

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE VALIDACIÓN PARA EL
MÓDULO DE MEDICIÓN INERCIAL DE LA HERRAMIENTA ITION-I DE
INSPECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS**

**JOSE ALEJANDRO BAYONA QUINTERO
LUIS RODOLFO CABRALES JIMÉNEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2014

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE VALIDACIÓN PARA EL
MÓDULO DE MEDICIÓN INERCIAL DE LA HERRAMIENTA ITION-I DE
INSPECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS**

**JOSE ALEJANDRO BAYONA QUINTERO
LUIS RODOLFO CABRALES JIMÉNEZ**

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director

**OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico, MS.c**

Co-Director

**SERGIO QUINTERO CARVAJAL
Ingeniero Electromecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIAS

A Dios padre todo poderoso por todas sus bendiciones y permitir concluir mis estudios en tan importante alma mater. A mi madre, Dalida Jiménez, por su constante e incansable apoyo que hizo posible uno de mis sueños y Por ser mi voz de aliento en los momentos de dificultades que surgieron en la preparación de este proyecto de vida que hoy alcanza un peldaño más.

A toda mi familia por su comprensión en el desarrollo de este proyecto de grado, a todos mis seres queridos que de una u otra forma contribuyeron en mi formación integral.

Luis Rodolfo Cabrales Jiménez

A Dios por permitirme cumplir esta meta; a mi madre, Liliana Quintero, quien gracias a sus esfuerzos, dedicación, apoyo y amor hicieron posible todo lo que he logrado, a pesar de las adversidades; a mi hermanita, Lilian Bayona, quien siempre creyó en mí y me apoyo en todas mis decisiones; a mi papa, Lázaro Bayona, y mis hermanos, Juan y Leonardo, por todos sus consejos y recomendaciones.

José Alejandro Bayona Quintero

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, hermanos, familia y amigos por los consejos, la paciencia y la comprensión durante todo este proceso.

Queremos agradecer al Ingeniero y Co-Director Sergio Quintero Carvajal, por su ayuda, consejos y colaboración durante el desarrollo del proyecto, en especial en las etapas de diseño y construcción donde nos orientó y fortaleció nuestros conocimientos sobre diseño mecánico, procesos de mecanizado y demás disciplinas presentes para el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Agradecemos por su gran aporte en el desarrollo personal y profesional de los autores, por todas sus experiencias compartidas.

Al Dr. Jorge Panqueva y a la Corporación para la Investigación de la Corrosión – CIC, por brindarnos la oportunidad de desarrollar y poner en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de nuestro ciclo profesional mediante la ejecución de este proyecto de grado. Al ingeniero Luis Carlos Díaz, Alfredo Gualdrón, Sergio Pinzón, Joel Flórez, Daniel Ramírez, Hernán Garnica, Joaquín Téllez, Mario Quintero y todo el equipo interdisciplinario de la UEN tecnologías de la CIC, por cada gesto de colaboración, motivación, enseñanzas y contribución que hicieron posible la finalización de este proyecto de grado.

Al Profesor Omar armando Gélvez Arocha por su respaldo y confianza durante el desarrollo del proyecto. Agradecemos también a la Escuela de Ingeniería Mecánica, y a todos los que la conforman, por ser la cuna de nuestra formación y contribuir en el desarrollo de nuestras metas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	26
1.1 ANTECEDENTES.....	26
1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	30
2 JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	32
3 OBJETIVOS	33
3.1.1 Objetivo General.....	33
3.1.2 Objetivos Específicos.....	33
4 DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA GIMBAL	35
4.1 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA NECESIDAD.....	37
4.1.1 Parámetros básicos	39
4.1.2 Requerimientos del sistema.....	40
4.2 ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS GIMBAL	43
4.2.1 Gimbal 2D.....	43
4.2.2 Gimbal 3D.....	45
4.2.3 Análisis de características técnicas ideales de un sistema de rotación. ..	48
4.2.4 Despliegue de la función de calidad	50
4.2.5 Matriz de calidad.....	52
4.2.6 Planteamiento de las alternativas de solución	54
4.2.7 Evaluación de alternativas: matriz de ponderaciones	57
4.2.8 Alternativa a construir según la matriz de ponderaciones.....	58
5 DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA GIMBAL	60
5.1 GENERALIDADES DEL SISTEMA MECÁNICO.....	62
5.1.1 Definición de la geometría del sistema de rotación tipo Gimbal	63
5.1.2 Configuración cinemática del sistema Gimbal	64
5.1.3 Disposición de los motores	65

5.1.4	Disposición de los sensores	67
5.2	GEOMETRÍA Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA MECÁNICO.....	70
5.2.1	Módulo de medición inercial.	70
5.2.2	Anclaje del módulo de medición inercial al sistema de validación.	71
5.3	MECANISMO TIPO GIMBAL	73
5.3.1	Gimbal Roll.	76
5.3.2	Gimbal Pitch.	85
5.3.3	Gimbal Yaw.	93
5.3.4	Estructura Base.	101
5.4	SELECCIÓN DE MATERIALES	110
5.4.1	Requerimientos de diseño.	112
5.4.2	Materiales estructura de rotación tipo Gimbal.....	112
5.4.3	Materiales para la estructura base.....	113
5.4.4	Materiales para los ejes.....	114
5.5	TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	115
5.5.1	Motorreductor	118
5.5.2	Ejes.....	136
5.5.3	Poleas y Correas	140
5.5.4	Rodamientos.....	147
5.6	ETAPAS DEL MODELAMIENTO CAD	153
6	CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE MECÁNICO	157
6.1	CONSTRUCCIÓN.....	157
6.1.1	Proceso de corte por agua para las láminas.....	158
6.1.2	Proceso de fresado para las láminas.....	161
6.1.3	Proceso de torneado para los ejes	163
6.2	ENSAMBLE MECÁNICO	165
6.2.1	Tipo de sujeción a usar.....	166
6.2.2	Secuencia de ensamble del Gimbal 3D.....	173
6.2.3	Proceso de montaje de los elementos electrónicos.....	182
7	SISTEMA ELECTRÓNICO.....	184
7.1	SISTEMA DE CONTROL APLICADO AL SISTEMA GIMBAL	185
7.1.1	Elementos básicos del sistema de control.....	186
7.1.2	Control lazo cerrado.....	187
7.1.3	Control lazo abierto.....	196

7.2	SOFTWARE CIC	197
7.2.1	MATLAB - Interfaz de usuario GUIDE	198
7.2.2	Control del motor mediante FPGA	199
7.2.3	Comunicación FPGA – Motor Brushless.....	202
7.3	HARDWARE.....	203
7.3.1	FPGA DEO-NANO.....	204
7.3.2	Drivers de potencia	205
7.3.3	Sensores.....	205
7.3.4	Cableado	208
8	ANALISIS DE COSTOS DEL GIMBAL.....	210
8.1	MATERIALES.....	210
8.2	ELEMENTOS DE SELECCIÓN	211
8.3	PROCESOS DE FABRICACIÓN	211
8.4	ASESORIAS.....	212
9	PRUEBAS DEL SISTEMA GIMBAL	213
9.1	RUTINAS DE OPERACION DEL GIMBAL	213
9.2	BALANCEO DEL MECANISMO TIPO GIMBAL	217
9.3	PUESTA A PUNTO	217
9.4	RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD	217
9.4.1	Parada de emergencia.....	218
10	CONCLUSIONES.....	219
11	RECOMENDACIONES	222
	BIBLIOGRAFIA	223
	ANEXOS.....	225

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Poliducto Ecopetrol.....	27
Figura 2. Herramientas de inspección interna ILI.....	28
Figura 3. Herramienta de Inspección ITION	30
Figura 4. Módulo de Medición Inercial ITION-I	31
Figura 5. Sistema de Validación Propuesto	34
Figura 6. Etapas de la metodología para el desarrollo del proyecto	35
Figura 7. Desarrollo del diseño conceptual.....	36
Figura 8. Reconstrucción de la trayectoria de un Poliducto	37
Figura 9. Perfil de altimetría y de planimetría	38
Figura 10. Esquema de montaje del dispositivo de medición inercial	38
Figura 11. Sistema de referencia de coordenadas RPY	41
Figura 12. Dimensiones del módulo de medición inercial	42
Figura 13. Sistema Gimbal 2D de Newmark.....	44
Figura 14. Sistema Gimbal 2D de AEROTECH.....	45
Figura 15. Sistema Gimbal 3D AEROTECH.....	46
Figura 16. Sistema Gimbal 3D ACUTRONIC.....	46
Figura 17. Sistema Gimbal 3D ENGEMOVI.....	47
Figura 18. Esquema del mecanismo tipo Gimbal existente en la CIC	55
Figura 19. Sistema de Transmisión por Correas Dentadas	57
Figura 20. Subdivisión de sistemas del Gimbal.....	59
Figura 21. Etapas del diseño del Sistema Mecánico	60
Figura 22. Giroscopio mecánico.....	61
Figura 23. Propuesta de diseño básico del sistema de validación.....	62
Figura 24. Dimensiones básicas del sistema Gimbal.....	64
Figura 25. Configuración cinemática del sistema de validación.....	65
Figura 26. Motor instalado directamente en el eje de salida.....	66
Figura 27. Montaje de motor mediante ejes paralelos	67
Figura 28. Configuración 1 del encoder en los ejes.....	68
Figura 29. Configuración 2 del encoder en los ejes	69
Figura 30. Componentes electrónicos del módulo de medición inercial	71
Figura 31. Sujeción del módulo de medición inercial	72
Figura 32. Placa de montaje para módulo de medición inercial.....	72
Figura 33. Componentes de la estructura Gimbal.....	74

Figura 34. Gimbal concéntricos	75
Figura 35. Diseño de la estructura mecánica.....	76
Figura 36. Rotación axial de la herramienta ITION	77
Figura 37. Integración de componentes de la estructura Gimbal Roll.....	79
Figura 38. Plataforma circular	80
Figura 39. Eje Roll	81
Figura 40. Placa hexagonal de acople: Eje Roll – Plataforma Circular	82
Figura 41. Funcionalidad Placa hexagonal.....	82
Figura 42. Montaje de piezas de transmisión de potencia en Roll	83
Figura 43. Análisis CAE de la estructura en U	84
Figura 44. Integración de componentes de Gimbal pitch.....	86
Figura 45. Estructura en forma de U.....	87
Figura 46. Eje Pitch.....	88
Figura 47. Ubicación del centro de masa de la estructura Pitch	89
Figura 48. Plataforma rectangular.....	90
Figura 49. Cubierta de acrílico	90
Figura 50. Placa sujeción motor.....	91
Figura 51. Placa hexagonal	92
Figura 52. Montaje de piezas de transmisión de potencia en Pitch.	93
Figura 53. Integración de componentes.....	95
Figura 54. Estructura en U.....	95
Figura 55. Soporte en L	96
Figura 56. Plataforma rectangular giratoria.....	97
Figura 57. Eje Yaw.....	98
Figura 58. Placa hexagonal	99
Figura 59. Separadores	99
Figura 60. Motorreductor de Gimbal Yaw	100
Figura 61. Bases de simuladores de rotación Acutronic	102
Figura 62. Modelo de estructura para el bastidor del sistema Gimbal	103
Figura 63. Disco circular	106
Figura 64. Placa rectangular	106
Figura 65. Ensamble placa mesa-motor	107
Figura 66. Bastidor.....	108
Figura 67. Elementos de nivelación y anti-vibratorio.....	109
Figura 68. Diseño completo de la Estructura Base	109
Figura 69. Aleaciones de aluminio comunes y sus aplicaciones	110
Figura 70. Propiedades mecánicas de algunas aleaciones de aluminio.....	111
Figura 71. Propiedades Mecánicas Acero inoxidable	114
Figura 72. Componentes transmisión de potencia.....	116

Figura 73. Perfil de Velocidad y Torque de los Motores	124
Figura 74. Motor Brushless	125
Figura 75. Reductor planetario de precisión.	128
Figura 76. Brushless, Rotary DC Servomotors.	131
Figura 77. Motor brushless Crouzet.....	132
Figura 78. Motores brushless Moog.....	133
Figura 79. Motor Maxon EC-max.	134
Figura 80. Diagrama de cargas eje Roll. Plano X-Y.....	138
Figura 81. Diagrama de carga eje Roll. Plano X-Z.....	138
Figura 82. Grafica de selección del paso de la correa	143
Figura 83. Rodamientos axiales a bolas 51130 de simple efecto, despiezable ..	148
Figura 84. Montaje de rodamiento en estructura Pitch	149
Figura 85. Montaje de rodamiento en estructura Base	149
Figura 86. Ubicación de los rodamientos radiales en el eje Roll.....	150
Figura 87. Rodamiento radiales rígido a bolas 61905.....	151
Figura 88. Rodamiento radiales rígido a bolas 61908.....	152
Figura 89. Rodamiento rígido a bolas 6008	153
Figura 90. Etapas del diseño mecánico de las estructura del sistema de validación.	154
Figura 91. Diseño por remoción de material.	155
Figura 92. Diseño por ensamble de placas.....	155
Figura 93. Diseño final del sistema de validación Gimbal	156
Figura 94. Procesos de construcción y ensamble mecánico	157
Figura 95. Láminas de Aluminio 7075-T651	158
Figura 96. Diagrama de corte para láminas de aluminio 7075-T651	159
Figura 97. Proceso de corte por chorro de agua abrasivo.	160
Figura 98. Acabados superficiales del corte por chorro de agua abrasiva.....	160
Figura 99. Lámina de aluminio 7075-T651	161
Figura 100. Proceso de fresado para piezas de Gimbal Yaw.	162
Figura 101. Proceso de fresado para láminas de Pitch y Yaw.....	162
Figura 102. Acero inoxidable 304 con las perforaciones.	163
Figura 103. Plano de fabricación de los ejes del Gimbal Pitch	164
Figura 104. Mecanizado de los ejes	164
Figura 105. Ejes terminados del proceso de fabricación.	165
Figura 106. Piezas para ensamble según el esquema agujero-eje	166
Figura 107. Normal DIN 7154	167
Figura 108. Piezas agujero-eje aseguradas con tornillos.	168
Figura 109. Esquema de montaje de tornillos.....	168
Figura 110. Arreglos de tornillos circulares (Der.) y lineales (Izq.).....	169

Figura 111. Esquema de montaje de las placas de 12 y 15 mm	170
Figura 112. Proceso de roscado para lámina de 15 mm.	171
Figura 113. Capacidad de carga en lbf para tornillos de acero inoxidable 304... ..	172
Figura 114. Piezas unidas con tornillería de 1/4 y 3/8 de pulgada.....	173
Figura 115. Ensamble de los componentes a los ejes.....	174
Figura 116. Ensamble de rodamientos en los ejes.	174
Figura 117. Ensamble de las piezas de soporte con los rodamientos radiales... ..	175
Figura 118. Montaje de láminas en cada estructura Gimbal.....	176
Figura 119. Placa de soporte del motor y el eje de estructura Gimbal Yaw.....	176
Figura 120. Ensamble del Gimbal.....	177
Figura 121. Ensamble de las estructuras Gimbal	178
Figura 122. Guías deslizantes para el montaje de las correas.	179
Figura 123. Ubicación del sistema de transmisión de potencia del Gimbal Roll .	179
Figura 124. Estructura base del sistema Gimbal	180
Figura 125. Ensamble de los Gimbal en la estructura base.....	181
Figura 126. Ensamble final del sistema de validación	182
Figura 127. Sistema de validación con los elementos electrónicos montados ...	183
Figura 128. Estructura del capítulo de Sistema Electrónico.....	184
Figura 129. Estructura de control en Lazo cerrado.....	188
Figura 130. Interfaz demo para Gimbal.	189
Figura 131. Esquema simplificado del sistema Gimbal.....	191
Figura 132. Diagrama de bloques Gimbal.	192
Figura 133. Modelo de la articulación robótica.	192
Figura 134. Control del sistema de validación en lazo abierto	196
Figura 135. Interfaz de usuario GUIDE.....	198
Figura 136. Ejemplo de rutina de pruebas	199
Figura 137. Despiece Motores Brushless	200
Figura 138. Lazo cerrado para el funcionamiento de los motores	201
Figura 139. Duty Cycle motores Gimbal	202
Figura 140. Hardware sistema de validación tipo Gimbal	203
Figura 141. FPGA DEO-NANO.....	204
Figura 142. Driver Motores Brushless.....	205
Figura 143. Encoder DS-70, posición absoluta.....	206
Figura 144. Encoder DS-70, Especificaciones técnicas.....	207
Figura 145. Diagrama esquemático cableado del sistema de validación tipo Gimbal y cableado final.....	209
Figura 146. GUI sistema de validación.	215
Figura 147. Visualización de Rutinas sistema de validación.....	216
Figura 148. Esquema transmisión de potencia.....	226

Figura 149. Programa selección de los motores Maxon.	228
Figura 150. Esquema transmisión de potencia	230
Figura 151. Fuerza sobre poleas	232
Figura 152. Procedimiento del diseño de los ejes.....	235
Figura 153. Interfaz MDSolids.....	237
Figura 154. Estado de carga Plano X-Y eje Roll.....	238
Figura 155. Diagrama de cortante y flexión. Plano X-Y eje Roll	239
Figura 156. Diagrama de carga del eje. Plano X-Z eje Roll	239
Figura 157. Diagrama de Torsión eje Roll	240
Figura 158. Esfuerzo repetido e invertido	243
Figura 159. Parámetros del factor de acabado superficial	245
Figura 160. Factores de confiabilidad k_e	247
Figura 161. Factor concentración de esfuerzos	248
Figura 162. Plataforma estabilizada (Gimbal).....	252
Figura 163. Sistema Strapdown.....	253
Figura 164. Sistema de coordenadas ECEF.....	255
Figura 165. Sistema RPY.	256
Figura 166. Información del modelo.....	262
Figura 167. Mallado de la estructura Pitch.....	267
Figura 168. Análisis de tensión Gimbal Pitch.....	268
Figura 169. Análisis de desplazamiento Gimbal Pitch.	268
Figura 170. Análisis de deformaciones Gimbal Pitch.....	269
Figura 171. Factor de seguridad Gimbal Pitch.....	269
Figura 172. Factor de seguridad Gimbal Yaw.....	270
Figura 173. Factor de seguridad Placa hexagonal Gimbal Yaw.	271
Figura 174. Factor de seguridad Estructura base.	271
Figura 175. Resultado Análisis de Tensiones eje Gimbal Roll.....	276
Figura 176. Resultado Análisis de Desplazamiento eje Gimbal Roll.....	276
Figura 177. Resultado Análisis de Deformaciones eje Gimbal Roll.	277
Figura 178. Factor de seguridad Eje Gimbal Roll.	277
Figura 179. Resultado Factor de Seguridad eje Pitch.....	279
Figura 180. Resultado Factor de Seguridad Eje Yaw	279
Figura 181. Clasificación de los encoders según su tecnología	289
Figura 182. Configuración encoder en el eje.	291
Figura 183. Niveladores del sistema de validación.	304
Figura 184. Estructuras Gimbal.	305
Figura 185. Módulo de medición Inercial IMU.....	306
Figura 186. Montaje del módulo de medición inercial.	307

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Requerimientos mínimos de operación para el IMU	40
Tabla 2. Requerimientos generales ideales del sistema Gimbal	42
Tabla 3. Cuadro comparativo de sistemas Gimbal comerciales.	48
Tabla 4. Conclusión del cuadro comparativo simuladores de rotación.	49
Tabla 5. Matriz de calidad QFD.	52
Tabla 6. Matriz de ponderaciones.....	58
Tabla 7. Materiales para la estructura de los Gimbal.....	113
Tabla 8. Materiales para la construcción de la estructura base.	113
Tabla 9. Tecnologías de motores DC.	119
Tabla 10. Configuración de la transmisión mecánica.....	121
Tabla 11. Especificaciones técnicas de motor EC 45 flat Ø42.8 mm.....	126
Tabla 12. Especificaciones técnicas de motor EC 60 flat Ø60 mm.....	127
Tabla 13. Especificaciones técnicas de motor EC 45 Ø45 mm.	127
Tabla 14. Especificaciones técnicas de Reductor GP 42 B Ø42 mm.....	129
Tabla 15. Especificaciones técnicas de Reductor GP 52 B Ø52 mm.....	129
Tabla 16. Especificaciones técnicas de Reductor GP 52 B Ø52 mm.....	130
Tabla 17. Requerimientos del sistema de transmisión por correas.....	142
Tabla 18. Resultados de la selección del paso de la correa	144
Tabla 19. Relación de velocidades para cada eje.....	145
Tabla 20. Valores mínimos de poleas establecidos por Intermec.....	145
Tabla 21. Resultados del proceso de selección de las correas y poleas.	146
Tabla 22. Referencias de las correas y las poleas a adquirir.....	147
Tabla 23. Ecuaciones para el modelamiento del sistema dinámico.....	193
Tabla 24. Datos para aplicar el modelo matemático de la articulación robótica.	195
Tabla 25. Presupuesto planteado inicialmente	210
Tabla 26. Presupuesto ejecutado en materiales.	211
Tabla 27. Presupuesto Elementos de selección.	211
Tabla 28. Presupuesto Mecanizados.....	212
Tabla 29. Asesorías en el desarrollo del proyecto.	212
Tabla 30. Botones GUI.	216
Tabla 31. Ventajas y desventajas de las configuraciones de navegación inercial.	253
Tabla 32. Propiedades del estudio CAE Gimbal Pitch.	263

Tabla 33. Propiedades del modelo	264
Tabla 34. Cargas	265
Tabla 35. Sujeciones	265
Tabla 36. Información de contacto.....	266
Tabla 37. Información de malla.....	266
Tabla 38. Fuerzas de reacción.....	267
Tabla 39. Propiedades del estudio.....	272
Tabla 40. Propiedades del estudio.....	273
Tabla 41. Unidades.....	273
Tabla 42. Propiedades del material	274
Tabla 43. Sujeciones	274
Tabla 44. Cargas	275
Tabla 45. Información de malla – Detalle.....	275
Tabla 46. Datos básicos para el proceso de selección de los encoders.....	292
Tabla 47. Matriz de selección de encoders.....	293
Tabla 48. Cronograma de mantenimiento preventivo	313

TABLA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Memoria de cálculos.....	225
Anexo B. Sistemas De Navegación Inercial.....	251
Anexo C. Cotización sistema Gimbal de 3 grados de libertad Acutronic.	257
Anexo D. Ficha técnica de los motores.....	258
Anexo E. Análisis CAE de los componentes mecánicos.....	261
Anexo G. Proceso de selección del sistema de transmisión por poleas y correas.	280
Anexo H. Ficha técnica de los materiales.	282
Anexo I. Planos generales para el sistema Gimbal.....	283
Anexo J. Encoder.....	289
Anexo K. Instructivo de operación y mantenimiento del sistema gimbal.....	298
Anexo L. Rutinas de calibración de la unidad de medición inercial IMU en Gimbal.	314

GLOSARIO

GIMBAL: Gimbal o cardan es un mecanismo que permite la rotación de un objeto alrededor de un eje en un montaje de anillos concéntricos y con ejes perpendiculares entre sí permitiendo que el movimiento de cada estructura de rotación sea independiente.

GIMBAL 2D: son dos mecanismos Gimbal montados de tal forma que sean concéntricos y perpendiculares entre ellos.

GIMBAL 3D: son tres mecanismos Gimbal montados de tal forma que sean concéntricos y perpendiculares entre ellos.

INTEGRIDAD MECANICA: conjunto de actividades enfocadas para asegurar la confiabilidad de equipos críticos para que sean mantenidos durante la vida útil de la instalación.

IMU: del inglés Inertial Measurement Unit, es un dispositivo electrónico que mide velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales del Sistema en el cual este instalado. Está compuesto por acelerómetros, giroscopios y magnetómetros.

MODULO DE MEDICION INERCIAL: está compuesto de un IMU la electrónica requerida (baterías, tarjetas, bastidor, etc.). Es el encargado de recibir la información de los sensores, interpretarla y almacenarla.

FPGA: las siglas FPGA significan Field Programmable Gate Array. Se trata de un dispositivo compuesto por una serie de bloques lógicos (puertas, registros, memorias, flip/flops, etc.) programables, es decir, la interconexión entre estos

bloques lógicos y su funcionalidad no viene predefinida sino que se puede programar y reprogramar.

REPETIBILIDAD: cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas en las mismas condiciones de medición.

PRECISIÓN: grado de cercanía o acuerdo entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas bajo condiciones estipuladas.

RESOLUCIÓN: es el número de segmentos de medición o unidades en una revolución de un eje de encoder. Menor diferencia entre las indicaciones de un dispositivo indicador, que se puede distinguir en forma significativa.

ENCODERS: sensores que generan señales digitales o analógicas en respuesta al movimiento. Están disponibles en dos tipos, uno que responde a la rotación, el otro al movimiento lineal y son utilizados para medir velocidad y posición.

MOTOR BRUSHLESS: motor eléctrico DC que no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor.

ALTIMETRIA: es la rama de la topografía que estudia el conjunto de procedimientos para determinar y representar la altura de un punto respecto a un plano de referencia.

PLANIMETRÍA: es la rama de la topografía que estudia el conjunto de métodos u procedimientos que tienden a conseguir la representación a escala de un terreno sobre una superficie plana.

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE VALIDACIÓN PARA EL MÓDULO DE MEDICIÓN INERCIAL DE LA HERRAMIENTA ITION-I DE INSPECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS*.

AUTORES:

JOSE ALEJANDRO BAYONA QUINTERO
LUIS RODOLFO CABRALES JIMÉNEZ**

PALABRAS CLAVES:

Pruebas para IMU, Diseño mecánico, Gimbal, Validación navegación inercial, Pruebas de rotación.

DESCRIPCIÓN:

Este libro contiene la descripción del proceso de diseño y construcción del componente mecánico de un sistema de rotación tipo Gimbal de tres ejes ortogonales, así como la implementación del control para la validación de los datos, obtenidos por el módulo de medición inercial perteneciente a la herramienta de inspección inteligente ITION, desarrollada en la Corporación para la investigación de la Corrosión - CIC.

En el desarrollo del libro se presentan aspectos relevantes de diseño mecánico realizado mediante la herramienta CAD-CAE SolidWorks 2012, los principales parámetros y requerimientos del sistema, además de los procesos de selección de los elementos que componen la unidad del sistema. Se describe el proceso de fabricación de Corte por Agua, Fresado y Torneado que se desarrolló dentro de las instalaciones de la Corporación y se detalla el proceso de ensamble realizado para todos sus componentes. Luego se describe la implementación del sistema de control en lazo abierto mediante el uso de motores brushless y una estructura de control programada en una tarjeta FPGA. Por último, se realiza el análisis de costos del desarrollo del proyecto y se presentan las pruebas propias del funcionamiento del sistema de validación.

El resultado de este proyecto es una herramienta que cumple con los objetivos planteados, de fácil manipulación y mantenimiento, de funciones automatizadas y versátiles para la adaptación de nuevos parámetros de velocidad y carga en la validación de los datos del módulo de medición inercial. Se incluyen también los instructivos de funcionamiento, mantenimiento y seguridad desarrollados para el correcto funcionamiento del sistema.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Ing. Omar Gelvez Arocha.

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A VALIDATION SYSTEM FOR INERTIAL MEASUREMENT MODULE TO THE ITION-I TOOL INSPECTION OF OIL AND GAS TRANSPORT PIPELINES.*

AUTHORS:

JOSE ALEJANDRO BAYONA QUINTERO
LUIS RODOLFO CABRALES JIMÉNEZ**

KEYWORDS:

IMU Tests, Mechanical Design, Gimbal, Validation Inertial Navigation Testing Rotation.

DESCRIPTION:

This book contains a description of the design and construction of the mechanical component of a rotational system three-axis type gimbal, and control implementation for the validation of the data, obtained by the inertial measurement module belonging to the tool smart inspection ITION, developed at La Corporación para la investigación de la Corrosión - CIC.

Inside the book are presented relevant aspects of mechanical design performed by the CAD-CAE software SolidWorks 2012, the main parameters and system requirements, in addition to the selection process of the elements of the system drive. Inside the manufacturing process are described the water cut, Milling and Turning processes developed within the premises of the Corporation and it's detailed the assembly process performed for all components. Is then described the open-loop control system for implemented using brushless motors and a control structure in an FPGA programmed card. Finally, the cost analysis of the project is developed and the operation tests of the system are presented.

This project provides as final result a tool that fulfills the proposed objectives, such as easy handling and maintenance, and automated and versatile functions to adapt new standards for speed and load on the data validation on inertial measurement module. Operating instructions, maintenance and safety developed for the correct operation of the system, are also included.

* Thesis

** Faculty of Physical Engineering - Mechanics, Mechanical Engineering School, Engineer Manager Omar Gelvez Arocha.

INTRODUCCIÓN

Una de las actividades más importantes del transporte de los hidrocarburos, sea producto refinado, crudo o gas, es el mantenimiento de las tuberías por las cuales es llevado a cabo este proceso de transporte. Dentro de la industria nacional hay diversas empresas que ofrecen servicios de asesoría e inspección de estos sistemas de transporte, los cuales dan una visualización general del estado de las tuberías y del comportamiento de las mismas en un tiempo futuro determinado.

Estos servicios de asesoría e inspección están basados en resultados de herramientas de inspección internas y externas a la tubería basados en tecnologías como lo son dispersión de flujo magnético, ultrasonido, corrientes de Eddy, infrarrojo, entre otras. Unas de las herramientas de inspección interna de tubería son llamados marranos de inspección o raspadores inteligentes, los cuales están dotados de alguna tecnología de las anteriormente mencionadas y viajan por las tuberías inspeccionando el estado de la pared de la tubería.

En vista de esta oportunidad de desarrollo, la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC), con el apoyo de otras entidades y el respaldo de Colciencias, genera un proyecto de desarrollo de nuevas tecnologías para generar conocimiento con el diseño y construcción de una herramienta de inspección interna de tuberías. Dentro de las funcionalidades que se están desarrollando para esta herramienta se puede destacar: inspección por dispersión de flujo magnético (MFL), descripción de la trayectoria de la tubería a partir de sistemas de medición inercial, ubicación de defectos, entre otros.

Esta herramienta de inspección interna denominada ITION cuenta con un módulo de medición inercial que permite reconstruir trayectorias 3D de las tuberías para la localización y referenciación geográfica de anomalías. La reconstrucción se realiza

mediante la utilización de un conjunto de sensores inerciales (giroscopios y acelerómetros) o unidad de medición inercial (IMU). Este módulo de medición inercial requiere determinar los parámetros de alineación del módulo con la herramienta de inspección, evaluar la máxima velocidad de adquisición de datos para el conjunto de sensores inerciales, verificar la estabilidad, la calidad de los datos entregados por los sensores, entre otras. Comercialmente existen simuladores de movimientos que se utilizan para pruebas y calibración de sensores inerciales.

En el marco del desarrollo de la herramienta ITION se plantea la construcción de un sistema de validación o banco de pruebas en laboratorio para realizar ensayos de verificación de la sensibilidad y estabilidad de la señal de los sensores inerciales ante las variaciones de velocidad en un rango conocido, determinar error en la medida en una unidad de distancia determinada, verificar la repetibilidad y concordancia de los datos.

El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema de pruebas que permita validar la información de reconstrucción (tanto de altimetría como de planimetría) en laboratorio mediante variaciones de posición y velocidad angular en los ejes de movimiento de la herramienta, logrando cuantificar las capacidades del sistema de navegación inercial y generando unos algoritmos veraces para poder reconstruir la trayectoria.

1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 ANTECEDENTES

En la industria, principalmente en el sector Petróleo y Gas, la forma más eficiente para transportar fluidos es a través de tuberías. Dependiendo del tipo de fluido a transportar existen tres tipos de tuberías: gasoductos, oleoductos y poliductos. Estos medios de transporte son susceptibles a fallas en operación como: fugas, taponamientos o deterioro de su integridad mecánica; las cuales generan ambientales y económicas.

Las fallas en las tuberías ocurren por anomalías internas o externas debido a diversos fenómenos, como corrosión a través del tiempo (picaduras, agrietamientos, hendiduras, etc.), daños mecánicos en servicio (abolladuras, erosión, etc.) o por interferencias externas (desastres naturales, toma clandestina, etc.). Se estima que los accidentes en las líneas de transporte de hidrocarburos se distribuyen aproximadamente de la siguiente manera: corrosión 41%, falla de material 25%, golpes de maquinaria 13%, tomas clandestinas 4.5%, fisura en soldaduras 3%, otras causas 13.5%. ¹

Para controlar las fallas de estos sistemas de transporte se implementan sistemas de gestión de integridad², donde se incluyen análisis de falla mecánica de tuberías implementados a partir de planes de mantenimiento correctivo, preventivo y

¹ Con respecto al marco teórico del Proyecto de grado, (NUCIRA, RENE. PACHECO, BENJAMIN. 2001, p. 6).

² Un sistema de gestión de integridad implica realizar un conjunto de actividades con el fin de garantizar que los sistemas mecánicos y las estructuras estén en condiciones seguras para el servicio.

predictivo u otros; basados en datos tomados por las herramientas de inspección interna y externa.

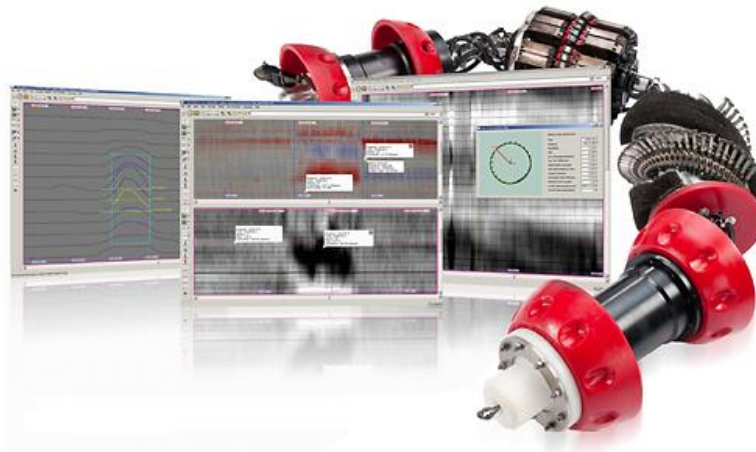
Figura 1. Poliducto Ecopetrol



Fuente: Ecopetrol. Transporte por poliductos. [En línea].
<<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/CartaPetrolera128/mitosyrea2.html>>. [Citado 10 Abril de 2013].

Por esta razón es de vital importancia asegurar que los sistemas en los cuales se transportan, distribuyen y almacenan los hidrocarburos estén en condiciones adecuadas para su buen funcionamiento; para esto existen herramientas de inspección que ayudan a garantizar la integridad de los elementos que componen los diversos sistemas. Inicialmente estas herramientas, conocidas como PIG por sus siglas en inglés (Pipeline Inspection Gauge), eran utilizadas para el mantenimiento y limpieza interna de las tuberías al eliminar los depósitos o sedimentos que obstruían parcial o totalmente el flujo. Estas herramientas son insertadas dentro de la tubería y viajan a través de ella impulsadas por el producto transportado.

Figura 2. Herramientas de inspección interna ILI



Fuente: T.D.Williamson, Inc. INLINE INSPECTION. [Online].
<<http://www.tdwilliamson.com/Pages/Inline-Inspection.aspx>>. [Cited Apr. 10, 2013].

En la actualidad existen diversas herramientas de inspección que permiten conocer las condiciones de las tuberías identificando los defectos y anomalías. Desafortunadamente no todos los tipos de anomalías son detectadas con un solo método de inspección. Algunos de los métodos de inspección como dispersión de flujo magnético (MFL), ultrasonido (UT), ondas guiadas (EMAT), entre otros; utilizan tecnologías de inspección diferentes que operan con ciertas limitaciones para lograr cuantificar y ubicar las anomalías.

Con el fin de abordar estos métodos de inspección la Corporación para la Investigación de la Corrosión – CIC, ubicada en Piedecuesta – Santander, ejecuta un programa en la modalidad de cofinanciación con Colciencias para el desarrollo de herramientas de inspección en línea – ILI³. La CIC, es un Centro de Desarrollo Tecnológico sin ánimo de lucro y su objeto es la producción de conocimiento, innovación y tecnología, a partir de la generación de soluciones a los problemas de la Corrosión en la industria nacional e internacional

³ Referencia documentación CIC.

Dentro de este programa de desarrollo de herramientas ILI, denominado ITION, se encuentran diversos cuerpos o sistemas, dentro de los cuales podemos encontrar el cuerpo ITION-I; este cuerpo incluye un módulo de medición inercial que permite reconstruir trayectorias 3D de las tuberías. Para obtener resultados satisfactorios en la reconstrucción, se requiere realizar pruebas de laboratorio con el fin de comparar y evaluar los datos procesados por los algoritmos matemáticos presentes en este módulo. Este proceso de evaluación por comparación requiere un sistema de validación para recrear el comportamiento que experimenta la herramienta de inspección mientras se traslada dentro de la tubería.

1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Ante la necesidad de la Industria Petrolera de asegurar la integridad de los sistemas de transporte de hidrocarburos, la CIC está desarrollando una herramienta inteligente para la inspección de tuberías, del tipo Inspección en Línea (ILI) o “marrano inteligente”, de nombre ITION, compuesta de tres cuerpos, cada uno de los cuales realiza una función específica.

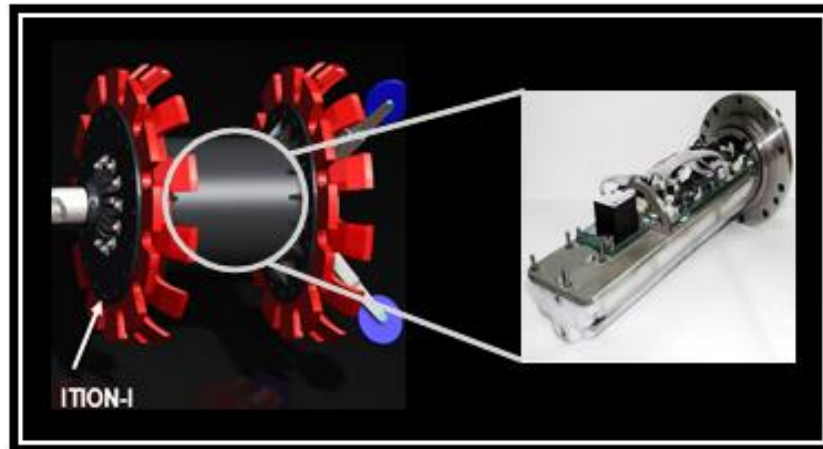
Figura 3. Herramienta de Inspección ITION



Fuente: CIC

El primer cuerpo, ITION-O, realiza inspección del espesor de la tubería mediante tecnología MFL además de registrar parámetros operacionales (presiones, temperaturas y caudales); el segundo cuerpo, ITION-K, ubica las abolladuras de las tuberías, determina los radios de curvatura críticos y deformaciones en las tuberías por desplazamientos; el tercer cuerpo, ITION-I, el cual contiene un módulo inercial compuesto por un conjunto de sensores: acelerómetros, giroscopios y magnetómetros; permite reconstruir tridimensionalmente la tubería, realizando perfiles tanto de altimetría y planimetría.

Figura 4. Módulo de Medición Inercial ITION-I



Fuente: CIC

Para desarrollar ITION-I y cumplir con su funcionalidad en la reconstrucción de la trayectoria, se usan modelos matemáticos, los cuales deben ser probados y validados a partir de un proceso de comparación entre los resultados de los modelos y un patrón conocido.

En este desarrollo se evidencian un problema para la validación de la información recopilada en todo el sistema ITION: no están disponibles los datos patrón para la validación de los modelos matemáticos de la reconstrucción de la trayectoria. Actualmente la CIC no cuenta con un mecanismo de ubicación, con una referencia tridimensional que permita generar movimientos controlados para comparar con los datos registrados por los sensores pertenecientes al módulo de medición inercial y poder evaluar si los modelos de cálculo establecidos para estas funciones del ITION son los adecuados.

2 JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Mediante la ejecución de este proyecto, la Universidad Industrial de Santander, por medio de la Escuela de Ingeniería Mecánica y con el respaldo de la CIC, desean fortalecer y poner en práctica los conocimientos adquiridos por los estudiantes en sus estudios de pregrado y solucionar la problemática planteada en el numeral anterior por medio del DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE VALIDACION PARA EL MODULO DE MEDICION INERCIAL DE LA HERRAMIENTA ITION-I, el cual ayudará a corroborar las lecturas de los sensores que pertenecen a esta y a verificar el trazado 3D generado.

El diseño y construcción de este sistema de validación también contribuirá con la CIC en la investigación y desarrollo de tecnología, que se llevan a cabo en sus instalaciones, correspondiente a la inspección en líneas de transporte de hidrocarburos, los medios de evaluación de elementos corroídos y las medidas necesarias para disminuir los efectos perjudiciales en sus componentes. Adicionalmente, dará a los posibles beneficiarios de los servicios ofrecidos por la CIC un medio de comprobación de funcionamiento del sistema de inspección que se desarrolla.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

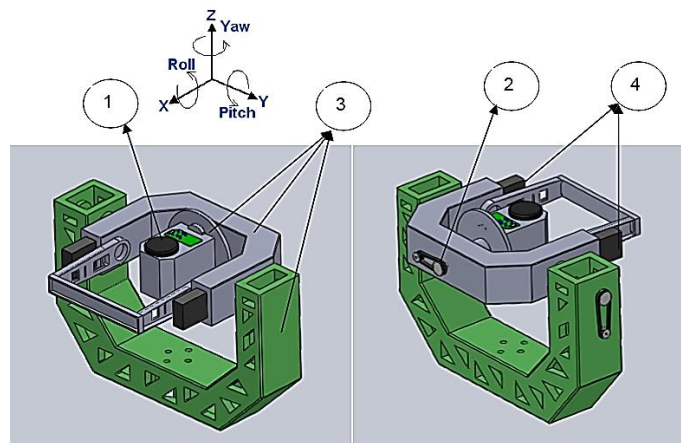
Contribuir con la misión y la formación integral del estudiante de la Universidad Industrial de Santander fortaleciendo la relación Universidad-Industria (UIS-CIC) y el desarrollo investigativo y tecnológico de la Escuela de Ingeniería Mecánica, mediante el diseño y construcción de un sistema de pruebas con tres ejes de rotación con control de velocidad, que permita comparar los datos generados por el sistema de prueba con los obtenidos mediante el módulo de medición inercial de la herramienta ITION-I.

3.1.1 Objetivos Específicos

3.1.1.1 Diseñar y construir un mecanismo de 3 ejes de rotación ortogonales, tipo Gimbal, en el cual se instalará el módulo de medición inercial cúbico de la herramienta ITION-I desarrollada por la CIC. Este mecanismo tiene como requerimientos mínimos de operación:

- Peso máximo del módulo de medición inercial: 4 kg.
- Velocidad Máxima permitida: 60 RPM.
- Rotación máxima en cada eje:
 - Eje X (roll): Rotación Libre.
 - Eje Y (pitch): 90° en ambos sentidos de rotación.
 - Eje Z (yaw): 90° en ambos sentidos de rotación.

Figura 5. Sistema de Validación Propuesto



Módulo de Medición Inercial.

1. Sistema de Transmisión por correas dentadas.
2. Mecanismo tipo Gimbal: Roll, Pitch y Yaw.
3. Contrapesos.

3.1.1.2 Implementar un control de velocidad en lazo abierto a los motores del sistema de validación tipo Gimbal que permita la rotación de los ejes Roll, Pitch y Yaw.

3.1.1.3 Realizar una guía del mecanismo de tres ejes de rotación que permita al operario hacer puesta a punto, rutinas de funcionamiento y mantenimiento, logrando un adecuado funcionamiento del sistema de validación.

4 DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA GIMBAL

Identificando el problema a solucionar y los objetivos a alcanzar, es planteada una metodología para el desarrollo del proyecto. Esta metodología establece una secuencia de diseño, aplicada en el desarrollo de productos, la cual consiste en abordar la evolución del diseño desde la descripción de la necesidad hasta llegar a las pruebas del sistema integrado definitivo. La Figura 6 muestra el despliegue de esta metodología, la cual es abordada según cada uno de los capítulos a tratar en este documento.

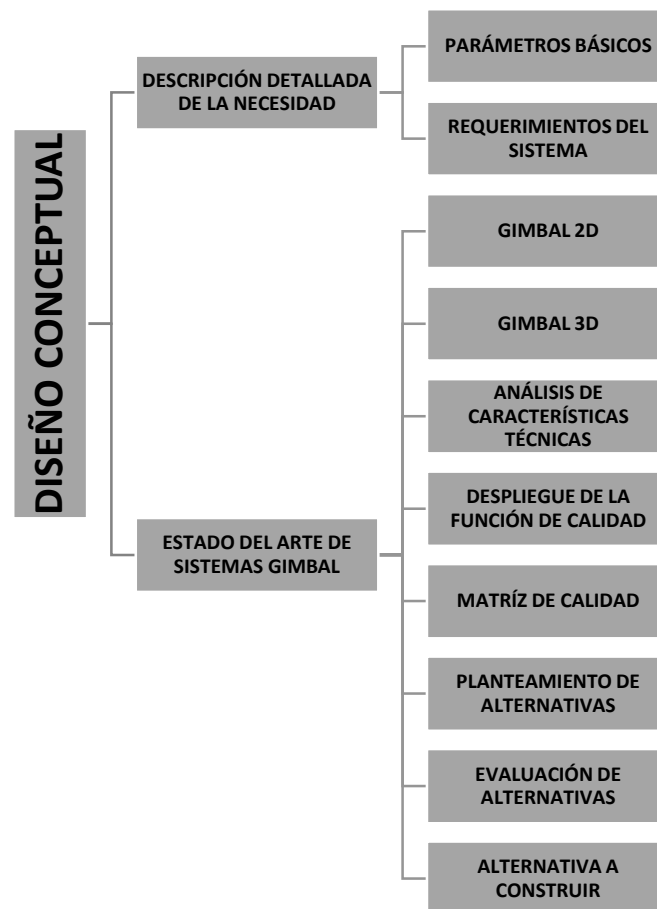
Figura 6. Etapas de la metodología para el desarrollo del proyecto⁴



⁴ Con respecto a la introducción del Proyecto de grado, (CASTAÑO, ANDRES. MORENO, HERNAN. 2004, p. 24)

Este capítulo inicia con la revisión del estado del arte de los simuladores de movimiento rotativo que pueden adquirirse en el mercado internacional, debido a que localmente no están disponibles. Estos simuladores son utilizados para pruebas y calibración de sistemas de navegación inercial y posicionamiento en aplicaciones militares, aeronáuticas, ópticas, entre otras⁵. A partir de esta revisión se evalúan los mecanismos tipo Gimbal comerciales y se determinan los elementos necesarios y aplicables para el diseño básico del sistema propuesto. En la Figura 7 son descritos los componentes del desarrollo de este capítulo.

Figura 7. Desarrollo del diseño conceptual.

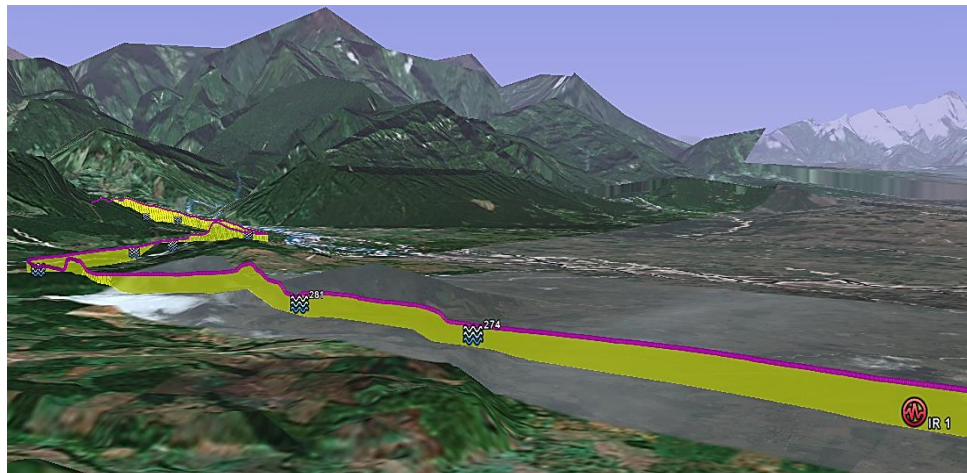


⁵ Tomado de <http://www.acutronic.com/us/>

4.1 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA NECESIDAD

Una de las funciones para la cual fue diseñado el cuerpo ITION-I, como parte de la herramienta de inspección de tuberías, es la reconstrucción de la trayectoria. Para realizar la reconstrucción este cuerpo cuenta con un módulo de medición inercial compuesto de dos elementos: un hardware y un software. El hardware incluye una unidad de medición inercial avanzada, un conjunto de baterías, unas tarjetas de procesamiento, entre otros; el software incluye el algoritmo que analiza los datos para realizar la reconstrucción de la trayectoria.

Figura 8. Reconstrucción de la trayectoria de un Poliducto



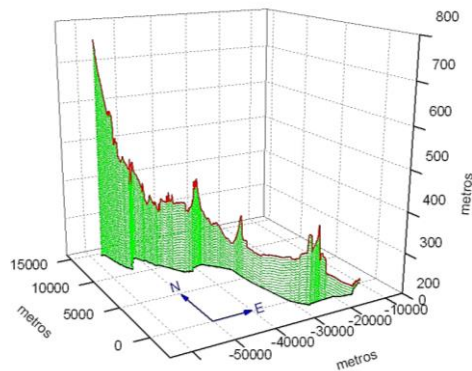
Fuente: CIC.

El algoritmo es desarrollado dentro de las instalaciones de la CIC es alimentado por los datos obtenidos del IMU⁶. Los resultados de este algoritmo (posición y velocidad en los ejes X, Y, Z) permiten definir los perfiles de altimetría y

⁶ La Unidad de Medición Inercial (IMU) está compuesta de sensores inerciales: giroscopios y acelerómetros.

planimetría necesarios para realizar el proceso de reconstrucción 3D y a su vez, lograr ubicar los diversos defectos encontrados durante la inspección.

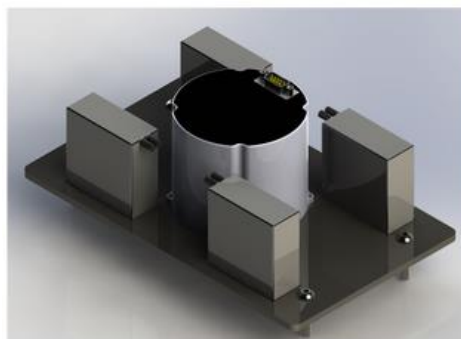
Figura 9. Perfil de altimetría y de planimetría



Fuente: CIC.

Según como esta descrito en la IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA, los valores que requieren ser validados son los obtenidos por el modulo inercial después de ser procesados por los algoritmos desarrollados en la CIC, para lo cual se necesita un sistema de validación que permita recrear el desplazamiento al interior de la tubería a partir de los cambios de posición angular en los tres ejes. La Figura 10 muestra un ejemplo de montaje del hardware en el sistema de validación para las pruebas comparativas.

Figura 10. Esquema de montaje del dispositivo de medición inercial



4.1.1 Parámetros básicos

Dentro los requerimientos de la CIC están la construcción de un sistema de validación que proporcione la velocidad multi-eje (3D) para la prueba de giroscopios y acelerómetros presentes en la unidad de medición inercial (IMU). Por esta razón, el sistema de validación debe simular cada uno de los parámetros que se describen a continuación.

- Posicionamiento 3D

Debido a la reconstrucción tridimensional de trayectorias (altimetría y planimetría), es necesario que el sistema de validación genere el posicionamiento en tres ejes de rotación, Roll (X), Pitch (Y), Yaw (Z), logrando recrear todo el comportamiento que experimenta el módulo en la trayectoria de las tuberías en campo.

- Rotación de la herramienta

La herramienta no cuenta con una limitante respecto a la rotación alrededor del eje longitudinal de la tubería, por lo tanto, es de vital importancia recrear esta característica de movimiento para el análisis de los datos.

- Velocidad de rotación

Es importante para las pruebas, analizar los rangos de velocidad críticos del módulo de navegación inercial, debido a que las condiciones de operación de la inspección pueden variar según el terreno por el cual está pasando la tubería a analizar.

- Dimensiones del módulo de medición inercial

Teniendo en cuenta los componentes de hardware del módulo de medición inercial, se establecen las condiciones de la carga a mover para fijar las dimensiones del sistema de validación.

4.1.2 Requerimientos del sistema

A partir de la revisión técnica realizada a las unidades de medición inercial (IMU) por el personal de la CIC, se obtienen las características mínimas con las cuales debería contar el sistema de validación para lograr comparar los datos. En la Tabla 1 se muestran estas características mínimas.

Tabla 1. Requerimientos mínimos de operación para el IMU

REQUERIMIENTOS	VALOR
RESOLUCION [arc-seg] ⁷	> 8
PRECISION [arc-seg]	> 40
VELOCIDAD [deg/seg]	0 - 60

Fuente: CIC.

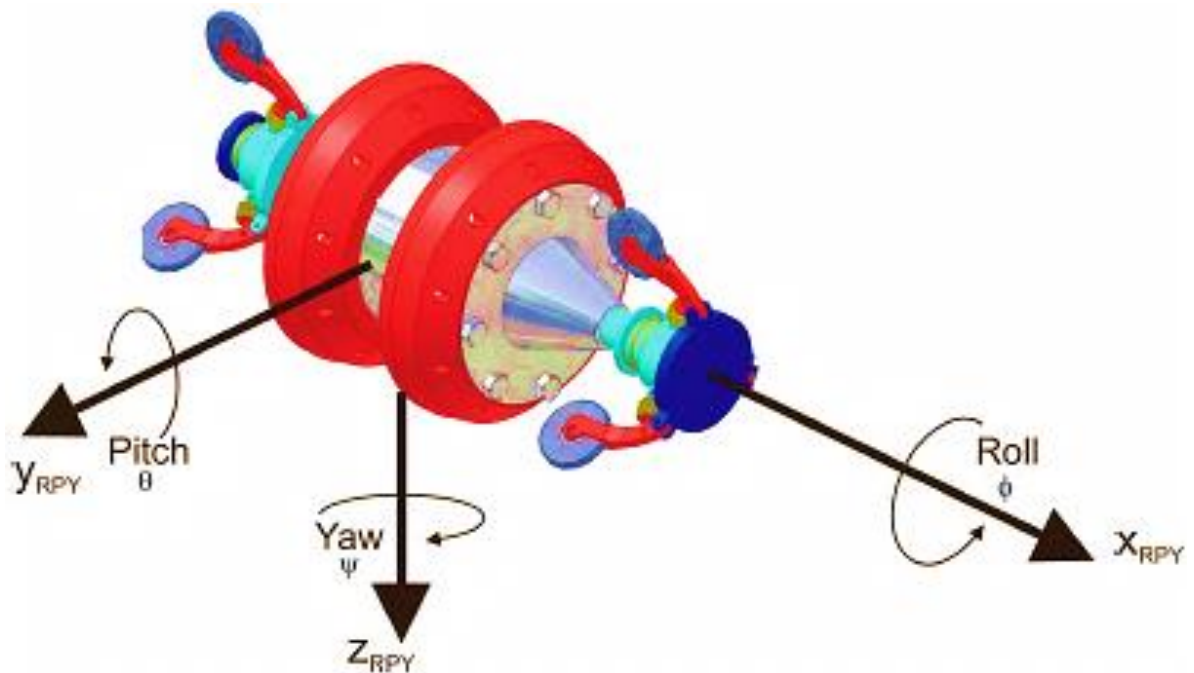
Partiendo de las características mencionadas en la Tabla 1 para el IMU y luego de evaluar los parámetros básicos del diseño, se llega a las siguientes conclusiones:

- Generalmente las tuberías a inspeccionar presentan cambios en pendiente y en rumbo, así mismo las herramientas de inspección rotan respecto a su propio eje durante el recorrido de inspección. Estos movimientos se representan en la nomenclatura de la navegación inercial (ver Anexo B)

⁷ 1 Arco Segundo (") = 0,00027777777777778°

como rotaciones en los ejes Roll (rotación de la herramienta sobre su propio eje), Pitch (rotación de cambio de pendiente) y Yaw (rotación de cambio de dirección), según como se puede visualizar en la Figura 11. Para estas rotaciones los rangos de trabajo que se necesitan son mostrados en la Tabla 2.

Figura 11. Sistema de referencia de coordenadas RPY



Fuente: EMMENDOERFER, Gustavo. Mestre em ciencias. Desenvolvimento e implementação de um sistema de medição inercial de trajetórias de dutos. Curitiba, Brasil. 2008.

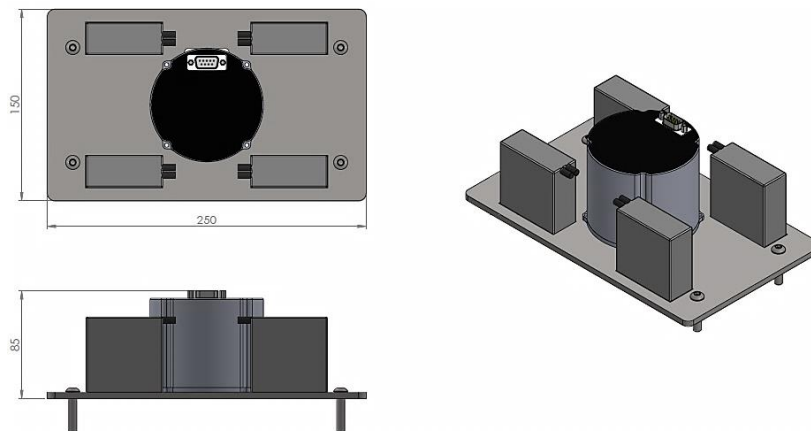
- La herramienta de inspección ITION no tiene ninguna restricción en cuanto a la rotación sobre su mismo eje o Roll.
- La CIC ha evidenciado que a velocidades bajas se ve afectada la medición de los sensores inerciales. El rango de velocidad requerido se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos generales ideales del sistema Gimbal

SISTEMA DE VALIDACION IDEAL		
RESOLUCION [arc-seg]	8	
CARGA MAXIMA DEL MÓDULO DE MEDICIÓN INERCIAL [kg]	4	
PESO DEL SISTEMA [kg]	200	
PRESICION [arc-seg]	40	
MIN VELOCIDAD [deg/s]	0	
MAX VELOCIDAD [deg/s]	60	
RANGO DE TRABAJO [deg]	X(Pitch)	(+/-) 90
	Y(Yaw)	(+/-) 90
	Z(Roll)	(+/-) 360

- En la Figura 12 se visualizan las dimensiones básicas del módulo de medición inercial (en mm) planteadas a partir de las dimensiones del IMU.

Figura 12. Dimensiones del módulo de medición inercial



- Se fija el peso máximo del módulo de medición inercial en máximo 4 kg. Como es mencionado anteriormente, la Tabla 2 muestra los requerimientos generales ideales del montaje del módulo para continuar con el proceso de diseño del sistema de validación Gimbal.

4.2 ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS GIMBAL

En el capítulo 1 y en los numerales anteriores se describe el problema y los requerimientos para la solución del problema a partir de los cuales es necesario realizar la búsqueda de los sistemas o dispositivos que sirvan de base para plantear el diseño del sistema de validación.

En la revisión se encuentran diversos tipos de mecanismos, con características similares pero con configuraciones diferentes. Comercialmente el tipo de mecanismo ofrecido es denominado Gimbal (cardan en inglés), comercialmente es ofrecido como simuladores de movimiento y está disponible en configuraciones de uno, dos y tres ejes (Gimbal de 1D⁸, 2D y 3D respectivamente). A continuación se muestran algunos de los dispositivos disponibles en el mercado y su aplicación en el mercado.

4.2.1 Gimbal 2D

A partir de las necesidades de posicionamiento definidas en el mercado, los movimientos de mayor interés a comprobar por los usuarios de estas unidades de medición inercial son los cambios de dirección y pendiente, los cuales son fácilmente recreables con este tipo de mecanismos. A continuación se mencionan los dos fabricantes más representativos en la búsqueda de este tipo de sistemas.

➤ NEWMARK

Esta empresa comercializa sistemas Gimbal 2D de alta precisión diseñados para posicionamiento de elementos de óptica. Permite realizar posicionamiento en el

⁸ Los Gimbal de 1D no fueron objeto de la revisión del estado del arte.

eje vertical y en el eje del plato según la Figura 13. Su sistema motriz es de conexión directa a partir de servomotores.

Figura 13. Sistema Gimbal 2D de Newmark.



Fuente: Newmark systems, Inc. Gimbal Mounts. [Online].
<<http://www.newmarksystems.com/gimbal-mounts/gm-12e-gimbal/>>. [Cited Jul. 15, 2013].

➤ AEROTECH

Esta empresa cuenta con sistemas robustos de precisión. Sus aplicaciones son sistemas de posicionamiento para antenas, óptica, calibración de misiles, giroscopios y acelerómetros. Presenta rotación en el eje vertical y el eje que sostiene el cristal en la Figura 14.

Figura 14. Sistema Gimbal 2D de AEROTECH.



Fuente: AEROTECH, Inc. Gimbal. [Online]. <<http://www.aerotech.com/product-catalog/gimbals-and-optical-mounts.aspx?>>. [Cited Jul. 20, 2013].

4.2.2 Gimbal 3D

La revisión de alternativas comerciales incluye sistemas Gimbal 3D debido a que la herramienta de inspección, en su movimiento a través de la tubería, no tiene restricción alguna en cuanto al giro sobre su propio eje, lo cual influye en los posibles parámetros de error a evaluar en la reconstrucción de la trayectoria. A continuación se mencionan los tres fabricantes más representativos en la búsqueda generada por los autores.

➤ AEROTECH

Esta empresa, mencionada anteriormente en los Gimbal 2D, desarrolla sistemas de posicionamiento especializados para la industria militar, tanto para pruebas y calibración, de instrumentación que hacen parte de armamentos como sistemas para pruebas. La

Figura 15 muestra un sistema de posicionamiento de 3 grados de libertad incluido en el catálogo de equipos de Aerotech.

Figura 15. Sistema Gimbal 3D AEROTECH.



Fuente: Catalogo AEROTECH, Inc. Advanced Motion Systems for Defense, Aerospace, and National Security. [Cited Jul. 5, 2013].

➤ ACUTRONIC

Empresa especializada en el desarrollo, diseño y manufactura de simuladores de movimiento para la industria aeroespacial, militar, automovilística y para el área de investigación. Cuentan con sistemas de simulación de movimiento de hasta 5 ejes de rotación. Son dispositivos de gran tamaño y compuestos de dos cuerpos, uno para realizar el movimiento y otro para realizar todo lo referente al control.

Figura 16. Sistema Gimbal 3D ACUTRONIC.



Fuente: ACUTRONIC. The Driving force in motion Simulation. Datasheets-2-Axis-Rate-Tables-21-Series_01. [Cited Jul. 16, 2013].

➤ ENGEMOVI

Esta empresa está dedicada al desarrollo de soluciones tecnológicas y automatizadas para la industria, en especial para el sector de hidrocarburos. El sistema Gimbal que desarrollaron de 3 grados de libertad está diseñado para unidades inerciales de poca carga (máximo 10 kg). Este Gimbal 3D está diseñado a partir de motores sin escobillas y un sistema de reducción de velocidad de alto desempeño (holguras reducidas).

Figura 17. Sistema Gimbal 3D ENGEMOVI.



Fuente: EngeMovi. Projetos. [En línea]. <<http://www.engemovi.com.br/nossos-projetos/>>. [Citado 2 Agosto de 2013].

4.2.3 Análisis de características técnicas ideales de un sistema de rotación.

Con la información de las características técnicas encontradas de cada sistema Gimbal 2D y 3D comercialmente ofrecido, la cual es recopilada y evaluada a partir de un cuadro comparativo mostrado en la Tabla 3, se fijan los requerimientos mínimos de desempeño para el sistema de validación. El proceso comparativo se realiza para determinar algunos o la mayoría de los elementos necesarios para realizar el diseño, además de establecer parámetros que al inicio del proyecto no fueron tenidos en cuenta como parte de las pruebas del módulo de medición inercial.

Tabla 3. Cuadro comparativo de sistemas Gimbal comerciales.

COMPARACION DE DISPOSITIVOS DISPONIBLES				
DISPOSITIVOS EN EL MERCADO		ENGEMOVI BANCADA	AEROTECH AMG-200 Gimbal	ACUATRONIC SERIES AC3337
RESOLUCION [arc-seg]		0,18	0,27	0,05
PRESICION [arc-seg]		NO DISPONIBLE	(+/-) 24 A (+/-) 144	5
REPETIBILIDAD [arc-seg]		NO DISPONIBLE	(+/-) 2,4	NO DISPONIBLE
MAX CAPACIDAD DE CARGA [Kg]		6	20	5
MAX VELOCIDAD [deg/s]		450	600	(+/-) 1500
DIMENSIONES DEL MÓDULO INERCIAL [mm]		200X200	206 DIAM	300 DIAM X 350
MAX TORQUE [N.m]		2,5	NO DISPONIBLE	NO DISPONIBLE
RANGO DE TRABAJO [deg]	X(PITCH)	(+/-) 90	(+/-) 360	(+/-) 360
	Y(YAW)	(+/-) 90	(+/-) 360	(+/-) 360
	Z(ROLL)	(+/-) 360	(+/-) 360	(+/-) 360
TIPO DE ENCODERS		OPTICO INCREMENTAL	ENCODER ANALOGICO	ENCODER ANALOGICO
RELACION DE VELOCIDAD MOTOR-EJE		2:1	NO	NO

PESO [Kg]	440	29	735
SISTEMA DE TRANSMISION MECANICA	CORREAS DENTADAS	DIRECTO	DIRECTO
ORTOGONALIDAD [arc-seg]	NO DISPONIBLE	24	(+/-) 5
CABECEO [arc-seg]	NO DISPONIBLE	48	5
TIPO DE MOTOR	SERVOMOTORES	SERVOMOTORES BRUSHLESS	SERVOMOTORES BRUSHLESS
ESTABILIDAD [deg/h]	0,04	NO DISPONIBLE	0,02

La Tabla 4 lista los valores de las características esperadas, además muestra los elementos y características adicionales a tener en cuenta durante el proceso de diseño. Algunos de estos valores son planteados únicamente a partir de lo encontrado teóricamente en las características técnicas encontradas en la revisión del estado del arte, los valores reales dependerán de los elementos finales construidos.

Tabla 4. Conclusión del cuadro comparativo simuladores de rotación.

CARACTERÍSTICA FUNCIONAL	SISTEMA DE VALIDACIÓN IDEAL
REPETIBILIDAD [%]	80
MAX TORQUE [N.m]	60
TEMPERATURA DE OPERACIÓN [°C]	0 A 70
TIPO DE ENCODERS	ENCODER DIGITAL DE ALTA RESOLUCION
INTERRUPTORES LIMITE	CONTROL DE VELOCIDAD EN EL FINAL DEL RECORRIDO
RELACION DE VELOCIDAD MOTOR-EJE	160:1
PESO [Kg]	60

SISTEMA DE TRANSMISION MECANICA	REDUCTOR Y CORREA DENTADA
TIPO DE MOTOR	MOTOR BRUSHLESS

4.2.4 Despliegue de la función de calidad

Los requerimientos y características de diseño se definen con base en la revisión del ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS GIMBAL, la revisión a los objetivos del proyecto y la asesoría de los funcionarios encargados del área de electrónica de la CIC, de esta forma se plantea la estructura de la matriz de calidad para definir la alternativa de solución más adecuada para el desarrollo del sistema de validación Gimbal 3GL.

4.2.4.1 Requerimientos de diseño

A continuación se listan estos requerimientos del diseño con los cuales es evaluada cada característica de diseño.

- Estético
- Repetibilidad
- Portátil
- Bajo costo
- Versátil
- Resistente
- Fácil mantenimiento
- Fácil manipulación
- Pocas piezas
- Confiable
- Seguro
- Ergonomía
- Bajo peso
- Estable

Los requerimientos planteados son agrupados de acuerdo al papel que representan en el desarrollo de este proyecto:

Construcción:

- Estético
- Portátil
- Bajo Costo
- Bajo Peso
- Versátil

Vida útil:

- Resistente
- Fácil
- Mantenimiento
- Pocas Piezas

Operación:

- Confiable
- Seguro
- Ergonomía
- Estable
- Fácil
- Manipulación
- Repetibilidad

4.2.4.2 Descripción de características de diseño de la QFD**Comportamiento lineal:**

Esta característica es relacionada con el comportamiento del arranque de los motores; es necesario que los mismos presenten un periodo reducido en estado transitorio, es decir, la respuesta en el tiempo para alcanzar régimen sea muy rápida.

Ensamblaje simple:

Hace referencia al ensamble y desensamble de las piezas de cada Gimbal, es requerido que sea realizado en poco tiempo, de la forma adecuada y con el mínimo de instrucciones.

Sistema de transmisión de potencia eficiente:

La confiabilidad de la herramienta depende en su mayoría de la eficiencia en la transmisión de potencia en el mecanismo; se necesita que la transmisión sea de alta eficiencia, no genere vibraciones y perturbaciones al sistema, en lo posible.

Disponibilidad de materiales:

La posibilidad de adquirir localmente algunos o todos los materiales para cumplir con los requerimientos del sistema, como polímeros, aceros, materiales no conductores, entre otros.

Formas fácilmente maquinables:

En el proceso de diseño y construcción, el costo de fabricación depende de la complejidad de las piezas a manufacturar.

Fuente motriz versátil:

La selección del tipo de motor a utilizar y la forma de controlarlo. Este sistema requiere un sistema motriz fácil de controlar que permita un cambio rápido en el sentido de giro.

Geometría robusta del mecanismo:

Es tiene en cuenta como característica de diseño debido a que el mecanismo debe ser resistente, debe tener estética y debe cumplir con los requerimientos.

4.2.5 Matriz de calidad

La Tabla 5 muestra, a partir de los requerimientos planteados y de las características de diseño, la ponderación de la matriz de calidad la cual define las características con más peso dentro del diseño del sistema de validación. Con estas características más importantes se determina los criterios de selección de alternativas de solución de la problemática mencionada en inicio de este libro.

Tabla 5. Matriz de calidad QFD.

