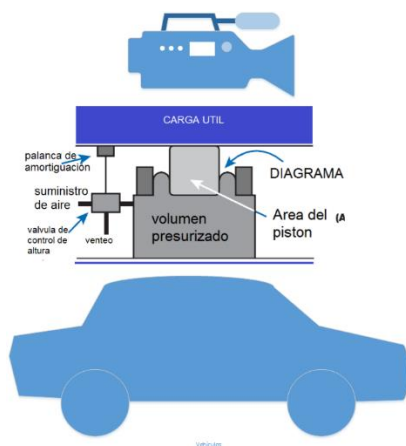
⁸ Se define de Tiempo Real a los sistemas que deben responder ante estímulos generados por el entorno dentro de un período de tiempo finito especificado. En sistemas en donde se trabaja con señales del mundo exterior se debe tener el cuidado de muestrear las señales a una misma frecuencia.

2.4.3 Suspensión activa

Para disminuir las vibraciones en un equipo de grabación, la respuesta podría ser implementar un sistema de suspensión activa, el cual consiste en dispositivos específicamente diseñados para disminuir las vibraciones⁹, ya sea por el aumento del amortiguamiento del sistema o por el cambio en la frecuencia natural, alejando la posibilidad de resonancia. Sin embargo, el uso e implementación de estos dispositivos mecánicos para controlar estructuras reales todavía es limitada. Según una encuesta sobre métodos de control de vibraciones realizada por Murray¹⁰, los sistemas de control a menudo no han sido probados fuera de los laboratorios o han tenido un impacto secundario en estructuras.

Esta solución se aleja de lo primordial y básico de este proyecto que es la estabilización, sin dejar de lado que podría ser un buen complemento para el mejoramiento de la respuesta dinámica del sistema.

Ilustración 3. Sistema simplificado de una plataforma de estabilización de suspensión activa.



Generalmente los amortiguadores tienen una característica de amortiguación específica, y por tanto, sus posibilidades de ajuste están limitadas a las diferentes cargas y condiciones de la carretera. Sin embargo en las suspensiones activas esta característica de amortiguamiento es regulable

⁹ A. Webster, R. V. (1992). Application of Tuned Mass Dampers to Control Vibration of Composite-floor Systems. Engineering Journal of the American Institute of Steel Construction of Steel Construction, Vol 29, pp 116-124.

¹⁰ MURRAY, T. (1991). Building Floor Vibration. Engineering Journal, Vol 28(3), 102-109.

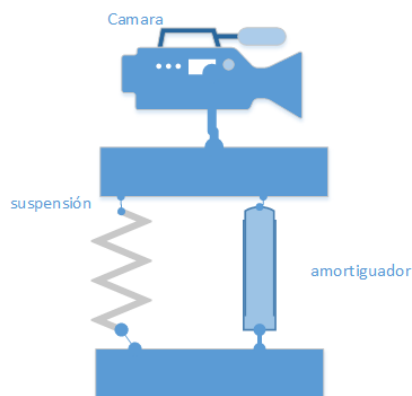
gracias al sistema hidráulico y se consigue un reposicionamiento de la estructura casi perfecta.

2.4.4 Suspensión pasiva

La elección de una suspensión convencional o pasiva supone un difícil compromiso entre el confort y la estabilidad. Los sistemas de suspensión pasivos se caracterizan por no recibir directamente aplicación alguna de energía externa. Almacenan energía mediante resortes y la disipación mediante amortiguadores. Los parámetros de una suspensión pasiva son fijos y corresponden a un compromiso entre las características del terreno, la carga soportada y el confort.

Este sistema presenta problemas cuando se modifica la rigidez o el coeficiente de amortiguamiento, cuanto más dura sea la suspensión, aumentará la estabilidad de la plataforma pero disminuirá el confort o aumentaría las vibraciones sobre esta. Al contrario, con una suspensión blanda aumentará el confort pero disminuirá la estabilidad. Por esta razón, es difícil realizar un diseño de amortiguación para cualquier carga útil debido a las variaciones del terreno en que la plataforma podría estar expuesta.

Ilustración 4. Sistema de estabilización de la plataforma de estabilización con suspensión pasiva.



2.5 Despliegue de función de calidad QFD

Para transformar las demandas del usuario en la calidad del diseño se procede a realizar el método el basado en función de calidad (QFD), para implementar las funciones que aporten más calidad, e implementar métodos para lograr calidad del diseño en subsistemas.

La aplicación QFD es centrada para:

- Identificar las necesidades y expectativas del grupo de investigación Geomática.
- Priorizar la satisfacción de estas expectativas en función de su importancia.
- Focalizar todos los recursos, humanos y materiales, en la satisfacción de dichas expectativas.

En matriz de correlación se determina cuál es la importancia en términos absolutos y relativos con la que cada actividad del proceso contribuye a la satisfacción del usuario.

Se determina a partir del Σ (importancia del cliente (I) * el peso asignado a las relaciones) según el convenio:

9: Relación fuerte

3: Relación media

1: Relación débil

Tabla 2. Matriz QFD.

| Fila # | Peso Gráfico | Peso relativo | Importancia para el cliente | Relación máxima | Columna # | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------------|---------------|-----------------------------|-----------------|--|------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--|--|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|---|---|---|---|
| | | | | | Requerimientos de ingeniería | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | | | | |
| | | | | | Requerimientos del cliente (Explícitos e implícitos) | Requerimientos de ingeniería | Bajo nivel de vibración | Alta resistencia mecánica | Alta resistencia al ambiente | Ajuste de inclinación | Capacidad de carga | Fácil manipulación | Diseño aerodinámico | Diseño estético | Espacio reducido de almacenamiento | Bajo costo de inversión | Reducción costo de manufactura | Fácil instalación ajuste y mantenimiento | Bajo peso | Fácil adquisición de repuestos | Diseño modular | Interfaz hombre maquina | | | | |
| 1 | | 9% | 10 | 9 | Facilidad de montaje | | | | o | | • | | o | | | ∇ | • | | ∇ | • | | | 4 | 1 | 2 | 4 |
| 2 | | 14% | 15 | 9 | facilidad de uso | | | | o | | • | | o | | | | | | | o | • | | 4 | 2 | 2 | 3 |
| 3 | | 9% | 10 | 9 | Fácil ajuste y mantenimiento | | | | o | | • | | • | | | o | | | • | ∇ | | | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 4 | | 27% | 30 | 9 | Ajuste de inclinación | | | | • | | | | | | | | | | | | • | | 5 | 4 | 0 | 0 |
| 5 | | 14% | 15 | 9 | Amortiguación | • | | | | | | | | | | | ∇ | | | ∇ | | | 0 | 0 | 5 | 5 |
| 6 | | 9% | 10 | 9 | Durabilidad | • | • | • | | o | | | o | | | | | | | ∇ | | | 3 | 4 | 3 | 3 |
| 7 | | 6% | 7 | 9 | Costo mínimo | ∇ | | • | o | ∇ | ∇ | | | | | ∇ | | ∇ | | ∇ | | | 2 | 1 | 2 | 4 |
| 8 | | 5% | 5 | 9 | Facilidad de manufactura | o | • | • | o | ∇ | ∇ | ∇ | | o | o | • | | | • | o | | | 4 | 1 | 2 | 4 |
| 9 | | 7% | 8 | 9 | Portabilidad | | | | | | | • | | • | • | | o | | | • | | | 3 | 2 | 2 | 3 |
| | | | | | Objetivo | Bajo nivel de vibración | Alta resistencia mecánica | Alta resistencia al ambiente | Ajuste de inclinación | Capacidad de carga | Fácil manipulación | Diseño aerodinámico | Diseño estético | Espacio reducido de almacenamiento | Bajo costo de inversión | Reducción costo de manufactura | Fácil instalación ajuste y mantenimiento | Bajo peso | Fácil adquisición de repuestos | Diseño modular | Interfaz hombre maquina | | | | | |
| | | | | | Relación máxima | 9 | 9 | 9 | 9 | 3 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | | | | |
| | | | | | Puntuación Técnico | 225 | 123 | 180 | 374 | 38 | 297 | 97 | 150 | 79 | 85 | 77 | 229 | 124 | 132 | 240 | 368 | | | | | |
| | | | | | Peso relativo | 8% | 4% | 6% | 14% | 1% | 11% | 3% | 5% | 3% | 3% | 3% | 8% | 4% | 5% | 9% | 13% | | | | | |
| | | | | | Gráfica de peso | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | Giroestabilizador | 1 | 3 | 3 | 5 | 2 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 5 | | | | | |
| | | | | | Plataforma Stewart | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 4 | | | | | |
| | | | | | Suspensión activa | 5 | 3 | 2 | 0 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | | | | | |
| | | | | | Suspensión pasiva | 3 | 3 | 4 | 0 | 4 | 4 | 1 | 2 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 0 | | | | | |

| Relaciones | |
|------------|---|
| Fuerte | • |
| Moderado | o |
| Débil | ∇ |

| Dirección de mejora | |
|---------------------|---|
| Maximizar | ▲ |
| Objetivo | ◇ |
| Minimizar | ▼ |

2.6 Selección de la alternativa

Basándonos en el proceso de diseño de máquinas y productos, se determinaron criterios fundamentales y los objetivos que el proyecto debe cumplir para alcanzar un óptimo rendimiento. Buscando una solución para los requerimientos anteriormente mencionadas y haciendo un análisis sobre la prioridad de estos, se realizó un estudio de las diferentes alternativas a través de pesos ponderados.

2.6.1 Matriz de selección de concepto método Pahl Beitz

A la hora de realizar la interrelación criterios vs conceptos, el método de Pahl y Beitz se apoya en unas funciones de valoración matemáticas para realizar la evaluación entre conceptos y criterios. Los valores de proporción del criterio de selección son determinados por medio de la matriz QFD y los valores cuantitativos de los conceptos los determinamos en función de conocimientos investigativos o experiencias de concedores del campo. Este método es muy apropiado cuando los criterios de evaluación, o gran parte de ellos, pueden ser medibles o cuantificables mediante parámetros y unidades.

Tabla 3. Análisis de concepto método Pahl Beitz.

| CONCEPTOS | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|-------------------|----------------------|--------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| Criterio y selección | Peso | Giroestabilizador | | Plataforma Stewart | | Suspensión activa | | Suspensión pasiva | |
| | | calificación | Evaluación ponderada | calificación | Evaluación ponderada | calificación | Evaluación ponderada | calificación | Evaluación ponderada |
| Bajo nivel de vibraciones | 8% | 1 | 0,08 | 2 | 0,16 | 5 | 0,4 | 3 | 0,24 |
| Alta resistencia mecánica | 4% | 3 | 0,12 | 3 | 0,12 | 3 | 0,12 | 3 | 0,12 |
| Alta resistencia ambiental | 6% | 3 | 0,18 | 3 | 0,18 | 2 | 0,12 | 4 | 0,24 |
| Ajuste de inclinación | 14% | 5 | 0,65 | 3 | 0,39 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| capacidad de carga | 1% | 2 | 0,02 | 3 | 0,03 | 4 | 0,04 | 4 | 0,04 |
| Fácil manipulación | 11% | 4 | 0,44 | 1 | 0,11 | 2 | 0,22 | 4 | 0,44 |
| Diseño aerodinámico | 3% | 3 | 0,09 | 3 | 0,09 | 3 | 0,09 | 1 | 0,03 |
| Diseño estético | 5% | 3 | 0,15 | 3 | 0,15 | 3 | 0,15 | 2 | 0,1 |
| Espacio reducido de almacenamiento | 3% | 4 | 0,12 | 3 | 0,09 | 4 | 0,12 | 4 | 0,12 |
| Bajo costo de inversión | 3% | 4 | 0,12 | 1 | 0,03 | 1 | 0,03 | 5 | 0,15 |
| Reducción costo manufactura | 3% | 4 | 0,12 | 1 | 0,03 | 2 | 0,06 | 5 | 0,15 |
| Fácil instalación ajuste y Mante... | 8% | 3 | 0,24 | 2 | 0,16 | 2 | 0,16 | 3 | 0,24 |
| Bajo peso | 4% | 4 | 0,16 | 1 | 0,04 | 1 | 0,04 | 4 | 0,16 |
| Diseño modular | 5% | 3 | 0,15 | 1 | 0,05 | 1 | 0,05 | 3 | 0,15 |
| Fácil Adquisición de repuestos | 9% | 3 | 0,27 | 1 | 0,09 | 1 | 0,09 | 4 | 0,36 |
| Interfaz hombre maquina | 13% | 5 | 0,65 | 4 | 0,52 | 3 | 0,39 | 0 | 0 |
| Evaluación neta | 100% | 3,56 | | 2,24 | | 2,08 | | 2,54 | |
| Posición | | 1 | | 4 | | 3 | | 2 | |
| ¿Continuar? | | si | | no | | no | | combinar | |

Tabla 4. Calificación por desempeño del método Pahl Beitz.

| Desempeño relativo | Calificación |
|--------------------|--------------|
| Pésimo | 1 |
| Malo | 2 |
| Aceptable | 3 |
| Bueno | 4 |
| Excelente | 5 |

2.6.2 Matriz de selección de concepto método Pugh

Para la toma de decisiones sobre el desarrollo de la plataforma de estabilización, se tiene en cuenta esta herramienta para priorizar de una manera rápida las características del producto que se pretenden lanzar. Con ello se consigue ver cuáles son los puntos fuertes y las limitaciones que presentan las posibles alternativas al problema, en base a una alternativa fundamental que se compara con el resto, pudiendo optar por la de mayor impacto y deshacernos de las más débiles. La matriz Pugh a pesar de que es un método netamente cualitativo, acerca a una toma de decisión subjetiva a una objetiva y cuantitativa.

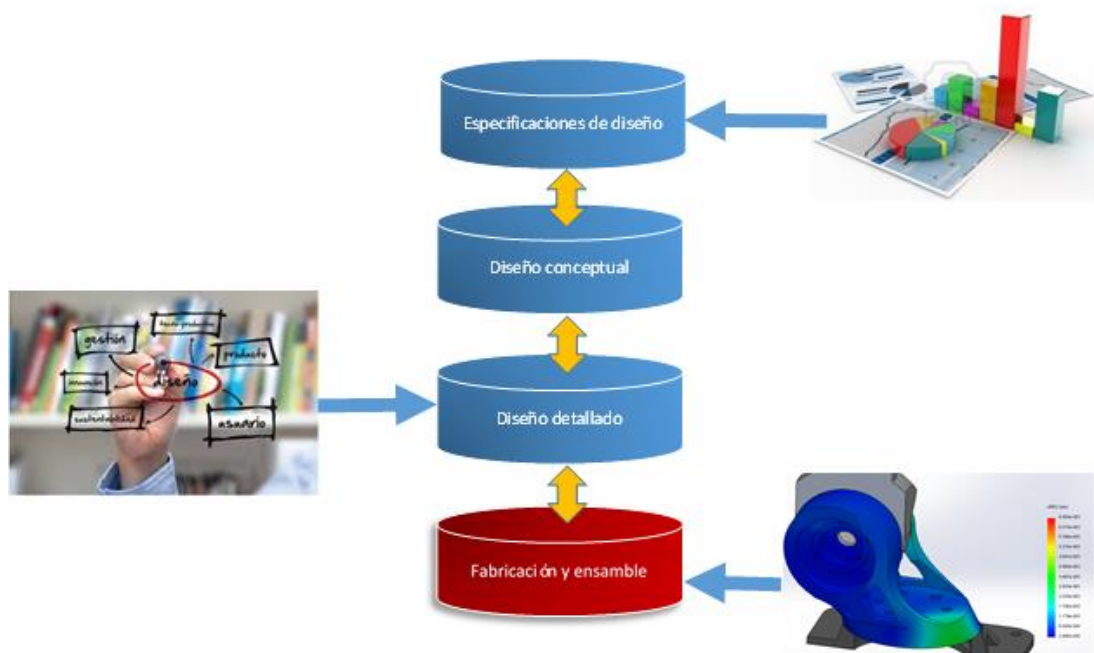
Tabla 5. Análisis de conceptos método Pugh.

| | CONCEPTOS | | | |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| | Giroestabilizador | Plataforma Stewart | Suspensión activa | Suspensión pasiva |
| Bajo nivel de vibraciones | 0 | 0 | + | + |
| Alta resistencia mecánica | 0 | - | - | + |
| Alta resistencia ambiental | + | + | + | + |
| Ajuste de inclinación | + | + | - | - |
| capacidad de carga | + | + | + | - |
| Fácil manipulación | + | - | 0 | + |
| Diseño aerodinámico | + | + | 0 | - |
| Diseño estético | + | + | - | - |
| Espacio reducido de almacenamiento | 0 | - | - | + |
| Bajo costo de inversión | - | - | - | + |
| Reducción costo manufactura | - | - | - | + |
| Fácil instalación ajuste y Mante... | 0 | - | - | + |
| Bajo peso | 0 | - | - | + |
| Diseño modular | + | - | - | + |
| Fácil Adquisición de repuestos | + | - | - | 0 |
| Interfaz hombre maquina | + | + | - | - |
| Suma + | 8 | 6 | 3 | 10 |
| Suma 0 | 5 | 1 | 2 | 1 |
| Suma - | 2 | 8 | 10 | 5 |
| Evaluación neta | 6 | -2 | -7 | 5 |
| Posición | 1 | 3 | 4 | 2 |
| Continuar | Si | No | No | Combinar |

3 DESCRIPCIÓN GENERAL

El trabajo desarrollado se basa en el diseño de una plataforma de estabilización con dos grados de libertad para una cámara panorámica, para lo cual es necesario la implementación de una unidad de medición inercial IMU, dispositivo electrónico encargado de detectar las variaciones de los ángulos de inclinación. Desarrollar el diseño de una plataforma de estabilización para una cámara panorámica, requiere de una metodología de diseño mecatrónico basado en la ingeniería concurrente, resultando una aproximación al diseño para un producto más sinérgico y en los sistemas CAD para el modelamiento de la configuración y simulación del movimiento.

Ilustración 5. Metodología de diseño de la plataforma de estabilización.



El documento se enfoca en tres modelos para profundizar el desarrollo de todo el trabajo realizado y especificar las condiciones de funcionamiento. Un modelo gráfico permite visualizar el funcionamiento del diseño, un modelo analítico que describe la ubicación en el espacio teniendo en cuenta su rotación y posición respecto a los ejes coordenados y un modelo físico para evaluar las diferentes pruebas de trabajo.

Tabla 7. Desarrollo detallado de la plataforma de estabilización.

| | MODELOS GRÁFICOS | MODELOS ANALITICOS | MODELOS FISICOS |
|---------------------------|---|---|--|
| PRODUCTO ABSTRACTO | Croquis Dibujos de definición | Modelo matemático | Prototipo experimental (considerado para pruebas del proyecto) |
| PRODUCTO REFINADO | Planos de ensamble de piezas Modelos solidos | Elementos finitos (CAE) Simulación detallada | |

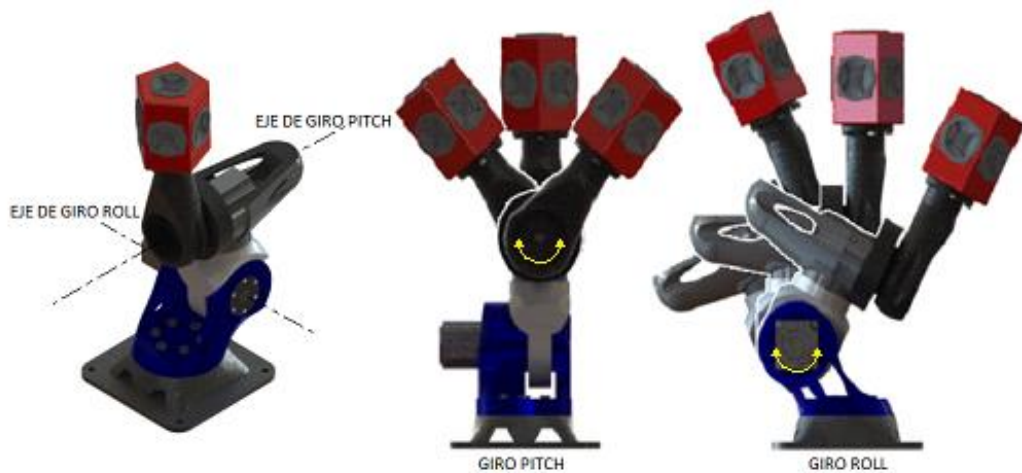
3.1 Modelo gráfico

Describe el desarrollo del proyecto desde el punto de vista informático ya que se emplea para el trabajo el uso de herramientas tipo CAD que permiten visualizar el modelo que se quiere llegar al funcionamiento apropiado.

Ilustración 6. Diseño gráfico y componentes.



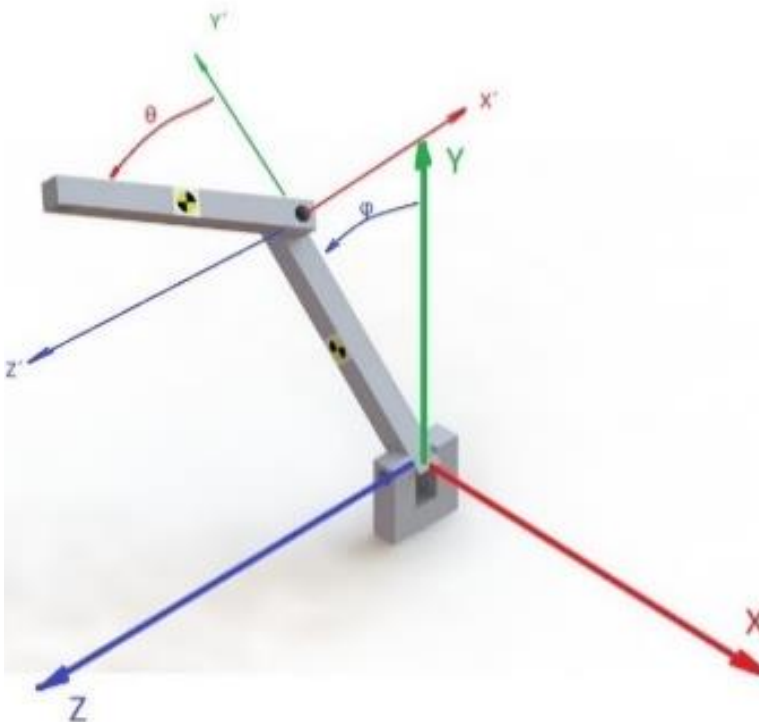
Ilustración 7. Funcionamiento del diseño.



3.2 Modelo analítico

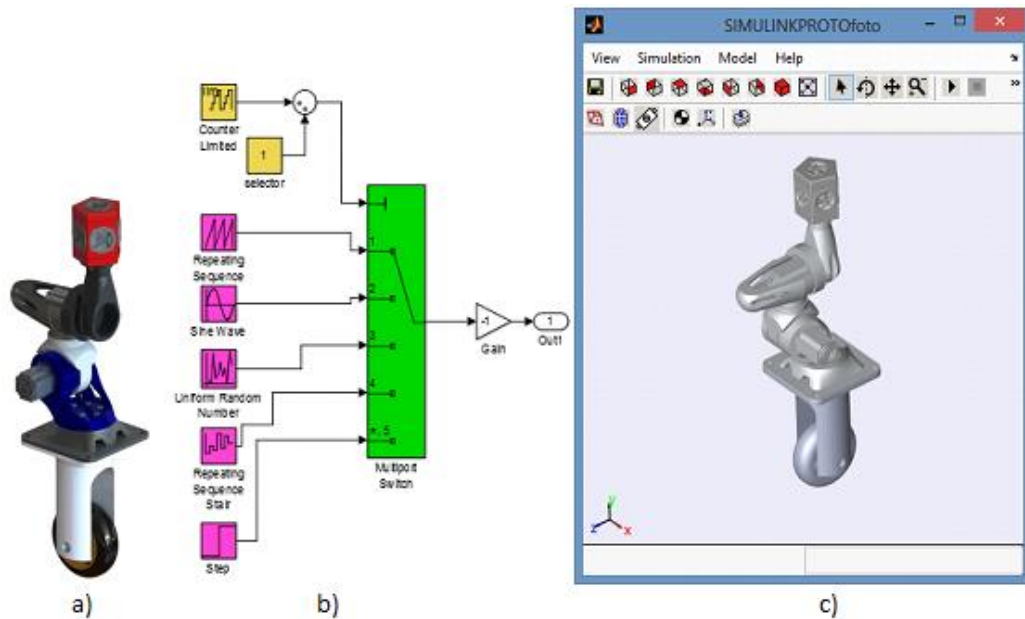
Fue necesario desarrollar un modelo matemático, obteniendo con ello una serie de ecuaciones que permitieran considerar los tres ejes de giro: “*pitch*” (cabeceo), “*yaw*” (guiño) y “*roll*” (alabeo) .Estas ecuaciones no son lineales, por lo que hay que darles un tratamiento con base en las series de expansión de Taylor. En algunos casos se emplea la ecuación de estado.

Ilustración 8. Esquema simplificado de la plataforma de estabilización.



Además del modelo matemático el proyecto incluye un modelo cinemático y dinámico para simular y evaluar los diseños de la plataforma de estabilización mediante SimMechanics. Esto dio un enfoque gráfico del funcionamiento al que se quiso llegar con el proyecto donde simula un trayecto y se visualiza el trabajo de los motores del sistema.

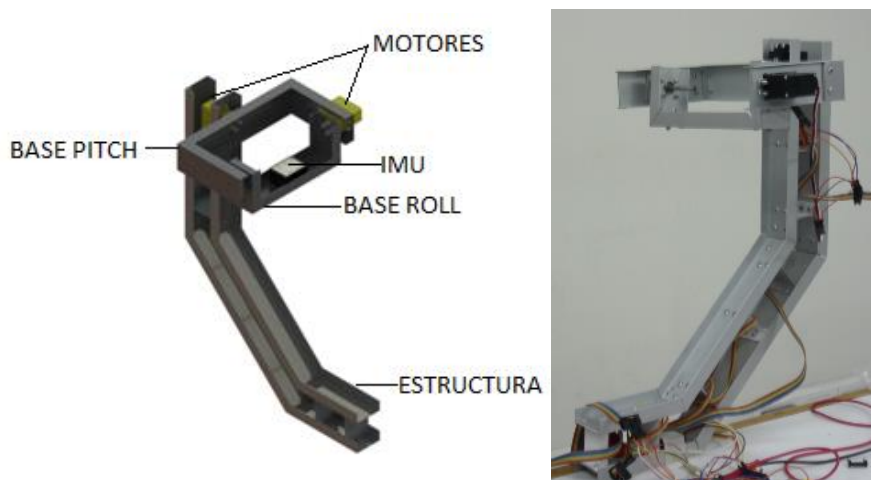
Ilustración 9. a) Prototipo SolidWorks, b) programación en Simulink c) Prototipo en Simulink.



3.3 Modelo físico

El modelo físico se creó de manera que fuera sencillo y económico; ya que se tuvo en cuenta para probar el control y el movimiento de los servomotores. El desafío era desarrollar un prototipo que aprovechará lo mejor posible de los beneficios proporcionados por un sensor de posición o una combinación de estos, tomando en cuenta sus condiciones de utilización, por lo tanto, se requiere un buen conocimiento y manejo de sus características.

Ilustración 10. Modelo físico SolidWorks y real.



Para el desarrollo del proyecto es indispensable el uso de un IMU (unidad de medición inercial) que es prácticamente un sensor de posición angular. más adelante en este documento se hace una descripción de este dispositivo; como se desarrollo el programa para la comunicación, la adquisición de datos y el desarrollo de los diferentes instrumentos virtuales para el funcionamiento del prototipo .

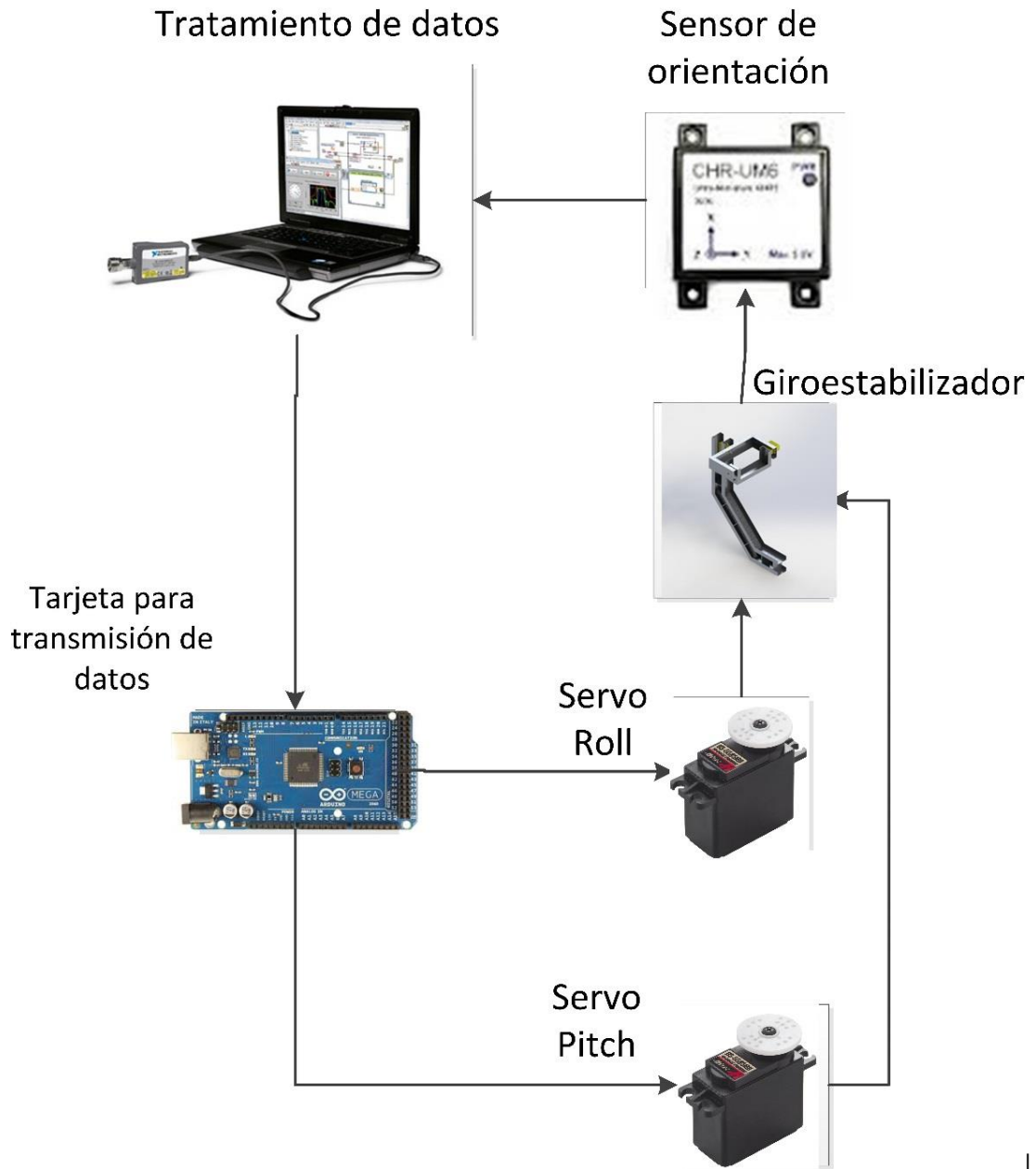
Ilustración 11. Sensor de orientación con comunicación serial, IMU CHR-UM6.



