#### RAE

- 1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO MECATRÓNICO
- 2. TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA ORIENTACIÓN DE UNA ANTENA BUSCANDO EL SEGUIMIENTO VISUAL Y LA TRAYECTORIA DE UN SISTEMA AÉREO NO TRIPULADO EN TIEMPO REAL
- 3. AUTOR(ES): JULIÁN CAMILO GIL VARGAS Y JUAN DAVID SINISTERRA BUTNARU
- 4. LUGAR: Bogotá D.C
- 5. FECHA: ENERO DE 2016
- 6. **PALABRAS CLAVES:** UAV, Antena RASPY 1, Movimiento Horizontal, Movimiento Vertical, HAVERSINE, CONTROL.
- 7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO: Diseñar y construir un sistema para el seguimiento de la trayectoria de UAV(UNMANNED AERIAL VEHICLE), todo el compendio de diseño mecánico, análisis de velocidades, aceleraciones y fuerzas presentes, así como el control para la ubicación de la antena en el ángulo horizontal y vertical.
- 8. **LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Línea de investigación de la USB: Diseño de sistemas de control.
- METODOLOGÍA: Es de carácter empírico-analítico, con un enfoque metodológico con base en el estudio y diseño de un sistema para el seguimiento de un UAV
- 10. CONCLUSIONES: El seguimiento automático del UAV es complejo debido al costo que conlleva obtener equipos de comunicación y obtención de datos precisos para las referencias del controlador del sistema a corta distancia, el error generado por los dispositivos implementados actualmente a cortas distancias complica la obtención de estas referencias.

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA ORIENTACIÓN DE UNA ANTENA BUSCANDO EL SEGUIMIENTO VISUAL Y LA TRAYECTORIA DE UN SISTEMA AÉREO NO TRIPULADO EN TIEMPO REAL.

JULIÁN CAMILO GIL VARGAS JUAN DAVID SINISTERRA BUTNARU

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA SEDE BOGOTÁ FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA MECATRÓNICA BOGOTÁ 2016

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA ORIENTACIÓN DE UNA ANTENA BUSCANDO EL SEGUIMIENTO VISUAL Y LA TRAYECTORIA DE UN SISTEMA AÉREO NO TRIPULADO EN TIEMPO REAL.

## JULIÁN CAMILO GIL VARGAS JUAN DAVID SINISTERRA BUTNARU

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

YALILY VARGAS ÁVILA INGENIERA MECÁNICA – MSC AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA SEDE BOGOTÁ FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA MECATRÓNICA BOGOTÁ 2016

Nota de Aceptación		
	-	
Presidente del Jurado	-	
	_	
Jurado		
	_	
Jurado		

Bogotá, Enero 2016

Dedicamos este proyecto a todos los estudiantes de ingeniería que creen que los límites de la creación solo están en su imaginación.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Dedicamos este proyecto, en primer lugar, a Dios por estar siempre con nosotros en este camino y dándonos la posibilidad de cumplir con esta meta en nuestras vidas.

A nuestra familia por apoyarnos y acompañarnos por las diferentes adversidades que tuvimos en el desarrollo y culminación del proyecto de vida. Gracias a ellos tuvimos el privilegio de estudiar Ingeniería Mecatrónica en una universidad como la San Buenaventura. El apoyo incondicional y acompañamiento sin igual es el que no podremos olvidar. Siempre estarán presentes cuando se nos cruce por el pensamiento este logro.

A amigos y compañeros de estudio que compartieron dificultades como las nuestras y colaboraron para salir en grupo victoriosos de estas.

A personas como el Estudiante Quetdrein Ruiz Cifuentes, el Ingeniero Julián David Sinisterra, el Ingeniero Eusebio Mercado, el Ingeniero Pedro Jiménez y demás colaboradores intelectuales que aportaron con una formación o ayuda en el momento oportuno.

A nuestra tutora, la Ingeniera Yalily Vargas Ávila, por su acompañamiento académico y guía en el desarrollo del proyecto.