MATRIZ QFD		COMPORTAMIENTO LINEAL	ENSAMBLAJE SIMPLE	POCAS PIEZAS	SISTEMA DE TRANSMISION DE POTENCIA EFICIENTE	DISPONIBILIDAD DE MATERIALES	FORMAS FACILMENTE MAQUINABLES	FUENTE MOTRIZ VERSATIL	GEOMETRIA DEL MECANISMO
12	CONFIABLE	9	0	0	9	0	0	9	1
		108	0	0	108	0	0	108	12
11	REPITIBILIDAD	9	3	1	9	0	0	9	1
		99	33	11	99	0	0	99	11
10	VERSATIL	3	9	3	0	0	1	0	3
		30	90	30	0	0	10	0	30
9	RESISTENTE	3	1	1	3	9	1	3	3

		27	9	9	27	81	9	27	27
8	FACIL MANIPULACION	9	0	1	1	0	0	9	1
		72	0	8	8	0	0	72	8
7	FACIL MANTENIMIENTO	3	9	9	3	1	3	3	3
		21	63	63	21	7	21	21	21
6	SEGURO	1	1	1	0	3	3	0	1
		6	6	6	0	18	18	0	6
5	BAJO COSTO	9	3	3	9	9	9	9	9
		45	15	15	45	45	45	45	45
4	ERGONOMICO	0	9	1	0	1	3	1	9
		0	36	4	0	4	12	4	36
3	BAJO PESO	3	1	3	3	9	3	9	9
		9	3	9	9	27	9	27	27
2	PORTATIL	0	3	9	0	1	1	1	3
		0	6	18	0	2	2	2	6
1	ESTETICO	0	0	0	0	1	3	0	9
		0	0	0	0	1	3	0	9
TOTALES		417	261	173	317	185	129	405	238

4.2.6 Planteamiento de las alternativas de solución

Para darle solución al problema identificado en el desarrollo de la herramienta ITION-I, son planteadas 3 alternativas basadas en el principio de funcionamiento de un mecanismo tipo Gimbal. Con estas alternativas se abordan los requerimientos definidos por la CIC y se cumplen con los objetivos propuestos en este trabajo de grado.

A continuación las tres alternativas de solución planteadas:

- **Alternativa 1.** Rediseño del mecanismo tipo Gimbal de 2 ejes de rotación existente.
- **Alternativa 2.** Diseño de un mecanismo tipo Gimbal de 3 ejes de rotación con transmisión por moto-reductor.
- **Alternativa 3.** Diseño de un mecanismo tipo Gimbal de 3 ejes de rotación con transmisión por correas dentadas.

4.2.6.1 Alternativa 1: rediseño del mecanismo tipo Gimbal de 2 ejes de rotación existente

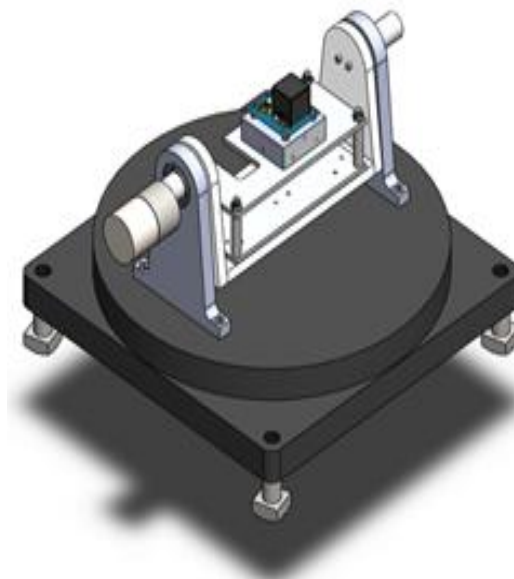
En la revisión de los requerimientos para la solución del problema se dispone un diseño preliminar del sistema de validación desarrollado y construido por la CIC (ver Figura 18), el cual consta de un mecanismo Gimbal en el cual es posible recrear solo dos ejes de rotación (Yaw y Pitch).

Este diseño sirve de base para realizar un aprendizaje de este tipo de sistemas y los problemas encontrados. Uno de los problemas encontrados es el desbalanceo

de las estructuras de rotación, el uso de reductores de engranajes rectos con holguras altas lo cual dificulta la resolución en la posición del sistema.

La primera alternativa para la solución del problema consiste en el rediseño de este sistema preliminar a partir de la corrección de los errores en el balance de la estructura, considerando nuevas alternativas de movimiento como otro tipo de reductores de velocidad y el diseño y fabricación de las piezas utilizando materiales más adecuados.

Figura 18. Esquema del mecanismo tipo Gimbal existente en la CIC



Fuente: CIC.

Las ventajas de implementar esta alternativa es: bajo costo dado que es posible reutilizar algunos materiales y piezas, rapidez en el diseño debido a que se inicia de una estructura previamente diseñada. Como desventaja, es necesario re-manufacturar algunas de las partes, adicionarles elementos, corregir los desbalances con nuevas masas, re-ensamblar el sistema, modificar el sistema de control debido a que es un nuevo sistema, e implementar motores más grandes

con contrapesos para poder hacer mediciones confiables. Otra desventaja es el sistema de transmisión de potencia por motorreductor de engranajes rectos, es necesario realizar el cambio del sistema motriz completo.

4.2.6.2 Alternativa 2: Diseño de un mecanismo tipo Gimbal de 3 ejes de rotación con transmisión por motorreductor.

Esta solución consiste en un mecanismo tipo Gimbal accionado por motor DC y un sistema de transmisión por engranajes planetarios de conexión directa, es decir, el eje motriz es directamente conectado a la estructura de cada Gimbal, lo que hace que el diseño sea compacto. La característica más deseable de este mecanismo es la reducción del desbalance provocado por el módulo de medición inercial, lo cual genera una de los problemas más comunes en un sistema de rotación: vibración, que perturba el sistema de control instalado en el mecanismo para realizar la validación.

La ventaja de esta alternativa de solución es lo compacto del sistema, y la disminución de las piezas necesarias para realizar la transmisión de potencia. Entre las desventajas que es posible mencionar de este diseño encontramos la pérdida de versatilidad del diseño y las dimensiones de los motorreductores a instalar para cada eje de movimiento.

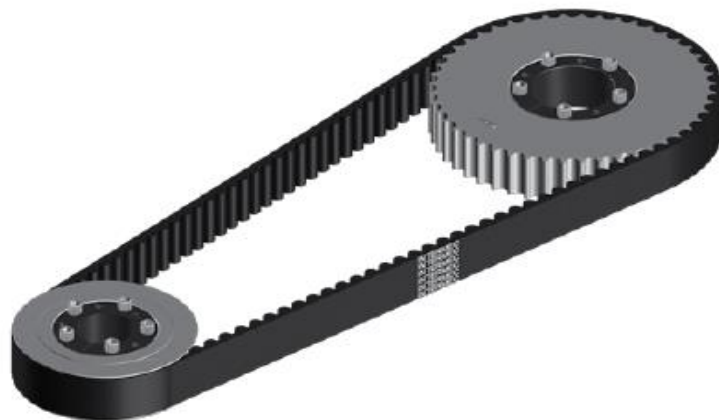
4.2.6.3 Alternativa 3: Diseño de un mecanismo tipo Gimbal de 3 ejes de rotación con transmisión por correas dentadas.

Esta alternativa propone utilizar un medio de transmisión de potencia entre los motorreductores DC de engranajes planetarios y los ejes de rotación del mecanismo tipo Gimbal una transmisión por correas dentadas. El sistema de

transmisión de potencia por correas dentadas es un sistema versátil puesto que su mantenimiento es sencillo.

Una ventaja muy importante de trabajar con este tipo de transmisión es la disminución del ruido: absorción de choques y vibraciones, característico en las transmisiones de potencia; este ruido podría que alterar las medidas de los sensores ocasionando errores en la validación de los datos. Una desventaja al utilizar correas dentadas es el volumen que ocupa la transmisión, lo cual hace que las dimensiones del mecanismo tipo Gimbal de 3 ejes de rotación sean mayores.

Figura 19. Sistema de Transmisión por Correas Dentadas



Fuente: Intermecc S.A. Manual de selección transmisiones por correas dentadas de tiempo y síncronas.

4.2.7 Evaluación de alternativas: matriz de ponderaciones

A partir de las características de cada una de las alternativas se elabora una tabla de ponderaciones para determinar la mejor alternativa para la solución del problema, según los parámetros más representativos identificados en la matriz QFD planteados por los autores en conjunto con la CIC.

Tabla 6. Matriz de ponderaciones.

NOTAS DE 1 A 5		ALT. 1		ALT. 2		ALT. 3			
PARAMETROS DE INGENIERIA	REQUERIMIENTOS	%	NOTA	POND.	NOTA	POND.	NOTA	POND.	
417 COMPORT. LINEAL	0,30	CONFIABILIDAD	0,10	2	0,2	3	0,3	4	0,4
		REPETIBILIDAD	0,09	2	0,18	2	0,18	4	0,37
		FACIL MANIPULACION	0,07	2	0,13	4	0,27	4	0,27
		BAJO COSTO	0,04	4	0,17	3	0,125	3	0,125
405 FUENTE MOTRIZ VERSATIL	0,29	BAJO PESO	0,09	2	0,18	3	0,27	3	0,27
		CONFIABILIDAD	0,2	2	0,4	3	0,6	3	0,6
317 SISTEMA DE TRANSMISION EFICIENTE	0,23	RESISTENTE	0,1	4	0,4	3	0,3	4	0,4
		FACIL MANTENIMIENTO	0,11	3	0,33	3	0,33	5	0,55
		REPETIBILIDAD	0,02	2	0,04	2	0,04	5	0,1
261 ENSAMBLE SIMPLE	0,19	FACIL MANTENIMIENTO	0,04	2	0,08	3	0,12	4	0,16
		ERGONOMIA	0,09	3	0,27	4	0,36	4	0,36
		VERSATIL	0,06	1	0,06	4	0,24	4	0,24
TOTALES					2,44		3,14		3,84

4.2.8 Alternativa a construir según la matriz de ponderaciones

La Tabla 6 muestra que partiendo de la información de cada alternativa, la que se ajusta más a los requerimientos para la solución del problema es la 3. Esta solución reduce los problemas de desbalanceo, ruidos en el sistema, cargas dinámicas excesivas sobre los rodamientos debido al desbalance y desalineamiento de los ejes de rotación del mecanismo tipo Gimbal. También evita que en la transmisión de movimiento desde los motorreductores al mecanismos de rotación presente holguras considerables.

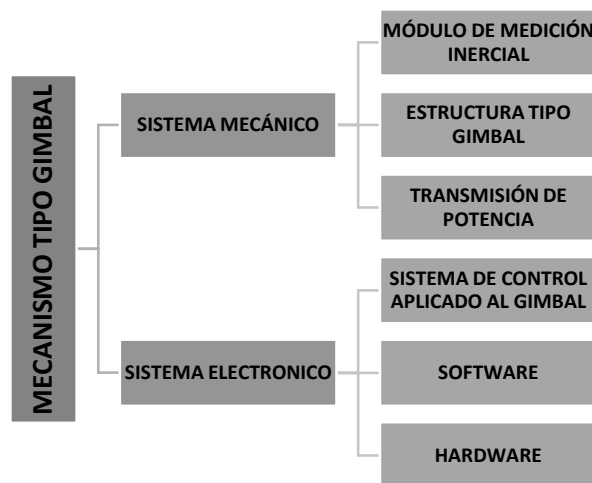
La alternativa 3 está compuesta de los siguientes elementos:

- Un mecanismo de rotación tipo Gimbal 3D
- Un sistema de transmisión de potencia por correas dentadas para cada eje.
- Un sistema motriz a partir de motorreductores DC para cada eje.
- Un sistema de balanceo a partir de contrapesas.
- Un sistema de control en lazo abierto.
- Interfaz gráfica para controlar el sistema.

A partir de estos elementos, se subdivide la solución para el problema planteado en dos sistemas: un sistema mecánico, que describe en detalle cada uno de los componentes y cálculos realizados para el diseño y construcción de la estructura; y un sistema electrónico, en el cual se describe todo lo referente al sistema de control, hardware y software aplicado a esta solución. En la Figura 20 es mostrado, de modo general, los sistemas que hacen parte de la alternativa 3 y los subsistemas que los componen.

En el capítulo 3 es descrito en detalle todos los componentes del sistema mecánico y en el capítulo 5 es descrito todo lo referente al sistema electrónico.

Figura 20. Subdivisión de sistemas del Gimbal.

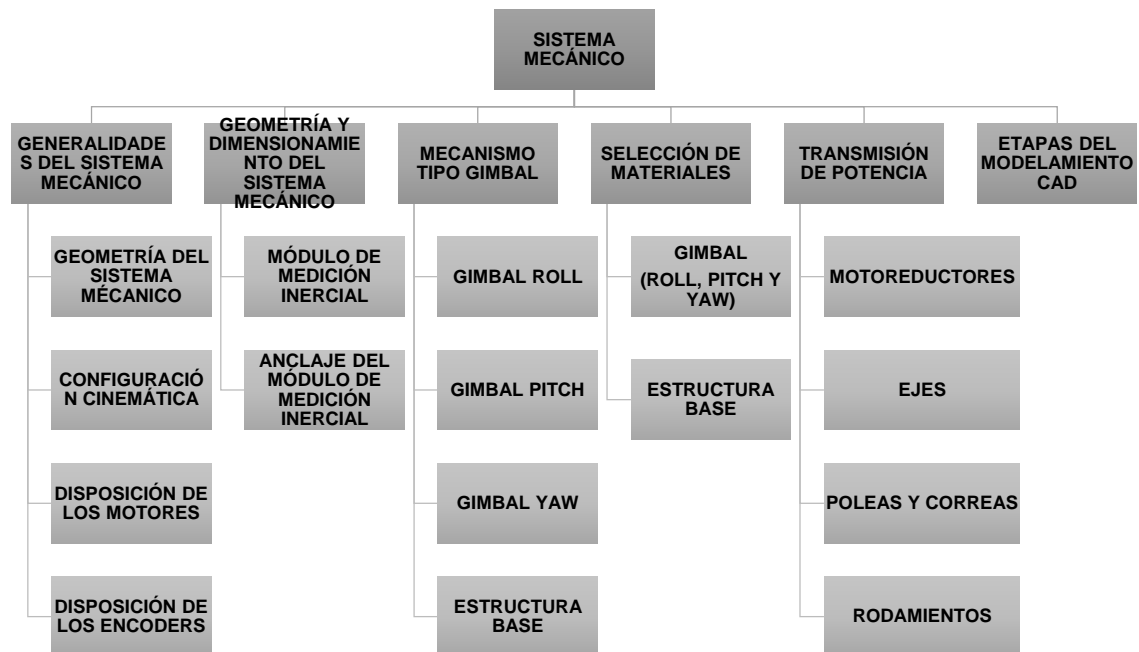


5 DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA GIMBAL

Este capítulo inicia con el planteamiento del sistema mecánico, a partir del cual se establecen los cálculos de ingeniería y la selección de los elementos electromecánicos presentes en todo el sistema de validación. La Figura 21 muestra el desarrollo del diseño mecánico del sistema de validación tipo Gimbal y contempla las etapas del diseño, desde el diseño básico hasta el modelamiento CAD. Las etapas del diseño mecánico consideradas son las siguientes:

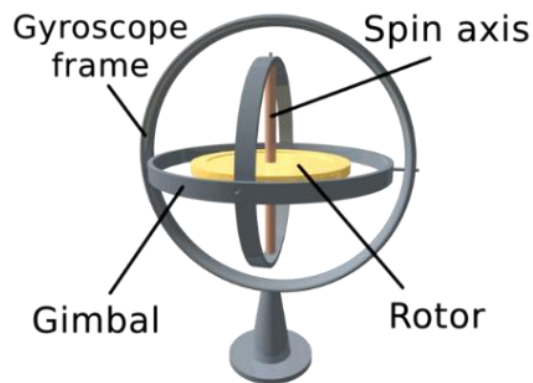
- Generalidades del sistema mecánico
- Geometría y dimensionamiento del sistema.
- Definición del mecanismo tipo Gimbal.
- Selección de materiales.
- Definición del sistema de transmisión de potencia.
- Etapas del modelamiento CAD.

Figura 21. Etapas del diseño del Sistema Mecánico



Este capítulo menciona los elementos que integran el sistema mecánico; sus sistemas y componentes individuales; cada elemento es desarrollado como parte de un subsistema. Tal como es mencionado en el planteamiento de las alternativas, el diseño permite recrear tres grados de libertad, partiendo del esquema básico de un giroscopio mecánico. Su estructura se despliega desde adentro hacia afuera, en forma de anillos concéntricos.

Figura 22. Giroscopio mecánico.



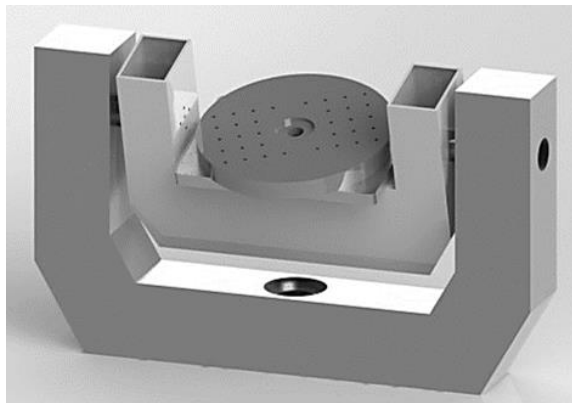
Fuente: ViKenBlog. Giroscopio. [En línea].
<<http://vikenblog.blogspot.com/2011/11/giroscopio.html>>. [Citado 20 agosto de 2013].

De acuerdo a lo anterior, el desarrollo del diseño básico inicia a partir de una estructura similar a la Figura 22 y a partir de esta figura se definen estructuras en forma de U, para fabricar mediante el ensamble de láminas rectangulares. El diseño del sistema de validación queda definido por cuatro estructuras generales ensambladas de manera independientemente. En la Figura 23 se muestra la primera propuesta de diseño.

5.1 GENERALIDADES DEL SISTEMA MECÁNICO

El planteamiento de la geometría del sistema de validación tipo Gimbal se realiza teniendo en cuenta los requerimientos estipulados por la CIC. Por lo tanto, para iniciar con el diseño básico es necesario definir la forma, tamaño y peso del módulo de medición inercial a validar y la forma de instalación en la estructura interna del sistema. El diseño se despliega desde la estructura interna hacia la estructura exterior y el dimensionamiento se realizó para un valor aproximado del peso del módulo de medición inercial; estableciendo dimensiones generales de diseño como geometría de la estructura de rotación, longitud, espesores, apoyo de los ejes de rotación y ubicación de los elementos de transmisión de potencia y control. Véase la Figura 23.

Figura 23. Propuesta de diseño básico del sistema de validación



Para definir el dimensionamiento del sistema de validación es necesario conocer las dimensiones de cada uno de los elementos que lo conforman, para garantizar su adecuada instalación. Por esta razón se realizó un análisis básico de diseño, conociendo la geometría de los componentes y su peso. Este análisis incluye cálculos básicos de torque, relación de transmisión, distancia entre ejes de transmisión, diámetro de ejes, entre otros. Además de esto cada estructura Gimbal

debe contar con un motor DC brushless, un encoder analógico, rodamientos radiales a bolas y axial a bolas (en los puntos de rotación según sea el caso), un sistema de transmisión de potencia con dos etapas de reducción.

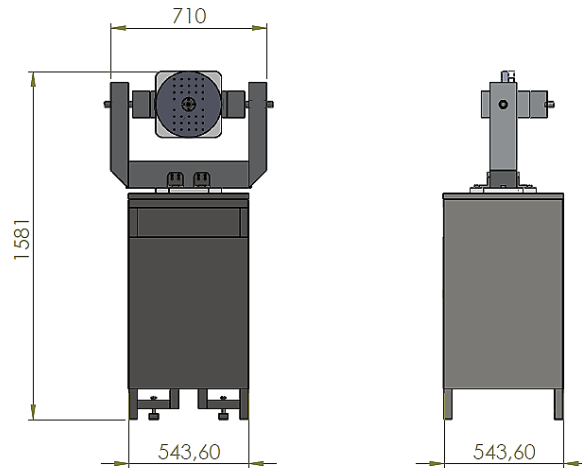
Se determinó el par de torsión que debe suministrar cada motor, para generar los movimientos de rotación requeridos inicialmente por la CIC; una vez definidos estos parámetros (Torque, RPM, Voltaje, etc.) es seleccionado el motor que sea cercano a estas especificaciones, para obtener sus dimensiones aproximadas. De la misma manera se realizaron cálculos para los demás elementos con el fin de determinar el espacio necesario para el montaje de cada uno de estos elementos.

5.1.1 Definición de la geometría del sistema de rotación tipo Gimbal

Las estructuras que permiten la rotación exterior e intermedia tendrán forma de “U”, con detalles particulares y facilidad en el diseño. La pieza que realiza la rotación interna es una placa circular, que rota libremente alrededor de un punto de apoyo situado sobre la pieza intermedia (ver Figura 23). La estructura intermedia está adjunta y apoyada en dos puntos sobre los extremos de la pieza exterior. Finalmente la pieza exterior rota respecto a un punto, situado en la parte central de la estructura en U, de manera que gire simétricamente con respecto al eje de rotación y apoyada en una base o bastidor (ver Figura 24).

Después de establecer la geometría de las tres estructuras de rotación tipo Gimbal y la forma de unión de los mismos, se estiman dimensiones generales de toda la estructura mecánica; incluyendo el bastidor o estructura base que soportará todo el peso.

Figura 24. Dimensiones básicas del sistema Gimbal



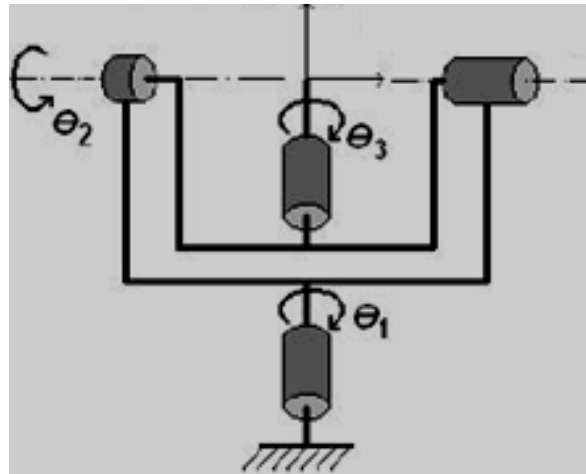
5.1.2 Configuración cinemática del sistema Gimbal

El sistema de validación tipo Gimbal consta de tres ejes de rotación ortogonales entre sí, que proporcionan estímulos en forma de velocidades y posiciones angulares controladas, alrededor de un eje pivotado. Estos movimientos controlados son comparados con las lecturas realizadas por los elementos electromecánicos como giróscopos, acelerómetros o unidad de medición inercial (IMU).

Las características de la rotación varían de acuerdo al eje de rotación y los requerimientos de la CIC. El eje de rotación interno permite realizar giros continuos a velocidad constante, en ambos sentidos de rotación. La plataforma circular gira sobre la estructura intermedia y puede realizar sus giros de manera independiente o simultánea con las otras estructuras de rotación. La estructura intermedia esta pivotada en los extremos de la estructura exterior y realiza giros de 180 grados en ambos sentidos de rotación, a velocidad constante, de manera independiente o simultanea igual que las demás estructuras. La estructura exterior

está apoyada sobre una base estructural y permite giros de 180 grados en ambos sentidos. El sistema permite girar las tres estructuras simultáneamente registrando estímulos en forma de velocidad en los tres ejes de rotación. La configuración cinemática se puede apreciar mejor en la representación esquemática de la Figura 25.

Figura 25. Configuración cinemática del sistema de validación



Fuente: Winderson E. dos Santos, Carlo A. Z. Pece, Walter A. Kapp e Gustavo Emmendoerfer. Bancada para Calibração de Giroscópios. Curitiba, Brasil. 2011.

5.1.3 Disposición de los motores

Uno de los parámetros principales para la ubicación de la fuente motriz es la forma en la que se transmite la potencia. Se plantea que los motores transmitan la potencia mediante un reductor planetario de precisión y un sistema de correas sincrónicas y poleas dentadas, que a su vez llevan el movimiento a los ejes de rotación presentes en cada estructura Gimbal. En la configuración mecánica tipo Gimbal es necesario que el motor se instale en la estructura externa al movimiento. Según esto el sistema de validación cuenta con tres motores DC que están ensamblados en el Gimbal que precede al que se está girando. Por ejemplo,

si es necesario mover Gimbal Roll, el motor debe estar instalado en la estructura externa a Gimbal Roll, es decir en la estructura de Gimbal Pitch; y así con las otras dos estructuras de rotación tipo Gimbal.

Mediante la revisión documental de los dispositivos encontrados en el mercado (ver ESTADO DEL ARTE), se contemplan dos alternativas para transmitir el movimiento del elemento motriz al eje de rotación de cada uno de las estructuras tipo Gimbal. La primera de estas alternativas, mostradas en la Figura 26, es realizar el montaje del motor directamente en el eje de salida mediante un acople flexible, partiendo de la selección de un motor y un reductor con el mínimo de holguras posible. En esta figura se visualiza un ejemplo de este montaje, donde se aprecia que sin importar que los motores sean DC o AC, el espacio requerido para realizar este montaje es grande.

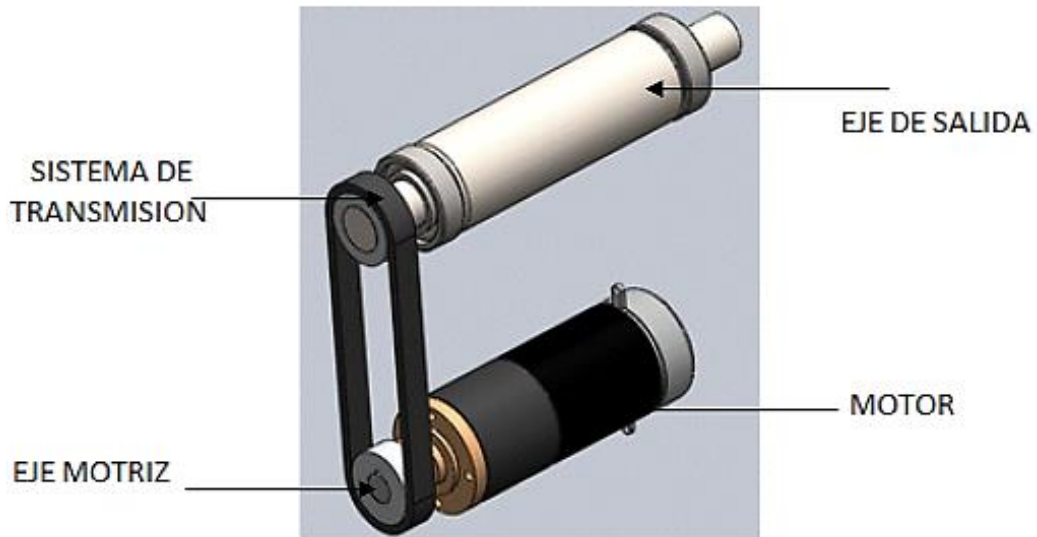
Figura 26. Motor instalado directamente en el eje de salida.



Fuente: Industrial Mex. Acoples elasticos. [En línea].
<<http://www.indusmex.com/page3.php>>. [Citado 4 febrero de 2014].

La segunda alternativa es realizar el montaje del eje del motor paralelo al eje de salida, conectados mediante un sistema de transmisión de potencia como se aprecia en la Figura 27.

Figura 27. Montaje de motor mediante ejes paralelos



5.1.4 Disposición de los sensores

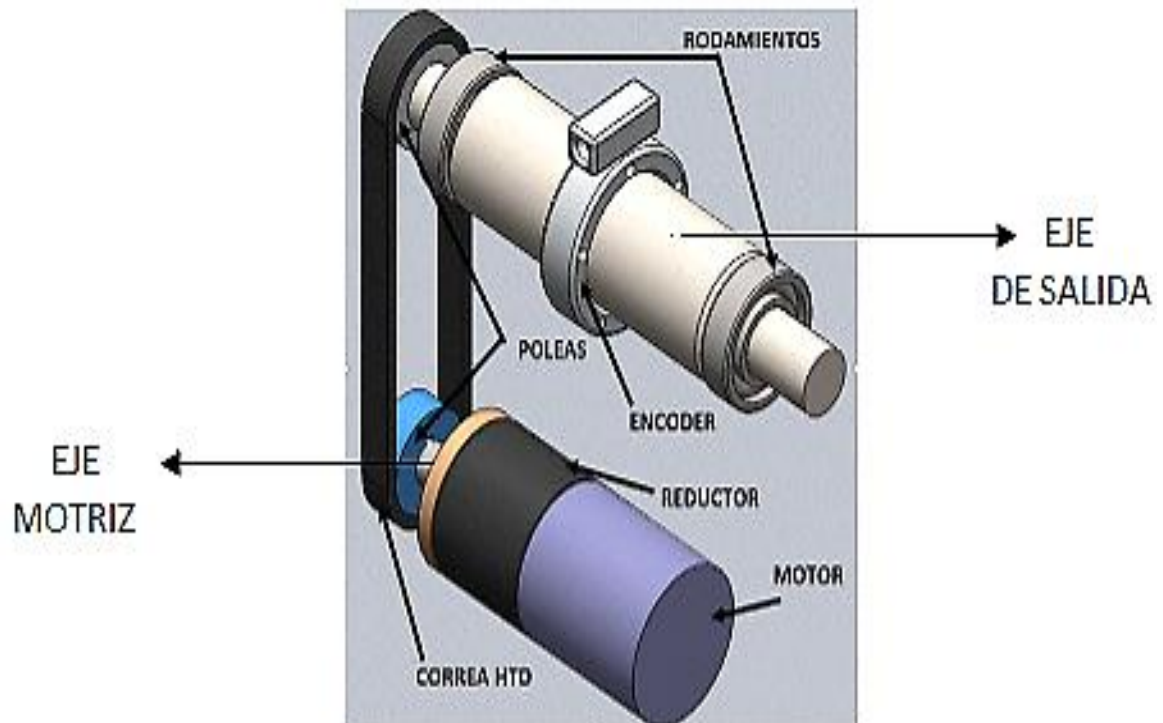
Para cumplir con las especificaciones técnicas del sistema de validación tipo Gimbal se definieron dos configuraciones de montaje para los sensores de alta resolución que permitan validar los datos procedentes del módulo de medición inercial. Previamente al planteamiento del montaje de los encoders se seleccionó la tecnología de los sensores necesarios para satisfacer los requerimientos propuestos en la sección 2.1.2. Para ver los detalles de la selección de la tecnología del sensor véase el Anexo J.

Considerando la disposición de los motores, configuración de los ejes, y los requerimientos de resolución y precisión que debe tener el sistema de validación; se evalúa la mejor forma de ubicar el encoder, visualizando las ventajas y desventajas de cada una de las configuraciones. A continuación se plantean dos configuraciones posibles para los sensores (encoder) y el tipo de sensor que se requeriría.

5.1.4.1 Configuración 1.

En la primera de las configuraciones se analiza la ubicación del encoder en el eje de salida del movimiento, teniendo como señales de entrada la posición y la velocidad de este eje. La ventaja de aplicar esta configuración es poder registrar el movimiento en el eje de salida, y de esta manera, obtener la posición real como una medida directa y no requerir de elementos adicionales o procesos de cálculos para obtener los resultados del movimiento. Para esto es necesario contar con un encoder de alta resolución (más de 4000 ppr⁹) de eje pasante (Hollow Shaft) que se instala en el eje de salida como se muestra en la Figura 28. La desventaja de esta configuración es el alto costo de adquisición este tipo de sensores.

Figura 28. Configuración 1 del encoder en los ejes.

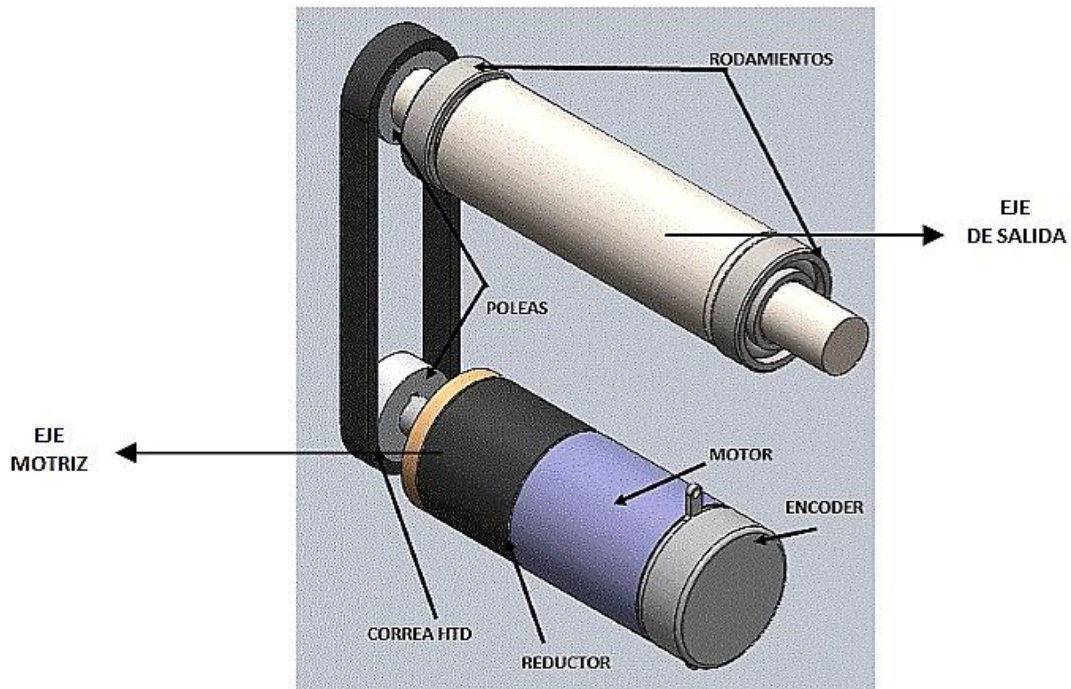


⁹ ppr= pulsos por revolución.

5.1.4.2 Configuración 2.

Como segunda configuración se analiza la ubicación del encoder en el eje de entrada o eje motriz. Presenta como ventaja hacer uso de un encoder de menor resolución (de 400 a 1000 ppr) y maximizando las lecturas por medio de la reducción de velocidad, siendo la lectura del encoder un ángulo de β grados mientras que el eje de salida está midiendo un ángulo β/i grados, donde i es la relación de reducción de la transmisión. Como desventajas se evidencia la necesidad de incluir una referencia adicional en el eje de salida del motor y la posibilidad de que cualquier holgura en el sistema de transmisión genere incertidumbre en el movimiento en el eje de salida.

Figura 29. Configuración 2 del encoder en los ejes



Finalmente, se establece la configuración uno (1) para el montaje del encoder; puesto que una medición directa sin incertidumbre es necesaria para cumplir con los requerimientos del sistema de validación.

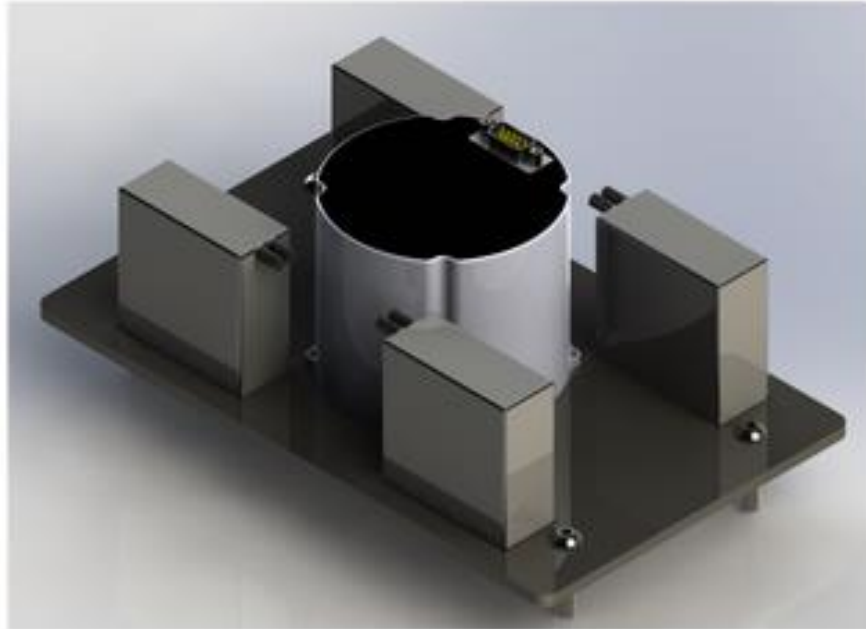
5.2 GEOMETRÍA Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA MECÁNICO.

El dimensionamiento se basa en la adecuación del montaje del módulo de medición inercial. En este proyecto se denomina módulo de medición inercial al conjunto de componentes electrónicos y electromecánicos dentro de los cuales se encuentran giroscopios, acelerómetros, tarjetas electrónicas y demás elementos necesarios para llevar a cabo la validación de los datos. Estos componentes se fijan firmemente en una placa rectangular la cual se monta en la estructura de rotación Gimbal Roll, para posteriormente realizar pruebas de velocidad y posición.

5.2.1 Módulo de medición inercial.

La Figura 30 muestra el conjunto de componentes que integran el módulo de medición inercial, los cuales cuentan con una geometría rectangular, de dimensiones 250 mm de largo, 150 mm de ancho y una altura de 100 mm aproximadamente, su peso máximo esperado es de 5 kg.

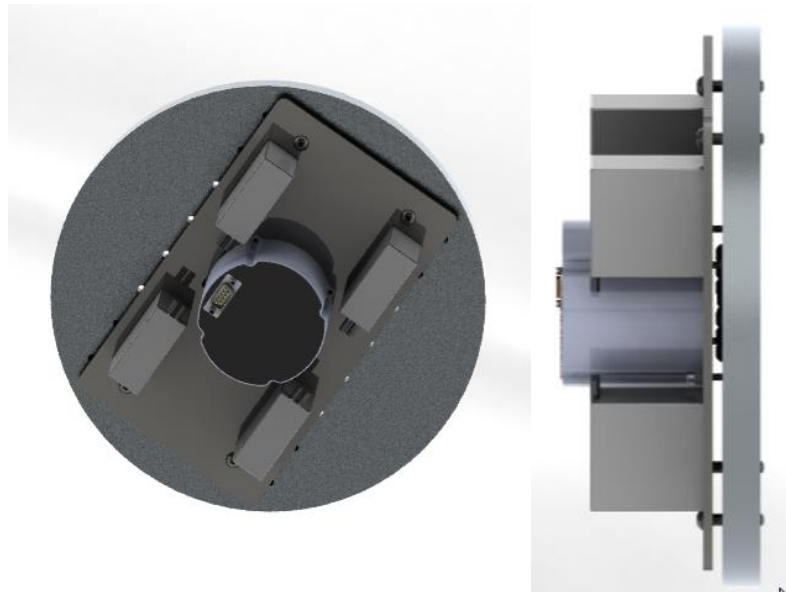
Figura 30. Componentes electrónicos del módulo de medición inercial



5.2.2 Anclaje del módulo de medición inercial al sistema de validación.

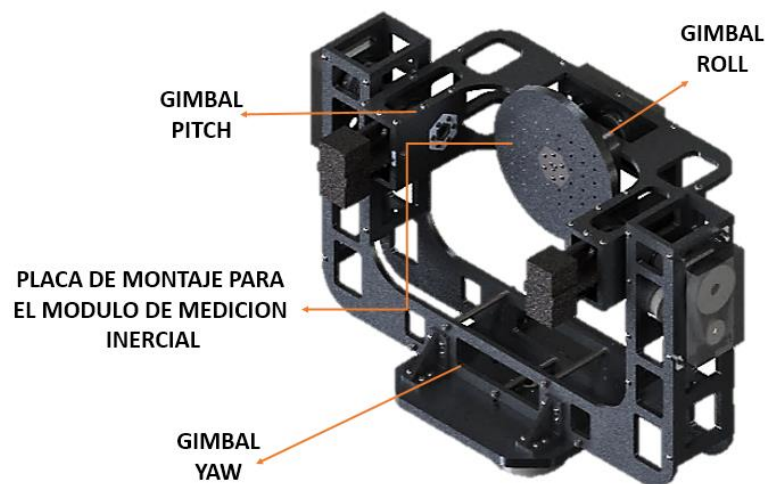
Es indispensable que el módulo de medición inercial este bien posicionado dentro de la estructura Gimbal Roll de manera que no pueda moverse de forma inesperada debido a los movimientos de rotación del sistema. Debido a esto se establece que la mejor forma de anclar el módulo de medición inercial a validar es por medio de tornillería, instalando el módulo de medición inercial en la placa circular que hace parte del Gimbal interno o Gimbal Roll, garantizando una unión temporal, de fácil montaje y desmontaje para pruebas posteriores. Véase Figura 31.

Figura 31. Sujeción del módulo de medición inercial



El módulo de medición inercial se instala en el sistema de validación por medio de tornillos que unen temporalmente el modulo a la plataforma circular que gira en relación al eje de rotación interno de la estructura tipo Gimbal.

Figura 32. Placa de montaje para módulo de medición inercial



La plataforma circular cuenta con una matriz de agujeros roscados que facilitan el montaje del módulo de medición inercial ofreciendo una mayor versatilidad en las dimensiones del módulo de medición inercial.

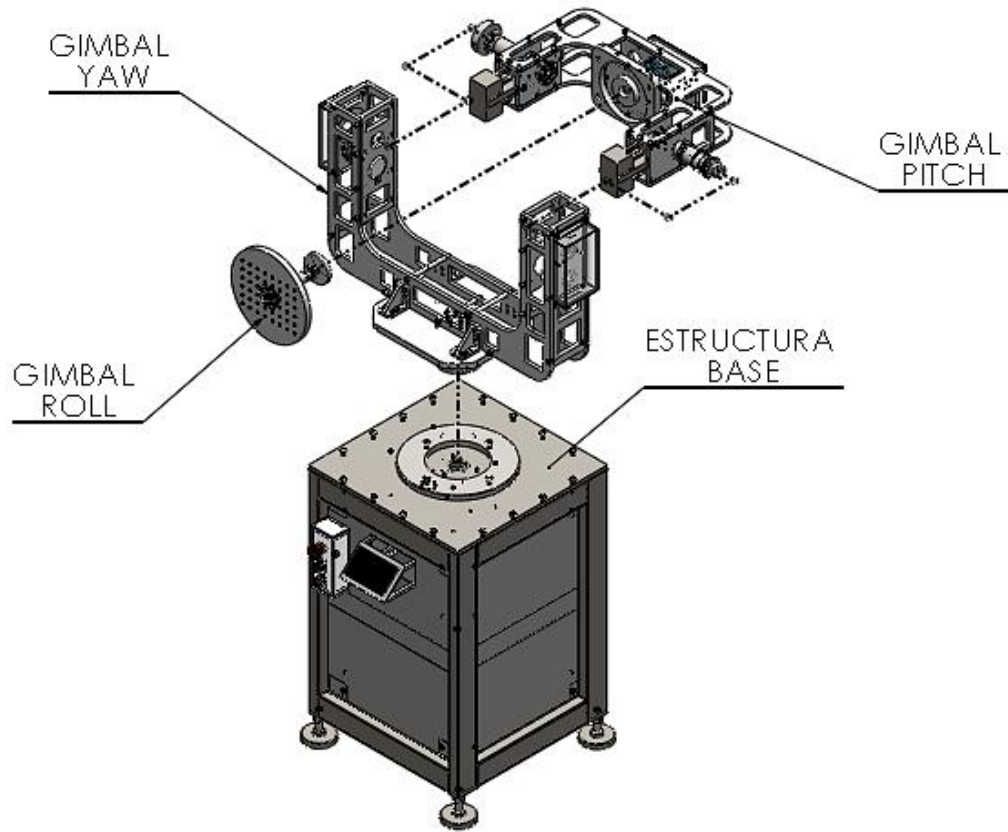
5.3 MECANISMO TIPO GIMBAL

Gimbal o cardan es un mecanismo que permite la rotación de un objeto alrededor de un eje en un montaje de anillos concéntricos y con ejes perpendiculares entre sí (ver Figura 33), permitiendo que el movimiento de cada estructura de rotación sea independiente.

El proceso de validación requiere de una plataforma mecánica para manipular con precisión el IMU. Se necesita un mínimo de un grado de libertad accionado para validar los sensores pertenecientes al IMU, pero es deseable disponer de una plataforma de tres (3) grados de libertad capaz de girar alrededor de los ejes de la IMU, minimizando la manipulación de la IMU por parte del usuario y reduciendo la incertidumbre en las mediciones.

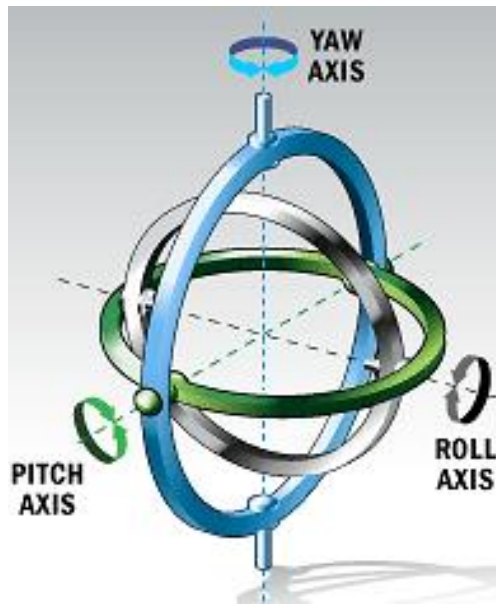
El sistema de validación tipo Gimbal está formado de elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos que funcionan conjuntamente para lograr un alto desempeño en la rotación, contemplando los requerimientos propios de un sistema de validación comercial. Estos elementos se agrupan por estructuras de acuerdo al tipo de movimiento que realizan y sus nombres se plantearon en semejanza a las coordenadas RPY (Roll, Pitch, Yaw) de navegación inercial y se muestra en la Figura 33.

Figura 33. Componentes de la estructura Gimbal



En el contexto de navegación inercial (ver Anexo B), cada uno de los ejes de rotación recibe un nombre en función del tipo de movimiento que realizan. Para el eje interno, en el caso de la Figura 34, el anillo negro gira simulando el alabeo de una aeronave o rotación sobre su eje longitudinal, este eje es denominado eje Roll. El anillo verde gira simulando el cabeceo de una aeronave o cambio de pendiente, este eje es denominado eje Pitch y por último el anillo azul, simula un giro similar a la guiñada de una aeronave o cambio de dirección, este eje es denominado eje Yaw.

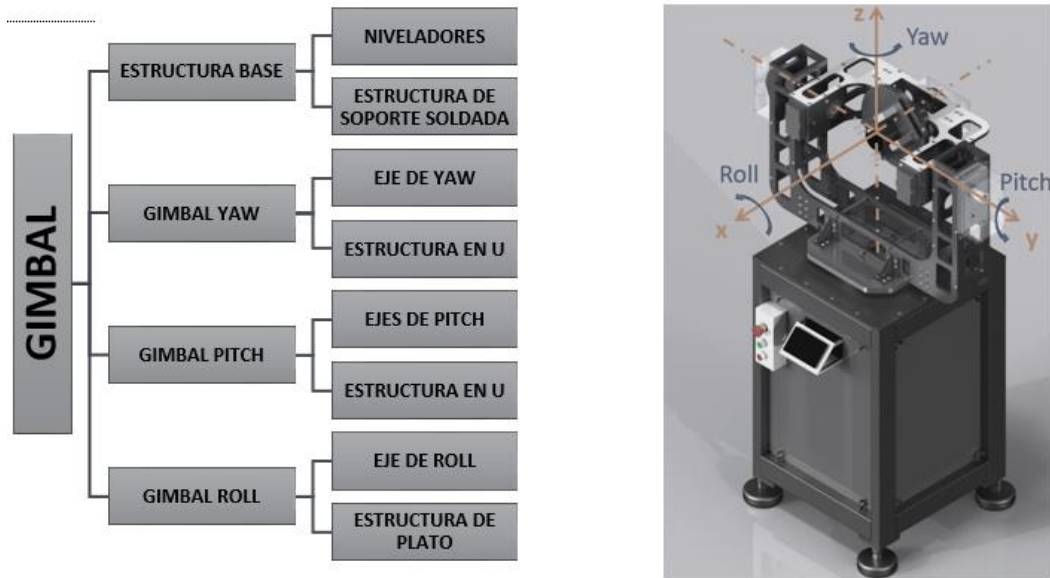
Figura 34. Gimbal concéntricos



Fuente: Gimbal Systems. [Online]. <<http://science.howstuffworks.com/gimbal1.htm>>. [Cited Apr. 5, 2013].

A partir de esta nomenclatura de ejes, se define cada uno de las estructuras de rotación como Gimbal y el bastidor de dicha estructura como “Estructura base”, por lo tanto, tenemos cuatro componentes de la estructura mecánica: Gimbal Roll, Gimbal Pitch, Gimbal Yaw y Estructura Base. Cada uno de estos componentes hace parte del sistema mecánico y posee sus elementos internos. En la Figura 35 se observa el planteamiento de la estructura mecánica de cada Gimbal.

Figura 35. Diseño de la estructura mecánica



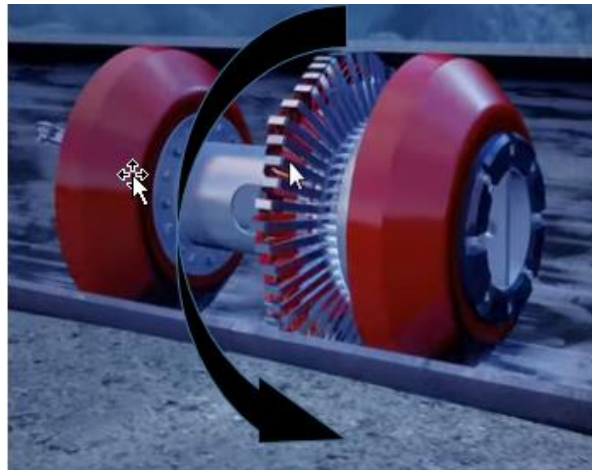
A continuación se describe cada uno de los componentes de la estructura y sus parámetros de diseño. El diseño del sistema de validación se despliega desde adentro hacia afuera, en forma de estructuras de rotación ortogonal, cada una rotando dentro de la otra. Es importante tener como requerimiento principal de cada Gimbal, soportar el peso del Gimbal que lo antecede.

5.3.1 Gimbal Roll.

Se denomina Gimbal Roll a la estructura mecánica interna que permite la rotación del módulo de medición inercial alrededor del sistema de coordenadas Roll como se muestra en la Figura 11 del capítulo 2; y en el cual se instala con firmeza y precisión el módulo de medición inercial a validar. Este eje de rotación del Gimbal debe explorar la mayor parte de la dinámica del giro con el fin de simular el comportamiento de rotación axial (Figura 36) que experimenta la herramienta ITION en la tubería. Gimbal Roll se compone de una plataforma circular, placa

hexagonal de acople, un rodamiento de soporte axial, un eje macizo, poleas y correas dentadas, entre otros. El diseño de cada uno de sus componentes trasciende al diseño de las otras estructuras Gimbal, por esta razón el diseño de las tres estructuras Gimbal se desarrollan desde la parte interna hacia el exterior siendo Gimbal Yaw la estructura de rotación externa (Figura 33).

Figura 36. Rotación axial de la herramienta ITION



Fuente: Pipeline Cleanliness Assessment Tool. [Online].

<<http://www.circorenergy.com/support/videos.php>>. [Extracted Jun. 10, 2014].

A continuación se listan los parámetros, componentes, cálculos y análisis de resistencia realizados para formalizar el diseño de esta estructura mecánica.

5.3.1.1 Criterios para el diseño de Gimbal Roll.

Los principales criterios aplicados para el diseño de la estructura de rotación Gimbal Roll se listan y describen a continuación:

- Dimensión del módulo de medición inercial (sección 3.2).

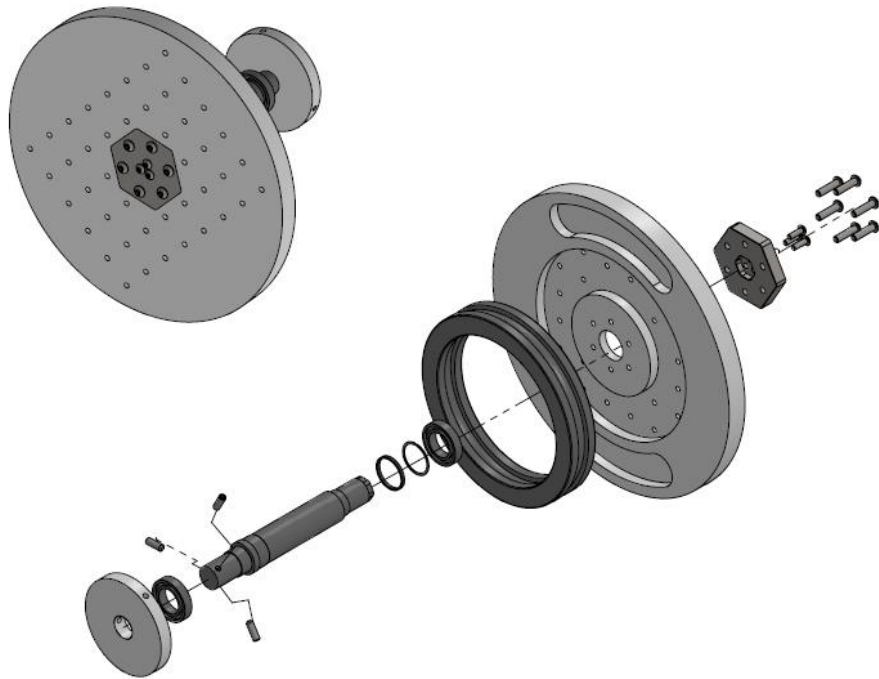
- Facilidad en el anclaje del módulo de medición inercial.
- Alta rigidez estructural.
- Bajo peso.
- Alto balance dinámico de la plataforma de rotación para eliminar fuerzas y momentos indeseables.
- Alta precisión en condiciones de carga dinámica.
- Montaje mecánico de los encoders.
- Alimentación eléctrica de los motores.

El peso es un criterio crítico en el diseño de la estructura, puesto que al tratarse de tres cuerpos concentrados que necesitan rotar con precisión, su bajo peso hace que sea fácil de manipular y controlar, consecuente a esto se diseñaron componentes estructurales de aluminio de alta resistencia, aluminio 7075 - T651, de fácil adquisición y costeable para este proyecto.

5.3.1.2 Componentes.

La Figura 42 muestra los componentes que fueron diseñados pertenecientes a la estructura del Gimbal Roll. Algunos componentes que facilitan el funcionamiento de esta estructura de rotación están integrados en la estructura Pitch con el fin de realizar una estructura compacta. Los elementos de apoyo como rodamientos que integran los elementos de transmisión de potencia se describen en la sección 3.5.4.

Figura 37. Integración de componentes de la estructura Gimbal Roll

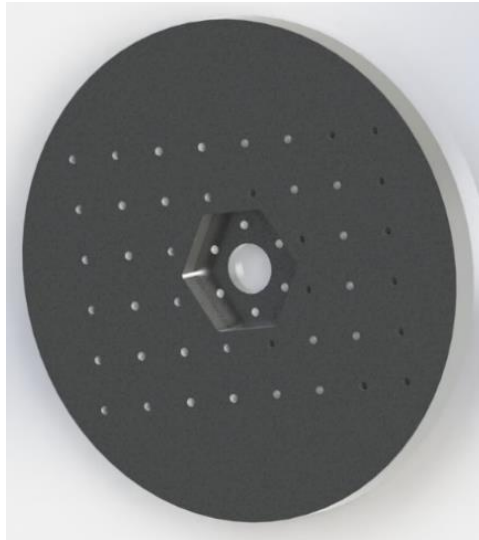


- Plataforma Circular Giratoria.

Sirve de soporte para el montaje del módulo de medición inercial y realiza la rotación en el eje Roll. Este elemento cuenta con una cavidad en su parte frontal y posterior para el montaje de elementos como rodamiento axial y pieza de acople que facilitan el cumplimiento de su funcionalidad.

El diseño y montaje que se ha dispuesto para este componente giratorio se ha realizado de tal forma que el montaje final ofrezca las máximas prestaciones en cuanto a precisión, rigidez y en algunos casos capacidad de carga. Como se contemplan en el diseño de mesas giratorias

Figura 38. Plataforma circular

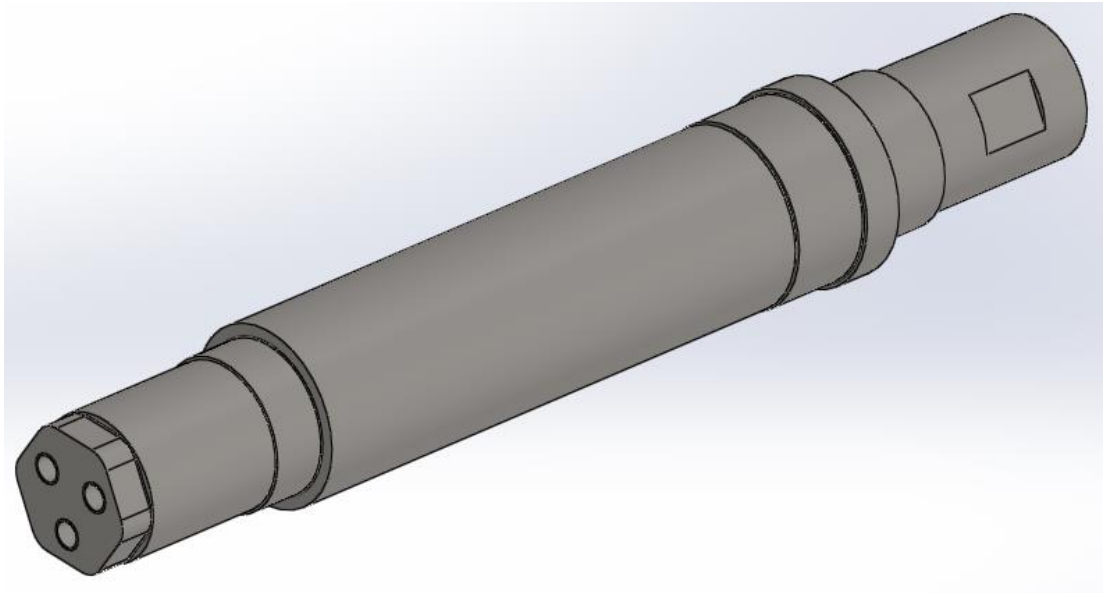


La Figura 38 muestra la configuración establecida para realizar el montaje de los componentes del módulo de medición inercial. Véase Sección 3.2.2 para más detalle.

- Eje Roll.

Eje macizo de sección escalonada para el montaje del encoder y rodamientos radiales de apoyo; este elemento mecánico se acopla a la plataforma circular por medio de una placa hexagonal permitiendo la rotación libre de la estructura mecánica y su montaje se realiza en la estructura en U de Gimbal Pitch. Los cálculos y requerimientos de diseño se describen en la sección 3.5.

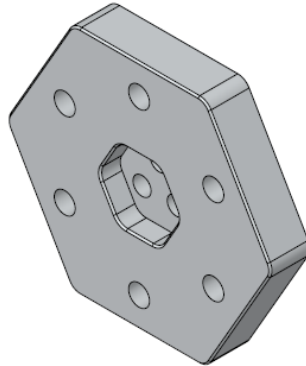
Figura 39. Eje Roll



- Placa hexagonal

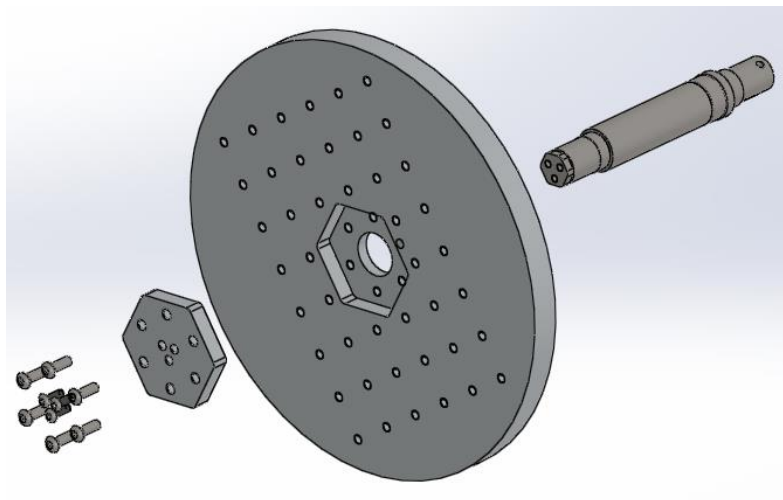
Para transmitir el movimiento de rotación del eje a la plataforma circular donde se instala el módulo de medición inercial, se realiza utilizando una placa de geometría hexagonal la cual acopla el eje Roll con la plataforma circular mediante secciones hexagonales y asegurando estos elementos por medio de tornillos, dándole un ajuste preciso y evitando posibles desajustes que constituyan fuentes de error en los datos validados por el sistema de validación Gimbal. La Figura 40 muestra la placa de acople y la Figura 41 muestra el montaje de estos tres elementos.

Figura 40. Placa hexagonal de acople: Eje Roll – Plataforma Circular



A continuación se muestra la funcionalidad de la placa hexagonal, en el ensamble del eje y la plataforma circular.

Figura 41. Funcionalidad Placa hexagonal.



- Rodamientos.

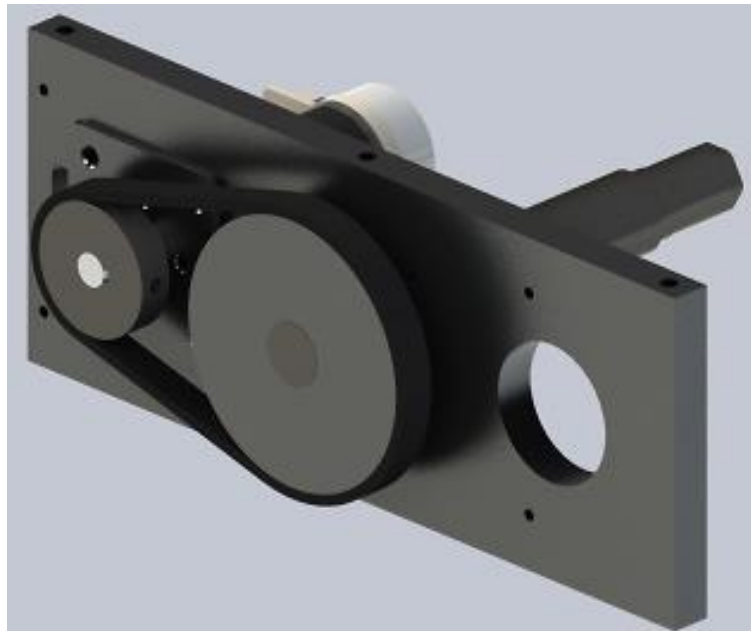
Se seleccionaron rodamientos radiales para el montaje del eje Roll en la estructura Gimbal Pitch y un rodamiento axial a bolas para facilitar el giro de la plataforma circular. Véase Sección 3.5.4

- Transmisión de potencia.

Debido a los requerimientos de diseño del sistema tipo Gimbal se estableció un sistema de transmisión de potencia por poleas y correas dentadas que garantice alta precisión en el eje de salida; a partir de esta configuración se posiciona el motor DC Brushless y el eje de rotación Roll en una placa rectangular como se muestra en la figura 43. Esta placa rectangular hace parte de la estructura en forma de U de Gimbal Pitch.

Los parámetros a tener en cuenta son la ubicación del sistema de transmisión de potencia por correas (ver el proceso de selección en el numeral 5.5.3), ubicación del sistema motriz (ver proceso de selección en el numeral 5.5.1).

Figura 42. Montaje de piezas de transmisión de potencia en Roll



El sistema de transmisión de potencia presenta la misma configuración para las tres estructuras mecánicas tipo Gimbal, por esta razón los ejes, poleas y rodamientos son agrupados y descritos en detalle en el numeral 3.5.

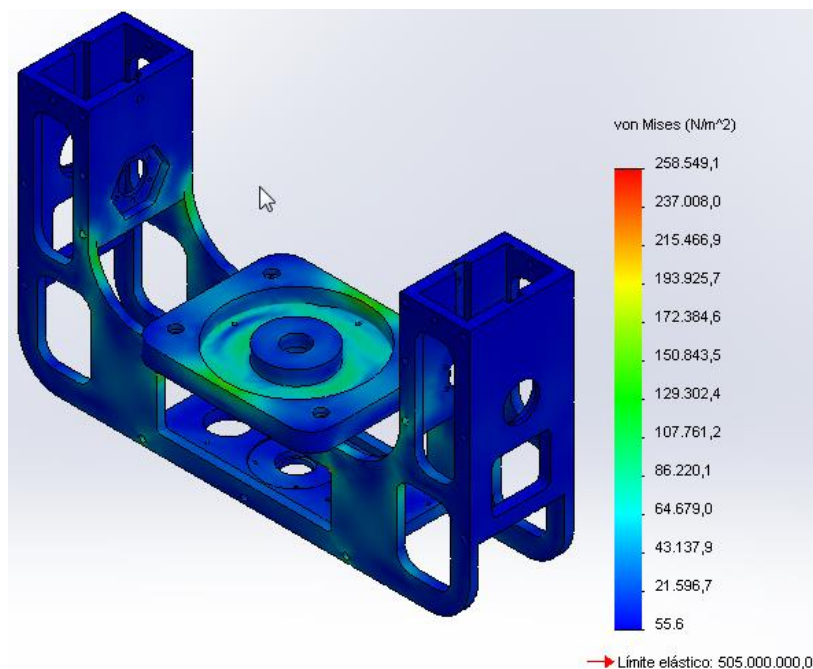
- Elementos de sujeción.

Las placas, elementos de acople y elementos electromecánicos pertenecientes a esta estructura están unidos mediante tornillos y los elementos como poleas se unen a los ejes por medio de tronillos prisioneros.

5.3.1.3 Cálculo de la estructura.

Para obtener excelentes resultados de rigidez de la estructura tipo Gimbal-estática y dinámicamente, de acuerdo a las condiciones de operación del sistema de validación, se han dimensionado los componentes con un margen de confianza, que luego son analizados mediante método de elementos finitos (FEA). Como no se manejan grandes cargas el análisis FEA se realiza a la integración de todos los componentes.

Figura 43. Análisis CAE de la estructura en U



Para ver en detalle las conclusiones y observaciones del análisis FEA realizado a las estructuras Gimbal, Véase la Anexo G. Análisis CAE de los componentes mecánicos.

5.3.2 Gimbal Pitch.

Estructura mecánica intermedia en forma de U, sobre la cual se apoya la estructura Gimbal Roll y el módulo de medición inercial. Es la responsable de simular los movimientos alrededor del eje de rotación Pitch del sistema de coordenadas RPY de navegación inercial; estos movimientos describen el cambio de inclinación que experimenta el módulo de medición inercial mientras se desplaza al interior de la tubería.

Debido a las características del movimiento de la herramienta ITION dentro la tubería este eje de rotación debe cumplir al menos con la dinámica necesaria para simular trayectorias de cambios de altimetría, por esta razón los cambios de inclinación que puede experimentar la herramienta ITION en el peor de los casos es 90° en ambos sentidos de rotación.

5.3.2.1 Criterios para el diseño de la estructura de rotación Pitch.

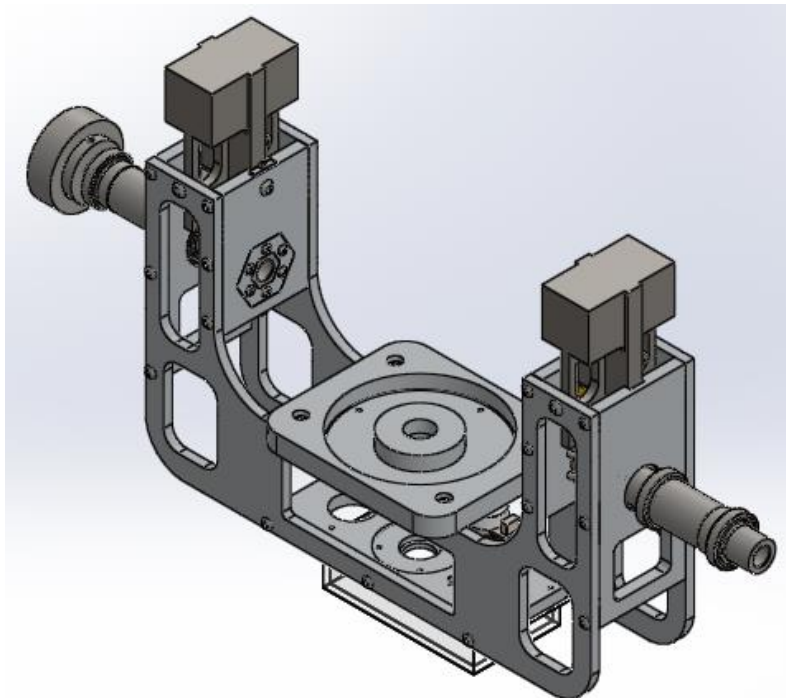
- Debe ser ortogonal con Gimbal Yaw.
- Simétrica con el fin distribuir los centro de masas y estén ubicados lo más cerca al centro de la estructura.
- Debe permitir montar la estructura Gimbal Roll.
- Simular los rangos de inclinación que experimenta la herramienta ITION en la tubería.
- Configuración de fácil montaje y desmontaje de los componentes.

- Bajo peso.
- Alta rigidez estructural.
- Facilidad en el montaje de motores, encoders y elementos de transmisión.
- Balanceo o compensación dinámica de la estructura para eliminar fuerzas y momentos indeseables.
- Alta precisión en condiciones de carga dinámica.
- La estructura no debe generar vibraciones por ajuste de sus componentes.

5.3.2.2 Componentes.

A continuación se muestra la estructura Gimbal Pitch con cada uno de sus componentes. Los motores que permiten el movimiento de esta estructura están instalados en la estructura Gimbal Yaw.

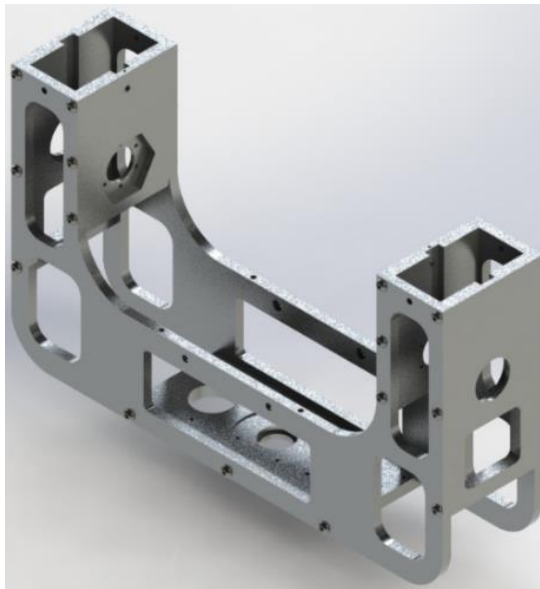
Figura 44. Integración de componentes de Gimbal pitch.



- Estructura en U.

Con el fin de ensamblar tres estructuras de rotación perpendiculares entre sí, se establece una estructura como se muestra en la Figura 44 que logre rotar y al mismo tiempo contener otro eje de rotación haciendo alusión a anillos concéntricos que giran uno dentro de otro.