Fuente: página oficial robot market <http://www.robotmarketplace.com/products/0-PL1255.html>

Para que el prototipo experimental tenga movimiento es necesario generar un sistema de control para los servomotores. El HMI (Interfaz hombre- máquina) del prototipo fue desarrollado mediante el software LabVIEW el cual permite que el usuario se pueda comunicar con el prototipo. Mediante una interfaz gráfica el usuario pueda realizar el control y conocer la orientación del prototipo; Con esta interfaz podemos recrear los movimientos que realiza el IMU en la pantalla. Para este control también se utilizó un Arduino para la adquisición de datos. Se hace una descripción extensa de cada parte de la programación ya que esta es la que le da vida al proyecto y al prototipo que se desarrolló.

Ilustración 12. Ilustración simplificada del Hardware del proyecto.



La construcción e implementación del prototipo experimental de dos grados de libertad se realiza con el fin de hacer un estudio que sea utilizado como base para la construcción de un prototipo en escala real. Se desarrolló un mecanismo de resortes que generará una señal tipo escalón para saber la respuesta en el tiempo del movimiento de los servomotores.

Ilustración 13. Prototipo experimental de la plataforma de estabilización.



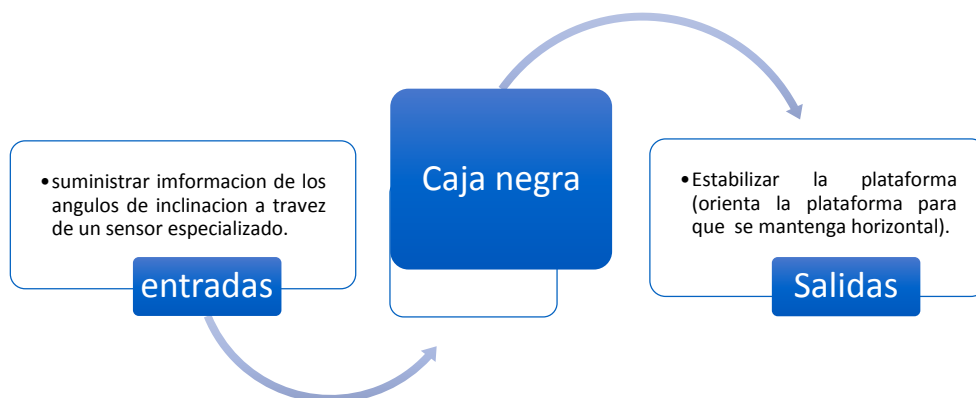
Se evaluó el correcto funcionamiento del movimiento en los dos ángulos de giro. Estos movimientos pueden ser controlados manualmente mediante botones situados en el panel frontal HMI de LabVIEW. Acá se visualiza el comportamiento del prototipo en funcionamiento y se describe las respuestas en el tiempo del movimiento. Cabe mencionar que para tener una clara apreciación del control, en estas pruebas no se realizó el movimiento sobre un vehículo todo terreno

4 ANÁLISIS FUNCIONAL DEL ESTABILIZADOR

Definida la alternativa de solución, se profundiza sobre esta y se especifican las condiciones de funcionamiento, modelo matemático, espacio de trabajo, tamaño de la plataforma, velocidad y aceleración en los movimientos, cargas a transferir, aproximación a la estructura definitiva y un rango variables en las articulaciones. Con todos estos factores se llega a representar gráficamente en el lenguaje CAD (*Computer Asisted Design*) y su diseño es analizado completamente con SolidWorks lo que permite evaluar las piezas diseñadas.

Es relevante mostrar con mayor detalle cómo se realizará el proceso, para esto se precisa la presentación del diagrama en donde se muestran los pasos primordiales del funcionamiento de la máquina.

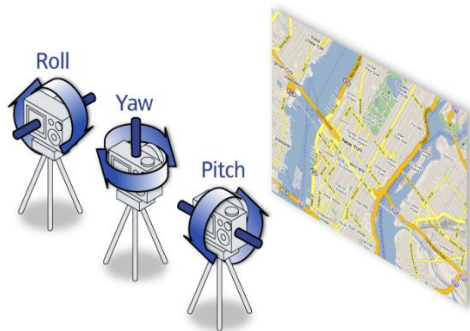
Ilustración 14. Comprensión básica del sistema.



4.1 Dirección de estabilización

A continuación se explican las direcciones que puede tomar la plataforma mientras es controlada por el operador.

Ilustración 15. Comprensión ilustrativa de los ángulos de navegación.



4.1.1 Cabeceo (pitch)

El ángulo de cabeceo permite la rotación de la plataforma a lo largo del eje y concediéndole capacidad de girar hacia adelante o hacia atrás. Para hacer girar hacia adelante, el operador puede a través del programa diseñado en LabVIEW controlar el Setpoint para su estabilización.

4.1.2 Alabeo (roll)

El ángulo de alabeo o roll concede a la plataforma la capacidad de efectuar giros laterales hacia la derecha o izquierda de su eje central. Para lograr la rotación de la plataforma de estabilización hacia el lado derecho, el operador puede a través del programa diseñado en LabVIEW controlar el Setpoint para su estabilización.

4.1.3 Guiñado (yaw)

El control direccional o movimiento de guiñado en la plataforma de estabilización no se tiene en cuenta. Pues se considera que no es necesaria, para este diseño.

Ilustración 16. Comprensión ilustrativa del sistema.



5 MODELO MATEMÁTICO

El conjunto de ecuaciones diferenciales describen la ubicación de un cuerpo en el espacio teniendo en cuenta su rotación y posición respecto a los ejes coordenados siempre son suficientes 6 grados de libertad divididos de maneras iguales en traslación y rotación, donde comúnmente para la posición se usa el sistema cartesiano y para la rotación se usan la convención de “*pitch*” (cabeceo), “*yaw*” (guiño) y “*roll*” (alabeo). Estas ecuaciones de orden no son lineales, por la que hay que darles un tratamiento con base en las series de expansión de Taylor para linealizarlas, posteriormente aplicar la transformada de Laplace y finalmente manipular la función de transferencia en forma de diagrama de bloques. En algunos casos se emplea la ecuación de estado. El modelamiento significa también la representación gráfica en sistema CAD de la configuración del robot. Es necesario saber que si existen menos grados de libertad la información sería insuficiente, es decir, las posiciones que se pudiesen alcanzar serían limitadas. Asimismo así mismo si existiesen más grados de libertad existiría una redundancia de las posiciones, es decir, que se podría alcanzar una posición por distintas formas o rutas.

Ilustración 17. Esquema simplificado de la plataforma de estabilización.

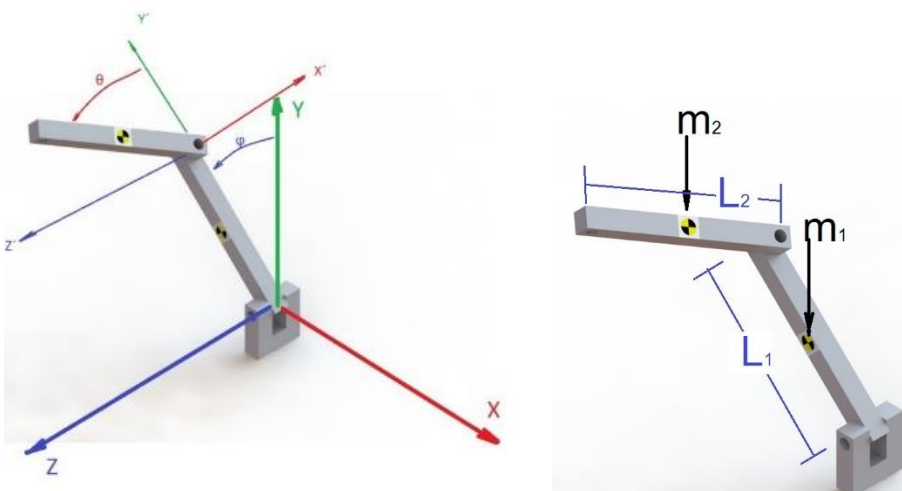


Tabla 6. Nomenclatura del modelo matemático.

| Eslabón | Notación | Significado |
|----------|-----------|--|
| 1 | m1 | Masa |
| | L1 | Longitud total |
| | I1 | Inercia |
| | Lc1 | Longitud al Centro de gravedad del eslabón 1 |
| | φ | Posición articulada |
| 2 | m2 | Masa |
| | L2 | Longitud total |
| | I2 | Inercia |
| | Lc2 | Longitud al Centro de gravedad del eslabón 2 |
| | θ | Posición articulada |
| | g | Gravedad |

Cuando se estudia el movimiento de una plataforma de estabilización es necesario poder referenciar los diferentes movimientos de las articulaciones respecto a un sistema de referencia fijo a fin de homogenizar los cálculos necesarios. En este orden de ideas, podemos hablar de la posición como (x, y, z) y de la rotación como (α , β , γ), ya sea por relaciones geométricas entre ellos o mediante el uso de matrices de transformación homogénea como vamos a explicar a continuación.

La representación de posicionamiento para el sistema involucra sistemas de coordenadas cartesianas que especifican posición y orientación del extremo final del robot. La transformación homogénea es una herramienta matemática que involucra operaciones de rotación y traslación dentro de una matriz que estructura el modelo cinemático directo. La notación más común para representar la matriz de rotación y el vector de traslación en forma compacta se conoce como transformación homogénea la cual, para el caso de la figura está dada por la siguiente expresión:

$$H = \begin{bmatrix} R_{z,\theta} & d_0^1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Matriz de rotación} & \vdots & \text{Vector de traslación} \\ & \ddots & \\ & 0^T & \vdots \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

El modelo matemático, también llamado modelo de la dinámica de la plataforma de estabilización, es un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias con las cuales se puede predecir el comportamiento del sistema. Implica, asignación de las coordenadas de las articulaciones, obtención de los parámetros de Denavit – Hartenberg, análisis de la cinemática directa, análisis de la cinemática inversa, cálculo del jacobiano geométrico y análisis de la dinámica con la formulación de Lagrange- Euler o con la formulación de Newton –Euler.

El modelo de cinemática directa con respecto al centro de masa de cada eslabón se representa con la metodología Denavit – Hartenberg. Para utilizarla primero se describe la convención para asignar los sistemas de referencia cartesianos asociados a los eslabones de la plataforma. En este punto es necesario aclarar que en la literatura de robótica, la convención Denavit-Hartenberg no es única, depende de la selección de los sistemas de referencia cartesianos en las articulaciones y eslabones, así como en sus eslabones adyacentes.

Eslabón 1

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{c1} & \sin \varphi \\ L_{c1} & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Eslabón 2

$$H_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & -L_1 \sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & L_1 \cos \varphi \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_1^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & L_{c2} \cos \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & L_{c2} \sin \theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_0^2 = H_0^1 * H_1^2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\cos \theta \sin \varphi & \sin \theta \sin \varphi & -L_1 \sin \varphi - L_{c2} \cos \theta \sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \theta \sin \varphi & -\cos \varphi \sin \theta & L_1 \sin \varphi + L_{c2} \cos \theta \cos \varphi \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & L_{c2} \cos \theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \varphi - L_{c2} \cos \theta \sin \varphi \\ L_1 \sin \varphi + L_{c2} \cos \theta \cos \varphi \\ L_{c2} \cos \theta \end{bmatrix}$$

La cinemática diferencial permite obtener la velocidad lineal con respecto al centro de masa de cada eslabón.

Velocidad Lineal

Eslabón 1

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{c1} \dot{\varphi} \cos \varphi \\ -L_{c1} \dot{\varphi} \sin \varphi \end{bmatrix}$$

Cinemática diferencial permite

$$V_1^2 = [L_{c1} \dot{\varphi} \cos \varphi]^2 + [-L_{c1} \dot{\varphi} \sin \varphi]^2 = L_{c1}^2 \dot{\varphi}^2$$

Eslabón 2

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overbrace{L_{c2} \sin \varphi \sin \theta}^A & 0 & \overbrace{-L1 \cos \varphi - L_{c2} \cos \theta \cos \varphi}^B \\ \overbrace{-L_{c2} \cos \varphi \sin \theta}^C & 0 & \overbrace{L1 \cos \varphi - L_{c2} \sin \varphi \cos \theta}^D \\ \overbrace{-L_{c2} \sin \theta}^E & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix}$$

$$V_2^2 = \left[\dot{\theta} \left(\overbrace{L_{c2} \sin \varphi \sin \theta}^A \right) + \dot{\varphi} \left(\overbrace{-L1 \cos \varphi - L_{c2} \cos \theta \cos \varphi}^B \right) \right]^2 + \left[\dot{\theta} \left(\overbrace{-L_{c2} \cos \varphi \sin \theta}^C \right) - \dot{\varphi} \left(\overbrace{L1 \cos \varphi - L_{c2} \sin \varphi \cos \theta}^D \right) \right]^2 + \left[\dot{\theta} \left(\overbrace{L_{c2} \cos \theta}^E \right) \right]^2$$

$$V_2^2 = [\dot{\theta}A + \dot{\varphi}B]^2 + [\dot{\theta}C + \dot{\varphi}D]^2 + [\dot{\theta}E]^2$$

$$V_2^2 = A^2 \dot{\theta}^2 + 2AB \dot{\theta} \dot{\varphi} + \dot{\varphi}^2 B^2 + C^2 \dot{\theta}^2 + 2CD \dot{\theta} \dot{\varphi} + \dot{\varphi}^2 D^2 + D^2 \dot{\theta}^2$$

$$V_2^2 = \dot{\theta}^2 (A^2 + C^2 + D^2) + \dot{\theta} \dot{\varphi} (2AB + 2CD) + \dot{\varphi}^2 (B^2 + D^2)$$

$$V_2^2 = \dot{\theta}^2 (L_{c2}^2) + \dot{\varphi}^2 (L1 + L_{c2} \cos \theta)^2$$

En esta parte se obtiene el modelo dinámico de la plataforma de estabilización de 2 grados de libertad, formado con eslabones rígidos conectados por

articulaciones libres de elasticidad en cadena cinemática abierta. Un método estándar para obtener el modelo dinámico está basado en las ecuaciones de movimiento de Euler- Lagrange.

La energía ε (*hamiltoniano*) de la plataforma está dada por la suma de la energía cinética $\kappa(q, \dot{q})$ más la energía potencial $u(q)$.

$$\varepsilon(q, \dot{q}) = \kappa(q, \dot{q}) + u(q)$$

La energía cinética $K(q, \dot{q})$ de la plataforma de dos grados de libertad está dada por la siguiente expresión:

ENERGÍA CINÉTICA

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}I_1^z\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \frac{1}{2}(I_2^z\dot{\theta}^2 + I_2^x\dot{\varphi}^2)$$

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}m_1L_{c2}^2\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}I_1^z\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}m_2[\dot{\theta}^2(L_{c2}^2) + \dot{\varphi}^2(L_1 + L_{c2}\cos\theta)^2] + \frac{1}{2}(I_2^x\dot{\theta}^2 + I_2^z\dot{\varphi}^2)$$

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}\dot{\varphi}^2(m_1L_{c2}^2 + I_1^z + m_2(L_1 + L_{c2}\cos\theta)^2 + I_2^z) + \frac{1}{2}\dot{\theta}^2[m_2(L_{c2}^2) + I_2^x]$$

$$u_{(q)} = m_1gL_{c1}\cos\varphi + m_2g(L_1\cos\varphi + L_{c2}\cos\theta\cos\varphi)$$

El *lagrangiano* $L(q, \dot{q})$ del sistema de dos grados de libertad se define como la diferencia entre energía cinética $\kappa(q, \dot{q})$ y la energía potencial $u(q)$.

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - u_{(q)}$$

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}\dot{\varphi}^2(m_1L_{c2}^2 + I_1^z + m_2(L_1 + L_{c2}\cos\theta)^2 + I_2^z) + \frac{1}{2}\dot{\theta}^2[m_2(L_{c2}^2) + I_2^x] - m_1gL_{c1}\cos\varphi - m_2g(L_1\cos\varphi + L_{c2}\cos\theta\cos\varphi)$$

Las ecuaciones de movimiento de Euler – Lagrange del sistema de dos grados de libertad están dadas.

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}}\right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau - \vartheta(\dot{q}, \tau)$$

Empleando las ecuaciones de movimiento de Euler- Lagrange se obtiene:

$$\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \varphi} = m_2g(L_1\sin\varphi + L_{c2}\cos\theta\sin\varphi) + m_1g(L_{c1}\sin\varphi)$$

$$\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \theta} = -\varphi^2 m_2 (L_1 + L_{c2} \cos \theta) L_{c2} \sin \theta + m_2 g (L_{c2} \sin \theta \cos \varphi)$$

$$\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{\varphi}} = (m_1 L_{c2}^2 + I_1^z + m_2 (L_1 + L_{c2} \cos \theta)^2 + I_2^z) \dot{\varphi}$$

$$\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{\theta}} = [m_2 (L_{c2}^2) + I_2^x] \dot{\theta}$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{\varphi}} \right] = (m_1 L_{c2}^2 + I_1^z + m_2 (L_1 + L_{c2} \cos \theta)^2 + I_2^z) \ddot{\varphi}$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{\theta}} \right] = [m_2 (L_{c2}^2) + I_2^x] \ddot{\theta}$$

Las ecuaciones de movimiento Euler – Lagrange para el caso particular de la centrífuga, adquieren la forma de una ecuación escalar con la siguiente estructura.

$$\tau_\varphi = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{\varphi}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \varphi} + f_f(f_e, \varphi)$$

$$\tau_\varphi = (m_1 L_{c2}^2 + I_1^z + m_2 (L_1 + L_{c2} \cos \theta)^2 + I_2^z) \ddot{\varphi} - m_2 g (L_1 \sin \varphi + L_{c2} \cos \theta \sin \varphi) - m_1 g (L_{c1} \sin \varphi) + f_f(f_e, \varphi)$$

$$\tau_\theta = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{\theta}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \theta} + f_f(f_e, \theta)$$

$$\tau_\theta = [m_2 (L_{c2}^2) + I_2^x] \ddot{\theta} + \dot{\varphi}^2 m_2 (L_1 + L_{c2} \cos \theta) L_{c2} \sin \theta - m_2 g (L_{c2} \sin \theta \cos \varphi) + f_f(f_e, \theta)$$

De los pares aplicados, agrupando términos de aceleración ($\ddot{\varphi}, \ddot{\theta}$) y velocidades ($\dot{\varphi}, \dot{\theta}$), la matriz de inercia está dada por:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_1 L_{c2}^2 + I_1^z + m_2 (L_1 + L_{c2} \cos \theta)^2 + I_2^z & 0 \\ 0 & m_2 (L_{c2}^2) + I_2^x \end{bmatrix}$$

Tabla 7. Especificaciones de ingeniería del diseño.

| LISTA DE POSIBLES PARÁMETROS TÉCNICOS | UNIDAD |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Peso carga útil | 2714 gr |
| Peso del sistema | <Kg |
| Área | 500X500 mm |
| Altura | 600 a 1000 mm |
| Rango de inclinación 1 | -30° a 30° |
| Rango de inclinación 2 | -30° a 30° |
| Velocidad máxima de giro | 500 RPM |
| Volumen completo | 0,15 a 0,25 m ³ |
| Capacidad de carga | Kg |

6 DISEÑO DETALLADO CAD Y CAE DEL ESTABILIZADOR

La tarea de diseñar el producto toma como base el modelo matemático de la cinemática y dinámica de la plataforma de estabilización, es decir, el conjunto de las ecuaciones diferenciales ordinarias que representan el comportamiento del movimiento de la plataforma de estabilización. Una vez analizado modelo matemático de la plataforma de estabilización, se representa gráficamente en el lenguaje CAD (*Computer Asisted Design*) y su diseño es analizado completamente con SolidWorks lo que permite evaluar las piezas diseñadas.

6.1 Diseño asistido por computador (CAD)

Solid Works profesional fue el software utilizado para este fin debido a sus múltiples funciones fáciles de usar, y que permiten ahorrar tiempo en el diseño mecánico en 2D y 3D.

Este software es uno de los más completos, proporcionando funciones para la modelación de piezas complejas, superficies, laminado, facilita el diseño de grandes ensambles y la creación automática de planos de ingeniería, entre otras tareas.

Ilustración 18. Modelo CAD de la plataforma de estabilización.



Para el diseño de la plataforma de estabilización se contemplaron dos materiales muy utilizados en la industria el aluminio y el polipropileno. El primero con mejores características en lo que a resistencia se refiere, forma parte de la gran mayoría de equipos tipo pesado que requieren resistencia y bajo peso para entregar las prestaciones de este tipo de vehículos.

Por otra parte, el polipropileno trae consigo características como pesos muy reducidos y buena resistencia para equipos de menores potencias como son los de tipo observación.

6.1.1 Arquitectura del diseño

La arquitectura de un giroestabilizador al ser preferiblemente utilizada en tareas inherentes a la estabilización, encaja en una de las definiciones de robot industrial, aceptado por la organización internacional de estándares:

“Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según su trayectoria variables programadas para realizar tareas diversas”.

6.1.1.1 Arquitectura modular del diseño

La arquitectura modular permite desarrollar el producto a través de la estandarización y reducción significativa de los procesos de manufactura, ensamblaje y diseño. En este tipo de arquitectura hay una detallada evaluación de la descomposición, integración y compatibilidad de componentes y de la compatibilidad de las interfaces.

Debido a que se basa en el uso de componentes estandarizados, admite la personalización del producto mediante la mezcla y ajuste de los mismos. Esto a su vez impacta en el resultado de las estrategias de producción.

En el caso de la plataforma de estabilización, debido a su complejidad tecnológica, no es sencillo el tránsito de una arquitectura integral a una modular, pero se optó por dividir el producto en dos subsistemas; uno que se denominara módulo de amortiguación y el otro módulo de estabilización. Decidimos hacer

esto porque la integración de los mismos implica riesgos y costos bien evaluados a la hora de la fabricación y producción.

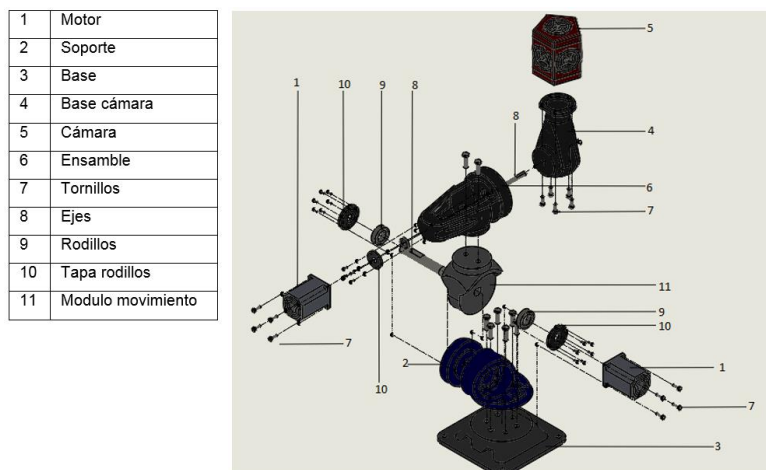
Ilustración 19. Modelo CAD con un soporte de amortiguación.



6.1.1.2 Arquitectura integral del diseño y funcionamiento

Su diseño completo, así como de ciertas características sistémicas de los componentes que integran la estabilización, requieren de este tipo de arquitectura, ya que un daño en cualquier componente afectará al producto en su totalidad.

Ilustración 20. Esquema explosión del sistema.



El funcionamiento del movimiento del diseño es básico. Los motores están puestos de tal modo que su eje de giro mueva los ejes pitch y roll del estabilizador

para que pueda ser controlado y genere la rotación necesaria en sentido que el prototipo requiera.

Ilustración 27. Ejes de giro del estabilizador.



Ilustración 21. Giro roll.



Ilustración 22. Giro pitch.



Ilustración 23. Modelo de la plataforma de estabilización explosión.

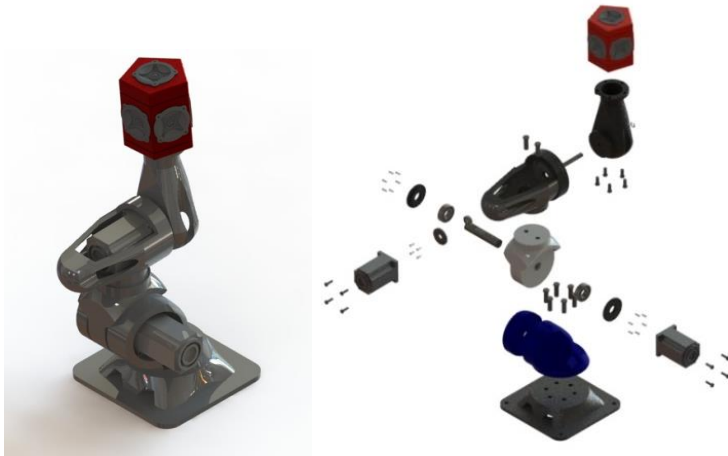
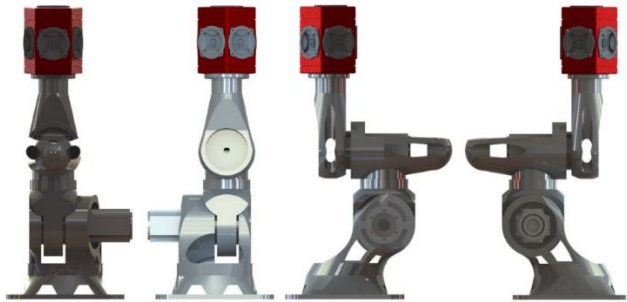


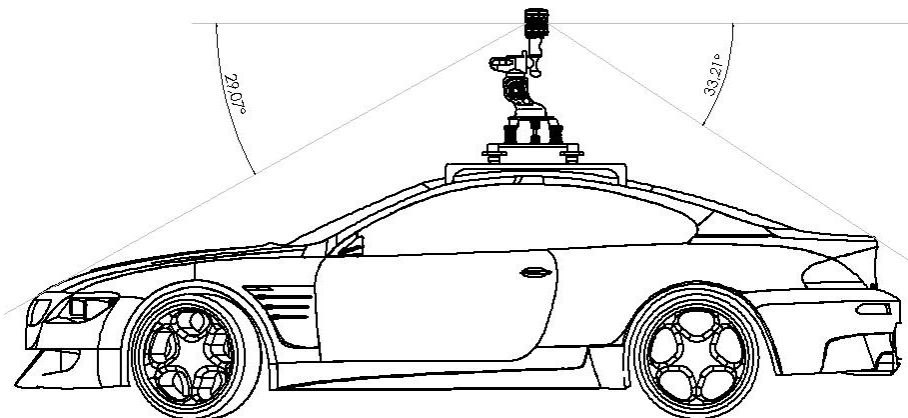
Ilustración 24. Vistas modelo plataforma de estabilización.



6.1.2 Medición distancia focal

La distancia focal de las cámaras es de 3.8 mm lo equivale a un ángulo cercano a los 180 grados. En nuestro modelo CAD la cámara podría tener un ángulo de visión ± 30 bajo el horizonte debido a las dimensiones que puede tener el automóvil.

Ilustración 25. Determinación de la visión angular del modelo CAD.



6.2 Ingeniería asistida por computador (CAE)

El CAE define una tecnología en donde el computador es una herramienta fundamental para la solución de tareas en ingeniería como análisis, diseño, producción y control. Para la realización de los estudios del comportamiento mecánico de la plataforma se ha seleccionado el software CAE SolidWorks Simulation.

SolidWorks Simulation es un sistema de análisis de diseño que está completamente integrado con SolidWorks y permite evaluar la pieza diseñada. La aplicación de una herramienta CAE como SolidWorks Simulation permite simular el comportamiento de la plataforma antes de realizar los primeros prototipos. El análisis CAE permite:

- Reducir el costo simulando la prueba de su modelo en lugar de realizar pruebas de campo costosas.
- Adelantar la comercialización del producto reduciendo el número de ciclos de desarrollo del mismo.
- Mejorar productos probando rápidamente múltiples conceptos y situaciones antes de tomar una decisión final, lo cual proporciona más tiempo para idear nuevos diseños.
- La capacidad de generar modelos para simular el pandeo, la carga de fatiga y la carga estática. La configuración de la simulación del modelo en SolidWorks se describe en las siguientes secciones.