A nuestro director de programa, el Ingeniero Alfonso Duque, que estuvo pendiente de la obtención de la idea a desarrollar y colaboró constantemente para poder enfocar el proyecto de forma adecuada.

A los desarrolladores del Raspberry Pi, Arduino, Ardupilot, Fritzing por compartir sus licencias gratuitas para el uso de software y dispositivos en el proyecto.

# **TABLA DE CONTENIDO**

RE	ESUMEN	17
1.	INTRODUCCIÓN	18
2.	OBJETIVOS	19
2	2.1 OBJETIVO GENERAL	19
2	2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
4.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	20
5.	JUSTIFICACIÓN	21
6.	MARCO TEÓRICO	22
7.	MATERIALES Y MÉTODOS	26
-	7.1 MATERIALES	26
-	7.2 METODOLOGÍA	27
	7.2.1 Enfoque de la investigación	29
	7.2.2 Línea de investigación	29
8.	DISEÑO MECÁNICO	31
8	8.1 Diseño mecánico del sistema	31
	8.1.1 Cálculo de velocidades y aceleraciones angulares	32
	8.1.2 Cálculo de la velocidad y aceleración angular que debe tene movimiento horizontal de la "Antena Raspy 1" a altura y velocidad crud del UAV	cero
	8.1.3 Cálculo de la velocidad Angular que debe tener el movimie horizontal de la "Antena Raspy 1" en su aterrizaje	
	8.1.4 Conclusión de velocidad angular horizontal	41
	8.1.5 Cálculo de la velocidad y aceleración angular que debe tene movimiento vertical de la "Antena Raspy 1" a altura y velocidad cruo	cero
	8.1.6 Cálculo de la velocidad y aceleración angular que debe tene movimiento vertical de la "Antena Raspy 1" a altura y velocidad aterrizaje	r el I de
	8.1.7 Conclusión de aceleración y velocidad angular vertical	50

8.1.8 Dimensionamiento del mecanismo para el giro vertical	51
8.1.9 Cálculo de velocidades	54
8.1.10 Cálculo de aceleraciones	56
8.1.11 Momentos de Inercia en las Barras	60
8.1.11.1 Eslabones 2 y 4 (65 mm)	60
8.1.11.2 Eslabón 3 (103mm)	61
8.1.12 Análisis de fuerzas en el mecanismo	61
8.1.12.1 Análisis Eslabón 4	64
8.1.12.2 Análisis Eslabón 3	66
8.1.12.3 Análisis Eslabón 2	67
8.2 Selección del motor para el giro vertical	69
8.3 Descripción y cálculo de las piezas del mecanismo	70
8.3.1 Explosionado mecanismo de 4 barras	71
8.3.1.1 Acople Brazos y eje antena	71
8.3.1.2 Acople brazos y eje motor	74
8.3.1.3 Brazo eje dynamixel	75
8.3.1.4 Brazo eje antena	76
8.3.1.5 Brazo intermedio	77
8.3.1.6 Eje Mecanismo 4 Barras	78
8.3.2 Explosionado ensamble Superior	79
8.3.2.1 Base Superior	81
8.3.2.2 Base Barra Antena y Base antena frenos	81
8.3.2.3 Eje Antena	82
8.3.2.4 Base eje giro motor	83
8.3.2.5 Eje motor Vertical	84
8.3.2.6 Buje eje Servomotor	84
8.3.2.7 Bloque de Contrapeso	85
8.3.2.8 Base Brújula	87
8.3.2.9 Soporte Acelerómetro	87
8.3.2.10 Soporte Base Brújula	87