Figura 45. Estructura en forma de U

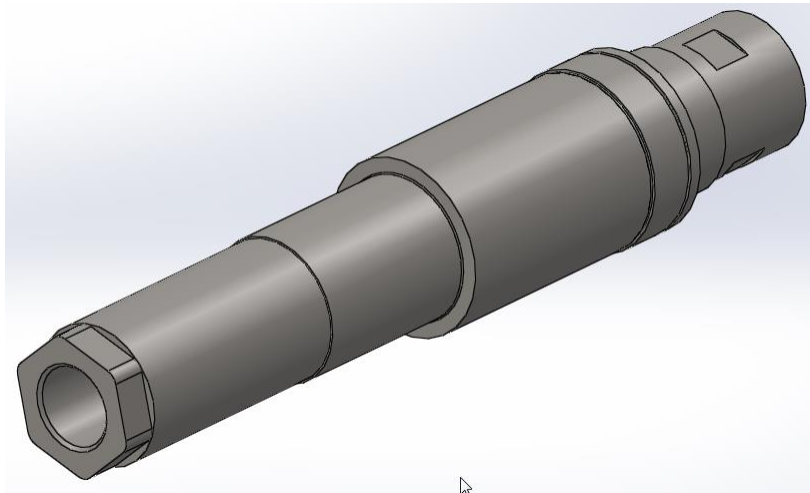


Esta estructura está formada por láminas de aluminio de 12 mm y 15 mm de espesor que se unen mediante tornillos dando como resultado una geometría que gira en torno a dos ejes; además sirve de apoyo para el montaje de los elementos de transmisión de potencia de Gimbal roll como son motores, ejes y encoders. Toda esta estructura, está pivotada a los extremos por dos ejes huecos que se acoplan haciendo uso de placas hexagonales, facilitando la transmisión de potencia del eje a la estructura mecánica en forma de U. Por otra parte cuenta en su parte superior con contrapesas las cuales se describen más adelante.

- Eje Pitch.

Se diseñaron dos ejes huecos idénticos que permiten la rotación de la estructura pitch en forma de U y los cuales se están apoyados en la estructura en U de Gimbal Yaw. Este componente se describe en detalle en la sección 3.5.

Figura 46. Eje Pitch.



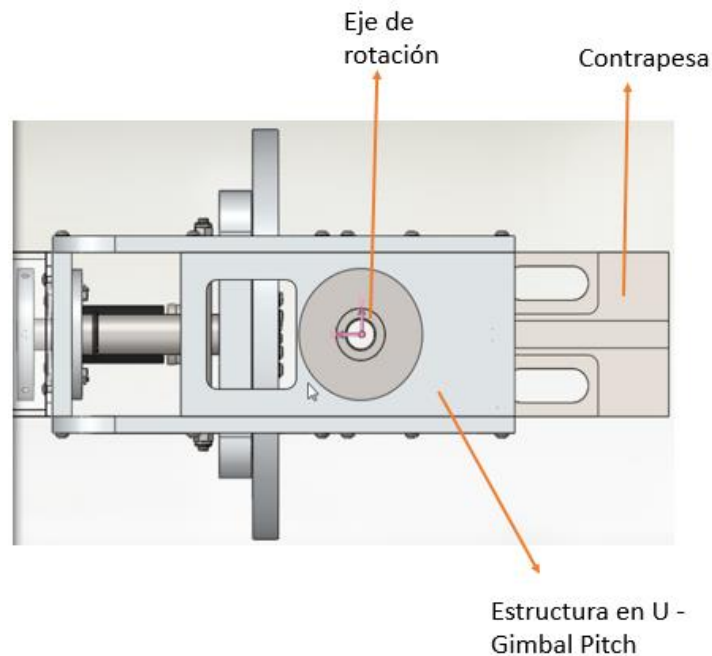
De manera similar a las demás estructuras Gimbal el eje se enlaza con la estructura pitch por medio de placas hexagonales, esta placa se fija al eje mediante ajuste forzado con la sección hexagonal del eje.

- Contrapesas.

Es un bloque de acero ASTM A36 que permite equilibrar la carga de la estructura Pitch con respecto al eje al cual rota, para facilitar el trabajo del motor y no forzarlo demasiado al girar la estructura. Se instalan en los extremos de la estructura en U, como se observa en la Figura 44 (Integración de componentes Gimbal Pitch) y están conducidas por guías que se forman en la unión de las placas de aluminio.

La Figura 47 muestra la configuración de las contrapesas en Gimbal pitch, y la ubicación del centro de masa de la estructura. La masa de estas contrapesas se estima a partir del peso de la estructura en conjunto de las estructuras Gimbal Pitch y Roll y la distancia de su centro de masa al eje de rotación.

Figura 47. Ubicación del centro de masa de la estructura Pitch



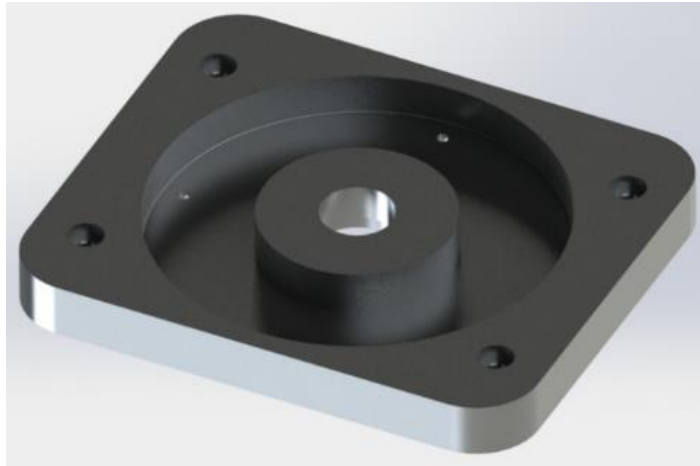
De acuerdo a la Figura 47 el montaje realizado para estas contrapesas permite que el centro de masa de la estructura pitch coincida o este muy cerca con el eje de rotación, logrando que el motor solo tenga que vencer una fracción de la inercia total de la estructura al momento del arranque.

- Plataforma rectangular Roll.

Superficie fija sobre la cual gira la plataforma circular de la estructura Roll. Su geometría facilita el montaje de los rodamientos radiales en los que se apoya el eje Roll. Así mismo cuenta con una cavidad para el montaje de un rodamiento

axial de bolas, que permite la rotación y el balance dinámico de la plataforma circular de la estructura Gimbal Roll. Véase figura 48.

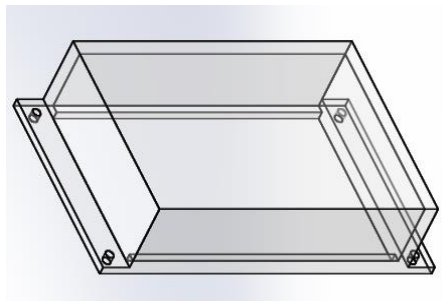
Figura 48. Plataforma rectangular



- Cubierta acrílico.

Es un elemento cuya función es aislar y proteger la transmisión de potencia por correas dentadas del ambiente que lo rodea y brindar seguridad al usuario. Véase Figura 49.

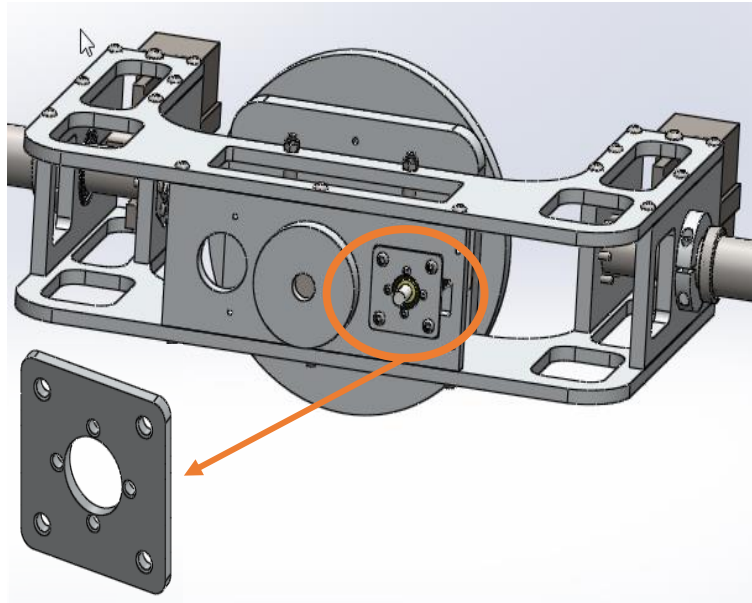
Figura 49. Cubierta de acrílico



- Placa de Sujeción Motor Roll.

Para lograr un fácil montaje y desmontaje del motor que mueve la plataforma circular de la estructura Gimbal Roll, sin tener que desensamblar todo el arreglo mecánico de Gimbal Pitch; el motor se instala en una placa cuadrada que se sujeta a la estructura Gimbal Pitch por medio de tornillos permitiendo un acceso rápido al motor en cualquier momento. En la Figura 50 se muestra la placa y el montaje del motor.

Figura 50. Placa sujeción motor.



- Placa hexagonal: acople eje – Estructura en U.

Es la encargada de acoplar el eje pitch con la estructura en U, mediante secciones hexagonales y se fija a la estructura mediante tornillos Bristol cabeza botón. Véase la Figura 51.

Figura 51. Placa hexagonal



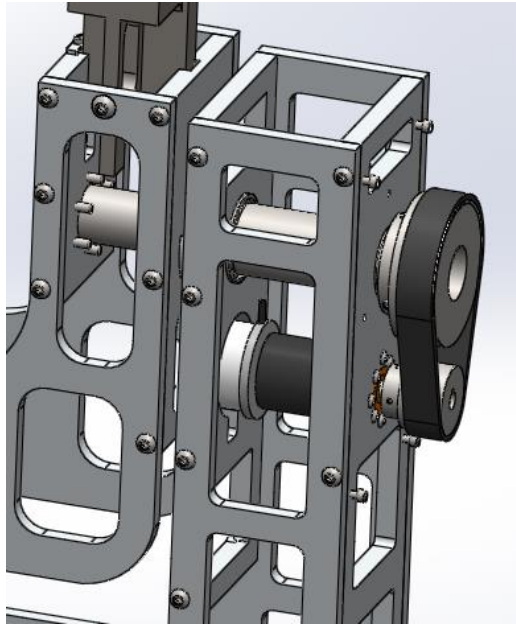
- Rodamientos.

Para el montaje de la estructura Gimbal pitch en estructura en U y Gimbal Yaw se seleccionaron rodamientos radiales para apoyar los dos ejes huecos de rotación. Los rodamientos seleccionados se especifican en la sección 3.5.4.

- Transmisión de potencia.

Se posiciona el motor DC Brushless y el eje de rotación Pitch en las placas rectangulares como se ilustra en la figura 52. Estas placas hacen parte de la estructura en U de Gimbal Yaw.

Figura 52. Montaje de piezas de transmisión de potencia en Pitch.



5.3.3 Gimbal Yaw.

Estructura de rotación exterior en forma de U en la cual están articuladas las estructuras mecánicas Gimbal Pitch y Gimbal Roll, soportando su peso y garantizando la estabilidad y rotación. Sus componentes son simétricos y de forma similar a la estructura Pitch. La estructura se apoya en una placa cuadrada de 20 mm de espesor que gira sobre un rodamiento axial de bolas montado en el bastidor o estructura base que le permite rotar soportando su propio peso y el de las estructuras Pitch y Roll, brindando estabilidad a toda la estructura mecánica de rotación y evitar problemas de cabeceo debido al peso.

Al igual que el resto de estructuras de rotación Gimbal, se diseñó en aluminio 7075-T65 con el fin de obtener una estructura baja en peso para que los requerimientos de potencia de los motores no fuesen altas y las dimensiones y peso de los motores DC fueran de peso reducido.

Es la responsable de simular los movimientos alrededor del eje de rotación Pitch del sistema de coordenadas RPY en navegación inercial; estos movimientos describen el cambio de inclinación que experimenta el módulo de medición inercial mientras se desplaza al interior de la tubería.

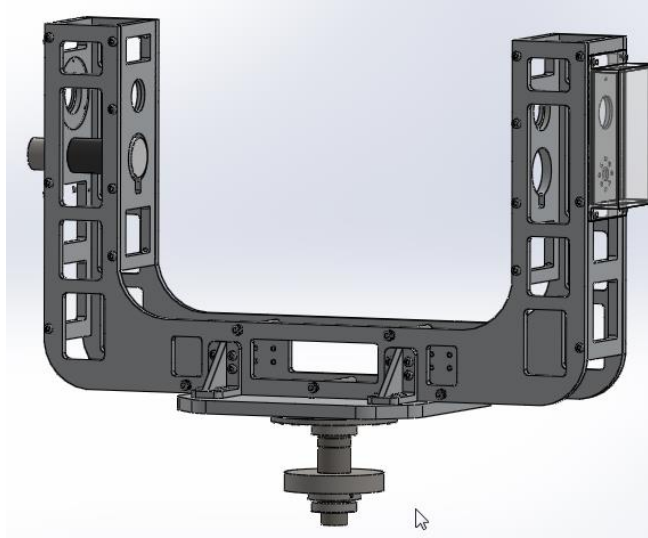
5.3.3.1 Criterios para el diseño de la estructura de rotación Yaw.

- Ortogonal con las otras estructuras de rotación Gimbal Pitch y Roll.
- Simetría en la estructura Gimbal
- Debe permitir montar la estructura Gimbal Pitch.
- Bajo peso.
- Alta rigidez estructural.
- Montaje de motores, encoders y elementos de transmisión del Gimbal Pitch.
- Alto balanceo dinámico.
- Precisión en condiciones de carga dinámica.

5.3.3.2 Componentes.

Algunos componentes que facilitan el funcionamiento de esta estructura de rotación están integrados en la estructura Base. Los elementos de apoyo como rodamientos los cuales integran los elementos de transmisión de potencia se describen en la sección 3.5.4.

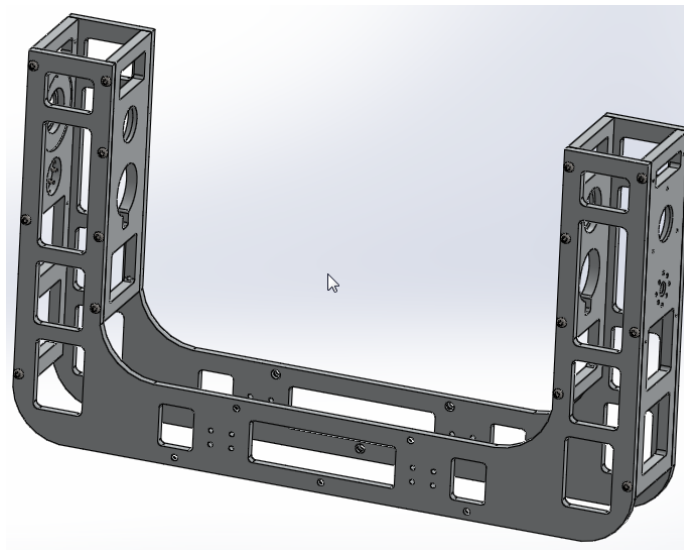
Figura 53. Integración de componentes



- Estructura en U.

Al igual que Gimbal Pitch está formada por la unión de láminas de aluminio 7075-T651 de 12 y 15 mm de espesor. Su estructura y rigidez permiten el soporte de las estructuras Gimbal Pitch y Roll.

Figura 54. Estructura en U

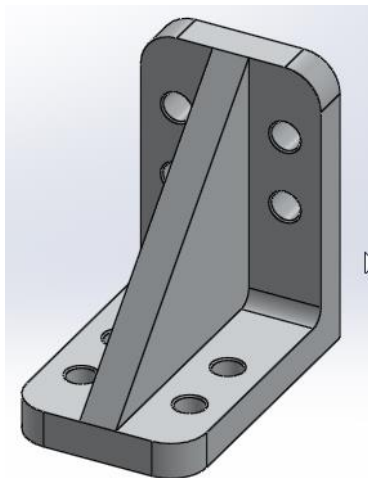


- Soportes.

Soporte en forma de “L” utilizado para sujetar la estructura Gimbal yaw con la plataforma rectangular de rotación; de esta manera enlazar y homogenizar el movimiento de rotación que recibe la plataforma rectangular del sistema de transmisión de potencia del eje Yaw.

La unión de la estructura Yaw con la plataforma rectangular se hace utilizando cuatro soportes y sujetándolos con tornillos.

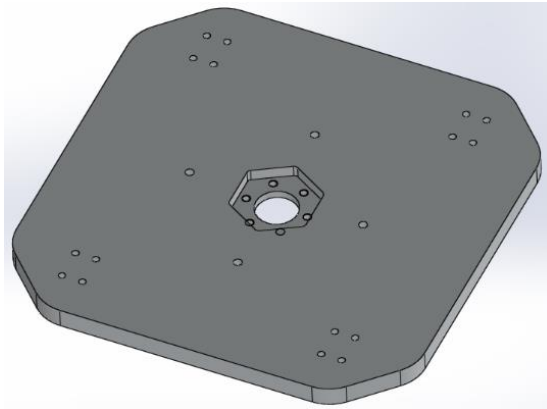
Figura 55. Soporte en L



- Plataforma rectangular.

Cumple la función de mesa giratoria en la cual se realiza el montaje de la estructura Gimbal Yaw mediante soportes en “L”. En esta plataforma se apoya todo el peso de las tres estructuras Gimbal.

Figura 56. Plataforma rectangular giratoria



- Rodamientos.

De manera similar a Gimbal Roll se seleccionaron rodamientos radiales para el montaje del eje en la estructura Base o bastidor y un rodamiento axial a bolas para facilitar el giro de la plataforma rectangular sobre la placa superior de la estructura base. Véase Sección 3.5.4

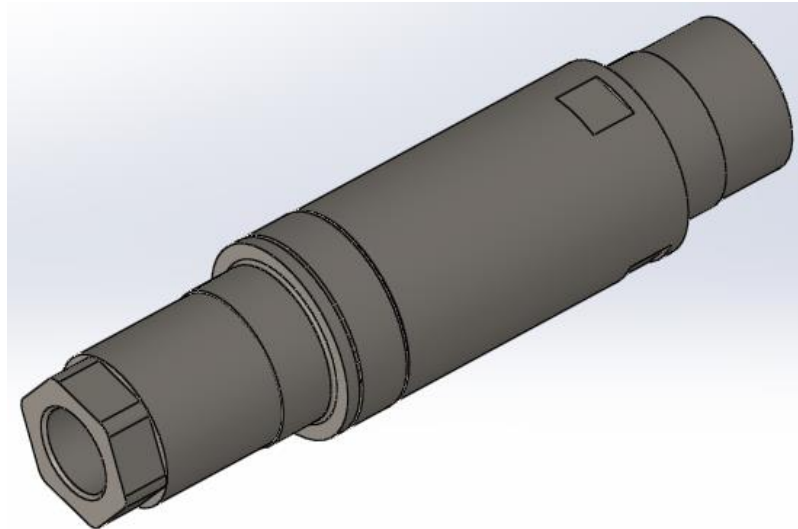
- Eje Yaw.

Elemento mecánico rotatorio que transmite el movimiento de rotación y potencia del motorreductor a la estructura Gimbal Yaw. Este eje es de sección circular hueca y escalonada para asentar los rodamientos y encoders (sección 5.1.2). La sección hueca permite el paso del cableado a las estructuras de rotación que están pivotadas sobre este.

El movimiento se transmite a Gimbal Yaw a través de la sección hexagonal del eje (Figura 57) mediante la configuración agujero -eje entre la placa giratoria y la placa de acople de sección hexagonal interna y externa (Figura 58).

Este elemento es un componente de la transmisión de potencia; sus consideraciones de diseño se mencionan en detalle en la sección 3.5.2.

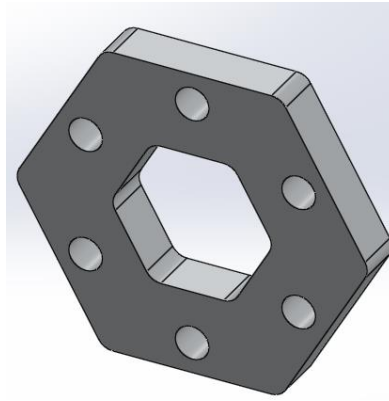
Figura 57. Eje Yaw



- Placa de acople.

En transmisión de potencia se usan diferentes métodos de acople, para trasladar el movimiento del eje del accionamiento o motor a la estructura mecánica de interés. Para el ensamble del eje Yaw a la estructura Gimbal se diseñó una placa intermediaria que conecta el movimiento de rotación entre el motorreductor, eje, y la estructura mecánica Gimbal yaw; brindando precisión en el movimiento y alineamiento del eje con la estructura Gimbal.

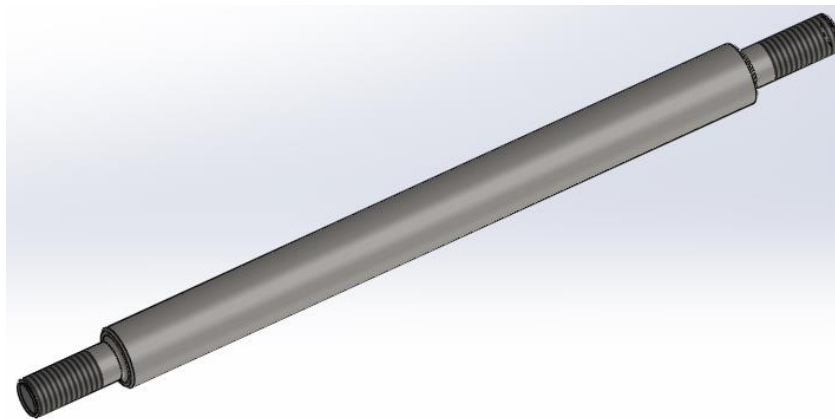
Figura 58. Placa hexagonal



- Separadores.

Son varillas lisas, roscada en sus extremos que unen las láminas en U por medio de turcas de seguridad, con el propósito de brindarle una mayor rigidez a la estructura Gimbal (Véase Figura 54).

Figura 59. Separadores



- Elementos de transmisión de potencia.

Los elementos que se tienen en cuenta en la transmisión de potencia son ejes, rodamientos radiales, poleas, correas y motorreductor. Al ser elementos comunes en las tres estructuras Gimbal se agrupan y describen en la sección 3.5.

- Motorreductor.

Esta estructura cuenta con un motor DC de conmutación electrónica de 250 watts, acoplado a una caja reductora de engranajes planetarios para cumplir con los requerimientos de potencia y requerimientos de precisión necesarios en el giro de la estructura Gimbal para la validación de los datos registrados por el módulo de medición inercial. Su montaje se realiza en la estructura externa a Gimbal Yaw, estructura Base o Bastidor. Este componente electromecánico es agrupado en la transmisión de potencia del sistema de validación y se describe en más detalle en la sección 3.5.1.

Figura 60. Motorreductor de Gimbal Yaw



- Poleas y correas sincrónicas.

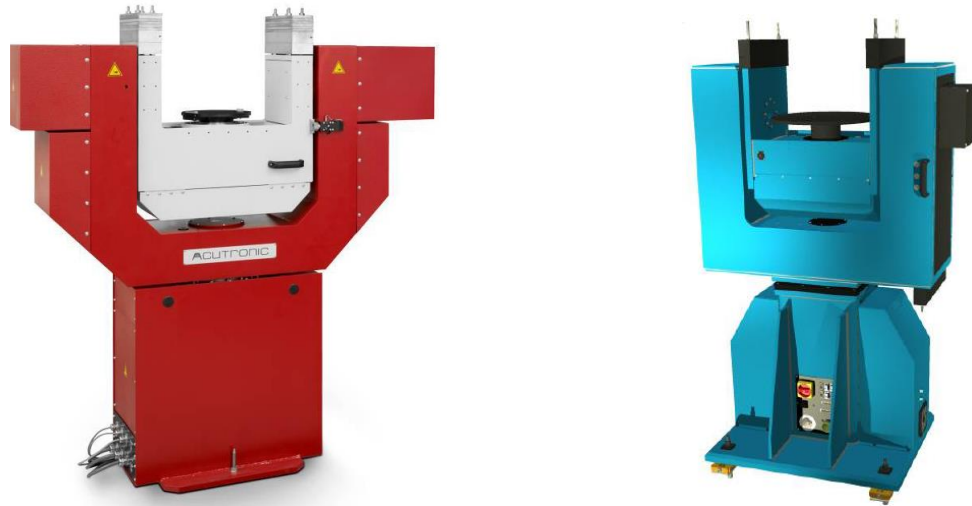
Los motores seleccionados son motores de alta velocidad por lo cual es indispensable establecer dos etapas de reducción de velocidad para garantizar los requerimientos de operación establecidos para el sistema de validación (Sección 2.1.2). En la primera etapa de reducción se selecciona un reductor de engranajes planetarios que garantizan precisión en la transmisión del movimiento. La segunda etapa de reducción se realiza por medio de poleas y correas sincrónicas con el objetivo de conservar la precisión del sistema y obtener los valores de potencia y velocidad requeridos.

Al igual que los motores, las poleas y correas son elementos comunes de la transmisión de potencia en las tres estructuras Gimbal y sus procedimientos de selección se repiten de manera similar para cada una de estas estructuras. Para más detalle de las correas y poleas. Véase (Sección 3.5.3).

5.3.4 Estructura Base.

Comercialmente los simuladores de tres ejes de rotación cuentan con una estructura base rígida y robusta que sirven de apoyo para el movimiento de la estructura externa y soportar el peso de todo el sistema de rotación, como se observan en la siguiente figura.

Figura 61. Bases de simuladores de rotación Acutronic



Fuente: Data Sheet Acutronic, 2013.

A partir de las características de estas dos alternativas se decide implementar el diseño de una estructura que de fácil construcción, que contenga un soporte para el sistema de transmisión de potencia de la estructura externa o Gimbal Yaw que se apoya y gira sobre esta base.

Para la estructura base del sistema de validación tipo Gimbal se plantea una estructura rectangular soldada con tubería rectangular de acero estructural. Esta estructura cuenta con dos superficies planas internas, en la primera se realizará el montaje de los componentes electrónicos y demás elementos que hagan parte del sistema de control y la segunda ubicada en la parte inferior de la base para alojar contrapesas, de ser necesario, para que el centro de inercia de toda la estructura mecánica este ubicado lo más bajo posible de tal forma que le dé estabilidad a todo el sistema Gimbal. En la Figura 62 se muestra un modelo preliminar para el diseño de la estructura base.

Figura 62. Modelo de estructura para el bastidor del sistema Gimbal



Fuente: DirectINDUSTRY. Bastidor máquina. [En línea].

<<http://www.directindustry.es/prod/italplant/bastidores-maquinas-112027-1205779.html>>.

[Citado 10 agosto de 2013].

La estructura base se define como una estructura estática encargada de soportar el peso de las tres estructuras Gimbal (Gimbal Roll, Gimbal Pitch y Gimbal Yaw) y resistir las condiciones de operación, para ello se utilizó tubería rectangular 40x80 mm de espesor 3 mm que brinde rigidez estructural y aislé las posibles vibraciones mecánicas ineludibles en las máquinas rotativas y que son ocasionadas por el desbalanceo y desalineamiento en la operación del sistema de rotación tipo Gimbal.

Su dimensionamiento se realizó de acuerdo a los elementos que en ella serán acoplados y la altura a la cual deben estar las estructuras Gimbal para que el usuario trabaje bajo los criterios de ergonomía en el puesto de trabajo. La estructura rectangular tiene 95,5 cm de alto, 60 cm de ancho y 60 cm de largo. El peso aproximado que debe soportar la estructura es 154 lb, más el peso propio, de 220 lb aproximadamente. La fabricación de esta estructura se realizó mediante el corte de tubería estructural y unión por soldadura de todas las piezas, hasta lograr las dimensiones requeridas. El detalle de la fabricación de la estructura base se muestra en el Anexo M. Planos de detalle.

5.3.4.1 Criterios para el diseño de la Estructura Base.

En la Figura 62 se visualiza un modelo de la estructura básica del bastidor. Se observa que las placas laterales son removibles, tal y como se desea en la estructura del sistema Gimbal. El diseño actual consta de una estructura ensamblada a partir de tubería rectangular, estos tramos de tubería están soldados y cubiertos por placas de lámina Cold Rolled. De acuerdo a los elementos mecánicos seleccionados, el peso y estabilidad del sistema Gimbal, los requerimientos para el diseño de esta estructura base se listan a continuación:

1. Capacidad de Carga: Debido al peso que posee el ensamble de las estructuras Gimbal, 80 kg aproximadamente, la estructura mecánica requiere una masa determinada en su parte más baja (aprox. 150 kg) con el fin de bajar el centro de gravedad, evitar vibraciones y volcadura del sistema.
2. Soporte para la Electrónica: Es indispensable que la estructura cuente con un espacio para alojar los componentes eléctricos y electrónicos que permiten la ejecución del control del sistema de validación, por lo tanto, se incluyó en la mitad de la estructura una plataforma para ubicar y anclar toda los elementos requeridos para el funcionamiento del sistema Gimbal (FPGA, drivers de potencia de los motores, fuente de poder, entre otros).
3. Disminución de la Suciedad: La electrónica y los sensores seleccionados para esta aplicación (tipo encoder) no poseen alta protección (IP40) contra elementos particulados, por este motivo se incluyó en el diseño de la estructura base, láminas que proporcionen un aislamiento con el objetivo de disminuir al máximo la entrada de partículas de polvo.

4. Dispositivo de Nivelación y Disminución de Vibraciones: El diseño de la estructura incluye un elemento flexible en los niveladores (neopreno) que aísla el sistema de vibraciones externas e internas provenientes de la estructura mecánica Gimbal en las mediciones. El sistema cuenta con cuatro (4) mecanismos manuales de nivelación para establecer pruebas con alto grado de confiabilidad.

5. Diseño ergonómico: Teniendo en cuenta la facilidad de manipulación del sistema de validación, el usuario debe adoptar una postura de trabajo que garantice su confort. Por esta razón la estructura base del sistema de validación debe contar con una altura aproximada de 1 metro con el objetivo que la altura de trabajo del sistema de validación sea 1,5 m.

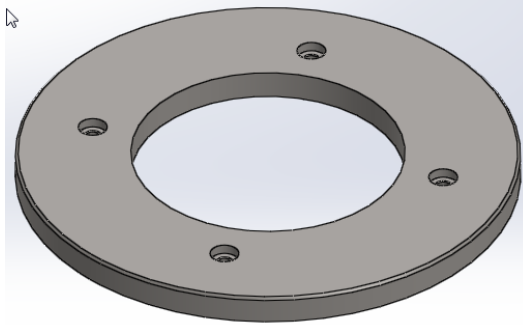
5.3.4.2 Componentes.

Algunos componentes que facilitan el funcionamiento de la estructura de rotación yaw están integrados en esta estructura. Los elementos de apoyo como rodamientos los cuales integran los elementos de transmisión de potencia de Gimbal yaw se describen en la sección 3.5.4.

- Disco circular

Es un disco hueco en acero ASTM A36, sirve de alojamiento para el rodamiento axial de bolas que funciona como apoyo axial para el giro de la estructura Gimbal yaw. El montaje mecánico de este componente se realiza en la placa rectangular de la estructura base.

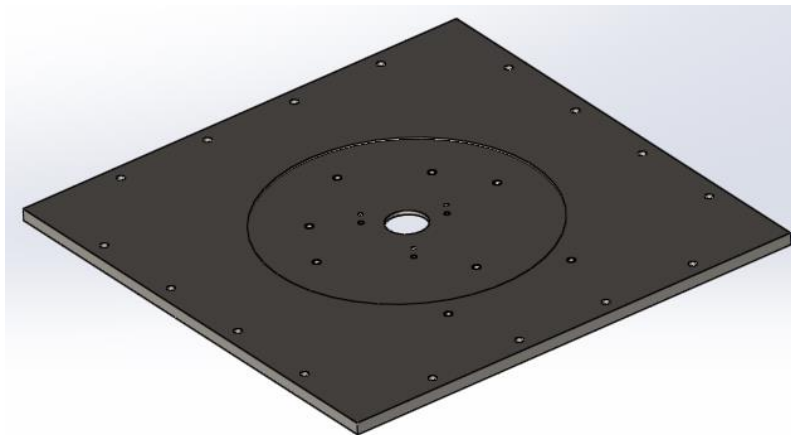
Figura 63. Disco circular



- Placa Rectangular.

Placa de acero ASTM A36 que sirve de base para el montaje de las tres estructuras Gimbal Está configurada para el montaje del disco circular, montaje de las abrazaderas para el encoder del eje Yaw y para el montaje de la mesa que sujeta el motor. Esta placa se une al bastidor o armazón de tubería rectangular mediante tornillos inoxidables de 3/8" rosca ordinaria. (Jaula esqueleto chasis bastidor). El peso de la lámina de 3/4" es apropiado para aumentar el peso de la estructura base y disponer de la menor cantidad de contrapesas en la parte inferior de dicha estructura.

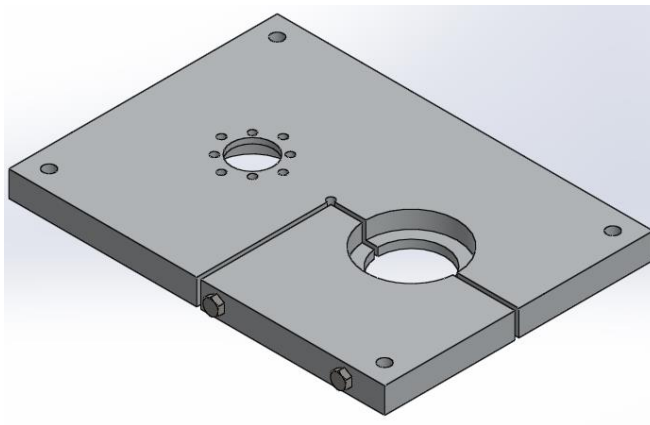
Figura 64. Placa rectangular



- Placa mesa-motor.

Placa rectangular en acero ASTM A36 donde se sujeta el motor y el sistema de transmisión de potencia del eje Yaw. Para facilitar el montaje y desmontaje de los elementos de transmisión como eje, poleas y rodamientos radiales es necesario que la placa se divida en dos tal y como se muestra en la Figura 65. Las dos divisiones se unen mediante tornillos inoxidables Bristol los cuales ajustan el rodamiento radial.

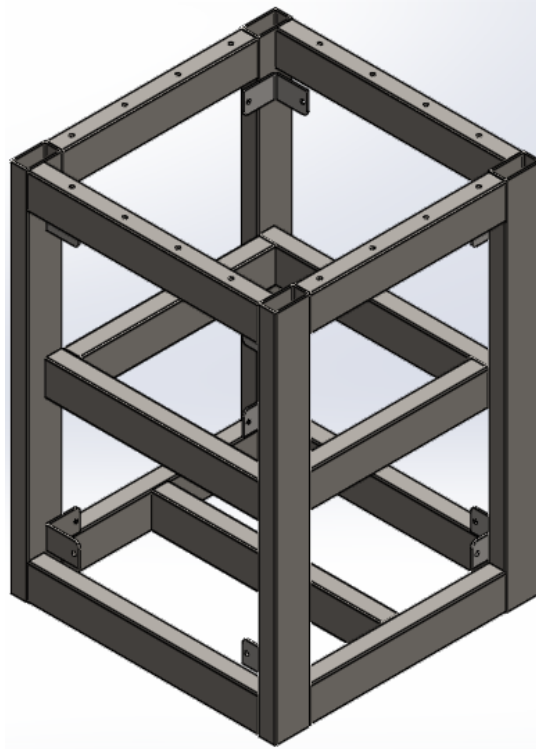
Figura 65. Ensamble placa mesa-motor



- Bastidor.

Estructura formada por un conjunto de tubos rectangulares de 40x80 mm y espesor 3 mm unidos entre sí mediante soldadura por arco eléctrico, capaces de soportar los esfuerzos que se transmiten entre las piezas debido al peso de las estructuras de rotación Gimbal.

Figura 66. Bastidor



- Niveladores.

Cada máquina plantea exigencias diferentes para la técnica de apoyo, al tratarse de un sistema de rotación para la validación de los datos o registros del sensor inercial IMU de alta resolución y precisión, es indispensable implementar una técnica de disipación de vibraciones.

Se utilizaron cuatro elementos circulares de nivelación y regulación flexible y anti-vibratorio con caperuza de acero ASTM A36, caucho antideslizante y de gran superficie de apoyo en cuatro puntos del bastidor, nivelación mediante rosca en la cabeza del tornillo y estable en el plano horizontal.

Figura 67. Elementos de nivelación y anti-vibratorio



- Láminas de protección.

La estructura metálica es cubierta por láminas ASTM A36 calibre 14 para proteger los elementos electrónicos de la suciedad. Estas láminas se unen al bastidor por medio de tornillos inoxidables Bristol que permita el montaje y desmontaje de la misma, con el fin de tener un fácil acceso a los componentes electrónicos y el sistema de transmisión de potencia de Gimbal Yaw que se encuentran al interior de la estructura base. Véase sección 3.3.4.1.

Figura 68. Diseño completo de la Estructura Base



5.3.4.3 Cálculos y análisis de resistencia.

En el Anexo G. Análisis CAE de los componentes Mecánicos, se muestran los resultados del análisis de resistencia realizadas a la estructura base para verificar si la estructura resiste el peso total de los componentes. Este estudio obtiene como resultado final el factor de seguridad. Todos estos cálculos se realizaron con el módulo Solidworks Simulation del Software Solidworks 2012: versión educativa.

5.4 SELECCIÓN DE MATERIALES

Como se estableció en los requerimientos de diseño (Sección 2.2.4.1) el peso de la estructura mecánica es un factor determinante, debido a la configuración cinemática (Sección 3.1.2) que presenta el sistema mecánico Gimbal. Hasta este punto se ha diseñado la geometría de los componentes que integran toda la estructura tipo Gimbal y seleccionado como material de fabricación la aleación de aluminio 7075 – T651 y acero ASTM A36.

Figura 69. Aleaciones de aluminio comunes y sus aplicaciones

Aleación	Aplicaciones	Formas
1060	Equipos químicos y tanques	Lámina, placa, tubo
1350	Conductores eléctricos	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, tubo, perfiles
2014	Estructuras de avión y armazones de vehículo	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, perfiles, piezas forjadas
2024	Estructuras de avión, ruedas, piezas de máquinas	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, perfiles, remaches
2219	Piezas sometidas a altas temperaturas (hasta 600°F)	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, perfiles, piezas forjadas
3003	Equipo químico, tanques, utensilios de cocina, piezas arquitectónicas	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, perfiles, tubo, remaches, piezas forjadas
5052	Tubos hidráulicos, electrodomésticos, fabricaciones con lámina	Lámina, placa, tubo, varilla, barra, alambre, remaches
6061	Estructuras, armazones y piezas de vehículos. usos marinos	Todas las formas
6063	Muebles, herrajes arquitectónicos	Tubo, perfiles extruidos
7001	Estructuras de alta resistencia	Tubo, perfiles extruidos
7075	Estructuras de aviones y para trabajo pesado	Todas las formas. excepto tubos

Fuente: Mott, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. 2006.

En la Figura 69 se muestran algunas aleaciones de aluminio y sus aplicaciones. Su resistencia mecánica varía considerablemente dependiendo del tipo de aleación siendo la 7075 – T6 (5,6 % Zn – 2,5% Mg) la de mayor resistencia a la tracción que se puede obtener en las aleaciones de aluminio.

Las láminas aluminio 7075 T651 son fabricadas de una aleación de alta resistencia que se utiliza principalmente en la construcción de maquinaria y aparatos sometidos a altas cargas dinámicas y estáticas¹⁰.

Figura 70. Propiedades mecánicas de algunas aleaciones de aluminio.

Aleación	Resistencia a la tracción		Resistencia a la fluencia		Elongación (en 50 mm) %
	MPa	ksi	MPa	ksi	
Aleaciones forjadas no tratables térmicamente					
1100-O > 99% Al	90	13	35	5	40
1100 – H18	165	24	157	22	10
3003-O 1.2% Mn	110	16	42	6	35
3003-H18	200	29	185	27	7
4043-O 5.2% Si	145	21	71	10	22
5056-O 5% Mg	290	42	157	22	35
5056-H18	435	63	405	59	15
Aleaciones forjadas tratables térmicamente					
2024-O 4.4% Cu	185	27	76	11	20
2024-T4 4.4% Cu	470	68	325	47	20
4032-T6 12% Si-1% Mg	380	55	315	46	9
6061-T6 1% Mg-0.6% Si	310	45	275	40	15
7075-T6 5.6% Zn-2.5% Mg	570	83	505	73	11

Fuente: Metals Handbook, ASM Vol. 2, Properties and Selection.

De la Figura 59, la resistencia última para la aleación de aluminio seleccionado es 570 MPa y la resistencia a la fluencia 505 MPa. Analizando estos valores con las propiedades mecánicas de los de aceros para piezas de maquinaria¹¹ (597 MPa y 449 MPa respectivamente) se aprecian que ambos materiales soportan esfuerzos equivalentes.

¹⁰ Tomado de Fundural

¹¹ Tomado de Tabla AT-7. V.M.Faires. Diseño Elementos Maquina.

5.4.1 Requerimientos de diseño.

Las relaciones resistencia a peso y rigidez a peso son factores decisivos para el establecer un buen desempeño físico de la estructura tipo Gimbal. El aluminio al ser más ligero (densidad $2,8E3 \text{ g.m}^{-3}$) posee relaciones de este tipo y es estructuralmente equivalente según el tipo de aleación, a los aceros, convirtiéndolo en un buen candidato para sustituirlo (densidad $7,8E3 \text{ g.m}^{-3}$).

Con frecuencia, los elementos deben diseñarse también para resistir la corrosión, y algunas de las aleaciones conservan las características de alta resistencia a la corrosión que tiene el aluminio en estado puro. A continuación se describen las tablas de alternativas planteadas para la selección del material de los diferentes componentes.

5.4.2 Materiales estructura de rotación tipo Gimbal.

Las alternativas de materiales para la fabricación de la estructura mecánicas Gimbal Yaw, Pitch y Roll del sistema de validación se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 7. Materiales para la estructura de los Gimbal.

Aspecto	Material Estructuras Gimbal		
Alternativa	Acero ASTM A36	Acero Inoxidable 304	Aluminio 7075 - T65
Ventaja	Alta resistencia mecánica, fácilmente asequible	Alta resistencia mecánica, Resistente a la corrosión	Bajo peso, fácil mecanizar, buenas propiedades mecánicas, Buen acabado superficial.
Desventaja	Alto peso, costos de mantenimiento	Costoso, altos costes por mecanizado	Alto Costo

5.4.3 Materiales para la estructura base

La estructura base o bastidor debe ser rígida, resistente, con el peso necesario para equilibrar los movimientos y soportar el su peso de las tres estructuras gimbal (Sección 3.3). A continuación las alternativas para la selección del material.

Tabla 8. Materiales para la construcción de la estructura base.

Aspecto	Material de la Estructura Base		
Alternativa	Acero ASTM A36	Acero Inoxidable 304	Aluminio 7075 T65
Ventaja	Alta resistencia, Alto peso, bajo costo, buenas propiedades de soldabilidad, mecanizado	Alta resistencia a la corrosión, apariencia agradable	Alta resistencia a la corrosión, apariencia agradable, mantenimiento bajo o nulo
Desventaja	Costo de mantenimiento.	Alto costo.	Alto costo.

El bastidor dispone de láminas de acero laminado en caliente (HR), usadas para cubrir la estructura realizada en tubería rectangular en ASTM A36 y evitar que los elementos electrónicos estén expuestos a la intemperie (Véase Sección 3.3.4.1).

5.4.4 Materiales para los ejes.

Los ejes se diseñaron en acero inoxidable 304 debido a que este material es generalmente no magnético, y los sensores seleccionados son de tecnología analógicos, es decir realizan las lecturas por medio de señales magnéticas. Se evitó seleccionar un material con propiedades magnéticas para evitar cualquier tipo de interferencia con las señales de medida. En la figura 71 se muestran las propiedades mecánicas del acero inoxidable 304.

Figura 71. Propiedades Mecánicas Acero inoxidable

Designación del material		Condición	Resistencia a la tensión		Resistencia de fluencia		Ductilidad (porcentaje de elongación en pulgadas)
Número AISI	UNS		(ksi)	(MPa)	(ksi)	(MPa)	
Aceros austeníticos							
201	S20100	Recocido	115	793	55	379	55
		1/4 duro	125	862	75	517	20
		1/2 duro	150	1030	110	758	10
		3/4 duro	175	1210	135	931	5
		Duro total	185	1280	140	966	4
301	S30100	Recocido	110	758	40	276	60
		1/4 duro	125	862	75	517	25
		1/2 duro	150	1030	110	758	15
		3/4 duro	175	1210	135	931	12
		Duro total	185	1280	140	966	8
304	S30400	Recocido	85	586	35	241	60
310	S31000	Recocido	95	655	45	310	45
316	S31600	Recocido	80	552	30	207	60

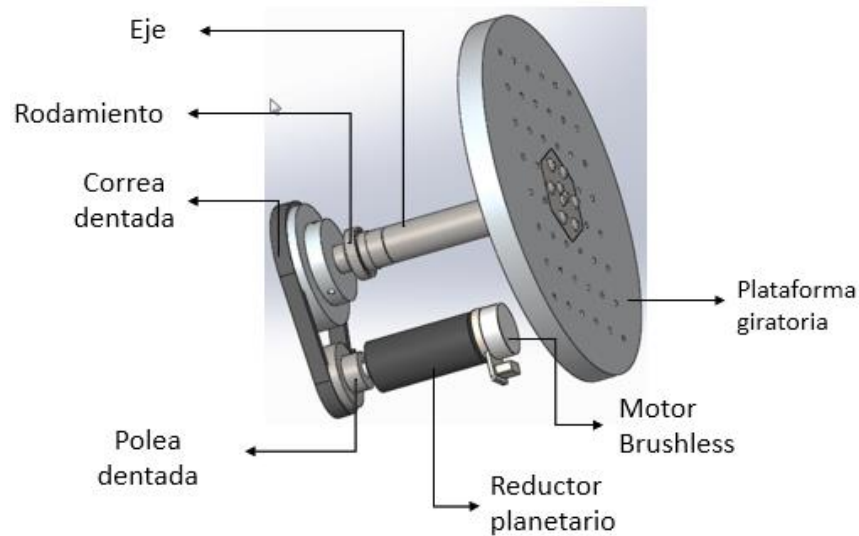
Fuente: Mott, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. 2006.

5.5 TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Considerando que los movimientos de las estructuras Gimbal deben ser precisos, es necesario que las holguras mecánicas presentes en los elementos de transmisión sea lo menor posible. A partir de esta condición y las bajas velocidades se plantea un sistema de transmisión de potencia de dos etapas de reducción: la primera etapa por reducción con engranajes planetarios y la segunda etapa, reducción con correas síncronas o dentadas. El sistema de transmisión está compuesto de un elemento motriz o motorreductor, ejes escalonados, rodamientos, poleas y correas dentadas que sirven para llevar el movimiento a las estructuras Gimbal. A continuación se describen estos componentes con los cálculos de diseño y selección. Es importante resaltar que el eje conductor será el mismo eje de salida del motorreductor y el eje conducido es un elemento mecánico adicional que conecta los movimientos con las estructuras de rotación Gimbal.

El sistema de validación tipo Gimbal cuenta con tres (3) transmisiones de potencia iguales en componentes, con diferentes requerimientos de operación. En la Figura 72 se muestra de forma general una de las configuraciones que resulta de la integración de estos elementos.

Figura 72. Componentes transmisión de potencia



- Requerimientos de la transmisión.
 - Precisión en la transmisión, eficiente y silenciosa.
 - Holgura reducida.
 - Motores buena relación peso/potencia.
 - Velocidad de salida 3-10 [RPM] en todas las estructuras Gimbal.
 - Alta resolución de posicionamiento de las estructuras Gimbal.
 - Potencia 9, 39, 80 Watts.
- Dimensionamiento de la transmisión.

Para determinar el valor estimado de la potencia es necesario conocer la carga que va a mover cada motor; para esto se determinó el peso aproximado que tendrán las estructuras Gimbal Yaw, Pitch y Roll, mediante el uso del software de diseño CAD, Solidworks. Estos cálculos fueron determinados con la herramienta de medición de propiedades físicas, estableciendo el material de fabricación de cada pieza. Al configurar el material podrán calcularse las propiedades físicas (densidad

del material, peso, volumen, etc.) del sólido modelado. Cabe destacar que estos cálculos son netamente teóricos, pero sirven de referencia para el cálculo que se requiere.

Las ecuaciones empleadas para la realización de estos cálculos se describen a continuación.

$$T = F * d \quad (1)$$

Donde:

T , Torque de carga en [N. m]

F , Fuerza en [N]

d , Distancia en [m]

$$T_{total} = T_{dinamico} + T_{carga} \quad (2)$$

El componente par dinámico producido por aceleración/desaceleración de un momento constante de inercia (la velocidad del motor se modifica en Δn [RPM] en el momento Δt [s], siendo J constante) es:

$$T_{dinamico} = J * \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (3)$$

$$T_{carga} = T \quad (4)$$

Donde:

T_{total} , Torque total en [N. m]

J , Momento de inercia en [$Kg. m^2$]

$\Delta\omega$, Rago Velocidad angular [$\frac{rad}{s^2}$]

Δt , Tiempo de estabilización [s]

ω , Velocidad angular [$\frac{rad}{s^2}$]

$$P = T_{total} * \omega \quad (5)$$

Mediante la ecuación (5) se determina la potencia en unidades [Hp] que requiere cada estructura Gimbal, para cumplir con los requerimientos de diseño. Una vez conocida la potencia, se realiza la búsqueda de los elementos comerciales que cumplan con las condiciones de operación. Estos cálculos se detallan en el anexo A.

5.5.1 Motorreductor

Debido a los requerimientos de repetibilidad del sistema de validación (Sección 2.1.2); se requiere un motorreductor DC, compacto, bajo nivel acústico, alto rendimiento, baja velocidad, holgura mecánica del reductor la menor posible.

Existen muchos tipos de motores DC en el mercado con características particulares cada uno. En la Tabla 9 se describen diferentes tecnologías de motores DC.

Tabla 9. Tecnologías de motores DC.

	Pros	Contras	Aplicaciones
Motores de pasos	Económico, puede ejecutar en lazo abierto, buen torque de eje inferior, limpio	Ruidoso y resonante, torque de alta velocidad mediocre, no apto para ambientes calientes, no apto para cargas variables	Posicionamiento, micro movimientos
Servomotores de Escobillas DC	Económico, velocidad moderada, buen torque de eje inferior, drivers simples	Requiere mantenimiento, no es limpio, las chispas de las escobillas causan EMI ¹² y peligro en ambientes explosivos	Control de velocidad, control de posición a alta velocidad
Servomotores sin Escobillas	No requiere mantenimiento, larga vida, sin chispas, altas velocidades, limpio, silencioso, ejecuta sin calentarse	Drivers caros y complicados	Robótica, tomar y colocar, aplicaciones de alto torque

Fuente: National Instruments. Elementos de motores y mecánicos. [En línea].
 <<http://www.ni.com/white-paper/3367/es/>>. [Citado 9 Agosto de 2013].

Después de evaluar las características de cada tecnología, la revisión del estado del arte de los sistemas de rotación y los requerimientos establecidos para el control de movimiento del sistema de validación propuesto (ver Sección 2.1.2), se define los motores DC sin escobillas (Motores Brushless) los adecuados para esta aplicación, principalmente por su facilidad de regulación continua de la velocidad del eje, su buen comportamiento en el control electrónico y su gran precisión.

¹² Interferencia Electromagnética (EMI)

5.5.1.1 Alternativas de velocidad de los motores brushless

Comercialmente se disponen de los siguientes motores Brushless, de acuerdo a la velocidad de salida.

➤ Motor de $RPM \leq 2000$

- Este tipo de motores son poco asequibles comercialmente
- Dimensionalmente grande y pesados (3 – 5 kg)
- Alto costo.
- Velocidades disponibles entre 1300 a 1750 [RPM].

➤ Motores $3000 \leq RPM \leq 9000$

- Asequible comercialmente
- Dimensiones y pesos menores (0.8 – 2.1 kg)

En toda máquina que involucra un movimiento definido, es necesario establecer un mecanismo de multiplicación o reducción de los parámetros de funcionamiento. Dentro de esos parámetros encontramos que el sistema de validación propuesto debe simular giros en rangos de velocidad angular de 3 – 10 [RPM].

Los rangos de velocidad de los motores comercialmente son mayores a 1300 [RPM], por tal motivo se debe establecer etapas de reducción para lograr las velocidades propuestas en el proyecto de grado. A continuación se mencionan los mecanismos o reductores disponibles comercialmente que garantizan un posicionamiento de precisión:

- Reductores de engranajes rectos de alta precisión.
- Reductores de engranajes helicoidales.

- Reductores tornillo sin fin-corona.
- Reductores planetarios.
- Reducción por correas síncronas o HTD.
- Reductor Harmonic drive.

Una reducción por medio de elementos mecánicos es tal vez la forma más sencilla de obtener los valores deseados, pero también se puede lograr realizando un control de voltaje al motor, dentro de los rangos establecidos por el fabricante, que en algunos casos es el 20% del voltaje nominal del motor, esto con la intención de conservar las especificaciones del motor. Después de analizar las configuraciones que pueden realizarse con los dos tipos de motores anteriormente mencionados, se establecen dos alternativas para la transmisión del movimiento en el sistema de posicionamiento preciso y control de velocidad.

Tabla 10. Configuración de la transmisión mecánica

Alternativa		Precisión	Precio
1	Motor Brushless bajas revoluciones	++*	Alto
	Dos etapas de reducción por correas HTD	+	Alto
2	Motor Brushless de revoluciones media revoluciones	++	Bajo
	Reductor planetario + reducción por correas síncronas	++	Alto

Después de realizar un análisis de las especificaciones técnicas finales que se obtienen a partir de la transmisión mecánica y la relación costo/beneficio, además del dimensionamiento mecánico que conlleva cada una de estas configuraciones, se establece la segunda configuración como la alternativa con mejores beneficios.

* ++ = Alta + = Media

5.5.1.2 Parámetros para la selección de motores Brushless¹³

En la selección del motor DC es necesario conocer detalladamente los siguientes criterios:

- Con que par (pico de par máximo, M_{max} y el par efectivo/medio, MRMS)
- A qué velocidad (máxima y mínima) ha de moverse la carga. Que valores tienen las inercias de las masas y cuanto duran los intervalos de movimientos de la carga, para conocer el tipo de funcionamiento (continuo, intermitente, reversible)
- Si el tipo de accionamiento es directo o se van usar correas, engranajes, tornillos sin fin y similares, esto con el fin de considerar los parámetros del accionamiento en el eje del motor. Comprobar los requisitos de alimentación: cuál es el máximo voltaje disponible en las terminales del motor, que limitaciones hay en cuanto a la corriente, cual es la corriente pico.
- Cuál es el diámetro y la longitud máxima que debe tener el accionamiento (motor brushless), incluido el reductor y el encoder.
- Condiciones ambientales (temperatura, humedad, tipo de anclaje y de refrigeración).

De acuerdo a los parámetros de selección del motor DC y las configuraciones propuesta (Sección 3.5.1.2) se definen los parámetros para la selección de los motores del banco de validación Gimbal como:

- **Velocidad:** según los resultados obtenidos de las diferentes pruebas modeladas con los algoritmos matemáticos, la CIC observa que los problemas en

¹³ Tomado de <http://www.maxonmotor.es/>

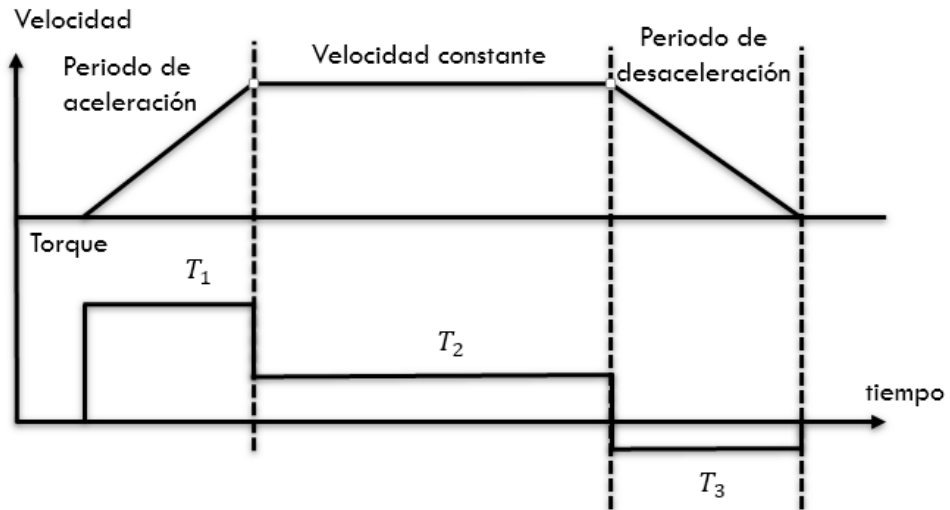
los resultados se han presentado a bajas velocidades del módulo de medición inercial de la herramienta ITION, por lo tanto, el rango de velocidades que se requiere validar es de 3 – 10 [RPM].

Mecánicamente se obtiene una velocidad en el eje de salida de la segunda etapa de transmisión de 13 [RPM]. Luego se realiza un control de velocidad a los motores para obtener los rangos de velocidades establecidos. Debido a las características de linealidad que presentan los motores brushless Maxon se puede controlar hasta un 40% del Duty Cycle.

- **Torque:** siendo la carga y el actuador elementos físicos con masa, siempre se necesitará un torque dinámico para mover la carga en la aceleración y para frenar la carga en la desaceleración, además de la resistencia normal de la carga (peso). Por tal motivo el torque requerido por el motor se rige por la ecuación (2) descrita en el dimensionamiento de la transmisión. Véase Anexo A para un mejor detalle de estos cálculos.

A Continuación se muestran los perfiles de velocidad y de torque teóricos a los que estarán expuestos los tres motores brushless de las diferentes estructuras Gimbal.

Figura 73. Perfil de Velocidad y Torque de los Motores



A partir de la Figura 73 se observa que el mayor requerimiento de torque que necesita realizar el motor es durante el arranque o periodo de aceleración, por esta razón el torque que debe entregar el sistema de accionamiento a las estructuras Gimbal debe ser mayor que el torque resistivo y se puede determinar como la suma del torque durante el periodo de aceleración (T_1) y del torque resistivo (T_2) que se presenta durante el periodo a velocidad constante y se recomienda aplicar al motor un factor de seguridad entre 20 a 100%. Por consideraciones prácticas se aplicó un factor de seguridad de 60%.

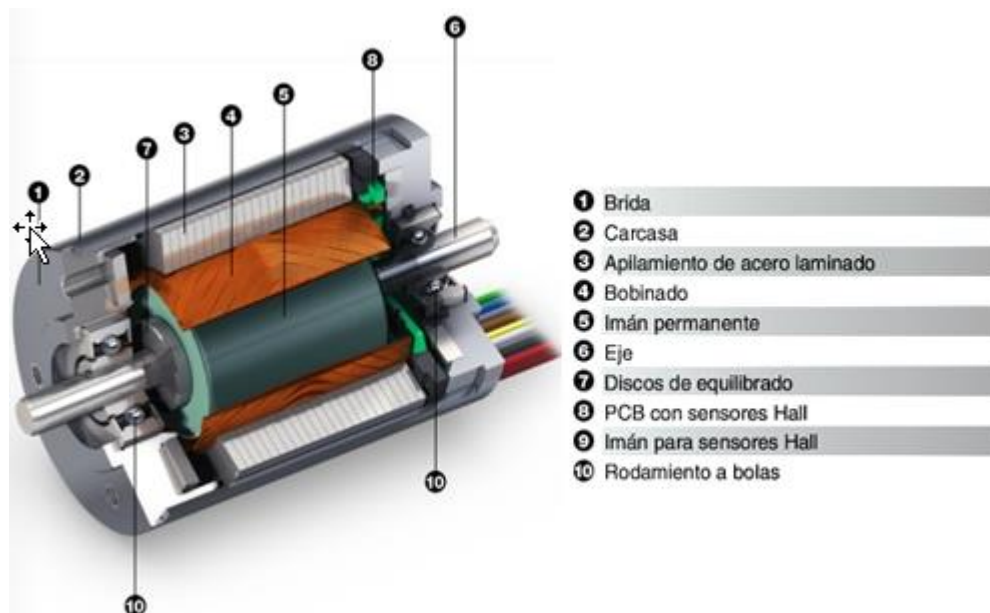
- **Potencia:** la potencia eléctrica del motor se calcula a partir del torque necesario para mover la estructura mecánica y la velocidad con la que se mueve las estructuras Gimbal. Véase Anexo A.
- **Voltaje:** Debido a los recursos de Corriente continua disponibles en las instalaciones de la CIC, se desea seleccionar un motor a 24 voltios.

- **Dimensiones:** De acuerdo al dimensionamiento básico establecido para las estructuras tipo Gimbal se define una longitud del motorreductor menor o igual a 120 mm y sección transversal menor o igual 90 mm.

5.5.1.3 Motor brushless

Es un motor eléctrico de corriente continua sin escobillas, a diferencia de un motor DC con escobillas, su mecanismo de conmutación (cambio de polaridad) se realiza de manera electrónica, sin contacto mecánico.

Figura 74. Motor Brushless



Fuente: Catalogo Maxon 2012-2013.

Se seleccionaron tres (3) motores Brushless para el accionamiento de las estructuras Gimbal Roll, Gimbal Pitch y Gimbal Yaw. Los motores DC electrónicamente conmutados (brushless DC) se destacan particularmente por sus excelentes características de par, buena disipación de calor, línea velocidad-par

largamente lineal, permitiendo una excelente regulación, Elevada eficiencia alcanzando el 90%, muy baja constante eléctrica de tiempo y reducida inductancia, por lo tanto, mínimo ruido eléctrico, rango de velocidades muy amplio y, por supuesto, su insuperable duración en servicio. Las especificaciones de los motores Brushless seleccionados se mencionan a continuación.

La combinación del motorreductor se realizó según el sistema modular Maxon, los cuales se montan con reductoras seleccionadas desde el programa de selección en línea. Esta combinación evalúa criterios como dimensiones, carga, requerimientos de potencia y voltaje.

- **Motor estructura Gimbal Roll:** EC 45 flat Ø42.8 mm, Conmutación electrónica (Brushless), 50 Vatios, con sensores Hall

Tabla 11. Especificaciones técnicas de motor EC 45 flat Ø42.8 mm.

Valores a tensión nominal		
Tensión nominal	24	V
Velocidad en vacío	6710	rpm
Corriente en vacío	183	mA
Velocidad nominal	5250	rpm
Par nominal (máx. par en continuo)	82.7	mNm
Corriente nominal (máx. corriente en continuo)	2.32	A
Par de arranque	782	mNm
Corriente de arranque	23.3	A
Máx. rendimiento	83	%

Para más detalle de las especificaciones técnicas de los motores brushless véase el Datasheet en el ANEXO E. Ficha técnica de los motores.

- **Motor estructura Gimbal Pitch:** EC 60 flat Ø60 mm, Conmutación electrónica (Brushless), 100 Vatios, sin tapa

Tabla 12. Especificaciones técnicas de motor EC 60 flat Ø60 mm.

Valores a tensión nominal		
Tensión nominal	24	V
Velocidad en vacío	4250	rpm
Corriente en vacío	417	mA
Velocidad nominal	3740	rpm
Par nominal (máx. par en continuo)	289	mNm
Corriente nominal (máx. corriente en continuo)	5.47	A
Par de arranque	3740	mNm
Corriente de arranque	78.2	A
Máx. rendimiento	86	%

- **Motor estructura Gimbal Yaw:** EC 45 Ø45 mm, Conmutación electrónica (Brushless), 250 Vatios, con sensores Hall.

Tabla 13. Especificaciones técnicas de motor EC 45 Ø45 mm.

Valores a tensión nominal		
Tensión nominal	24	V
Velocidad en vacío	5000	rpm
Corriente en vacío	341	mA
Velocidad nominal	4300	rpm
Par nominal (máx. par en continuo)	331	mNm
Corriente nominal (máx. corriente en continuo)	7.51	A
Par de arranque	2540	mNm
Corriente de arranque	55.8	A
Máx. rendimiento	85	%

Estos motores poseen un grado de protección IP54¹⁴: Protegido contra el polvo y las proyecciones de agua. Puede penetrar polvo en cantidad no perjudicial.

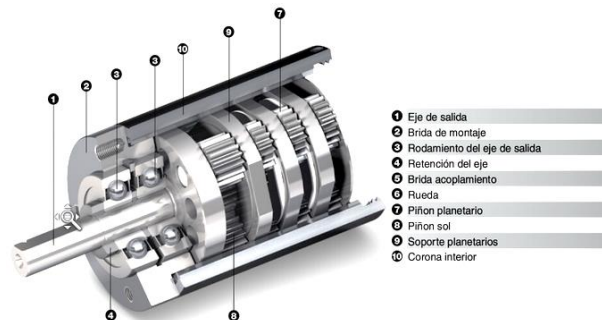
¹⁴ Nomenclatura estándar ANSI/IEC 60529-2004

5.5.1.4 _Reductor planetario

Los reductores planetarios Maxon son particularmente adecuados en la transmisión de pares elevados. La reducción del juego u holgura se consigue mediante un sistema patentado de pretensado de los piñones planetarios de la etapa de salida.

Aunque se genere desgaste durante el funcionamiento, el juego del reductor se mantiene constantemente bajo; esto contrasta con otros reductores en los que la reducción del juego se obtiene mediante una fabricación con baja tolerancia y combinación de materiales.

Figura 75. Reductor planetario de precisión.



Fuente: Catalogo Maxon 2012-2013.

El sistema de validación debe contar con alta precisión por lo tanto el elemento de transmisión de potencia debe tener características de baja holgura mecánica para no afectar la precisión y resolución del sistema. Los reductores planetarios son usados en aplicaciones donde la precisión es la directriz de mayor importancia. A continuación se muestran las especificaciones técnicas de los reductores seleccionados.

- **Reductor planetario estructura Gimbal Roll:** GP 42 B Ø42 mm, 3 - 15 Nm, versión en cerámica 230:1

Tabla 14. Especificaciones técnicas de Reductor GP 42 B Ø42 mm.

Relación de reducción	230 : 1	
Relación de reducción absoluta	8281/36	
Máx. diámetro del eje del motor	10	mm
Número de etapas	4	
Máx. par en continuo	15	Nm
Par admisible de forma intermitente a la salida del reductor	22	Nm
Sentido de giro, de motor a eje de salida	=	
Máx. rendimiento	64	%
Peso	560	g
Holgura media del reductor sin carga	1	°
Momento de inercia	15	gcm ²
Longitud del reductor (L1)	84.5	mm
Máx. potencia transmisible en continuo	55	W
Máx. potencia transmisible intermitente	80	W

- **Reductor planetario estructura Gimbal Pitch:** GP 52 B Ø52 mm, 4 - 30 Nm, versión en cerámica 156:1.

Tabla 15. Especificaciones técnicas de Reductor GP 52 B Ø52 mm.

Relación de reducción	156 : 1	
Relación de reducción absoluta	156/1	
Máx. diámetro del eje del motor	8	mm
Número de etapas	3	
Máx. par en continuo	30	Nm
Par admisible de forma intermitente a la salida del reductor	45	Nm
Sentido de giro, de motor a eje de salida	=	
Máx. rendimiento	75	%
Peso	770	g
Holgura media del reductor sin carga	1	°
Momento de inercia	9.1	gcm ²
Longitud del reductor (L1)	78.5	mm
Máx. potencia transmisible en continuo	120	W
Máx. potencia transmisible intermitente	180	W

- **Reductor planetario estructura Gimbal Yaw: GP 52 B Ø52 mm, 4 - 30 Nm, versión en cerámica 126:1.**

Tabla 16. Especificaciones técnicas de Reductor GP 52 B Ø52 mm.

Relación de reducción	126 : 1	
Relación de reducción absoluta	126/1	
Máx. diámetro del eje del motor	10	mm
Número de etapas	3	
Máx. par en continuo	30	Nm
Par admisible de forma intermitente a la salida del reductor	45	Nm
Sentido de giro, de motor a eje de salida	=	
Máx. rendimiento	75	%
Peso	770	g
Holgura media del reductor sin carga	1	°
Momento de inercia	16.4	gcm ²
Longitud del reductor (L1)	78.5	mm
Máx. potencia transmisible en continuo	150	W
Máx. potencia transmisible intermitente	220	W

5.5.1.5 Empresas distribuidoras de motores brushless DC

En la revisión de los simuladores de movimiento de dos y tres ejes de rotación disponibles comercialmente se identificaron algunas empresas comercializadoras de algunos componentes de estos sistemas de simulación (Motores Brushless, reductores planetarios, reductores de dientes rectos de precisión y encoders ópticos) los cuales facilitan el proceso de búsqueda y selección de los componentes del sistema de validación.

AEROTECH

Esta empresa está dedicada a la ciencia del movimiento y fabricación de sistemas de simulación de movimiento.

Figura 76. Brushless, Rotary DC Servomotors.



Fuente: Datasheet Brushless Rotary Servomotors Aerotech.

Características:

- Tamaños de marco estándar incluyen NEMA 17, 23, 34, 42 y IEC 142.
- Los imanes de neodimio-boro-hierro maximizan el funcionamiento.
- El diseño con estator sesgado de varios polos reduce al mínimo la ondulación de momento de rotación y suave velocidad.
- Construcción IP65 nivel opcional que permite su uso en ambientes hostiles.
- Freno opcional, sello del eje delantero, y la precisión reductores.
- Bajo nivel acústico

Sus productos son utilizados en la industria militar, aeroespacial, medica, en equipos de fabricación aditiva.

CROUZET

Fabrica componentes de automatismos en el mundo entero y en los mercados de la industria, la aeronáutica, y el transporte.

Figura 77. Motor brushless Crouzet.



Fuente: Crouzet. Brushless Motors. [Online].
<<http://www.crouzet.com/english/products/crouzet-motors/brushless-motors/brushless-dc-motors/86-mm-square-1-5-nm-continuous-with-hall-effect-sensors.htm>>. [Cited Aug. 5, 2013].