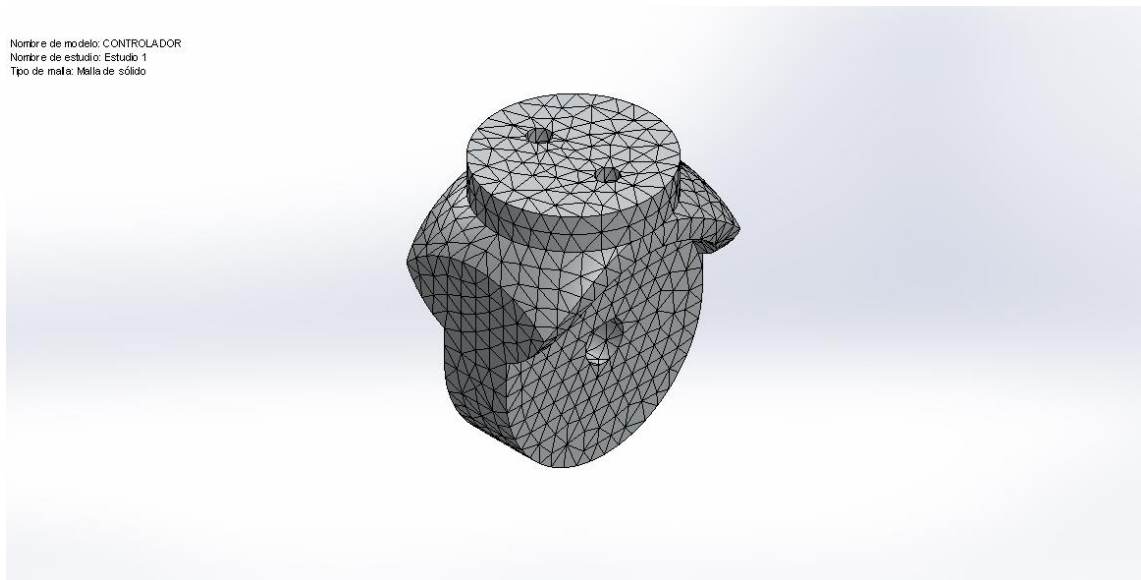
Tomando en cuenta la dinámica de la pieza de la plataforma de estabilización tanto de manera individual como colectiva, se desprendieron las partes más vulnerables al desgaste y deformación de este sistema, que se describe a continuación.

Tabla 8. Unidades del análisis.

| | |
|-------------------------|-------------------|
| Sistema de unidades: | Métrico |
| Longitud/Desplazamiento | mm |
| Masa | g |
| Peso | N |
| Velocidad angular | Rad/seg |
| Presión/Tensión | N/m ² |
| Volumen | mm ³ |
| Área superficial | mm ² |
| Densidad | Kg/m ³ |

El refinamiento de mado automatizado en SolidWorks permite una análisis más preciso del comportamiento de cada pieza frente a la fatiga. Esto permite analizar tamaños y materiales de los elementos diseñados, considerando la menor necesidad de estas áreas.

Ilustración 26. Forma de la malla.



6.2.1 Criterio máximo de tensión de Von Mises

El criterio de máxima tensión de von Mises se basa en la teoría de von Mises-Hencky, también conocida como teoría de la energía de cortadura o teoría de la energía de distorsión máxima.

En términos de las tensiones principales σ_1 , σ_2 y σ_3 , la tensión de von Mises se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]/2\}^{(1/2)}$$

La teoría expone que un material dúctil comienza a ceder en una ubicación cuando la tensión de von Mises es igual al límite de tensión. En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión. Sin embargo, el software le permite utilizar el límite de tensión de tracción/ruptura o establecer su propio límite de tensión.

$$\sigma_{\text{vonMises}} \geq \sigma_{\text{limit}}$$

El límite elástico es una propiedad dependiente de la temperatura. Este valor especificado del límite elástico debe considerar la temperatura del componente.

El factor de seguridad se calcula a partir de:

$$\text{Factor de seguridad (FDS)} = \sigma_{\text{limit}} / \sigma_{\text{vonMises}}$$

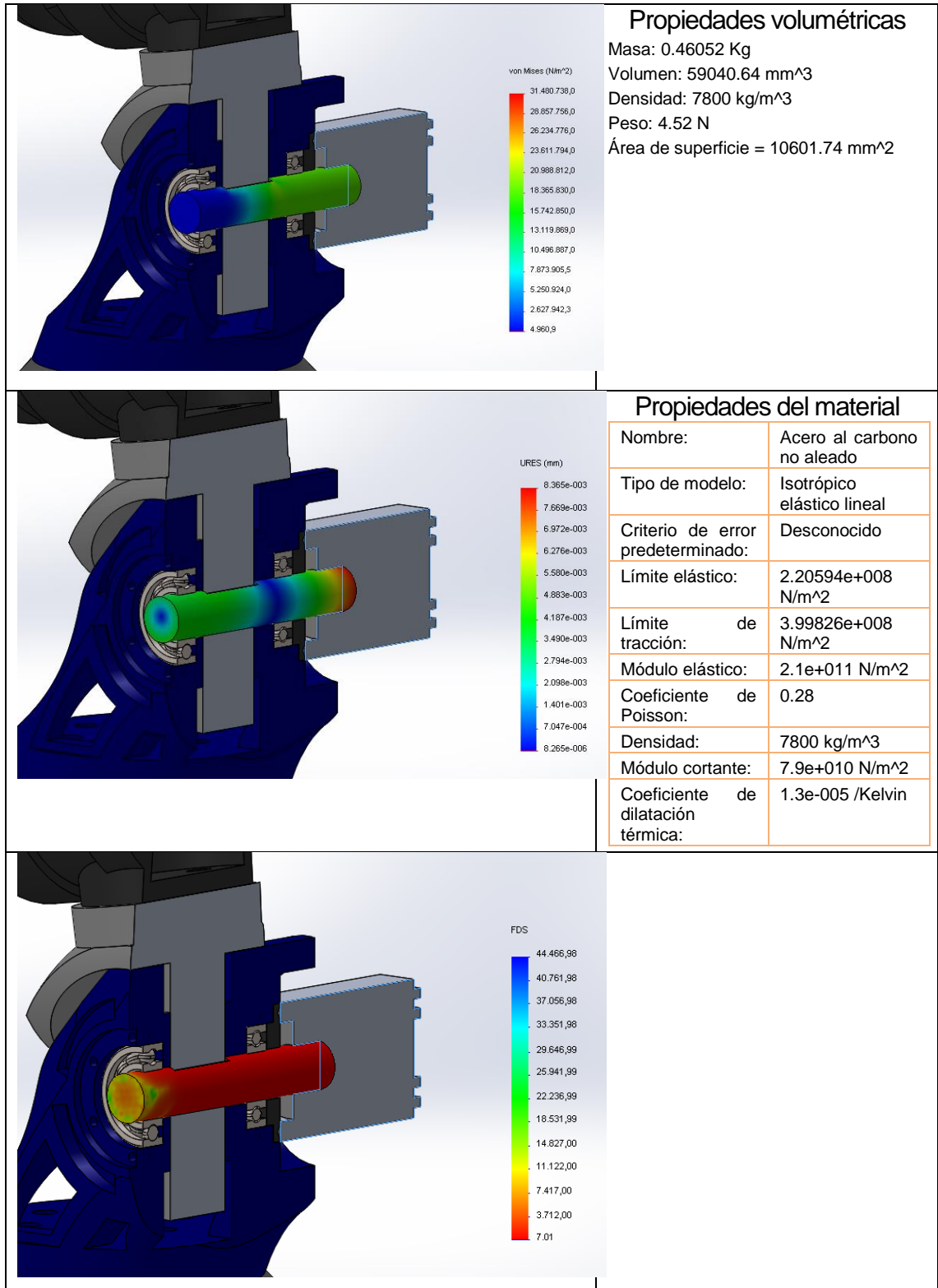
El desplazamiento resultante se obtiene por la combinación del desplazamiento en las tres direcciones.

El análisis CAE realizado en SolidWorks nos muestra el comportamiento de las diferentes piezas que componen el prototipo; este análisis se basa en el funcionamiento y debido al peso de la cámara se generan fuerzas en los dos ejes y en los materiales del prototipo que llevarían a deformaciones.

Ilustración 27. Distribución de fuerzas.



Tabla 9. Análisis eje motor 1. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad.



Propiedades volumétricas

Masa: 0.46052 Kg
 Volumen: 59040.64 mm³
 Densidad: 7800 kg/m³
 Peso: 4.52 N
 Área de superficie = 10601.74 mm²

Propiedades del material

| | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Nombre: | Acero al carbono no aleado |
| Tipo de modelo: | Isotrópico elástico lineal |
| Criterio de error predeterminado: | Desconocido |
| Límite elástico: | 2.20594e+008 N/m ² |
| Límite de tracción: | 3.99826e+008 N/m ² |
| Módulo elástico: | 2.1e+011 N/m ² |
| Coefficiente de Poisson: | 0.28 |
| Densidad: | 7800 kg/m ³ |
| Módulo cortante: | 7.9e+010 N/m ² |
| Coefficiente de dilatación térmica: | 1.3e-005 /Kelvin |

Tabla 10. Análisis base cámara. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad.

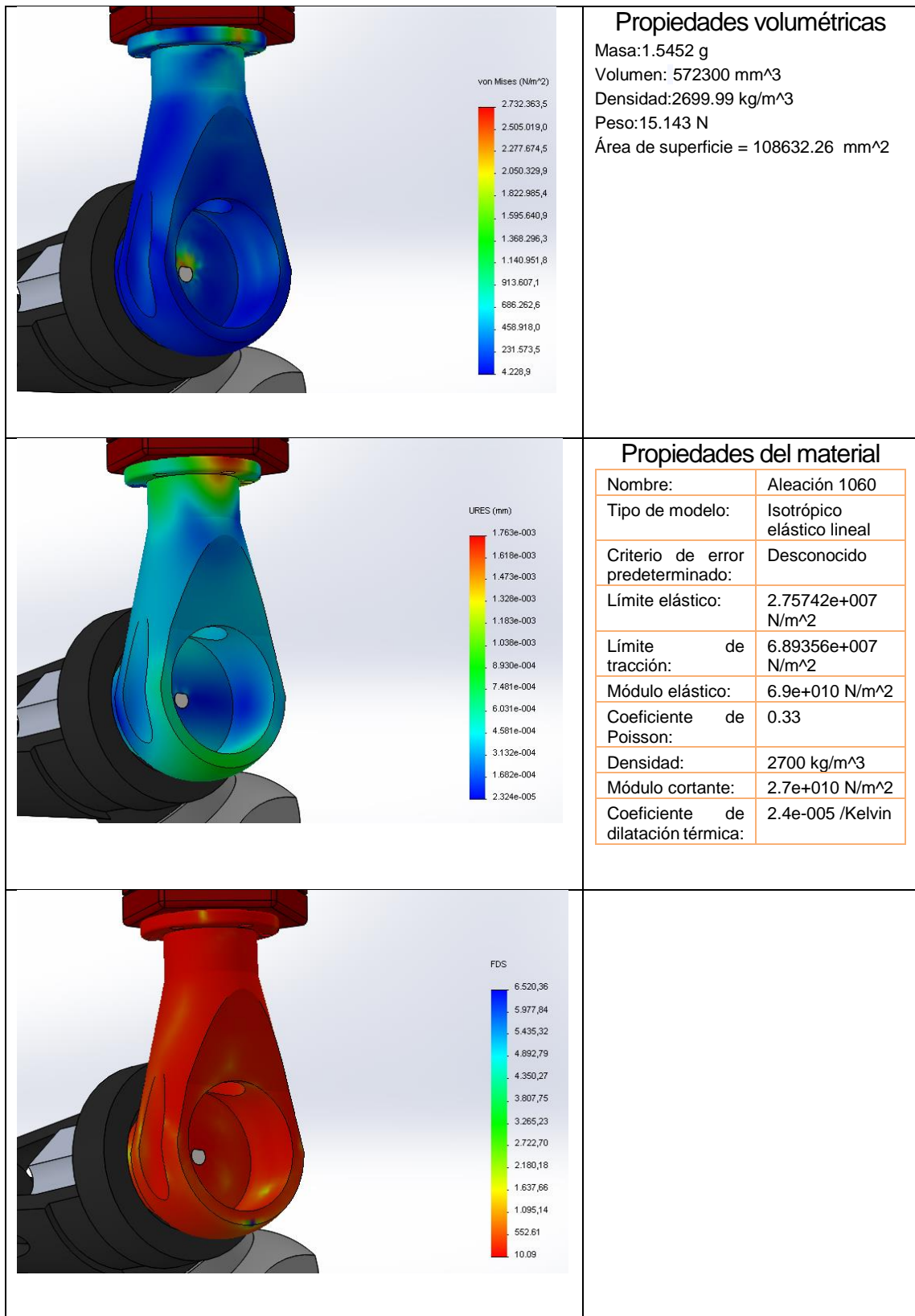
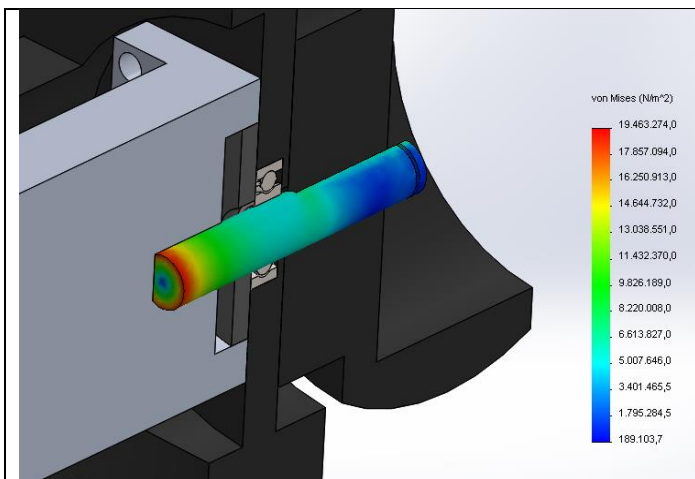
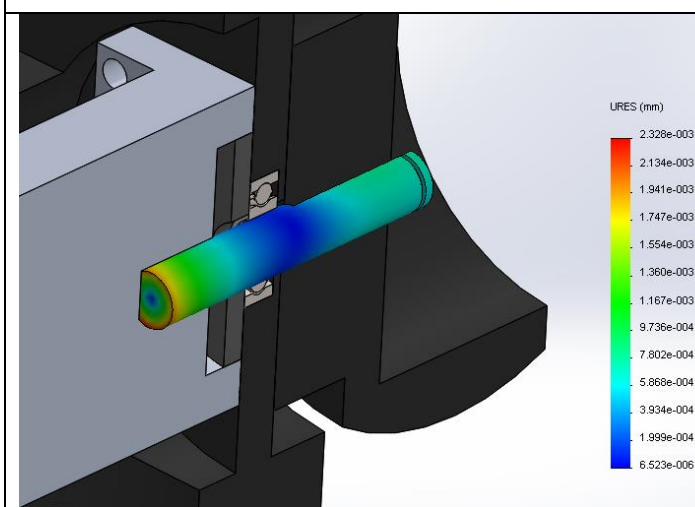


Tabla 11. Análisis eje motor 2. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad.



Propiedades volumétricas
 Masa: 0.06208 g
 Volumen: 7958.85 mm³
 Densidad: 7800 kg/m³
 Peso: 0.61 N
 Área de superficie = 3005.46 mm²



Propiedades del material

| | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Nombre: | Acero al carbono no aleado |
| Tipo de modelo: | Isotrópico elástico lineal |
| Criterio de error predeterminado: | Desconocido |
| Límite elástico: | 2.20594e+008 N/m ² |
| Límite de tracción: | 3.99826e+008 N/m ² |
| Módulo elástico: | 2.1e+011 N/m ² |
| Coefficiente de Poisson: | 0.28 |
| Densidad: | 7800 kg/m ³ |
| Módulo cortante: | 7.9e+010 N/m ² |
| Coefficiente de dilatación térmica: | 1.3e-005 /Kelvin |

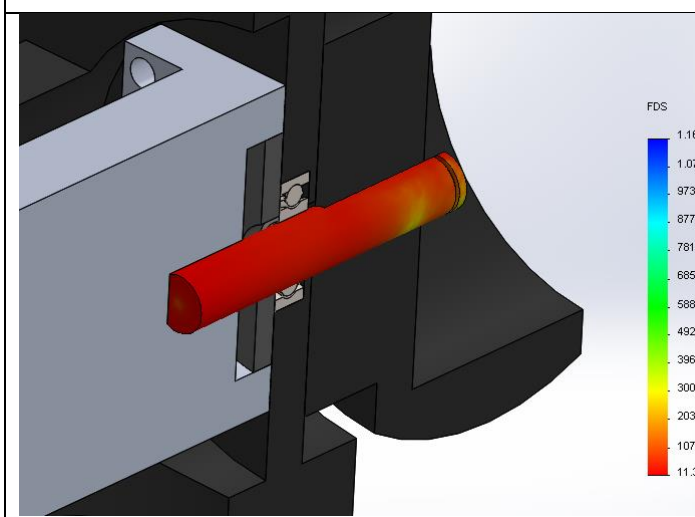


Tabla 12. Análisis base motor 2. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad.

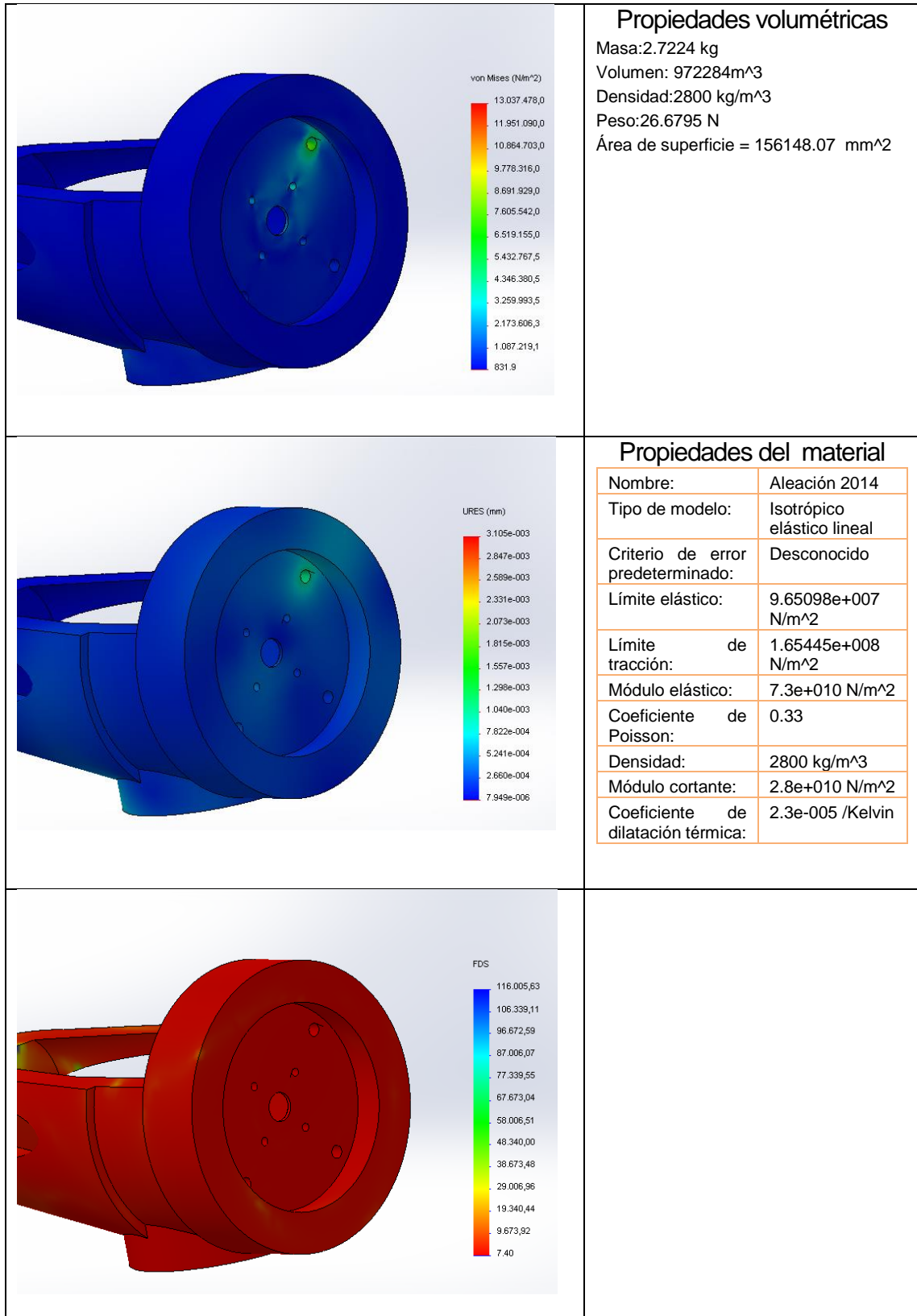


Tabla 13. Análisis módulo de movimiento. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad.

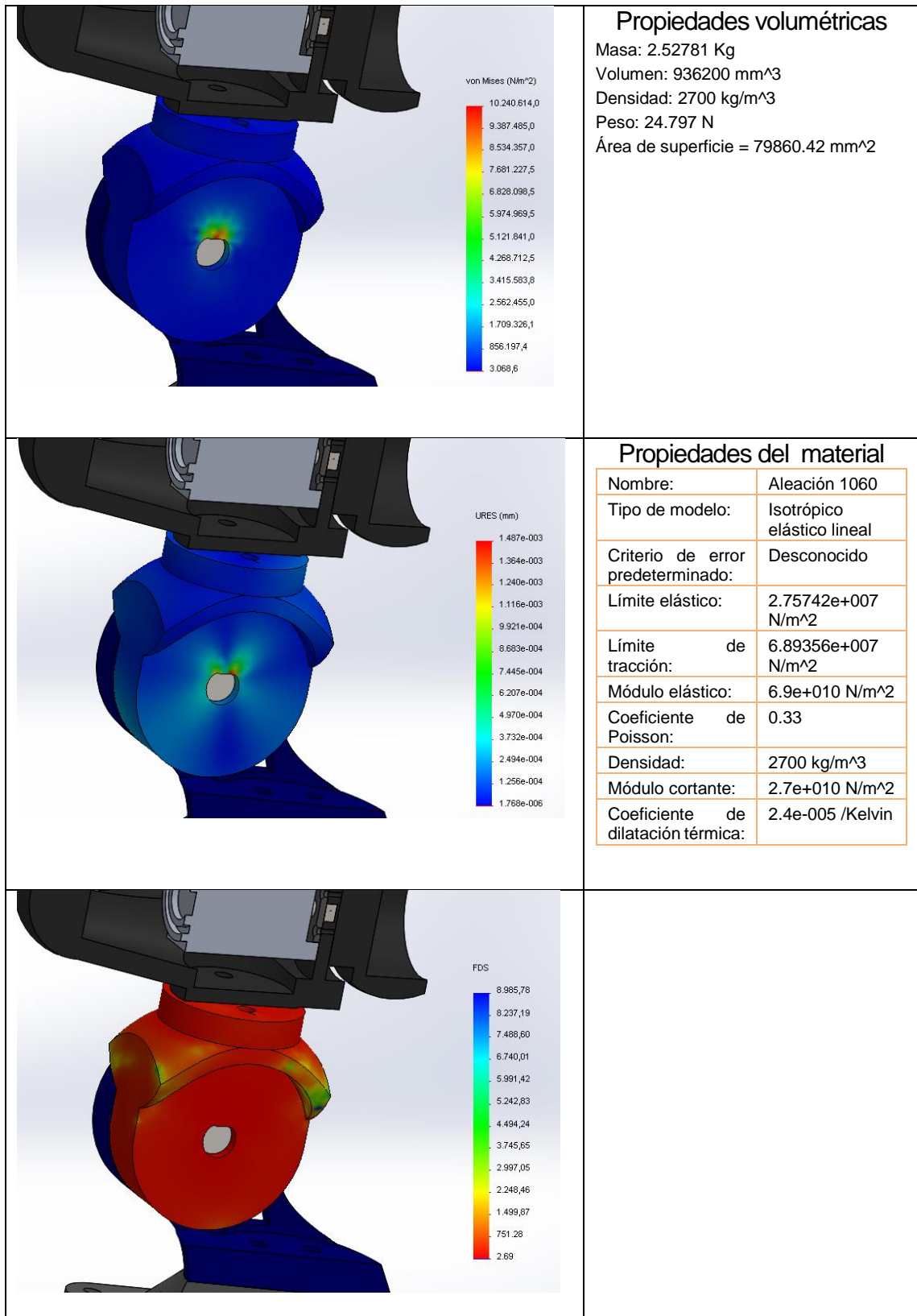


Tabla 14. Análisis soporte. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad.