	8.3.2.11 Placa Superior Soporte Antena	88
	8.3.2.12 Placa Inferior Soporte Antena	88
	8.3.2.13 Acople Eje Dynamixel	89
	8.3.2.14 Freno Mecánico Superior	90
	8.3.2.15 Freno Mecánico Inferior	90
	8.3.3 Explosionado ensamble inferior	93
	8.3.3.1 Acople Motor Horizontal a Base Superior	94
	8.3.3.2 Platina soporte Motor Horizontal	95
	8.3.3.3 Rodachina	95
	8.3.3.4 Platina Base motor Horizontal	99
	8.3.3.5 Soporte inferior vertical	99
	8.3.3.6 Platina Base unión Trípode	105
	8.4 Piezas sin requerimiento de cálculo por resistencia	106
	8.5 Cálculo y selección del motor para el movimiento en el plano hori	
•	. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DEL ANTENA RASPY	
	9.1 Diseño y Obtención del Controlador para el movimiento del siste el plano horizontal.	
	9.1.1 Tiempo de establecimiento del Controlador	112
	9.1.2 Tiempo pico del Sistema	113
	9.1.3 Identificación de la planta	113
	9.1.4 Método de Jury	115
	9.1.5 Diseño de un compensador por el método de la bisectriz	122
	9.1.6 Diseño de controlador PI	125
	9.1.7 Diseño de control PID	129
	9.2 Controlador para el movimiento del sistema en el plano vertical	133
	9.2.1 Librería arduino con Dynamixel ax-12	133
	9.3 Obtención de los ángulos de referencias	134
	9.3.1 Obtención del Ángulo de referencia en el Plano Horizontal	134
	9.3.2 Obtención del Ángulo de referencia en el Plano Vertical	137

9.4	4 Diagramas de bloque del sistema de control	138
10.	ADECUACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DEL ANTENA F	<b>RASPY</b> .139
10	.1 Corriente entregada por el Regulador Ireguladorvoltaje	140
10	.2 Corriente consumida por el puente H	141
10	.3 Corriente Consumida por el Dynamixel	141
10	.4 Corriente Consumida por el 74ls241	142
10	.5 Corriente Consumida por la Raspberry Pi B+	142
10	.6 Caracterización de la programación y niveles de control	145
10	.7 Prueba y demostración	146
10	.8 Código y programación:	146
10	.9 Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema	147
11.	CONCLUSIONES	147
12.	RECOMENDACIONES	149
13.	BIBLIOGRAFÍA	150

# **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Materiales de Construcción del mecanismo de la "Antena Raspy 1"	26
Tabla 2. Software utilizado en el proyecto	26
Tabla 3. Especificaciones de la Antena Parabólica TDJ - 5158SPL4	
Tabla 4. Variables de las Ilustraciones 10 y 11	32
Tabla 5. Rangos de variación en la velocidad angular horizontal a altura y veloc	idad
crucero	37
Tabla 6. Rangos de variación en la velocidad angular horizontal a altura y veloc	idad
de aterrizaje	40
Tabla 7. Variables de la Ilustración 16 y 17	42
Tabla 8. Rangos de variación en la velocidad angular vertical a altura y veloc	
crucero	
Tabla 9. Rangos de variación en la velocidad angular vertical a altura y velocida	
aterrizaje	
Tabla 10. Variables Ecuación de Kutzbach	52
Tabla 11. Centros instantáneos del mecanismo de 4 barras (Ver Anexo	F e
Ilustración 35).	53
Tabla 12. Propiedades brazos mecanismo 4 barras	60
Tabla 13. Dimensiones y constantes dinámicas de cada eslabón del mecanis	smo.
Tabla 14. Matriz de reacciones y torques para cálculo de potencia requerida e	en e
motor	68
Tabla 15. Matriz de reacciones en Matlab.	69
Tabla 16. Características del servo motor seleccionado	70
Tabla 17. Tabla de componentes	71
Tabla 18. Cálculo de Tornillos de Sujeción	72
Tabla 19. Lista de piezas explosionado ensamble superior	80
Tabla 20. Lista de piezas explosionado ensamble inferior	93
Tabla 21. Cálculo de tornillos de sujeción	97
Tabla 22. Valor de K para distintos tipos de conexión con los extremos	.102
Tabla 23. Cálculo de tornillos de sujeción	.104
Tabla 24. Explicación de no Cálculo por resistencia piezas Ilustración 34	.106
Tabla 25. Explicación de no cálculo por resistencia piezas ilustración 41	.107
Tabla 26. Explicación de no cálculo por resistencia piezas ilustración 57	.109
Tabla 27. Comparación de controladores calculados	.131
Tabla 28. Elementos usados en el circuito de la antena raspy	.140