Características:

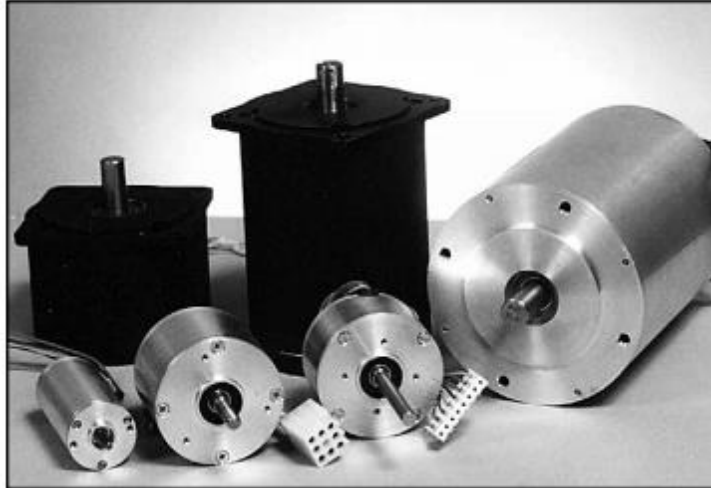
- Con reductores planetarios o angulares.
- Vida útil de 20.000 horas.
- Motores sin escobillas de alto rendimiento.
- Velocidad muy alta (50.000 rpm).
- Rendimiento superior al 80 %.
- Motores de alto par.
- Hasta IP69K.
- Bajo nivel acústico.

Estos productos son esencialmente adecuados para instrumental médico, válvulas, aplicaciones ferroviarias, control de acceso (puertas, torniquetes, puertas de ascensor...), etc.

MOOG

Moog se especializa en ofrecer motores de corriente continua de potencia fraccionaria, así como servomotores sin escobillas.

Figura 78. Motores brushless Moog.



Fuente: Catalogo Brushless DC Motors.

Características:

- Construcción de rotor para una aceleración rápida.
- Motores de 4 polos opcionales para aplicaciones de alta velocidad.
- Longitudes disponibles - 1.3 a 2.8 pulgadas y diámetro - 1,20 pulgadas.
- Pares continuos 2,4-8,6 oz-in.
- Imanes de neodimio de alta energía.
- Capacidad de alta velocidad - hasta 20.000 RPM
- Alto par.
- Bajo nivel acústico.

Estos productos son utilizados en el control de aviones militares y comerciales, satélites y vehículos espaciales, equipos médicos, aplicaciones marinas, entre otras.

MAXON MOTOR

Es proveedor líder a nivel mundial de sistemas de alta precisión y de motores de hasta 500 W.

Figura 79. Motor Maxon EC-max.



Fuente: Catalogo Maxon 2012-2013.

Características:

- Imanes de neodimio.
- Motores de alta precisión de hasta 500 W.
- Rendimiento hasta 90 %.
- Vida útil insuperable.
- Excelente capacidad de regulación.
- Conexión (cable AWG 20).
- Bajo nivel acústico.

Los motores Maxon son utilizados en tecnologías de medición y control, industria aeroespacial, tecnología de la seguridad, tecnología médica, automatización industrial, entre otras.

5.5.1.6 Holguras en la transmisión.

Aunque se consiga una resolución o precisión muy alta, ésta puede ser anulada por la holgura de la reductora y otros elementos de la transmisión. Las holguras son necesarias para el rendimiento y el funcionamiento suave de los engranajes y se hace evidente solo cuando se invierte el sentido de giro.

Como solución a estos casos se puede incluir un encoder adicional en el eje de salida, una reductora de holgura reducida (la holgura cero no existe), minimizar por software el efecto de la holgura en la inversión de giro o utilizar un servomotor directo acoplado al eje de salida del sistema de validación.

Las alternativas planteadas para dar solución al problema de holgura mecánica son las siguientes:

- El uso de correas HTD con poleas dentadas, siempre y cuando esté por debajo de las máximas fuerzas radiales que puedan soportar los cojinetes. (Bajo costo)
- El uso de engranajes de precisión (planetarios, sin fin corona, helicoidales) o de alta precisión (Harmonic drive). (Alto costo)
- El uso de un reductor con holguras considerables, es decir que puedan afectar la precisión del sistema (Económicos)
- El uso de un encoder adicional en la carga, siendo este encoder de tipo Analógico, ofreciendo excelente resolución y punto de referencia para las medidas. (Alto costo)

5.5.2 Ejes

El diseño de los ejes se fundamenta en el cálculo del diámetro requerido para asegurar su rigidez, inercia de rotación y resistencia, cuando el eje transmite potencia en las condiciones de cargas y operación establecidas. Los ejes se diseñan de sección transversal circular, huecos y macizo¹⁵.

La carga aplicada en cada estructura Gimbal es constante en el tiempo, sin embargo los esfuerzos que se producen, como consecuencia de su giro, son variables; haciendo adecuado un diseño del eje a fatiga.

El material más utilizado para árboles y ejes es el acero. Se recomienda seleccionar un acero de bajo o medio carbono y de bajo costo. Según requerimientos de la CIC de utilizar material no magnético, los ejes se diseñan en acero inoxidable 304 y su dimensionamiento se realiza a partir del criterio de teoría de fallas para carga combinada en fatiga según Soderberg y Von Mises. La falla por fatiga se reduce moderadamente mediante el incremento de la resistencia.

Los ejes se diseñaron en acero inoxidable austeníticos puesto que son no magnéticos, y los encoders analógicos seleccionados realizan sus lecturas por medio de señales magnéticas. Se prescindió seleccionar un material con propiedades magnéticas para evitar cualquier tipo de afectación con las señales de medida realizadas por el encoder analógico.

5.5.2.1 Requerimientos de diseño

Los ejes se diseñaron teniendo en cuenta los requerimientos que se mencionan a continuación.

¹⁵ Tomado y editado código ASME

- Velocidad de rotación de 3- 10 [RPM].
- Potencia de 9, 39 y 80 Watts.
- Instalación mecánica/montaje de poleas síncrona en uno de los extremos.
- Instalación mecánica/montaje en de encoders analógicos de eje hueco.
- Eje hueco para guiar los cables de alimentación entre estructuras.
- Transmisión de potencia mediante acople de sección hexagonal.
- Material No magnético—acero inoxidable.

Los ejes se diseñan a partir de los requerimientos de carga; su geometría depende del montaje de los rodamientos, y los detalles de mecanizado recomendados por el proveedor para el montaje de los encoders.

5.5.2.2 Cálculos.

En la transmisión de potencia del sistema, el eje está sometido a un par de torsión y momento flector debido al montaje de las poleas síncronas. De esta forma en el eje se desarrolla un esfuerzo cortante por torsión y flexión que deberá resistir.

Las cargas que soporta cada estructura Gimbal y las condiciones a la que opera hacen que el eje no sea crítico por carga estática, por esta razón los esfuerzos significativos para el cálculo del diámetro del eje se deben a carga cíclica. A partir de estas consideraciones el eje se diseña aplicando la teoría de fatiga según Soderberg. Para detalle de los cálculos del diámetro de los ejes Véase Anexo A.

Finalmente se diseña un eje macizo que mueve la estructura Roll, dos ejes huecos para la estructura Gimbal Pitch y un tercer eje hueco para rotar la estructura Gimbal Yaw. El propósito de los ejes huecos es guiar los cables de alimentación desde la unidad de potencia a cada uno de los motores ubicados en las estructuras de rotación. Los dos ejes que transmiten el movimiento a la estructura Pitch son huecos e idénticos.

Por consideraciones prácticas se requirió que el diámetro del eje sea mayor que el mínimo calculado, para adaptarse a un cojinete en donde la fuerza cortante sea menor o igual a la máxima carga radial que soporta el eje y para que los cambios de sección sean suaves.

5.5.2.3 Análisis estático

La solución del análisis estático se realiza con la asistencia del programa MDSolids¹⁶, el cual determina los diagramas de fuerzas cortantes (V) y momento flector (M), debido a las cargas que soporta el eje. En la Figura 80 se muestra el diagrama de carga del eje Roll

Figura 80. Diagrama de cargas eje Roll. Plano X-Y



Figura 81. Diagrama de carga eje Roll. Plano X-Z



¹⁶ Software análisis estático de elementos

A partir de los diagramas de fuerzas cortantes y momento flector (Ver Anexo A) es posible determinar la sección crítica, dando como resultado la sección más cargada en el apoyo B.

$$M_{max} = \sqrt{M_{xy}^2 + M_{xz}^2} \quad (6)$$
$$M_{max} = 20208.72 \text{ N} - \text{mm}$$

El procedimiento anterior se repite para el cálculo de todos los ejes del sistema tipo Gimbal.

5.5.2.4 Análisis de resistencia

Para el estudio de factor de seguridad se empleó el criterio de von Mises. Con este estudio virtual se validó el comportamiento mecánico que experimentan los ejes Roll, Pitch y Yaw, mostrando que el eje está diseñado con un factor de seguridad FDS igual o mayor al calculado mediante los métodos analíticos.

Este resultado garantiza que los ejes soporten los esfuerzos a los que están sometidos, en condiciones de operación. Los resultados de deformaciones muestran que los valores máximos de desplazamiento en uno de los ejes es 1.95E-02 mm, lo cual es pequeño comparado con el porcentaje de elongación que presenta este el material (40 % en 50 mm) con el cual está diseñado el eje: acero inoxidable AISI 304.

Los resultados obtenidos están entre los valores esperados por lo que el diseño de los ejes se considera apto. El diseño de todos los ejes es verificado con el uso de módulo Solidworks Simulation. Véase Anexo E.

5.5.3 Poleas y Correas

Son los elementos mecánicos encargados de transmitir la tracción desde el eje del motor al eje Yaw, Pitch y Roll de las estructuras de rotación Gimbal. Mediante el desarrollo del proyecto se analiza el sistema de transmisión de potencia como un elemento vital para el funcionamiento de cada subsistema Gimbal. Durante la realización de la investigación sobre estos elementos y analizando los problemas visualizados por el equipo de profesionales de la CIC, se determina que el sistema de transmisión debe contar con alta precisión en el movimiento, lo cual hace el proceso de búsqueda complejo. Como se define en uno de los numerales anteriores, se trabajó con un sistema de reducción de velocidad compuesto de dos elementos: motorreductor y sistema de transmisión por poleas.

5.5.3.1 Tipo de Correas y Poleas

Al evaluar los sistemas de transmisión de potencia, se determina seleccionar poleas y correas dentadas. Este sistema de transmisión cuenta con las siguientes ventajas en su aplicación:

- Tienen un buen comportamiento a bajas como a altas velocidades.
- No requieren lubricación.
- No se estiran.
- No existe contacto entre metales.
- Presentan bajo peso.
- Es silencioso.
- Compacto.
- Eliminan el patinaje.
- Velocidad constante.

- Presentan baja falla por desgaste.
- No requieren gran tensión inicial.
- Baja carga sobre los ejes por tensado.
- Son flexibles.
- Resistentes al alargamiento.
- Diseñadas y fabricadas con alta precisión.
- Alta precisión en transmisión de movimiento.

5.5.3.2 Requerimientos de diseño

Teniendo en cuenta los motores anteriormente seleccionados y los ejes calculados, se definen los requerimientos para poder realizar el proceso de selección de las correas

- Potencia de requerida: 9, 39 y 80 Watts.
- Velocidad motriz o de entrada: 20 y 30 RPM.
- Velocidad requerida o de salida: 10 RPM.
- Distancia entre centros: máx. 120 mm para Yaw y 100 mm para Roll y Pitch.

5.5.3.3 Proceso de selección

En este numeral se explica el proceso de selección del sistema de poleas y correas dentadas según el catálogo de selección de la empresa INTERMEC S.A., debido a la posibilidad de establecer un canal de información rápido con los proveedores en la ciudad. Es importante recordar que para el proceso transmisión del movimiento se había seleccionado con anterioridad correas de tipo sincrónicas

debido a la precisión del movimiento que estas ofrecen. A continuación se numera el paso a paso del proceso:

1. Requerimientos del sistema de transmisión (hp, velocidad, diámetros de los ejes, distancia entre centros y tipo de maquina a impulsar) y cálculo de la potencia de diseño.

Tabla 17. Requerimientos del sistema de transmisión por correas.

EJE	POTENCIA A TRANSMITIR [W]	DIAMETRO DE EJES [MM]	POTENCIA A TRANSMITIR [HP]	FACTOR DE SERVICIO	POTENCIA DE DISEÑO	VELOCIDAD POLEA PEQUEÑA [RPM]
YAW	80,00	12,00	0,11	1,70	0,18	25
		49,50				
PITCH	39,00	12,00	0,05			
		38,00				
ROLL	9,00	12,00	0,01			
		23,00				

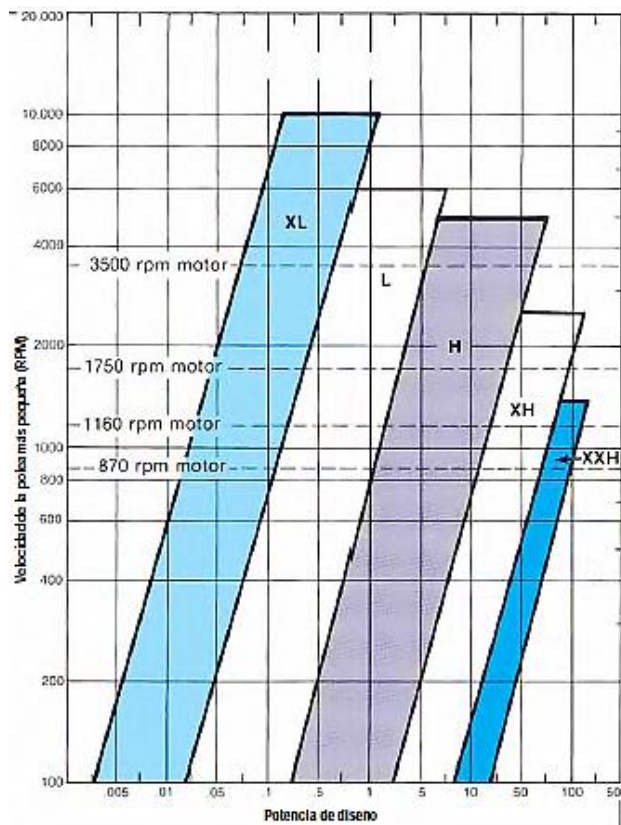
En la Tabla 17 se muestran los datos iniciales para poder realizar los cálculos del proceso de selección. Los valores de potencia y diámetros de los ejes se calculan en el Anexo A. Se define un factor de servicio de 1,7 para el cálculo de la potencia de diseño debido a que, siendo un sistema de validación de precisión, se decide trabajar con el mismo factor de servicio de una máquina herramienta como una fresadora. El cálculo de la potencia de diseño se realiza bajo la ecuación 7.

$$Pot_{diseño} = f_s * Pot_{transmitida} \quad (7)$$

2. Selección del paso de la correa según la potencia de trabajo y cálculo de la relación para la reducción de velocidad.

A partir de la potencia de diseño, calculada en el paso anterior, y teniendo como referente la velocidad de cada uno de los motorreductores o como se denota en el catálogo de Intermec “la velocidad de la polea más pequeña”, se accede a la gráfica de la Figura 82 y se ubica el punto de selección del paso de la correa. Al acceder con todas las velocidades por debajo de 100 rpm, se trabaja partiendo de ese límite.

Figura 82. Grafica de selección del paso de la correa



Fuente: Intermec. Manual de selección transmisiones por correas dentadas de tiempo y síncronas.

Como conclusión de ese paso, se muestran los tipos de pasos de correa según sea el caso de cada eje en la Tabla 18. Resultados de la selección del paso de la correa. En la selección de la correa del eje Yaw es posible escoger tipo L o tipo H debido a que, con los valores de potencia se encuentra en el límite entre las dos.

Tabla 18. Resultados de la selección del paso de la correa

EJE	POTENCIA DE DISEÑO [HP]	VELOCIDAD POLEA PEQUEÑA [RPM]	TIPO DE CORREA PASO
YAW	0,18	25	H
PITCH	0,08	20	L
ROLL	0,02	20	L

Para el cálculo de la relación de velocidades de cada eje la velocidad del eje de salida o eje conducido debe ser aproximadamente de 10 rpm y teniendo velocidad del eje conductor como el valor del eje motriz el referenciado en la Tabla 17, es calculado a partir de la ecuación siguiente:

$$i = \frac{RPM_{conductor}}{RPM_{conducido}} \quad (8)$$

A partir de los cálculos para cada eje, tenemos entonces los siguientes valores de reducción de velocidad.

Tabla 19. Relación de velocidades para cada eje

Relación de velocidad	EJE		
	Yaw	Pitch	Roll
i	2,5	2	2

3. Selección de las poleas a utilizar para los requerimientos de transmisión.

A partir de estos datos, se busca entre las relaciones de transmisión estándar del catálogo de Intermec, pero debido a los grandes diámetros de poleas que se encontraban en estas transmisiones, se establece una búsqueda manual de cada una de las poleas y correas.

Se inicia buscando las poleas de acuerdo a los valores mínimos sugeridos por el fabricante en cuanto a la cantidad de dientes y diámetros, estos valores son mostrados en la Tabla 20 pero finalmente, debido al rango de velocidades tan bajo a manejar, solo se sigue esta recomendación para los ejes pitch y roll.

Tabla 20. Valores mínimos de poleas establecidos por Intermec

DIAMETRO MINIMO DE POLEA DE TIEMPO RECOMENDADO			
Paso	RPM	Número dientes	Diametro exterior
1/5" pulg (XL)	3.500	12 XL	18,8 mm
	1.750	11 XL	17,2 mm
	1.160	10 XL	15,6 mm
3/8" pulg (L)	3.500	16 L	47,8 mm
	1.750	14 L	41,7 mm
	1.160	12 L	35,6 mm
1/2" pulg (H)	3.500	20 H	79,5 mm
	1.750	18 H	71,4 mm
	1.160	16 H	63,3 mm
7/8" pulg (XH)	1.750	26 XH	181,2 mm
	1.160	24 XH	167,0 mm
	870	22 XH	152,8 mm
1-1/4" pulg (XXH)	1.750	26 XXH	259,7 mm
	1.160	24 XXH	239,5 mm
	870	22 XXH	219,3 mm

Fuente: Intermec. Manual de selección transmisiones por correas dentadas de tiempo y síncronas.

A su vez, se plantea la ecuación de la longitud de la correa (ver ecuación 9) para poder seleccionar la longitud adecuada y la distancia entre centros requerida por el diseño. Este cálculo fue un proceso iterativo revisando las dimensiones de las poleas, la distancia entre centros y la longitud de la correa.

$$L_p = 2C + 1,57(D + d) + \frac{(D + d)^2}{4C} \quad (9)$$

Donde:

L_p = largo de la correa en [in]

D = diámetro de la polea mayor en [in]

d = diámetro de la polea menor en [in]

C = distancia entre centros en [in]

De este proceso iterativo de selección, en la Tabla 21 se muestran los resultados del proceso y las poleas y correas seleccionadas hasta este paso. En cuanto a los diámetros de las poleas del eje Yaw, estas se seleccionaron teniendo en cuenta que el tiempo de servicio de la polea se disminuye debido a los requerimientos de dimensiones del sistema de transmisión, y también se toma esta decisión dado que el rango de velocidades estará por debajo de los límites mínimos sugeridos por el fabricante.

Tabla 21. Resultados del proceso de selección de las correas y poleas.

EJE	DISTANCIA ENTRE CENTROS [IN]	LONGITUD DE LA CORREA [IN]	TIPO DE CORREA PASO	No. DE DIENTES	DIENTES POLEA	DIAM. POLEAS [IN]
YAW	4,67	22,00	H	44	14	2,2
					35	5,5
PITCH	3,67	16,50	L	44	16	1,9
					32	3,8
ROLL	3,67	16,50	L	44	16	1,9
					32	3,8

4. Selección del ancho de la correa.

Para finalizar el proceso de selección, se procede a determinar el ancho de la correa necesario para transmitir la potencia requerida. Se buscan los valores de las poleas más pequeñas en las tablas del catálogo, y se establecen las dimensiones del ancho para las correas. La Tabla 22 muestra los datos del ancho de las correas y poleas y especifica las referencias de los elementos a adquirir para el sistema de transmisión por correas dentadas.

Tabla 22. Referencias de las correas y las poleas a adquirir.

EJE	LONG. DE LA CORREA [IN]	PASO	No. DE DIENTES	POT. POR IN DE ANCHO [HP]	ANCHO TEORICO [IN]	ANCHO COMERCIAL [IN]	REF. DE LA CORREA	POLEA	REF. DE LA POLEA
YAW	22,00	H	44	0,25	0,74	0,75	220H-075	YAW-1	14H-075
								YAW-2	35H-075
PITCH	16,50	L	44	0,08	1,00	1,00	165L-100	PITCH-1	16L-100
								PITCH-2	32L-100
ROLL	16,50	L	44	0,08	0,23	0,50	165L-050	ROLL-1	16L-050
								ROLL-2	32L-050

5.5.4 Rodamientos

Para asegurar un enlace móvil entre los ejes de rotación y las estructuras mecánicas Gimbal se emplean rodamientos rígidos a bolas, que soportan las cargas radiales generadas durante el movimiento.

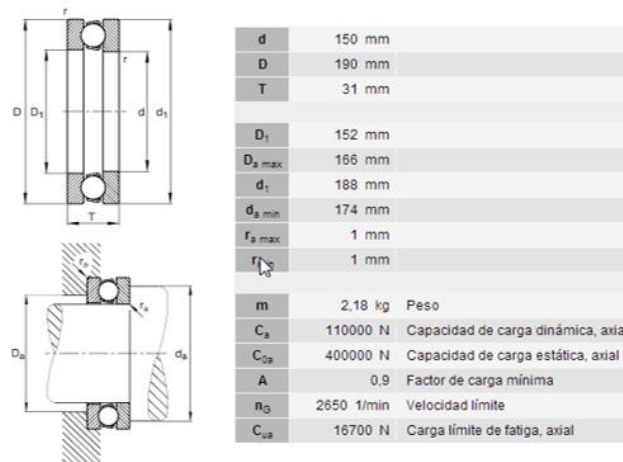
El ancho de los rodamientos determinó las dimensiones de la cavidad en la cual deben ir instalados estos elementos de apoyo, por esta razón las láminas de

aluminio 7075 – T6 deberían contar como mínimo con un espesor de 15 mm que garanticen el montaje de los rodamientos radiales seleccionados. A continuación se describen los tipos de rodamientos empleados en el sistema mecánico tipo Gimbal, de acuerdo a su funcionalidad.

5.5.4.1 Rodamientos. Axiales de bolas, de simple efecto

La selección del rodamiento se realiza como sistema de apoyo axial para el giro de las plataformas y balance dinámico que deben tener las estructuras mecánicas Gimbal Yaw y Roll, con la intención de disminuir el cabeceo que pueden presentar la plataforma circular (sección 3.3.1.2) y placa rectangular (sección 3.3.3.2) pertenecientes a las estructuras Gimbal. El montaje de los rodamientos axiales se hace en la estructura Gimbal externa a la del movimiento. Las especificaciones se muestran en la siguiente figura.

Figura 83. Rodamientos axiales a bolas 51130 de simple efecto, despiezable¹⁷



Fuente: Schaeffler. Rodamiento axial 51130. [En línea]. <http://medias.schaeffler.de/medias/en!hp.ec.br.pr/511*51130-MP>. [Citado 15 Noviembre de 2013].

¹⁷ Medidas Principales Según DIN 711/ISO 104

Fueron seleccionados dos rodamientos axiales 51130, puesto que sus dimensiones externas brindan mayor área de apoyo a las plataformas giratorias. El procedimiento de selección del rodamiento axial fue de acuerdo a la mayor área contacto posible entre las estructuras de rotación y no por carga estática o dinámica. En la Figura 84 y 85 se muestra el alojamiento de los rodamientos axiales. El montaje del rodamiento de la Figura 84 permite el giro de la estructura Gimbal Roll y el montaje de la Figura 85 permite el giro de la estructura Gimbal Yaw.

Figura 84. Montaje de rodamiento en estructura Pitch

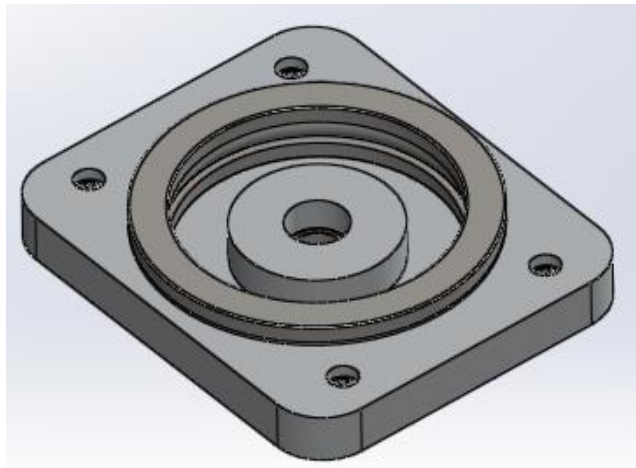
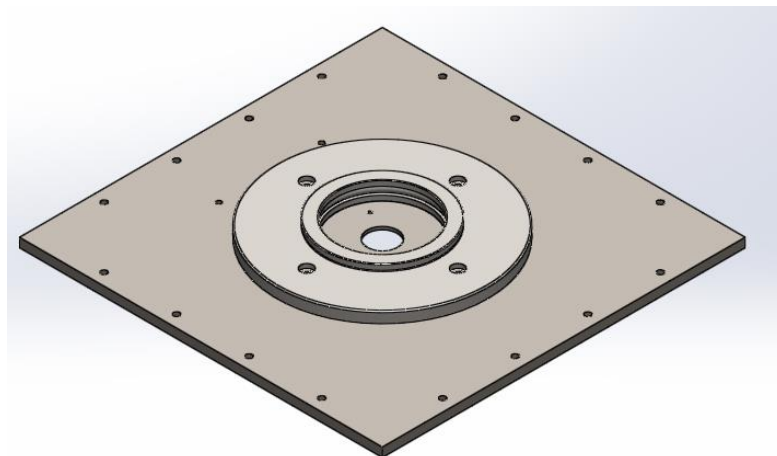


Figura 85. Montaje de rodamiento en estructura Base



5.5.4.2 Rodamientos Radiales

Elementos de apoyo para soportar las cargas generadas por el motor al momento de transmitir la potencia. Estos rodamientos se apoyan en cavidades realizadas a las placas que hacen parte de la estructura en U del eje de rotación Pitch.

Figura 86. Ubicación de los rodamientos radiales en el eje Roll



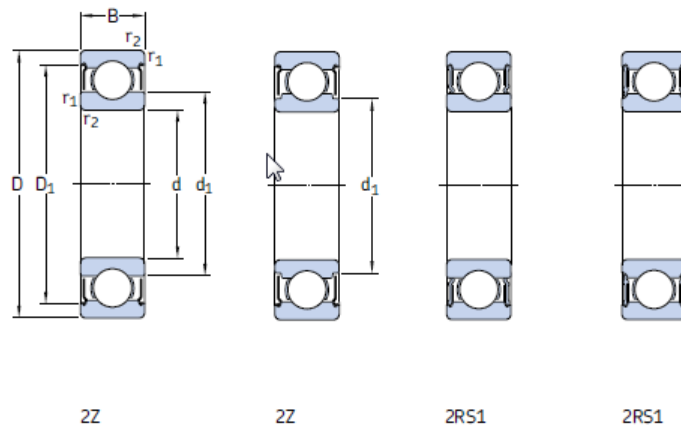
Todos los rodamientos se seleccionaron por carga dinámica. Los rodamientos del eje Roll se seleccionaron para soportar cargas radiales y axiales, los rodamientos del eje Pitch y el eje Yaw se calcularon solo bajo cargas radiales. Los rodamientos radiales a bolas fueron seleccionados marca SKF y NSK y finalmente fueron adquiridos en marca ACE al igual que los rodamientos axiales.

Los rodamientos seleccionados fueron los siguientes:

- **Eje macizo Roll:** De acuerdo al diámetro del eje, y las cargas a soportar se seleccionó el rodamiento a bolas 61905. El procedimiento para la selección es el siguiente:
 - Cálculo de la carga dinámica que debe soportar el rodamiento: $C_r = 2941 \text{ N}$

- Determinación del diámetro interno del rodamiento que debe ser mayor al diámetro mínimo del eje ($d_{\min} = 17 \text{ mm}$). Finalmente se considera el diámetro interno del rodamiento $d = 25 \text{ mm}$ para que el eje de rotación tenga cambios de sección suaves.
- Del grupo de rodamientos mostrados en las tablas del catálogo SKF es seleccionado el rodamiento que satisface el valor de carga dinámica, es decir el que tiene una capacidad de carga dinámica superior a la requerida.

Figura 87. Rodamiento radiales rígido a bolas 61905.



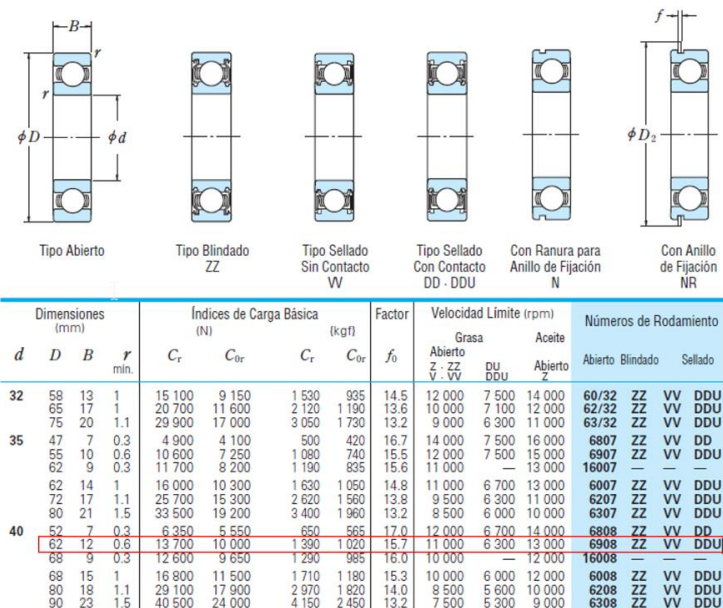
Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm	kg	-	
25	42	9	5,92	4,15	0,193	-	10 000	0,047	W 61905-2RS1
	47	12	8,52	5,7	0,25	32 000	16 000	0,08	W 6005-2Z
	47	12	8,52	5,7	0,25	-	9 500	0,08	W 6005-2RS1
	52	15	11,9	7,65	0,335	28 000	14 000	0,13	W 6205-2Z
	52	15	11,9	7,65	0,335	-	8 500	0,13	W 6205-2RS1

Fuente: Catalogo SKF

- **Eje hueco Pitch:** se seleccionaron dos rodamientos por cada eje, para un total de 4 rodamientos. Además se adicionaron 2 rodamientos para el montaje de la estructura Gimbal Pitch en los ejes huecos. Los rodamientos radiales a bolas fueron seleccionados marca SKF y finalmente adquiridos en marca ACE, referencia 61908. El procedimiento para la selección de los rodamientos de este eje son los siguientes:

- Calculo de la carga dinámica que debe soportar el rodamiento: $C_r = 6820 \text{ N}$
- Determinación del diámetro interno del rodamiento que debe ser mayor al diámetro ($d = 30 \text{ mm}$). Finalmente se considera el diámetro interno del rodamiento $d = 40 \text{ mm}$ para que el eje tenga cambios de sección suave.
- Del grupo de rodamientos mostrados en las tablas del catálogo NSK es seleccionado el que tiene una capacidad de carga dinámica superior a la requerida.

Figura 88. Rodamiento radiales rígido a bolas 61908.



Fuente: Catalogo de NSK

- **Eje hueco Yaw:** Fueron seleccionados dos rodamientos radiales a bolas, marca ACE, referencia 6008. El procedimiento de selección de este rodamiento es igual al anterior variando solo la carga dinámica que tiene que soportar; siendo este valor $C_r = 14825$ [N]. El resultado del grupo de rodamientos del catálogo NSK es el siguiente.

Figura 89. Rodamiento rígido a bolas 6008

Dimensiones (mm)				Índices de Carga Básica (N)				Factor f_0	Velocidad Límite (rpm)			Números de Rodamiento			
d	D	B	r mín.	C_r	C_{0r}	C_r	C_{0r}		Grasa		Aceite	Abierto	Blindado	Sellado	
						(kgf)		Z - ZZ	DU	Abierto					
								V - VV	DDU	Z					
32	58	13	1	15 100	9 150	1 530	935	14.5	12 000	7 500	14 000	60/32	ZZ	VV	DDU
	65	17	1	20 700	11 600	2 120	1 190	13.6	10 000	7 100	12 000	62/32	ZZ	VV	DDU
	75	20	1.1	29 900	17 000	3 050	1 730	13.2	9 000	6 300	11 000	63/32	ZZ	VV	DDU
35	47	7	0.3	4 900	4 100	500	420	16.7	14 000	7 500	16 000	6807	ZZ	VV	DD
	55	10	0.6	10 600	7 250	1 080	740	15.5	12 000	7 500	15 000	6907	ZZ	VV	DDU
	62	9	0.3	11 700	8 200	1 190	835	15.6	11 000	—	13 000	16007	—	—	—
	62	14	1	16 000	10 300	1 630	1 050	14.8	11 000	6 700	13 000	6007	ZZ	VV	DDU
40	72	17	1.1	25 700	15 300	2 620	1 560	13.8	9 500	6 300	11 000	6207	ZZ	VV	DDU
	80	21	1.5	33 500	19 200	3 400	1 960	13.2	8 500	6 000	10 000	6307	ZZ	VV	DDU
	52	7	0.3	6 350	5 550	650	565	17.0	12 000	6 700	14 000	6808	ZZ	VV	DD
40	62	12	0.6	13 700	10 000	1 390	1 020	15.7	11 000	6 300	13 000	6908	ZZ	VV	DDU
	68	9	0.3	12 600	9 650	1 290	985	16.0	10 000	—	12 000	16008	—	—	—
	68	15	1	16 800	11 500	1 710	1 180	15.3	10 000	6 000	12 000	6008	ZZ	VV	DDU
	80	18	1.1	29 100	17 900	2 970	1 820	14.0	8 500	5 600	10 000	6208	ZZ	VV	DDU
	90	23	1.5	40 500	24 000	4 150	2 450	13.2	7 500	5 300	9 000	6308	ZZ	VV	DDU

Fuente: Catálogo de NSK

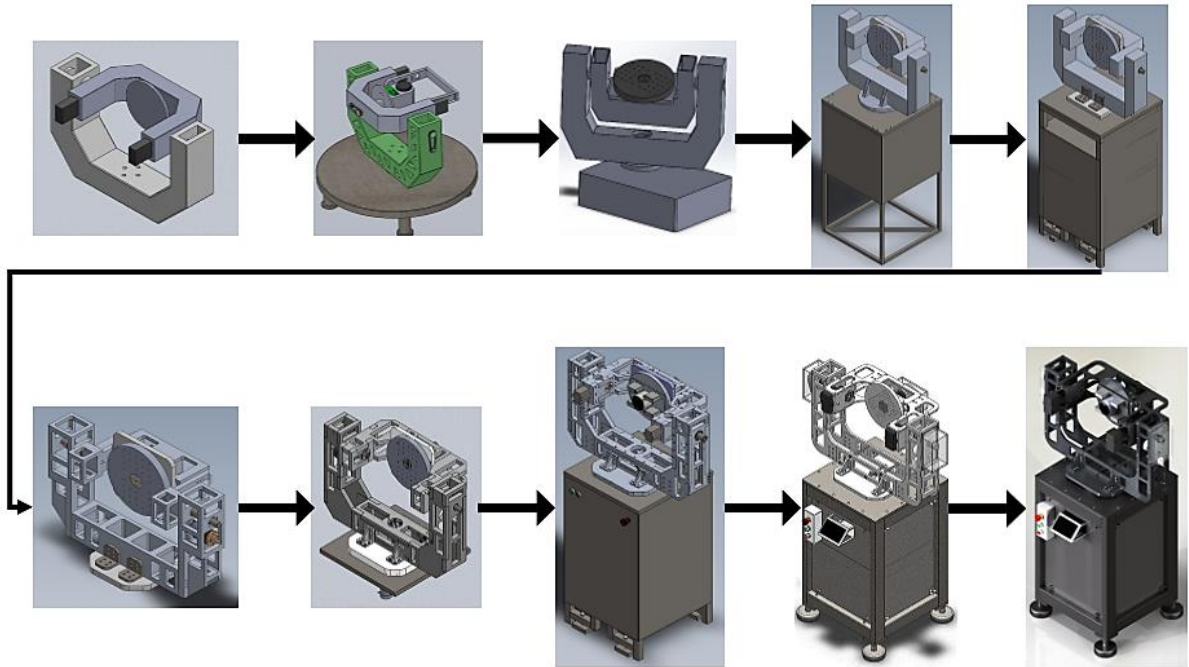
El factor de vida de fatiga (f_h) y el factor de velocidad (f_n) del rodamiento se determinan a partir de la proyección del uso de la máquina y la velocidad en [rpm]. Los rodamientos están seleccionados para un mínimo de 10.000 horas de servicio.

5.6 ETAPAS DEL MODELAMIENTO CAD

La Figura 90 muestra el desarrollo del modelamiento CAD en cada una de las etapas del diseño mecánico del sistema de validación Gimbal. El planteamiento inicial es realizado a partir de la documentación técnica de sistemas inerciales y los simuladores de movimiento que existen comercialmente. En el diseño

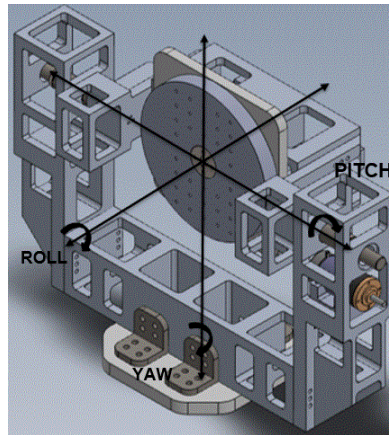
conceptual se define el diseño del sistema de validación como un mecanismo Gimbal.

Figura 90. Etapas del diseño mecánico de las estructura del sistema de validación.



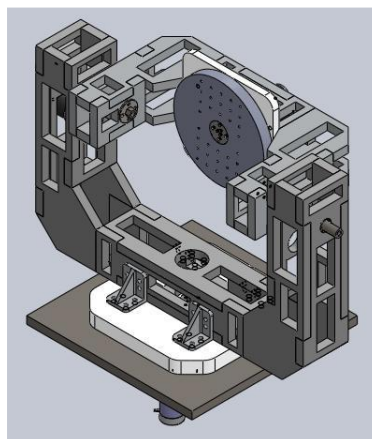
Para el desarrollo del diseño básico del mecanismo Gimbal, como primera alternativa se trabaja con lingotes rectangulares, las cuales se mecanizan hasta obtener las dimensiones deseadas. Las estructuras Gimbal en forma de U están formada por la integración de tres piezas, a las cuales se les realiza un proceso de remoción de material. Ver Figura 91. El Gimbal interno se construye a partir de dos piezas de duraluminio. Realizar el diseño a partir de esta manera tiene como ventajas una baja cantidad de piezas, la cantidad de uniones reducida implica menor error en alineación de los componentes y menor desalineamiento. Como desventaja el elevado costo del material, además se perdería material en la remoción.

Figura 91. Diseño por remoción de material.



La segunda alternativa de diseño es planteada mediante el uso de placas de duraluminio de 12 y 15 mm de espesor ensambladas por medio de guías, topes y tornillos. Ver Figura 92. Cada una de las estructuras Gimbal tendría alrededor de 10 piezas las cuales tienen ranuras para reducir su peso, el Gimbal interno se construye a partir de dos piezas rígidas del mismo material. Realizar el diseño de estos elementos tiene como ventaja un menor costo y un mejor aprovechamiento del material. Como desventaja presenta una mayor cantidad de piezas y por lo tanto mayor probabilidad de presentar dificultades en el ensamble.

Figura 92. Diseño por ensamble de placas.



Finalmente y luego de todo el proceso de selección los componentes electromecánicos, diseño básico y detallado de cada componente estructural del mecanismo Gimbal, se muestra el diseño final del sistema de validación Gimbal.

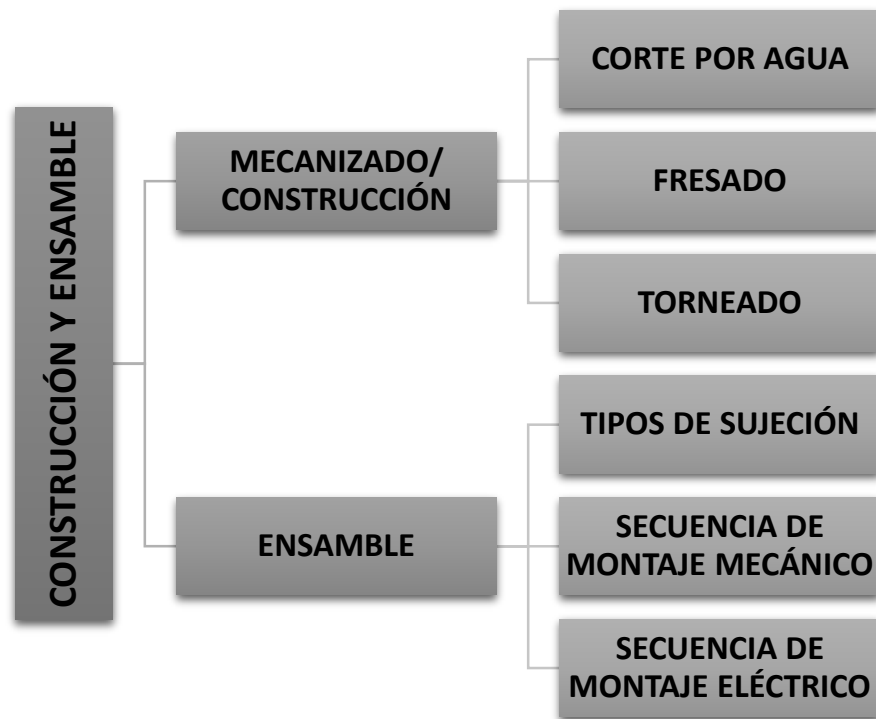
Figura 93. Diseño final del sistema de validación Gimbal



6 CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE MECÁNICO

En este capítulo se desarrolla, a modo general, todo el proceso de construcción y ensamble del sistema mecánico diseñado en el capítulo 3. Todos los procesos fueron realizados a partir de la disponibilidad tanto de materiales y de maquinaria. En la Figura 94 es posible visualizar el contenido del capítulo 4.

Figura 94. Procesos de construcción y ensamble mecánico



6.1 CONSTRUCCIÓN

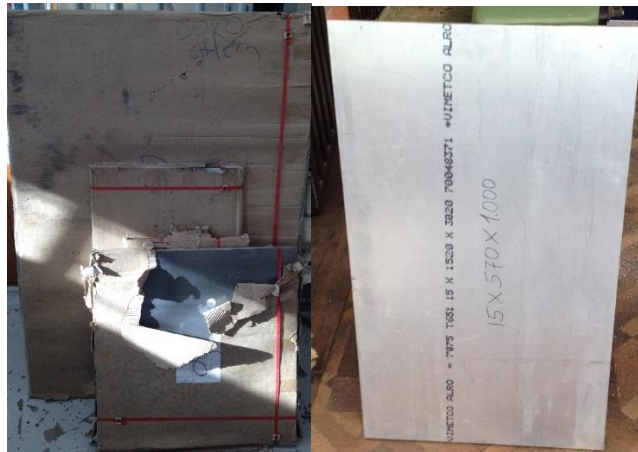
En este numeral son descritos los diversos procesos de fabricación realizados a los materiales para obtener las piezas que hacen parte del sistema mecánico. Al comenzar con la ejecución del proyecto la mayoría de las piezas fueron diseñadas para ser fabricadas mediante procesos de fresado y torneado mediante la

maquinaria CNC disponible en las instalaciones de la CIC, pero durante el desarrollo del proyecto fue necesario incluir otros procesos para agilizar y facilitar la construcción de las piezas.

6.1.1 Proceso de corte por agua para las láminas

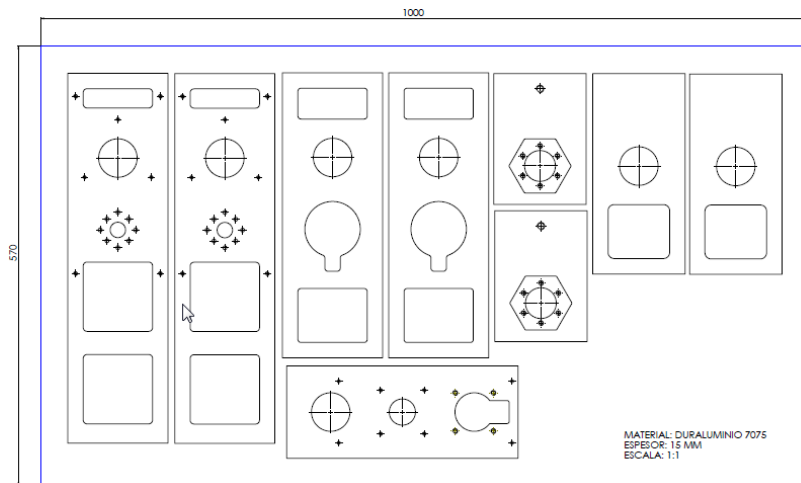
El primer proceso a realizar es el corte de las láminas de aluminio 7075-T651. Estas láminas son recibidas en forma rectangular, según se puede visualizar en la Figura 95, en espesores de 12, 15, 20 y 25 mm para la fabricación de las caras de las estructuras de cada Gimbal (Roll, Pitch y Yaw).

Figura 95. Láminas de Aluminio 7075-T651



Con los planos de las piezas, se generan los cortes por chorro de agua requeridos de las láminas de 12 y 15 mm, según se puede apreciar en la Figura 96. Para las láminas de otros espesores los cortes se realizan en la fresadora CNC y torno CNC disponibles en la empresa, debido a la simplicidad de la geometría.

Figura 96. Diagrama de corte para láminas de aluminio 7075-T651



Las láminas son cortadas mediante un proceso de corte por chorro de agua abrasivo, el cual consiste en acelerar las partículas de abrasivo a partir de la velocidad del agua (ver Figura 97), permitiendo que este abrasivo erosione el material. Este proceso es aplicado en materiales duros y tiene como ventajas:

- No genera esfuerzos en el material.
- No genera zonas afectadas por calor.
- Buenos acabados superficiales.
- Menores tiempos de mecanizado
- Económico.

Figura 97. Proceso de corte por chorro de agua abrasivo.

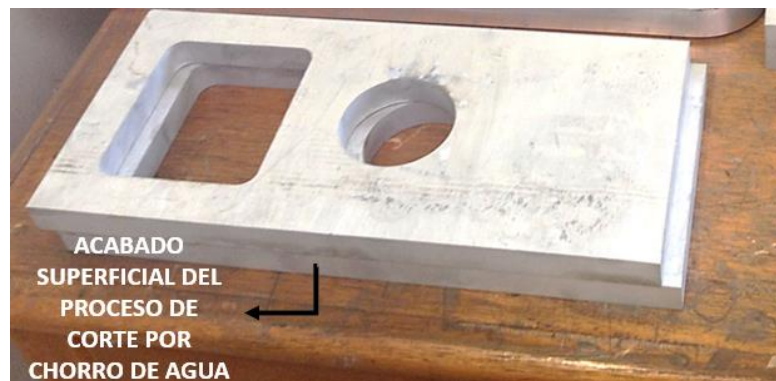


Fuente: FlowWaterjet. Corte por chorro de agua. [En línea].

<<http://www.flowwaterjet.com/es-MX/waterjet-technology/abrasive-waterjet.aspx>>. [Citado 12 Octubre de 2014].

Las piezas son recibidas y se verifican dimensionalmente, según los planos de fabricación (ver Anexo G), además de verificar la calidad de los acabados superficiales en las áreas de corte. La Figura 98 muestra el tipo de acabado superficial recibido después del proceso de corte. Este acabado es el esperado y permite realizar un correcto ensamblaje entre piezas.

Figura 98. Acabados superficiales del corte por chorro de agua abrasiva.



Este proceso de corte solo permite realizar procesos de mecanizado donde el corte sea en la totalidad del espesor de la lámina, por lo tanto, algunas de estas piezas requieren procesos de mecanizados posteriores. En la Figura 99 son visualizadas todas las piezas a las cuales se les aplico este proceso de mecanizado.

Figura 99. Lámina de aluminio 7075-T651



6.1.2 Proceso de fresado para las láminas

Inicialmente mientras es realizado el proceso de corte por chorro de agua abrasiva, de las otras laminas, las de 20 y 25 mm de espesor, se realizan los proceso de fresados por maquinas herramientas CNC. Los materiales de estas piezas fueron solicitados bajo medidas ajustadas, lo cual hace que su proceso de corte pueda ser realizado por la maquina CNC de una forma rápida.

La Figura 100 muestra el proceso de mecanizado por fresado realizado para una pieza de soporte del eje Yaw, a la cual se le realizan perforaciones para hacer roscados, agujeros y cajas cilíndricas para pasar los ejes y alojar rodamientos y una caja hexagonal para ubicar las piezas que van a transmitir el movimiento del eje a la estructura, en este caso de Gimbal Yaw.

Figura 100. Proceso de fresado para piezas de Gimbal Yaw.



Luego de recibir las piezas que fueron cortadas con el proceso de chorro de agua, estas piezas requieren proceso de fresado para los agujeros de los tornillos, agujeros y cajas para los rodamientos y paso de los ejes, así como algunos trabajos especiales para el acople de piezas. En la Figura 101 es posible observar la máquina CNC realizando el proceso de fresado en una de las piezas que estarán ubicadas en el eje Pitch y también las piezas después del proceso de fresado.

Figura 101. Proceso de fresado para láminas de Pitch y Yaw.



6.1.3 Proceso de torneado para los ejes

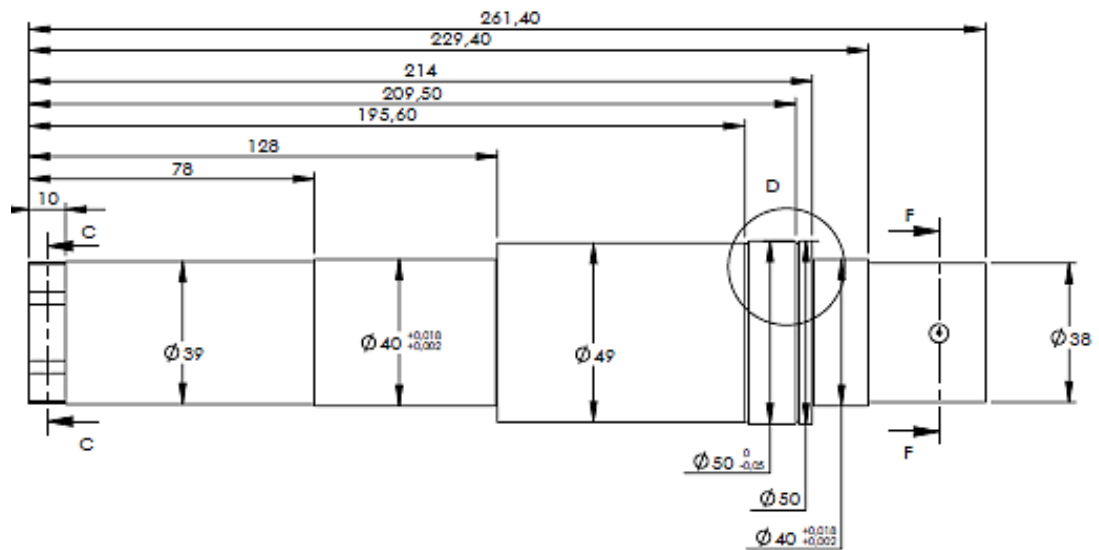
Para el proceso de fabricación de los ejes, debido a que algunos de estos (ejes del Gimbal Pitch y Yaw) son huecos, es necesario realizar dos etapas de mecanizado mediante el Torno CNC: mecanizado interno y externo. La primera etapa de mecanizado es la elaboración del mecanizado interno de los ejes, debido a los acabados para la ubicación de los rodamientos luego de realizar los mecanizados externos no es posible sujetar de manera adecuada el eje sin causarle algún defecto. La Figura 102 muestra los ejes después del proceso de torneado para la realización de los agujeros internos, además de mostrar el material para la construcción del eje Roll.

Figura 102. Acero inoxidable 304 con las perforaciones.



La segunda etapa de fabricación de los ejes es el mecanizado externo, según es posible ver en la Figura 103, este mecanizado presenta diversos procesos de cilindrado sobre su superficie externa.

Figura 103. Plano de fabricación de los ejes del Gimbal Pitch



La Figura 104 muestra el proceso de mecanizado exterior realizado a los ejes, es importante resaltar que las medidas presentes en los mismos son demasiado estrictas debido a que fueron diseñados con el fin de alojar los encoders de alta resolución seleccionados para la implementación del sistema de control por lazo cerrado.

Figura 104. Mecanizado de los ejes



La Figura 105 muestra los ejes luego de terminado su proceso de fabricación, es importante decir que estos ejes también presentan un proceso de mecanizado por fresado, en la elaboración de los hexágonos ubicados en uno de los extremos.

Figura 105. Ejes terminados del proceso de fabricación.



6.2 ENSAMBLE MECÁNICO

De acuerdo con las piezas construidas para cada una de las estructuras del sistema de validación tipo Gimbal 3D (Roll, Pitch, Yaw y Estructura Base) es necesario establecer tanto los elementos de sujeción o uniones adecuadas, así como una secuencia de montaje acorde a la disposición de los ejes para lograr la ortogonalidad de las estructuras.

En esta sección se describen los tipos de sujeción utilizados para unir las piezas y se detallan las razones por las cuales se utiliza cada uno de ellos, también es desarrollada la secuencia de montaje de los componentes del sistema de validación Gimbal 3D y por último es detallado el proceso de montaje de los componentes electrónicos.

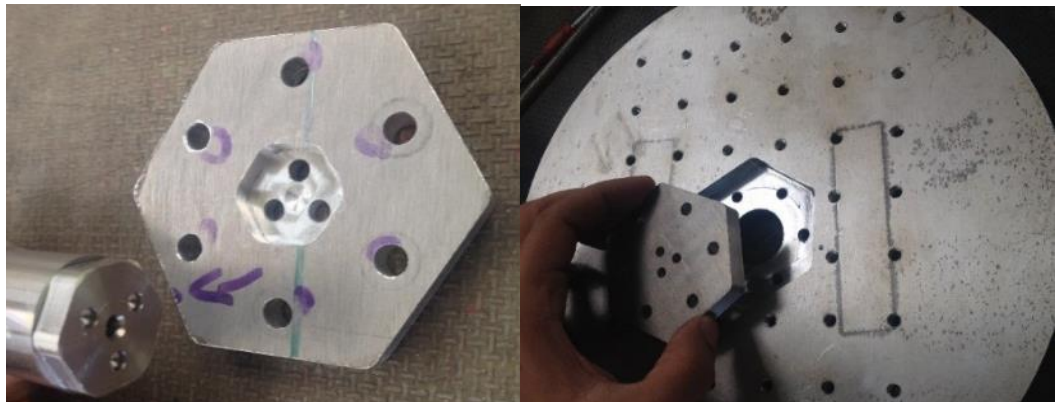
6.2.1 Tipo de sujeción a usar

Durante el diseño de todo el sistema de validación tipo Gimbal, en cada una de las estructuras son planteados diversos métodos de sujeción teniendo en cuenta la necesidad de la precisión del sistema de validación, planteada al inicio del proyecto (ver Tabla 1). A continuación son descritos los tipos de sujeción utilizados en el ensamble.

a) Ensamble mediante esquema Agujero-Eje

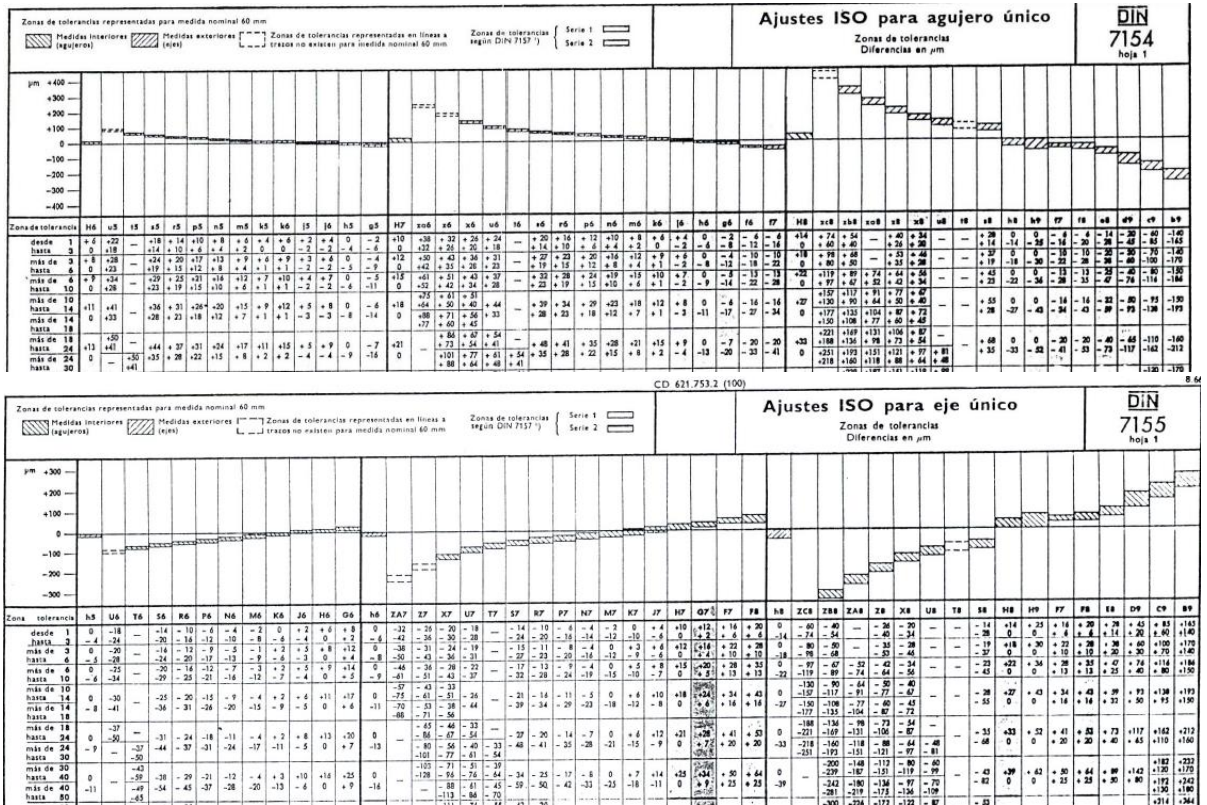
Este tipo de ensamble establece que una de las piezas encaja en la otra mediante una guía geométrica (cilindros, hexágonos, cubos, entre otras) y permite mantener las piezas concéntricas o alineadas. La Figura 106 detalla una de las piezas que son fabricados mediante este esquema de unión, en el cual es importante detallar y seleccionar las tolerancias adecuadas. La figura referenciada muestra un conjunto de ensamble donde se muestra uno de los ejes, el cual presenta una guía geométrica hexagonal, una pieza intermedia que hace de eje y agujero al mismo tiempo y por ultimo un disco donde ajusta la pieza intermedia y la cual es necesario mover.

Figura 106. Piezas para ensamble según el esquema agujero-eje



Los ajustes aplicados a este esquema de ensamble son seleccionados según la norma DIN 7154 (ver Figura 107), la cual para diversos agujeros y ejes, determina la tolerancia necesaria. Algunas de estas tolerancias durante el proceso de fabricación fueron realimentadas para su construcción dentro de las instalaciones de la CIC. En la Figura 107 es posible detallar una imagen proveniente de dicha norma, en donde son mostrados los rangos dimensionales de los ejes que para el ajuste requerido sugiere sus respectivas tolerancias al igual que con los agujeros.

Figura 107. Normal DIN 7154



Fuente: Normal DIN 7154.

La ventaja de la implementación de este tipo de esquema de unión es asegurar la concentricidad y alineación de los ejes, de forma tal que en el movimiento no se presente desbalanceo en el sistema. La implementación de esta unión requiere elementos de sujeción convencionales como tornillos (ver Figura 108) con el fin de

mantener las piezas en su lugar, sin que sea posible que se desarmen o se desacoplen durante la operación del sistema de validación.

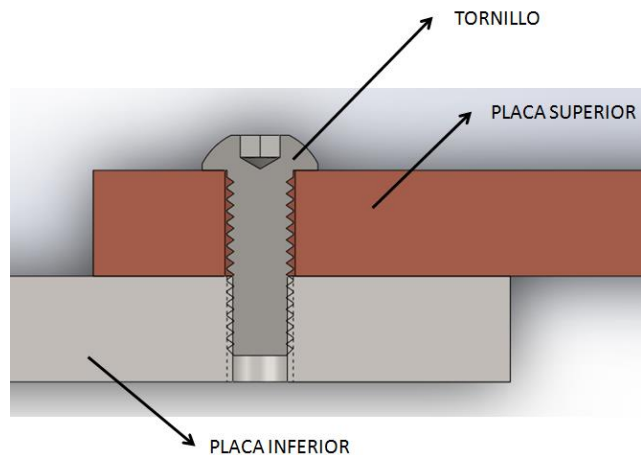
Figura 108. Piezas agujero-eje aseguradas con tornillos.



b) Ensamble mediante esquema de Tornillos

Este esquema de montaje es planteado de tal forma que para unir dos placas, la placa inferior lleve un roscado y la placa que va sobre esta, lleve un agujero pasante ajustado al diámetro del tornillo, tal como se puede ver en la Figura 109.

Figura 109. Esquema de montaje de tornillos.



En cuanto a la disposición de los tornillos, son planteados arreglos de tornillos tanto lineales como circulares. Los arreglos de tornillos lineales son implementados para secciones de lámina en donde sea requerida precisión en el distanciamiento entre placas o para placas de dimensiones mayores a 30 cm de largo. Los arreglos de tornillos circulares son implementados en piezas donde se realiza la transmisión de potencia de los motores a los ejes de movimiento. La

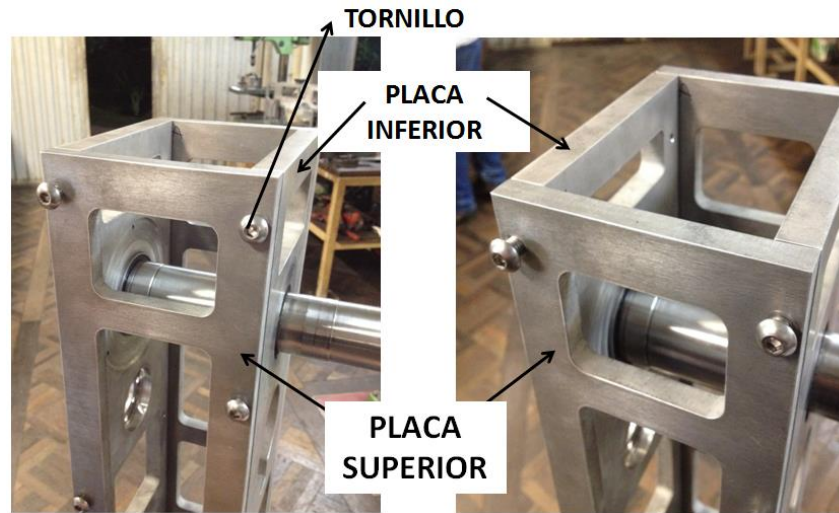
Figura 110. Arreglos de tornillos circulares (Der.) y lineales (Izq.)



Estos arreglos tienen como ventajas disminuir la carga por tornillo al utilizar múltiples elementos de sujeción, reduce la posibilidad de vibraciones en el sistema al fijar en varios puntos las piezas y permite ensamblar y desensamblar los componentes de forma rápida y sencilla.

A partir de lo anteriormente descrito, es necesario seleccionar el tipo de tornillo adecuado para la aplicación específica. Cada una de las piezas a unir, tanto en los Gimbal Pitch y Yaw como la estructura base, están construidas a partir de láminas de 12 y 15 mm, lo cual limita el tamaño del tornillo a usar debido a que las láminas son unidas de tal forma que el agujero de una de ellas se encuentre en la mitad del espesor de la placa. Según el esquema de montaje de los tornillos, anteriormente descrito, aplicado a la configuración de las placas consiste en usar como placa inferior la lámina de 15 mm, puesto que permite usar tornillos de una mayor dimensión sobre su espesor y usar la placa de 12 mm como placa superior. La Figura 111 detalla lo anteriormente mencionado.

Figura 111. Esquema de montaje de las placas de 12 y 15 mm



Definiendo el esquema de unión de las piezas y el tipo de arreglo a utilizar, es necesario seleccionar el tornillo que logre mantener la estructura ensamblada. Del proceso de análisis de la carga de los tornillos para poder determinar la capacidad de carga del tornillo es posible concluir que los tornillos soportan en su mayoría la carga de la fuerza cortante ocasionada por el peso de la estructura y la carga de apriete del tornillo. En el caso particular de esta estructura, donde los parámetros de carga y de apriete son bajos, es decir, el peso de la estructura en total es máximo de 80 kg y el apriete necesario de los tornillos es el mínimo para que no se separen las piezas, las dimensiones de los tornillos son determinados a partir de parámetros dimensionales únicamente, como lo son la disponibilidad de espacio y las dimensiones de la cabeza del tornillo.

El diámetro de los tornillos es seleccionado de tal forma que la lámina de 15 mm, la cual lleva los agujeros roscados para los tornillos, después del proceso de roscado cuenta con una pared considerable (mínimo 3 mm a cada lado del tornillo) que asegure su integridad. Por lo cual para la unión de estas placas el diámetro de tornillo a utilizar es 5/16.

Figura 112. Proceso de roscado para lámina de 15 mm.



En cuanto a la cabeza de tornillo más adecuada para el tipo de unión establecido, es necesario que la cabeza cuente con un área lo suficientemente grande para sujetar una buena dimensión de la lámina sin dejar de tener en cuenta tanto la estética del tornillo con respecto al ensamblaje como el tamaño adecuado donde la cabeza del tornillo quede fuera de la superficie de la lámina. En la revisión de los tipos de tornillos disponibles en el mercado es posible determinar que la cabeza de tornillo más adecuada para esta configuración es la cabeza tipo botón.

Por último, debido a las condiciones ambientales y el montaje y desmontaje del sistema de validación el material idóneo para los tornillos es el acero inoxidable 304. A partir de este proceso de selección, es necesario realizar la verificación para el proceso de selección con el fin de comprobar que la resistencia de los tornillos es la adecuada. A partir de la Figura 113 es posible visualizar la capacidad de carga sugerida para cada uno de los diámetros de los tornillos según

su material en libras por pulgada. Con esto es posible verificar que con la cantidad de tornillos y los diámetros establecidos podemos soportar la carga.

Figura 113. Capacidad de carga en lbf para tornillos de acero inoxidable 304¹⁸

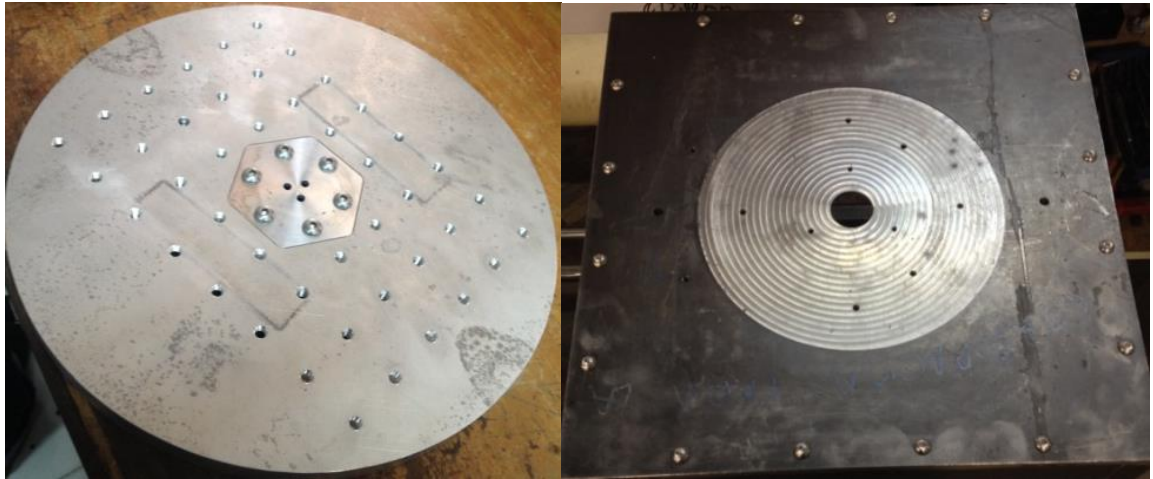
Size	18-8	
	Stainless Steel	Brass
2-56	2.5	2.0
2-64	3.0	2.5
3-48	3.0	3.2
3-56	4.4	3.6
4-40	5.2	4.3
4-48	6.6	5.4
5-40	7.7	6.3
5-44	9.4	7.7
6-32	9.6	7.9
6-40	12.1	9.9
8-32	22.0	18.0
8-36	22.0	18.0
10-24	22.8	18.6
10-32	31.7	25.9
1/4"-20	75.2	61.5
1/4"-28	94.0	77.0
5/16"-18	122	107
5/16"-24	142	116
3/8"-16	236	192
3/8"-24	259	212
7/16"-14	376	317

Fuente: Catalogo Técnico tornillos GA-TA. 2006.

Los demás tornillos incluidos en la estructura de diámetros como ¼ y 3/8 de pulgada y otros menores, son dispuestos en los elementos a unir debido a la cantidad de espacio disponible y en los materiales a unir, todos en acero inoxidable 304, por las razones antes descritas.

¹⁸ El acero inoxidable 18-8 es comparable al acero inoxidable 304.

Figura 114. Piezas unidas con tornillería de 1/4 y 3/8 de pulgada



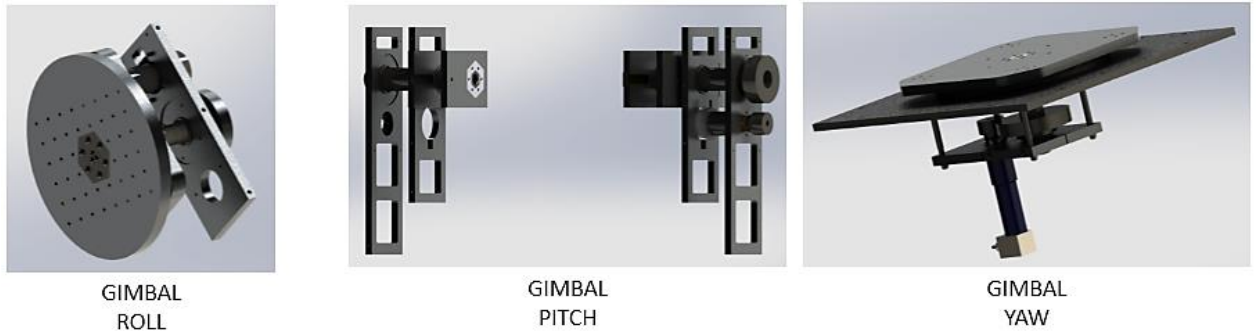
6.2.2 Secuencia de ensamble del Gimbal 3D

Durante el proceso de diseño del sistema de validación Gimbal 3D son incluidos detalles de montaje necesarios para lograr a ensamblar la estructura y poder intervenirla en caso de mantenimiento y modificaciones. En el análisis de montaje de todas las piezas es posible, dentro de cada Gimbal, determinar grupos de piezas que requieren una secuencia de ensamble y des-ensamble estricta dentro de los cuales podemos encontrar las láminas, los ejes y el acople entre el Gimbal 3D y su estructura base. A continuación son descritos estos grupos de piezas y su secuencia de ensamble

6.2.2.1 Ensamble de ejes.

Consta de todos los elementos requeridos para montar sobre los ejes como rodamientos, placas, poleas y demás elementos que requieren ser montados por medio del esquema Agujero-Eje.