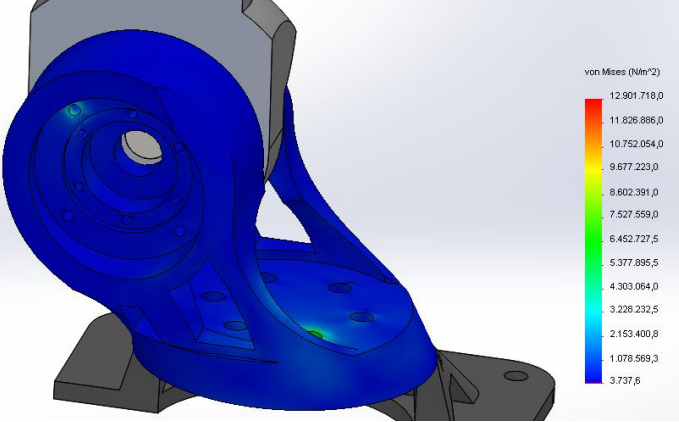
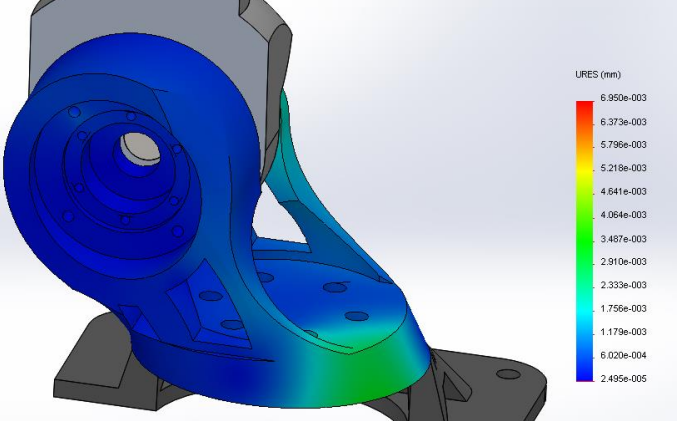
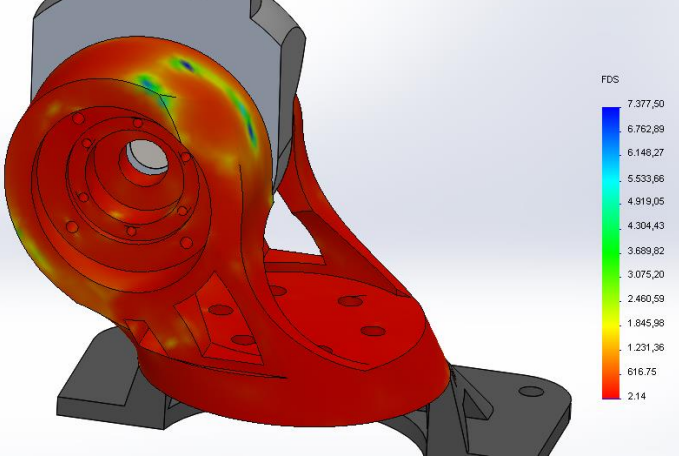
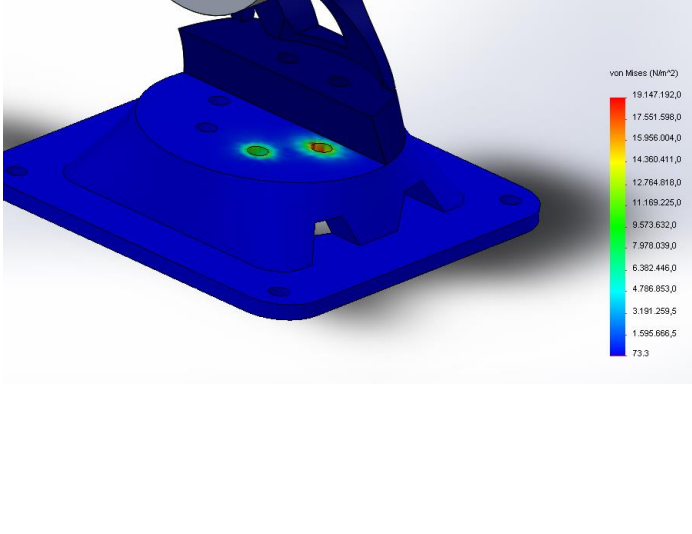
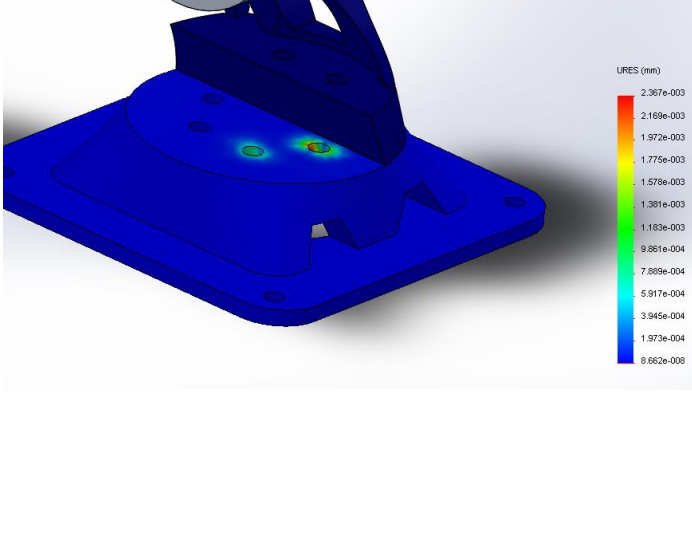
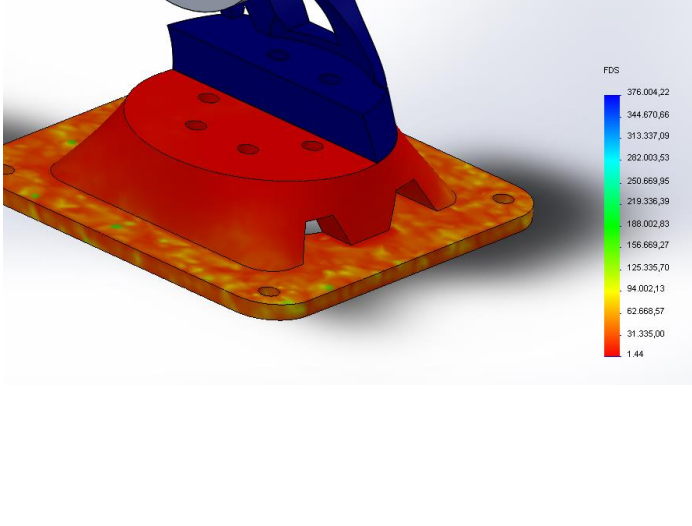
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---------|---------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------|------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|------|-----------|------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------------|------------------|
|  | <p>Propiedades volumétricas</p> <p>Masa:3.71035 kg Volumen: 1374210 mm³ Densidad:2700 kg/m³ Peso:36.3614 N Área de superficie = 184377.63 mm²</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | <p>Propiedades del material</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Nombre:</td> <td>Aleación 1060</td> </tr> <tr> <td>Tipo de modelo:</td> <td>Isotrópico elástico lineal</td> </tr> <tr> <td>Criterio de error predeterminado:</td> <td>Desconocido</td> </tr> <tr> <td>Límite elástico:</td> <td>2.75742e+007 N/m²</td> </tr> <tr> <td>Límite de tracción:</td> <td>6.89356e+007 N/m²</td> </tr> <tr> <td>Módulo elástico:</td> <td>6.9e+010 N/m²</td> </tr> <tr> <td>Coefficiente de Poisson:</td> <td>0.33</td> </tr> <tr> <td>Densidad:</td> <td>2700 kg/m³</td> </tr> <tr> <td>Módulo cortante:</td> <td>2.7e+010 N/m²</td> </tr> <tr> <td>Coefficiente de dilatación térmica:</td> <td>2.4e-005 /Kelvin</td> </tr> </tbody> </table> | Nombre: | Aleación 1060 | Tipo de modelo: | Isotrópico elástico lineal | Criterio de error predeterminado: | Desconocido | Límite elástico: | 2.75742e+007 N/m ² | Límite de tracción: | 6.89356e+007 N/m ² | Módulo elástico: | 6.9e+010 N/m ² | Coefficiente de Poisson: | 0.33 | Densidad: | 2700 kg/m ³ | Módulo cortante: | 2.7e+010 N/m ² | Coefficiente de dilatación térmica: | 2.4e-005 /Kelvin |
| Nombre: | Aleación 1060 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo de modelo: | Isotrópico elástico lineal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Criterio de error predeterminado: | Desconocido | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Límite elástico: | 2.75742e+007 N/m ² | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Límite de tracción: | 6.89356e+007 N/m ² | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Módulo elástico: | 6.9e+010 N/m ² | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Coefficiente de Poisson: | 0.33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Densidad: | 2700 kg/m ³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Módulo cortante: | 2.7e+010 N/m ² | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Coefficiente de dilatación térmica: | 2.4e-005 /Kelvin | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 15. Análisis base. Trazado de tensiones, deformación y factor de seguridad.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---------|---------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------|------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|------|-----------|------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------------|------------------|
|  | <p>Propiedades volumétricas</p> <p>Masa: 2.56648 kg Volumen: 950548 mm³ Densidad: 2700 kg/m³ Peso: 25.1515 N Área de superficie = 174253.18 mm²</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | <p>Propiedades del material</p> <table border="1" data-bbox="1038 860 1433 1323"> <tbody> <tr> <td>Nombre:</td> <td>Aleación 1060</td> </tr> <tr> <td>Tipo de modelo:</td> <td>Isotrópico elástico lineal</td> </tr> <tr> <td>Criterio de error predeterminado:</td> <td>Desconocido</td> </tr> <tr> <td>Límite elástico:</td> <td>2.75742e+007 N/m²</td> </tr> <tr> <td>Límite de tracción:</td> <td>6.89356e+007 N/m²</td> </tr> <tr> <td>Módulo elástico:</td> <td>6.9e+010 N/m²</td> </tr> <tr> <td>Coefficiente de Poisson:</td> <td>0.33</td> </tr> <tr> <td>Densidad:</td> <td>2700 kg/m³</td> </tr> <tr> <td>Módulo cortante:</td> <td>2.7e+010 N/m²</td> </tr> <tr> <td>Coefficiente de dilatación térmica:</td> <td>2.4e-005 /Kelvin</td> </tr> </tbody> </table> | Nombre: | Aleación 1060 | Tipo de modelo: | Isotrópico elástico lineal | Criterio de error predeterminado: | Desconocido | Límite elástico: | 2.75742e+007 N/m ² | Límite de tracción: | 6.89356e+007 N/m ² | Módulo elástico: | 6.9e+010 N/m ² | Coefficiente de Poisson: | 0.33 | Densidad: | 2700 kg/m ³ | Módulo cortante: | 2.7e+010 N/m ² | Coefficiente de dilatación térmica: | 2.4e-005 /Kelvin |
| Nombre: | Aleación 1060 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo de modelo: | Isotrópico elástico lineal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Criterio de error predeterminado: | Desconocido | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Límite elástico: | 2.75742e+007 N/m ² | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Límite de tracción: | 6.89356e+007 N/m ² | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Módulo elástico: | 6.9e+010 N/m ² | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Coefficiente de Poisson: | 0.33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Densidad: | 2700 kg/m ³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Módulo cortante: | 2.7e+010 N/m ² | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Coefficiente de dilatación térmica: | 2.4e-005 /Kelvin | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

6.2.2 Resultados y trazados del torque y la potencia

El torque es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia. La potencia desarrollada por el par motor es proporcional a la velocidad angular del eje de transmisión, viniendo dada por:

$$P = M\omega$$

Dónde:

P : es la potencia (en **W**)

M : es el par motor (en **N·m**)

ω : es la velocidad angular (en **rad/s**)

Conocido el modelo dinámico del robot, se calcularon torques y potencias de los servomotores. Con esta información se seleccionan de catálogos comerciales y se diseña o seleccionan las transmisiones. Al llegar a este paso ya se tienen definidas las variables a controlar, por lo que se puede seleccionar los sensores correspondientes. Conocidos los sensores puede obtenerse su modelo matemático para representarlo en diagrama de bloques e integrarlos al sistema de control.

Ilustración 28. Trazado del torque, potencia y velocidad angular para el motor 1.

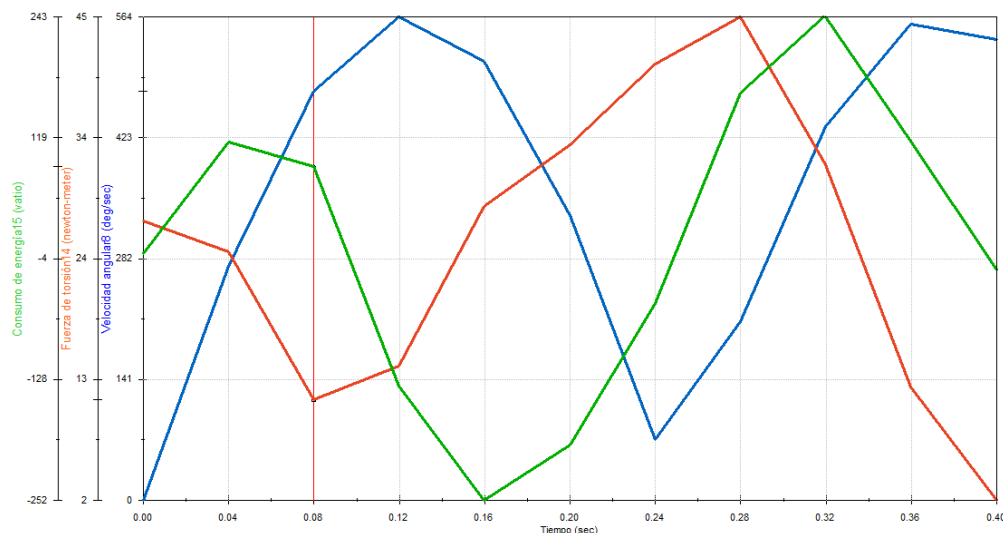
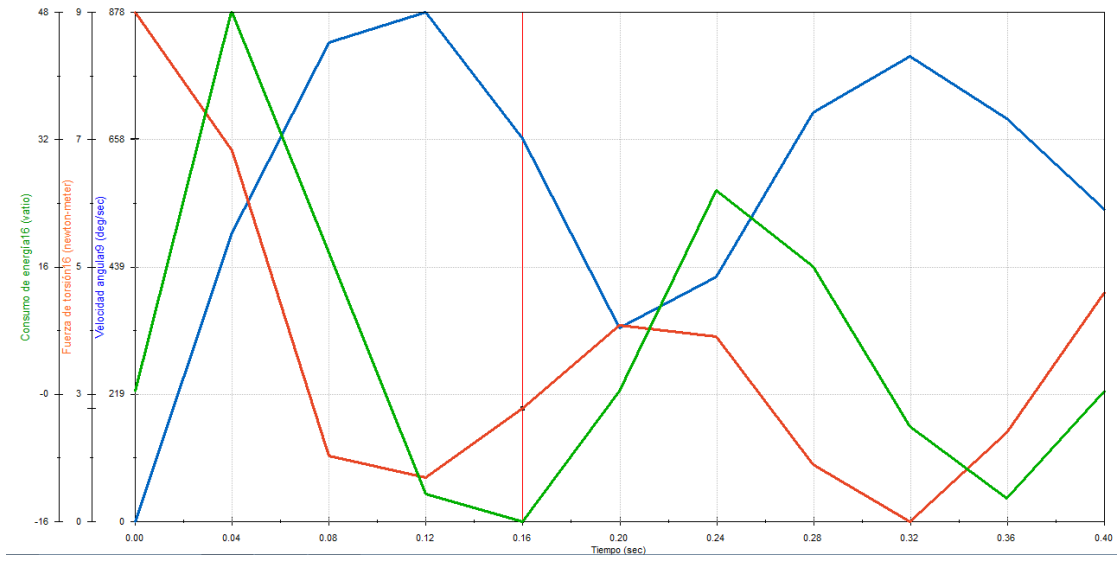


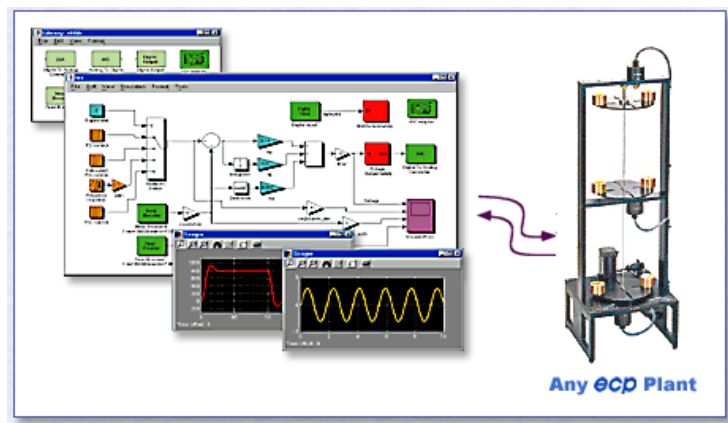
Ilustración 29. Trazado del torque, potencia y velocidad angular para el motor 2.



7 SIMULACIÓN DINÁMICA DEL ESTABILIZADOR

Para este proyecto se desarrolla un modelo cinemático y dinámico para simular y evaluar los diseños de la plataforma de estabilización mediante la herramienta computacional Simulink. Significa la visualización en una estación computarizada de la animación del sistema de control de la plataforma de estabilización para conocer un comportamiento ante diferentes acciones de control. Para el efecto se emplea software especializado de simulación.

Ilustración 30. Entorno Simulink Matlab.



Fuente: http://www.ecpsystems.com/controls_rtl.htm

Para entrar en detalles Simulink es una plataforma para simulación multidominio y diseño basado en modelos de sistemas dinámicos. Proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto de librerías de bloques personalizables que permiten diseñar, simular, implementar y probar una gran variedad de sistemas con variación temporal, entre los que se incluyen sistemas de comunicaciones, control, procesamiento de señales, vídeo e imágenes.

SimMechanics contiene herramientas para el modelado tridimensional de los sistemas mecánicos en el entorno Simulink. En lugar de derivar ecuaciones y programación, puede utilizar esta herramienta de simulación de sistemas multicuerpo para construir un modelo compuesto de cuerpo, las articulaciones, limitaciones, y los elementos de fuerza que refleja la estructura del sistema. Genera automáticamente una animación 3-D le permite visualizar la dinámica

del sistema. Puede importar modelos completos con masa, la inercia, la restricción, y la geometría en 3-D a partir de varios sistemas CAD.

7.1 SimMechanics

Se modela el sistema mediante bloques que representan los elementos, las articulaciones, limitaciones y fuerzas; luego SimMechanics¹¹ formula y resuelve las ecuaciones de movimiento para el sistema mecánico completo.

Modelos de sistemas CAD, incluyendo masa, inercia, articulaciones, restricciones y geometría 3D, se pueden importar en SimMechanics. Una animación 3D generada automáticamente que permite visualizar la dinámica del sistema.

Al utilizar este software de simulación obtenemos muchas ventajas ya que al poder trabajar sobre el sistema hecho en SolidWorks se deducen muchos parámetros que mejora el diseño. Puede parametrizar los modelos de uso de variables de MATLAB y expresiones, y sistemas de control de diseño para su sistema multicuerpo en Simulink[®]. Puede agregar sistemas eléctricos, hidráulicos, neumáticos y otros componentes para su modelo mecánico y poner a prueba a todos en un solo entorno de simulación.

SimMechanics genera un diagrama de bloques que simula un sistema mecánico a partir de un ensamblaje realizado con un software CAD. Para simular en SimMechanics se ha utilizado un complemento de SimMechanics llamado SimMechanics Link que permite crear archivos de extensión XML para el modelado físico y STL para la visualización a través de un ensamblaje realizado con un software CAD. XML es un metalenguaje (lenguaje que se utiliza para hacer referencia a otros lenguajes) que se utiliza como un estándar para el intercambio de información estructurada entre diferentes plataformas. STL es un tipo de archivo que utiliza una malla de pequeños triángulos sobre las superficies para definir la forma de un objeto. A partir de estos archivos SimMechanics

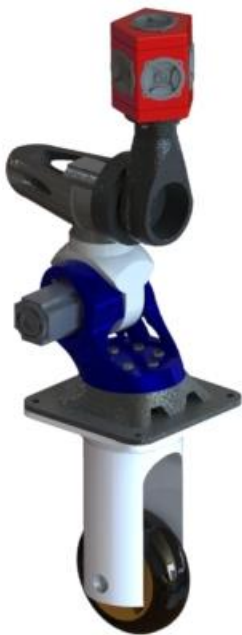
¹¹ SimMechanics proporciona un entorno de simulación multicuerpo para sistemas mecánicos 3D, tales como robots, suspensiones de vehículos, equipos de construcción o equipo de aterrizaje de los aviones.

genera un modelo que simula físicamente el sistema mecánico mediante un diagrama de bloques, y visualmente mediante Machine for model, con el cual se observa el ensamblaje inicial del cual se ha partido.

Para la realización de estas simulaciones se debe tener el sistema hecho en SolidWorks de tal manera que el ensamblaje este de la forma que se desee que trabaje; con las condiciones de movimiento y con los diferentes anclajes que permitan el funcionamiento del prototipo.

Para simular el movimiento que hace el automóvil se le agrego al prototipo un sistema de soporte y rueda que va generar la señal que indica sobre que terreno se está desplazando; esto permite visualizar como trabajara el diseño.

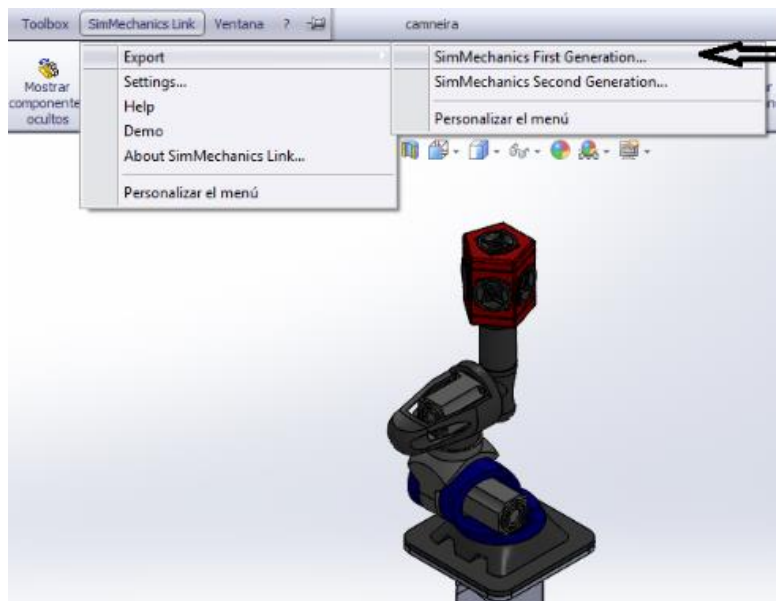
Ilustración 31. Principio del modelo para la simulación en Simulink.



7.2 Desarrollo de la interfaz SolidWorks – Simulink

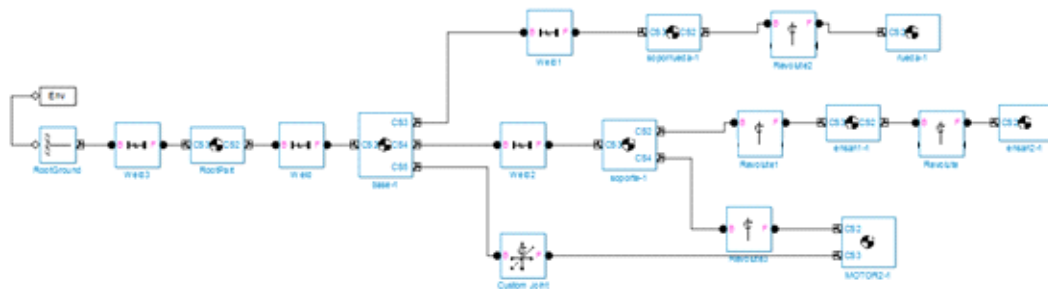
Desde SolidWorks se exporta el modelo al simulador mecánico de Simulink (SimMechanics) cuando se tiene el prototipo completo se guarda el archivo, luego se busca la librería de SimMechanics y se exporta como compuesto de SimMechanics de primera generación que realiza un archivo XLM con el cual se trabajara en Matlab.

Ilustración 32. Desarrollo para el inicio, de la interfaz SolidWorks -Simulink.



En Matlab se importa la carpeta donde se guardó desde “current folder”; ya hay con los archivos se digita en el “command window” el comando “mech_import ('nombre_archivo.xml’)” con este enlace se genera un sistema de bloques de Simulink.

Ilustración 33. Programación en bloques Simulink.

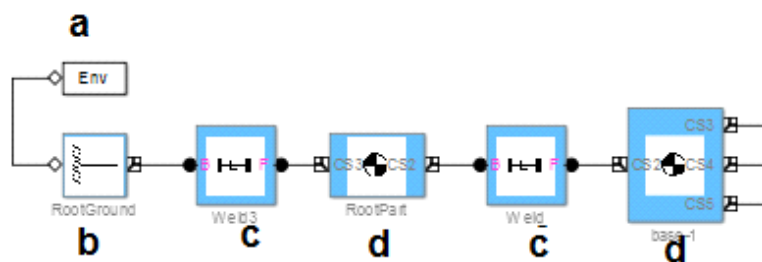


Una vez que se ha exportado el modelo de SolidWorks a SimMechanics hay que realizar una inspección revisarlo de posibles errores o bloques que sobren. El sistema de bloques creado esta por defecto sin ningún control y si se simula como ha quedado trabajaría de forma errática luego entonces se debe agregar los diferentes bloques de control que permitan que el sistema tenga el movimiento requerido para la simulación.

Al crear el sistema se revisa cada bloque, su estructura y su posición para verificar su conexión sea la indicada para la simulación; ya que a veces puede haber inconvenientes para el trabajo que se desea realizar. Cada bloque actúa como una parte o la unión e interacción que el sistema requiere; luego se debe introducir las especificaciones requeridas para cada componente del sistema. Esto ayudara a que la simulación se asemeje más a la realidad; y se obtendrá lo que se desea que es la visualización de como trabajara el sistema diseñado y que cambios debe tener y que componentes sobran o faltan para que cumpla con los requerimientos que se desea.

7.3 Descripción de los diferentes bloques

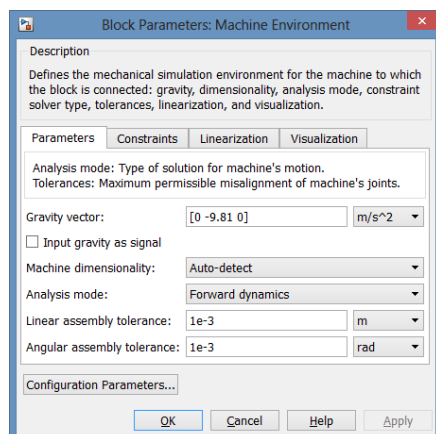
Ilustración 34. Análisis de bloques de Simulink.



7.3.1 Machine Environment

Define el entorno de simulación mecánica de la máquina a la que está conectado el bloque: la gravedad, las dimensiones, el modo de análisis, el tipo de solucionador de restricciones, tolerancias, linealización y visualización.

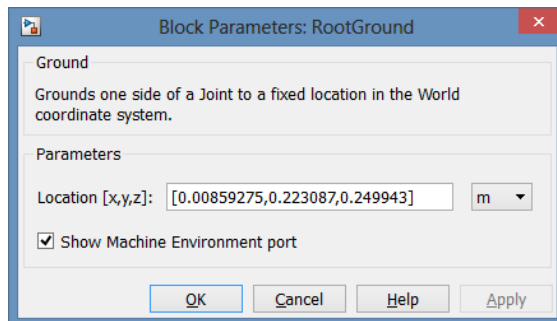
Ilustración 35. Configuración del bloque machine Environment.



7.3.2 RootGround

Anclar el sistema a un lugar fijo en el sistema de coordenadas.

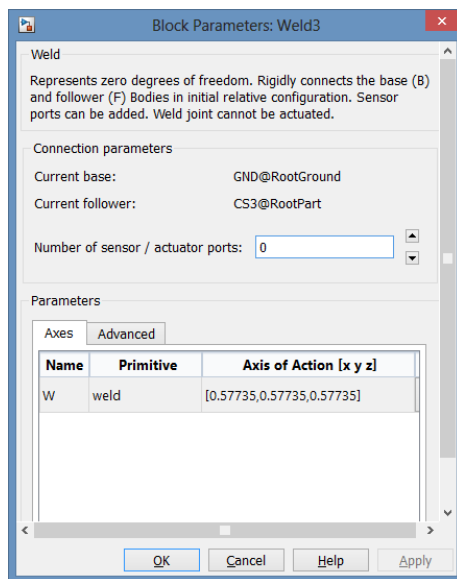
Ilustración 36. Configuración del bloque RootGround.



7.3.3 Weld

Representa cero grados de libertad. Conecta rígidamente la base y el seguidor. Se pueden añadir puertos de sensores.

Ilustración 37. Configuración del bloque Weld.



7.3.4 Ensan

Representa un cuerpo rígido definido por el usuario; en masa m , tensor de inercia I , y coordinar orígenes y ejes para el centro de gravedad (CG) y otra de cuerpo especificada por el usuario de sistemas de coordenadas. Este cuadro de diálogo define la posición inicial del cuerpo y la orientación; también proporciona opciones para la geometría del cuerpo y color.

Ilustración 38. Configuración del bloque Ensan para la representación del cuerpo rígido.

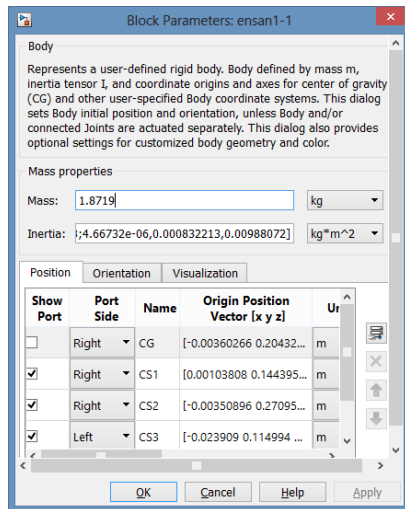


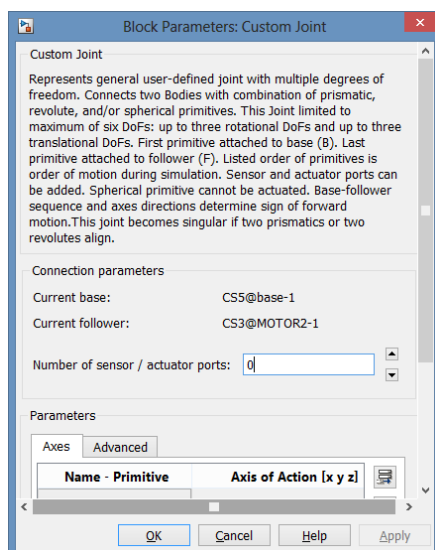
Ilustración 39. Bloques Custom joint y Revolute.



7.3.5 Custom joint

Representa el conjunto en general definido por el usuario con varios grados de libertad. Conecta dos cuerpos en combinación de revolución, hasta tres grados de libertad de rotación y un máximo de tres grados de libertad de traslación. Se pueden añadir puertos de sensores y actuadores.

Ilustración 40. Configuración del Custom joint.



hace en la rueda que representa el movimiento del automóvil y los dos motores que van a contrarrestar el movimiento que se genera.

7.5 Desarrollo de bloques para la superficie de movimiento

Para simular la superficie de la carretera se utilizan bloques de Simulink con diferentes perfiles con los que se representa el terreno. En este caso se ha elegido una secuencia saltos, una superficie ondulada, un escalón, una secuencia de escalones y un terreno abrupto, en los cuales se pueden modificar los valores para variar el terreno. Y se hace una programación con bloques para que en un tiempo determinado cambie la forma el terreno o haga la secuencia que debe tener para la superficie.

Ilustración 43. Configuración de bloques para Counter Limited.

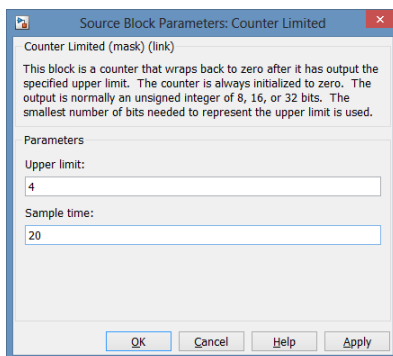
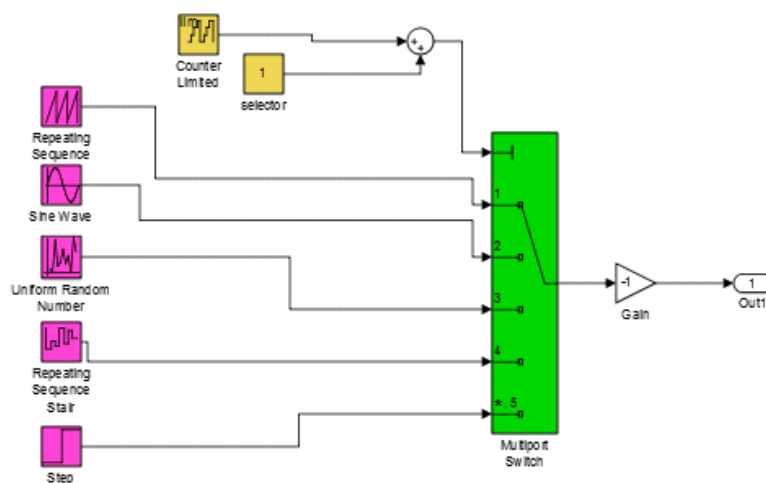
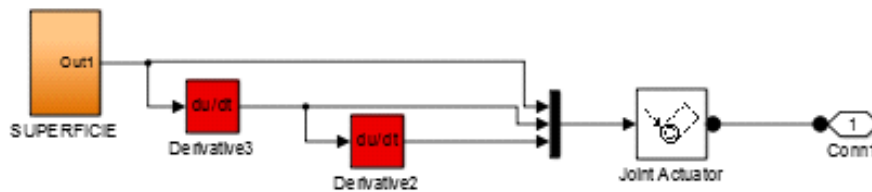


Ilustración 44. Generación de excitación para Simulink.