# **LISTA DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1. Antena Raspy 1 Autores2
Ilustración 2. Marcus UAV tracking antenna system[9]2
Ilustración 3. Basic tracking antenna system 2. [6]2
Ilustración 4. GTRACK tracking antenna 1. [5]2
Ilustración 5. Marcus UAV médium tracking ant 1. [9]2
Ilustración 6. Tracking antenna system 1.[7]2
Ilustración 7. UAV Tracking device 1.[10]2
Ilustración 8. Diagrama de Flujo de la Metodología2
Ilustración 9. Ensamble general del sistema3
Ilustración 10. Esquema de movimiento del avión respecto a la Antena Raspy 1 e
altura y velocidad crucero - Vista superior3
Ilustración 11. Esquema empleado para el cálculo de la velocidad tangencial del gir
horizontal de la Antena Raspy 13
Ilustración 12. Cálculo de la velocidad angular de giro horizontal en revoluciones po
minuto de la "Antena Raspy 1" a velocidad crucero3
Ilustración 13. Esquema de movimiento del avión respecto a la Antena Raspy 1 e
el aterrizaje - Vista superior3
Ilustración 14. Cálculo de la velocidad angular de giro horizontal en revoluciones po
minuto de la Antena Raspy 1 en el aterrizaje3
Ilustración 15. Esquema de movimiento del avión respecto a la Antena Raspy 1
altura y velocidad crucero al máximo alcance de envío y recepción de datos de la
antena - Vista lateral4
Ilustración 16. Esquema de movimiento del avión respecto a la "Antena Raspy 1"
altura y velocidad crucero a la mitad de alcance de envío y recepción de datos de l
antena - Vista lateral4
Ilustración 17. Esquema geométrico de las velocidades que actúan sobre el sistema
4. A Cálada da la calacidad a manda da cina contra la calacidad a contra da cina contra la calacidad a contra da cina cina contra da cina cina cina cina cina cina cina cin
Ilustración 18. Cálculo de la velocidad angular de giro vertical en revoluciones por
minuto de la Antena Raspy 1 a velocidad crucero
Illustración 19. Esquema de movimiento del avión respecto a la "Antena Raspy 1" a
máximo ángulo al que ésta puede girar de forma vertical - Vista lateral4
Illustración 20. Esquema de movimiento del avión respecto a la Antena Raspy 1 altura y volcoidad erusoro al mévimo alcaneo de envío y reconsión de dates de la
altura y velocidad crucero al máximo alcance de envío y recepción de datos de la antena - Vista lateral4
Ilustración 21. Cálculo de la velocidad angular de giro vertical en revoluciones po
minuto de la Antena Raspy 1 a altura y velocidad de aterrizaje4
THINIQUO GO IA ATRICHA INASPY I A ARGIARA Y VOLUCIUAU UD ALCHIZAJO