Figura 115. Ensamble de los componentes a los ejes.



Inicialmente es planteado el ensamble de los ejes a partir de las piezas para las cuales es requerido el uso de una prensa hidráulica en el ensamble de sus componentes, por lo cual primero se ajustan los ejes con los rodamientos. La Figura 116 muestra el ensamble de los ejes de las estructuras Gimbal (Roll, Pitch y Yaw). En el caso del eje Yaw, es necesario en este proceso de ensamble incluir entre los rodamientos la polea y la correa del eje conducido dado que los rodamientos se montan por ajuste.

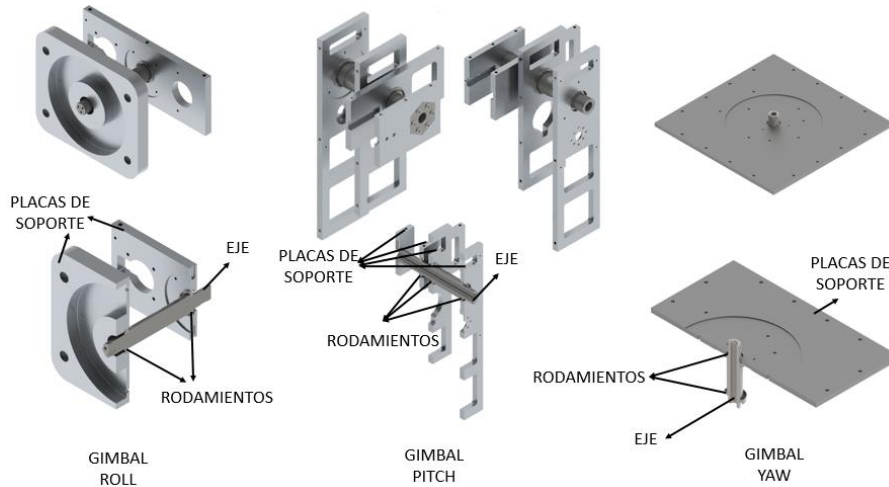
Figura 116. Ensamble de rodamientos en los ejes.



A partir de estos montajes previos, es realizado el montaje de las piezas en las cuales encajan los rodamientos y donde esta soportada la estructura. La Figura

117 muestra las piezas ensambladas de los soportes donde está alojado cada uno de los rodamientos con el conjunto eje-rodamiento.

Figura 117. Ensamble de las piezas de soporte con los rodamientos radiales.



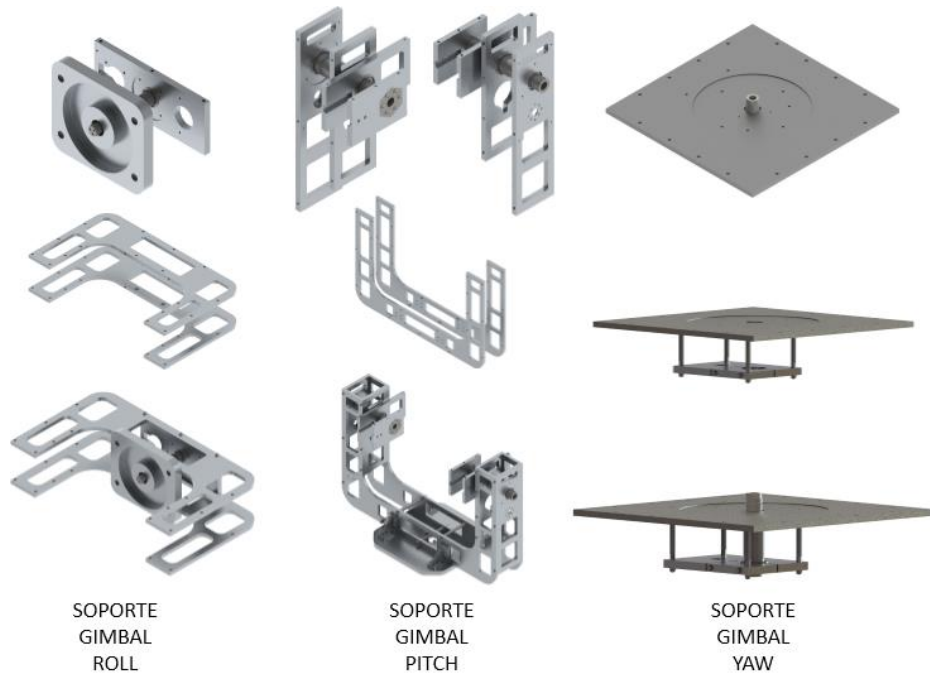
Partiendo de los ensambles de estas piezas, el paso siguiente en la secuencia de ensamble es realizar el montaje de las láminas.

6.2.2.2 Ensamble de láminas

Consta de las piezas que brindan soporte a cada uno de los Gimbal, estas piezas se instalan en las placas de soporte de los conjuntos de los ejes y proporcionan robustez a cada estructura Gimbal. Estas piezas utilizan el esquema de sujeción por tornillos.

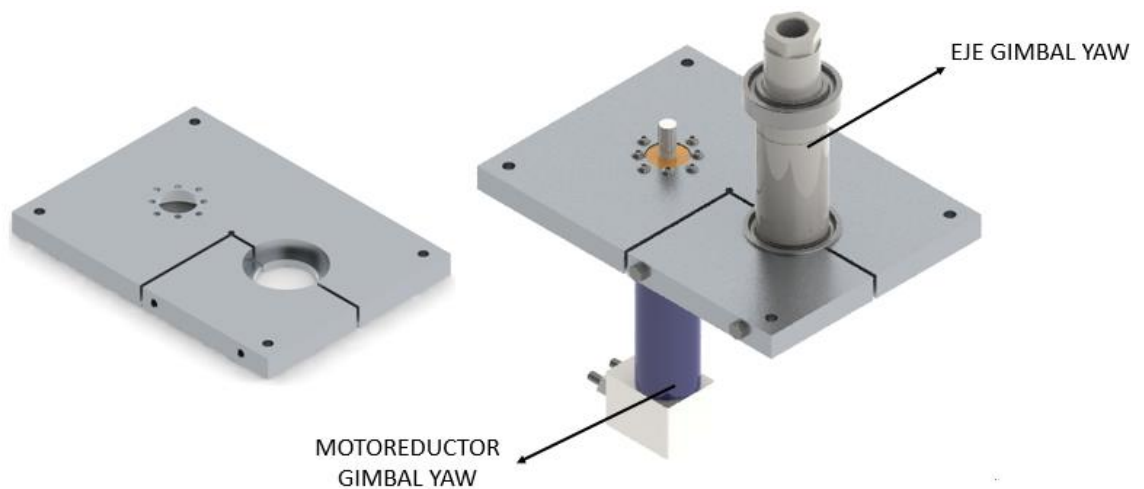
Siguiendo la secuencia de ensamble, la Figura 118 muestra cómo se ensamblan las placas y como quedan a partir del conjunto anterior.

Figura 118. Montaje de láminas en cada estructura Gimbal.



Para el ensamble del eje que mueve el Gimbal Yaw, el conjunto de piezas ubicado en la parte inferior, mostrada en la Figura 119, está configurado de tal forma que el ajuste al rodamiento sea logrado mediante un par de tornillos montados sobre una pieza independiente, posibilitando el desensamble de los componentes

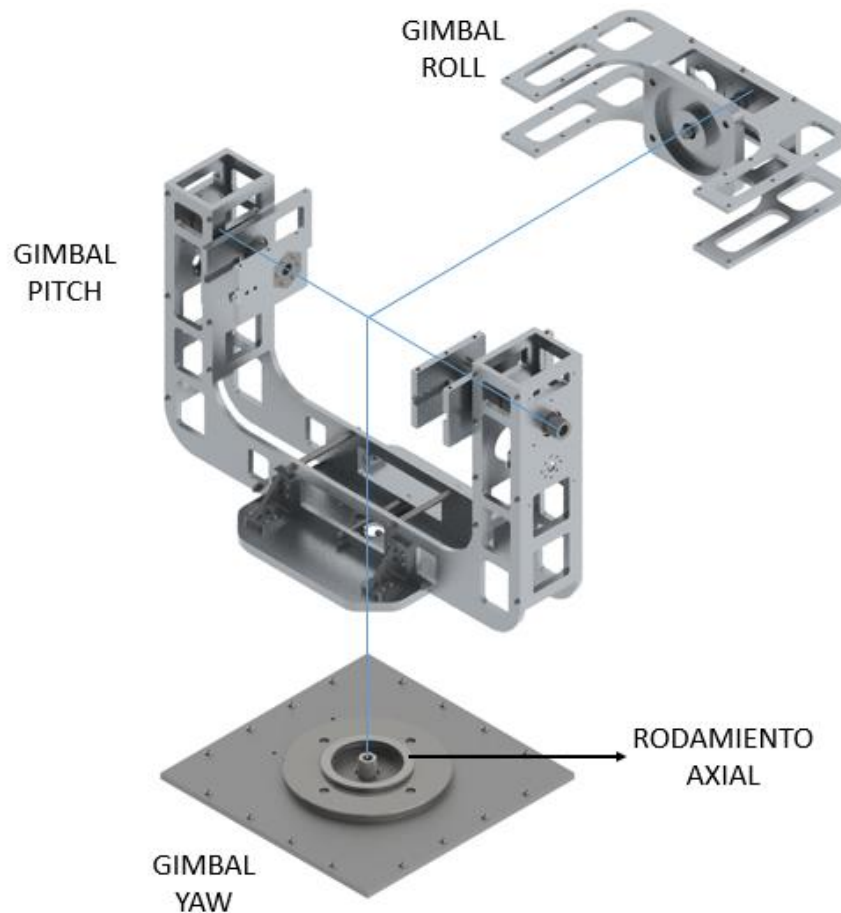
Figura 119. Placa de soporte del motor y el eje de estructura Gimbal Yaw.



6.2.2.3 Ensamble de las estructuras Gimbal

El paso siguiente es ensamblar las tres estructuras Gimbal, para lo cual se requiere deslizar cada una de las estructuras entre la inmediatamente anterior en cada una de sus posiciones, iniciando por el Gimbal más pequeño (Gimbal Roll) con el Gimbal Pitch y por último, el resultado de estos dos, ubicarlo en el Gimbal Yaw.

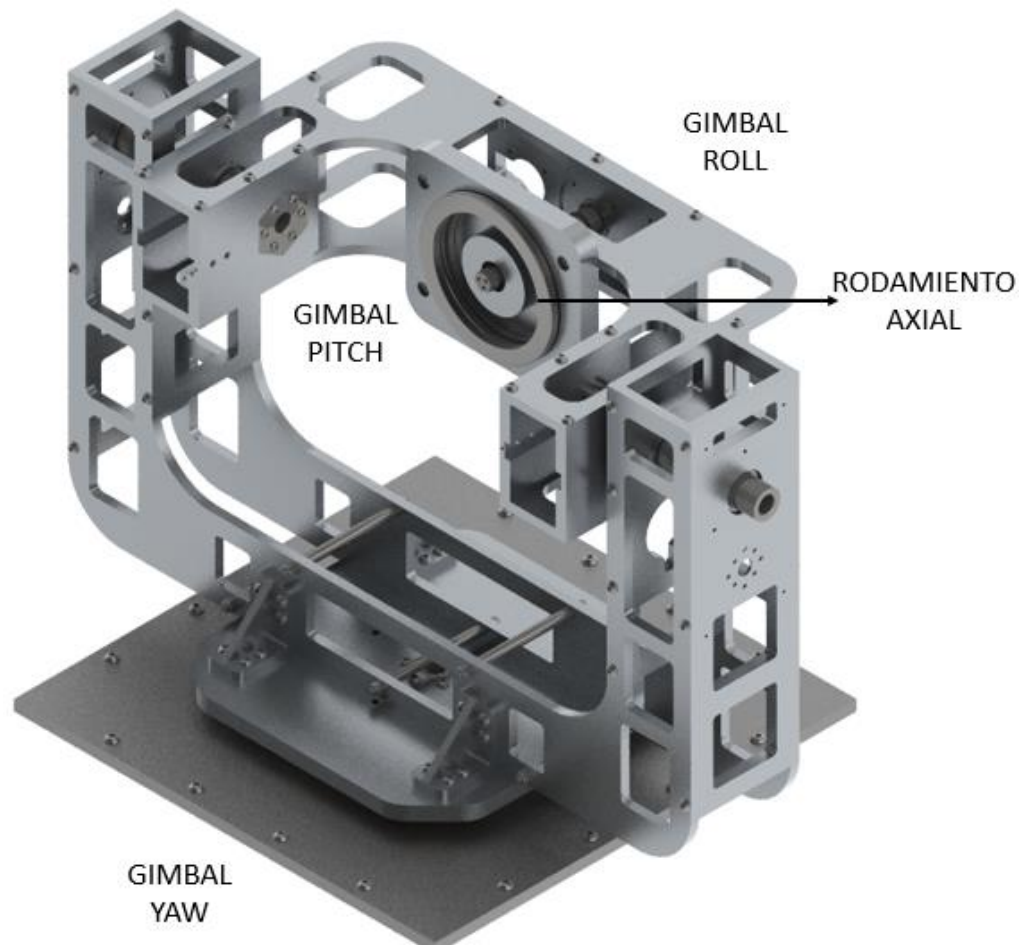
Figura 120. Ensamble del Gimbal



Durante este proceso de montaje son ubicados también los rodamientos de soporte axial, que permiten soporte de la carga y que facilitan el giro de los

Gimbal. La Figura 121 muestra la ubicación final de cada Gimbal dentro del ensamble.

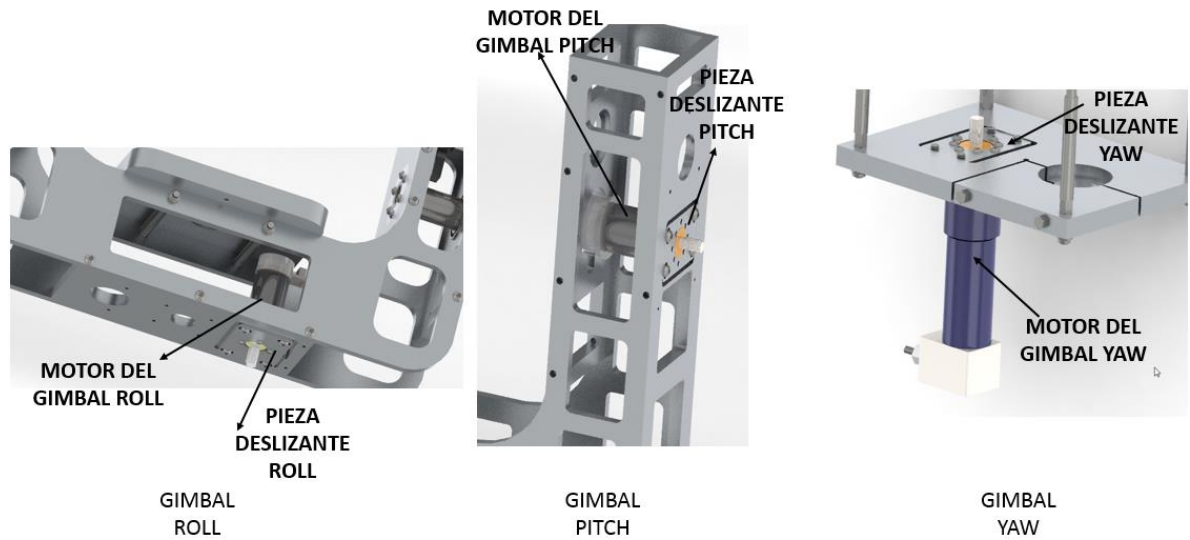
Figura 121. Ensamble de las estructuras Gimbal



6.2.2.4 Ensamble del sistema de transmisión de potencia.

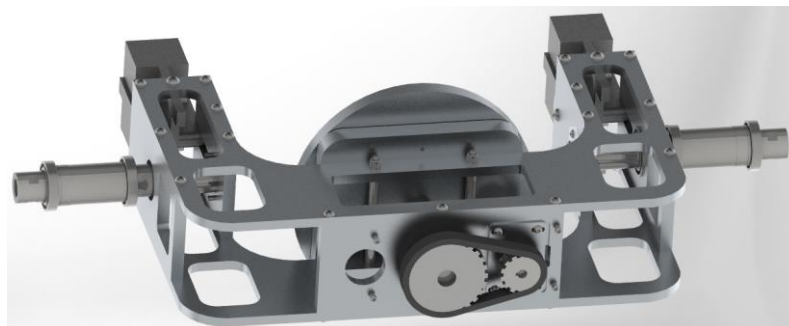
A partir de la información y descripción del proceso de montaje de cada uno de los ejes y con el eje conducido son instalados los motores en las placas deslizantes para el ajuste de la tensión de las correas. La Figura 122 muestra el montaje de los motores en las placas deslizantes para cada Gimbal.

Figura 122. Guías deslizantes para el montaje de las correas.



Estas piezas deslizantes permiten al motor moverse de tal manera que se pueda variar la distancia entre centros de las correas y así poder tensar y soltar las correas para poder ensamblar y desensamblar el sistema de transmisión de potencia. Inicialmente las placas con los motores se ubican en la posición más cercana a los ejes conducidos de cada Gimbal, se realiza el montaje de las correas y las poleas en los ejes, tanto del motor como del eje conducido y posterior a esto, es modificada la separación del motor con respecto al eje hasta el punto donde la correa está en una tensión que le permita hacer la transmisión de movimiento.

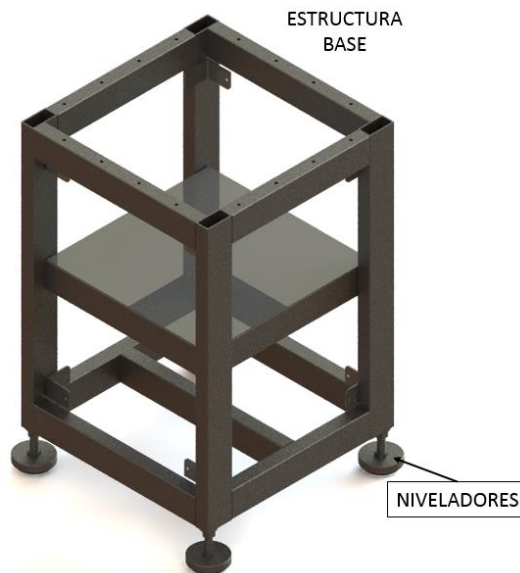
Figura 123. Ubicación del sistema de transmisión de potencia del Gimbal Roll



6.2.2.5 Ensamble del sistema Gimbal en la estructura base.

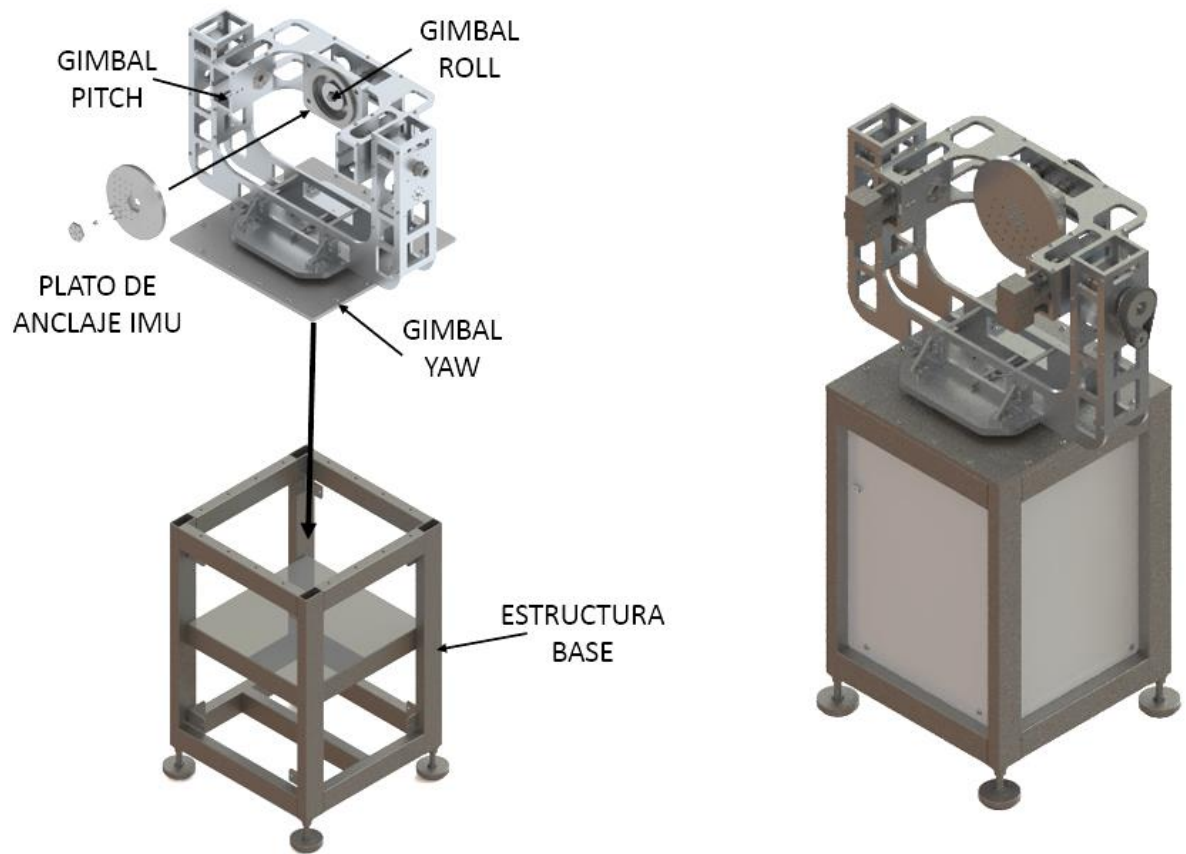
A partir del ensamble de las tres estructuras tipo Gimbal, mostrado en la Figura 121, es necesario realizar este montaje en un bastidor o estructura base, ensamblando previamente esta estructura con sus niveladores, que en el caso de este diseño simplemente son roscados los tornillos de los mismos en las esquinas de la estructura. La Figura 124 muestra la estructura base con los niveladores instalados.

Figura 124. Estructura base del sistema Gimbal



El montaje del ensamble de los 3 Gimbal es realizado metiendo el soporte del Gimbal Yaw entre la perfilería de la estructura base y alineando los agujeros de los tornillos, procedimiento que permite ubicar los tornillos y roscarlos hasta asegurar las dos estructuras. La Figura 125 detalla el ensamble de estos dos subcomponentes y el detalle de la pieza final. Adicional a esto, también es ensamblado el plato de anclaje del IMU con la matriz de agujeros y su respectiva pieza de ajuste.

Figura 125. Ensamble de los Gimbal en la estructura base.



El ensamble final de la estructura construida es mostrado en la Figura 126. Es importante resaltar que los elementos como las contrapesas y los niveladores son instalados respectivamente por guías deslizantes y por tornillos, por lo cual no se detalla el proceso de instalación de estos elementos puesto que no son determinantes o no presentan dificultad en su ensamble.

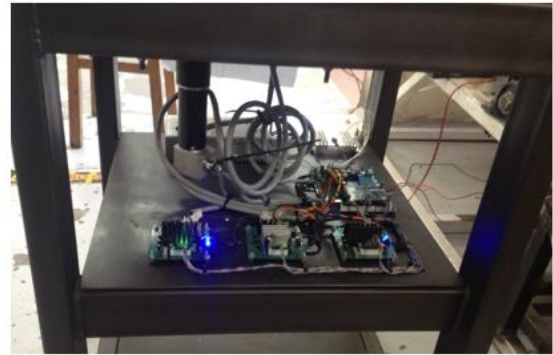
Figura 126. Ensamble final del sistema de validación



6.2.3 Proceso de montaje de los elementos electrónicos

Finalmente en el sistema de validación ya ensamblado, son instalados los cables a través de los ejes de rotación y se anclan las tarjetas de los drivers y la tarjeta madre del sistema en la placa media de la estructura, según es mostrado en la Figura 127. Estos cables son asegurados a la estructura por medio de amarres y para su conexión y conexión rápida se le instalan regletas de conexiones cerca de cada uno de los motores. Las tarjetas de control del sistema se anclan por medio de tornillería en la placa anteriormente mencionada.

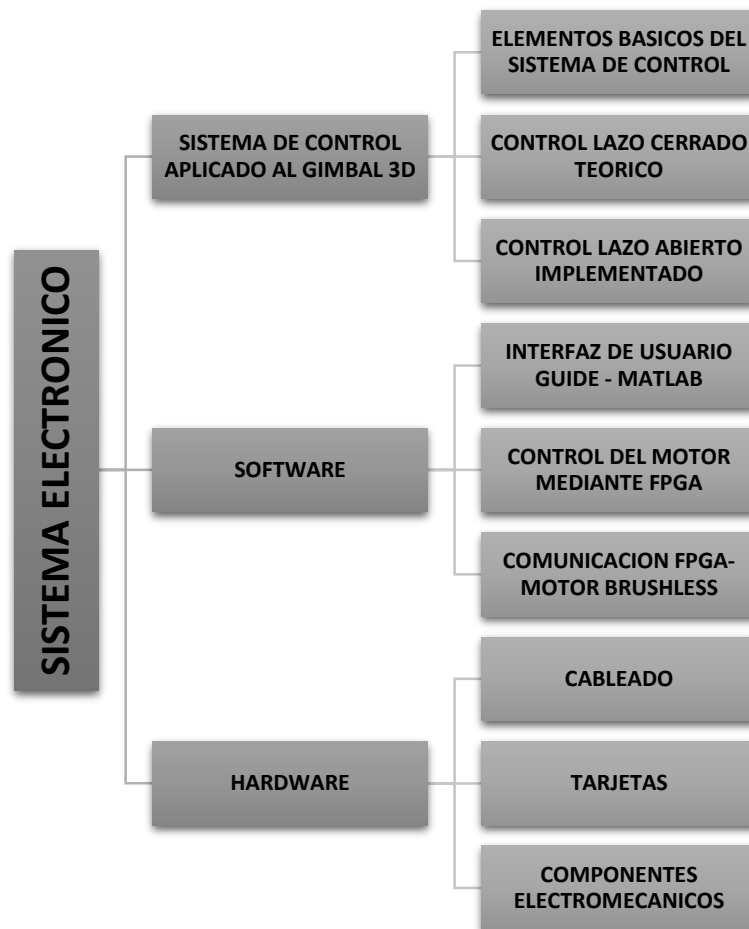
Figura 127. Sistema de validación con los elementos electrónicos montados



7 SISTEMA ELECTRÓNICO

Este capítulo describe el sistema electrónico instalado en el mecanismo Gimbal para la alimentación y control de los motorreductores cuya función es generar el movimiento en cada uno de los ejes. Este capítulo se subdivide en 3 numerales compuestos de un sistema de control, un software y un hardware; en los cuales se describen sus componentes y su funcionamiento dentro del sistema de control. En la Figura 128 es mostrada la estructura de la temática que será abordada en este capítulo.

Figura 128. Estructura del Sistema Electrónico



7.1 SISTEMA DE CONTROL APLICADO AL SISTEMA GIMBAL

En el desarrollo del sistema de control, inicialmente es planteada una estructura de control basada en un sistema de lazo cerrado (feedback), la cual a partir de una señal de entrada u orden genera una respuesta en el sistema, esta respuesta es registrada por un elemento de sensado y esta información es comparada con la señal de entrada con el fin de corregir el error entre la entrada y la salida.

Como es descrito anteriormente, los sistemas de lazo cerrado requieren un elemento de sensado para poder generar la señal de realimentación en el sistema. La tecnología y el funcionamiento de estos elementos de sensado varían según la variable a registrar y el tipo de señal a analizar. Para el caso particular del sistema de validación tipo Gimbal, los elementos de sensado necesarios para controlar la variable posición angular en cada uno de los ejes son encoders rotativos analógicos o digitales de alta resolución¹⁹

Durante el desarrollo del proyecto es realizado un proceso de selección de un encoder acorde a los requerimientos del sistema de validación, proceso de selección que es detallado en el anexo J, pero por dificultades administrativas no es posible adquirir este elemento de sensado, en este caso de posición y velocidad, y por lo tanto no es posible realizar una estructura de control en lazo cerrado, por lo cual es planteada una nueva estructura de control a partir de un sistema en lazo abierto.

Para el funcionamiento del sistema de control planteado, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, son definidos unos elementos básicos a tener en cuenta durante la construcción o elaboración del control del sistema de validación. A continuación se describen estos elementos básicos.

¹⁹ Se establece como alta resolución mayor a 8 arc-seg, que es la resolución máxima del IMU.

7.1.1 Elementos básicos del sistema de control

7.1.1.1 Variable a controlar: Posición y Velocidad de cada Gimbal a partir de los motores brushless, los cuales definen el comportamiento de las estructuras tipo Gimbal. Su rango de operación en posición se encuentra definido para cada estructura de la siguiente manera; Roll será un eje libre con posiciones no definidas, Pitch estará limitado a movimientos de $\pm 90^\circ$ a partir de la posición horizontal y Yaw tendrá un rango de posiciones de $\pm 180^\circ$, estos rangos son establecidos con el fin de evitar daños en el cableado para cada eje. El rango de velocidades es determinado a partir de los elementos motrices disponibles en el mercado, que para el caso de la aplicación son motorreductores DC brushless con una etapa de reducción adicional a partir de correas sincrónicas, estableciendo un rango para los tres motores de 3 a 10 rpm.

7.1.1.2 Señal de referencia (Set point): Es el valor en el cual se quiere mantener la variable controlada. En el sistema de validación tipo Gimbal, el set point es la velocidad de las estructuras tipo Gimbal de acuerdo a las rutinas de operación del sistema, planteadas por la CIC.

7.1.1.3 Actuador: Es el elemento que recibe una orden desde el regulador o controlador y la adapta a un nivel adecuado de velocidad y posición (según las variables de salida) necesaria para accionar el elemento final de control, planta o estructura tipo Gimbal. El elemento que cumple esta función dentro del sistema de validación Gimbal son los motores Brushless dado que estos transforman la señal de control en una acción que puede ser interpretada por la planta.

7.1.1.4 Planta: Sistema a ser controlado. En el caso de este proyecto, la planta hace referencia a todo el sistema mecánico el cual realiza la rotación, es decir, la planta hace referencia a los 3 Gimbal en conjunto.

7.1.1.5 Sensor: Es el elemento del sistema de control encargado de detectar magnitudes físicas con el fin de transformarlas en magnitudes eléctricas. En el contexto del sistema de validación los sensores más adecuados para registrar las variables anteriormente descritas son conocidos encoders rotativos, los cuales a partir de un movimiento angular generan una serie de pulsos digitales. La medida de la posición en este tipo de sensores es una medida directa, pero la medida de la velocidad es una medida indirecta debido a que esta resulta del conteo de estos pulsos en un tiempo determinado.

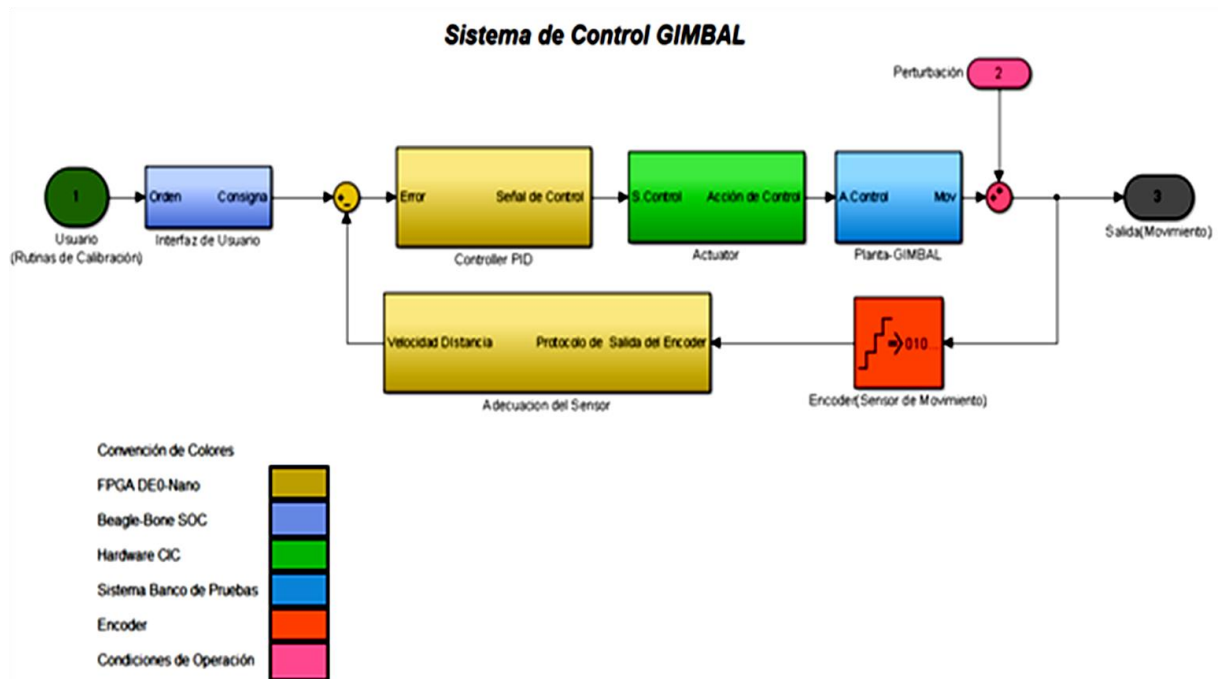
7.1.1.6 Perturbaciones: Son señales, de diferentes naturalezas (eléctricas, mecanizas, digitales, entre otras), que pueden afectar de forma no deseada la señal de salida de un sistema. Estas señales pueden ser tanto internas como externas. En el contexto del sistema de validación las perturbaciones internas pueden llegar a ser vibraciones de los motores, desbalanceo del sistema, desalineación de los ejes, entre otras; y externas como fuerzas que se le apliquen al sistema.

7.1.2 Control lazo cerrado.

La Figura 129 muestra la estructura de control a implementar en lazo cerrado, cada uno de los elementos que interactúan en esta estructura están señalados en un color diferente. Es importante resaltar que este sistema de control es el más adecuado para implementar en el sistema porque permite controlar las

perturbaciones del sistema y obtener resultados más precisos del mismo. Este sistema es descrito de la siguiente manera:

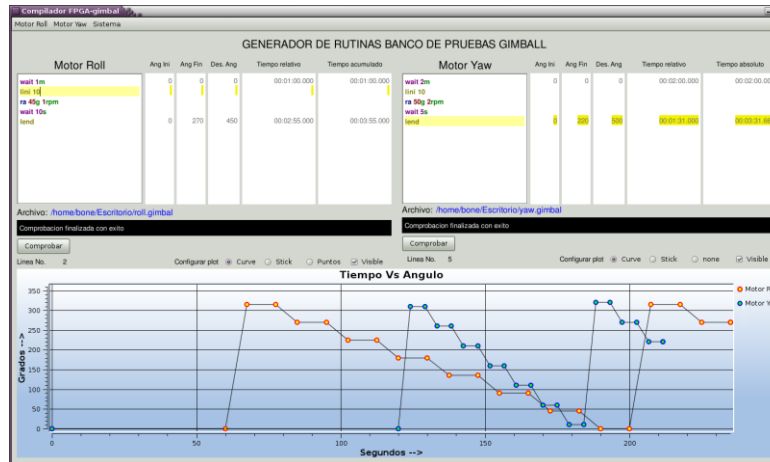
Figura 129. Estructura de control en Lazo cerrado.



Fuente: CIC.

- El primer elemento, en color verde oscuro, representa al usuario el cual programa la rutina de movimiento y/o velocidad que requiere ser validada, en el sistema se cargan rutinas de demostración o rutinas programables a la necesidad del usuario a través de la Beagle Bone SOC, el cual está representado mediante color azul y tiene la leyenda de interfaz de usuario. La Figura 130 muestra el demo realizado para la interfaz de usuario.

Figura 130. Interfaz demo para Gimbal.



Fuente: CIC

- El segundo elemento que se puede visualizar en la Figura 129 es la tarjeta FPGA DE0-Nano, representada en la figura de color amarillo, realiza dos funciones en el sistema de control en lazo cerrado, la primera es realizar la ejecución del controlador para adecuar la señal de actuación del sistema y la segunda función es realizar el proceso de adecuación de la señal recibida por el encoder de alta resolución en el eje de salida del movimiento.
- El tercer elemento, verde claro según la Figura 129, presente en el sistema de control por lazo cerrado es el conjunto del actuador, en el caso del sistema Gimbal sería el driver trifásico y el motorreductor, este conjunto recibe la señal del controlador y realiza el movimiento del eje motriz del sistema, es decir, este conjunto recibe la señal eléctrica generada por la FPGA y la convierte en movimiento.
- El cuarto, representado en azul claro y el quinto elemento, representado en fucsia, representan tanto la planta o el componente mecánico del sistema de validación y las perturbaciones que podría presentar el sistema.

- Por último, el encoder, representado en la Figura 129 con el color naranja y ubicado en el lazo de realimentación cumple con la función de realizar el sensado del movimiento final de la planta para poder identificar las posibles correcciones a realizar en el movimiento.

Teniendo en cuenta la configuración de los elementos anteriormente descrita, es planteado el modelo dinámico q describe el movimiento del sistema. Este modelo se plantea de forma teórica debido a la ausencia de los elementos de sensado que posibilitan la realimentación del sistema.

7.1.2.1 Modelamiento dinámico del sistema mecánico a controlar

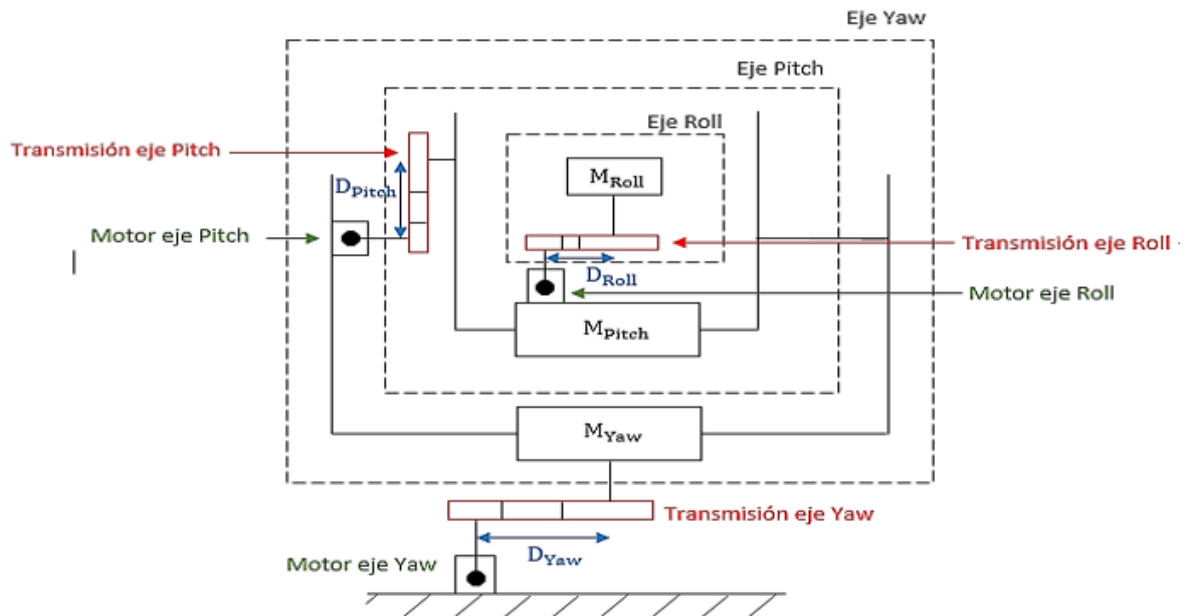
Para realizar el control del sistema mecánico es necesario describir mediante un modelo matemático el comportamiento dinámico del mecanismo Gimbal y así determinar la función de transferencia o la relación entre la respuesta del sistema a controlar con la señal de entrada o excitación en cada uno de sus ejes (Roll, Pitch y Yaw).

Inicialmente el análisis del mecanismo tipo Gimbal 3D es realizado para cada uno de los ejes, debido a que el comportamiento de cada uno de ellos es independiente a los demás, es decir, el sistema cuenta con tres grados de libertad, uno por cada Gimbal existente.

Para efectos de cálculo, cada uno de estos ejes son asumidos como completamente balanceados y las inercias de los ejes es constante en cualquier posición de giro en la cual se encuentre cualquier Gimbal, además la Figura 131 muestra la simplificación del sistema mecánico. Esta simplificación lo que representa para cada eje es una masa suspendida mediante uno o dos apoyos

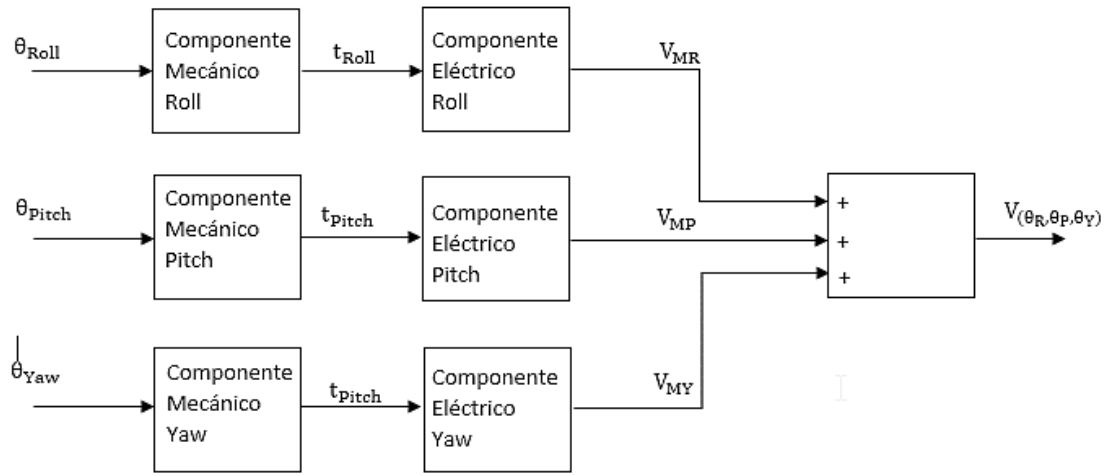
sobre los cuales está girando. Cada eje cuenta con su sistema de transmisión de potencia independiente.

Figura 131. Esquema simplificado del sistema Gimbal.



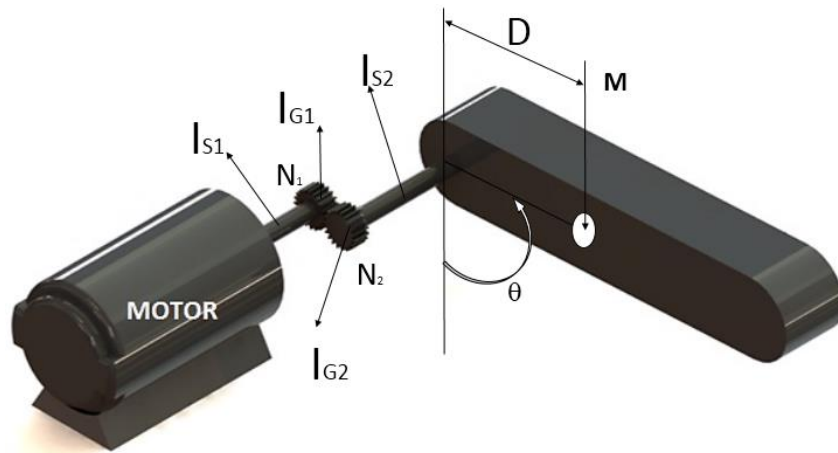
Teniendo en cuenta la Figura 131 es planteado un diagrama de bloques donde es posible visualizar la entrada y salida del sistema, lo cual permite establecer una relación inicial para definir la función de transferencia. Este diagrama plantea la relación entre el ángulo o posición deseada (en función del tiempo) y el voltaje de alimentación de cada uno de los motores. El esquema de montaje para las pruebas donde se relaciona la velocidad con el voltaje cumple con la misma estructura.

Figura 132. Diagrama de bloques Gimbal.



Entre los modelos aplicables al sistema mecánico compuesto de los mecanismos tipo Gimbal, el más adecuado para su análisis es la articulación robótica. Este modelo cuenta con un sistema de transmisión de potencia: un eje motriz, un eje conducido, sus respectivas poleas y correas; además de una masa o peso muerto el cual es necesario mover.

Figura 133. Modelo de la articulación robótica.



En el planteamiento del modelo a aplicar es necesario definir algunos parámetros teóricos, los cuales determinan las ecuaciones particulares del sistema y contribuyen a encontrar la función de transferencia del sistema. Los valores a definir son los datos de las inercias de los ejes, de los engranajes, de los motorreductores y los valores de las cargas muertas a mover, valores que son obtenidos a partir del modelo CAD realizado en el software de Solidworks y de las hojas de datos de los motorreductores adquiridos.

Dentro del modelamiento inicialmente es necesario plantear las ecuaciones básicas de movimiento aplicables a este sistema. La Tabla 23 agrupa todas las ecuaciones básicas a usar en la adquisición del modelo dinámico.

Tabla 23. Ecuaciones para el modelamiento del sistema dinámico

ITEM	ECUACIÓN	FORMA DE LA ECUACIÓN
1	Dinámica del Movimiento Rotativo	$I\alpha = T_{motor} - T_{resistivo}$
2	Energía Cinética	$E_c = \frac{1}{2} [I_{motor} \omega_{motor}^2 + I_{S1} \omega_{motor}^2 + I_{G1} \omega_2^2 + I_{S2} \omega_2^2 + I_{G2} \omega_2^2 + mV_2^2]$
3	Conversión de Velocidad Angular a Velocidad Lineal	$V = \omega_{motor} * D$
4	Torque Resistivo del Eje Conducido	$T_{resistivo} = \frac{N_1}{N_2} (DMg \text{sen}\theta)$
5	Velocidad del Eje Conductor al Eje Conducido	$\omega_2 = \omega_{motor} \frac{N_1}{N_2}$

Inicialmente el modelo es abordado a partir de la ecuación que define la dinámica del movimiento rotativo y a partir la ecuación de la energía cinética aplicada al mecanismo Gimbal, en la cual es posible visualizar que esta energía depende de la inercia de los componentes y de la velocidad de cada uno de los mismos, por lo tanto, es posible convertir todas estas inercias en función de la misma velocidad, y

que la velocidad lineal es posible convertirla a la velocidad angular del motor aplicando la ecuación de conversión de velocidad angular.

De estos análisis, es obtenida la ecuación de la inercia total o equivalente. Ec. de la energía cinética al reemplazar las velocidades.

$$E_c = \frac{1}{2} \omega_{motor}^2 \left[I_{motor} + I_{S1} + I_{G1} + (I_{S2} + I_{G2}) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 + MD^2 \right] \quad (10)$$

$$E_c = \frac{1}{2} \omega_{motor}^2 I_{eq} \quad (11)$$

A partir de la ecuación 10, que representa la dinámica del movimiento rotativo; de la definición de aceleración angular y de la definición del torque resistivo, es posible reescribir la ecuación de la dinámica del movimiento rotativo como:

Ecuación 1. Dinámica del movimiento rotativo en función de la posición y la inercia relativa.

$$I_{eq} = I_{motor} + I_{S1} + I_{G1} + (I_{S2} + I_{G2}) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 + MD^2 \quad (12)$$

$$\left(I_{motor} + I_{S1} + I_{G1} + (I_{S2} + I_{G2}) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 + MD^2 \right) \ddot{\theta} = T_{motor} - \frac{N_1}{N_2} (DMgsen\theta) \quad (13)$$

La Ecuación 1 es la forma general de la ecuación que describe el movimiento de cada uno de los Gimbal en función del tiempo, en su forma diferencial. A partir de la Tabla 24 se definen los valores de las constantes particulares de cada eje con el fin de obtener la ecuación diferencial de cada uno.

Tabla 24. Datos para aplicar el modelo matemático de la articulación robótica.

DATOS PARA EL MODELO MATEMATICO DE LA ARTICULACION ROBOTICA					
CONSTANTE	DESCRIPCION DE LA CONSTANTE	UNIDAD	VALOR GIMBAL ROLL	VALOR GIMBAL PITCH	VALOR GIMBAL YAW
M	MASA	KG	5,74	38,74	71,27
I_MOTOR	INERCIA DEL MOTOR	KG*M^2	1,5*10 ^{^(-5)}	1,22*10 ^{^(-4)}	2,3
N_1 / N_2	RELACION DE VELOCIDADES	ADIMENSIONAL	0,5	0,5	0,4
I_S2	INERCIA DEL EJE CONDUCCION	KG*M^2	0,0034	0,1326	0,0252
I_G1	INERCIA DE LA POLEA MOTRIZ	KG*M^2	4,35*10 ^{^(-5)}	11,34*10 ^{^(-5)}	15,6*10 ^{^(-5)}
I_G2	INERCIA DE LA POLEA CONDUCCION	KG*M^2	4,68*10 ^{^(-4)}	9,01*10 ^{^(-4)}	41,15*10 ^{^(-4)}
D	DISTANCIA ENTRE CENTROS	M	0,02	0,02	0,02
T_MOTOR	TORQUE DEL MOTOR	N*M	21,11	48,81	127,1
G	GRAVEDAD	M/S^2	9,81	9,81	9,81

Para lograr simplificar los cálculos de las ecuaciones diferenciales también se requiere fijar las condiciones de frontera y establecer las consideraciones para su solución. A continuación se enumeran estas condiciones:

- El sistema está diseñado para el registro de desplazamientos angulares pequeños, por lo tanto, el valor de la función seno en rangos de 0-15 grados es aproximadamente igual a los valores del ángulo. Condición 1 de las Ecuaciones Diferenciales.

$$\sin \theta = \theta \quad (14)$$

- La inercia del eje motriz está incluida en el valor de inercia del motor, por lo tanto: Condición 2 de las Ecuaciones Diferenciales.

$$I_{S1} = 0 \quad (15)$$

- Para resolver las ecuaciones diferenciales, las condiciones iniciales del sistema son definidas estáticas, en otras palabras: Condición 3 de las Ecuaciones Diferenciales.

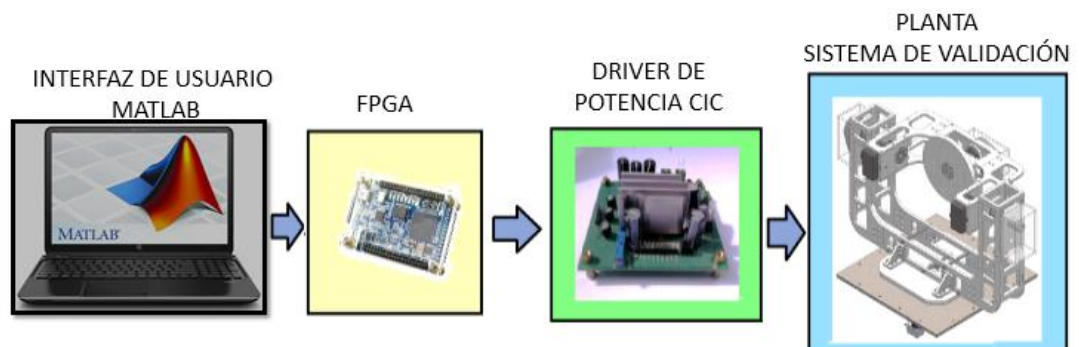
$$\theta = 0 \quad \text{y} \quad \ddot{\theta} = 0 \quad (16)$$

A partir de la ecuación diferencial y de las condiciones de frontera es posible encontrar las funciones que relacionan las variables del sistema (posición y velocidad) para poder generar una rutina de control clásico que permita generar pruebas estables, de alta trazabilidad y repetibilidad.

7.1.3 Control lazo abierto.

Continuando con el planteamiento del sistema de control, y en vista de la limitante de la adquisición de los elementos de sensado para implementar un control lazo cerrado que permita y garantice un alto porcentaje de repetibilidad y trazabilidad de las pruebas a realizar, en conjunto con la CIC es planteado un nuevo esquema de control que permita realizar pruebas de velocidad para el sistema de validación. Este nuevo esquema de control en lazo abierto fija como alcances lograr los movimientos de cada uno de los Gimbal dentro de los rangos de posición previamente establecidos.

Figura 134. Control del sistema de validación en lazo abierto



La Figura 134 muestra el esquema de control en lazo abierto implementado en el sistema de validación para lograr estas pruebas, en el cual es descrito a modo general su funcionamiento. El primer elemento presente en esta figura es una interfaz de usuario desarrollada como GUIDE en el software Matlab, en la cual son introducidos los datos de la prueba de velocidades a partir de una nomenclatura estándar definida para este sistema.

El segundo elemento del esquema de control en lazo abierto es la FPGA, este elemento tiene incluido todos los parámetros para la comunicación de la interfaz de usuario con los drivers que envían la potencia hacia los actuadores del sistema. Estos elementos reciben los comandos de la interfaz y los convierte en señales PWM para poder realizar la conmutación de las bobinas en los motores y así generar el movimiento y la carga requerida por la planta. El tercer elemento del sistema son los drivers de potencia, estos toman las señales del PWM del motor y las transforman en la potencia necesaria para transmitirla al motor.

Por último se encuentra la carga del sistema, que es la planta o el sistema de validación, la cual es el sistema mecánico que permite el movimiento del sistema. Como es posible notar, en este esquema de control únicamente es tomada en cuenta la señal de entrada y las perturbaciones ni la posición o velocidad final del sistema pueden ser comprobadas o corregidas por el sistema, únicamente es posible determinar una salida teórica a partir de las instrucciones dadas al sistema, no es posible medirlas exactamente.

7.2 SOFTWARE CIC

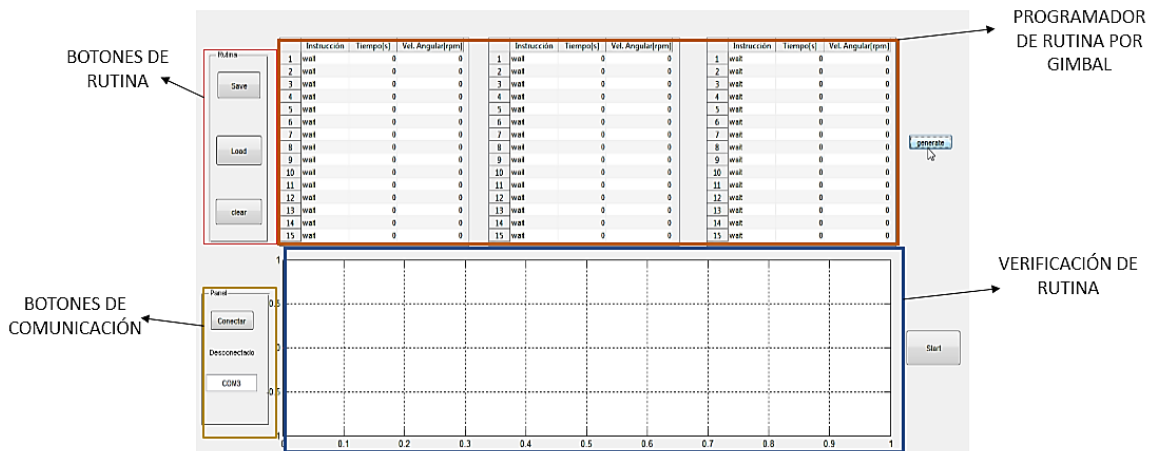
Continuando con la descripción del sistema de control lazo abierto en lazo cerrado implementado en el sistema de validación, el software desarrollado para el movimiento de cada uno de los componentes es posible describirlo a modo general en 3 subprogramas. Los subprogramas a identificar es la Interfaz de

usuario en GUIDE – Matlab, un control de los movimientos del motor a partir de la FPGA y la comunicación de la FPGA a los motores brushless.

7.2.1 MATLAB - Interfaz de usuario GUIDE

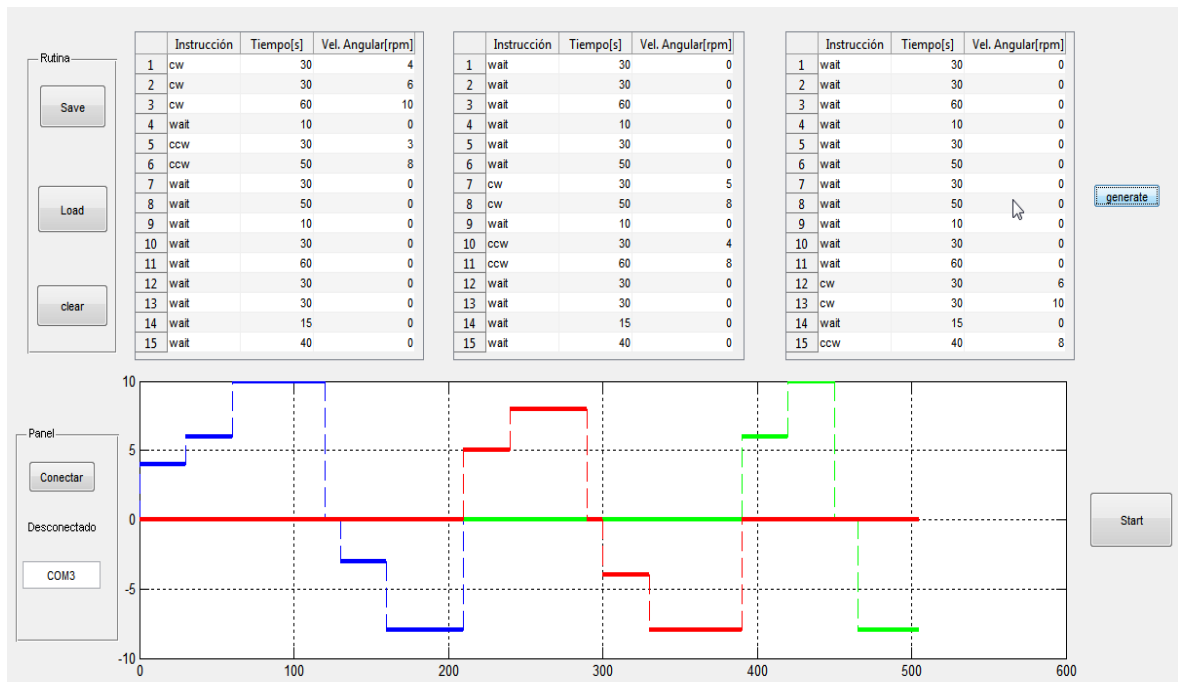
El primero de los subprogramas es la interface de usuario GUIDE en Matlab, el cual está compuesto de unos cuadros editables los cuales generan unos vectores de datos para enviar a la FPGA. La Figura 135 permite visualizar las zonas del Guide desarrollado, entre las cuales es posible destacar la zona de botones de rutina, donde es posible cargar, guardar o borrar las rutinas escritas en el programador de rutinas para los 3 Gimbal. La segunda zona es la del programador de rutina por Gimbal, donde se puede programar el sentido de giro (ccw o cw), el tiempo de giro a esa velocidad y la velocidad a la cual es requerida realizar la rutina. Por último es destacada la zona de verificación de la rutina, donde es posible visualizar la rutina descrita en el programador con sus respectivos tiempos.

Figura 135. Interfaz de usuario GUIDE.



La Figura 136 muestra un ejemplo de la visualización de una rutina de pruebas en la interfaz de usuario. Como es descrito anteriormente en la parte inferior es posible visualizar la rutina que va a ejecutar.

Figura 136. Ejemplo de rutina de pruebas



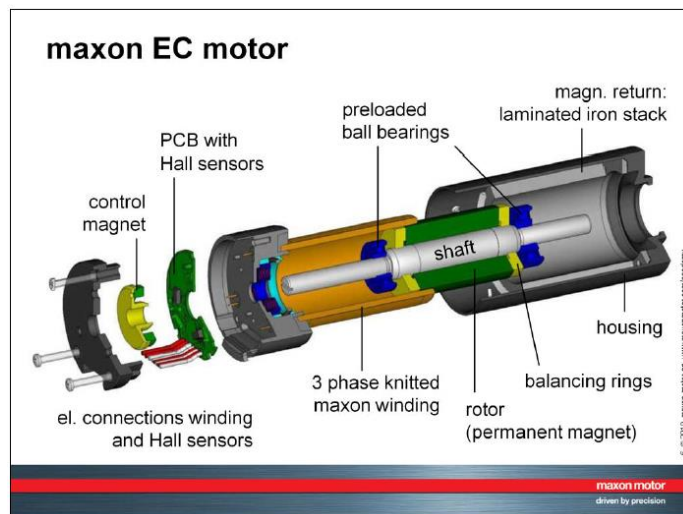
7.2.2 Control del motor mediante FPGA

Continuando con la descripción del software que controla el sistema de validación, un segundo subprograma que interviene en este proceso es el controlador diseñado dentro de la FPGA. Este controlador tiene como funcionalidad generar las secuencias de variación de las señales que permiten el movimiento de los motores brushless, así como realizar la interpretación de las señales provenientes de la interfaz de usuario y procesos relacionados con el funcionamiento de los motores.

Lo descrito anteriormente es posible entenderlo mejor al comprender el principio de funcionamiento de estos motores. Los motores brushless están compuestos de 3 partes fundamentales: 1 rotor con imanes permanentes montados en el centro del eje, balanceados dinámicamente, 1 estator que contiene el bobinado el cual genera una corriente eléctrica que produce un campo electromagnético que interactúa con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, y por último la carcasa del motor que encierra todo el mecanismo del motor y donde también está ubicada la PCB con los sensores Hall del motor.

El funcionamiento de estos motores para poder funcionar generan un campo magnético en su bobinado que sea perpendicular a la dirección del campo magnético de los imanes permanentes y así el rotor empieza a girar. Al iniciar el giro el motor la dirección del rotor puede ser variable por lo tanto es necesario que estos motores cuenten con un sistema de posicionamiento para poder energizar las bobinas que correspondan y mantener el par de los motores en su valor máximo en cada instante.

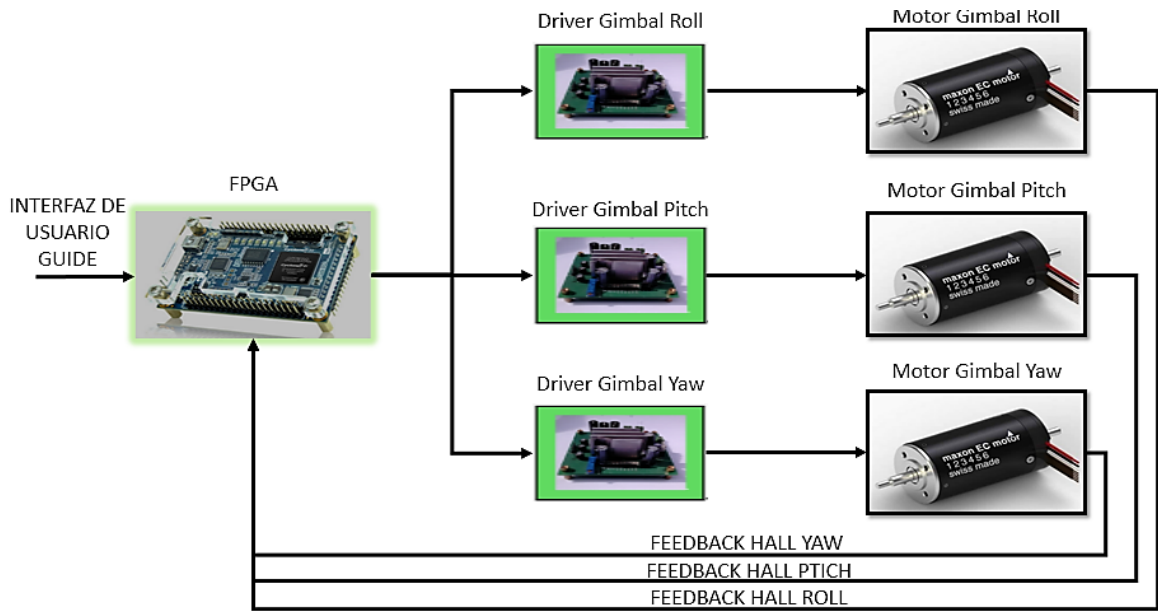
Figura 137. Despiece Motores Brushless



Fuente: Maxon motor. Fundamentos Brushless DC Motors. [En línea]. <http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8803450617886/maxonDCmotor-Notes.pdf?attachment=true>. [Citado 10 Octubre de 2014].

Por el principio de funcionamiento de estos motores podemos inferir que para que estos motores puedan funcionar, así el sistema esté en un esquema de control en lazo abierto, internamente en control por lazo cerrado. La Figura 138 muestra el esquema de control de lazo cerrado interno para los motores.

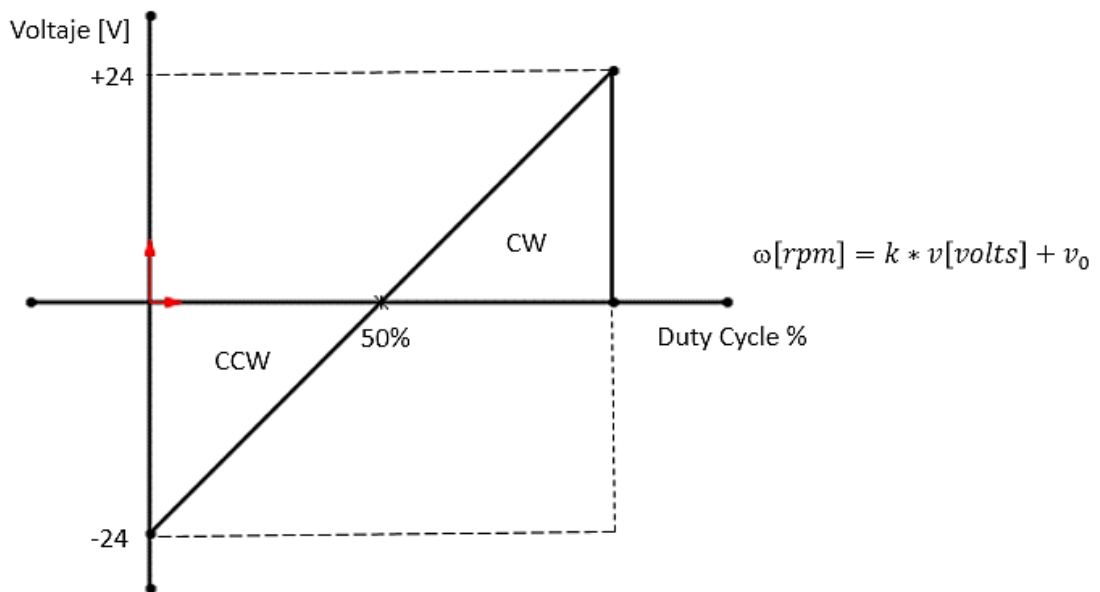
Figura 138. Lazo cerrado para el funcionamiento de los motores



A partir del principio de funcionamiento de los motores, una de las funciones del controlador presente en la FPGA es poder realizar este control a los motores para su correcto funcionamiento, otra de las funciones es verificar el comportamiento de los sensores de efecto Hall en analogía de interruptores que permiten realizar la secuencia de encendido y apagado de las bobinas a partir del funcionamiento de los driver trifásicos de cada uno de los Gimbal. Siguiendo con las funciones de este controlador, también permite realizar la variación porcentual del ciclo útil del motor para aumentar o disminuir la velocidad o realizar el cambio de sentido de giro de cada uno de estos y dentro de este controlador se incluye un aumento en rampa para los cambios de velocidad de cada una de las estructuras tipo Gimbal.

Esta variación del ciclo útil o Duty Cycle, es propia de cada valor y está determinada por la función que aparece a continuación para cada uno de los motores, la cual relaciona el valor del voltaje del motor con la velocidad del mismo. La forma general de esta función se muestra en la Figura 139 con la gráfica del ciclo útil. En la gráfica de ciclo útil es posible visualizar los porcentajes del voltaje total que generan una rotación en sentido contrario de las manecillas del reloj (ccw) y en el sentido de las manecillas (cw).

Figura 139. Duty Cycle motores Gimbal



7.2.3 Comunicación FPGA – Motor Brushless

Como último elemento del software para el sistema de control en lazo abierto aparece la comunicación de la FPGA con los motores Brushless, la cual se realiza mediante el driver de potencia y los sensores de efecto Hall. La tarjeta FPGA genera las señales que recibe el driver de los motores con la secuencia de encendido y apagado de las bobinas, las cuales son alimentadas a 24 [V] y estas

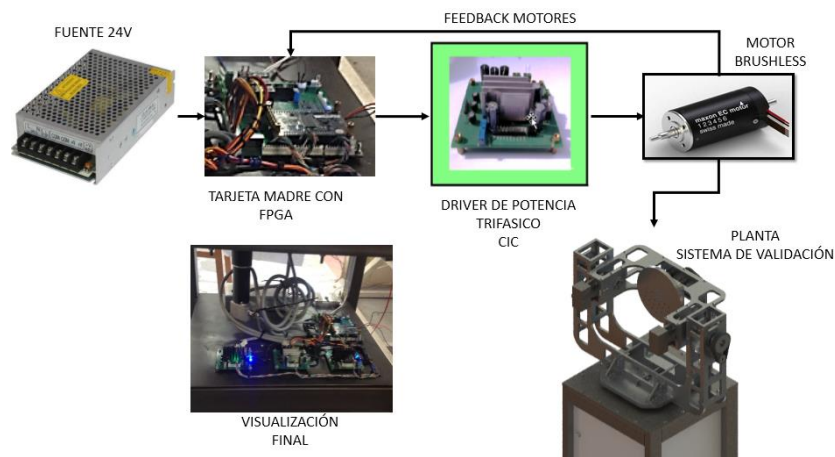
señales realizan la regulación de la potencia para que el motor gire a determinada velocidad y en determinado sentido de giro.

Luego de la recepción del motor, los sensores de efecto Hall reciben la información del sentido de giro del motor y envían esta información de vuelta a la FPGA la cual realiza nuevamente la secuenciación de los bobinados para producir el movimiento.

7.3 HARDWARE

Para el desarrollo del sistema de control es necesario contar con elementos que permitan generar la comunicación y las tareas de la transmisión e interpretación de las señales, estos elementos se describen en este numeral. La Figura 140 sintetiza los componentes del sistema de control del Gimbal, planteados en el desarrollo del sistema de validación de tres ejes de rotación. Para el control de velocidad de las estructuras Gimbal Yaw, Gimbal Pitch y Gimbal Roll se repite la configuración de drivers de potencia.