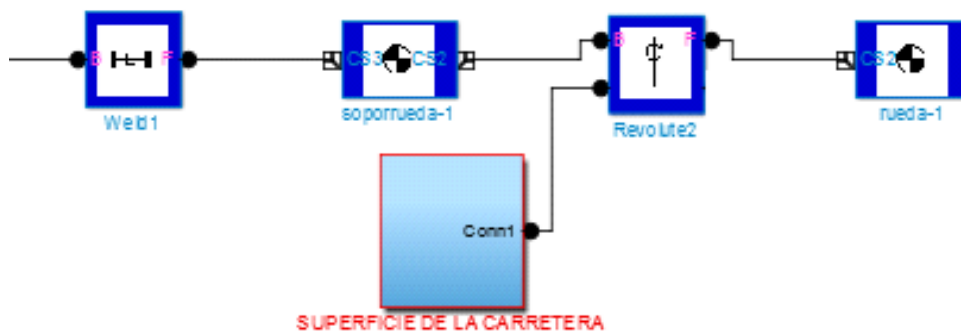
Con la señal de la superficie del terreno se toma como un subsistema que se llama “SUPERFICIE” para unirla a unos bloques que va a simular posición, velocidad y aceleración al componente para que la genere; y esto se realiza incorporando diferentes bloques de programación.

Ilustración 45. Subsistema de movimiento.



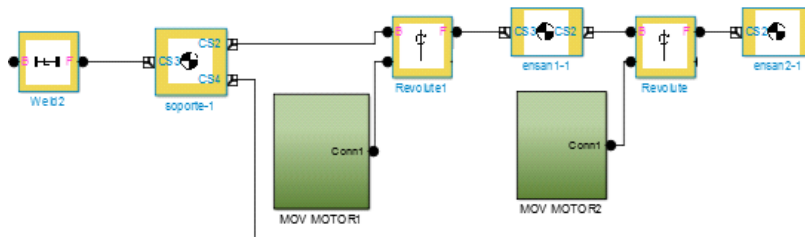
Al tener esta parte de la programación de la superficie del terreno se crea un nuevo subsistema llamado “SUPERFICIE DE LA CARRETERA” que contiene la señal de superficie y la programación de la posición, velocidad y aceleración; y esta se incorpora al sistema de bloques creado desde SimMechanics al “Revolute” de la rueda; que es el bloque que genera la rotación.

Ilustración 46. Configuración del subsistema de superficie al movimiento del motor.



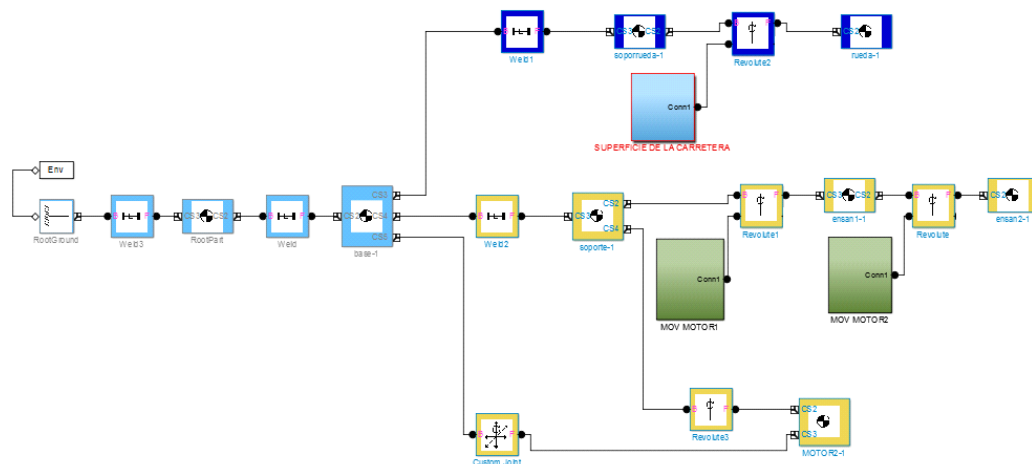
De igual modo se hace una programación similar a los dos motores ya que estos tienen que contrarrestar el movimiento generado por la señal que viene del vehículo (rueda) y completara la simulación de una forma casi real que es como se necesita.

Ilustración 47. Configuración del subsistema del movimiento de los motores al programa.



Con esto se completa el sistema que se va a simular, los bloques con su respectiva programación; pero aún falta la programación de visualización y captura de los datos que nos genere la simulación.

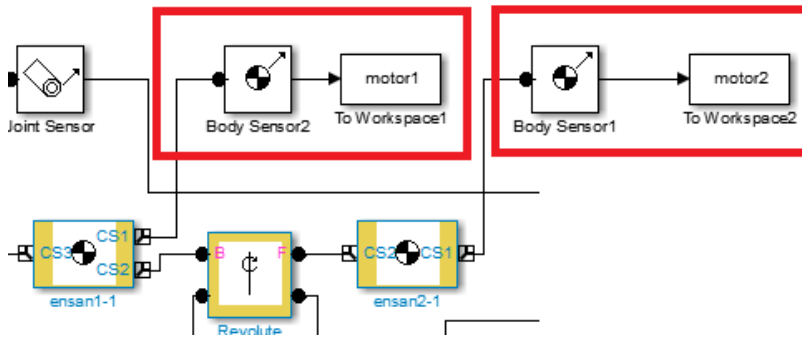
Ilustración 48. Programa de bloque completo.



7.6 Desarrollo de bloques para la visualización de movimiento

Para visualizar el movimiento en forma gráfica se incorpora dos bloques; un “joint sensor” que va a enviar la señal generada por cada “Revolute” y un “scope” que es el visualizador de la señal.

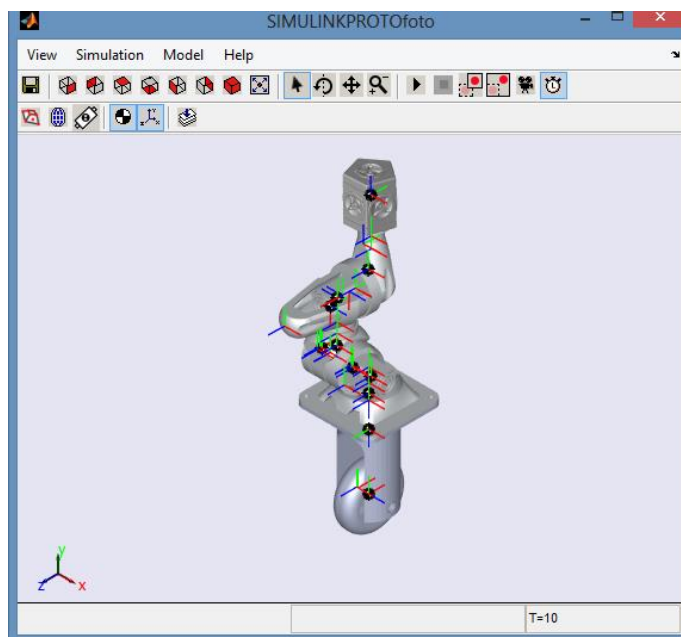
Ilustración 51. Bloques para captura de datos.



7.8 Inicio y configuración de la simulación

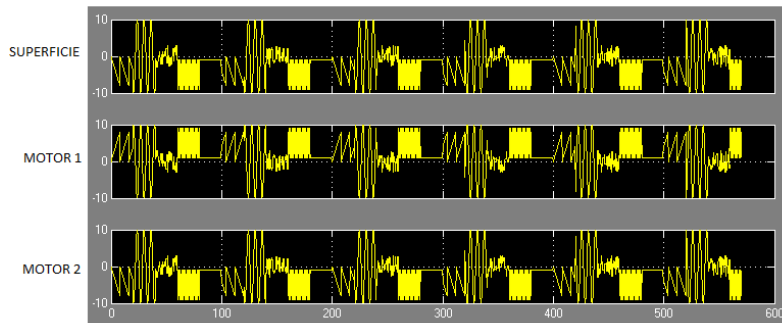
Para simular el sistema se puede configurar el tiempo de simulación para luego correrlo; para nuestro caso le damos un tiempo de 150 segundos que es suficiente para que la señal del terreno pase por todas las etapas ya que dicha señal tiene un cambio de secuencia cada 20 segundos y son cinco etapas. Lugo de la simulación se observa el diseño con los diferentes centros de gravedad y los planos que indican como es su movimiento en las partes que se hizo la programación.

Ilustración 52. Animación de la simulación.



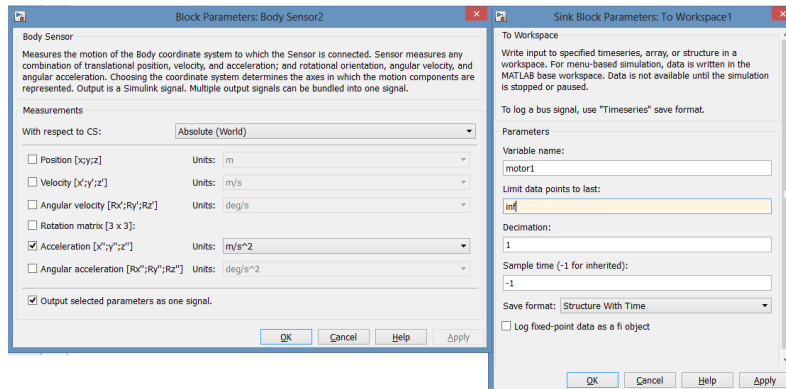
Con la simulación en proceso se observa el movimiento que va generando cada parte a la que se programa.

Ilustración 53. Graficas de posición en el tiempo de los motores.



Luego de la simulación del sistema se visualiza la posición, velocidad y aceleración de los motores. Con los datos tomados por los bloques “body sensor” y “to workspace”; “body sensor” almacena posición, velocidad lineal y angular, aceleración lineal y angular y “to workspace” almacena los datos y los guarda en formato Structure With time, en la carpeta donde esté trabajando Matlab.

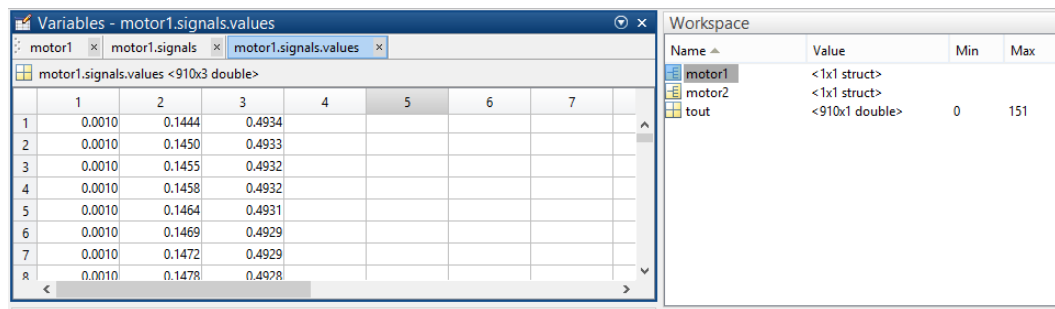
Ilustración 54. Configuración para la captura de datos (Body sensor, to workspace).



7.9 Muestreo de datos

Los archivos generados contienen una variable donde se encuentran los datos almacenados. Para que la variable aparezca hay que ejecutar el archivo que debe aparecer en “Current Directory” “workspace” en el inicio del entorno de Matlab.

Ilustración 55. Entorno de la captura de datos.



El procedimiento que se sigue para trabajar con los datos obtenidos es sencillo y como lo que se quiere es tener una gráfica del tiempo VS posición, velocidad y aceleración se realiza lo siguiente:

- **Primero**
 En el “command window” de Matlab se teclea:
`y = nombre_archivo.signals.values`
 Que son los valores que van en el eje (y).
 Dónde: y es la variable generada
 nombre_archivo es el nombre de archivo que se ha generado.
- **Segundo**
 Para los valores que van en el eje (x) se teclea en el “command window”:
`t=nombre_archivo.time`
 Y para que se genere la gráfica se teclea en el “command window”:
`Plot (x, y)`
- **Tercero**
 Con esto ya se genera la gráfica. Se trabajó simulando cada variable de los motores, posición, velocidad y aceleración; y cada una nos generó las siguientes gráficas. Cabe resaltar que se muestra tres líneas en cada recuadro y es por defecto Matlab grafica también los mínimos y los máximos.

Ilustración 56. Posición de los motores.

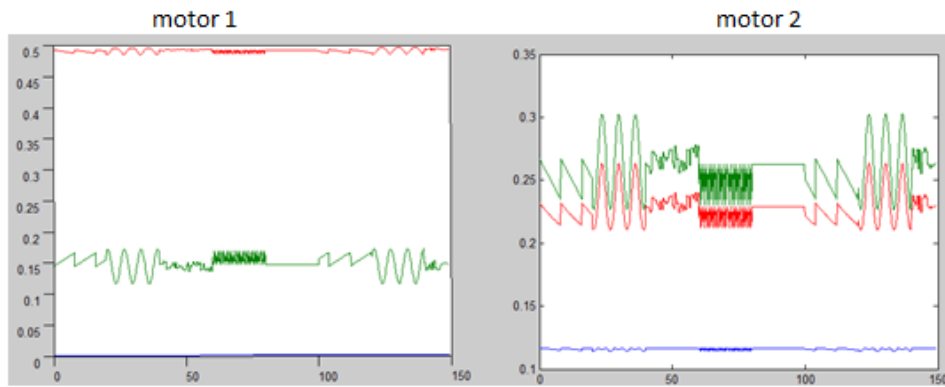


Ilustración 57. Velocidad de los motores.

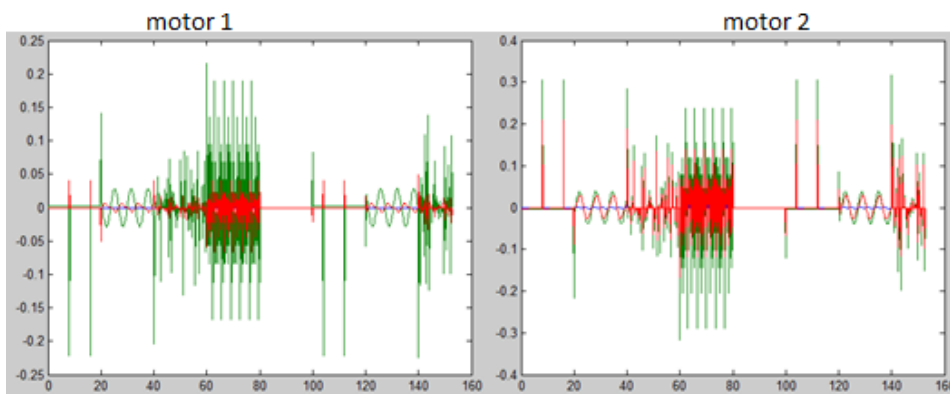
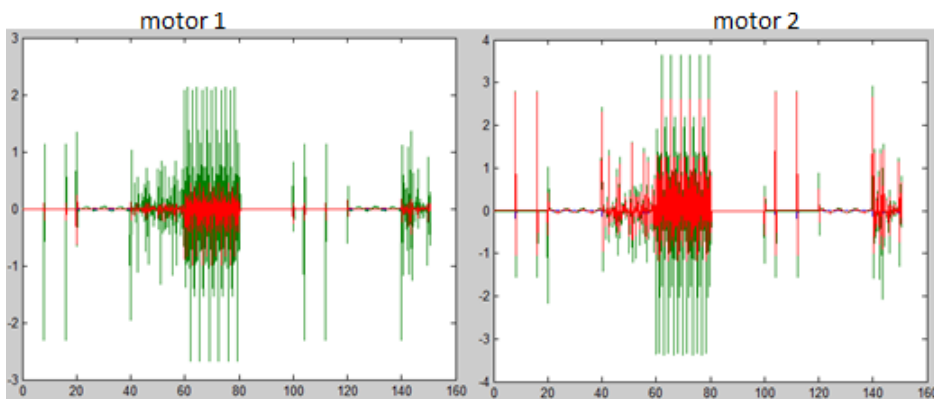


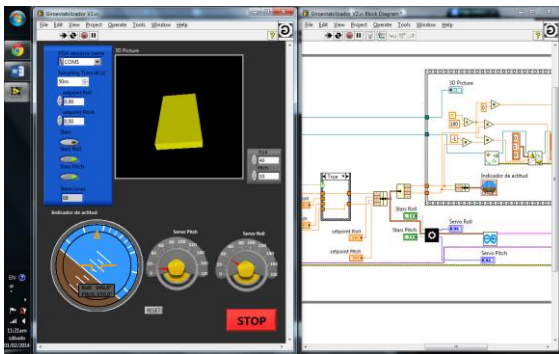
Ilustración 58. Aceleración de los motores.



8 INTERFAZ HOMBRE- MÁQUINA (HMI)

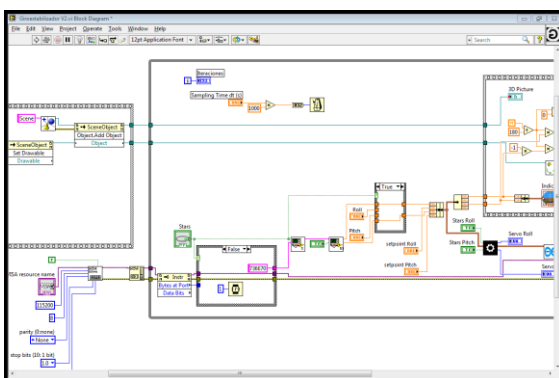
El HMI (Interfaz hombre- máquina) del prototipo fue desarrollado mediante el software LabVIEW. El programa desarrollado con LabVIEW recibe el nombre de Giroestabilizador, el cual se desarrolla como un instrumento virtual (VIs).

Ilustración 59. Entorno programa diseñado en LabVIEW.



Una de las ventajas que genera LabVIEW es que permite la creación de programas con varios subVIs, los cuales en otros lenguajes de programación son llamados subrutinas. Un subVI puede ser utilizado las veces que sean necesarias dentro de un VI, para así evitar hacer el mismo procedimiento varias veces reduciendo de esta manera la programación dentro Vis principal.

Ilustración 60. Entorno programación en diagrama de bloque Labview.



Con el objetivo de facilitar la programación de HMI se desarrolló un Vis con varios subVIs, los cuales serán explicados más adelante.

El HMI desarrollado permite que el usuario se pueda comunicar con el prototipo de tal modo que mediante una interfaz gráfica el usuario pueda realizar el control y conocer la orientación del prototipo.

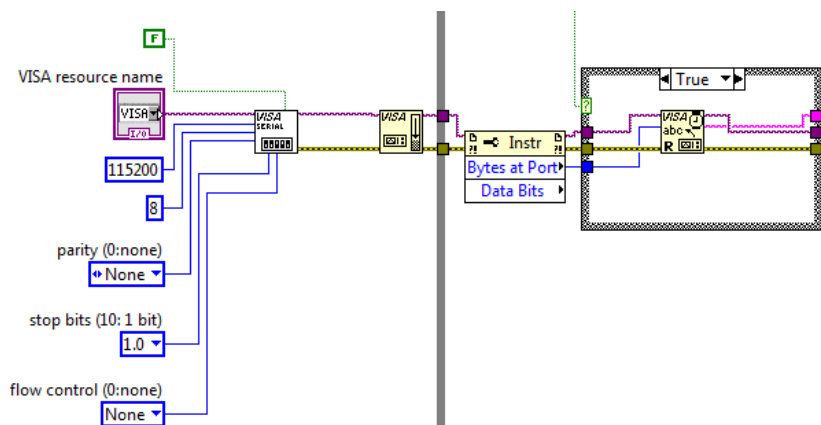
La comunicación de la IMU está basada en el protocolo UART Data Communication Protocol. Este es un conjunto de comandos y respuestas en serie diseñados específicamente para sensores de orientación. Todas las comunicaciones con el sensor son realizadas usando un puerto serie estándar. Esto se consigue gracias a un controlador del dispositivo que convierte las distintas opciones del interfaz proporcionadas por el fabricante (FTDI), además para una respuesta en tiempo real se requiere que una tarjeta de adquisición de datos que este comunicada con PC por el mismo puerto serial.

8.1 Desarrollo del VI para la adquisición de datos

El envío y recepción de datos se realizó mediante 2 instrumentos de la paleta de VISA para la comunicación serial UART.

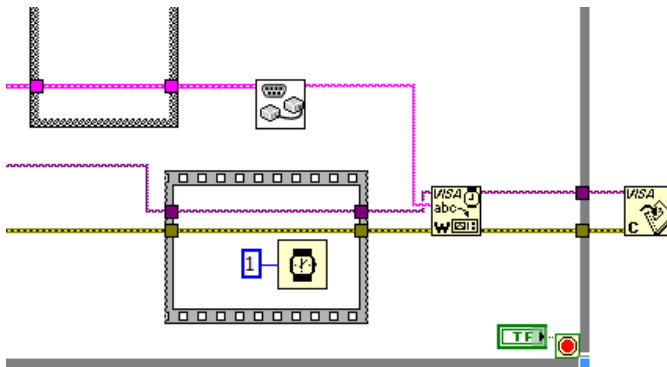
En la figura se puede observar el VI de envío de datos. Para facilitar la explicación este sub VI se lo divide en dos bloques. En el primer bloque se configura el puerto serial para la comunicación con el prototipo. En la configuración se especifica el puerto, baud rate, 8 bits de datos, sin paridad y 1 bit de parada. En el segundo bloque se usa una herramienta VISA Write la cual permite escribir los datos en el puerto.

Ilustración 61. Detalles de la recepción de datos en Labview.



El VI para la recepción de datos se presenta en la figura. En el primer bloque se procede a configurar el puerto serial. En el segundo bloque primordialmente se determina el número de bytes que llegara al puerto, para luego mediante la herramienta VISA Read leer el número de bytes especificados.

Ilustración 62. Detalles del envío de datos en Labview.



8.2 Desarrollo del SubVI para el cálculo de los ángulos Euler

Este SubVI fue desarrollado para que reciba los paquetes de datos que continuamente se encuentra enviando el sensor de orientación (unidad de medición inercial). Una vez recibidos los paquetes, se extrae la información correspondiente a los ángulos de Euler, y posteriormente se los convierte a grados para su visualización.

El sensor de orientación envía la información serial en forma de paquetes que se encuentran formados por 13 bytes hexadecimales. Cada paquete se encuentra como se muestra en la tabla.

Tabla 16. Estructura del paquete de datos de la IMU.

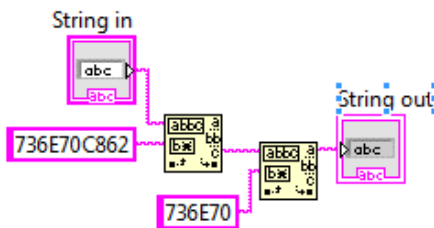
| Secuencia de inicio | Tipo de paquete | Dirección | Ángulos de Euler | | Checksum |
|---------------------|-----------------|-----------|------------------|--------|----------|
| | | | Roll | Pitch | |
| 3 Bytes | 1 Byte | 1 Byte | 2 Byte | 2 Byte | 2 Bytes |

La secuencia de inicio consta de 3 bytes, los cuales indican el inicio de un nuevo paquete. El tipo de paquete está dado por 1 byte que indica la función y la longitud del paquete. El quinto byte del paquete indica la dirección del registro de datos correspondientes a los ángulos de Euler. Seguidamente se tiene 4 bytes

que proporcionan la información sobre los ángulos Roll y Pitch. Finalmente para la detección de errores en los datos se tiene un Checksum de dos bytes.

Una vez recibido un paquete de datos, se compara los bytes de inicio de secuencia, el byte del tipo de paquete, y el byte de la dirección. Si estos datos son correctos se procede a almacenar individualmente el dato de cada ángulo de Euler.

Ilustración 63. Programación con Match pattern para separación de la trama datos.



Para demostrar lo explicado anteriormente pongamos un ejemplo de una trama recibida:

```
736E 70C8 5600 2A00 14FF E300 0004 8F73 6E70 C85C 0005 FFFF FFE5 0000 065C 736E
70C8 5E00 3C16 1F02 E700 0003 D1 73 6E70 C860 02AD FC16 F8AD 0000 05DF 736E 70C8
62 2E 83 FA 6A FE A0 00 0006 2E73 6E70 8076 41EC EA06 0464 736E 70C8 5600 1D00 15FF
F900 0004 9973 6E70 C85C FFF6 0000 FFFE 0000 0667 736E 70C8 5E00 4716 0402 8F00
0003 69 73 6E70 C860 02AD FC28 F8B6 0000 05FA 736E 70C8 62 2E 7C FA 6D FE A3 00
0006 2D73 6E70 8076 41EC 8AF0 04EE 736E 70C8 5600 1300 12FF FB00 0004 8E
```

Cuando el programa detecte los bytes de protocolo de inicio 's', 'n' y 'p' (73 6E 70 en formato hexadecimal) indicara el inicio de un nuevo paquete de datos, el cuarto byte indica el tipo de paquete y el quinto la dirección del paquete. Para nuestro caso la dirección que estamos buscando es la número 62 en formato hexadecimal que es donde se encuentran los datos de los ángulos pitch y roll, de ahí en adelante se realiza la respectiva concatenación y conversión de los datos.

Los datos de ángulos son enviados por el sensor como enteros de 16 bits en complemento a 2. Cada dato del ángulo es recibido por el computador como numero hexadecimal, la primera acción que se realiza es convertir este número

a binario. Para obtener una estimación del ángulo se realiza el proceso inverso al cálculo complemento a 2. Este cálculo consiste primeramente identificar el valor del bit 16 que corresponde al signo, si este bit es igual a “0” quiere decir que es positivo, en este caso la estimación del ángulo se obtiene directamente convierte el numero binario a decimal. Si por el contrario, el bit de signo es igual a “1” quiere decir que el ángulo es negativo, en este caso al número binario se le resta “1”, luego se invierte cada uno de los 16 bits, cambiando cada “0” por “1” y viceversa, para finalizar se convierte el número de binario a decimal y se le añade el signo negativo.

Ilustración 64. Separación del string de datos.

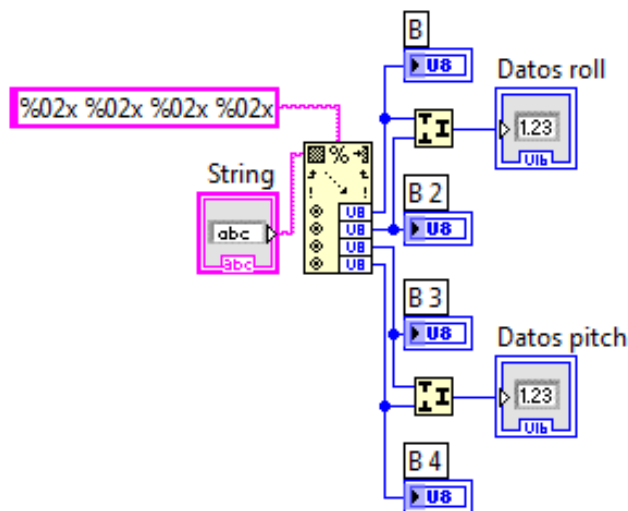
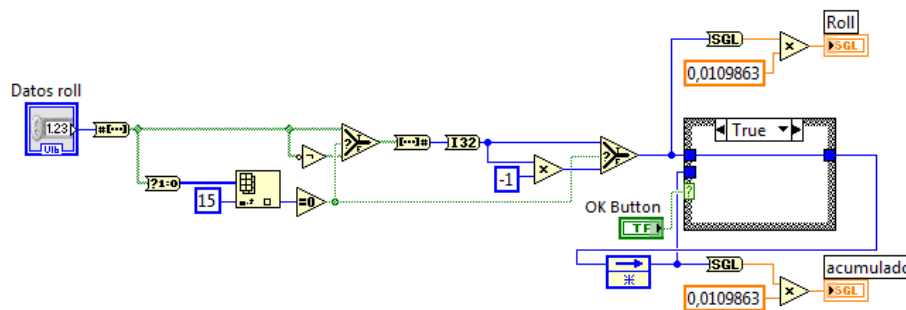


Ilustración 65. Tratamiento de datos de cada uno de los ángulos.