Ilustración 22. Mecanismo de 4 barras utilizado para el giro vertical de la "A	Antena
Raspy 1" (cotas en mm)	51
llustración 23. Teorema de Kennedy aplicado al cálculo de los centros instan	táneos
secundarios del mecanismo de la ilustración 22	53
Ilustración 24. Eslabonamiento con juntas completas y la ubicación de los o	centros
instantáneos	54
Ilustración 25. Mecanismo de 4 barras utilizado para el giro vertical de la "A	Antena
Raspy 1"	60
Ilustración 26. Dimensiones de eslabones 2 y 4	60
Ilustración 27. Dimensiones de Eslabón 3	61
Ilustración 28. Eslabonamiento con juntas completas y la ubicación de los o	centros
instantáneos	61
Ilustración 29. Esquemático de fuerzas del mecanismo de 3 barras	62
Ilustración 30. Diagrama de cuerpo libre eslabón 4	64
Ilustración 31. Diagrama de cuerpo libre eslabón 3	66
Ilustración 32. Diagrama de Cuerpo Libre Eslabón 2	67
Ilustración 33. Dynamixel AX-12	70
Ilustración 34. Explosionado mecanismo de 4 barras	71
Ilustración 35. Vista Isométrica Acople Brazos y eje antena	71
Ilustración 36. Vista Isométrica Acople brazos y eje motor	74
Ilustración 37. Vista Isométrica Barra eje dynamixel	75
Ilustración 38. Vista Isométrica Barra eje antena	76
Ilustración 39. Vista Isométrica Barra intermedia	77
Ilustración 40. Vista Isométrica Eje Barras	78
Ilustración 41. Explosionado Parte Superior	79
Ilustración 42. Vista Isométrica Base Superior	81
Ilustración 43. Vista Isométrica Base Barra antena	81
Ilustración 44. Vista Isométrica eje antena	82
Ilustración 45. Vista Isométrica Base eje giro motor	83
Ilustración 46. Vista Isométrica Eje motor Vertical	84
Ilustración 47. Vista Isométrica Buje eje servomotor	84
Ilustración 48. Vista Isométrica Bloque de contrapeso	85
Ilustración 49. Vista Isométrica Base Brújula	87
Ilustración 50. Vista Isométrica Soporte Acelerómetro	87
Ilustración 51. Vista Isométrica Soporte Base Brujula	87
Ilustración 52. Vista Isométrica Placa Superior Soporte Antena	88
Ilustración 53. Vista Isométrica Placa inferior soporte antena	88
Ilustración 54. Vista Isométrica Acople Eje Dynamixel	89
Ilustración 55. Vista Isométrica Freno Mecánico Superior	90

Ilustración 56. Vista Isométrica Freno Mecánico Inferior	90
Ilustración 57. Explosionado ensamble inferior	93
Ilustración 58. Vista Isométrica Acople motor horizontal a Base Superior	94
Ilustración 59. Vista Isométrica Platina soporte motor horizontal	95
Ilustración 60. Vista isométrica de Rodachina	95
Ilustración 61. Resistencia a la rodadura	
Ilustración 62. Vista Isométrica Platina base motor Horizontal	99
Ilustración 63. Vista Isométrica Platina Soporte Sistema Vertical	99
Ilustración 64. Vista Isométrica Platina Base unión Trípode	105
Ilustración 65. Vista superior de mecanismo de giro horizontal	109
Ilustración 66. Diagrama de Bloques Sistema con Compensador Proporcion	al118
Ilustración 67. Función de transferencia del sistema con Kp en lazo abierto	119
Ilustración 68. Diagrama de Bloques Sistema con compensador por el métod	de la
Bisectriz.	
Ilustración 69. Diagrama de Bloques Sistema con Controlador PI	127
Ilustración 70. Diagrama de Bloques Sistema Con controlador PID	
Ilustración 71. Triángulo esférico	
Ilustración 72. Antena enfocada hacia el norte	137
Ilustración 73. Cálculo del Ángulo en el plano vertical	
Ilustración 74. Esquema de Funcionamiento de Control	139
Ilustración 75. Circuito de entrada de potencia y regulación a 9V	143
Ilustración 76. Circuito de elevación de pulso para el dato de entrada de	I motor
Dynamixel AX-12	143
Ilustración 77. Circuito del JY-MCU utilizado para la comunicación por Blueto	oth con
Android	143
Ilustración 78. Circuito de potencia para el Motor DC de 12V usado para	el giro
horizontal de la Antena Raspy 1	
Ilustración 79. Conexión del GPS Quectel L26	144
Ilustración 80. Conexión del Bus de Datos para la Antena Raspy 1	144
Ilustración 81. Conexión del Arduino Mega 2560	145

#### LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Tablas

Anexo B. Explosionados y pasos de ensamblaje del sistema mecánico

Anexo C. Diagramas de bloques en Simulink

Anexo D. Documentación de especificaciones para componentes electrónicos. (Dynamixel, módulo GPS, etc.). Ver en DVD Anexo.