Figura 140. Hardware sistema de validación tipo Gimbal



7.3.1 FPGA DEO-NANO

Una FPGA (del inglés Field Programmable Gate Array) es un dispositivo que integra bloques lógicos de chips de silicio reprogramables. A diferencia de los procesadores, los FPGA son verdaderamente paralelos por naturaleza, así las diferentes operaciones de procesamiento no tienen que competir por los mismos recursos. Cada tarea de procesamiento independiente es asignada a una sección del chip y puede ejecutarse de manera autónoma sin ser afectada por otros bloques de lógica. Como resultado, el rendimiento de una parte de la aplicación no se ve afectado cuando se agregan otros procesos. Uno de los beneficios de los FPGA ante los sistemas basados en procesador es que la lógica de aplicación es implementada en circuitos de hardware en lugar de ejecutarse aparte de un SO, controladores y software de aplicación²⁰.

Para sistemas de control, también puede ejecutar algoritmos de control avanzados directamente en la estructura del FPGA para disminuir la latencia e incrementar velocidades. En el contexto del sistema de validación tipo Gimbal la FPGA es la encargada de ejecutar el conjunto de instrucciones lógicas que controlan el movimiento del motor Brushless.

Figura 141. FPGA DEO-NANO.



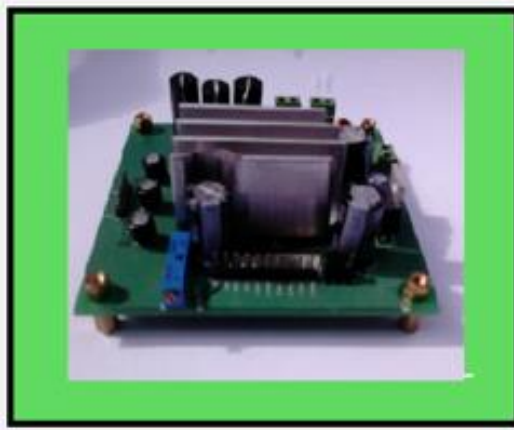
Fuente: Altera. DE0-Nano Development and Education Board. [En línea].
<<http://www.altera.com/education/univ/materials/boards/de0-nano/unv-de0-nano-board.html>>. [Citado 10 de Junio de 2014].

²⁰ Tomado de National Instruments.

7.3.2 Drivers de potencia

Los amplificadores (también llamados drivers) toman los comandos del controlador y generan la corriente necesaria para dirigir o girar el motor. Este componente fue desarrollado en las instalaciones de la CIC.

Figura 142. Driver Motores Brushless



Fuente. CIC

7.3.3 Sensores

Dispositivo de retroalimentación o sensor de posición. Algunas aplicaciones de control de movimiento (por ejemplo, control de motores de pasos) no requieren ningún dispositivo de retroalimentación de posición, pero para los servomotores sí es vital. El dispositivo de retroalimentación, generalmente un codificador de cuadratura, detecta la posición del motor y reporta el resultado al controlador, y de esa manera cierra el lazo con el controlador de movimiento.

Durante el desarrollo del proyecto es planteado el desarrollo de un sistema de control en lazo cerrado realimentado por sensores de posición tales como encoders digitales de alta resolución, para lo cual son seleccionados estos dispositivos a partir de la disponibilidad en el mercado y los requerimientos planteados dentro de las instalaciones de la CIC. El dispositivo de retroalimentación de posición y velocidad seleccionado es de tipo absoluto; sus fundamentos y especificaciones técnicas se describen más adelante.

Figura 143. Encoder DS-70, posición absoluta.



Fuente: Netzer. Electric Rotary Encoders. [Online].

<http://www.netzerprecision.com/files/Netzer_brochure_lr.pdf>. [Cited Aug. 5, 2014].

La DS-70 es un miembro de la serie DS de codificadores eléctricos basado en la tecnología patentada Netzer precisión. Estos codificadores ofrecen muchas ventajas, algunas sin precedentes:

- Perfil bajo (10 mm).
- Eje flotante hueco.
- No hay cojinetes u otros elementos de contacto.

- De alta precisión.
- Alta tolerancia a la temperatura, golpes, humedad, EMI y RFI.
- Insensible a los campos magnéticos.
- Muy bajo peso.

La DS-70 es un encoder absoluto que ofrece alta resolución y precisión, las cuales son adecuadas para aplicaciones exigentes, tales como: aeroespacial, médico, instrumentación, automatización, etc. El desarrollo de este proyecto involucra la validación de sensores inerciales (IMU) con características similares a las aplicaciones aeroespacial. Por esta razón es seleccionado un encoder que brinde características 5 veces mayor o igual a las características del IMU KVH-1750. Véase Sección 4.1.2.

Figura 144. Encoder DS-70, Especificaciones técnicas

Mechanical	
Allowable mounting eccentricity (operational)	±0.1 mm
Allowable rotor axial motion (operational)	±0.1 mm
Rotor inertia	1.7 gr mm ²
Total weight	35gr
Outer diameter / Inner diameter / Profile	70 / 30 / 10 mm
Material (stator, rotor)	Ultem™ polymer
Material mounting clamps, M2	S.S.
Electrical	
Supply voltage	5V ± 5%
Interconnection	Ø 3 mm Shielded cable
Performance	
Electrical Cycles – Fine/Coarse channels	64 / 3
Angular resolution (using 12 bit A/D conversion)	19 bits
Static error (with offset compensation)	< 10 mDeg (0.17mrad)
Maximum operational speed	750 rpm
Measurement range	Unlimited rotation
Output	SSi absolute position
BIT (build in tests , optional)	Included (SSi version)

Fuente: DS-70 Data Sheet, V 2.0, Nov. 2012.

De acuerdo a la Figura 144 la señal de salida es absoluta y la resolución angular del encoder seleccionado es 19 bit. Con el propósito de comparar estas especificaciones técnicas con los de la sección 4.1.2, son mostradas las equivalencias en arc-seg.

Opciones de resolución²¹:

- 18 bit (262 144 counts per revolution, ≈ 4.94 arc second)
- 26 bit (67 108 864 counts per revolution, ≈ 0.019 arc second)

Además de seleccionar un encoder de alta resolución, es importante tener en cuenta un encoder con protocolo abierto, como el BiSS; el cual no es dependiente del desarrollo del fabricante y disminuye los costos de adquisición de los encoders.

7.3.4 Cableado

El sistema de validación tipo Gimbal es un equipo fijo, que no tiene restricciones directas de alimentación, dado que utiliza una fuente DC para suministrar la corriente y el voltaje necesario para alcanzar la potencia deseada en el motor en condiciones de arranque y operación. La conexión de los componentes electromecánicos se realiza mediante cables UTP de 8 hilos en cada uno de los ejes de rotación, para transmitir la potencia y realizar el control de cada de los motores Brushless y los encoders.

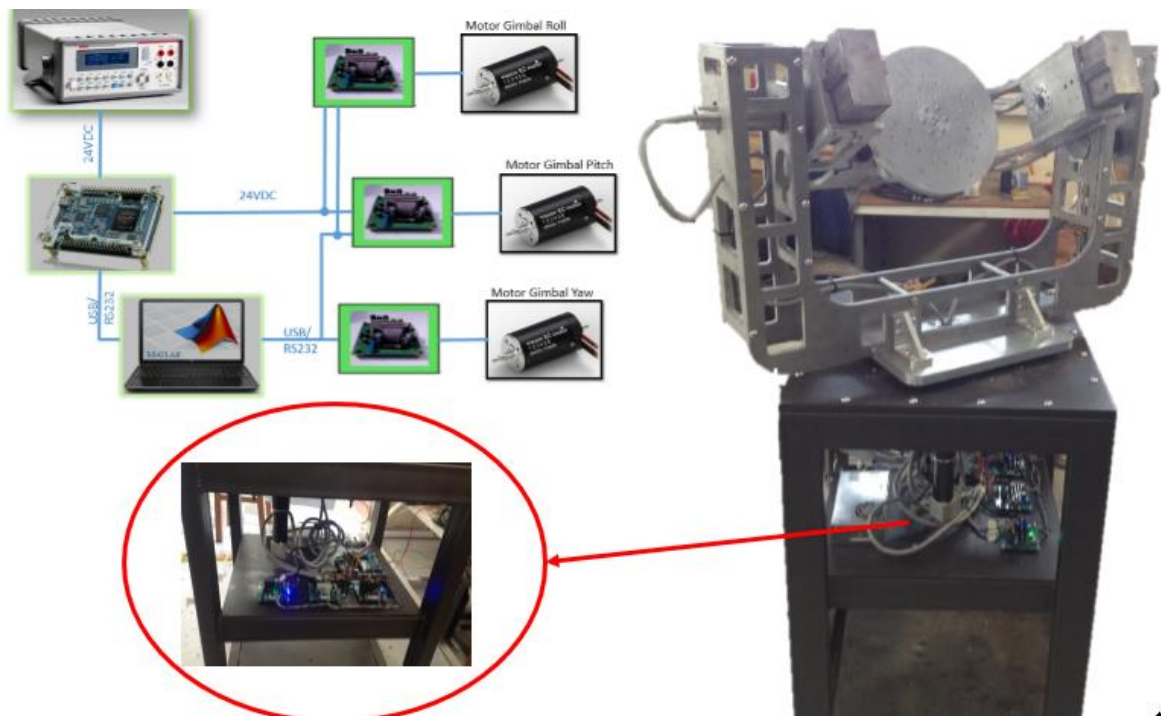
Ante la necesidad de energizar los componentes electromecánicos (motores y encoders), se establece una comunicación eléctrica por cables entre los ejes de cada Gimbal. Para establecer las conexiones y no limitar la rotación o la cantidad de vueltas de cada estructura Gimbal se diseñan ejes huecos con el propósito de pasar los cables al interior del eje de giro y así evitar que los cables se enreden

²¹ Tomado de Renishaw

con la estructura o se tensionen deteniendo la rotación. De acuerdo al diseño del cableado todas las estructuras Gimbal podrán hacer rotaciones completas (360°).

En la Figura 145 se muestra el diagrama simplificado del cableado implementado en el sistema de validación tipo Gimbal, como también el cableado final de la estructura del sistema de validación. Todos los cables fueron fijados a los elementos de la estructura de cada Gimbal.

Figura 145. Diagrama esquemático cableado del sistema de validación tipo Gimbal y cableado final.



8 ANALISIS DE COSTOS DEL GIMBAL

En este capítulo se muestra una comparación del presupuesto inicialmente planteado para el desarrollo del proyecto de grado y el presupuesto final ejecutado para lograr el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio del desarrollo del proyecto. El presupuesto inicial para la ejecución del proyecto es posible visualizarlo en la

Tabla 25, es importante resaltar que los valores de las asesorías son asumidos internamente dentro del presupuesto de cada institución.

Tabla 25. Presupuesto planteado inicialmente

PRESUPUESTO		
RESPONSABLE	RECURSO NECESARIO	COSTO
ESTUDIANTES	BIBLIOGRAFIA Y PAPELERIA	\$ 300.000
CIC	MATERIALES Y ELEMENTOS MECANICOS	\$ 2.500.000
	MATERIALES Y ELEMENTOS ELECTRICOS Y ELECTRONICOS	\$ 3.000.000
	SISTEMA DE ADQUISICION Y MONITOREO	\$ 2.500.000
	ASESORIA TECNICA EN SOFTWARE Y SENSORES	\$ 1.500.000
	MAQUINADOS Y ENSAMBLAJE	\$ 2.500.000
	HONORARIOS (SALARIOS ESTUDIANTES)	\$ 7.200.000
	ASESORIA ING. SERGIO QUINTERO	\$ 1.500.000
UIS	ASESORIA ING. OMAR GELVEZ	\$ 2.500.000
	SUBTOTAL	\$ 23.500.000
	IMPREVISTOS (10%)	\$ 2.350.000
	TOTAL	\$ 25.850.000

8.1 MATERIALES

La tabla 26 muestra el presupuesto ejecutado en materiales, los cuales se dividen en dos categorías, los materiales mecánicos (aluminio, perfilería, lámina ASTM A36, entre otros) y materiales eléctricos y electrónicos (tarjeta madre, drivers, cables y demás).

Tabla 26. Presupuesto ejecutado en materiales.

PRESUPUESTO MATERIALES		
RESPONSABLE	RECURSO NECESARIO	COSTO
CIC	MECANICOS	\$ 4.500.000
	ELECTRICOS Y ELECTRONICOS	\$ 880.000
	TOTAL	\$ 5.380.000

8.2 ELEMENTOS DE SELECCIÓN

En la Tabla 27 son detallados los costos asumidos por la CIC para los elementos de selección, tal y como están descritos en la columna de recurso necesario. Dentro del presupuesto del proyecto no se incluyeron los elementos de sensado (Encoders de alta resolución) debido a que estos no fueron adquiridos dentro del desarrollo del proyecto.

Tabla 27. Presupuesto Elementos de selección.

PRESUPUESTO ELEMENTOS DE SELECCION		
RESPONSABLE	RECURSO NECESARIO	COSTO
CIC	MOTOREDUCTORES	\$ 5.321.400
	CORREAS Y POLEAS	\$ 755.160
	RODAMIENTOS	\$ 416.498
	TOTAL	\$ 6.493.066

8.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN

En la Tabla 28 son detallados algunos de los procesos más importantes dentro de la construcción del Gimbal. Los procesos de fresado y torneado fueron

desarrollados dentro de las instalaciones de la CIC por el Físico Hernán Garnica, quien nos aconsejó, colaboro y guio durante toda la construcción de las piezas.

Tabla 28. Presupuesto Mecanizados.

PRESUPUESTO MECANIZADOS		
RESPONSABLE	RECURSO NECESARIO	COSTO
CIC	CORTE POR AGUA ABRASIVO	\$ 1.700.000
	TORNEADO	\$ 960.000
	FRESADO	\$ 4.000.000
	ROSCADO, CORTE POR CIERRA Y OTROS PROCESOS	\$ 1.500.000
	TOTAL	\$ 8.160.000

8.4 ASESORIAS

En cuanto a las asesorías recibidas, durante todo el desarrollo del proceso contamos con el acompañamiento de diferentes especialidades de la UEN Tecnologías de la CIC para el desarrollo de los subsistemas. Las asesorías más significativas son detalladas en la Tabla 29.

Tabla 29. Asesorías en el desarrollo del proyecto.

PRESUPUESTO ASESORIAS		
RESPONSABLE	RECURSO NECESARIO	COSTO
CIC	DISEÑO MECANICO	\$ 500.000
	MECANIZADOS	\$ 500.000
	HARDWARE	\$ 500.000
	SOFTWARE	\$ 500.000
	ELECTRONICA	\$ 500.000
	TOTAL	\$ 2.500.000

9 PRUEBAS DEL SISTEMA GIMBAL

Antes de empezar la calibración o validación del IMU, es necesario seguir los siguientes lineamientos que ayudan a estandarizar las diferentes pruebas a realizar en el Sistema de validación tipo Gimbal.

- Conexión de los cables externos (alimentación, USB/RS232).
- Instalación correcta del firmware en el dispositivo IMU.
- Montaje y aseguramiento del módulo de medición inercial y sus componentes electrónicos en la plataforma circular (Gimbal Roll).
- Adecuación de las opciones de configuración de conexión de la interfaz gráfica de usuario (según el manual de funcionamiento del Anexo K).
- Definición de la posición cero.
- Configuración de las rutinas de movimiento y salida.
- Comienzo del muestreo.

9.1 RUTINAS DE OPERACION DEL GIMBAL

El proceso de validación se lleva a cabo mediante el uso de un sistema mecánico el cual genera distintas velocidades constantes controlables para cada una de las estructuras tipo Gimbal, donde es anclada la IMU. Para iniciar este proceso de pruebas es indispensable generar un área de seguridad, conocimientos de los riesgos y funcionamiento del sistema.

La puesta en marcha de las pruebas requiere de la ejecución del programa Matlab, en el cual está montada la interfaz de usuario que permite la manipulación de los parámetros a evaluar. Los pasos a seguir para realizar las pruebas son los siguientes:

- Inicie la interfaz gráfica de calibración con la ejecución del archivo 'gui_gimbal3d.m'.
- Haga clic en el botón 'Conectar' en la GUI para conectar el sistema de validación e inicializar los controladores de motor. Si la inicialización falla, compruebe si el cableado y la comunicación están configurados correctamente.
- Verifique que el puerto que se visualiza en el GUI coincida con el puerto al cual realizo la conexión.
- Haga clic en el botón 'Load' para cargar la rutinas establecidas. Si desea generar una nueva rutina presione el botón 'Clear' para borrar la rutina existente, copie una nueva rutina y presione el botón 'Save' para guardar la rutina generada.
- Para introducir los movimientos dentro de las rutinas es necesario describirlos de la siguiente manera:
 - Cw: sentido de giro con las manecillas del reloj.
 - Ccw: contrario al sentido de giro de las manecillas del reloj.
 - Wait: tiempo de espera.
 - Tiempo: duración del movimiento en segundos.
 - RPM: porcentaje de Duty Cycle equivalente a la velocidad en RPM definida en el Datasheet de cada motor. Rango de variación de 0-50.
- Luego de verificar que la rutina es la adecuada, presione el botón de inicio (START). Recuerde que al final de la rutina hay que devolver el sistema de validación a su posición inicial.
- Apague el sistema de validación a partir del panel de botones en la parte frontal del sistema. Botón de apagado.

Las características de la interfaz gráfica de usuario (GUI) se muestran en la Figura 146 donde se puede observar los paneles de opciones y los diferentes botones anteriormente mencionados para la configuración de las rutinas. En la parte inferior se observa la gráfica de las velocidades teóricas de las rutinas generadas.

Puesto que no fue implementado un control en lazo cerrado esta grafica solo trabaja con los valores teóricos asignados en las rutinas; si por algún motivo se presenta una desviación en las velocidades de salida debido a imprevistos de tipo electrónico o mecánico, no podrán ser ajustados. El control de lazo cerrado será implementado más adelante, y está contemplado dentro los requisitos para que el sistema de validación pueda calibrar el IMU tal como se diseñó. El alcance de este proyecto es limitado a un control en lazo abierto para verificar que el sistema mecánico esta balanceado y sus componentes no presenten dificultades mecánicas que puedan afectar la precisión requerida del sistema de validación.

Figura 146. GUI sistema de validación.

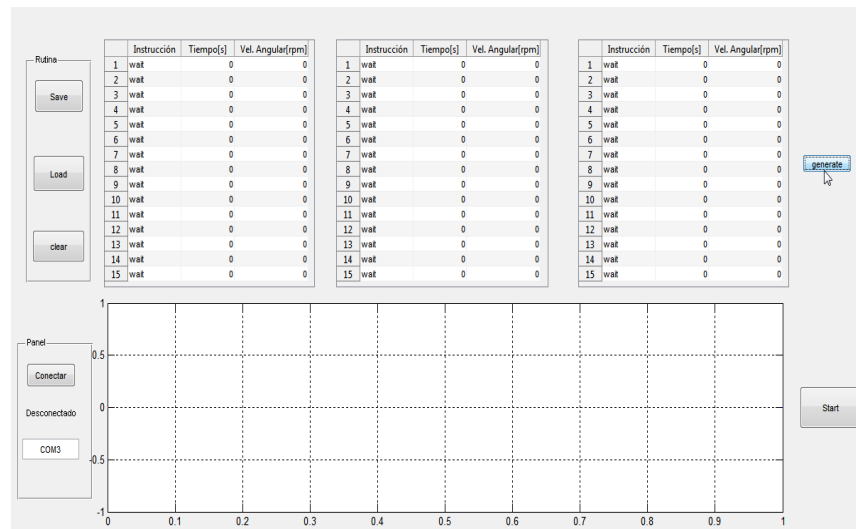
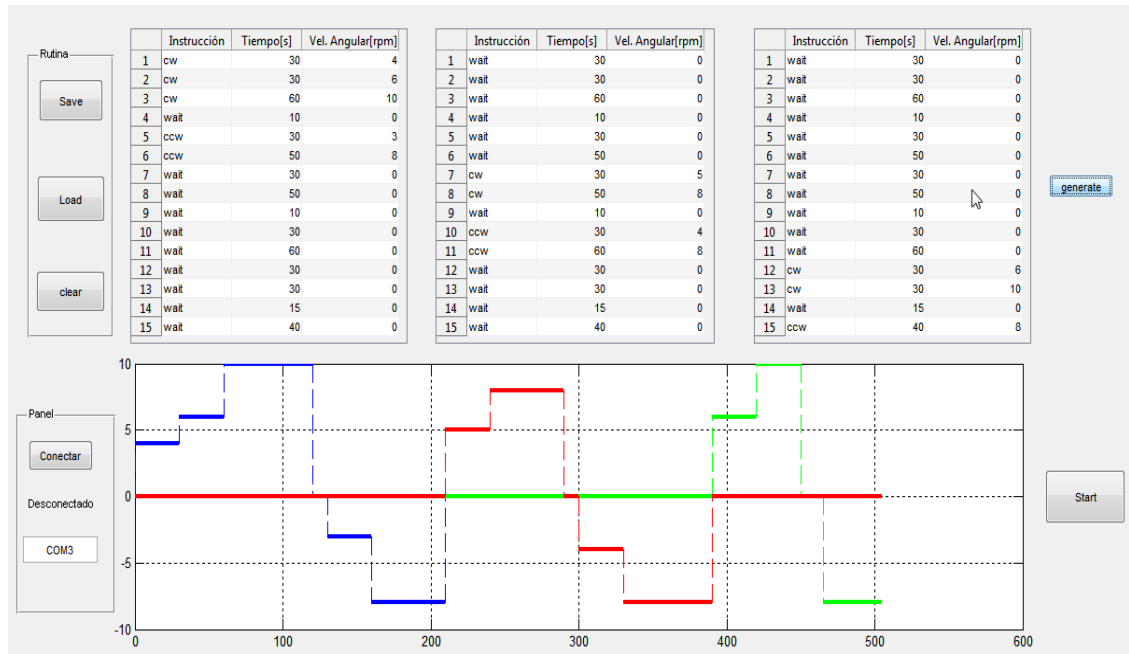


Figura 147. Visualización de Rutinas sistema de validación.



Las funciones de los Botones principales del GUI son descritos en la Tabla 30.

Tabla 30. Botones GUI.

Botón	Función
Conectar	Habilita o deshabilita la conexión de puerto serial establecida entre el sistema de calibración y la computadora.
Save	Guarda una rutina a partir de los nuevos valores (instrucción, tiempo y velocidad angular) asignados en la tabla de cada Gimbal
Load	Carga una rutina existente.
Clear	Borra la rutina que se ha cargado en GUI, para poder escribir una nueva rutina.
Generate	Visualiza el comportamiento de velocidad que tendrán las tres estructuras de rotación Gimbal del sistema de validación, antes de empezar la rutina.
Start	Empezar la rutina de calibración.

9.2 BALANCEO DEL MECANISMO TIPO GIMBAL

Dentro de los requerimientos de operación del sistema mecánico tipo Gimbal está reducir el desbalanceo a sus más bajos niveles con el fin de minimizar la vibración y el ruido del sistema, evitando alterar los datos de posición angular medidos por los encoders.

Para brindar una mayor confiabilidad de las mediciones se utilizaron rodamientos axiales de bolas que permiten que las estructuras de rotación tengan mayor área de contacto al girar y equilibrar las fuerzas centrifugas alineando el eje de inercia principal con los ejes geométricos de rotación a través de la simetría de los componentes o agregando contrapesas a una distancia específica

Las fuerzas causadas por el desbalanceo son proporcionales al cuadrado de las RPM y eso quiere decir que las máquinas de alta velocidad deben ser balanceadas con mayor precisión que las máquinas de baja velocidad. El sistema de validación tipo Gimbal opera a velocidades entre 3 -10 RPM por lo que no se necesitan estudios o técnicas rigurosas para corregir esta condición mecánica.

9.3 PUESTA A PUNTO

Para seguir las recomendaciones de puesta a punto o puesta en funcionamiento Véase Anexo K. Instructivo de operación y mantenimiento.

9.4 RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD

Véase Anexo J. Instructivo de operación y mantenimiento del sistema gimbal

9.4.1 Parada de emergencia

El sistema de validación tipo Gimbal cuenta con los siguientes elementos de parada de emergencia, que garantizan la seguridad de la maquina como la seguridad del usuario a bordo de ella. :

- Un pulsador de paro de emergencia externo, ubicado en las superficie lateral de la estructura base o bastidor.

El pulsador es de accionamiento manual, cuando se acciona el paro de emergencia, el sistema de validación se detiene inmediatamente ya sea que se encuentre en condiciones normales de funcionamiento una vez finalizadas las rutinas de validación o bajo condiciones anormales de funcionamiento.

10 CONCLUSIONES

- Se realizó satisfactoriamente el diseño y construcción de un sistema de validación para el módulo de navegación inercial cumpliendo con los requerimientos de movimiento establecidos por la CIC, utilizando SolidWorks como herramienta de diseño CAD y análisis CAE respectivamente.
- Se seleccionaron cada uno de los componentes mecánicos y electromecánicos que hacen parte del sistema de validación tipo Gimbal, como son, motores DC de tecnología brushless o sin escobillas, encoders rotativos digitales de alta resolución, correas síncronas, poleas dentadas, rodamientos radiales y rodamientos axiales a bolas.
- Se implementó un control en lazo abierto al sistema de validación tipo Gimbal a partir de la integración de los motores brushless, la unidad central de procesamiento FPGA, drivers de potencia y demás componentes electrónicos desarrollados en la CIC.
- Se realizaron las pruebas de velocidades a cada una de las estructuras tipo Gimbal donde se evidencia que los requerimientos fueron alcanzados. Los rangos de libertad angular y velocidad final del sistema de validación son los siguientes:
 - Rango de velocidades: 3 - 10 rpm
 - Rango de posiciones Gimbal Roll: Continua
 - Rango de posiciones Gimbal Pitch: +/-180
 - Rango de posiciones Gimbal Yaw: +/-180
- Se diseñaron ejes huecos que permiten el paso del cableado entre las estructuras tipo Gimbal, sin limitar la libertad angular requerida, permitiendo mayor

libertad en los movimientos del sistema de validación respecto a los requerimientos de posición establecidos por la CIC.

- Se diseñó la estructura de cada Gimbal teniendo en cuenta la precisión deseada del sistema, asegurando la simetría de los componentes que permita establecer la alineación y balanceo adecuado para el correcto funcionamiento del sistema.
- Se realizó una ficha técnica del sistema de validación, un instructivo de seguridad, un instructivo de operación y mantenimiento de acuerdo a lo establecido los objetivos específicos.
- Debido a la complejidad tanto del sistema de validación como del sistema de control en lazo cerrado que se planteó inicialmente para el desarrollo del proyecto, se abre la posibilidad del planteamiento de un proyecto de grado que tenga la final de realizar todo el modelamiento dinámico y que genere un sistema de control para las pruebas a realizar a futuro.
- El sistema de validación se diseñó con la finalidad de poder adaptarse a diferentes módulos de medición inercial y diferente IMU con un peso no mayor a 10 kg.
- Debido a la complejidad del sistema mecánico y la cantidad de componentes, fue necesario seleccionar un material de bajo peso y altas propiedades mecánicas (aleación de aluminio 7075 -T651) que además de soportar los esfuerzos generados, disminuya el peso de las estructuras y así lograr seleccionar motores con menores exigencias de carga.

- Dentro de las características del sistema de validación son incluidos los parámetros de resolución y precisión del sistema, los cuales inicialmente se planteó para ser medidos mediante un sistema de control en lazo cerrado a partir de la implementación de encoder digitales de alta resolución, pero debido a razones administrativas dentro de la CIC no fue posible adquirir estos elementos, por lo cual, se vio la necesidad de implementar un sistema de control en lazo abierto, en donde la medida de la precisión no puede ser realizada y la resolución teóricamente es de 0.96 grados.
- El beneficio económico obtenido por la CIC en la ejecución de este proyecto de grado es la reducción de costos asociados a la compra del equipo a empresas internacionales. El costo en el desarrollo de este equipo para la empresa es de \$ 25.850.000.00 aproximadamente comparado con el costo de adquisición del equipo, relacionado en el **Anexo C**, de aproximadamente \$ 599.000.000.00.
- El desarrollo de este proyecto de grado en la CIC contribuye en el desarrollo profesional y personal de los autores, fortaleciendo las capacidades técnicas de diseño, trabajo en equipo e interdisciplinario en la construcción de un equipo de validación de alta precisión. Así como la formación en áreas como la inspección de tubería, el planteamiento de propuestas tipo investigativo para la detección de defectos internos en poliductos. Experiencia en la construcción de estructuras mecánicas para el monitoreo del sistema de protección catódica en tuberías enterradas.

11 RECOMENDACIONES

- Debido a imprevistos administrativos en la ejecución del proyecto no fue posible realizar la compra de los sensores tipo encoder para la implementación del control en lazo cerrado. Por esta razón, se recomienda adquirir los sensores de alta resolución seleccionados para obtener la precisión y resolución necesaria en las pruebas de posición y velocidad para la validación de los datos del módulo de medición inercial.
- El tiempo de desarrollo del proyecto se extendió debido a problemas de tipo administrativos dentro de la CIC, por lo tanto, se recomienda más claridad y asesoría en el desarrollo de estas actividades interinstitucionales para proyectos futuros.
- Debido a la complejidad tanto del sistema de validación como del sistema de control en lazo cerrado que se planteó inicialmente para el desarrollo del proyecto, se abre la posibilidad del planteamiento de un proyecto de grado que tenga la final de realizar todo el modelamiento dinámico y que genere un sistema de control para las pruebas a realizar a futuro.

BIBLIOGRAFIA

ACUTRONIC CARCO ELECTRONICS. The driving force in motion simulation. [Online]. THREE-Axis Motion Simulators. [Bubikon, Switzerland], 2013.

AEROTECH. Catalog Advanced Motion Systems for Defense, Aerospace, and National Security. 2010.

ASM Handbook, Volume 02- Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 1990.

BUDYNAS, Richard G. y NISBETT J. Keith. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. Traducido por Jesus Elmer Murrieta y Efren Alatorre. 8 ed. Bogotá D.C: McGraw- Hill, 2008. 1044 p.

Guallichico, Jorge David y UTRERAS, Carlos Adrián. Diseño e implementación de un sistema de navegación inercial tipo strapdown para estimar la posición de un robot móvil, aplicable a un prototipo de autopiloto de un UAV. Trabajo de grado ingeniería electrónica. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2013. 123 p

KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. Traducido por Miguel Ángel Martínez. 3 ed. Colombia. Pearson, 1998. 998 p.

MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. Pearson Educación, Mexico, 2006. 944 p.

NORTON, Robert. Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Traducido por Rodolfo Navarro Salas. 3 ed. Bogotá D.C.: McGraw-Hill, 2005. 750 p.

NUCIRA, René Oswaldo y PACHECO, Benjamín Andrés. Desarrollo de una herramienta de inspección interna para tuberías de hidrocarburos, fase 1 “estudio de prefactibilidad”. Trabajo de grado ingeniería eléctrica y Telecomunicaciones. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2001. 123 p.

Pós-graduação, Desenvolvimento e implementação de um sistema de medição inercial de trajetórias de dutos, 2008.

PARADA, Alfredo. Módulo de fatiga fisura progresiva. Ingeniero mecánico UIS. Disponible Centro de Estudios de Ingeniería Mecánica.

Winderson, E. Carlo, Pece. Walter A. Kapp. y Gustavo Emmendoerfer. Bancada para Calibração de Giroscopios. Brasil: 2011. 6 p.

ANEXOS

Anexo A. Memoria de cálculos.

Este anexo presentan los cálculos realizados para el diseño y la selección de algunos de los componentes mecánicos de la estructura mecánica Gimbal. A continuación se detallan los cálculos descritos en el numeral 3.5 del capítulo de diseño mecánico. Los cálculos se agrupan por Gimbal para una mejor distribución.

A.1 POTENCIA MOTORREDUCTOR

El peso estimado de las estructuras Gimbal Yaw, Gimbal Pitch y Gimbal Roll se determina mediante el uso del software Solidworks 2012. Versión estudiantil. Los cálculos se establecen según la estructura Gimbal de interés y las consideraciones descritas en el la sección 3.5.

- Par y potencia Gimbal Roll

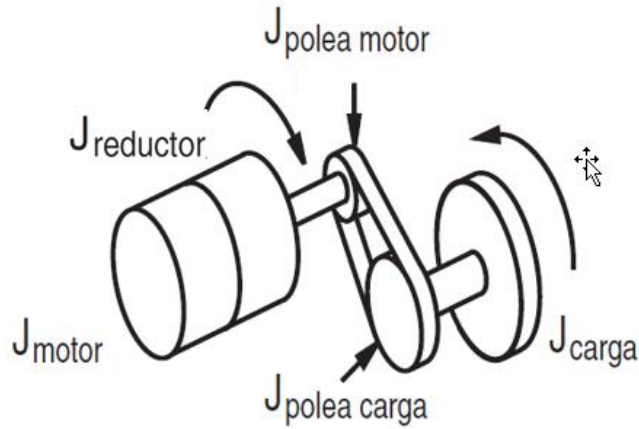
La masa total de Gimbal Roll²² y del módulo de medición inercial instalado en él, es de 11,24 [lbf]. La distancia entre centros del eje del motor y el eje que mueve la plataforma circular de 3,66 [in], en donde se ubicará el módulo inercial con un peso de 11,02 [lbf], correspondiente al IMU y sus componentes.

$$T_{motor,roll} = T_{dinamico} + T_{carga} \quad (17)$$

Se define el torque dinámico como el torque requerido para acelerar y desacelerar la carga.

²² Véase Sección 3.3.1

Figura 148. Esquema transmisión de potencia.



$$T_{dinámico}[N - m] = J_{total}[Kg - m^2] * \left(\frac{\Delta n_{carga} [rpm]}{\Delta t [s]} \right) * \frac{2\pi}{60} \quad (18)$$

Donde $\Delta t [s]$ es el tiempo en estado transitorio en el que el motor logra establecer su velocidad nominal de operación.

Inercia de la carga llevada al motor.

$$J_{total} = J_{motor-red} + J_{polea motor} + \frac{J_{polea carga} + J_{carga}}{i^2} \quad (19)$$

Donde i es la relación de transmisión de la transmisión por correas síncronas.

$$\begin{aligned} J_{motor-red} &= 150 \times 10^{-6} [Kg - m^2] \\ J_{polea motor} &= 1,075 \times 10^{-4} [[Kg - m^2] \\ J_{polea carga} &= 1,6209 \times 10^{-3} [Kg - m^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{carga} &= 0,06 [Kg - m^2] \\ i &= 2 \end{aligned}$$

$J_{total} = 0,0618 [Kg - m^2]$

Reemplazando (12) en (11) y sabiendo que $\Delta n_{carga} = n_f - n_i = 10 - 0$; [rpm] y $t = 0,1$ [s] para Gimbal Roll se tiene que:

$$T_{dinámico}[N - m] = 0,0618[Kg - m^2] * \left(\frac{10[rpm]}{0,1 [s]} \right) * \frac{2\pi}{60}$$

$$T_{dinámico} = 0,647 [N - m]$$

Después, se necesita calcular el torque resistivo o torque de carga a velocidad constante para hacer funcionar el mecanismo, para vencer la fricción, a fuerzas externas de carga, etc. Por lo tanto se estima este valor por medio de la siguiente formula:

$$T_{carga}[N - m] = F * d \quad (20)$$

$$F = 98,08 [N]$$

$$d = 0,02[m]$$

$$T_{carga} = 1,96 [N - m]$$

El torque suministrado por el motor para cumplir los requerimientos debe ser:

$$T_{motor, Roll} = 0,6[N - m] + 1,96[N - m]$$

$$T_{motor, Roll} = 2,607 [N - m]$$

La potencia se determinó a la velocidad máxima a la que necesita moverse la estructura Gimbal Roll, siendo este valor 10 [RPM].

$$P [Watt] = T_{motor, Roll} * \omega * \frac{2\pi}{60}$$

$$P = 2,607[N - m] * 10[rpm] * \frac{2\pi}{60}$$

$$P_{motor, Roll} = 2,73 [Watt]$$

$$P_{seleccion; motor, Roll} = 2,73 * 3,5 = 9,5 [Watt]$$

Debido que el sistema es reversible; por sus características de cambio de giro y el peso final de la estructura no estaba completamente definido en el momento de la compra de los motores se consideró un factor de seguridad para la selección de estos motores de $N= 3.5$ con el fin de dar un margen de seguridad al peso total de cada estructura Gimbal. La decisión fue tomada en conjunto con las directrices de la CIC puesto que los motores fueron importados y el periodo de compra y de entrega era demorado.

Según lo anterior multiplicamos el torque de selección por 3,5. Los motores fueron seleccionados de acuerdo al programa de selección de Maxon. Véase Figura 149. Los parámetros que se muestran en la figura son los valores en el motor.

Figura 149. Programa selección de los motores Maxon.



Fuente: Maxon Motors. Maxon selection program. [Online].
<http://www.maxonmotor.es/maxon/view/msp/>. [Cited Sept. 26, 2014].

Según la información suministrada, la combinación de motores de tecnología Brushless y reductores de alta precisión que se ajustan a los valores de torque y velocidad requeridos, disponibles en el momento fue el siguiente:

251601 - EC 45 flat Ø42.8 mm, Conmutación electrónica (Brushless), 50 Vatios, con sensores Hall

203131 - Reductor planetario GP 42 B Ø42 mm, 3 - 15 Nm, versión en cerámica 230:1

El torque y la potencia suministrada por el motor a seleccionar, debe ser mayor que la calculada, para garantizar el margen de seguridad. Los cálculos para determinar el torque y potencia para la selección de los motores Gimbal Pitch y Gimbal Yaw se realizan siguiendo el mismo procedimiento mostrado en Gimbal Roll. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Par y potencia Gimbal Pitch

$$T_{motor,Pitch} = 37,96 [N - m]$$

$$P_{motor,Pitch} = 39,75 [Watt]$$

El motor Brushless Maxon seleccionado de referencia 411678 tiene un factor de seguridad aproximadamente de $90,16 \text{ Nm} \div 37,96 \text{ Nm}$, es decir, un factor de 2,37 o 137% sobre el valor máximo del torque resistivo.

- Par y potencia Gimbal Yaw

$$T_{motor,Yaw} = 78,6 [N - m]$$

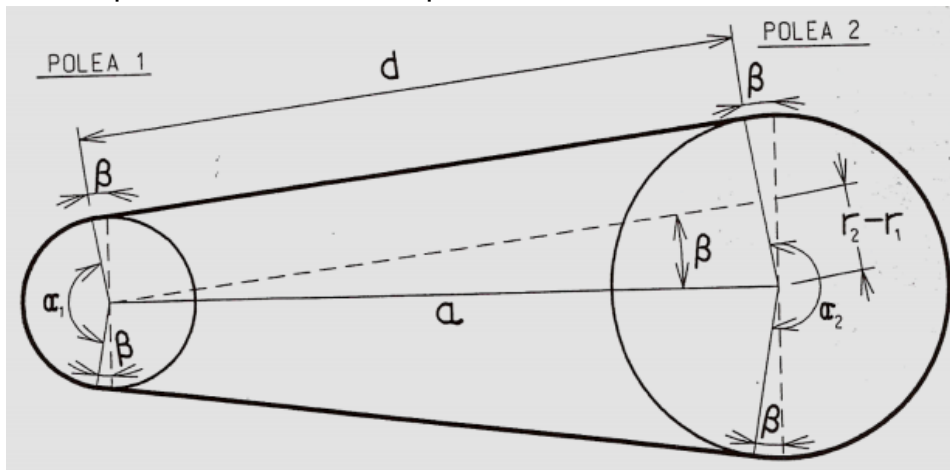
$$P_{motor,Yaw} = 80,85 [Watt]$$

El motor Brushless Maxon seleccionado de referencia 136207 tiene un factor de seguridad aproximadamente de $104,2 \text{ Nm} \div 78,6 \text{ Nm}$, es decir, un factor de 1,32 o 32% sobre el valor máximo del torque resistivo.

A.2 CÁLCULO DE FUERZAS

En la rueda dentada, la única componente que produce torsión en el eje es la fuerza tangencial, F_t . Por medio de la geometría de las correas se determinan las componentes de las fuerzas que actúan sobre las correas síncronas o dentadas.

Figura 150. Esquema transmisión de potencia



Haciendo uso de la ecuación simplificada (14) que se muestra a continuación se determina el ángulo de contacto beta (β) de las correas con las poleas.

$$\sin(\beta) = \frac{r_2 - r_1}{e} \quad (21)$$

Donde:

e: distancia entre centros [m]

r1:²³ radio de la polea del motor [m]

r2: radio de la polea de carga [m]

A partir de la ecuación (14) los ángulos de contacto del sistema de correas síncronas de las estructuras Gimbal Yaw, Pitch y Roll son los siguientes. Estos resultados se utilizan más adelante para el cálculo de las fuerzas.

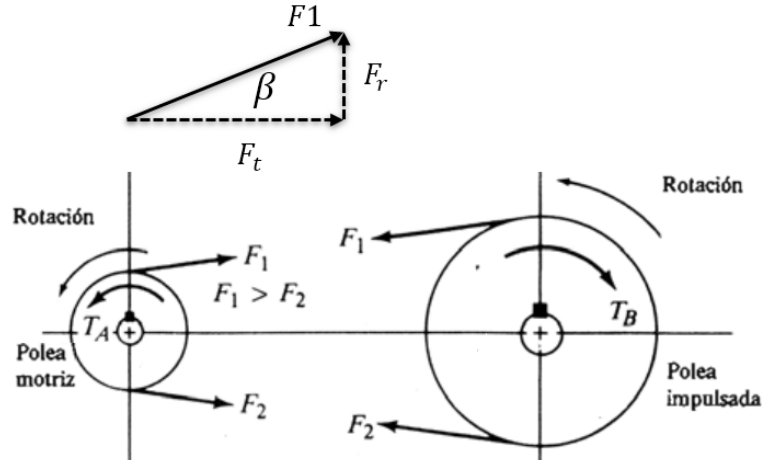
$$\beta_{Roll} = 15 [^\circ]; \quad \beta_{Pitch} = 15 [^\circ]; \quad \beta_{Yaw} = 20,69 [^\circ]$$

- Análisis de Fuerzas Transmisión Roll

Se analiza las correas síncronas como correas en "V", debida a que presenta secciones en forma de gargantas y los dos lados de la correas están en tensión como se ve en la Figura 150.

²³ Véase sección 3.5.3 para detalles del dimensionamiento de las poleas.

Figura 151. Fuerza sobre poleas²⁴



Fuente: Mott, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. 2006.

Existe una fuerza neta de impulso en las poleas que se representa como $F_{neta} = F_1 - F_2$. Por lo tanto el par torsional neto sobre la polea motriz se expresa mediante:

$$T_{motor;roll} = (F_1 - F_2) \cdot \frac{d_{1roll}}{2} \quad (22)$$

$$F_1 = 5 \cdot F_2 \quad (23)$$

$$F_t = F_1 \cdot \cos(\beta_{roll}) + F_2 \cdot \cos(\beta_{roll}) \quad (24)$$

$$F_r = F_1 \cdot \sin(\beta_{roll}) - F_2 \cdot \sin(\beta_{roll}) \quad (25)$$

Mediante el sistema de ecuaciones que surge a partir de las ecuaciones (15) – (18) se determinan la fuerza radial (F_r) y la fuerza tangencial (F_t) que generan

²⁴ Tomado y modificado de Diseño de elementos de máquinas, Robert L. Mott

flexión sobre el eje que sostiene la polea. El diámetro de la polea del motor, $d1_{Roll} = 48,26 \times 10^{-3} [m]$. Solucionando el sistema se tienen que:

$$F1 = 465,2 [N]; \quad F2 = 93,04 [N]$$

$$F_r = 96,32 [N]; \quad F_t = 539,2 [N]$$

De la misma forma se calculan las fuerzas que actúan en las transmisiones de las otras estructuras Gimbal.

- Análisis de Fuerzas Transmisión Pitch

El diámetro de la polea del motor, $d1_{pitch} = 48,26 \times 10^{-3} [m]$

$$F1 = 1966 [N]; \quad F2 = 393,3 [N]$$

$$F_r = 407,2 [N]; \quad F_t = 2279 [N]$$

- Análisis de Fuerzas eje Yaw

El diámetro de la polea del motor, $d1_{yaw} = 55,88 \times 10^{-3} [m]$

$$F1 = 3516 [N]; \quad F2 = 703,3 [N]$$

$$F_r = 993,9 [N]; \quad F_t = 3948 [N]$$

A.3 DISEÑO DE EJES

Se diseñaron tres ejes de sección circular hueca y uno de sección circular maciza, los cuales tendrán una velocidad de giro de 3 a 10 [RPM]. Todos los cálculos que se contemplan en este anexo se realizaron para una velocidad angular $\omega = 10$ [rpm]. Los valores de potencia y torque se describen en la sección A.1 Potencia motorreductor.

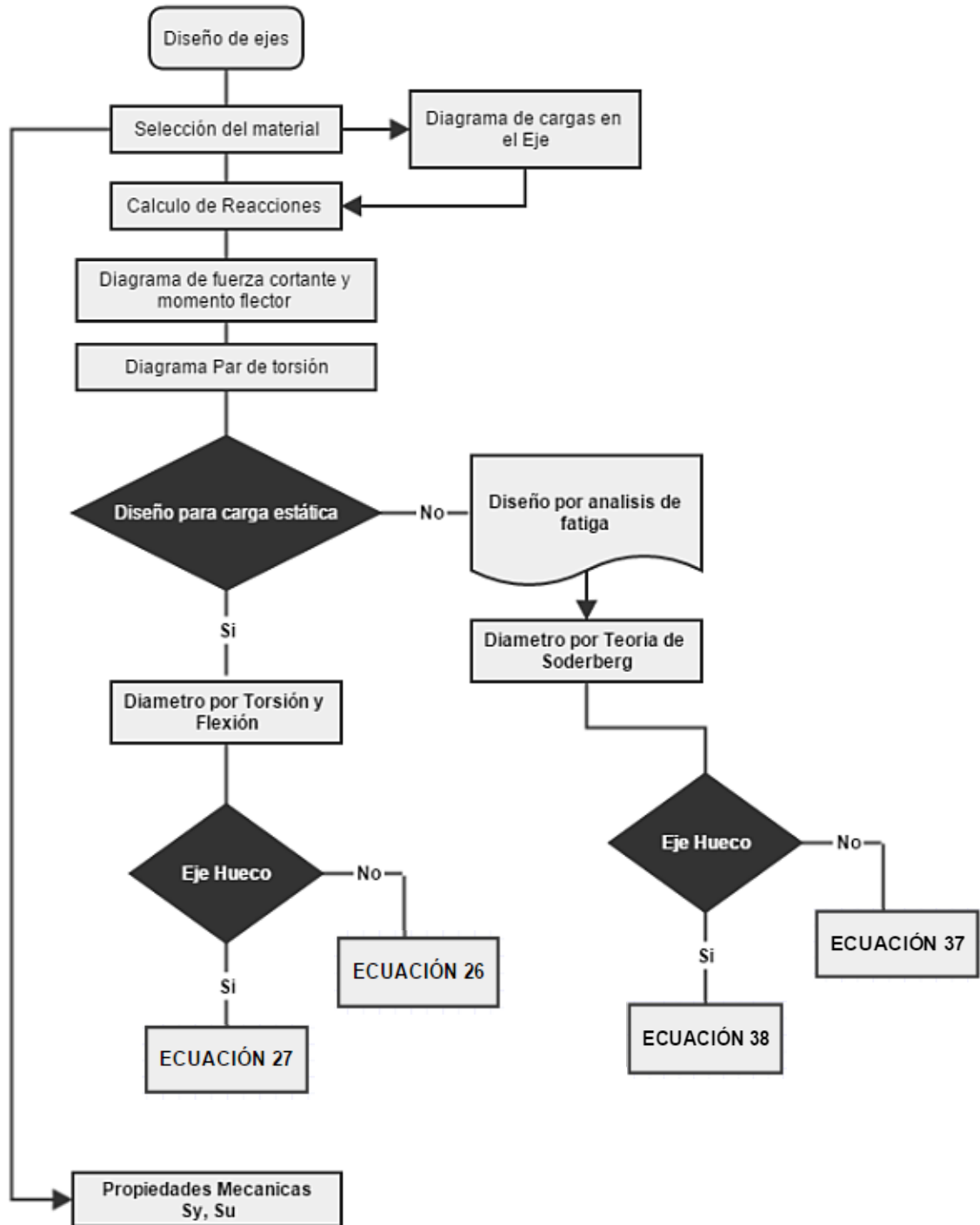
Se desarrollan dos procedimientos para el cálculo del diámetro requerido de los ejes que transmiten la potencia. Cálculo del eje macizo y eje hueco. En la Figura 152 se observan las diferentes cargas a las que está sometido el eje.

Para diseñar el eje definiremos en primer lugar el acero que deberá cumplir con ciertas características; tales como:

- Resistente a la torsión.
- Resistente a la flexión
- Resistente a la fatiga.

Obtenidas todas las fuerzas procedemos a hallar el diagrama de fuerzas cortantes (DFC) y el de momentos flector (DMF).

Figura 152. Procedimiento del diseño de los ejes



- Selección del material

Se escoge acero AISI 304 recocido, debido a requerimientos de diseño. De la Figura 71 (Sección 3.4) resumiremos sus propiedades mecánicas

$$S_y = 310[MPa]$$

$$S_u = 586 [MPa],$$

Elongación: 60% en 1 pulgada

Dureza: 123 HB

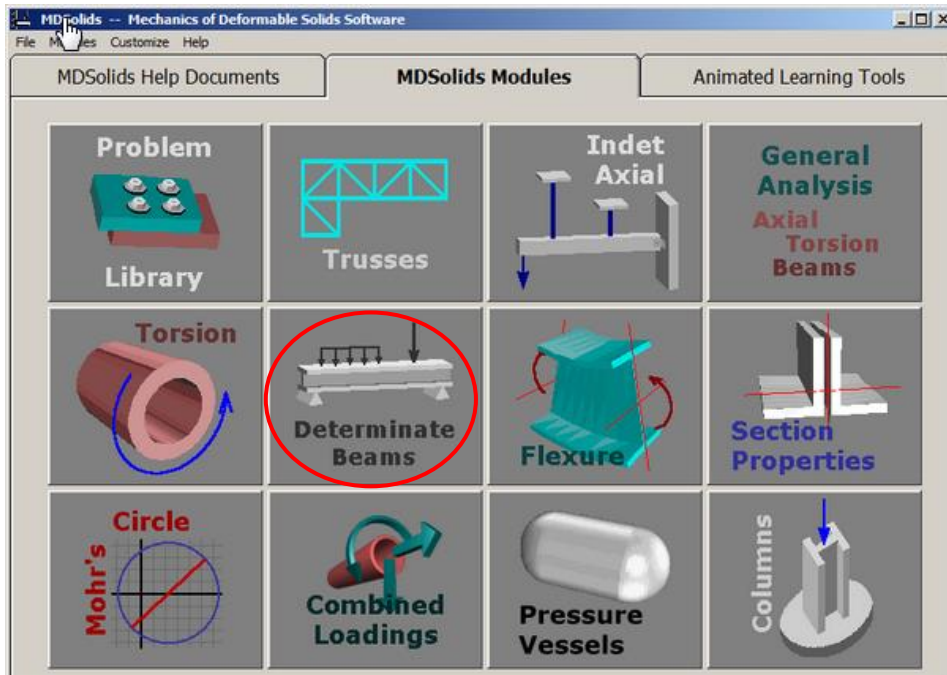
- Configuración geométrica del eje

El diseño de su geometría se constituye como resultado del montaje de los elementos de transmisión de potencia, poleas dentadas; el acople de pieza hexagonal para unir el eje a las estructuras Gimbal, montaje de los encoder huecos seleccionados, ubicación de los elementos de apoyo, rodamientos radiales. El agujero se usa para comunicar el cableado de una estructura Gimbal a otra, para evitar las deformaciones en el cable debido al giro. Resultado de esto da un eje de geometría de escalonado sección maciza y sección hueca.

- Calculo de las reacciones

Para determinar las reacciones se hace mediante el uso del software educativo MDSolids para la solución de problemas de resistencia de materiales. Este software cuenta con un módulo de análisis de vigas estáticamente determinadas (Determinate Beams).

Figura 153. Interfaz MDSolids.

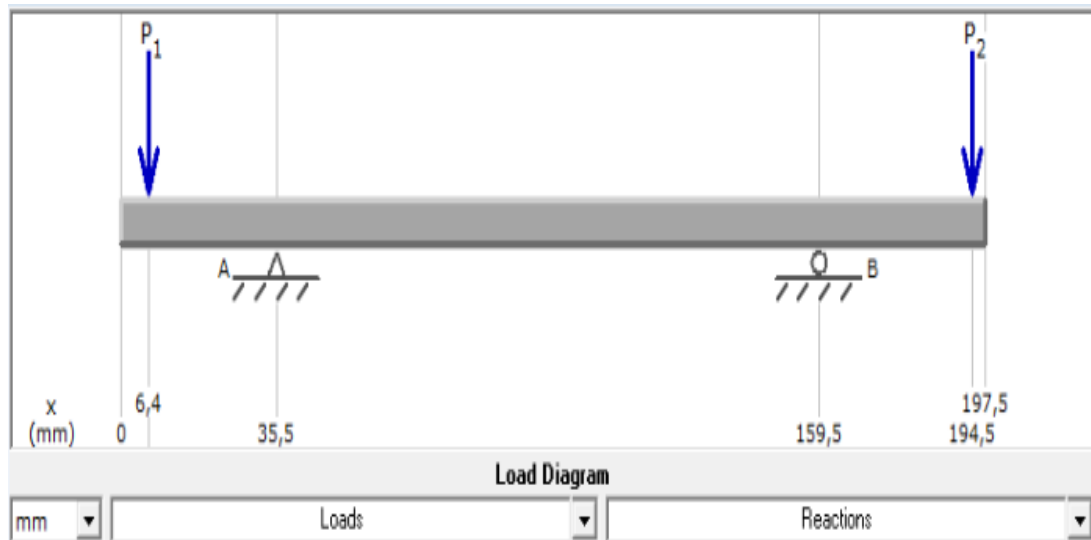


Fuente: MDSolids

Cada módulo de MDSolids cuenta con un dibujo que representa gráficamente los aspectos importantes del problema; en nuestro caso la dirección, ubicación y magnitud de las cargas aplicadas al eje.

El software realiza el cálculo estático, determina el valor de las reacciones las cuales son necesarias para dibujar los diagramas de fuerza cortante y momento flector que es el objetivo del módulo seleccionado. A partir de la configuración de carga a la que está sometida la viga (eje) se insertan los valores de carga. En la Figura 154 se observa la representación gráfica de las cargas del problema en MDSolids.

Figura 154. Estado de carga Plano X-Y eje Roll



- Diagramas de fuerza cortante y momento flector

A partir de las cargas previamente fijadas en el módulo “Determinate Beam” se determinan los diagramas de fuerza cortante y momento flector para el eje de rotación de la estructura Gimbal Roll, En las figuras (155) y (156) se muestran estos diagramas.

Figura 155. Diagrama de cortante y flexión. Plano X-Y eje Roll²⁵

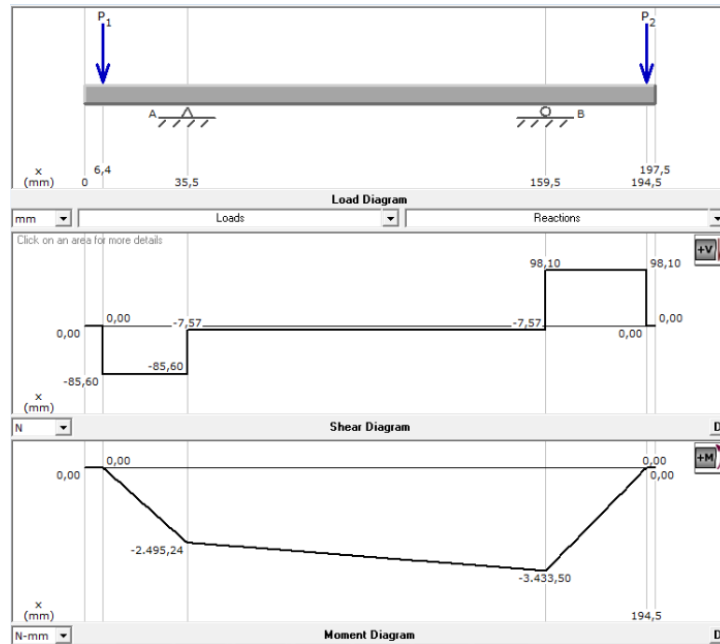
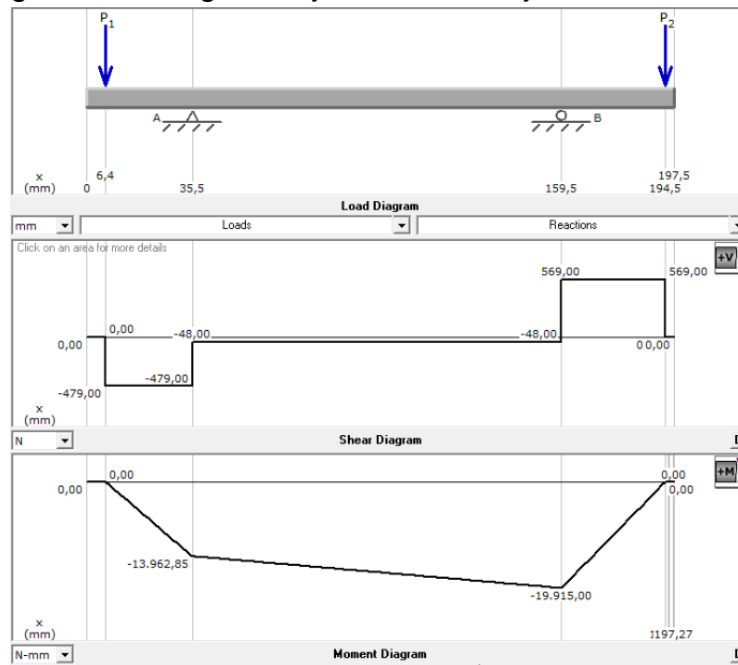


Figura 156. Diagrama de carga del eje. Plano X-Z eje Roll

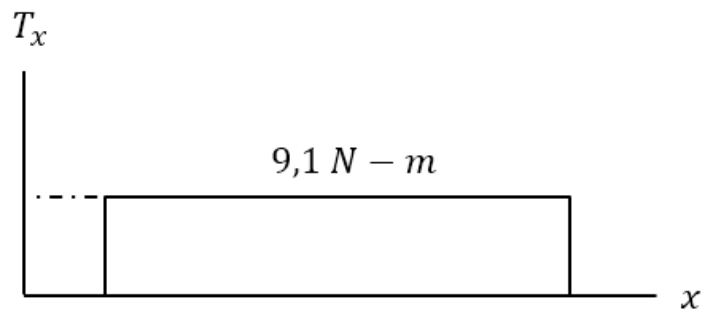


²⁵ En este diagrama se representan las fuerzas radiales a las que está sometida el eje. De la misma forma la Figura 156 representa las fuerzas tangenciales.

- Diagramas de pares de torsión

Como se cuenta solo con un elemento de entrada (Polea carga) y salida (carga) el par de torsión es constante en estas secciones del eje. Todos los ejes diseñados presentan la misma configuración de torque constante en la secciones del eje. A continuación se muestra el diagrama para el eje Roll.

Figura 157. Diagrama de Torsión eje Roll



- Cálculo del diámetro por torsión pura

En la transmisión de potencia el eje queda sujeto a un momento torsional (torque), en consecuencia se produce un esfuerzo cortante torsional que el eje debe resistir. Debido a la magnitud de la carga y la potencia transmitida por el eje, se estima que los esfuerzos de torsión no son críticos en el diseño del eje. Sin embargo se determina el diámetro requerido del eje a partir de la fórmula convencional para el cargas torsionales. El esfuerzo de torsión es:

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3}; \quad \text{Ejes macizos} \quad (26)$$

$$\tau = \frac{16Td_o}{\pi(d_o^2 - d_i^2)}; \quad \text{Ejes huecos} \quad (27)$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante de torsión, [Pa]

T = momento de torsión, [N.m]

d_o = diametro exterior del eje, [m]

d_i = diametro interior del eje [m]

d = diametro del eje macizo, [m]

Según la teoría de esfuerzo cortante máximo²⁶ el esfuerzo cortante de torsión permisible es:

$$\tau_{max} = 0,5 * S_y \quad (28)$$

A partir de las ecuaciones (19), (20) y (21) se determinan los diámetros mínimos para soportar los esfuerzos de corte por torsión de los ejes.

Para calcular el esfuerzo cortante del eje macizo reemplazamos el valor de S_y en la ecuación (21), luego se determina el diámetro mínimo según la ecuación (19) para soportar el esfuerzo cortante. Las magnitudes para el cálculo de diámetro del eje macizo son las siguientes:

- $S_y = 310$ [MPa]
- $T_{salida}^{27} = 17,96$ [N – m]

$$d = 0,0083[m] = 8,3 [mm]$$

²⁶ Tomado Diseño en ingeniería mecánica shigley. Sección 5-4.

²⁷ $T_{salida} = \text{relacion de velocidad de poleas roll} * T_{motor,roll}$

Para el eje hueco de Gimbal Pitch tenemos:

- $S_y = 310 \text{ [MPa]}$
- $T_{salida} = 75,92 \text{ [N - m]}$
- $d_i = 22 \text{ mm}$

$$d_o = 23,1 \text{ [mm]}$$

Para el eje hueco de Gimbal Yaw tenemos:

- $S_y = 310 \text{ [MPa]}$
- $T_{salida} = 157,2 \text{ [N - m]}$
- $d_i = 22 \text{ mm}$

$$d_o = 24,22 \text{ [mm]}$$

- Cálculo del diámetro en la sección más cargada según teoría de Soderberg.

Se establece la localización de la sección transversal crítica o la localización donde el momento flexionante es mayor. Según los diagramas de momentos de los planos XY y XZ se determina el momento resultante:

$$M_{max} = \sqrt{M_{xy}^2 + M_{xz}^2} \quad (29)$$

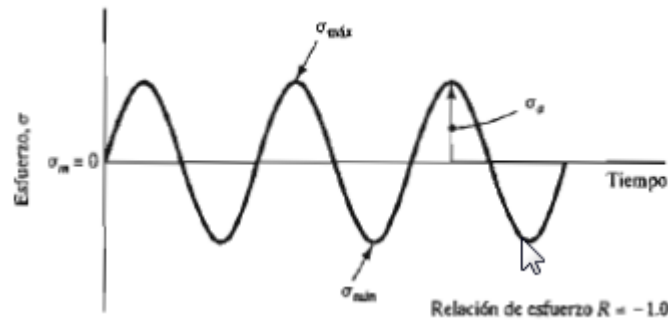
$$M_{max} = 20208.72 \text{ N - mm}$$

- Análisis por fatiga de los ejes

La forma de calcular el esfuerzo depende de la manera de aplicar la carga y de la clase de material. Se identifica que el eje giratorio presenta esfuerzos repetidos e invertidos. El eje giratorio se somete a la acción de cargas flexionantes

experimenta esfuerzos de tensión, seguido por el mismo valor de esfuerzo a compresión. La Figura 158 muestra el diagrama de esfuerzo en función del tiempo cuando el esfuerzo es repetido e invertido. Como $\sigma_{min} = -\sigma_{max}$, la relación de esfuerzos $R = -1$, y el esfuerzo promedio es cero.

Figura 158. Esfuerzo repetido e invertido



Fuente: Mott, Robert L. Diseño de elementos de máquina. 2006.

Para la flexión repetida e invertida en un eje, causada por cargas transversales aplicadas al eje giratorio el esfuerzo de diseño se relaciona con la resistencia del material del eje a la fatiga²⁸.

Los esfuerzos máximos y mínimos se determinan con método de análisis de esfuerzos a partir de la información conocida. Para aplicar la teoría de análisis por fatiga es necesario conocer los esfuerzos medio, y alternativo. A continuación muestran las ecuaciones de los esfuerzos anteriormente mencionados.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (30)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (31)$$

²⁸ Tomado de Robert L. Mott. Diseño de elementos de maquinas

❖ **Límite de resistencia a la fatiga (S'_e)**

Los ejes se diseñaron para ciclos de vida de, 10^6 , 10^7 , 10^8 , etc. (vida infinita). En el caso de los aceros, se estima el límite de resistencia como:

$$S'_e = \begin{cases} 0,5S_{ut} & S_{ut} \leq 2000 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Donde, S_{ut} es la resistencia a la tensión mínima.

❖ **Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga.**

Para realizar el análisis de falla por fatiga es necesario tener presente los siguientes factores que modifican el límite de la resistencia a la fatiga en un material que se somete a un número específico de ciclos. Estos factores se definen y usan para tomar en cuenta las diferencias entre la pieza de prueba y la parte de la maquina real en relación con las condiciones de superficie, tamaño, la carga, la temperatura, la confiabilidad y diversos factores. En este punto la carga sigue considerándose repetida e invertida.

A continuación se definen los factores que reducen la resistencia por fatiga, con el fin de ajustar el límite de resistencia a la fatiga por medio de correcciones, por lo tanto la ecuación se escribe como:

$$S'_e = S_e * k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_m \quad (32)$$

Donde k_a = factor de modificación de la condición superficial.

k_b = factor de modificación del tamaño.

k_c = factor de modificación de la carga.

k_d = factor de modificación de la temperatura.

k_e = factor de confiabilidad.

k_m = factor de modificación de efectos varios.

S_e = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

S_e' = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

❖ Factor de superficie (K_a)

El factor de modificación depende de la calidad del acabado de la superficie de la parte y de la resistencia a la tensión. A fin de determinar expresiones cuantitativas para acabados comunes de parte de máquinas (esmerilada, maquinada o estirada en frío, laminada en caliente y forjada), se determina un factor de multiplicación a partir de la siguiente ecuación

$$k_a = a * S_{ut}^b \quad (33)$$

Donde S_{ut} es la resistencia mínima a la tensión y los valores a y b se encuentran en la Figura 159.

Figura 159. Parámetros del factor de acabado superficial

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Fuente: SHIGLEY, Joseph. Diseño en ingeniería mecánica.

❖ Factor de tamaño (k_b)

Para flexión y torsión puede expresarse como:

$$k_b = 0,879 * d^{-0,107} \quad 0,11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \quad (34)$$

❖ Factor modificación de la carga (kc)

A continuación se especifica los valores medios del factor de carga.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexion} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torsión} \end{cases}$$

Cuando la torsión está combinada, con otros esfuerzos, como la flexión, $K_c = 1$.

❖ Factor temperatura (kd)²⁹

Cuando las temperaturas de operación son mayores que la temperatura ambiente, primero se debe investigar la fluencia porque la resistencia a ésta disminuye con rapidez con la temperatura.

$$k_d = \frac{620}{460 + T(^{\circ}F)}, \quad \text{para } T \geq 160^{\circ}F \approx 71^{\circ}C \quad (35)$$

$$k_d = 1.0, \quad \text{para } T < 160^{\circ}F \approx 71^{\circ}C \quad (36)$$

❖ Factor confiabilidad (ke)

En la Figura 160 se proporcionan los factores de confiabilidad de algunas confiabilidades estándar especificadas.

²⁹ Tomado de Parada Corrales, Alfredo, Fatiga, fisura progresiva. Disponible Escuela Ingeniería Mecánica UIS

Figura 160. Factores de confiabilidad k_e

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_u	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fuente: SHIGLEY, Joseph. Diseño en ingeniería mecánica.

❖ Factor de modificación de efectos varios (k_m)

El factor k_m tiene el intención de tomar en cuenta la reducción del límite de resistencia a la fatiga debida a todos los otros efectos, en verdad significa un recordatorio que estos efectos se deben tomar en cuenta, porque los valores reales de k_m no siempre están disponibles.. Dentro de estos efectos adicionales encontramos:

- Concentración de esfuerzos debido a discontinuidades.
- Corrosión por frotamiento.
- Frecuencia cíclica.

Finalmente, cuando no se dan otras condiciones, el factor diverso es $k_m = 1$.

❖ Estimación concentración de esfuerzos (K_t)

El proceso de análisis del esfuerzo de la fatiga depende en gran medida de las concentraciones del esfuerzo. En el caso de los hombros y los cuñeros, las concentraciones del esfuerzo dependen de las especificaciones de tamaño que no se conocen en el primer paso del proceso³⁰.

³⁰ Tomado de Shigley. Diseño en ingeniería Mecánica

Figura 161. Factor concentración de esfuerzos

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$)	2.7	2.2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.1$)	1.7	1.5	1.9
Cuñero fresado ($r/d = 0.02$)	2.2	3.0	—
Cuñero de patín o trapezoidal	1.7	—	—
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Fuente: SHIGLEY, Joseph. Diseño en ingeniería mecánica.

A continuación se muestran el resumen de las ecuaciones y valores tomados para el cálculo del diámetro requerido del eje macizo y los ejes huecos.

Las ecuaciones empleadas para determinar el diámetro según criterio de falla por fatiga para el eje hueco de Gimbal Yaw son las descritas a continuación para Gimbal Pitch.

Ecuaciones y datos Eje macizo Roll

$N = 2,5 \rightarrow$ Factor de seguridad

$M = 20 [N - m]$

$T_{max} = 23 [N - m]$

$S_{yt} = 3,45 \times 10^8 [MPa]$

$S_{ut} = 5,52 \times 10^8 [MPa]$

$k_t = 1,5$

$k_t = 1$

$S'_e = S_e * k_l * k_s * k_d * k_c * k_t * k_m$

$S_e = 0,5 * S_{ut}$

$k_l = 0,81$

$k_m = 1$

$k_s = 0,9$

$k_d = 0,9$

$k_c = 0,814$

$$d_o = \left(\frac{32 * N}{\pi} \sqrt{\left(k_t \frac{M}{S'_e} \right)^2 + \left(\frac{T_{max}}{S_{yt}} \right)^2} \right)^{1/3} \quad (37)$$

Ecuaciones y datos Eje hueco Pitch

$$N = 2,5 \rightarrow \text{Factor de seguridad}$$

$$d_i = 0,022 \text{ [m]}$$

$$M_a = 44,83 \text{ [N - m]}$$

$$M_m = 0 \text{ [N - m]}$$

$$T_a = 5,72 \text{ [N - m]}$$

$$T_m = 0 \text{ [N - m]}$$

$$S_{yt} = 3,45 \times 10^8 \text{ [MPa]}$$

$$S_{ys} = 0,5 * S_{yt} \text{ [MPa]}$$

$$S_{ut} = 5,5210^8 \text{ [MPa]}$$

$$k_t = 1$$

$$k_f = 2$$

$$k_{fs} = 0,85 * k_f$$

$$s_{es} = 0,5 * S'_e$$

$$S'_e = S_e * k_l * k_s * k_d * k_c * k_t * k_m$$

$$S_e = 0,5 * S_{ut}$$

$$k_l = 0,81$$

$$k_m = 1$$

$$k_s = 0,9$$

$$k_d = 0,75$$

$$k_c = 0,814$$

$$d_o = \left(A * \sqrt{B^2 + C^2} \right)^{1/3} \quad (38)$$

$$A = \frac{32 * N}{\pi * \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^4 \right]}$$

$$B = \frac{M_m}{S_{yt}} + k_f * \frac{M_a}{S'_e}$$

$$C = \frac{T_m}{2 * S_{ys}} + k_{fs} * \frac{T_a}{2 * s_{es}}$$

Según los resultados obtenidos mediante la solución del conjunto de ecuaciones se tiene las siguientes dimensiones:

Eje Gimbal Roll: las dimensiones mínimas que debe tener el eje macizo para soportar los esfuerzos debido a los elementos de potencia que se montan en este eje.