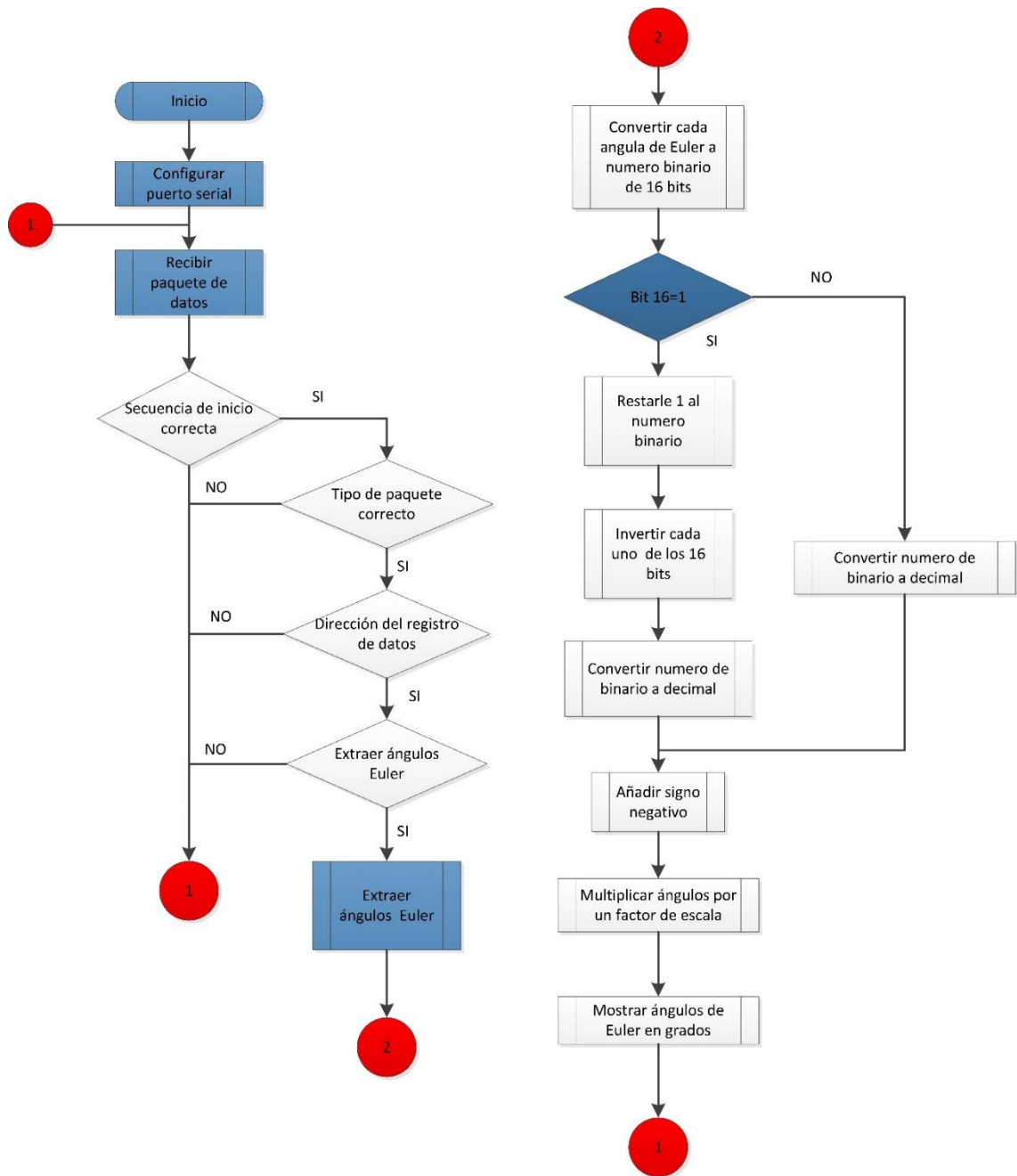


Al concluir este proceso se tendrá un rango de valores enteros con signo, que van desde -32768 a 32767.

Finalmente para obtener el ángulo real en grados se debe multiplicar el dato de la estimación del ángulo por un factor de escala, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Angulo real (grados)} = 0.0109863 * \text{estimacion del angulo}$$

Ilustración 66. Algoritmo para el tratamiento de datos en LabVIEW.



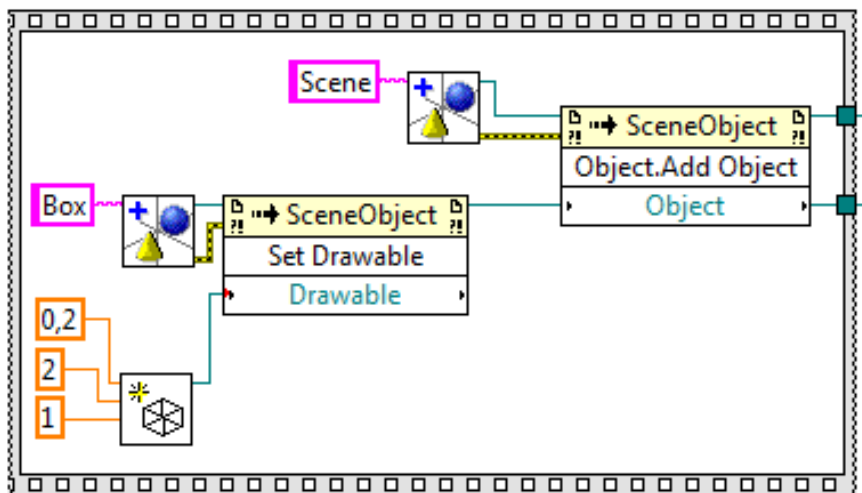
8.3 Desarrollo del VI para graficar la figura 3D

Este VI fue desarrollado para representar gráficamente la orientación del sensor electro-óptico en el espacio tridimensional, a partir de los ángulos de Euler: roll y pitch.

Para la realización de este VI se utilizó los instrumentos virtuales de 3D Picture Control, los cuales permiten la creación de escenas 3D. Una escena 3D es un objeto o una colección de objetos 3D. Al crear una escena 3D se puede especificar la forma, apariencia y orientación de los objetos.

La creación de una escena se la realiza como se muestra en la figura, en primer lugar se utiliza Create Object.vi, este VI permita crear el objeto 3D que se mostrara en la escena 3D. Después de crear el objeto es necesario definir la forma, el tamaño y el color del objeto.

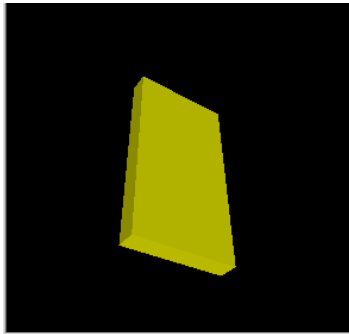
Ilustración 67. Programación necesaria para definir el cuadro 3D.



Las visualizaciones de control de imagen en 3D representaciones gráficas de los objetos 3D . Una escena 3D es un objeto 3D o una colección de objetos en 3D que se pueden ver en el control de imagen en 3D o en una ventana separada escena. Al diseñar una escena 3D, se puede generar múltiples objetos 3D y especificar su orientación , el aspecto y la relación con otros objetos dentro de la escena 3D. Puede ajustar las características de la escena 3D, como el estilo y la

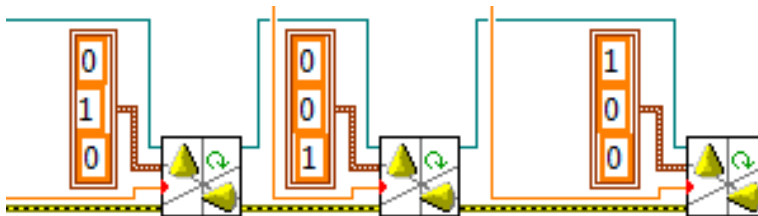
ubicación de una fuente de luz y de cómo una cámara controlada por el usuario interactúa con la escena 3D.

Ilustración 68. Cuadro de muestreo 3D.



La rotación del objeto 3D se la realiza con el instrumento virtual Rotate Object.vi, el mismo que se muestra en la figura. Para cambiar la orientación del objeto 3D, se define el eje alrededor del cual girar el objeto y el ángulo de rotación. Este procedimiento se realiza para dos ejes: lateral y frontal. Y la rotación se define mediante los ángulos pitch y roll.

Ilustración 69. Programación en bloques para definir las dimensiones del cuadro 3D.



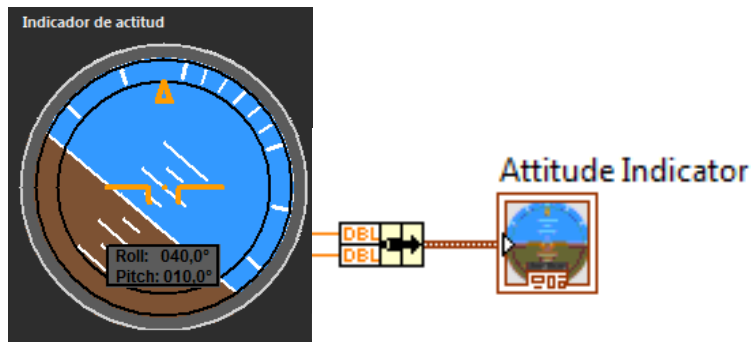
8.4 Desarrollo del VI para la visualización de la orientación

Con la finalidad de proporcionar al usuario una visualización inmediata de la orientación del sensor electro-óptica, se ha realizado un VI que posee un indicador de actitud (attitude Indicator). Estos indicadores utilizan la información de los ángulos de Euler que proporciona el sensor de orientación.

Un Indicador de Actitud (IA), o también conocido como Horizonte artificial, es un instrumento de vuelo utilizado en los aviones, que muestra la orientación del avión respecto al horizonte. En LabVIEW, podemos conocer la posición del alabeo y cabeceo. De este modo, conoceremos si la plataforma está inclinada

lateralmente y frontalmente, con respecto al horizonte. Gracias a este instrumento, es posible mostrar los datos de estabilización.

Ilustración 70. Indicador de actitud para mostrar los ángulos Roll y el Pitch.

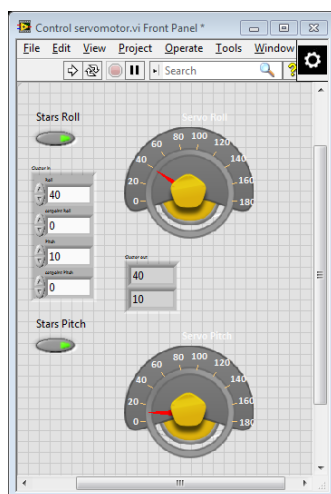


8.5 Desarrollo del VI para el control de estabilización

Puesto que este tipo de aplicación es el PC el que funciona como controlador, la tarjeta de adquisición de datos debe llevar la salida del sistema de forma que la aplicación LabVIEW trate esos datos con la mayor brevedad posible para obtener una acción de control lo suficientemente rápida como para permitir un control del sistema en tiempo real.

Con el objetivo de realizar descripción estructural, se presentara el VI utilizando como programa principal; a continuación mostramos a detalle cada uno de los subVI que ejecutan las estrategias de control.

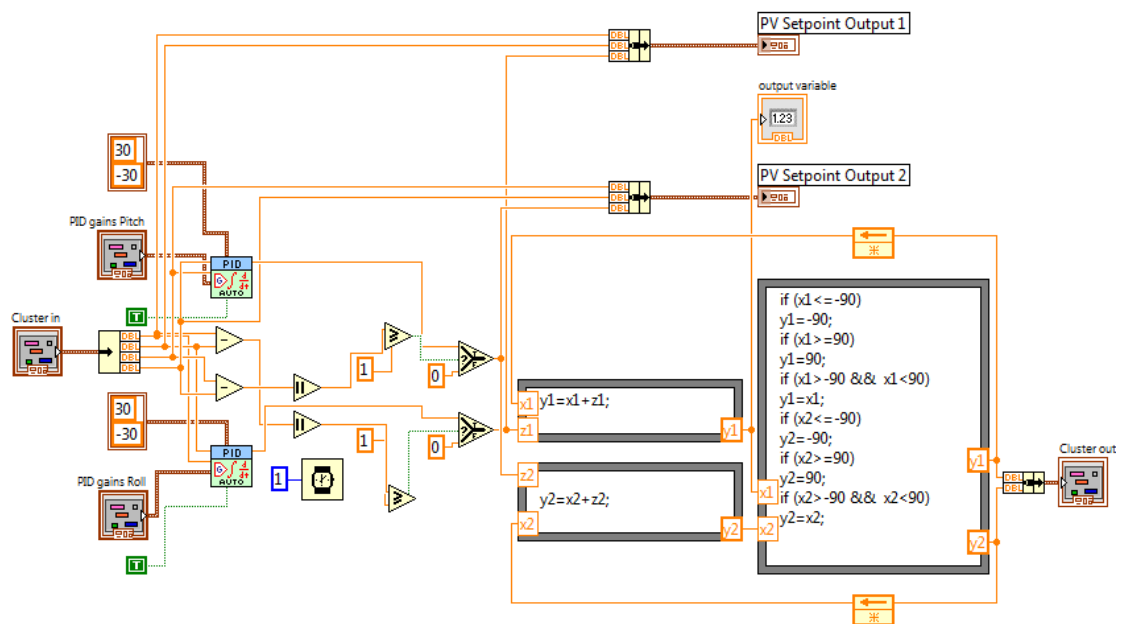
Ilustración 71. Panel frontal del control de los servomotores.



Una de las funciones específicas que hace el programa principal es la interface gráfica del control de los servomotores, este programa aparte que muestra los controles de ejecución del programa, también tiene cuatro marcadores, que muestran el proceso variable y el Setpoint de los ángulos de inclinación. El programa además de incorporar 2 indicadores visuales de posición de los servomotores para una mejor visualización del sistema.

En el diagrama de bloques se definen las condiciones generales de la transición de datos la tarjeta Arduino, así como también los aspectos generales de las estrategias de control.

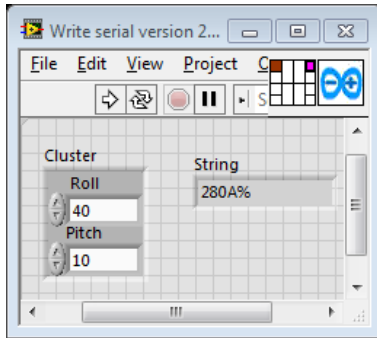
Ilustración 72. Diagrama de bloques del control de los servomotores.



8.6 Desarrollo del subVI para la comunicación serial con la placa Arduino

Se desarrolló un subVI denominado Writeseial, que permite realizar una comunicación serial con cualquier placa con puertos UART. El programa envía una trama de datos de solamente 3 byte, para que la placa Arduino la procese.

Ilustración 73. Panel frontal de la comunicación serial con la Arduino.



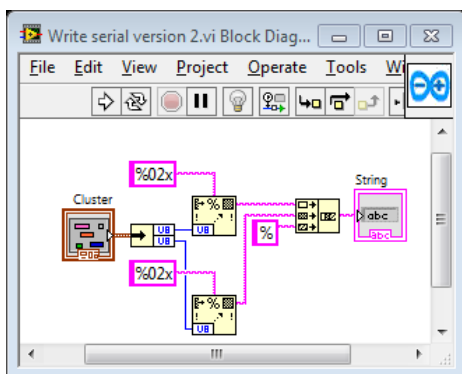
El computador envía la información serial en forma de paquetes que se encuentran formados por 3 bytes hexadecimales. Cada paquete se encuentra como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Información de la trama de datos para el Arduino.

| Angulo Roll | Angulo Pitch | % (separación o byte de inicio) |
|-------------|--------------|---------------------------------|
| 1 Byte hex | 1 Byte hex | 1 Byte hex |

El diagrama de bloque del subVI contiene permite concatenar una cadena de datos 3 byte denominada concatenate string. Así se puede lograr él envió de una trama de datos en formato hexadecimal.

Ilustración 74. Diagrama de bloque para armar la trama de datos de la Arduino.

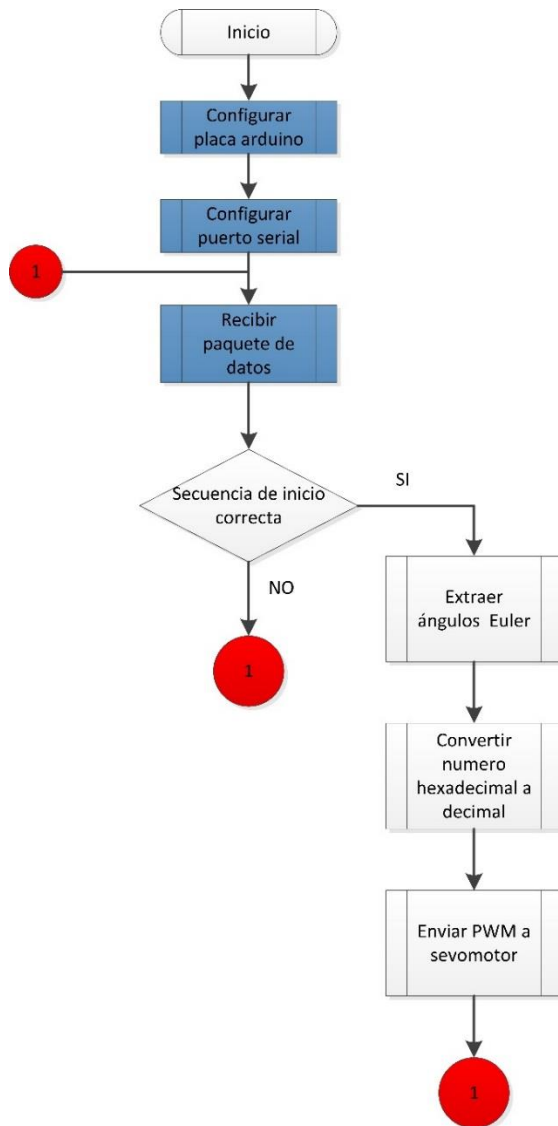


8.7 Programación en Arduino

La placa Arduino recibe la trama de datos que ha sido enviada desde el computador por comunicación serial; esta trama contiene información de los ángulos que debe girar la plataforma para que se establezca. La programación

que contiene Arduino es para convertir estos datos de un formato hexadecimal a decimal; Posteriormente esta envía trenes de pulso de anchura variable o más comúnmente llamado PWM dependiendo del número decimal obtenido.

Ilustración 75. Algoritmo para el tratamiento de datos en Arduino.



La estructura básica de programación de Arduino se divide en dos partes: setup y loop. Setup() constituye la preparación del programa y loop() es la ejecución, pero una mayor comprensión, se ejecutan las partes conv() la cual convierte el paquete serial y motores() en la cual se realiza una programación para darle dirección a los motores. En la función Setup() se incluye la declaración de variables y se trata de la primera función que se ejecuta en el programa. Esta función se ejecuta una única vez y es empleada para configurar el pinMode

(todos los pines en uso son declarados de salida) e inicializar la comunicación serie. La función loop () incluye el código a ser ejecutado continuamente (leyendo las entradas de la placa, salidas, etc.).

8.7.1 Desarrollo del programa Arduino

```
#include <Servo.h>
#include <SoftwareSerial.h>

Servo servo_roll;
Servo servo_pitch;

char string[5];
unsigned int angroll=0,angpitch=0;

void servos(){
  servo_roll.write(angroll);
  servo_pitch.write(angpitch);
}

void conv(){
  angroll=0;
  angpitch=0;
  if((int)string[1]<58){
    angroll = angroll+((int)string[1]-48);
  }
  if((int)string[1]>64){
    angroll = angroll+((int)string[1]-55);
  }
  if((int)string[0]<58){
    angroll = angroll+(((int)string[0]-48)*16);
  }
  if((int)string[0]>64){
    angroll = angroll+(((int)string[0]-55)*16);
  }
  if((int)string[3]<58){
    angpitch = angpitch+((int)string[3]-48);
  }
  if((int)string[3]>64){
    angpitch = angpitch+((int)string[3]-55);
  }
  if((int)string[2]<58){
    angpitch = angpitch+(((int)string[2]-48)*16);
  }
  if((int)string[2]>64){
    angpitch = angpitch+(((int)string[2]-55)*16);
  }
  }

  Serial.println(angroll);
  Serial.println(angpitch);
  servos();
}
```

```
void setup(){
  Serial3.begin(115200);
  Serial.begin(115200);
  servo_roll.attach(8);
  servo_pitch.attach(9);
}

void loop(){
  while(Serial3.available()){

    Serial3.readBytesUntil('\n',string,5);
    Serial.println('-');
    Serial.print(string[0]);
    Serial.print(string[1]);
    Serial.print(' ');
    Serial.print(string[2]);
    Serial.print(string[3]);
    Serial.print(' ');
    Serial.print(string[4]);
    conv();
  }
}
```

9 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

La construcción e implementación del prototipo experimental de dos grados de libertad se realiza con el fin de realizar un estudio que sea utilizado como base para la construcción de un prototipo en escala real. Otra factor determinante al momento de diseñar un sistema de estabilización es conocer su capacidad de manejo, maniobrabilidad, seguridad y diseño de la plataforma, la cual es el espacio establecido para cualquier carga adicional al sistema propiamente dicho.

Ilustración 76. Prototipo experimental de la plataforma de estabilización.



9.1 Selección de componentes

Antes de pensar en la construcción del sistema debemos estudiar y seleccionar todos los diferentes componentes que lo conforman. Por lo tanto, a continuación se explica por separado porque y como ha sido escogido cada componente de este sistema, asimismo sus características específicas, las cuales hacen de nuestro sistema más eficaz y sencillo.

9.1.1 Sensores

Como sabemos existen diferentes tipos de sensores, pero los que realmente interesan, son los sensores de posición angular. El desafío es realizar un prototipo que aproveche lo mejor posible los beneficios proporcionados por el sensor o una combinación de estos, tomando en cuenta sus condiciones de utilización, por lo tanto, se requiere un buen conocimiento y manejo de sus características.

Tabla 18. Comparación de los algunos sensores de inclinación.

| Nombre del producto | Sensores | | | | Estimación | | | | Otro |
|----------------------------------|------------|-------------|----------|---------|------------|-------|-----|-----------|---------|
| | Gyros (3x) | Accels (3x) | Mag (3x) | Altitud | Roll | Pitch | Yaw | Cuaternio | Carcasa |
| Pololu Minimu-9 v2 | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | |
| Pololu AltIMU-10 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | |
| Sensor de orientación CHR-UM6-LT | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Sensor de orientación CHR-UM6 | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

9.1.1.1 IMU CHR-UM6 Robotics

La IMU escogida para el presente proyecto es la CHR-UM6 que se compone de sensores inerciales: giroscopios, acelerómetros, magnetómetros en tres ejes x, y & z y un sensor de temperatura, además tiene la opción para conectar un GPS estándar. Cuenta con un filtro de Kalman extendido o EKF (del inglés Extended Kalman Filter) implementado en un microcontrolador de 32 bits.

Las principales características de este dispositivo son:

- Voltaje de alimentación: 3.5 a 5.0 V
- Corriente: 52 mA
- Temperatura de operación: -40 a 80 C
- Protocolos de comunicación: serial RS232, SPI
- Tasa de actualización de datos: 20 a 300 HZ
- Tasa de transferencia de datos: hasta 115200 baudios
- Dimensiones: 30x30x10 mm

Ilustración 77. Sensor de orientación con comunicación serial, IMU CHR-UM6.



Fuente: página oficial robot market <http://www.robotmarketplace.com/products/0-PL1255.html>

Utilizando las variables de la IMU se pretende obtener la compensación ante los movimientos más importantes de la base donde está montado el sistema electrótico. Los parámetros habilitados de la IMU y su utilidad para llevar a cabo el proyecto, se resumen en la tabla 9:

Tabla 19. Parámetros habilitados de la IMU.

| Parámetros | Aplicaciones |
|----------------------------|--|
| Ángulos Euler | Obtener los ángulos de rotación: Pitch, roll, yaw. Reflejar la orientación angular de la plataforma robótica móvil en una imagen en 3D en la estación de control. Efectuar estabilización de imagen. Visualizar en forma gráfica los datos. |
| Posicionamiento Geográfico | Determinación la posición geográfica del sistema. Visualizar la ubicación geográfica a través de Google Earth. Hacer direccionamiento para la identificación de objetos globales. |
| Acelerómetro | Visualizar en forma gráfica los datos |
| Magnetómetro | Calcular el norte magnético Visualizar en forma gráfico los datos |

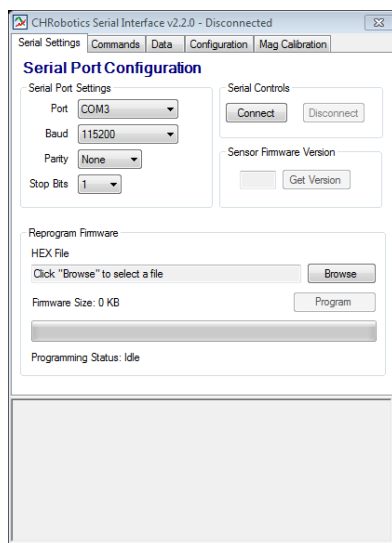
- **Ángulos Euler:** los ángulos Euler permiten conocer la orientación del objeto donde se encuentra montada la IMU basada en un sistema de referencia tridimensional centrada en dicha IMU. Los ángulos de Euler (roll, yaw y pitch) proveen la suficiente información a fin realizar la estabilización de imagen en dos DoF (yaw y pitch) en tiempo real.
- **Posicionamiento geográfico:** A través de un GPS conectado directamente a la IMU se obtienen las variaciones más importantes de posición geográfico: latitud, longitud y altura.
- **Acelerómetro:** muestran gráficamente los valores de aceleración en los tres ejes a fin de visualizar la distorsión y el ruido latente en los valores

muestreados a causa de vibraciones y motores de plataforma robótica móvil.

- Magnetómetros: se utiliza los datos del sensor en el eje “y” para calcular la orientación magnética de la plataforma robótica móvil.

La configuración de la IMU se realiza de forma sencilla usando el software CHR Software Serial Interface dado por el fabricante. La interfaz serial permite configurar datos de registros y visualizar datos del trazado en tiempo real.

Ilustración 78. Interfaz de configuración de la IMU CHR-UM6.



Los parámetros por defecto del enlace serial de la IMU CHR-UM6 con la interfaz de configuración son: 115200 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de parada y sin paridad que el usuario puede cambiar en acuerdo a la aplicación final en la que se utilice.

La alta tasa de datos hace que el proceso de transmisión consumo más energía y disminuya el nivel de integridad de los datos, el problema se hace más crítico por el hecho de que se trabaja bajo un protocolo de en lace inalámbrico, esta característica negativa se corrige tomando en cuenta como punto primordial la desactivación de parámetros que no se utilizan de la IMU y luego se puede bajar la cantidad de bits por segundo o baudios a una tasa aceptable.

9.1.2 Cable FTDI

El cable de FTDI es un convertidor de USB a serie (nivel TTL), permite una conexión fácil con dispositivos de interfaz TTL a USB. Los pines de E / S de este cable de FTDI están configurados para funcionar a 5V.

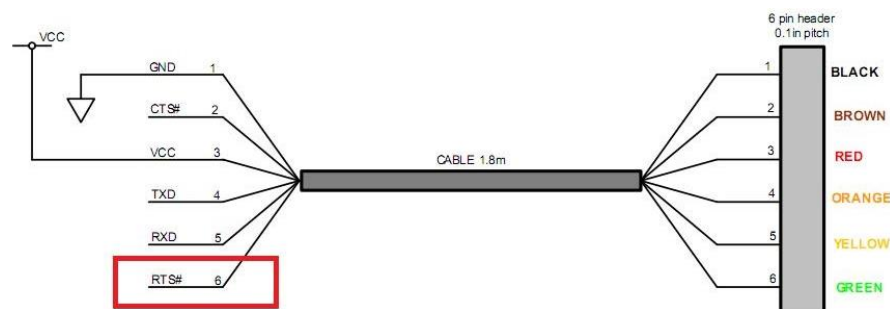
Ilustración 79. Cable FTDI para la comunicación serial.



Fuente: <http://makeyourbot.wikidot.com/fabio-1-1>

El cable de FTDI está diseñado en torno a un FT232RQ, que está ubicado en un conector USB. El otro lado del cable termina en un lanzamiento, conector de 6 pines 0,1 "con los siguientes pines de salida: RTS, RX, TX, 5V, CTS, GND (RTS es el cable verde y GND es el negro). Este dispositivo es utilizado para la comunicación con la IMU y la tarjeta Arduino.

Ilustración 80. Asignación de colores para los pines de comunicación.



Fuente: <http://diydrones.com/profiles/blogs/ardupilot-config-tool-fixed>

9.1.3 Arduino MEGA 2560

El Arduino Mega 2560 es una placa electrónica basada en el ATmega2560. Lleva 54 entradas / salidas digitales (de los cuales 15 pueden utilizarse para salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos seriales), un 16MHz oscilador de cristal, una conexión USB, un conector de alimentación, un botón de Reset. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador, simplemente conectarlo a un ordenador con un cable USB, o alimentarla con un adaptador de corriente AC a DC para empezar.

Ilustración 81. Placa Arduino MEGA 2560.



Fuente: página Arduino <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560#UwZgZmJ5NaE>

El Mega2560 difiere de todas las placas anteriores ya que no utiliza el chip controlador de USB a serial FTDI. En su lugar, ofrece las ATmega16U2 (ATmega8U2 en la revisión del 1 y la revisión 2 tableros) programado como convertidor USB a serie.


9.1.4 Servomotores

Para poder lograr las rutinas de movimientos de la plataforma de estabilización utilizaremos los servomotores, debido a su precisión y torque. Los dispositivos son capaces de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición. En servo motor común puede variar su inclinación del sistema robótico. Para el control del giro se utilizan servomotores estándar, los cuales tienen la capacidad de girar 180 grados. Partiendo de la estructura adquirida, se procede a seleccionar los servomotores considerando características como: velocidad, torque, rango de movimiento, dimensiones y costo. A continuación se presentan los dos tipos de servomotores empleados:

- primero: servo motor control pitch.

Tabla 20. Servo motor Futaba S3003.


| S3003 Estándar | | | |
|---|----------------------|---------------|--|
| Volts | Esfuerzo de torsión | Velocidad | |
| 4.8V | 44 oz-in (3,2 kg-cm) | 0.23 sec/60 ° | |
| 6.0V | 57 oz-in (4,1 kg-cm) | 0.19 sec/60 ° | |
| Dimensiones | | Peso | |
| 1-9/16 x 13/16 x 1-7/16 en (40 x 20 x 36 mm) | | 1,3 oz (37 g) | |



- Segundo: servo motor roll

Tabla 21. Servo motor polulo MG946r.

| MG946r | | | |
|------------------------|---------------------|---------------|--|
| Volts | Esfuerzo de torsión | Velocidad | |
| 4.8V | 10,5 kg-cm | 0.2 sec/60 ° | |
| 6.0V | 6 kg-cm | 0.17 sec/60 ° | |
| Dimensiones | | Peso | |
| (40.7 x 19.7 x42.9 mm) | | 55 g | |



9.1.5 Base estructural de la maquina

Se pretende usar base estructural para soportar todos los componentes y subsistemas de la misma. Esta base requiere ser de un peso liviano pero que a su vez sea resistente para soportar el peso de los componentes y tenga la suficiente rigidez para eliminar la vibración. En cuanto a la aparición de la estructura se pretende seleccionar un material que sea resistente a la corrosión para evitar la tarea y en momento dado cambiar partes de la estructura debido a la corrosión y una vida corta.