▪ $d = 17 \text{ mm}$

Ejes Gimbal Pitch: Son dos ejes idénticos, que cumplirán la función de pivotar la estructura Gimbal pitch. A continuación se muestran los diámetros mínimos.

▪ $d_i = 22 \text{ mm}$

▪ $d_o = 29,61 \text{ [mm]}$

Eje Gimbal Yaw: A continuación se muestran los diámetros mínimos.

▪ $d_i = 22 \text{ mm}$

▪ $d_o = 32 \text{ [mm]}$

Anexo B. Sistemas De Navegación Inercial.

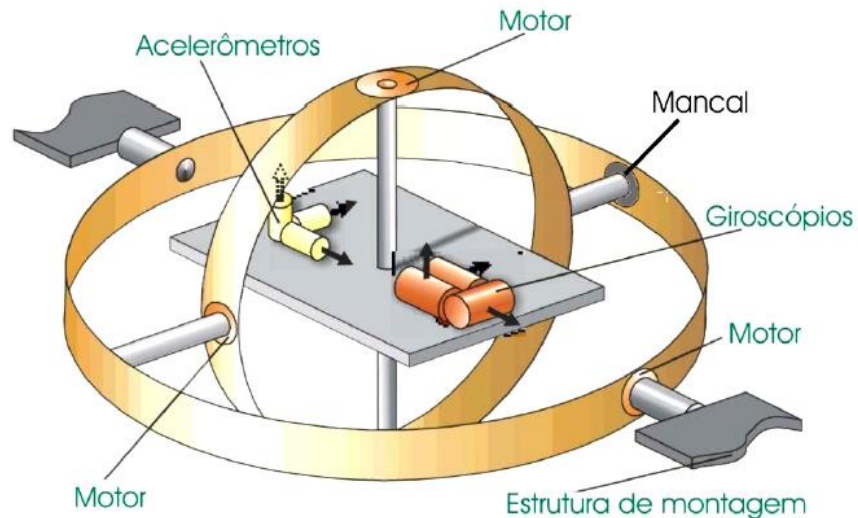
Un sistema de navegación inercial (INS - Inertial Navigation System) puede ser definido como el proceso para determinar de la posición, orientación y desplazamiento de un vehículo desde un punto de partida conocida mediante la medición de las aceleraciones en direcciones espaciales. Un sistema de navegación inercial utiliza una unidad de medición inercial, conocido como IMU, que comprende giroscopios y acelerómetros; un ordenador de procesamiento que lleva a cabo los cálculos y la integración de señales de los sensores para la estimación de posición, velocidad y actitud (orientación ángulos con respecto a un sistema de referencia) del vehículo donde están instalados los sensores. El funcionamiento de estos sensores se basa en las leyes del movimiento de Newton.

Existen básicamente dos maneras de implementación de una unidad de medición inercial, una conocida como Gimbaled (llamada plataforma estabilizada), y otra conocida como Strapdown.

- Plataforma tipo Gimbal.

Una plataforma estabilizada que se ilustra en la Figura 162, se mantienen los sensores en una orientación constante con respecto a una referencia mediante el control de servomotores. En esta configuración la configuración de los sensores inerciales pertenecientes a la IMU están instalados sobre una plataforma que está sujeta a una estructura mecánica en forma de anillos concéntricos o estructura Gimbal como se muestra en la Figura 162, esta plataforma está alineada al sistema de coordenadas de navegación inercial los cuales se mencionan en el desarrollo de este anexo.

Figura 162. Plataforma estabilizada (Gimbal).



Fuente: EMMENDOERFER, Gustavo. Mestre em ciencias. Desenvolvimento e implementação de um sistema de medição inercial de trajetórias de dutos. Curitiba, Brasil. 2008.

- Plataforma tipo Strapdown.

Según Titterton (2004) Strapdown es el nombre dado a un sistema integrado medición inercial en el que tres giróscopos y tres acelerómetros montados en ejes ortogonales sobre una misma base rígida.

En una plataforma strapdown, los sensores se fijan directamente al cuerpo de Vehículo (rígidamente). De este modo, los sensores se ven afectados en los movimientos de los vehículos (desplazamientos y rotaciones). En este sistema, es necesario que los sensores posean un alto rango de medición dinámico, debido a que están sujetos a las vibraciones del vehículo, o el vehículo deben tener filtros mecánicos que sólo permitan el paso de las señales que se encuentran dentro del rango de medición de los sensores. Por lo tanto, un sistema de Strapdown consta de tres acelerómetros y tres giroscopios alineados perpendicularmente de acuerdo con la Figura 163.

Figura 163. Sistema Strapdown.

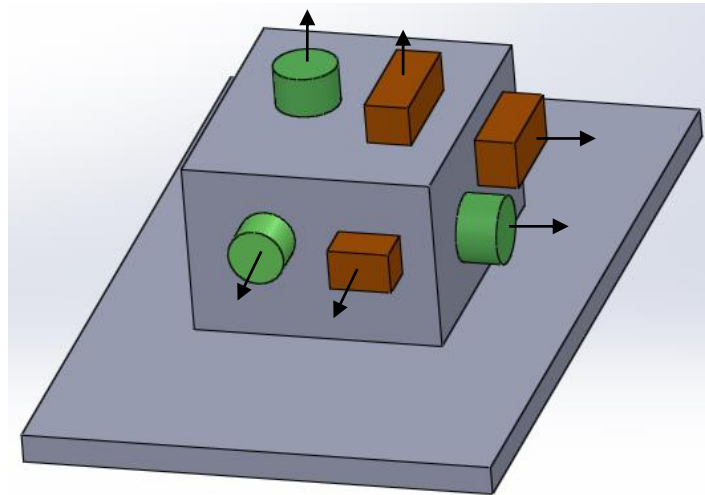


Tabla 31. Ventajas y desventajas de las configuraciones de navegación inercial.

Gimballed		Strapdown	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Cálculos simples porque solo se necesita conocer las tres componentes de la aceleración	Complejo en el aspecto mecánico debido a la regulación de la plataforma	Simple respecto al diseño mecánico debido a que solo es necesario los sensores acelerómetros y giroscopios sobre los ejes del objeto móvil	Calculo complejo en los cálculos debido a que no solo se necesita de las tres componentes de aceleración sino también de las tres componentes de aceleración angular.

Fuente: EMMENDOERFER, Gustavo. Mestre em ciencias. Desenvolvimento e implementação de um sistema de medição inercial de trajetórias de dutos. Curitiba, Brasil. 2008.

Los sistemas de navegación inercial se desarrollaron originalmente para los cohetes o misiles; estos sistemas entraron en uso más generalizado con la llegada de las naves espaciales, misiles guiados y aviones comerciales³¹.

En la actualidad estos dispositivos son implementados desde teléfonos móviles, sistemas de posicionamiento para fotografía y video, aeronaves, embarcaciones, armamento, sistemas de inspección y demás dispositivos donde se requiera un posicionamiento preciso.

- Sistema de coordenadas navegación inercial.

A continuación se mencionan algunos de los sistemas de referencia en navegación inercial:

- Sistema ECI (Earth Centered Inertial).

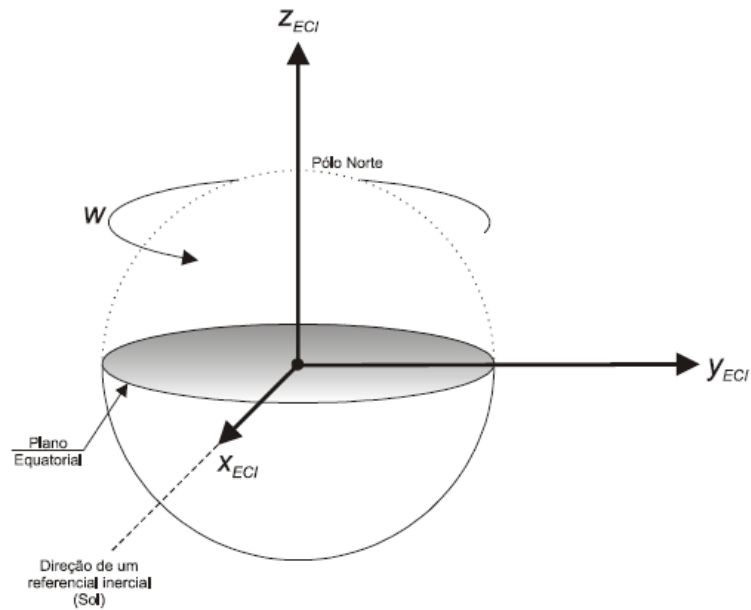
El sistema ECI tiene su origen en el centro de la tierra, su eje X_{ECI} apunta hacia el sol, pasando por la línea del ecuador, su eje Z_{ECI} es paralelo al eje de rotación de la tierra pasando por el polo norte, y el eje Y_{ECI} está orientado según la regla de la mano derecha. El plano XY coincide con el plano ecuatorial. El sistema ECI es llamado inercial porque se fija con respecto a un cuerpo estelar distante, es decir no gira con la tierra.

- Sistema ECEF (Earth Centered, Earth Fixed).

En este sistema de referencia, el origen está localizado en el centro de la tierra, y su eje X_{ECEF} se orienta a través de la intercepción del ecuador y el meridiano de Greenwich, el eje Z_{ECEF} está orientado apuntando hacia el polo norte geográfico de la tierra, y la Y_{ECEF} está orientado a través de la regla de la mano derecha.

³¹ Tomado de http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article_121124.html.

Figura 164. Sistema de coordenadas ECEF.



Fuente: EMMENDOERFER, Gustavo. Mestre em ciencias. Desenvolvimento e implementação de um sistema de medição inercial de trajetórias de dutos. Curitiba, Brasil. 2008.

Hay dos maneras de describir la ubicación de un cuerpo en el sistema ECEF, uno usando coordenadas rectangulares y otra a través de las coordenadas geodésicas.

- Sistema RPY (Roll, Pitch y Yaw).

Uno de los sistemas más utilizados en navegación y en sistemas de orientación de vehículos es el sistema conocido como RPY, términos aeronáuticos Roll-Pitch-Yaw, que representan las rotaciones en un sistema de coordenadas euclidiano (utilizando ángulos de Euler) con relación a los ejes de las coordenadas del vehículo.

Figura 165. Sistema RPY.



Anexo C. Cotización sistema Gimbal de 3 grados de libertad Acutronic.

Reference: P-13235

QUOTATION (Continued)

<u>ITEM</u>	<u>QTY</u>	<u>DESCRIPTION</u>	<u>PRICE EA.</u>	<u>TOTAL</u>
1	1	<p>Model AC317 Three Axis Position and Rate Table System per ACUTRONIC AC317 generic Data Sheet Revision A. Includes the following:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Model AC317 Position and Rate Table. Includes: <ul style="list-style-type: none"> ○ 18 inch diameter aluminum table top (rotates inside the temperature chamber) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Standard ¼-20 mounting holes on a 2 inch grid ○ Continuous rotation all axes <ul style="list-style-type: none"> ▪ 25 customer signal lines rated at 2 amps, 150 VDC per line ○ Direct drive brushless motors (all 3 axes) ○ Failsafe electrically released brakes (all axes) ○ Absolute position sine encoder (all axes) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Incremental signals are available to the customer for monitoring ○ Drive power amplifiers for all axes (mounted in the base structure) ○ Easy ACL Digital Motion controller for all axes (mounted in the base structure) <ul style="list-style-type: none"> ▪ ACL (ACUTROL® Control Language) protocol subset ▪ Fully programmable via an Ethernet interface ▪ Operation from a customer supplied PC via setup software ○ Emergency stop button on the base ○ Basic complement of counterweights to balance customer payload about the tilt (outer) axis ○ Leveling feet • System Documentation <ul style="list-style-type: none"> ○ Controller, computer interface and power amplifier operation and maintenance manuals on CD ROM ○ Electrical and mechanical assembly drawings, parts lists, and schematics sufficient for system maintenance on CD ROM. ○ Acceptance test results on CD ROM 	296,800.00	

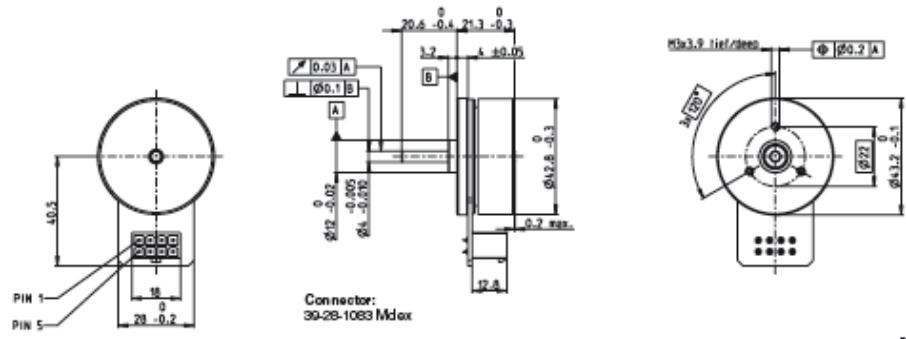


Anexo D. Ficha técnica de los motores.

Motor Gimbal Roll, Referencia 251601.

EC 45 flat Ø42.8 mm, brushless, 50 Watt

maxon flat motor



Connector:
30-28-1063 Mdex

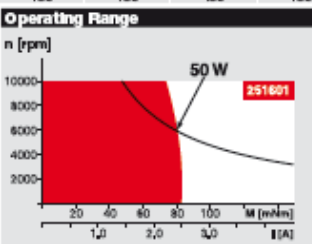
M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers				
with Hall sensors	330285	251601	330286	330287

Motor Data		330285	251601	330286	330287
Values at nominal voltage					
1 Nominal voltage	V	18	24	24	36
2 No load speed	rpm	6720	6710	4730	3360
3 No load current	mA	247	195	106	42.3
4 Nominal speed	rpm	5220	5250	3480	2360
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	95.2	82.7	69.5	90.5
6 Nominal current (max. continuous current)	A	3.46	2.32	1.41	0.828
7 Stall torque	mNm	925	741	382	459
8 Starting current	A	38.9	23.3	8.5	4.83
9 Max. efficiency	%	85	83	79	82
Characteristics					
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.463	1.03	2.82	7.46
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.322	0.572	1.15	5.15
12 Torque constant	mNm/A	25.1	33.5	47.5	101
13 Speed constant	rpm/V	380	285	201	95
14 Speed torque gradient	rpm/mNm	7	8.75	12	7.05
15 Mechanical time constant	ms	9.89	12.4	16.9	9.97
16 Rotor inertia	gcm ²	135	135	135	135

Specifications	
Thermal data	
17 Thermal resistance housing-ambient	4.13 K/W
18 Thermal resistance winding-housing	4.95 K/W
19 Thermal time constant winding	18.4 s
20 Thermal time constant motor	237 s
21 Ambient temperature	-40...+100°C
22 Max. permissible winding temperature	+125°C
Mechanical data (preloaded ball bearing)	
23 Max. permissible speed	10000 rpm
24 Axial play at axial load < 4.0 N	0 mm
> 4.0 N	0.14 mm
25 Radial play	preloaded
26 Max. axial load (dynamic)	3.8 N
27 Max. force for press fit (static)	33 N
(static, shaft supported)	1000 N
28 Max. radial loading, 7.5 mm from flange	21 N



Comments

- Continuous operation
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.
- Short term operation
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- Assigned power rating

Other specifications	
29 Number of pole pairs	8
30 Number of phases	3
31 Weight of motor	110 g

Values listed in the table are nominal.

Connection	
Rn1	Hall sensor 1*
Rn2	Hall sensor 2*
Rn3	V _{cc} 4.5...18VDC
Rn4	Motor winding 3
Rn5	Hall sensor 3*
Rn6	GND
Rn7	Motor winding 1
Rn8	Motor winding 2
Internal pull-up (7...13 kΩ) on pin 3	
Wiring diagram for Hall sensors see p. 31	

Cable	
Connection cable Universal, L = 500 mm	339390
Connection cable to EPOS, L = 500 mm	354045

maxon Modular System Overview on page 20 - 25

Planetary Gearhead Ø42mm 3 - 15 Nm Page 271	
Spur Gearhead Ø45mm 0.5 - 2.0 Nm Page 272	

Recommended Electronics:

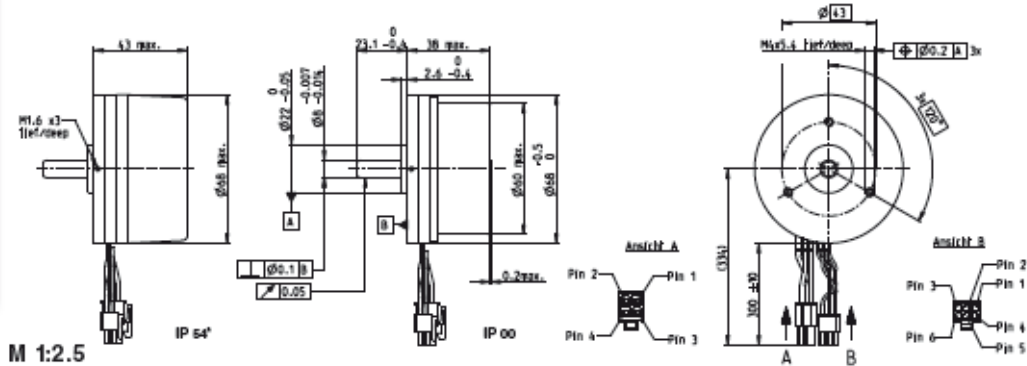
ESCON 36/3 EC	Page 330
ESCON Modul 50/5	321
ESCON 50/5	321
DECS 50/5	324
DEC Modul 50/5	325
EPOS2 24/2	330
EPOS2 Modul 36/2	330
EPOS2 24/5	331
EPOS2 P 24/5	334
EPOS3 70/10 EtherCAT	337
Notes	24

Option
With Cable and Connector
(Ambient temperature -20...+100°C)

Motor Gimbal Pitch, referencia 411678.

EC 60 flat Ø60 mm, brushless, 100 Watt

maxon flat motor



M 1:2.5

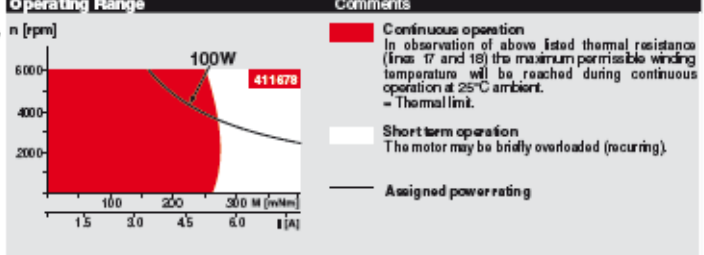
- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers

IP 54* (with cover)	412819	4080 57	412821	
IP 00 (without cover)	412823	411678	412825	

Motor Data (provisional)							
Values at nominal voltage							
1 Nominal voltage	V	12	12	24	24	48	48
2 No load speed	rpm	3710	3710	4250	4250	3970	3970
3 No load current	mA	671	671	419	419	187	187
4 Nominal speed	rpm	3290	3190	3850	3740	3580	3500
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	216	267	221	284	255	317
6 Nominal current (max. continuous current)	A	7.37	8.88	4.33	5.39	2.28	2.77
7 Stall torque	mNm	2820	2820	3740	3740	4190	4190
8 Starting current	A	93.5	93.5	78.2	78.2	43.8	43.8
9 Max. efficiency	%	84	84	86	86	88	88
Characteristics							
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.128	0.128	0.307	0.307	1.1	1.1
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.0615	0.0615	0.186	0.186	0.864	0.864
12 Torque constant	mNm/A	30.5	30.5	53.4	53.4	114	114
13 Speed constant	rpm/V	313	313	179	179	83.4	83.4
14 Speed torque gradient	rpm/mNm	1.32	1.32	1.03	1.03	0.708	0.708
15 Mechanical time constant	ms	16.7	16.7	13	13	12.1	10.1
16 Rotor inertia	gcm ²	1210	1210	1210	1210	1210	1210

- Specifications**
- Thermal data**
- 17 Thermal resistance housing-ambient 4.31 (2.41) K/W
 - 18 Thermal resistance winding-housing 3.8 K/W
 - 19 Thermal time constant winding 40 s
 - 20 Thermal time constant motor 155 (96.9) s
 - 21 Ambient temperature -40...+100°C
 - 22 Max. permissible winding temperature +125°C
- Mechanical data (preloaded ball bearings)**
- 23 Max. permissible speed 6000 rpm
 - 24 Axial play at axial load < 12.0 N 0 mm
 - 24 Axial play at axial load > 12.0 N 0.14 mm
 - 25 Radial play preloaded 10 N
 - 26 Max. axial load (dynamic) 1.70 N
 - 26 Max. axial load (static, shaft supported) 6000 N
 - 28 Max. radial loading, 7.5 mm from flange 100 N
- Other specifications**
- 29 Number of polepairs 7
 - 30 Number of phases 3
 - 31 Weight of motor 470g



- Values listed in the table are nominal.
- Connection motor (Cable AWG 18)**
- red Motorwinding 1 Pin 1
 - black Motorwinding 2 Pin 2
 - white Motorwinding 3 Pin 3
 - N.C. Pin 4
- Connector Part number**
- Motor 39-01-2010
- Connection Sensors (Cable AWG 28)**
- gray Hall sensor 1 Pin 1
 - gray Hall sensor 2 Pin 2
 - gray Hall sensor 3 Pin 3
 - gray GND Pin 4
 - blue Vcc 4.5...18 VDC Pin 5
 - N.C. Pin 6
- Connector Part number**
- Motor 430-25-0500
- * Wiring diagram for Hall sensors see p. 31
- * Protection class only when installed with flange-side seal

maxon Modular System Overview on page 20 - 25

Planetary Gearhead
Ø52mm
4 - 30 Nm
Page 274

Recommended Electronics:

- ESCON 50/5 Page 321
- ESCON Module 50/5 321
- ESCON 70/10 321
- DEC Module 50/5 325
- EPOS2 24/5 331
- EPOS2 50/5 331
- EPOS2 70/10 331
- EPOS2 P 24/5 334
- EPOS3 70/10 EtherCAT 337
- Notes 24

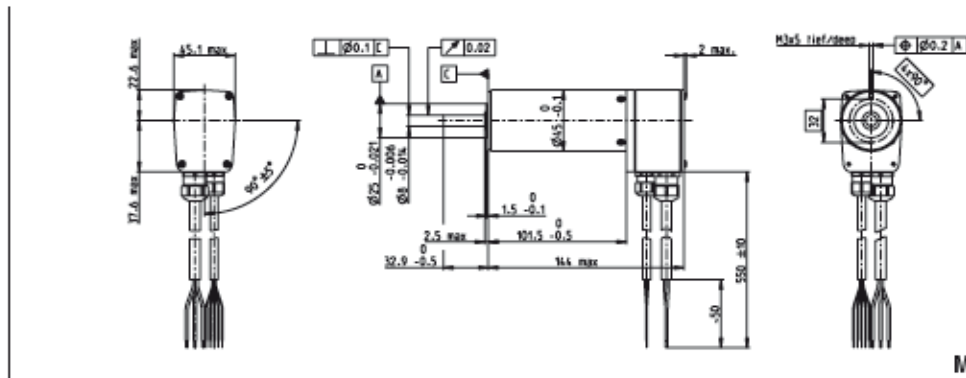
Encoder MILE
512 - 4096 CPT,
2 channels
Page 293

224 maxon EC motor

June 2013 edition / subject to change

Motor Gimbal Yaw, referencia 136207

EC 45 Ø45 mm, brushless, 250 Watt



M 1:4

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers						
136210	136207	136211	136206	136212	136209	

Motor Data	136210	136207	136211	136206	136212	136209
Values at nominal voltage						
1 Nominal voltage	V	24	24	36	36	48
2 No load speed	rpm	8670	5000	10400	6010	10700
3 No load current	mA	897	341	834	312	656
4 Nominal speed	rpm	7970	4300	9730	5320	10000
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	311	331	312	341	316
6 Nominal current (max. continuous current)	A	12.5	7.9	10.2	6.21	7.94
7 Stall torque	mNm	4400	2540	5750	3320	6110
8 Starting current	A	167	55.8	175	58.3	143
9 Max. efficiency	%	86	85	87	86	87
Characteristics						
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.143	0.43	0.206	0.617	0.336
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.0565	0.17	0.0883	0.265	0.149
12 Torque constant	mNm/A	26.3	45.5	32.8	56.9	42.7
13 Speed constant	rpm/V	3.64	210	291	16.8	224
14 Speed/torque gradient	rpm/mNm	1.98	1.98	1.82	1.82	1.76
15 Mechanical time constant	ms	4.34	4.34	3.99	3.99	3.65
16 Rotor inertia	g·cm ²	209	209	209	209	209

Specifications	
Thermal data	
17 Thermal resistance housing-ambient	1.7 K/W
18 Thermal resistance winding-housing	1.1 K/W
19 Thermal time constant winding	31 s
20 Thermal time constant motor	1570 s
21 Ambient temperature	-20...+100 °C
22 Max. permissible winding temperature	+125 °C
Mechanical data (preloaded ball bearings)	
23 Max. permissible speed	12000 rpm
24 Axial play at axial load < 20 N	0 mm
	> 20 N
	max. 0.15 mm
25 Radial play	preloaded
26 Max. axial load (dynamic)	16 N
27 Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	182 N
28 Max. radial loading, 5 mm from flange	5000 N
180 N	
Other specifications	
29 Number of pole pairs	1
30 Number of phases	3
31 Weight of motor	1150 g
Protection to	IP54

Values listed in the table are nominal.

Connection motor (Cable AWG 16)

Cable 1 Motor winding 1

Cable 2 Motor winding 2

Cable 3 Motor winding 3

Connection sensors (Cable AWG 24)*

white Hall sensor 3

brown Hall sensor 2

green Hall sensor 1

yellow GND

V_{nom} = 4.5...24 VDC

Wiring diagram for Hall sensors seep. 35

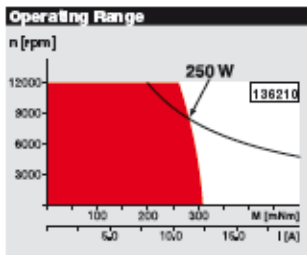
* Housed through knockouts with seal.

Option

Temperature monitoring, PTC resistance Micropile

110 °C, R 25 °C = 0.5 kΩ, R 105 °C = 1.2...1.5 kΩ

R 115 °C = 7...13 kΩ, R 120 °C = 18...35 kΩ



Comments

Continuous operation
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25 °C ambient.
= Thermal limit.

Short term operation
The motor may be briefly overloaded (occurring).

— Assigned power rating

maxon Modular System	Overview on page 20 - 25
Planetary Gearhead Ø42 mm 3 - 15 Nm Page 270	Encoder HEDL 9140 500 CPT, 3 channels Page 310 Resolver Res 26 Ø26 mm 10 V Page 316 Brake AB 28 24 VDC 0.4 Nm Page 340
Planetary Gearhead Ø52 mm 4 - 30 Nm Page 273	
Planetary Gearhead Ø62 mm 8 - 50 Nm Page 275	
<p>Recommended Electronics:</p> <p>ESCON 50/5 Page 321</p> <p>ESCON Module 50/5 321</p> <p>ESCON 70/10 321</p> <p>DECS 50/5 324</p> <p>DEC Module 50/5 325</p> <p>EPOS2 50/5, 70/10 331</p> <p>EPOS3 70/10 EtherCAT 337</p> <p>Notes 24</p>	
* Protection level only when installed with flange side seal.	

June 2013 edition / subject to change

maxon EC motor 183

maxon EC motor

Anexo E. Análisis CAE de los componentes mecánicos.

Con el fin de validar la resistencia y seguridad de los componentes estructurales diseñados en el capítulo 3 se presenta el análisis del diseño como herramienta esencial para complementar el modelado 3D con SolidWorks. Este análisis se conoce también como estudio de elementos finitos (FEA), el cual se aborda haciendo uso de la herramienta SolidWorks Simulation.

SolidWorks Simulation es una herramienta del software SolidWorks, que proporciona un potente entorno de pruebas virtuales donde realizar simulaciones avanzadas de propiedades mecánicas, térmicas, entre otras; de los componentes diseñados, de forma que los diseñadores puedan evaluar elementos críticos como la vida útil de los diseños, escenarios de cargas complejas y problemas multifísicos³².

SolidWorks Simulation integrado en el CAD 3D de SolidWorks permite a cada uno de los diseñadores e ingenieros realizar una simulación estructural de las piezas y ensamblajes mediante el análisis por elementos finitos (FEA) mientras trabajan para mejorar y validar el rendimiento, y para reducir la necesidad de realizar costosos cambios en prototipos o diseños posteriormente.

E.1 Análisis de las estructura Gimbal

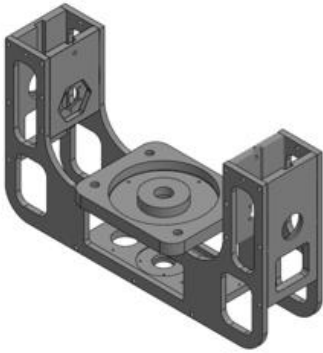
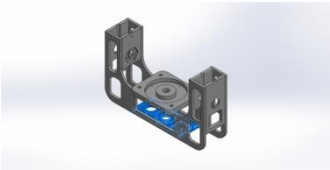

Para obtener excelentes resultados de rigidez de la estructura tipo Gimbal-estática y dinámicamente, de acuerdo a las condiciones de operación del sistema de validación, se han dimensionado los componentes con un margen de confianza, que luego son analizados mediante método de elementos finitos (FEA).

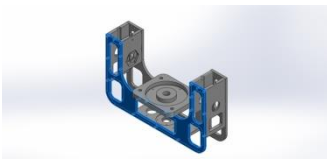
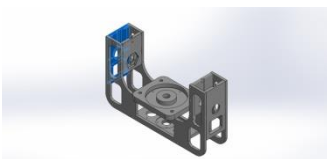
³² Tomado y modificado de:
http://www.solidworks.es/launch/documents/SW_Simulation_DS_2013_ESP.pdf

- Información del modelo.

A continuación se muestra la estructura Gimbal analizada, sus componentes seleccionados, propiedades volumétricas y las consideraciones de análisis con la que serán evaluados; algunos de los componentes son tratadas como sólido y otros como una formulación de análisis por lámina delgada debido a su geometría

Figura 166. Información del modelo

 <p>Nombre del modelo: GPITCH-ALZ Configuración actual: Predeterminado</p>		
Sólidos		
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas
Redondeo2 	Sólido	Masa:1.20853 kg Volumen:0.000430083 m ³ Densidad:2810 kg/m ³ Peso:11.8436 N
	Sólido	Masa:2.44877 kg Volumen:0.000871449 m ³ Densidad:2810 kg/m ³ Peso:23.998 N
Vaciados		
Nombre de documento y referencia	Formulación	Propiedades volumétricas

 <p>Shell-2</p>	Delgado	<p> Espesor:12 mm Peso:0 N Volumen:0 m³ Masa:0 kg Densidad:-1.#INDkg/m³ </p>
 <p>Shell-3</p>	Delgado	<p> Espesor:12 mm Peso:0 N Volumen:0 m³ Masa:0 kg Densidad:-1.#INDkg/m³ </p>

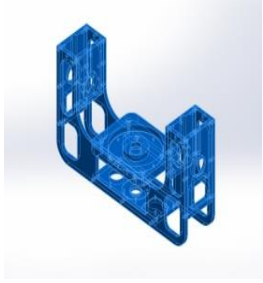
Para el análisis de esfuerzos realizados a la estructura es usado el método de mallas sólidas y solucionado mediante el Solver FFEPlus de Solidworks Simulation. La densidad del mallado seleccionada es fina, con una malla basada en curvatura debido a las curvaturas, redondeos, vaciados propios del sistema de validación. Las unidades empleadas en la simulación son las del sistema Métrico.

Tabla 32. Propiedades del estudio CAE Gimbal Pitch.

Nombre de estudio	Gimbal Roll
Tipo de análisis	Estático
Tipo de malla	Malla sólida
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Tipo de solver	FFEPlus
Opciones de unión rígida incompatibles	Simplificada
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar

A continuación se muestran las propiedades del material seleccionado; Aluminio 7075 T651 los cuales son necesarios definir para cálculos posteriores de tensión, desplazamientos, factor de seguridad entre otros.

Tabla 33. Propiedades del modelo

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: 7075-T6 (SN)</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises</p> <p>Límite elástico: 5.05e+008 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 5.7e+008 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 7.2e+010 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.33</p> <p>Densidad: 2810 kg/m³</p> <p>Módulo cortante: 2.69e+010 N/m²</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 2.36e-005 /Kelvin</p>	<p>Sólido 1(Redondeo2)(GM-LAMINA HXZ_SV1.0-4), Sólido 1(Taladro roscado 5/16-181)(GM-LAMINA VIZY_SV1.0-1), Sólido 1(Sólido-Mover/Copiar1)(GM-LAMINA VIZY_SV1.0-2), Sólido 1(Simetría1)(GM-LAMINA VXY_completa-1), Sólido 1(Simetría1)(GM-LAMINA VXY_completa-12), Sólido 1(Cortar-Extruir4)(GM-LAMINA VZY_SV1.0-1), Sólido 1(Sólido-Mover/Copiar1)(GM-LAMINA VZY_SV1.0-2), Sólido 1(MatrizC1)(GM-PLATO FIJO_SV1.0-1)</p>

- Cargas y Sujeciones

Las cargas que soporta la estructura pitch se centra en la placa rectangular, específicamente en la ubicación del rodamiento axial del eje Roll. Los detalles de la sujeción de la estructura se aprecian en la tabla 34; donde se observan los 2 puntos de apoyo en cada uno de los extremos de las estructura en U.

Tabla 34. Cargas

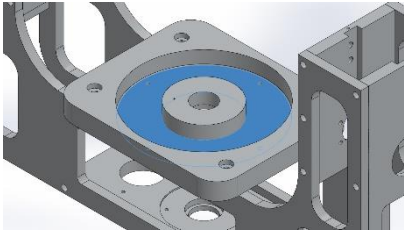
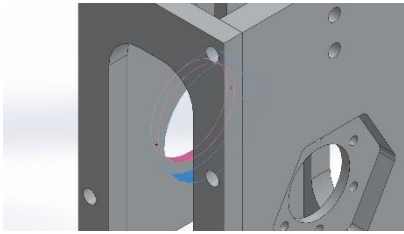
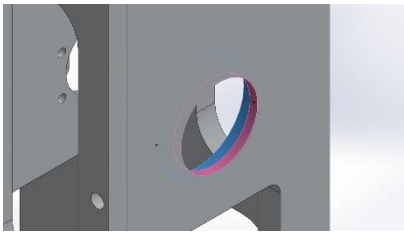
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 78.45 N
Torsión-3		Entidades: 1 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 39 N-m
Torsión-4		Entidades: 1 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 39 N-m

Tabla 35. Sujeciones

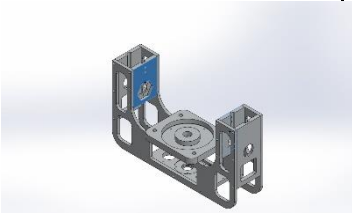
	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-1		Entidades: 2 cara(s) Tipo: Geometría fija			
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	0.00142018	79.2916	0.769712	79.2953	

Tabla 36. Información de contacto.

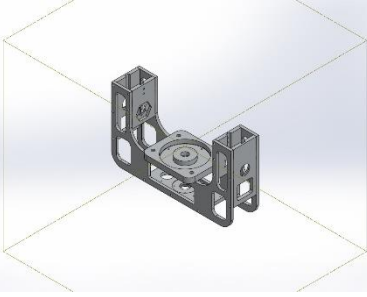
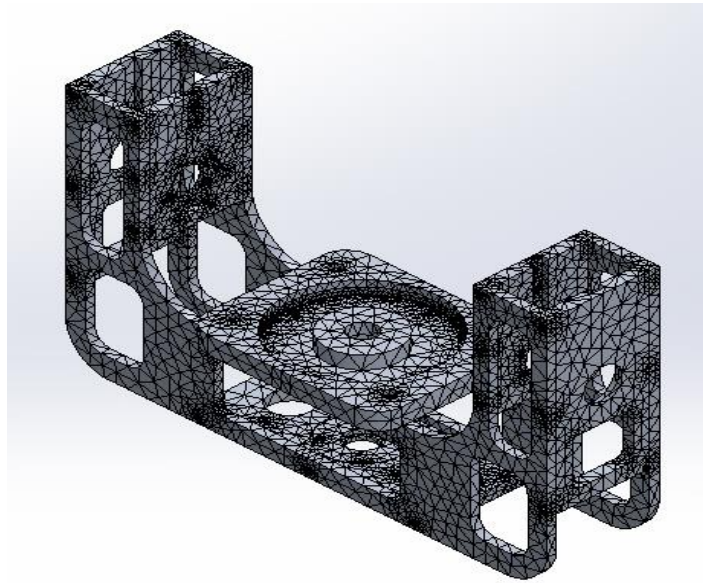
Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto
Contacto global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 componente(s) Opciones: Mallado compatible

Tabla 37. Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Transición automática:	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla:	Desactivar
Puntos jacobianos	En los nodos
Tamaño máximo de elemento	20.2085 mm
Tamaño mínimo del elemento	4.04171 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar

A continuación se muestra el mallado realizado a la estructura Gimbal Pitch.

Figura 167. Mallado de la estructura Pitch.



- Resultados de Fuerza

Tabla 38. Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	-0.00365818	79.2916	0.769712	79.2953

- Resultados del estudio.

Figura 168. Análisis de tensión Gimbal Pitch.

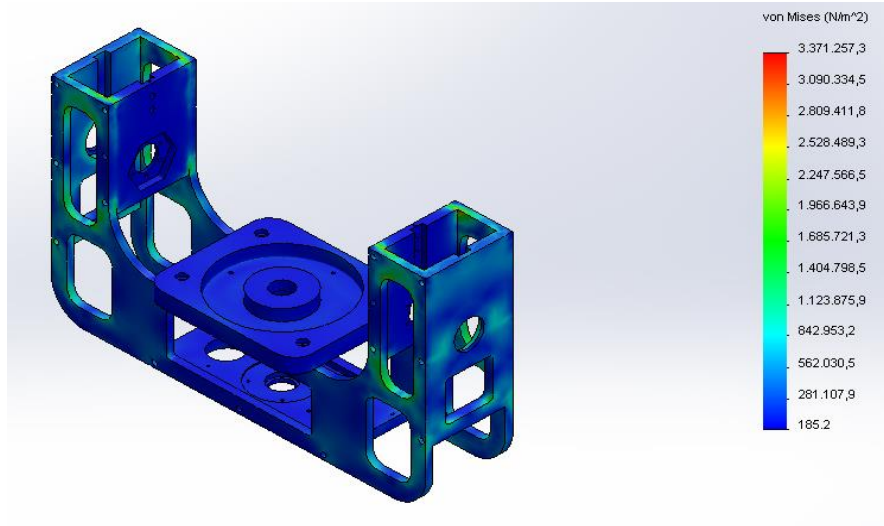


Figura 169. Análisis de desplazamiento Gimbal Pitch.

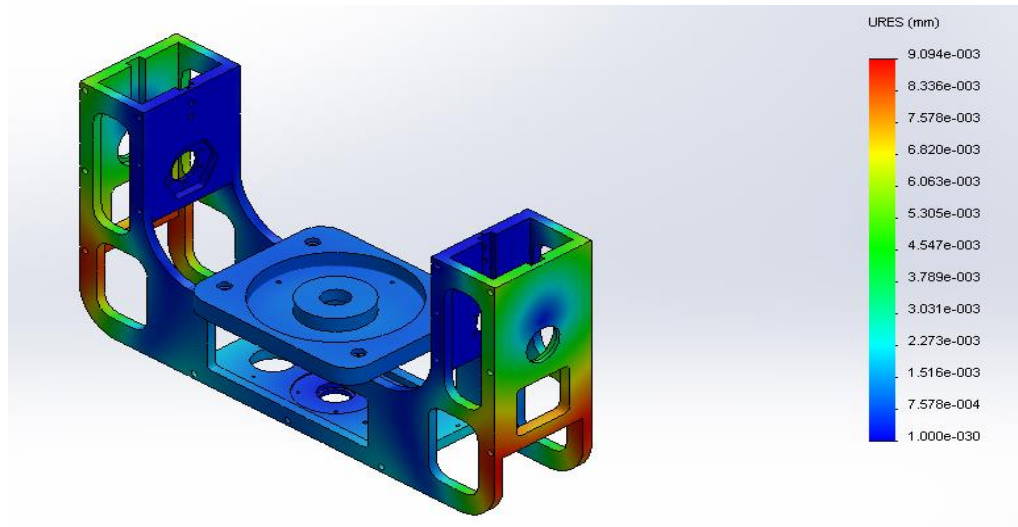
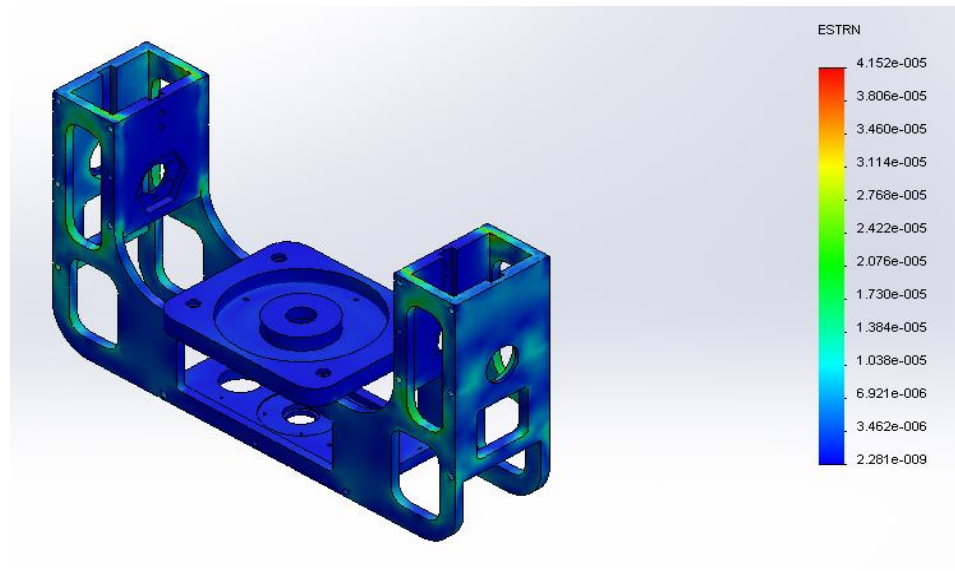
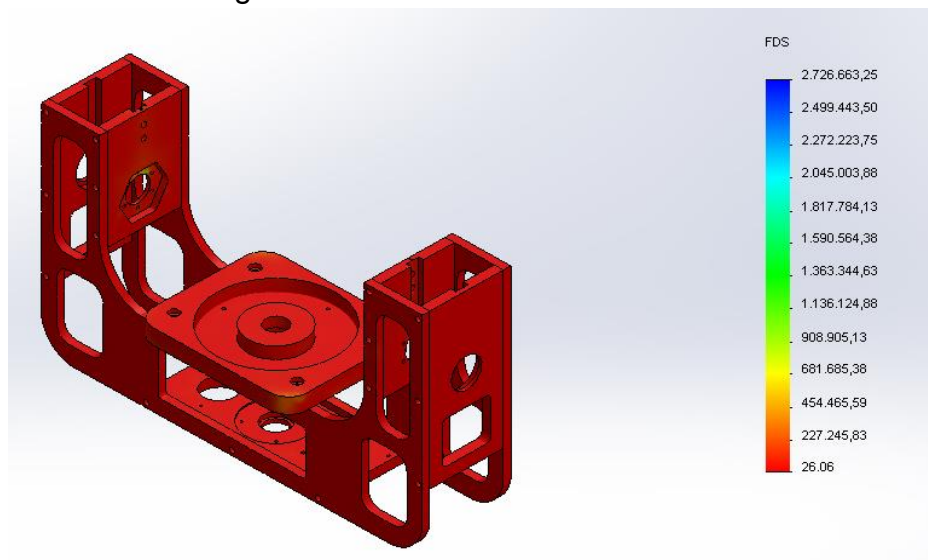


Figura 170. Análisis de deformaciones Gimbal Pitch.



Deformación unitaria es la proporción de cambio en longitud con respecto a la longitud original o $\delta L/L$. La deformación unitaria es una cantidad sin unidades. El resultado del análisis revela un de deformación máxima 4.15164e-005 el cual es considerado como una deformación baja para el material seleccionado, garantizando el diseño.

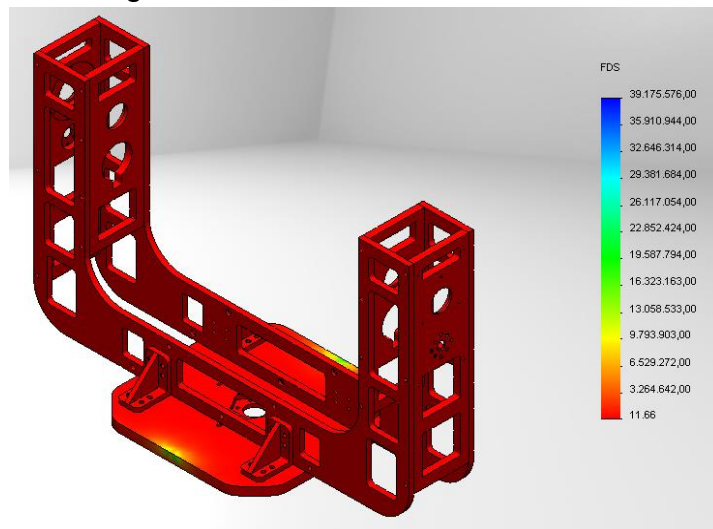
Figura 171. Factor de seguridad Gimbal Pitch



Para la verificación del diseño se emplea el criterio de Von Mises. El análisis de tensión de la Figura 168 muestra que la estructura en U presenta alta rigidez, siendo las áreas más cargadas las zonas cercanas a la curvatura interna. Sin embargo la tensiones máximas presentadas en la estructura son de 3.37126×10^6 N/m² como muestra Figura 168, el cual está por debajo del límite de elástico del material que es 505 MN/m². Queda demostrado que esta estructura no falla por carga estática.

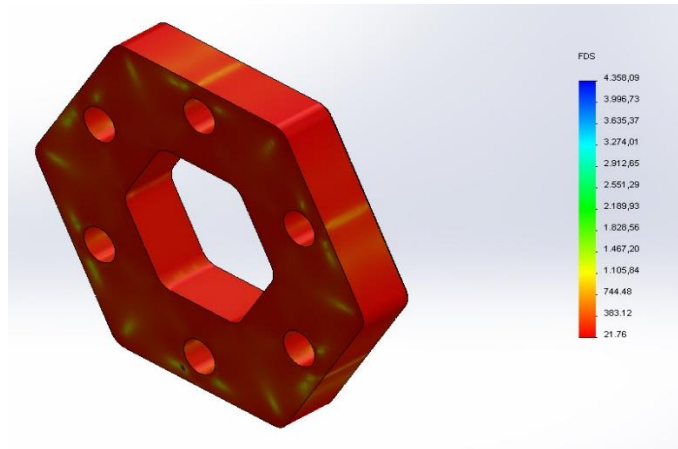
La estructura mecánica está sobredimensionada con un factor de seguridad FDS= 26, esto se debe a que la selección de las láminas de duraluminio se realizó de acuerdo al montaje de los rodamientos en las placas laterales, como también del montaje de otros componentes mecánicos y no con respecto a las cargas a soportar por las estructuras tipo Gimbal.

Figura 172. Factor de seguridad Gimbal Yaw.



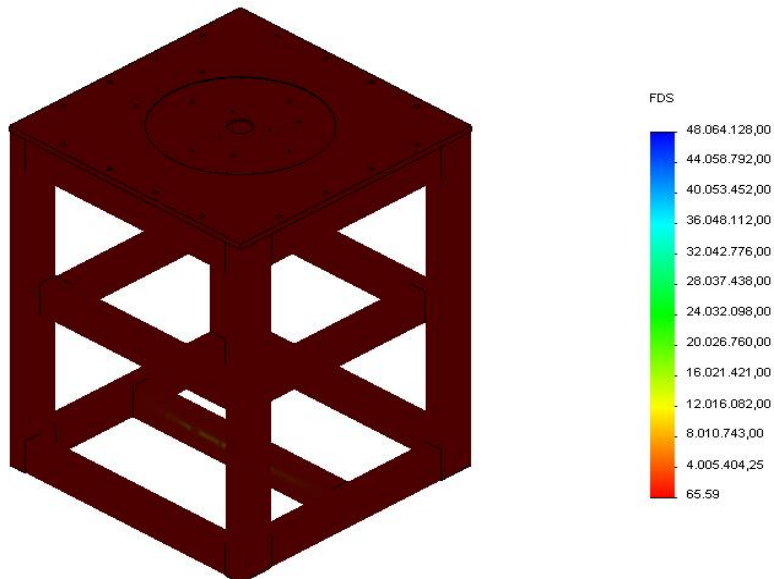
La estructura mecánica Gimbal Yaw está sobredimensionada con un factor de seguridad FDS= 12, y esto se debe a la misma condición que la estructura anterior.

Figura 173. Factor de seguridad Placa hexagonal Gimbal Yaw.



Este elemento mecánico está sobredimensionada con un factor de seguridad $FDS= 22$. De las placas de acople hexagonal del Gimbal es la que soporta mayores esfuerzos con respecto a las placas de acople hexagonal de Gimbal Pitch y Gimbal Roll.

Figura 174. Factor de seguridad Estructura base.



Esta estructura posee un $FDS = 65$. Al igual que las demás estructuras se diseñó por rigidez, a eso se debe su alto valor de seguridad.

E.2 Análisis de los Ejes de rotación

El análisis se inicia estableciendo un estudio estático, definiendo las posiciones de los puntos de sujeción y de las cargas que soporta el eje.

Tabla 39. Propiedades del estudio

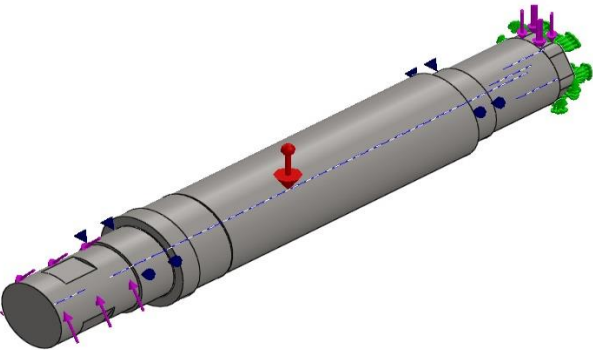
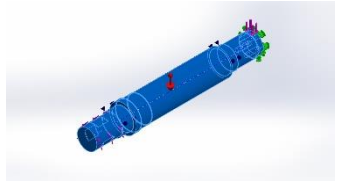
 <p>Nombre del modelo: EJE-GI_SV1.0 Configuración actual: Predeterminado</p>		
Sólidos		
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas
MatrizC1 	Sólido	Masa:0.923274 kg Volumen:0.000115409 m ³ Densidad:8000 kg/m ³ Peso:9.04809 N

Tabla 40. Propiedades del estudio

Nombre de estudio	Eje Roll
Tipo de análisis	Estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Tipo de solver	FFEPlus
Calcular de fuerzas de cuerpo libre	activar

El análisis se realizó en el sistema Métrico, con el fin de trabajar en las mismas unidades utilizadas en el cálculo del diámetro a partir del desarrollo matemático de las teorías de Soderberg descrito en el Anexo A. Memoria de Cálculos. Véase Tabla 40.

Tabla 41. Unidades

Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

Tabla 42. Propiedades del material

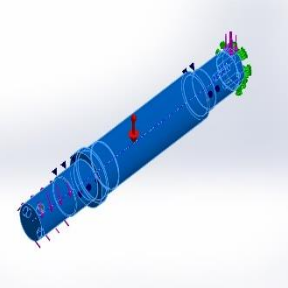
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AISI 304</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Límite elástico: 2.06807e+008 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 5.17017e+008 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 1.9e+011 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.29</p> <p>Densidad: 8000 kg/m³</p> <p>Módulo cortante: 7.5e+010 N/m²</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 1.8e-005 /Kelvin</p>	<p>Sólido 1(Cortar-extruir5) (EJE-GI_SV1.0)</p>

Tabla 43. Sujeciones

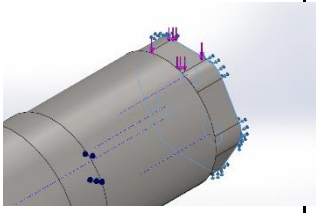
Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-3.16776	86.1086	-5.60159	86.3487

Tabla 44. Cargas

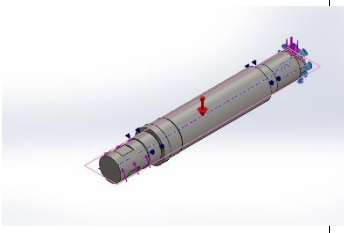
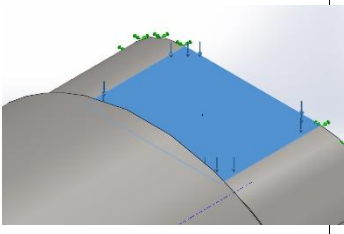
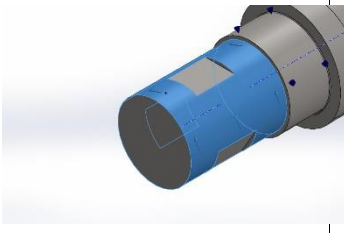
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Gravedad-1		Referencia: Planta Valores: 0 0 -9.81 Unidades: SI
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 98.1 N
Torsión-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 9.1 N-m

Tabla 45. Información de malla – Detalle

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Número total de nodos	33149
Tamaño de elementos	
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

En el **Anexo A** se muestra en detalle la información del análisis estático realizado al eje y el cual es verificado mediante el módulo de simulación de Solidworks. A continuación se muestran los resultados del estudio estático del eje Roll.

Figura 175. Resultado Análisis de Tensiones eje Gimbal Roll.

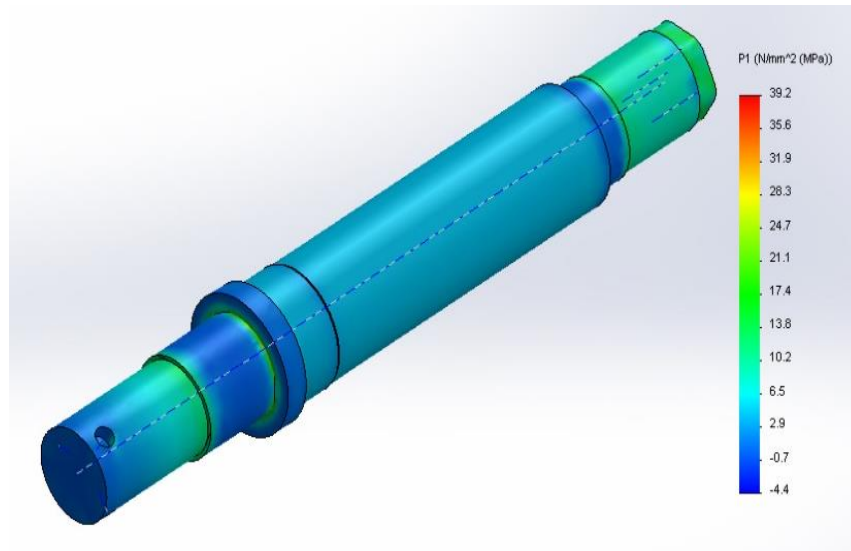


Figura 176. Resultado Análisis de Desplazamiento eje Gimbal Roll.

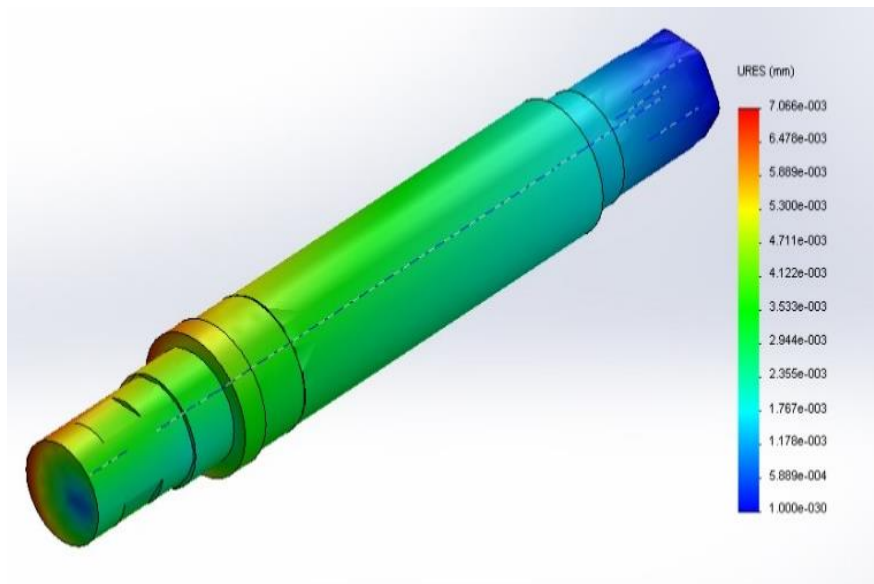


Figura 177. Resultado Análisis de Deformaciones eje Gimbal Roll.

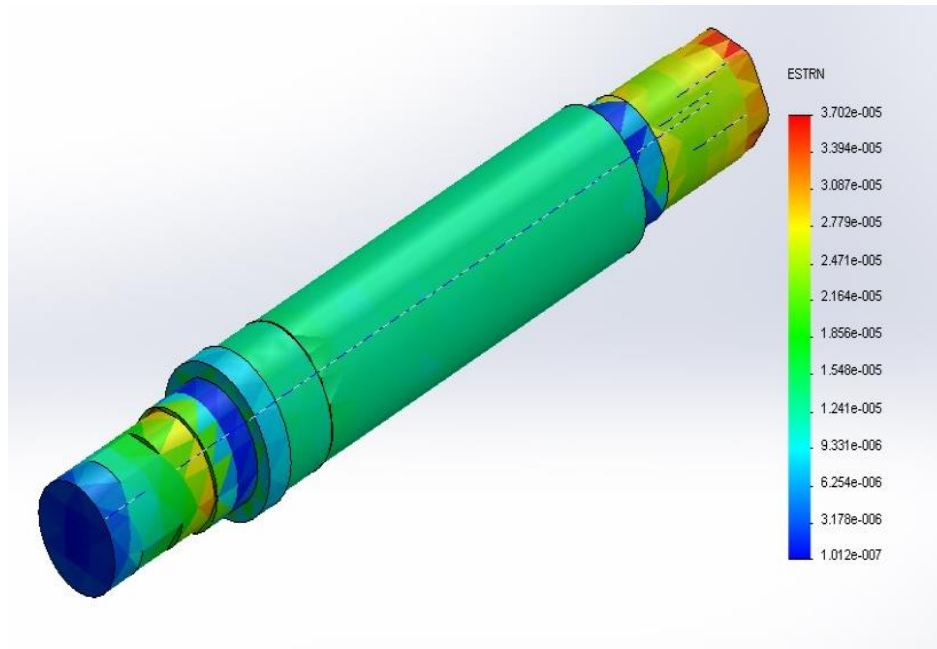
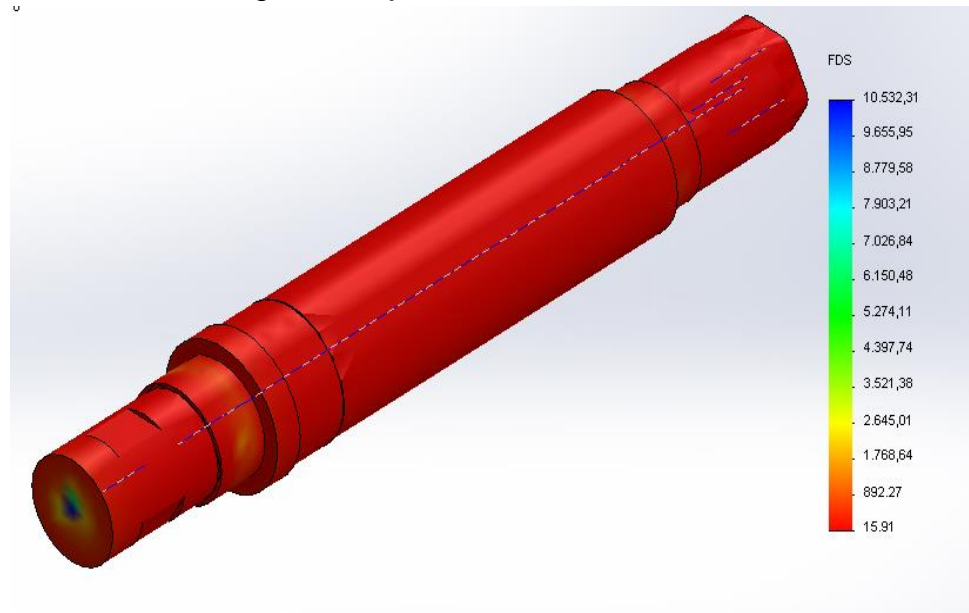


Figura 178. Factor de seguridad Eje Gimbal Roll.



Conclusión análisis de resultados para el eje Roll.

Para el estudio de factor de seguridad se empleó el criterio de von Mises. Con este estudio virtual se validó el comportamiento mecánico que el eje Roll experimenta, mostrando que el eje está diseñado con un factor de seguridad $FDS = 15,91$.

El diámetro exterior del eje de rotación se dimensiono en función del montaje del encoder de eje pasante seleccionado, los encoder seleccionados cuentan con un diámetro de agujero de 40 y 50 mm. Los cambios de sección en el eje donde se instalan los rodamientos se dimensionaron cercanos al diámetro exterior para que los cambios de sección en el eje sean suaves y evitar concentradores de esfuerzos.

Con este resultado se garantiza el correcto funcionamiento de los ejes. Los resultados de deformaciones muestran que los valores máximos de desplazamiento son de $7.066E-03$ mm, lo cual es pequeño comparado con el porcentaje de elongación que presenta este el material (30 % en 50 mm) con el cual está diseñado el eje: acero inoxidable AISI 304.

Resaltar nuevamente que la selección del material para los ejes se seleccionó con propiedades no magnéticas debido a las características magnéticas del encoder seleccionado. Los resultados obtenidos son superiores a los valores esperados por lo que el diseño de los ejes se considera apto.

Este mismo estudio se realizó para los ejes de rotación: eje pitch y eje Yaw obteniendo como resultado un factor de seguridad de 9,7 y 5,5 respectivamente como se muestran a continuación. Todos los ejes fueron diseñados en acero inoxidable 304.

Figura 179. Resultado Factor de Seguridad eje Pitch

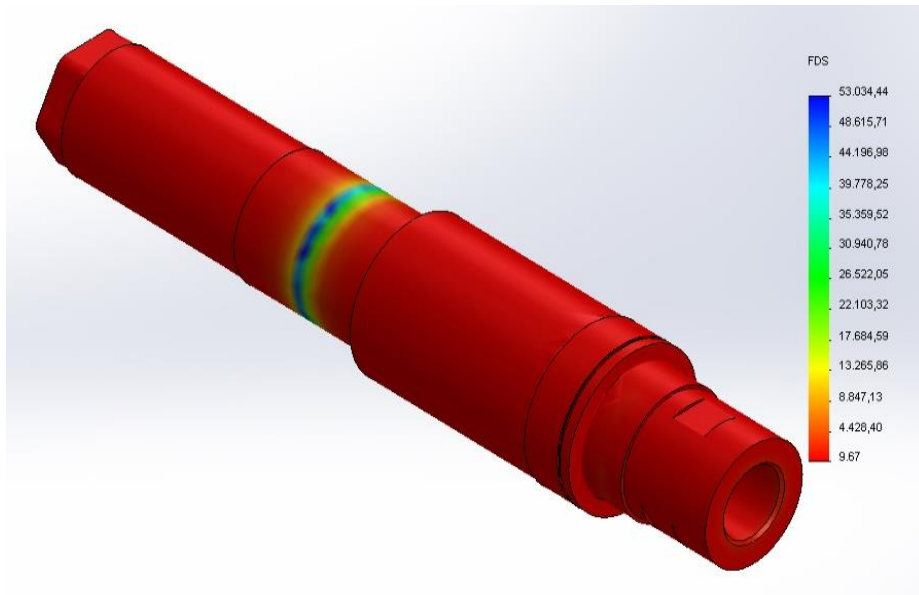
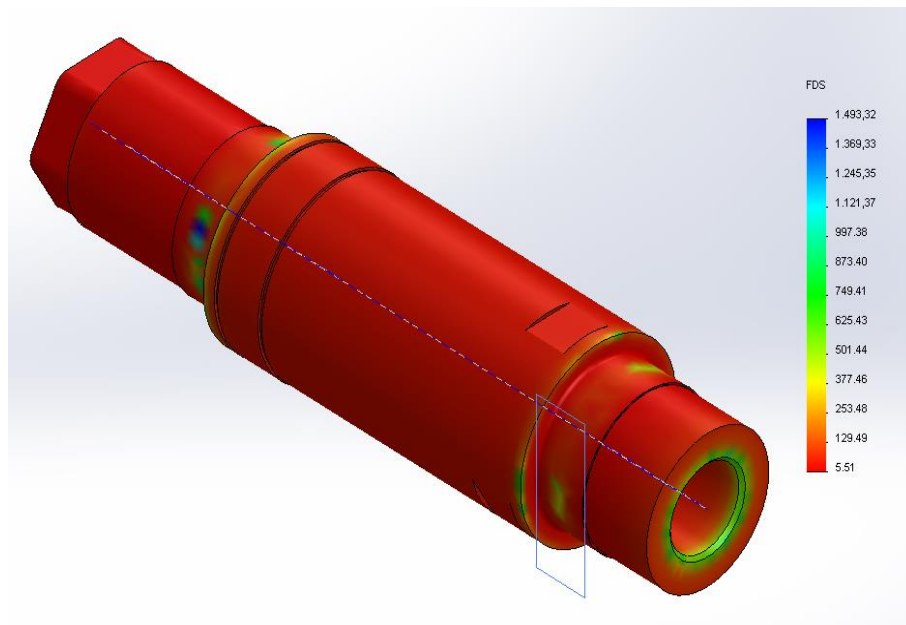


Figura 180. Resultado Factor de Seguridad Eje Yaw



Anexo F. Proceso de selección del sistema de transmisión por poleas y correas.



TABLA DE DIAMETROS DE POLEAS DENTADAS PARA CORREAS DE TIEMPO

Dientes	Diámetro exterior en milímetros				
	XL Paso 1/5"	L Paso 3/8"	H Paso 1/2"	XH Paso 7/8"	XXH Paso 1-1/4"
10	15,6	29,8	39,0		
11	17,3	32,8	43,1		
12	19,8	35,8	47,2		
13	20,5	38,6	51,2		
14	22	41,7	55,2		
15	23,7	44,7	59,3	106,1	
16	25,4	47,8	63,3	113,2	
17	27,0	50,9	67,4	120,3	
18	28,6	53,9	71,4	124,5	178,9
19	30,2	56,9	75,4	134,4	188,9
20	31,8	59,9	79,5	138,7	199,0
21	33,5	62,9	83,5	148,6	209,1
22	35,1	65,9	87,6	152,8	219,2
23	36,7	69,0	91,6	159,9	229,3
24	38,3	72,0	95,7	167,0	239,4
25	39,9	75,0	99,7	174,1	249,5
26	41,5	78,1	103,7	181,2	259,6
27	43,2	81,1	107,8	188,2	269,7
28	44,8	84,1	111,8	195,3	279,8
29	46,4	87,2	115,8	202,4	289,9
30	48,0	90,2	119,9	209,4	300,0
31	49,6	93,2	124,0	216,5	310,1
32	51,2	96,3	128,0	223,6	320,2
33	52,9	99,3	132,0	230,7	330,3
34	54,5	102,3	136,1	237,7	340,4
35	56,1	105,4	140,1	244,8	350,5
36	57,7	108,4	144,2	251,9	360,7
37	59,3	111,4	148,2	259,0	370,8
38	60,9	114,5	152,2	266,0	380,9
39	62,6	117,5	156,3	273,1	391,0
40	64,2	120,5	160,3	280,2	401,1
41	65,8	123,5	164,4	287,2	411,2
42	67,4	126,6	168,4	294,3	421,3
43	69,0	129,6	172,5	301,4	431,4
44	70,6	132,6	176,5	308,5	441,5
45	72,3	135,7	180,5	315,5	451,6
46	73,9	138,7	184,6	322,6	461,7
47	75,5	141,7	188,6	329,7	471,8
48	77,1	144,8	192,7	336,8	481,9
49	78,7	147,8	196,7	343,9	492,0
50	80,3	150,9	200,8	350,9	502,1
51	82,0	153,9	204,8	358,0	512,2
52	83,6	156,9	208,8	365,1	522,4
53	85,2	159,9	212,9	372,2	532,5
54	86,8	163,0	216,9	379,2	542,6

Dientes	Diámetro Exterior en milímetros				
	XL Paso 1/5"	L Paso 3/8"	H Paso 1/2"	XH Paso 7/8"	XXH Paso 1-1/4"
55	88,4	166,0	221,0	386,3	552,7
56	90,0	169,0	225,0	393,4	562,8
57	91,7	172,1	229,1	400,5	572,9
58	93,3	175,1	233,1	407,5	583,0
59	94,9	178,1	237,1	414,6	593,1
60	96,5	181,2	241,2	421,7	603,2
61	98,1	184,2	245,2	428,8	613,3
62	99,7	187,2	249,3	435,8	623,4
63	101,1	190,2	253,3	442,9	633,5
64	103,0	193,3	257,4	450,0	643,6
65	104,6	196,3	261,4	457,0	653,7
66	106,2	199,3	265,4	464,1	663,8
67	107,8	202,4	269,5	471,2	673,9
68	109,4	205,4	273,5	478,3	684,0
69	111,1	208,4	277,6	485,3	694,2
70	112,7	211,5	281,6	492,4	704,3
71	114,3	214,5	285,6	499,5	714,4
72	115,9	217,5	289,7	506,6	724,5
73	117,5	220,6	293,7	513,6	734,6
74	119,2	223,6	297,8	520,7	744,7
75	120,8	226,6	301,8	527,8	754,8
76	122,4	229,7	305,9	534,9	764,9
77	124,0	232,7	309,9	541,9	775,0
78	125,6	235,7	313,9	549,0	785,1
79	127,2	238,8	318,0	556,1	795,2
80	128,9	241,8	322,0	563,2	805,3
81	130,5	244,8	326,3	570,2	815,4
82	132,1	247,9	330,1	577,3	825,5
83	133,7	250,9	334,2	584,4	835,6
84	135,3	253,9	338,2	591,5	845,8
85	136,9	257,0	342,2	598,5	855,9
86	138,6	260,0	346,3	605,6	866,0
87	140,2	263,0	350,3	612,7	876,1
88	141,8	266,0	354,4	619,8	886,2
89	143,4	269,1	358,4	626,8	896,3
90	145,0	272,1	362,5	633,9	906,4
91	146,6	275,1	366,5	641,0	916,5
92	148,3	278,2	370,5	648,1	926,6
93	149,9	281,2	374,6	655,1	936,7
94	151,5	284,2	378,6	662,2	946,8
95	153,1	287,3	382,7	669,3	956,9
96	154,7	290,3	386,7	676,4	967,0
97	156,3	293,3	390,8	683,4	977,1
98	158,0	296,4	394,8	690,5	987,2
99	159,6	299,4	398,8	697,6	997,4
100	160,7	302,4	402,9	704,6	1007,5

NOTA: Las poleas cuyos diámetros se encuentran en azul, pueden ser utilizadas si una reducción de la vida útil de la correa es permitida.

POLEAS CON PESTAÑAS

Debido a que las correas dentadas tienen una presión inherente sobre la correa, es necesario utilizar al menos una polea con pestañas para evitar que la correa se deslice. Generalmente, para sincronizar, la polea más pequeña de la transmisión tiene las pestañas. Sin embargo, cuando la distancia entre centros de las poleas es mayor a 8 veces el diámetro de la polea menor, o cuando los ejes no son horizontales, o la transmisión tiene más de 2 poleas, ambas deben tener pestañas.

Factores de Servicio Básicos para Máquinas

Tabla 1

TIPO		FACTOR
Agitadores, batidores (Pala o propulsor)	Líquido	1.6
	Semilíquido	1.7
Máquinaria de pasteurizadora	Batidoras de masa	1.6
Máquinaria para ladrillos y barro	Taladros, batidoras y granuladores amasadoras	1.7
		2.0
Centrifugadoras		1.9
Compresores	Recíprocos	2.2
	Centrífugos	1.7
Transportadores	Banda, carga ligera;	1.5
	banda para hornos; mineral, carbón, apron cangilón, espiral, helicoidal	1.7
		1.8
Ventiladores, Sopladores	Centrífugos, propulsor, ventiladores para minas, sopladores positivos	1.8
		2.0
Generadores y excitadores		1.8
Molinos de martillos		1.9
Cribas, elevadores		1.8
Máquinaria para lavanderías	General	1.6
	Extracción, lavadoras	1.8
Eje de línea		1.7
Máquinas herramientas	Taladros, tornos	1.6
	máquinas de tornillo, esmeril	1.7
	fresadoras, copillos, troqueles	1.7
Molinos	Bola, varilla, granula, etc.	2.2
Máquinaria para papel	Agitadores, calandrias, secadoras, desfibradoras, bombas nash	1.6
		1.9
Máquinaria para imprentas	Imprentas, periódicos, rotativos, planas, revista; máquinas de linotipo, cortadoras, plegadoras	1.6
Bombas	Centrífugas, engranes rotarios, tubulas, recíprocas	1.7
		2.2
Máquinaria para plantas de hule		1.8
Máquinaria para aserraderos		1.8
Cribas	Vibradoras, (agitadoras)	1.7
	tambor, cónico	1.5
Máquinaria textil	Isleras, hilanderías, carretes, urdimbra	1.8
		1.7
Máquinaria para trabajos en madera	Tornos, stomas sinfin, stomas circula res, copillos	1.4
		1.6

IMPORTANTE:

Es preferible elegir siempre una transmisión de mayor capacidad a la calculada que una ligeramente inferior. Recuerde que las transmisiones NO deben emplearse como "hastillo", pues para ello existen dispositivos mecánicos y eléctricos específicos.

Formula para el calculo de la longitud de correas para transmisiones especiales que no se encuentran predeterminadas en este manual.

$$Lp = 2C + 1.57(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4C}$$

FACTORES DE SERVICIO ADICIONALES PARA TRANSMISIÓN DE ACELERACIÓN

Para transmisiones de aceleración, añada al factor de servicio básico, el factor de servicio adicional mostrado a continuación

Rango de proporción de aceleración	Factor Adicional
1.00 a 1.24	Ninguno
1.25 a 1.74	.10
1.75 a 2.49	.20
2.50 a 3.49	.30
3.50 y arriba	.40

PARA CONDICIONES POCO USUALES

Para una operación continua de 24 horas y/o el uso de una rueda boca, añada .02 al factor de servicio básico. Para una operación intermitente o estocada real, deduzca 0.2 al factor de servicio básico.

Los factores de servicio adicionales se requieren para condiciones poco usuales - tales como inversión de carga, carga pesada, freno eléctrico. Éstos deben ser determinados por un especialista en transmisión.

DIAMETRO MÍNIMO DE POLEA DE TIEMPO RECOMENDADO

Paseo	RPM	Número dientes	Diámetro exterior
1/5" pulg (XL)	3,500	12 XL	18.8 mm
	1,750	11 XL	17.2 mm
	1,160	10 XL	15.6 mm
3/8" pulg (L)	3,500	16 L	47.8 mm
	1,750	14 L	41.7 mm
	1,160	12 L	35.6 mm
1/2" pulg (H)	3,500	20 H	79.5 mm
	1,750	18 H	71.4 mm
	1,160	16 H	63.3 mm
7/8" pulg (XH)	1,750	26 XH	181.2 mm
	1,160	24 XH	167.0 mm
	870	22 XH	152.8 mm
1-1/4" pulg (XXH)	1,750	26 XXH	259.7 mm
	1,160	24 XXH	239.5 mm
	870	22 XXH	219.3 mm

Donde:

Lp: largo de la correa en pulgadas

D: diámetro de la polea mayor en pulgadas

d: diámetro de la polea menor en pulgadas

C: distancia entre centros en pulgadas

Anexo G. Ficha técnica de los materiales.

AW 7075

LAMINADA

Alcupla



POSIBILIDADES DE APLICACIÓN Y UTILIZACIÓN

	CRITERIOS	T651
MECANIZADO	Mecanizado general	●●●
	Mig-Tig	●
SOLDADURA	Por resistencia	●●●
	Braseado	●●
ANODIZADO	Protector	●●
	Decorativo	●
	Duro	●●
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN	Atmosférica	●●
	Marina	●

● No usado ●● Medio ●●● Buena ●●●● Excelente

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Alto límite elástico. Aleación de alta resistencia.

USO HABITUAL

Moldes, matrices, maquinaria o piezas que necesiten altas cargas dinámicas o estáticas.

COMPOSICIÓN QUÍMICA (% PESO)

ELEMENTOS	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti+Zr
MÍNIMO	-	-	1,20	-	2,10	0,18	5,10	-
MÁXIMO	0,40	0,50	2,00	0,30	2,90	0,28	6,10	0,20

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

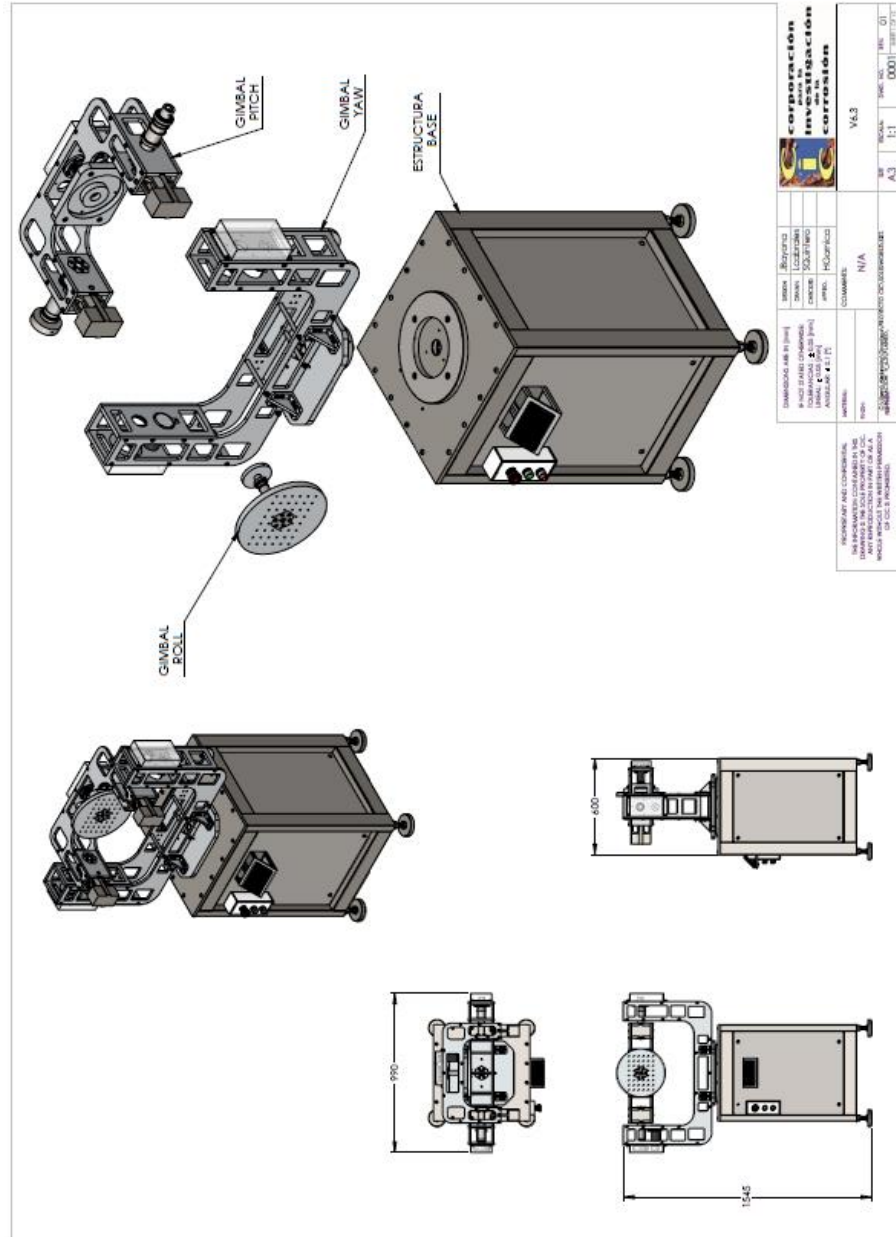
ESTADO H111	Rp 0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A50 (%)	Dureza HB
12,5 - 25 mm.	470	540	6	175
25 - 50 mm.	460	530	5	175
50 - 60 mm.	440	525	4	175
60 - 80 mm.	420	495	4	175
80 - 90 mm.	390	490	4	175
90 - 100 mm.	360	460	3	170
100 - 120 mm.	300	410	2	170
120 - 127 mm.	260	360	2	170

PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS (valores nominales)

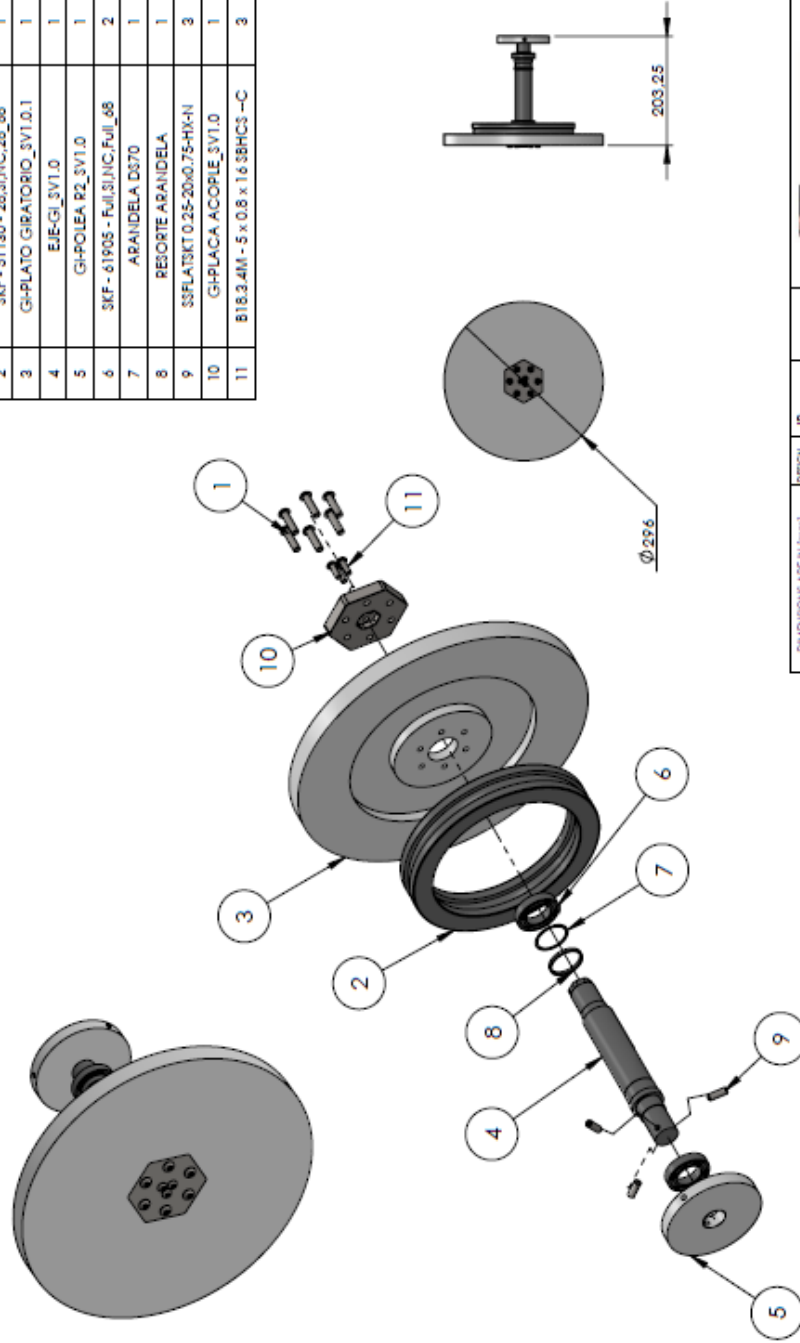
DENSIDAD	$\frac{Kg}{dm^3}$	2,81
MÓDULO ELÁSTICO	MPa	72.000
COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA	$\frac{10^{-6}}{^{\circ}C}$	23,6
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	$\frac{W}{mK}$	115-140
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA A 20°C	$\frac{MS}{m}$	17-21



Anexo H. Planos generales para el sistema Gimbal.



NO.	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	SBHSCREW 0.25-20x1-HK-C	6
2	SKF - 51130 - 28.3J.NC.28_68	1
3	GH-PLATO GIRATORIO_SV1.0.1	1
4	EJE-GI_SV1.0	1
5	GH-POLEA R2_SV1.0	1
6	SKF - 61905 - Full3J.NC.Full_68	2
7	ARANDELA D670	1
8	RESORTE ARANDELA	1
9	SSFLOTSKT 0.25-20x0.75-HX-H	3
10	GH-PLACA ACOPILE_SV1.0	1
11	B18.3.4M - 5 x 0.8 x 1.6 SBHCS -C	3



DESIGN	JBayona	DESIGN	JBayona
DRAWN	Ledrales	DESIGN	Ledrales
CHECKED	S Quintero	DESIGN	S Quintero
APPRO.	H Gamica	DESIGN	H Gamica
COMMENTS:			
N/A			
MATERIAL:			
FINISH:			
REVISION: COLUMBIA AMERICAN GYROSCOPE CO. (COLUMBIA GYROSCOPE CO.)			
VALORACIÓN: VULS/PA/AV			

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS
 DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF C.C.C.
 AND IS TO BE USED ONLY FOR THE PROJECT
 WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION
 OF C.C.C. IS PROHIBITED.

GIMBAL ROLL

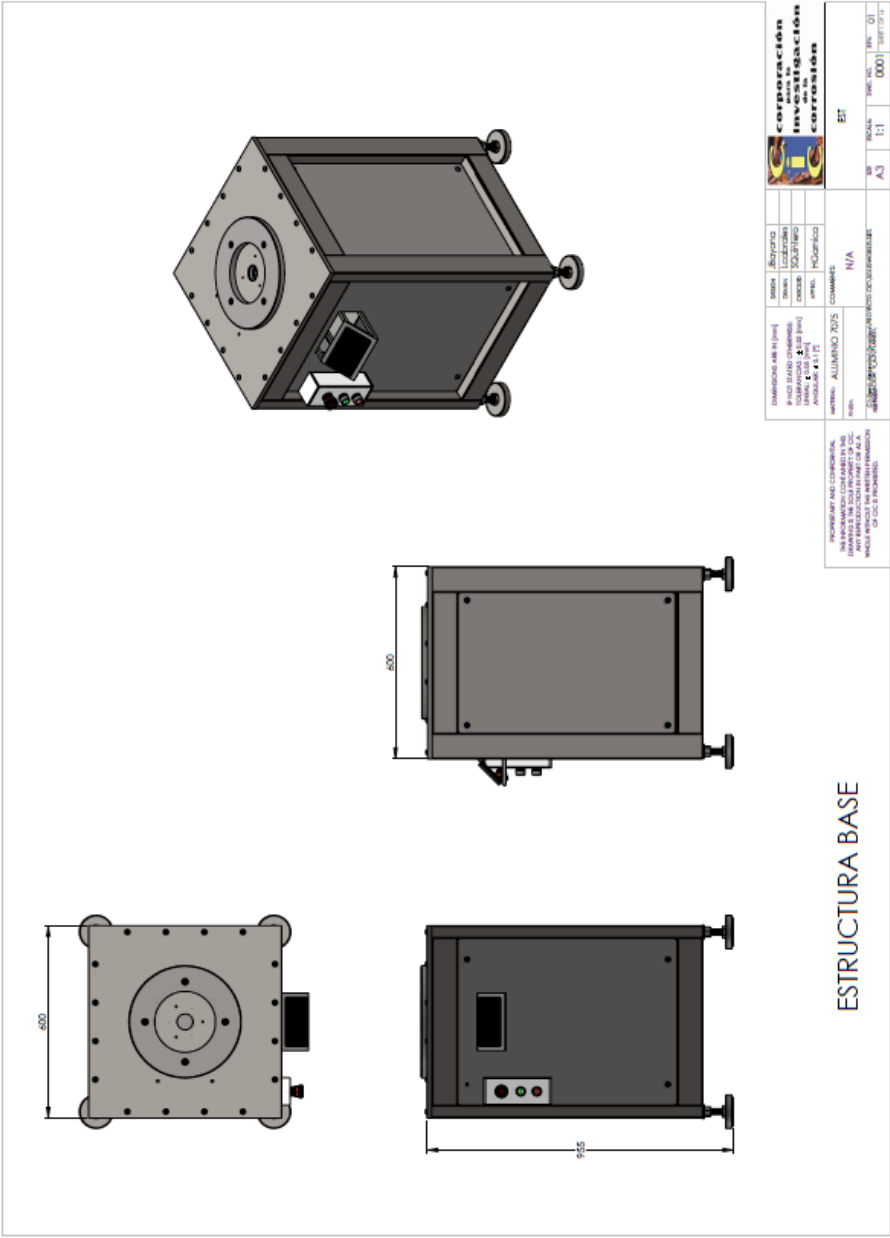
corporación para la investigación corrosión

GROLL-EXPLOSION

0001

01

SHEET 1 OF 3



ESTRUCTURA BASE

DESCRIPCION	ESTRUCTURA BASE
UNIDAD	UNIDAD
CANTIDAD	1
VALOR	0.000
TOTAL	0.000

INFORMACION GENERAL:
 INFORMACION GENERAL DEL
 EQUIPO ENTREGADO EN LA
 LISTA DE MATERIALES.
 PARA MAS INFORMACION
 CONTACTAR AL AREA DE
 ATENCION AL CLIENTE.

COMMENTS:
 N/A

EST

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR
1	ESTRUCTURA BASE	UNIDAD	1	0.000

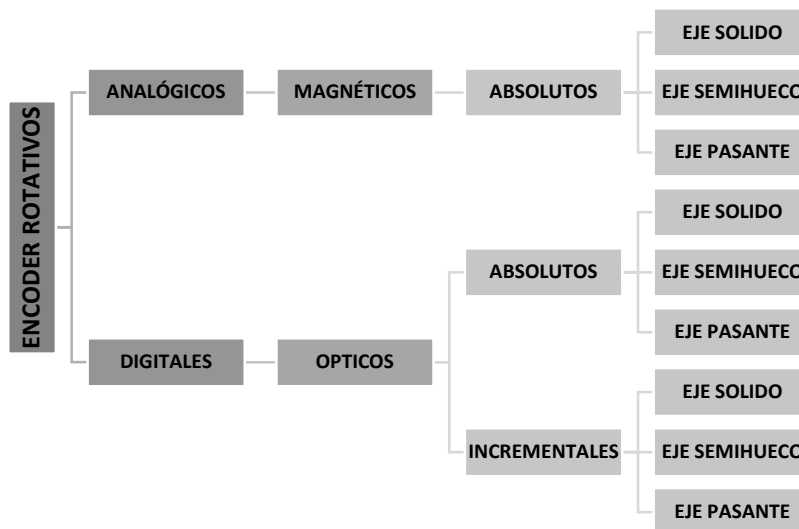
corporacion
 innovaciones
 en las
 corporaciones

Anexo I. Encoder.

Los planteamientos iniciales del proyecto incluyen un sistema de control en lazo cerrado en el cual partiendo de la selección e implementación de un encoder de alta resolución, el sistema de control realice una realimentación tanto de la velocidad como de la posición que permita conocer y compensar las perturbaciones que reciba el sistema tanto por fuerzas externas como por desbalances o variaciones dentro del sistema.

Teniendo como punto inicial, es necesario definir el tipo de encoder adecuado que permita llegar a los valores esperados en la posición y que permita también realizar un movimiento con velocidad constante en todas las pruebas a realizar. La revisión del estado del arte de los encoder rotativos establece que dependiendo de la tecnología a utilizar, es posible encontrar varios tipos de encoder rotativos. La Figura 181 muestra que tipos de encoder rotativos es posible encontrar en el mercado.

Figura 181. Clasificación de los encoders según su tecnología



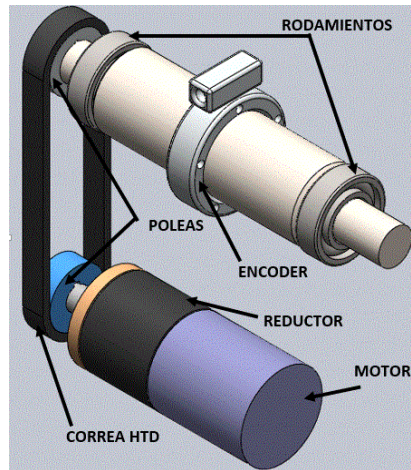
A partir de esta clasificación y teniendo como base los requerimientos del sistema, es necesario un encoder de alta resolución, que permita un fácil montaje y que sus conexiones tanto de comunicación como mecánicas no generen conflictos con el movimiento de los ejes, por lo cual, es indispensable plantear dos rutas de selección de los encoders. Cada una de las rutas de selección implica una configuración diferente de los elementos.

- CONFIGURACION 1

La primera de las rutas de selección de los encoders, es analizada buscando la mejor resolución posible (resolución > 4000 ppr), que me permita realizar variaciones de fracciones de grado en la posición del sistema con precisión. En esta ruta es planteada una distribución de la siguiente manera: realizar la selección de un encoder analógico absoluto de eje hueco³³, donde la señal de salida de este encoder debe ser interpolada para tener un rango de posiciones infinitas, según contempla la literatura, e instalarlo en el eje que llevará el movimiento del sistema de transmisión al Gimbal respectivo.

³³ WEST INSTRUMENTS DE MEXICO, S.A. Manual de aplicación de encoders [En línea]. Disponible en: <<http://www.westmexico.com.mx/pfd/dynapar/catalogos/4.-Manual%20de%20Aplicacion%20de%20Encoders.pdf>> [Consulta: 21 de agosto de 2013]

Figura 182. Configuración encoder en el eje.



- CONFIGURACION 2

Una segunda ruta de selección plantea la instalación en la misma posición del encoder pero un encoder de alta resolución del tipo digital ubicado también en el eje de salida del movimiento. Es importante destacar que los encoder de eje sólido y semihuecos no son tenidos en cuenta debido a que la implementación de estos requiere instalación de ejes adicionales, reubicación de los cables, montajes no adecuados en cuanto a la estructura del sistema, entre otros.

A partir de esta primera consideración del montaje de los encoder, es necesario plantear los requerimientos básicos para poder realizar la búsqueda de las empresas y los encoders más adecuados para la aplicación deseada. Para poder establecer los requerimientos básicos de búsqueda, los datos que a continuación son listados están basados tanto en las características técnicas del elemento a validar (IMU AVANZADO) y en las características propias de las pruebas y del estado del arte de los sistemas Gimbal definidos en los primeros capítulos de este libro.

Tabla 46. Datos básicos para el proceso de selección de los encoders

DATOS BASICOS PARA EL PROCESO DE SELECCIÓN DE LOS ENCODERS	
CARACTERISTICA	CRITERIO DE SELECCION
RESOLUCION	8 ARC-SEG
PRECISION	40 ARC-SEG
REPETIBILIDAD	0,8
PROTOCOLO DE COMUNICACION	ABIERTO
DIAMETRO DE AGUJERO PARA EJE	ENTRE 30 Y 50 MM
ELEMENTOS ADICIONALES	NO
PESO	HASTA 1 KG
TECNOLOGIA	ANALOGICO

A partir de estos datos básicos y evaluando la información de los sistemas Gimbal ofrecidos en el mercado, las recomendaciones es que el sistema de validación para giroscopios o sistemas de medición inercial debe tener en lo posible 5 veces mayor resolución que el elemento a validar. Según este criterio, se realiza la búsqueda de un encoder que permita realizar mediciones afines.

Partiendo de estos criterios, es realizada una búsqueda, de la cual se logran los siguientes resultados. En la matriz de selección que se muestra a continuación se incluyen otros criterios que fueron evaluados a lo largo de la búsqueda de los encoders.

Tabla 47. Matriz de selección de encoder

EMPRESA	INTERFACE	TECNOLOGIA	REFERENCIA	RESOLUCION [PPR]	RESOLUCION [ARC/SEG]	PRECISION [ARC/SEG]	PESO [KG]	D EJE [MM]	GRADO DE PROTECCION	ELEMENTOS ADICIONALES + COSTO [US]	COSTO [US]
HEIDENHAIN	ENDAT2,2	M. ANALOGICO+INTER POLADOR	ERM2410	9830400	0,14	36	0,5	40	IP67	IPCORE	2600
HEIDENHAIN	VPP	M. ANALOGICO+INTER POLADOR	ERM280	60000	22,22	36	0,5	40	IP67	INTERPOLADOR, CABLES	1700
RENISHAW	BISS	O. ABSOLUTO	RA18BAA052B15F - RESA20USA052B	262144	4,58	5,49	0,6	30	IP64	NO REQUIERE	2700
RENISHAW	BISS	O. ABSOLUTO	RA18BAA057B15F - RESA20USA057B	262144	4,58	5,49	0,6	37	IP64	NO REQUIERE	2700
RENISHAW	BISS	O. ABSOLUTO	RA18BAA075B15F - RESA20USA075B	262144	4,58	5,49	0,6	55	IP64	NO REQUIERE	2700
TR- ELECTRONI C	SSI	O. ABSOLUTO	COH110	262144	5,09	13,18	1,75	40 o 50	IP54	NO REQUIERE	2650
NETZER	SSI	M. ABSOLUTO	DS-70-64-SH-R0	524288	2,3	34	0,05	30	IP40	KIT MONTAJE	1300
NETZER	SSI	M. ABSOLUTO	DS-90-64-SH-R0	524288	2,3	34	0,05	50	IP40	KIT MONTAJE	1200

A partir de las características técnicas de cada uno de los encoders encontrados, fue evaluado cada uno de los encoders según el criterio de resolución 5 veces mayor y los encoders de mejor resolución con el mínimo de elementos adicionales son los ofrecidos por la empresa Netzer. Adicional a esto, también fue realizada una evaluación del grado de protección del encoder y del costo de estos elementos con lo cual también fueron seleccionados los encoders de esta marca.

Se seleccionaron dos (2) encoders de referencia DS-90-64-SHR0 y uno (1) referencia DS-70-64-SH-R0. A continuación se muestran los datasheet de los encoders seleccionados, donde se detallan las especificaciones eléctricas y mecánicas.

1. ENCODER NETZER DS70

REF. DS-70-64-SH-R0

DS-70

Absolute position, rotary Electric Encoder™



The DS-70 is a member of the DS series of Electric Encoders, based on Netzer Precision proprietary technology. These encoders offer many advantages, some unparalleled:

- Low profile (10 mm).
- Hollow, floating shaft.
- No bearings or other contacting elements.
- High precision.
- High tolerance to temperature, shock, moisture, EMI & RFI.
- Insensitive to magnetic fields.
- Very low weight.

The DS-70 is suited to demanding applications such as: aerospace, medical, instrumentation, automation, etc.



Mechanical

Allowable mounting eccentricity (sine/cosine)	+0.1 mm
Allowable rotor axial motion (sine/cosine)	+0.1 mm
Rotor inertia	17 gr mm ²
Total weight	35gr
Outer diameter / Inner diameter / Profile	70 / 50 / 70 mm
Material (stator, rotor)	Utem™ polymer
Material mounting damps, M2	S.S.

Electrical

Supply voltage	5V ± 5%
Interconnection	Ø 3 mm Shielded cable

Environment

EMC	IEC 6100-6-2, IEC 6100-6-4
Operating temperature range	-40°C to +85°C
Relative humidity	<98 % - non condensing
Shock endurance	IEC 60068-2-27 100 g for 11 ms
Vibration endurance	IEC 60068-2-6 20 g 10 - 2000 Hz
Protection	IP 40

Performance

Electrical Cycles - Fine/Coarse channels	64 / 5
Angular resolution (using 11 bit A/D converter)	19 bits
Static error (with offset compensation)	< 30 mDeg (0.17mrad)
Maximum operational speed	750 rpm
Measurement range	Unlimited rotation
Output	SSI absolute position
BIT (built in tests, optional)	Included (SSI version)

www.netzerprecision.com

The holistic structure of the Electric Encoder™ provides generous mounting tolerance, thus obviating the need for internal ball bearings. The lack of bearings and components such as flexible couplers, glass disc, light sources and detectors, along with very low power consumption makes the DS-70 encoder virtually failure free.

The internally shielded, DC operated Electric Encoder™ includes an electric field generator, a field receiver, a sinusoidal shaped dielectric rotor, and processing electronics.

The outputs signals of DS-70 Electric Encoder™ are analog Sine / Cosine representing the rotation angle, incremental or absolute position.



Digital - SSI Interface (absolute position)

DS-70

Output signal parameters

Signal latency	-250 µSec
Output code	Binary
Serial output SSI	Differential RS-422
Clock SSI	Differential RS-422
Monoflop time	25 µSec
Clock Frequency	0.5 ± 2.5 MHz
Position update (Max)	29 KHz

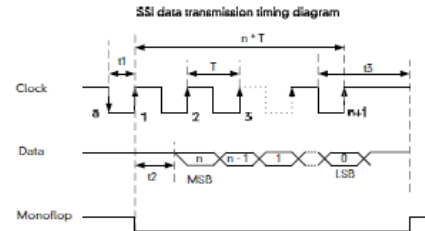
Electrical parameters

Current consumption	~ 180 mA
---------------------	----------

SSI - Wires color code

#	Name	Color	Function
1	Clock +	Grey	SSI Clock
2	Clock -	Blue	
3	Data -	Yellow	SSI Data
4	Data +	Green	
5	GND	Black	Ground
6	+5V	Red	Power supply

Synchronous Serial Interface (SSI) allows for serial transmission of absolute position data from the Electric Encoder™ responding to controller clock pulses. The Encoder and controller are linked by clock and data differential signal lines.



n = total number of data bits.
 T = clock period (sec) - user defined.
 1/T = clock frequency 0.5 ± 2.5 MHz (user defined).
 t1 = minimum time required for the encoder to freeze data and preset the shift registers before receiving the first rising edge to prompt the MSB
 t2 = data transmission delay (increases with cable length)
 t3 = required delay to refresh position data between subsequent position reads.

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	DS-70		1
2	EAPK005	Encoder clamp ST.SI	3
3	MP-03083	DS-70 Wave spring	1
4	MP-00996	DS-70 Retaining Ring	1

Notes:
 1) For any incompatibility with the model or missing dimension, please refer to Nitzor for clarification.
 2) Packing must prevent physical damage during process storage and shipment.

THE INFORMATION CONTAINED HEREIN IS THE PROPERTY OF SETZER PRECISION SERVICES LTD. ANY REPRODUCTION OR USE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF SETZER PRECISION SERVICES LTD IS PROHIBITED. THE DRAWINGS AND DIMENSIONS ARE THE PROPERTY OF SETZER PRECISION SERVICES LTD AND SHALL BE KEPT IN CONFIDENCE BY THE RECIPIENT.

Setzer Precision
 ROTATION SENSORS LTD

MP-DS-70 Instruction - mital shaft with shoulder - ver 03/2018

DATE: 03/2018
 DRAWN: [Name]
 CHECKED: [Name]
 APPROVED: [Name]

SCALE: 1:1
 SHEET: 1 OF 1
 PART NO: A3

2. ENCODER NETZER DS90

REF. DS-90-64-SHR0

DS-90

Absolute position, rotary Electric Encoder™



The DS-90 is a member of the DS series of Electric Encoders, Based on Netzer Precision proprietary technology. These encoders offer many advantages, some unparalleled:

- Low profile (10 mm).
- Hollow, floating shaft.
- No bearings or other contacting elements.
- High precision.
- High tolerance to temperature, shock, moisture, EMI, RFI and Magnetic fields.
- Very low weight.
- Analog or multiple digital interface options.
- Extremely low power options.

The DS-90 is suited to demanding application such as: aerospace, medical, instrumentation, automation, etc.

Mechanical

Allowable mounting eccentricity , operational	±0.1 mm
Allowable rotor axial motion; operational	±0.1 mm
Rotor inertia	2,812 gr · mm ²
Total weight	50 gr
Outer diameter / Inner diameter / Profile	90 / 50 / 10 mm
Material (stator, rotor)	Utem™ polymer
Material mounting damps , M2	S.S.

Electrical - common to all types

Supply voltage	5V ± 5%
Interconnection	Ø 5.5 mm Shielded cable

Environment - common to all types

EMC	IEC 6100-6-2, IEC 6100-6-4
Operating temperature range	-40°C to +85°C
Relative humidity	<98 % - non condensing
Shock endurance	IEC 60068-2-27 100 g for 11 ms
Vibration endurance	IEC 60068-2-6 20 g 10 – 2000 Hz
Protection	IP 40

Performance

Electrical Cycles – Fine/Coarse channels	64 / 5
Angular resolution (with 8 bit A/D converter)	19 bits
Static error (with offset compensation)	< 10 mDeg (0.17mrad)
Maximum operational speed	750 rpm
Measurement range	Unlimited rotation
Output	Digital SSI , Incremental AqB+ Index , Analog
BIT (build in tests , optional)	Included (SSI version)

www.netzerprecision.com



The holistic structure of the Electric Encoder™ provides generous mounting tolerance, thus obviating the need for internal ball bearings.

The lack of bearings and components such as flexible couplers, glass disc, light sources and detectors, along with very low power consumption makes the DS-90 encoder virtually failure free.

The internally shielded, DC operated Electric Encoder™ includes an electric field generator, a field receiver, a sinusoidal shaped dielectric rotor, and processing electronics.

The outputs signals of Electric Encoder™ are analog Sine / Cosine representing the rotation angle. The digital outputs are obtained by further processing which may be either internal or external to the encoder.



Digital - SSI Interface (absolute position)

DS-90

Output signal parameters

Signal latency	~250 μ Sec
Output code	Binary
Serial output SSI	Differential RS-422
Clock SSI	Differential RS-422
Monotop time	25 μ Sec
Clock Frequency	0.5 : 2.5 MHz
Position update (Max)	29 KHz

Electrical parameters

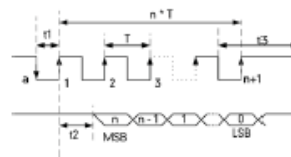
Current consumption	~ 180 mA
---------------------	----------

SSI - Wires color code

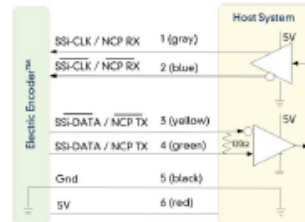
#	Name	Color	Function
1	Clock +	Grey	SSI Clock
2	Clock -	Blue	
3	Data +	Yellow	SSI Data
4	Data -	Green	
5	GND	Black	Ground
6	+5V	Red	Power supply

Synchronous Serial Interface (SSI) allows for serial transmission of absolute position data from the Electric Encoder™ responding to controller clock pulses. The Encoder and controller are linked by clock and data differential signal lines.

SSI data transmission timing diagram



n = total number of data bits.
 T = clock period (sec) - user defined.
 1/T = clock frequency (0.5 : 2.5 MHz (user defined)).
 t1 = minimum time required for the encoder to freeze data and preset the shift registers before receiving the first rising edge to prompt the MSB.
 t2 = data transmission delay (Increases with cable length)
 t5 = required delay to refresh position data between subsequent position reads.



Host system mounting details

NO.	PART NAME	CATALOG NO.	QTY.
1	Host shaft	-	1
2	Host base	-	1
3	DS-90 Retaining ring	MP-00006	2
4	DS-90 Encoder	See data sheet	1
5	Encoder clamp	MP-00749-00	3
6	DS-90 Wave spring	MP-00007	1

Title: DS-90 Installation: Middle of shaft, smooth shaft
Date: Dec 08 **Version:** 0.5 **A4**
 SHEET 1 OF 1 **SCALE:** 1:1.5 **Dimensions:** mm

Anexo J. Instructivo de operación y mantenimiento del sistema gimbal.

Instructivo de Operación y Mantenimiento Gimbal 3D



Capítulo

1.	Descripción preliminar del Sistema de Validación Inercial.....	300
2.	Instrucciones de Seguridad	301
3.	Puesta en funcionamiento	303
3.1.	Proceso de nivelación	303
3.2.	Modos de operación.....	304
3.3.	Montaje y Ajuste IMU	306
3.4.	Preparativos del funcionamiento.....	307
3.5.	Secuencia Operación.....	309
3.6.	Protección eléctrica de la maquina	309
4.	Mantenimiento.....	309

1. Descripción preliminar del Sistema de Validación Inercial.

Un sistema de navegación inercial (INS - Inertial Navigation System) puede ser definido como un proceso para determinar de la posición, orientación y desplazamiento de un vehículo desde un punto de partida conocida mediante la medición de las aceleraciones en direcciones espaciales. Para esto se utilizan unidades de medición inercial (IMU), que son dispositivos electromecánicos que registran cambios de orientación, velocidad de un sistema, haciendo uso de la combinación de acelerómetro y giroscopios presentes en el IMU. Es necesario validar estas unidades de medición inercial para conocer el grado de incertidumbre que se manejan en las mediciones y desarrollar los algoritmos matemáticos adecuados.

La unidad de medición inercial (IMU), presentes en los sistemas de navegación inercial (INS) son validados mediante mecanismos de rotación que recrean la fenomenología o comportamiento dinámico que experimentan las IMU. Estos mecanismos denominados como Gimbal (Cardan en Ingles), debido a su configuración geométrica, comercialmente son ofrecidos como simuladores de movimiento en 3D.

Para validar los sistemas de navegación inercial es necesario contar con un sistema de rotación tridimensional que permita simular los fenómenos físicos que experimenta la unidad de medición inercial en el recorrido por las tuberías, permitiendo corroborar las lecturas de posición y velocidad que registran los giroscopios, acelerómetros y magnetómetros cuando se somete a un giro o trayectoria angular, en cualquiera de las direcciones.

Que es Gimbal: El sistema mecánico Gimbal, es un simulador de movimiento de 3 ejes dinámicos de precisión. Se utiliza para la prueba y calibración de las

variables de censado de la Unidad de Medición Inercial IMU avanzado, presente en la herramienta de inspección ITION-I.

Especificaciones del sistema de validación Gimbal.

Dimensiones	Diametro de Plataforma circular Roll	mm	300 x 25 (DxH)
	Estructura U-Gimbal Pitch	mm	620 x 120 x 350 (LxWxH)
	Estructura U-Gimbal Yaw	mm	890 x 120 x 550 (LxWxH)
	Estructura Base	mm	600 x 600 x 955 (LxWxH)
	Altura Total	mm	1500 (H)
		mm	
Unidad Medición Inercial (KVH-1750)	Peso	kg	5 (nominal)
	Dimensiones	mm	250 x 150 x 85 (LxWxH)

Especificaciones Mecánicas	Eje interno/Gimbal Roll	Eje intermedio/Gimbal Pitch	Eje externo/Gimbal Yaw
Resolución [arc-seg]	8		
Precisión [arc-seg]	40		
Máx. Capacidad de carga [Kg]	10	-	-
Sistema de transmisión	Reductor planetario + Correas y poleas Síncronas	Reductor planetario + Correas y poleas Síncronas	Reductor planetario + Correas y poleas Síncronas
Tipo de motores	Brushless DC	Brushless DC	Brushless DC
Tipo de encoder	Analógicos	Analógicos	Analogicos
Rango de trabajo [deg]	± 360	± 180	± 180
Peso [kg]	10	37	70
Rango velocidad [deg/s]	0-60	0-60	0-60

2. Instrucciones de Seguridad.

- Para garantizar la seguridad del operario del sistema y las personas alrededor de la maquina es importante establecer un área de seguridad alrededor, teniendo en cuenta el radio de giro de los ejes de la máquina.
- Es conveniente que antes de proceder con la manipulación, pruebas, montaje, mantenimiento o reparaciones a la máquina, realizar la lectura del

manual de operación y mantenimiento. Si se realiza una adecuada instalación, se lleva a cabo el plan de mantenimiento y se opera según las recomendaciones de este manual, reduce el riesgo de presentar algún accidente o avería. El plan de mantenimiento que se propone es sencillo y está relacionado con la forma de operación, la lista de revisión (Check List), revisiones antes, al iniciar y finalizar operaciones.

- El operario por ningún motivo debe manipular el sistema eléctrico y electrónico sin la supervisión de un experto en el área.
- Comprobar si la maquina se encuentra libre de sustancias y objetos extraños para evitar alteraciones en su funcionamiento.
- Verificar que todos los sistemas y componentes se encuentre en buen estado y lugar adecuado antes de empezar a operar.
- Comprobar que el lugar donde será posicionado el sistema de validación cuente con una superficie totalmente plana, de lo contrario se verá afectada la confiabilidad de las lecturas realizadas por el sistema de validación. Se requiere que el lugar de trabajo cuente con unas dimensiones mínimas de: 2,5 [m]de alto, 2,0 [m] de largo y 2,0 [m] de ancho.
- Verificar y/o nivelar la estructura antes de hacer uso de la misma
- Verificar el montaje y buen ajuste del módulo de medición inercial en la plataforma circular de la máquina.
- Antes de iniciar las pruebas informar a las personas del área que el equipo va estar en operación.

- Solo el personal autorizado puede manipular la máquina.
- Asegúrese de que personas ajenas a la maquina no obstruyan de manera alguna el movimiento de la misma dado que esto puede generar lesiones o variaciones en las pruebas.

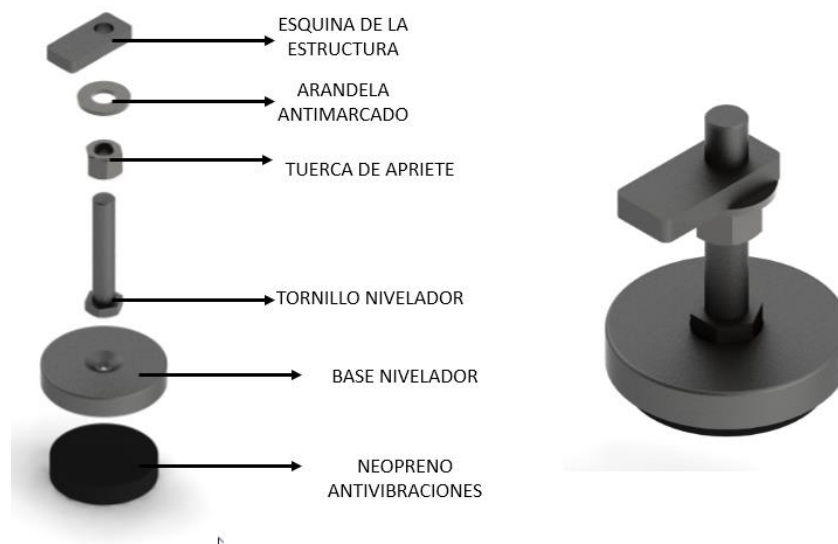
3. Puesta en funcionamiento.

3.1. Proceso de nivelación.

Antes de cualquier uso del sistema de validación es necesario iniciar el proceso de preparación del sistema con el proceso de nivelación básico de la estructura. Este procedimiento es llevado acabo con el fin de minimizar las fuentes de error en las mediciones realizadas por los encoders en el sistema de validación.

- Ubique el sistema de operación en una superficie plana donde sea establecido para realizar el proceso de validación.
- En la parte inferior de la estructura, como puede visualizarse en la Figura 184, están ubicados los 4 niveladores de la estructura, cada uno en cada esquina de la estructura. Este nivelador cuenta con 4 partes fundamentales, tal y como se muestra en la Figura 183.
- Ubique un nivel en una de las esquinas del sistema y revise la posición de la burbuja de este nivel. Si la burbuja del nivelador se encuentra descentrada, realice el paso 4, de lo contrario, pase a la siguiente esquina.

Figura 183. Niveladores del sistema de validación.



- Proceda a ajustar el tornillo, roscándolo o desenroscándolo hasta lograr centrar la burbuja del nivelador.
- Realice este procedimiento hasta que las 4 esquinas del sistema se encuentren con la burbuja centrada.

3.2. Modos de operación.

El sistema de validación Gimbal tendrá dos modos de operación los cuales se presentan a continuación.

- Giros en ambos sentidos de rotación de las tres estructuras Gimbal durante un periodo de tiempo.
- Movimiento a una posición angular definida.

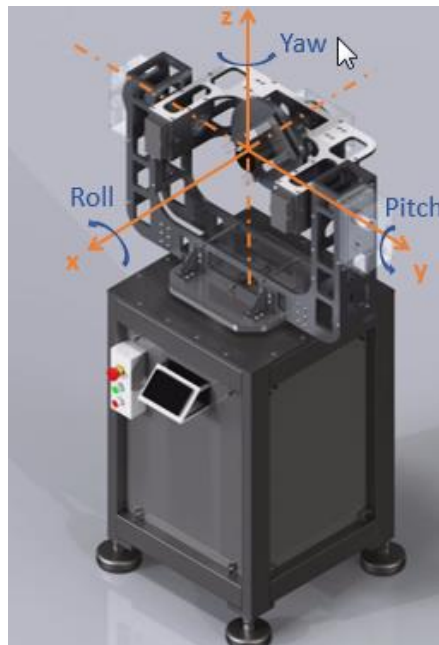
La rotación máxima y la dirección de rotación en cada Gimbal en condiciones normales de la maquina son los siguientes:

- Estructura Gimbal Roll: Rotación Continua.
- Estructura Gimbal Pitch: 180° en ambos sentidos de rotación.
- Estructura Gimbal Yaw: 180° en ambos sentidos de rotación.

Con el fin de obtener los parámetros de censado de la unidades de medición inercial se pueden contemplar las siguientes secuencias de operación de las tres estructuras Gimbal.

- Rotación individual de la estructura Gimbal Roll.
- Rotación individual de la estructura Gimbal Pitch.
- Rotación individual de la estructura Gimbal Yaw.
- Rotación simultanea de los Ejes Yaw, Pitch y Roll.

Figura 184. Estructuras Gimbal.



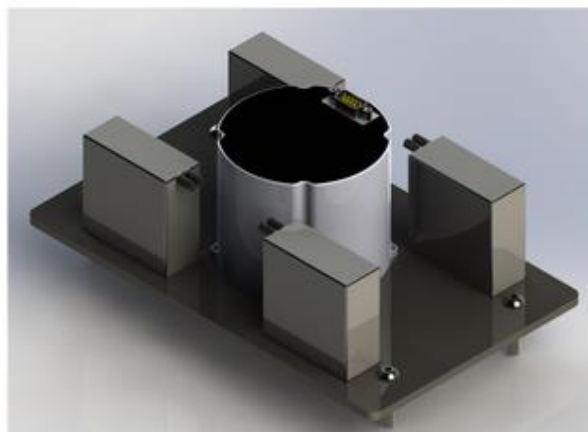
Para el arranque del sistema, en cualquiera de las secuencias de operación, se establece como medida previa verificar el ajuste de los motores a las placas de las estructuras Gimbal, de las poleas en los ejes, ajuste de los tornillos de sujeción de los componentes del sistema, para mantener el sistema balanceado y libre de vibraciones que pueden influir en el desempeño del sistema de validación. Además se debe observar que no haya elementos que interfieran en la transmisión por correas y poleas; como también verificar que las estructuras giren sin obstrucciones.

Estas recomendaciones deben ser realizadas periódicamente para mantener balanceado el sistema.

3.3. Montaje y Ajuste IMU.

La unidad de medición inercial IMU, en conjunto con otros elementos electrónicos, son denominados módulo de medición inercial de la herramienta de inspección ITION. Estos componentes se integran en una placa rectangular como se muestra en la Figura 185 para realizar las pruebas de calibración y validación del IMU.

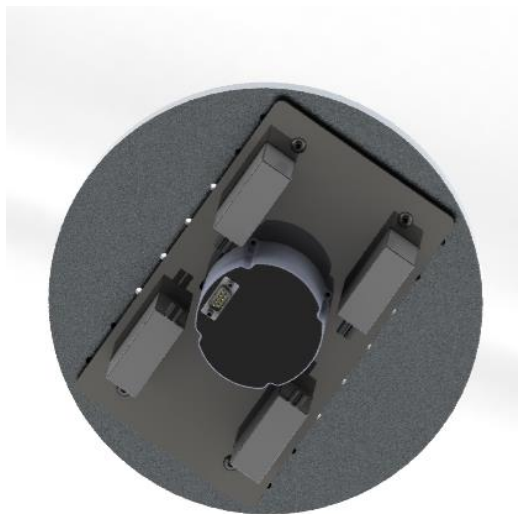
Figura 185. Módulo de medición Inercial IMU.



Esta placa rectangular se instala sobre la plataforma circular perteneciente a Gimbal Roll por medio de tornillos permitiendo una unión temporal. La plataforma circular es un componente de Gimbal Roll y cuenta con una matriz de agujeros roscados en la cual se sujeta la placa rectangular; la matriz permite configurar la placa rectangular en diferentes posiciones dando mayor versatilidad al montaje y desmontaje.

Es indispensable que el módulo de medición inercial quede bien posicionado dentro de la estructura Gimbal Roll de manera que no pueda moverse debido a los movimientos de rotación del sistema y evitar desviaciones en las mediciones.

Figura 186. Montaje del módulo de medición inercial.



3.4. Preparativos del funcionamiento

Los pasos previos a la puesta en marcha, se deben conocer para evitar cometer errores y asegurar que las actividades se desarrollen según las recomendaciones de los diseñadores. A continuación se presenta el Check List de este sistema de validación:

- **Chequeo de los rodamientos:** Después de largos periodos de inactividad (3 meses aprox.) verifique la condición de los rodamientos axiales y radiales dando giros suaves a las estructuras Gimbal Yaw, Pitch y Roll. En el caso de escuchar ruidos en los rodamientos axiales, verifique el estado de lubricación o suciedad de este.
- **Chequeo de la transmisión:** verificar que las correas estén en buen estado y correctamente instaladas. Mueva manualmente la transmisión y cerciórese que el movimiento sea suave y continuo.
- **Chequeo del acople hexagonal de los ejes de rotación:** verifique el ajuste de las piezas hexagonales a la sección hexagonal de los ejes y el ajuste de los tornillos a las placas del Gimbal.
- **Chequeo de las conexiones eléctricas y electrónicas:** realice una inspección de las conexiones de los motores y encoder. Si observa alguna anomalía comunicarse con el personal encargado y no encender el banco hasta verificar el estado de las conexiones.
- **Chequeo del ajuste de los tornillos de las contrapesas:** debido al peso que tienen las contrapesas y a la dinámica que experimentan las estructuras Gimbal se recomienda ajustar fuertemente los tornillos que permiten el ajuste de las contrapesas con el fin de evitar algún accidente debido a la caída de estas contrapesas.
- **Chequeo del ajuste de los tornillos de las estructuras Gimbal:** Para evitar vibraciones en los componentes de las estructuras Gimbal verifique el ajuste de los tornillos de las estructuras principales y componentes.

- **Chequeo de la tapa de protección de la transmisión:** Con el fin de mantener al usuario aislado y protegido del contacto con la transmisión en movimiento, no opere el sistema si las cajas de protección de la transmisión no están instaladas.

3.5. Secuencia Operación

- Realizar el montaje del IMU en la plataforma circular
- Energizar el sistema de validación mediante una fuente a 24 V.
- Conectar el sistema de validación a la computadora mediante cable serial
- Programar las rutinas de posición y velocidad según criterios de la CIC.
- Ejecutar Rutinas.
- Regresar cada uno de los ejes de rotación a las posiciones iniciales.

3.6. Protección eléctrica de la maquina

La máquina funciona a 24 V de corriente directa y cuenta con un botón de parada de emergencia que desconecta todo el sistema eléctrico. Accione este botón en caso de cualquier eventualidad, y al final de las pruebas de calibración.

4. Mantenimiento

Se recomienda que los trabajos de mantenimiento solamente pueden ser llevados a cabo cuando la máquina está detenida y des-energizada.

El propósito de darle un buen mantenimiento a esta máquina, es lograr que no presente fallas debido al uso inadecuado, falta de revisión de cada uno de sus sistemas; y al mismo tiempo trabaje lo más silenciosamente posible, manteniendo su precisión y características técnicas.

Existen áreas críticas en la realización del mantenimiento, y para este mecanismo se contemplaron las siguientes:

- **Inspección:** se recomienda una inspección de todo el equipo cada vez que se opere la máquina para encontrar piezas averiadas, fallas leves o imperfecciones en el equipo. La máquina debe ser monitoreada durante su operación para identificar anomalías durante el proceso y éstas puedan ser corregidas. Al tratarse de un sistema de validación que debe contar con alta precisión no se admiten ningún tipo de imperfección en los componentes.

Durante la operación identifique el funcionamiento de los motores, verifique que no presenten ruido, que su operación sea sin paradas repentinas, ni presente holgura o juego en la transmisión del movimiento. Si es percibido alguno de estos eventos es señal que se requiere realizar ajustes, mantenimiento o reparaciones y en caso extremo recurrir a un análisis general y detallado del sistema de validación.

Si se perciben piezas o componentes averiados, estos deben ser reemplazados inmediatamente, dado que esto afecta la precisión del sistema. Además el no cambiarlas en el momento indicado implica que la falla continúe y afecte otros sistemas o componentes; además de comprometer la seguridad del operario.

Revise el sistema de transmisión de potencia por correas y poleas síncronas observando y escuchando cualquier sonido anormal o vibración mientras revisa el funcionamiento de la transmisión protegida. Inspeccione la protección del sistema de transmisión para ver si está desajustada o dañada, si hay rozamiento con los elementos de transmisión. Gire la transmisión manualmente para verificar el correcto guiado de la correa

La fabricación de una nueva pieza, en caso de ser necesario, debe cumplir con los ajustes de tolerancia contemplados en los planos de fabricación y debe ser mecanizada en un centro de mecanizado de precisión con el fin que las dimensiones estén dentro las especificaciones de diseño.

En el desarrollo del proyecto de grado, el tipo de mantenimiento que se tuvo en cuenta para este sistema de validación es de tipo preventivo. Sin embargo se considera necesario realizar un estudio correctivo, para conservar la maquina en un rango permisible de condiciones y especificaciones de funcionamiento.

Haga el chequeo del ruido de los cojinetes durante el funcionamiento. En caso requerido, proceda al recambio de los cojinetes.

- **Limpieza:** Se recomienda mantener todos los componentes de los sistemas completamente limpios y libres de polvo, grasa o residuos, porque éstos pueden hacer que la sincronía del sistema se desajuste o dañe, y por consiguiente ocasionar algún daño en alguno de los elementos que forman el sistema.
- **Ajuste:** Es indispensable Chequear el ajuste de todos los tornillos de la estructura mecánica que se han desajustado debido a la operación o vibraciones del sistema. De ser necesario realizar un apriete severo.

Verifique también la alineación, montaje y ajuste de la polea motriz y la impulsada a los ejes de rotación de las estructuras y al eje del motor.

- **Lubricación:** Los componentes que necesitan algún tipo de lubricación son los rodamientos axiales a bolas, para disminuir la fricción, mejorar su funcionamiento y tiempo de vida, es necesario periódicamente limpiar y lubricar con grasa blanca las jaulas de estos rodamientos para eliminar cualquier suciedad presente y se recomienda revisar las piezas de los separadores del eje Pitch y

lubricarlas con algún aceite (posiblemente aceite 3 en 1). A demás se recomienda un chequeo mensual de la lubricación. Los rodamientos radiales son de bajo mantenimiento. El sistema de validación tipo Gimbal cuenta con pocos puntos de lubricación por lo tanto este no es un tema de mucho interés en el equipo. En la tabla 1 se contempla el cronograma de mantenimiento preventivo para el sistema de validación tipo Gimbal.

Tabla 48. Cronograma de mantenimiento preventivo

COMPONENTES	MENSUAL	SEMESTRAL	ANUAL	CUANDO SE NECESITE
MOTORREDUCTOR				
1. Revisar ruido	X			
2. Revisar Calentamiento	X			
3. Revisar los pernos de sujeción del motor	X			
4. Revisar cables y conexiones eléctricas		X		
5. Revisar que no haya rozamiento del rotor del motor con las estructuras Gimbal	X			
POLEAS Y CORREA				
1. Comprobar tensión y condición de la correa	X			
2. Cambiar correa				X
3. Revisar alineación	X			
4. Revisión de suciedad y limpieza	X			
ESTRUCTURAS GIMBAL				
1. Controlar ajuste exterior de soportes, tuercas, tornillos, etc.	X			
2. Efectuar limpieza integral externa de los componentes mecánicos		X		X
3. Verificar estado de rodamientos radiales			X	
4. Cambiar rodamiento				X
5. Verificar ruidos presentes en rodamientos axiales de Gimbal Yaw y Gimbal Roll	X			
6. Lubricar rodamientos axiales	X			
7. Corroborar alineación y balanceo del plato giratorio		X		
8. Corroborar alineación y balanceo de la estructura en U intermedio(Gimbal Pitch)		X		
9. Corroborar alineación y balanceo de la estructura en U externa(Gimbal Yaw)		X		
10. Detectar ruidos y holguras, colaborando en su identificación de la causa y corrección.		X		
11. Verificar acoplamientos, juego de rodamientos y todo tipo de fijaciones y ejes de transmisión.		X		
SISTEMA ELECTRICO Y ELECTRONICO				
1. Limpieza. De tarjetas electrónicas		X		
2. Revisión de conexiones electrónicas		X		

Anexo K. Rutinas de calibración de la unidad de medición inercial IMU en Gimbal.



Rutinas de calibración de la Unidad de Medición Inercial IMU en Gimbal

Corporación para la Investigación de la Corrosión

Laboratorio de Electrónica

Grupo de Análisis de Fenómenos y Datos

Piedecuesta - Agosto de 2014

Índice general

1. Rutinas de Calibración	4
1.1. Rutinas	4
1.1.1. Posicionamiento Inicial	4
1.1.2. Giro a velocidad constante	5
1.1.3. Giro a velocidad variable	5
1.1.4. Giro de dos ejes a velocidad constante	6
1.1.5. Giro de dos ejes a velocidad variable	6
1.1.6. Giro de dos ejes cada uno con distintas variaciones de velocidad angular	7
1.1.7. Observaciones	7

Índice de figuras

1.1. Censado de Acelerometro	5
1.2. Giroscopio en un eje (Roll)	5
1.3. resultado aproximado de sensado de velocidad en cada eje	6
1.4. ejemplo de censado de dos ejes de giro	6

Capítulo 1

Rutinas de Calibración

Objetivos

General

- Caracterizar y calibrar con precisión todas las variables de sensado de una unidad de medición inercial IMU.

Específicos

- Establecer el posicionamiento inicial de la herramienta mediante el sensado de la gravedad por medio de los acelerómetros.
- Evaluar giro en un único eje a velocidad angular constante, para cada uno de los ejes.
- Evaluar el giro de un solo eje a diferentes velocidades angulares de rotación.
- Evaluar los giroscopios de distintos ejes de manera simultanea a velocidades constantes.
- Evaluar los giroscopios de distintos ejes de manera simultanea a velocidades variables.

1.1. Rutinas

Las rutinas planteadas deben dar cumplimiento a la caracterización, validación y propender por la calibración, principalmente del sensado de velocidad angular de la unidad de medición inercial (IMU), así mismo también debe permitir establecer un estimado de la calidad en la medición de aceleraciones y campos magnéticos. Con un adecuado posicionamiento inicial tanto de los ejes físicos del Gimbal con de la unidad de medición inercial, se puede tener un método de comprobación y respaldo a las mediciones, la fiabilidad de estas señales es muy alta debido a que provienen de una fuente natural como lo es el campo magnético o la gravedad, la precisión del resultado está definido por la sensibilidad y tipo de exactitud de unidad de medición inercial.

1.1.1. Posicionamiento Inicial

El posicionamiento inicial es importante porque permitirá ubicar posiciones específicas estándar de todos los sensores, para los giroscopios debido a que ellos registran velocidad angular, en cualquier posición inicial sus valores serán cero, los acelerómetros debido a que censan las fuerzas debidas a una masa (aceleraciones relativas) registran la gravedad, así que los valores deberán ser $[0 \ 0 \ 1]$, los magnetómetros censarán el campo magnético terrestre, con las aceleraciones y esta medición es posible calcular el ángulo azimuth, o el equivalente a una brújula, esto hace posible probar ejes individuales de todos los tipos de sensado.

Si el eje de rotación es perpendicular a la superficie terrestre, el ángulo azimuth calculado con los acelerómetros y giroscopios entregará un estimado de la posición angular que permitirá contrastar resultados. Si el eje de rotación es paralelo a la superficie terrestre y el posicionamiento inicial es correcto, el valor de sensado en los ejes perpendiculares al eje de giro del acelerómetro permitirán estimar la cantidad de vueltas o posición final de la rutina ejecutada. Estas dos posibilidades de contrastar la medición se ilustran en la figura 1.2

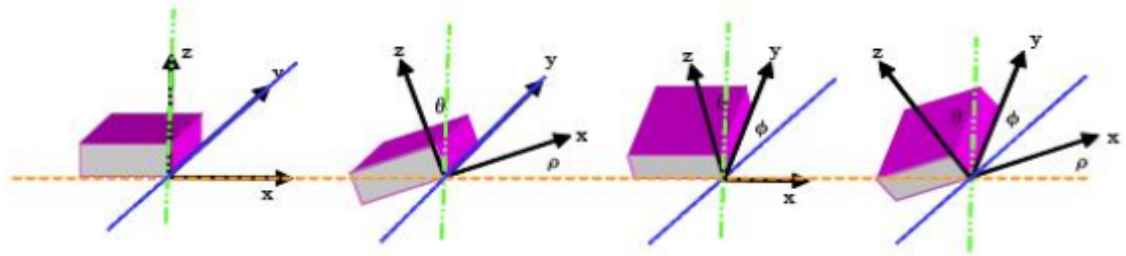


Figura 1.1: Censado de Acelerometro

1.1.2. Giro a velocidad constante

En esta rutina, el objetivo principal es generar un movimiento a velocidad constante, el censado deberá visualizarse como un valor constante y corresponder a valor de velocidad establecido en la configuración del gimbal, si el eje de rotación es perpendicular a la superficie de la tierra y el eje x inicia apuntando al norte (resultado que idealmente se obtendría de el posicionamiento inicial), la integral de esta señal debe coincidir con el numero de giros registrados por el ángulo azimuth, para este caso entre mayor sea el tiempo de giro, mejor se podrá determinar el error por unidad de tiempo del giroscopio. Este procedimiento se debe practicar a cada uno de los ejes de giro que posee la unidad de medición inercial.

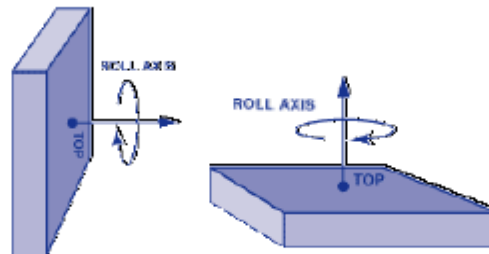


Figura 1.2: Gyroscopio en un eje (Roll)

Para cualquiera de las posiciones de censado de velocidad angular en un eje el resultado debe ser como el de la figura 1.3 , es decir un valor constante de velocidad angular y los otros dos ejes valores de velocidad en cero, esto valida la correcta alineación entre la unidad de medición inercial y el sistema mecánico de movimiento si la alineación inicial es correcta.

1.1.3. Giro a velocidad variable

Esta rutina pretende variar la velocidad angular de un único eje de una manera controlada y establecida previamente por el usuario, la magnitud de la velocidad debe tener cambios lentos y rápidos para registrar el comportamiento y estabilidad de la medición a diferentes variaciones de frecuencia de la señal de entrada. Este censado también puede ser apoyado por señales naturales si el sistema está correctamente posicionado al iniciar. Este procedimiento se debe practicar a cada uno de los ejes de giro que posee la unidad de medición inercial.

En la figura 1.4 se muestra un ejemplo de dos posibles posiciones de giro que se probarían con esta rutina. Para este caso en específico si se tiene toda la alineación inicial correcta, el acelerometro del eje y z pueden corroborar la medición de giro del eje x, y mediante los magnetometros, es decir con el ángulo azimuth se puede comparar el giro del eje z.

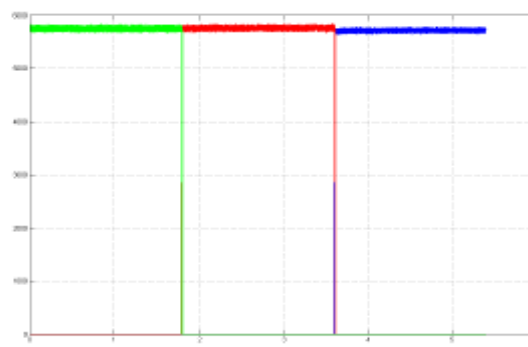


Figura 1.3: resultado aproximado de sensado de velocidad en cada eje

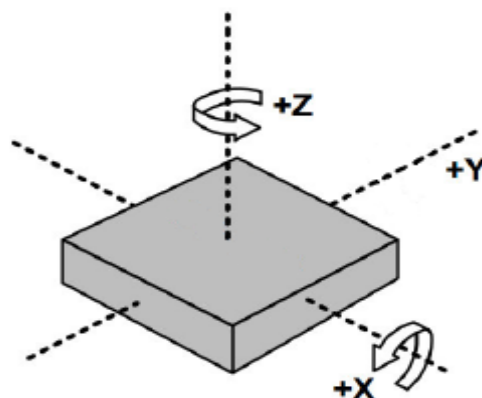


Figura 1.4: ejemplo de sensado de dos ejes de giro

1.1.4. Giro de dos ejes a velocidad constante

En esta prueba el objetivo es generar un movimiento a velocidad constante en dos de los ejes de sensado, la señal deberá visualizarse como un valor constante y corresponder a un valor de velocidad establecido en la configuración del gimbal. Para este caso cada eje puede validarse con las señales físicas sensadas si un eje de giro es perpendicular a la superficie terrestre y otro paralelo a ella. Este procedimiento se debe practicar a cada uno de los ejes de giro que posee la unidad de medición inercial. Para la comprobación mediante el sensado de señales físicas, no se puede realizar de forma directa debido a el constante cambio de referencia entre los dos ejes que se estén probando

1.1.5. Giro de dos ejes a velocidad variable

En esta rutina se requiere variar la velocidad angular de un par de ejes de una manera controlada enviando la misma señal de cambio a los dos ejes, o asegurándose de que la velocidad y sus cambios sean físicamente iguales en cada eje, la velocidad debe cambiar a diferentes frecuencias permitiendo analizar la respuesta de la unidad de medición inercial ante los diferentes cambios de velocidad y permitir encontrar si influyen entre si el hecho que

se muevan dos ejes a la vez, debido a que la naturaleza de los sensores es censar mediante patrones de vibración (MEMS).

1.1.6. Giro de dos ejes cada uno con distintas variaciones de velocidad angular

Esta prueba es similar a la prueba de censar dos giroscopios con distintas variaciones de velocidad pero en este caso los cambios de velocidad serán diferentes para cada eje, de diferentes valores y con cambios en distintos momentos. En esta prueba se comprobarán los resultados de las pruebas iniciales con los de esta prueba, garantizando que no hayan efectos que alteren la medición, por este hecho solo es necesario hacerlo en un par de ejes.

1.1.7. Observaciones

- ver si hay la manera de medir la alineación mecánica del sistema con la de los ejes de la IMU (por encoders o algo así)
- las señales en las pruebas de dos ejes, deberán enviarse al mismo tiempo o garantizar que las velocidades sean las mismas (debido a que cada eje mecánico ofrecerá diferentes pares inerciales y diferentes potencias para mover los ejes a la misma velocidad), para que idealmente las gráficas estén superpuestas o evidenciar diferentes forma de respuesta del sistema
- al estar el sistema completo se deberá hacer una estimación de la clase de exactitud de la herramienta, esto junto con las características teóricas de la unidad de medición inercial, se estimará cual tiene mayor precisión y por ende será considerado el teórico.

link imagenes acelerometro <http://www.geekmonprojects.com/gyroscopes-and-accelerometers-on-a-chip/> link imagenes gyro <http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/37-03/gyro.html> link imagen gyro dos ejes <https://learn.sparkfun.com/tutorials/gyroscope>