Tabla 22. Matriz comparativa sobre el material de la estructura.

| <i>Factor</i> | <i>Ventaja</i> | <i>desventaja</i> |
|-------------------------|--|---|
| <i>Acero</i> | Costo bajo. Fácil conseguir. Rigidez. | Vulnerable a la corrosión. Pesado. |
| <i>Aluminio</i> | Costo medio. Fácil conseguir. Liviano. Resistente a la corrosión. Fácil de maquinar. | Difícil de soldar. Dúctil, poca rigidez. |
| <i>Acero inoxidable</i> | Buena apariencia. Calidad para manejo de alimentos. Alta resistencia a la corrosión. | Costo alto. Peso excesivo. Difícil de soldar. Difícil de maquinar. |

Analizando la tabla comparativa anterior la decisión que se toma es la de utilizar estructuras de aluminio comerciales de fácil acoplamiento especialmente diseñadas para soportar elementos neumáticos.

9.2 Diseño del prototipo experimental

Al ser este un prototipo experimental, es prudente analizar las distintas alternativas de sistemas robóticos existentes en el mercado, con el objetivo de seleccionar aquella que permita realizar los movimientos en los dos grados de libertad queridos.

Los factores previos a considerar son el peso y dimensiones, por cuanto el diseño y ensamble están basados en la estructura. A partir de la estructura adquirida se procede a diseñar las diferentes piezas así como modelar la estructura ensamblada, utilizando el lenguaje CAD (Computer Asisted Design). La plataforma de estabilización consta de una estructura que está diseñado en aluminio, capaz de ser controlado mediante los servomotores instalados de forma estratégica que permite efectuar movimientos de alabeo y cabeceo de la carga útil.

Ilustración 82. Modelo prototipo experimental.



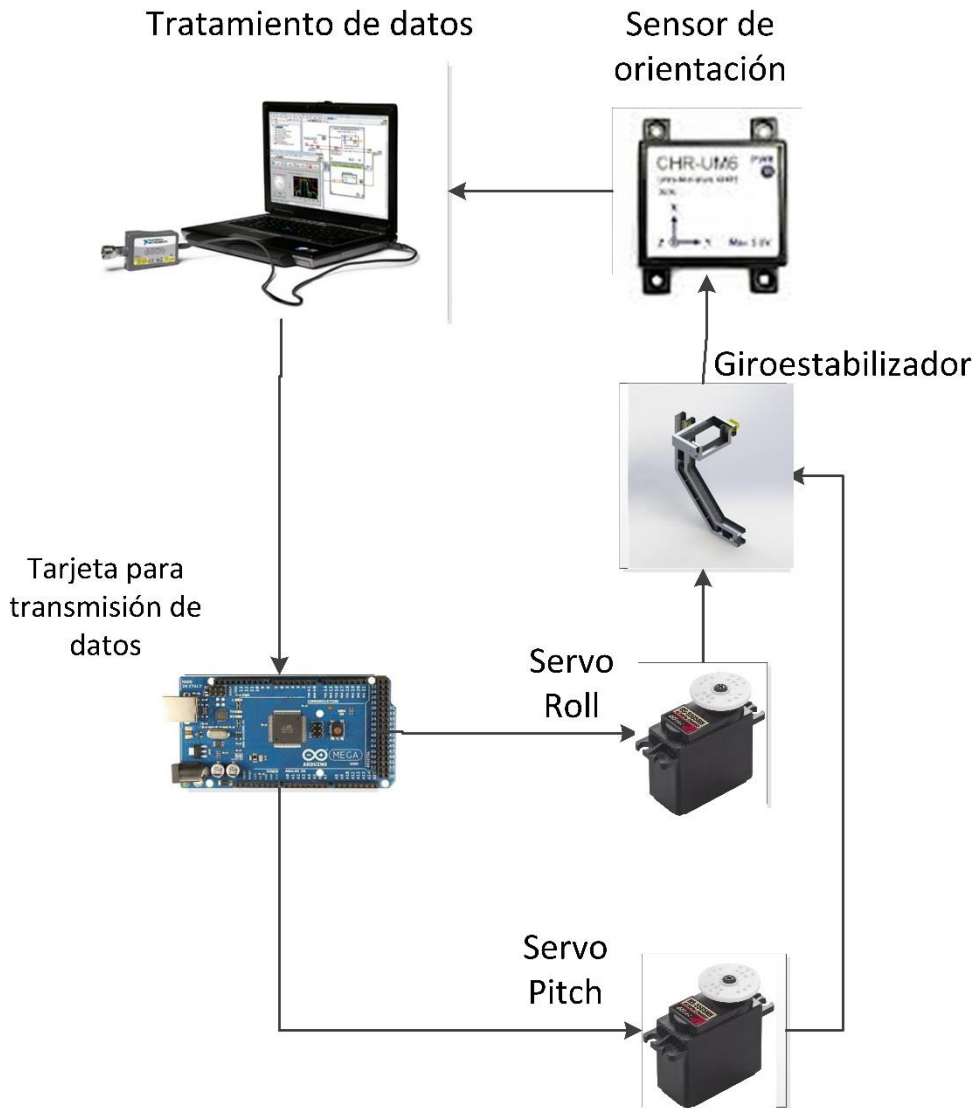
Las características físicas más importante de la estructura en estudio son:

- Material: aluminio súper ligero técnicamente denominado aluminio arquitectónico.
- Peso: 1,8 libras
- Capacidad de carga útil: 0,5 libras
- Capacidad de giro Roll: 180
- Capacidad de giro Pitch: 180
- Capacidad de giro Yaw: No aplica
- Altura de soporte: 50 mm de diámetro

9.3 Construcción del hardware

Este capítulo detalla la instrumentación electrónica para el IMU, la tarjeta Arduino, y los servomotores que son los complementos básicos de la electrónica de este proyecto.

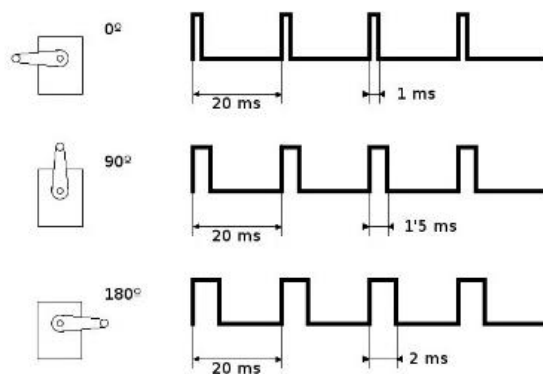
Ilustración 83. Ilustración simplificada del Hardware del proyecto.



9.3.1 Control servomotor

El control de los servos es mediante el envío de trenes de pulso de anchura variable a través del cable de control. Los parámetros del tren de pulsos son: Una duración mínima de pulso, un pulso máximo, y una tasa de repetición que se indican en las figuras. Dadas las limitaciones de rotación del servo tiene exactamente la misma cantidad de rotación efectiva en la dirección de las agujas de reloj como en el sentido anti horario. Es importante señalar que la placa Arduino genera los trenes de pulsos para los dos servomotores en función de la comunicación serial que recibe del computador.

Ilustración 84. Ancho de pulso según la posición.



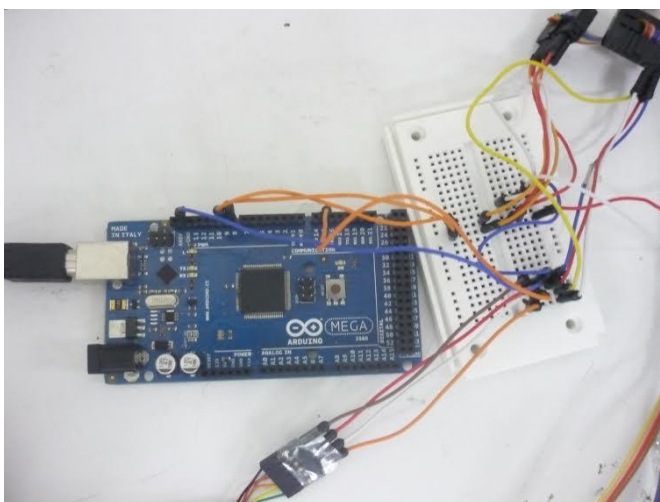
Fuente: Publicación de ardumania, pagina tutorial <http://www.ardumania.es/apendice-del-ejercicio-3-senales-de-control-rc/>

9.3.2 Conexión cable FTDI

El cable de FTDI es un convertidor de USB a serie (nivel TTL), permite una conexión fácil entre el computador- Arduino y computador IMU. Los pines de este cable están configurados para funcionar a 5V.

En resumidas cuentas este cable lo utilizamos para recibir datos serial en formato hexadecimal de la IMU y enviar datos serial también en formato hexadecimal a la Arduino. Los que permite hacer una doble comunicación por un solo canal.

Ilustración 85. Conexiones del hardware.



9.3.3 Conexión Arduino

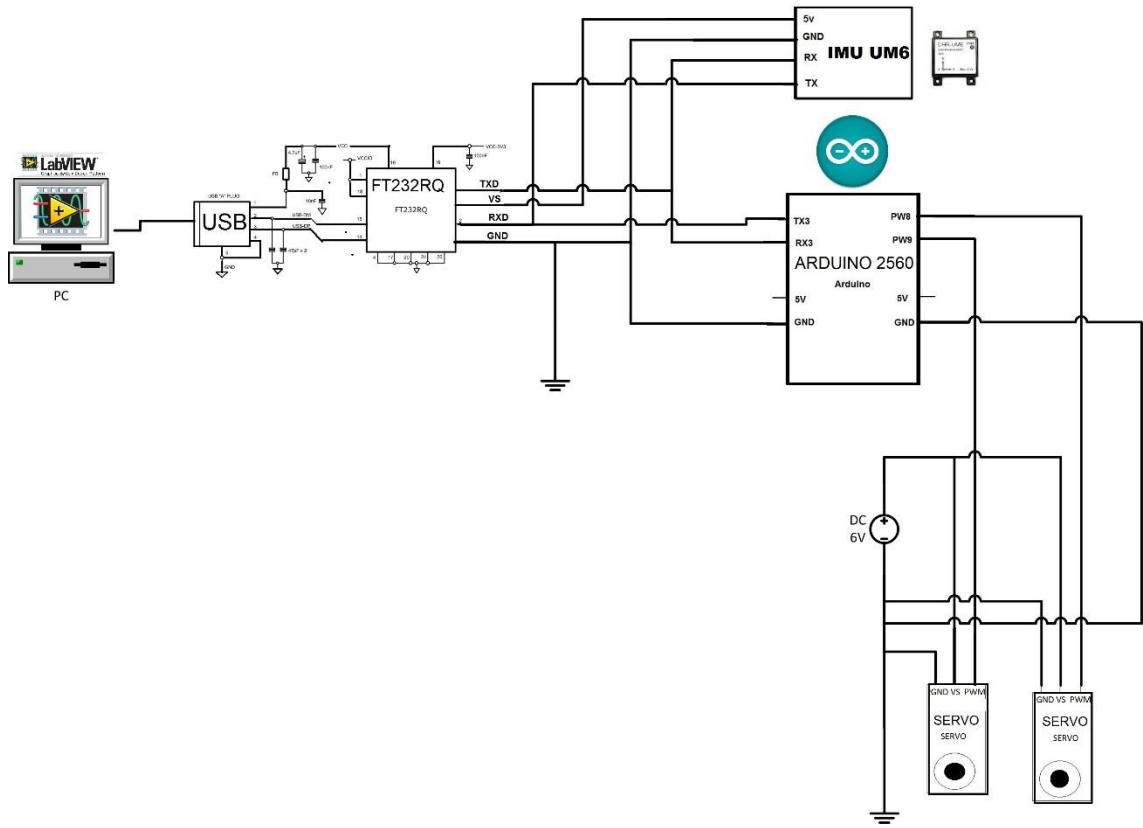
Como se definió en un principio en los objetivos del proyecto de grado la utilización de una tarjeta de desarrollo basada en microcontrolador ATmega; para este fin se decidió utilizar la tarjeta de desarrollo Arduino mega que integra un microcontrolador ATmega 2560 de la familia Atmel.

Se utilizó esta placa para establecer una comunicación entre la placa Arduino y un ordenador. Todas las placas Arduino tienen al menos un puerto serial también conocido como UART Serial; en nuestro caso la placa 2560 tiene 4 canales de comunicación serial. Se comunica a través de los pines digitales TX3 y RX3, así como con el ordenador mediante USB. Para nuestro caso solo estaremos utilizando el puerto RX3, ya que solo utilizamos para recibir los datos que anteriormente habíamos concatenado en el software Labview.

9.3.3.1 Pines utilizados de la placa Arduino 2560

- Pin 15: comunicación serial Arduino Labview (Rx3). Recibe el paquete de datos generada por LabVIEW.
- Pin 8: Pin de salida PWM 1, asistido para controlar la velocidad del motor que estabiliza el ángulo Roll.
- Pin 9: Pin de salida PWM 2, asistido para controlar la velocidad del motor que estabiliza el ángulo Pitch.
- GND: Debe haber una línea a tierra conectada al sistema.

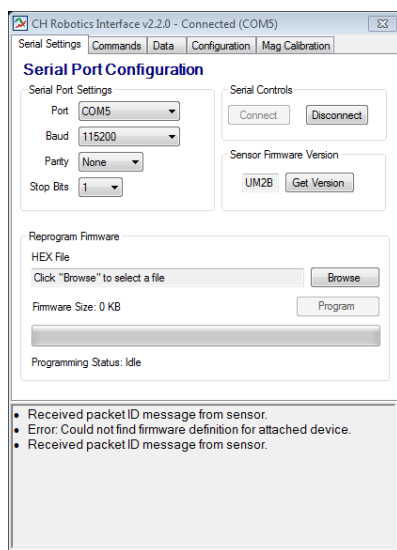
Ilustración 86. Plano detallado del Hardware del proyecto.



9.4 Instrucciones de instalación, operación para el prototipo experimental

- Instale el software Ch Robotics serial interfaz.

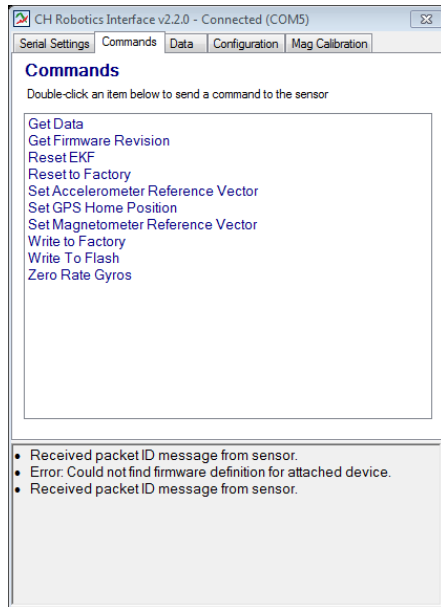
Ilustración 87: Interfaz serial Ch Robotics, configuración inicial.



- Monte la IMU y asegúrela en la plataforma.

- Configure la IMU (set acelerómetro, set Magnetómetro y demás). Cada vez monte la IMU se debe realizar una nueva configuración.

Ilustración 88. Interfaz Ch Robotics, comandos de configuración.



- Instale LabVIEW, preferiblemente LabVIEW 2011.
- Instale el módulo Robotics de LabVIEW.
- Cargue el proyecto denominado Giroestabilizador y posteriormente el Vi Giroestabilizador V2.
- Conecte el cable FTDI a los puertos asignados de la IMU y el Arduino.
- Cargue el puerto de comunicación asignado para la IMU.
- Si la anterior instrucción ha salido perfecta active los botones de inicio (Stars., Stars. Roll & Stars. Pitch) de lo contrario verifique la comunicación serial.

10 EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO

La evaluación consiste en comprobar el correcto funcionamiento del movimiento en los dos ángulos de giro. Estos movimientos pueden ser controlados manualmente mediante botones situados en el panel frontal HMI Labview. Cabe mencionar que para tener una clara apreciación del control, en estas pruebas no se realizará el movimiento sobre un vehículo todo terreno.

10.1 Definición de la capacidad de giro

Para las pruebas iniciales del prototipo se realizaron movimientos del sistema en cierta cantidad de grados, desde el origen hacia el lado derecho y hacia el lado izquierdo. El prototipo tiene la capacidad de girar media vuelta, es decir, desde la posición inicial puede realizar un movimiento de 90° en sentido horario, y 90° en sentido contrario como se muestra en la figura.

Ilustración 89. Inclinación máxima del ángulo Roll del prototipo experimental¹².



¹² Los límites del movimiento del ángulo roll tienen un rango del control de inclinación se encuentre entre -90° y 90° .

Ilustración 90. Inclinación máxima del ángulo Pitch del prototipo experimental.¹³



10.1.1 Medición de los ángulos generales por el servomotor

El ángulo de medida dado por el sensor IMU sobre la plataforma se compara con el generado por el servomotor. Se toma como referencia real los datos generados por la IMU y como valor de medición los datos generados por el servomotor. La muestra tomada de la medición es de $\pm 90^\circ$ con un incremento de 10° .

¹³ Los límites del movimiento del ángulo pitch también tienen un rango del control de inclinación se encuentre entre -90° y 90° .

Ilustración 91. Error relativo de la medida tomada, con respecto al instrumento de referencia¹⁴.

| ANGULO ROLL | | | | ANGULO PITCH | | | |
|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|-------------|----------------|----------------|
| VALOR IMU | Valor servo | Error absoluto | Error relativo | Valor IMU | Valor servo | Error absoluto | Error relativo |
| -86,8 | -90 | 3,2 | 0,03686636 | -94 | -90 | 4 | 0,04255319 |
| -76,3 | -80 | 3,7 | 0,04849279 | -85,8 | -80 | 5,8 | 0,06759907 |
| -65,4 | -70 | 4,6 | 0,07033639 | -75,8 | -70 | 5,8 | 0,07651715 |
| -54,8 | -60 | 5,2 | 0,09489051 | -64,4 | -60 | 4,4 | 0,06832298 |
| -44,6 | -50 | 5,4 | 0,12107623 | -53,4 | -50 | 3,4 | 0,06367041 |
| -36,4 | -40 | 3,6 | 0,0989011 | -42,2 | -40 | 2,2 | 0,0521327 |
| -26,8 | -30 | 3,2 | 0,11940299 | -31,7 | -30 | 1,7 | 0,05362776 |
| -17,8 | -20 | 2,2 | 0,12359551 | -21,4 | -20 | 1,4 | 0,06542056 |
| -7,94 | -10 | 2,06 | 0,25944584 | -11,5 | -10 | 1,5 | 0,13043478 |
| 0,176 | 0 | 0,176 | 1 | -0,791 | 0 | 0,791 | 1 |
| 9,82 | 10 | 0,18 | 0,01832994 | 8,53 | 10 | 1,47 | 0,17233294 |
| 18,9 | 20 | 1,1 | 0,05820106 | 18,4 | 20 | 1,6 | 0,08695652 |
| 28 | 30 | 2 | 0,07142857 | 28,8 | 30 | 1,2 | 0,04166667 |
| 37,6 | 40 | 2,4 | 0,06382979 | 38,2 | 40 | 1,8 | 0,04712042 |
| 46,7 | 50 | 3,3 | 0,07066381 | 48,8 | 50 | 1,2 | 0,02459016 |
| 56,5 | 60 | 3,5 | 0,0619469 | 57,8 | 60 | 2,2 | 0,03806228 |
| 66 | 70 | 4 | 0,06060606 | 67,2 | 70 | 2,8 | 0,04166667 |
| 77 | 80 | 3 | 0,03896104 | 76,2 | 80 | 3,8 | 0,04986877 |
| 87,1 | 90 | 2,9 | 0,03329506 | 85,4 | 90 | 4,6 | 0,05386417 |

10.2 Respuesta en el tiempo del sistema de estabilización en control de lazo abierto

La respuesta en el tiempo de la estabilización de los ángulos Setpoint, está formada en dos partes:

- La respuesta transitoria que sería la parte de la respuesta del sistema que se presenta cuando hay un cambio en la entrada y desaparece después de un breve intervalo.
- La respuesta en estado estable aparece después de que desaparece la etapa transitoria, en donde el sistema llega a su etapa de estabilización.

¹⁴ El error absoluto conocido estadísticamente en estado estacionario en la teoría de control se le conoce como *offset*, así que es la diferencia entre el valor deseado y el valor medido en estado estacionario.

La señal de entrada es de tipo escalón, lo cual permite conocer la respuesta del sistema frente a cambios abruptos en su entrada. Asimismo, da una idea del tiempo de establecimiento de la señal, es decir, cuanto se tarda el sistema en alcanzar su estado estacionario. Otra de las características de esta señal es que, producto de la discontinuidad del salto, contiene un espectro de frecuencia en una amplia banda lo cual hace que sea equivalente a aplicar al sistema una gran cantidad de señales senoidales con un intervalo de frecuencias grande.

Ilustración 92. Respuesta dinámica de la inclinación Roll frente a señal en escalón, prueba 1.

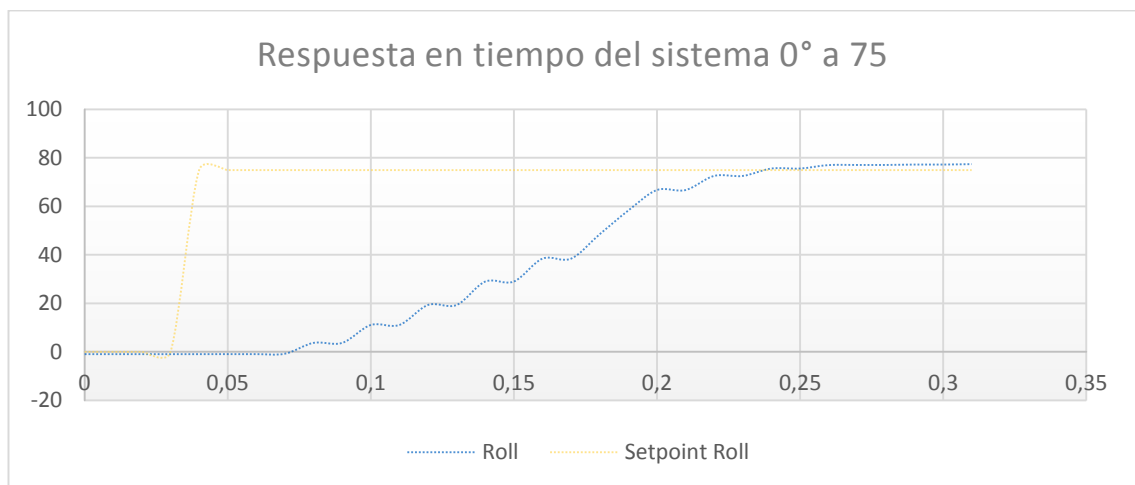


Ilustración 93. Respuesta dinámica de la inclinación Roll frente a una señal en escalon prueba 2.

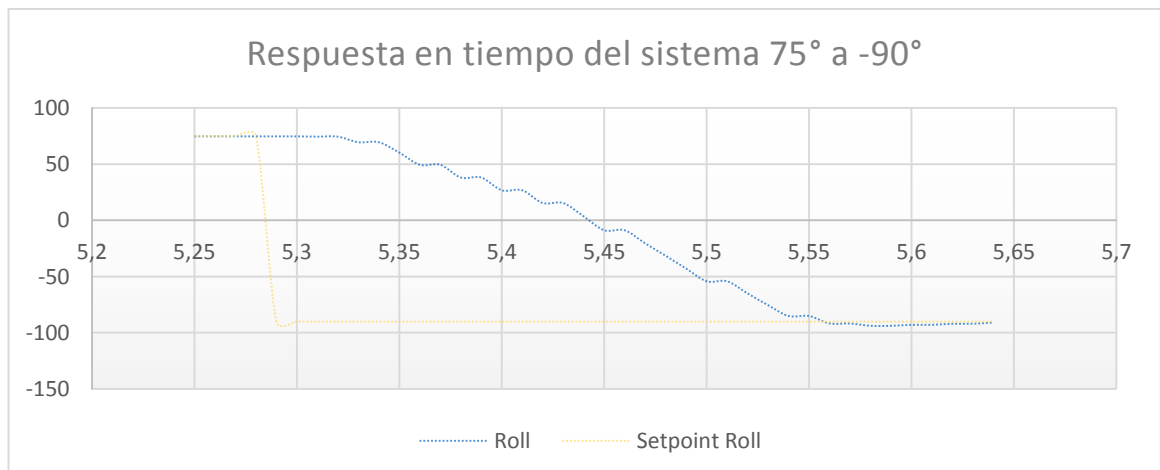


Ilustración 94. Respuesta dinámica del ángulo Pitch frente a una señal en escalón prueba 3.

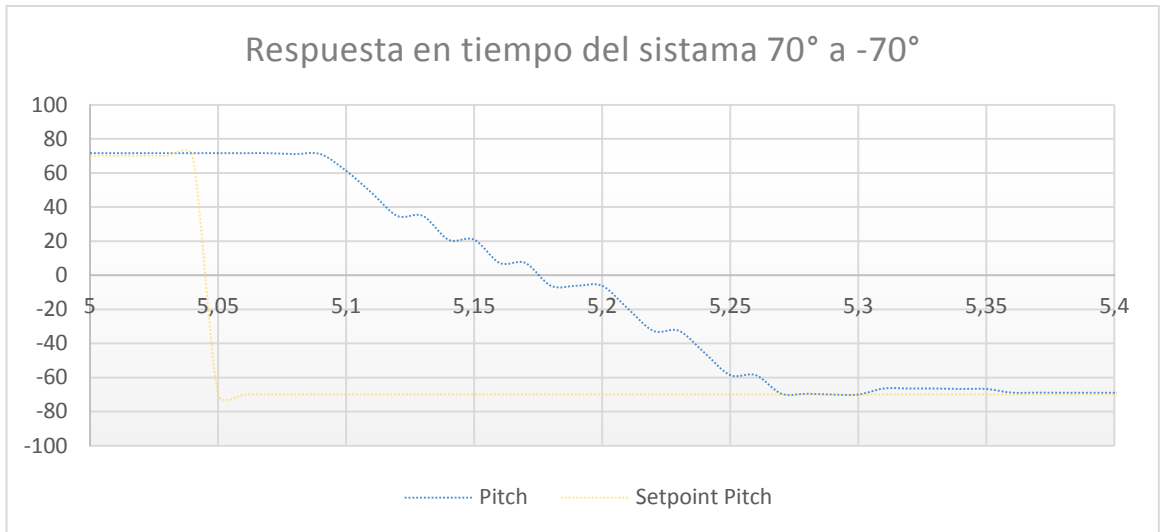
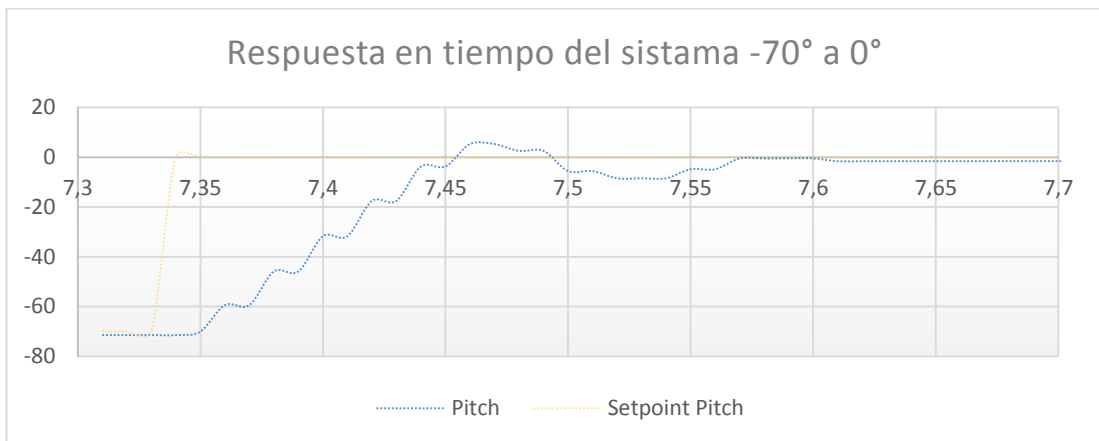


Ilustración 95. Respuesta dinámica del ángulo Pitch frente a una señal en escalón prueba 4.



En la respuesta de estabilización de la plataforma experimental, se muestra que los servomotores tienen una respuesta de transición entre 0,2 seg y 0,25 seg para los 2 ángulos de estabilización.

10.3 Respuesta en el tiempo del sistema de estabilización en control de lazo cerrado

Para la toma de datos de la plataforma de estabilización en control de lazo cerrado, se generan señales dependientes del tiempo con unas características determinadas de frecuencia, amplitud y forma. Las señales permiten conocer cuál es la respuesta del sistema a la señal de entrada que cambian linealmente con el tiempo. Además permite conocer la respuesta del sistema frente a

cambios abruptos en su entrada ya que este tipo de señal también genera un escalón.

Ilustración 96. Respuesta en el tiempo Roll (señal senoidal).

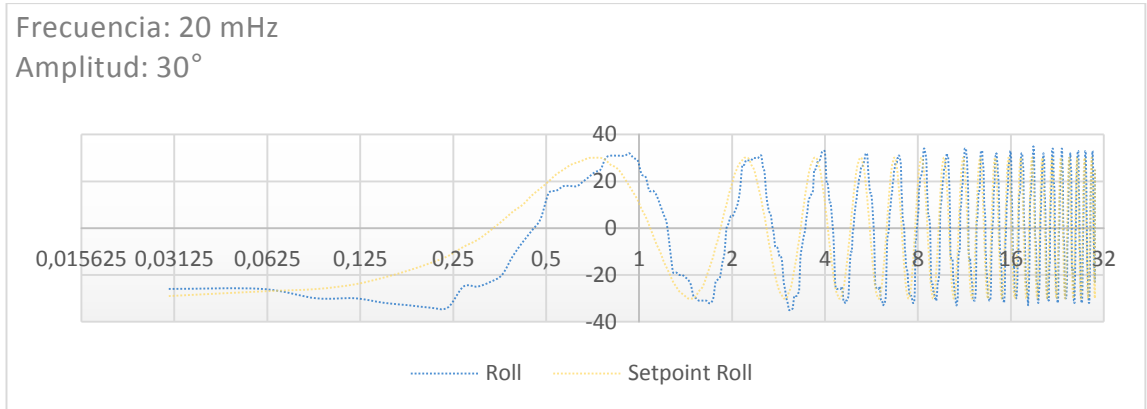


Ilustración 97. Respuesta en el tiempo Pitch (señal senoidal).

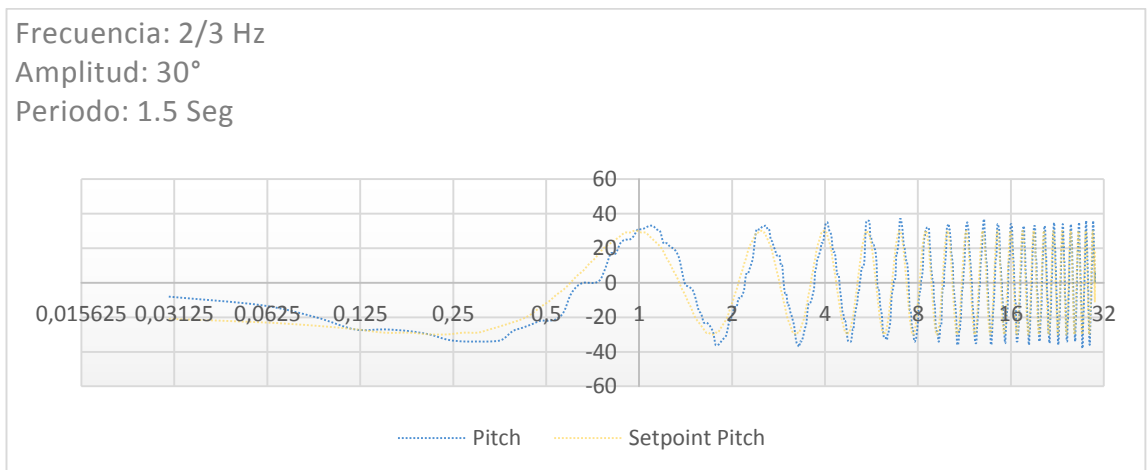


Ilustración 98. Respuesta en el tiempo Roll (señal senoidal).

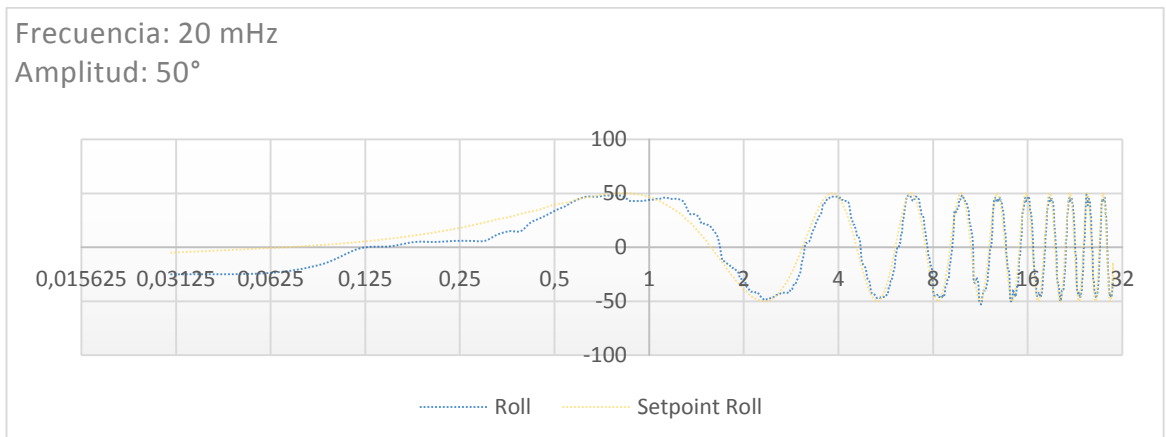


Ilustración 99. Respuesta en el tiempo Pitch (señal senoidal).

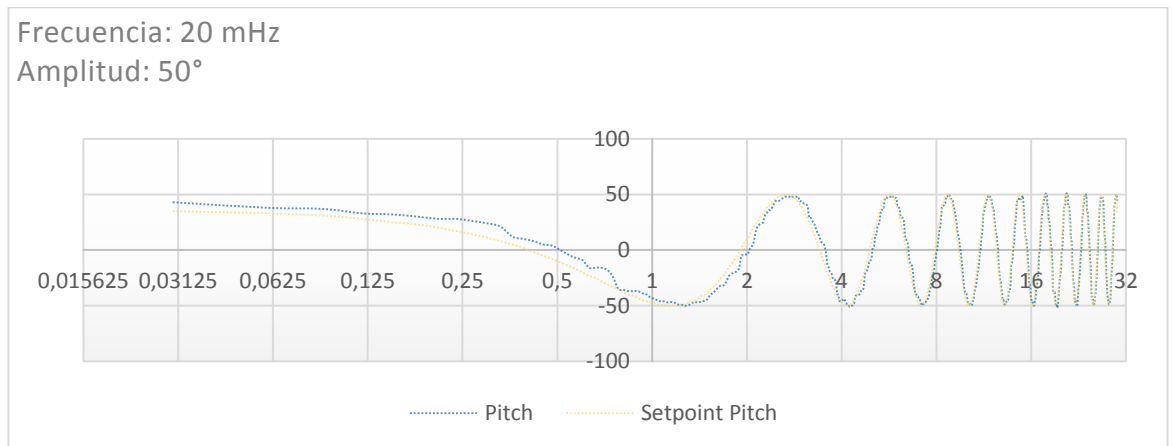


Ilustración 100. Respuesta en el tiempo Roll (señal diente de sierra).

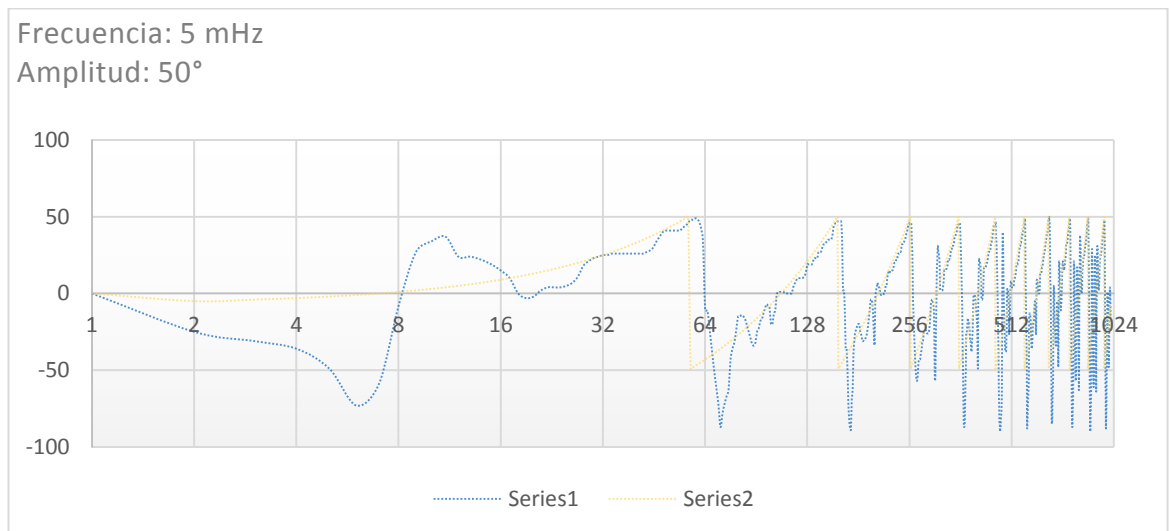


Ilustración 101. Respuesta en el tiempo Pitch (señal diente de sierra).

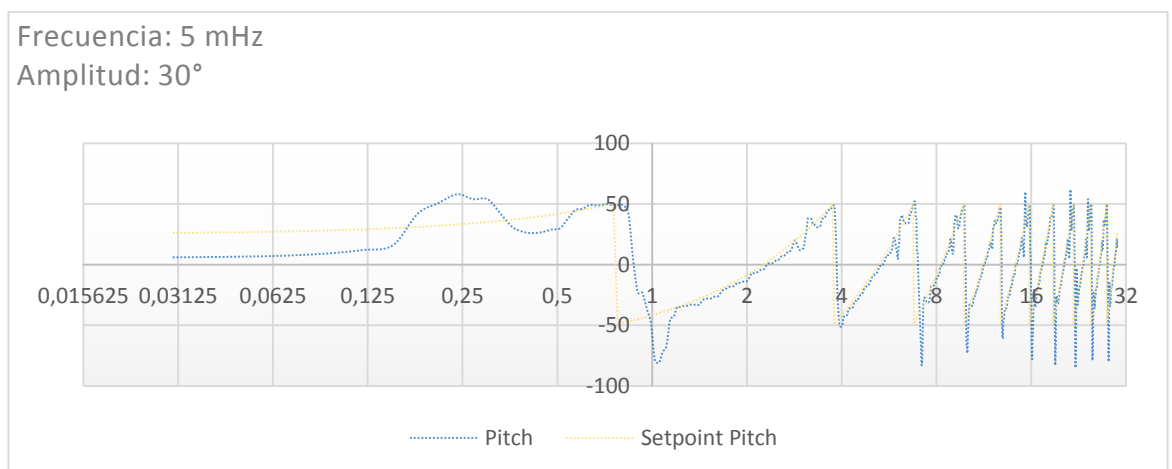


Ilustración 102. Respuesta en el tiempo Roll (señal triangular).

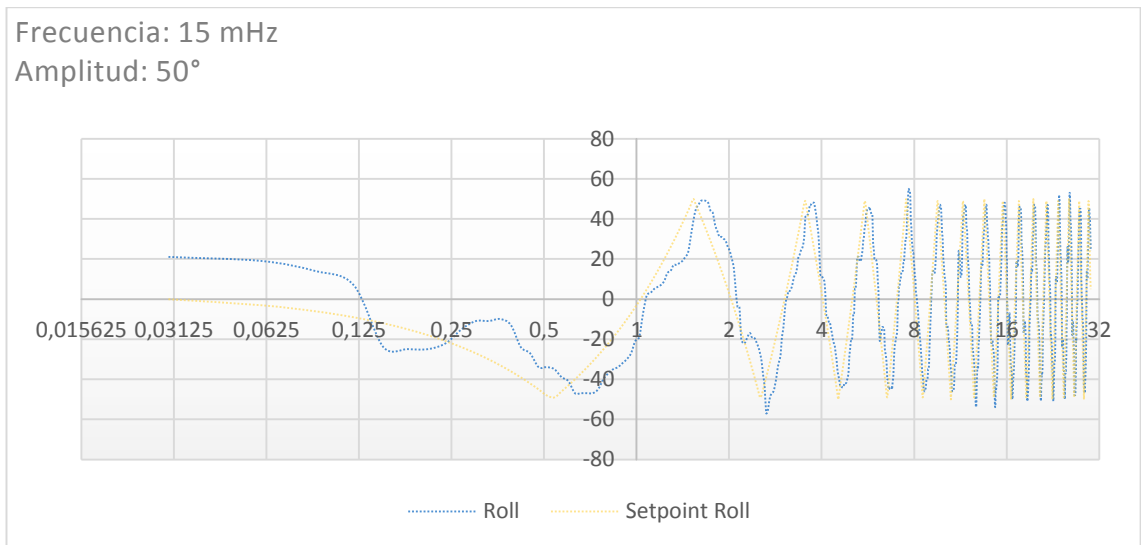
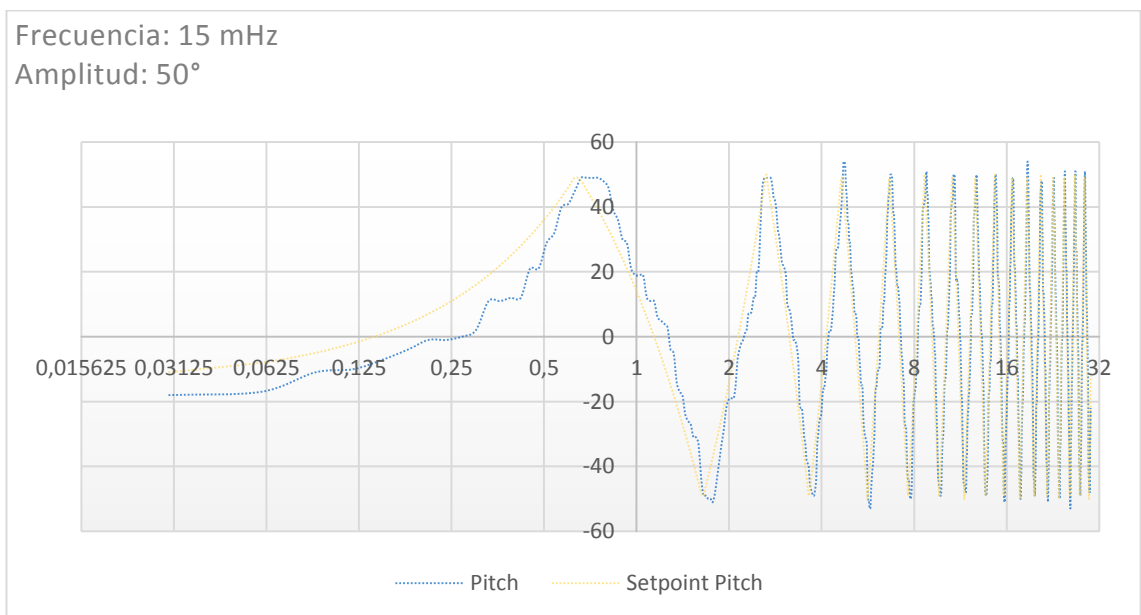


Ilustración 103. Respuesta en el tiempo Pitch (señal triangular).



11 ECONOMÍA Y DESARROLLO DEL PROYECTO

Una de las actividades cruciales del proceso de desarrollo del proyecto, se basa en una buena estimación del esfuerzo requerido para realizar el proyecto, duración cronológica del proyecto y el costo.



11.1 Modelo de costos del proyecto

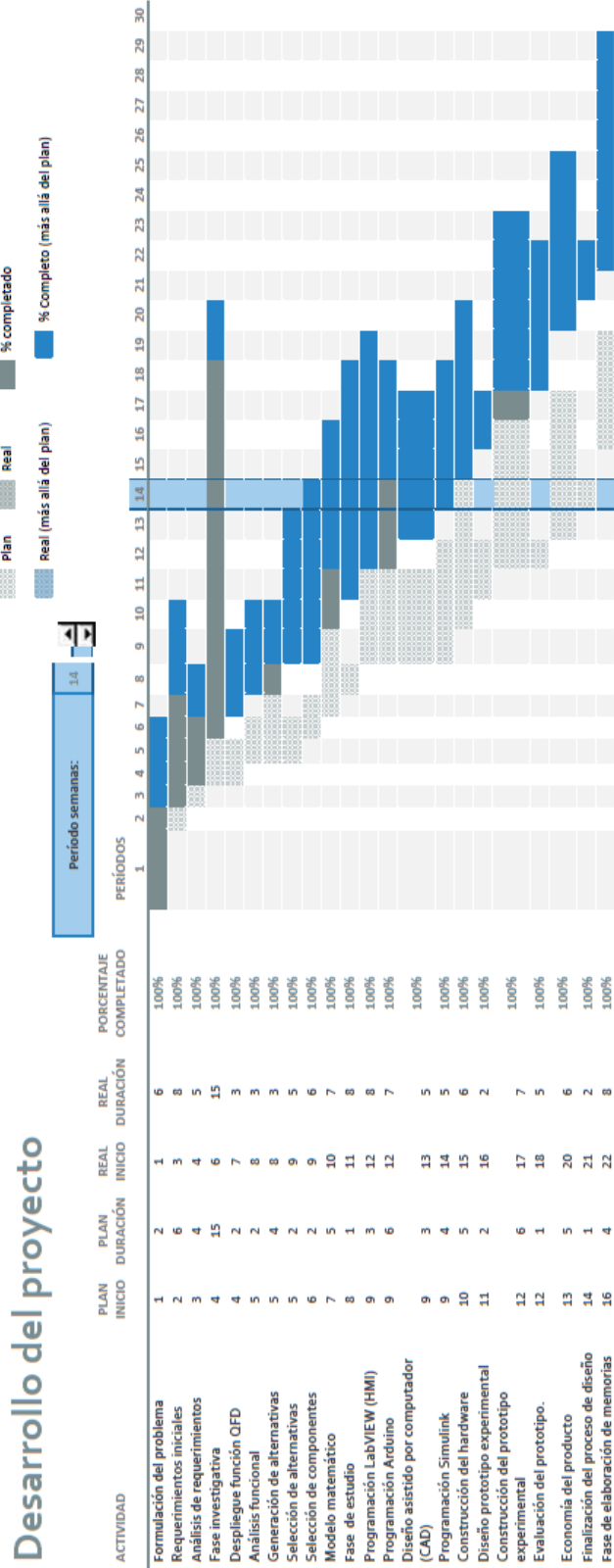
La técnica para desarrollar el modelo de costos es utilizar una descomposición en módulos. Esto significa que se divide el proyecto en partes más pequeñas y estimar cada una por separado, utilizando un juicio experto. Para facilitar la estimación de la economía del proyecto, se desarrolla la tabla de costos en función cronológico.

Tabla 23. Tabla de costos generales del proyecto.

| | TAREAS DEL PROYECTO | HORAS MANO DE OBRA | COSTO X HORA (\$) | COSTO MANO OBRA (\$) | COSTO MATERIAL (\$) | COSTO VIAJES (\$) | OTROS COSTO S (\$) | TOTAL POR TAREA |
|--|---|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| DISEÑO DEL PROYECTO | Desarrollo especificaciones funcionales | 2 | 5000,00 | 10000,00 | 0,00 | 10000,00 | 0,00 | 20000,00 |
| | Benchmarking | 5 | 5000,00 | 25000,00 | 0,00 | 10000,00 | 0,00 | 35000,00 |
| | Desarrollo especificaciones de diseño preliminares | 1 | 5000,00 | 5000,00 | 0,00 | 10000,00 | 0,00 | 15000,00 |
| | Desarrollo diseño de concepto | 10 | 5000,00 | 50000,00 | 0,00 | 10000,00 | 0,00 | 60000,00 |
| | Desarrollo de software Labview | 30 | 5000,00 | 150000,00 | 0,00 | 10000,00 | 0,00 | 160000,00 |
| | Desarrollo de software Arduino | 10 | 5000,00 | 50000,00 | 0,00 | 10000,00 | 0,00 | 60000,00 |
| | Desarrollo diseño CAD SolidWorks | 20 | 5000,00 | 100000,00 | 0,00 | 10000,00 | 0,00 | 110000,00 |
| | Desarrollo simulación Matlab - Simulink | 60 | 5000,00 | 300000,00 | 0,00 | 10000,00 | 0,00 | 310000,00 |
| | Subtotal | 138 | | 690000,00 | 0,00 | 80000,00 | 0,00 | 770000,00 |
| DESARROLLO DEL PROYECTO | Desarrollo hardware | 30 | 5000,00 | 150000,00 | 1000000,0 0 | 100000,0 0 | 0,00 | 1250000,0 0 |
| | Desarrollo componentes del prototipo | 20 | 5000,00 | 100000,00 | 40000,00 | 100000,0 0 | | 240000,00 |
| | Construcción de prototipo | 5 | 5000,00 | 25000,00 | 20000,00 | 50000,00 | 0,00 | 95000,00 |
| | Evaluación del prototipo | 2 | 5000,00 | 10000,00 | 10000,00 | 20000,00 | 0,00 | 40000,00 |
| | Subtotal | 57 | | 285000,00 | 1070000,0 0 | 270000,0 0 | 0,00 | 1625000,0 0 |
| ENTREGA DEL PROYECTO | Instalar el sistema | 1 | 5000,00 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5000,00 |
| | Entrenar a los clientes | 1 | 5000,00 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5000,00 |
| | Realizar prueba de aceptación | 1 | 5000,00 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5000,00 |
| | Archivar material | 2 | 5000,00 | 10000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 10000,00 |
| | Subtotal | 5 | | 25000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 25000,00 |
| ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO | Reuniones/informes de progreso con el cliente | 0 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Reuniones/informes de estado interno | 0 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Interfaz con proveedor externo | 0 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Interfaz con otros departamentos internos | 0 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Administración de la configuración | 0 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Control de calidad | 0 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Administración global del proyecto | 0 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Subtotal | 0 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| OTROS COSTOS | Accesorias técnicas y profesionales | 15 | 15000,0 0 | 225000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 225000,00 |
| | Otros costos | 0 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Otros costos | 0 | 5000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Subtotal | 15 | | 225000,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 225000,00 |
| SUBTOTALES | | 215 | | 1225000,0 0 | 1070000,0 0 | 350000,0 0 | 0,00 | 2645000,0 0 |
| RIESGO (PREVISTOS) | | 0 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| TOTAL (PROGRAMADO) | | 215 | | 1225000,0 0 | 1070000,0 0 | 350000,0 0 | 0,00 | 2645000,0 0 |

11.2 Desarrollo del proyecto

Tabla 24. Desarrollo en periodos del proyecto.



12 CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño mecánico de cada uno de los componentes estructurales del prototipo de experimental empleando herramientas computacionales de dibujo y análisis de esfuerzos de SolidWorks.
- Se desarrolló un modelo cinemático y dinámico para simular y evaluar los diseños de la plataforma de estabilización mediante la herramienta computacional Simulink.
- Se diseñó y construyó un prototipo experimental, que nos permitió corroborar aspectos básicos de control y estabilización. Este prototipo comprendió.
- Se seleccionó y empleó la unidad de medición inercial CHR-UM6, la cual incorpora los sensores básicos, acelerómetros y giroscopios. Esta permitió informar al microcontrolador acerca de la velocidad, orientación e inclinación de la plataforma de estabilización de forma fácil y segura.
- Se seleccionó y empleó una tarjeta Arduino que permite realizar una interfaz entre los actuadores y el sistema de control de la estabilización del prototipo.
- Se realizó una interfaz entre la tarjeta embebida Arduino y el software de Labview para la comunicación de datos del sensor y los datos de control.

13 RECOMENDACIONES

- En el presente trabajo de grado se presentó un diseño como alternativa de estabilización para la cámara panorámica lady bug 3¹⁵, que es una cámara de gama alta con prestaciones de recopilación de imágenes. Así que el uso para otros dispositivos que necesiten estabilización es simplemente limitado.
- Se recomienda el uso de módulos XBee¹⁶ hace que los enlaces de transición de comandos de control se maneje de forma fácil y sencilla como cualquier comunicación serial y es un sistema de enlace seguro de datos a pensar de utilizar una banda de frecuencia libre.
- La IMU um6 tiene incorporado un filtro Kalman para mayor precisión. Se recomienda la incorporación de un GPS, para que los datos de la IMU sean compensados con mayor fiabilidad. El módulo receptor GPS LS20031¹⁷ está inicialmente a una velocidad de actualización de 5 Hz, una velocidad de comunicación de serie 57600bps pero se puede cambiar a una configuración predeterminada.
- El prototipo que generará el proyecto es algo robusto, necesita la implementación de una electrónica y componentes más sofisticados, que soporte corrientes eléctricas más altas. Para producir estimaciones de ángulos que sean fiables, incluso durante maniobras dinámicas agresivas, en el mercado existen alternativas más sofisticadas, una de ellas es la GP9¹⁸ es un AHRS¹⁹ asistida por GPS.

¹⁵ *Point Grey*. (n.d.). Retrieved 2013, from <http://www.ptgrey.com>:
http://www.ptgrey.com/products/ladybug3/ladybug3_360_vídeo_camera.asp

¹⁶ *didacticaselectronicas*. (n.d.). Retrieved 2013, from
[http://www.didacticaselectronicas.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.t
pl&product_id=44&category_id=68&option=com_virtuemart&Itemid=3&vmcchk=1&Itemid=3](http://www.didacticaselectronicas.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=44&category_id=68&option=com_virtuemart&Itemid=3&vmcchk=1&Itemid=3)

¹⁷ (2014). (sparkfun) Retrieved , from sparkfun: <https://www.sparkfun.com/products/8975>

¹⁸ robotic, C. (2014). *CH robotic*. Retrieved from CH robotic: <http://www.chrobotics.com/shop/gp9-ahrs>

¹⁹ AHRS se refiere a la actitud y sistema de referencia de partida, consta de sensores en tres ejes que proporcionan las partidas, la actitud y la guiñada.

- Para el desarrollo de la construcción de esta plataforma de estabilización, se recomienda el trabajo en equipo de profesionales en ingeniería mecánica, electrónica y diseño industrial.

BIBLIOGRAFÍA

2014. *sparkfun*. [En línea] sparkfun, 2014. <https://www.sparkfun.com/products/8975>.

D, Pozo. 2010. www.epn.edu.ec. [En línea] 22 de feb de 2010. Diseño y construcción de una plataforma didáctica para medir ángulos de inclinación usando sensores inerciales como acelerómetro y giroscopio.. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1794>.

didacticasselectronicas. [En línea] Xbee conexión inalámbrica. [http://www.didacticasselectronicas.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.t](http://www.didacticasselectronicas.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=44&category_id=68&option=com_virtuemart&Itemid=3&vmcchk=1&Itemid=3)

J, Gomez. 2011. *Rovotica movil. Estudio y caracterización del robot Movil Kjunior Desarrollo de aplicación de robot Laberinto.* Universidad politécnica de cartagena. Cartagena : s.n., 2011. Proyecto de titulación (Ingeniería electrónica) .

Jauregui Uribe, Alejandra Lucia y Vianchada Estevez, Carlos Alberto. 2010. *Diseño de un control de cabeceo y alabeo de un vehículo no tripulado.* Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga : s.n., 2010. Proyecto de titulación.

Point Grey. <http://www.ptgrey.com>. [En línea] Cámara panorámica Lady bug. http://www.ptgrey.com/products/ladybug3/ladybug3_360_video_camera.asp.

robotic, CH. 2014. CH robotic. *CH robotic*. [En línea] 2014. <http://www.chrobotics.com/shop/gp9-ahrs>.

Robust Control Design for a Two-axis Gimbaled. **Yoo, Ho-Pyeong Lee y Inn-Eark.** Regional robotic, pág. 7.

Wikipedia. [En línea] [Citado el: 12 de Sep de 2013.] http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81ngulos_de_navegaci%C3%B3n.

ENLACES

<http://www.mathworks.com/>

<http://www.mathworks.com/products/simulink/>

<http://www.mathworks.com/products/simmechanics/videos.html>

http://www.itu.dk/stud/speciale/segmentering/Matlab6p5/help/toolbox/phymod/mech/mech_getting.html

<http://repositorio.ual.es/jspui/bitstream/10835/1611/1/PFCestevez.pdf>

http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Extras_IMatlab

http://www.tp.devry.edu/PDFs/Using_Matlab_Simulink.pdf

http://www.tufts.edu/~rwhite07/PRESENTATIONS_REPORTS/simulink.pdf

<http://www.mathworks.com/help/phymod/smlink/ref/linking-and-unlinking-simmechanics-link-software-with-SolidWorks.html>

<http://www.SolidWorks.com/>

<http://www.SolidWorks.es/>

<http://www.chrobotics.com/shop/orientation-sensor-um6>

<http://www.pololu.com/product/1255>

<https://www.sparkfun.com/products/9718>

<http://arduino.cc/es/Reference/Servo>

<http://colab-arduino.blogspot.com/2012/03/comunicacion-entre-arduino-y-LabVIEW.html>

<http://www.olimex.cl/tutorial/Guia%20MCI%20-%20Servo%20motor%20con%20Arduino.pdf>

<http://www.ni.com/gettingstarted/LabVIEWbasics/esa/datastructures.htm>

ANEXOS

(Ver en CD)

ANEXO A.GENERACIÓN Y DESARROLLO DE PROYECTO (Ver archivo adjunto en el CD).

ANEXO B. MODELO CAD SOLIDWORKS (Ver archivo adjunto en el CD).

ANEXO C. SIMULACIÓN MATLAB - SOLIDWORKS (Ver archivo adjunto en el CD).

ANEXO D. HMI LABVIEW (Ver archivo adjunto en el CD).

ANEXO E. FOTOS CONEXIÓN (Ver archivo adjunto en el CD).

ANEXO F. DATASHEET DE SENSORES Y CONEXIONES (Ver archivo adjunto en el CD)

ANEXO G.VÍDEOS PLATAFORMA EXPERIMENTAL (Ver archivo adjunto en el CD).