ANEXO E. Documentación de especificaciones para componentes mecánicos. (Rodamientos, materiales). Ver en DVD Anexo.

ANEXO F. Método gráfico para el cálculo de velocidades y aceleraciones del mecanismo de 4 barras, Diagrama de bloques de funcionamiento general del sistema.

ANEXO G. Licencia Solid Edge ST8 Estudiante.

#### **GLOSARIO**

UAV: Unmanned Aircraft Vehicle, por sus siglas en inglés, es un vehículo aéreo no tripulado destinado a vuelos, muy comúnmente, en piloto automático.

M.R.U: Un cuerpo realiza un movimiento rectilíneo uniforme o m.r.u, cuando su trayectoria es una línea recta y su velocidad es constante. Esto implica que recorre distancias iguales en tiempos iguales.

NMEA: La National Marine Electronics Association(NMEA) es una organización de comercio electrónico estadounidense que establece estándares de comunicación entre electrónica marina, se pueden encontrar estándares tales como: NMEA 0183, NMEA 2000). NMEA 0183 es un medio a través del cual los instrumentos marítimos y también la mayoría de los receptores GPS pueden comunicarse los unos con los otros. Ha sido definido, y está controlado por la organización NMEA(National Marine Electronics Association.

#### **RESUMEN**

En este documento se buscó como ubicar en línea de visión un UAV en vuelo desde una antena unidireccional ubicada en la superficie terrestre. Inicialmente se planteó un modelo matemático que busca conocer cómo debe ser la dinámica de la antena, la potencia de giro vertical y horizontal para alcanzar a enfocar el UAV en condiciones limites (proporcionadas por el semillero Aerotech de la universidad) de velocidad y/o de distancia. Conocidas estas variables se procedió a calcular los motores respectivos para cada giro (vertical según la altura del UAV y horizontal basado en la posición GPS del mismo).

Apoyados en la teoría de Haversine para la geolocalización del avión respecto a la antena para el cálculo de la distancia lineal y el ángulo de giro respecto al norte terrestre entre el UAV y la antena.

Conocidas las variables de entrada y salida, se podrá detallar cómo se desarrollaron varios tipos de controladores para encontrar el más adecuado a los requerimientos del sistema.

PALABRAS CLAVE: UAV, Antena Raspy 1, Movimiento Horizontal, Movimiento Vertical, Haversine, Control.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se pueden encontrar varias opciones para sistemas de seguimiento con antenas, no solo destinados a seguir UAV. La cantidad de aplicaciones van desde lo militar hasta el campo de las telecomunicaciones y las soluciones desarrolladas para dar tratamiento a estás temáticas han permitido obtener un seguimiento más preciso de la aplicación que se esté trabajando.

Con este proyecto se pretende resolver un problema de comunicación entre un UAV y un ordenador que captura la señal y los datos proporcionados por la aeronave. Basados en esta información se hacen los respectivos estudios de telemetría. El mayor problema que se presenta con las antenas omnidireccionales es el limitado rango de recepción de datos que tienen, es decir, su alcance se reduce a unos pocos kilómetros por lo cual el seguimiento del UAV se vuelve complicado. Por el contrario, las antenas unidireccionales presentan una ventaja dado que tiene un rango de alcance mucho mayor, esto permite obtener la información proporcionada por el UAV a mayores distancias. Hay que tener en cuenta que al ser unidireccionales es necesario realizar un enfoque en la línea de visión de a antena, permanente hacia el UAV para evitar perdida de datos durante el seguimiento.

Dada la necesidad que se presenta actualmente en el semillero AEROTECH de la universidad de San Buenaventura, se plantea diseñar e implementar un sistema de orientación automático de una antena unidireccional para el seguimiento de los sistemas aéreos no tripulados con los que trabajan.

#### 2. OBJETIVOS

#### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sistema automático para la orientación de una antena buscando el seguimiento visual de la trayectoria de un UAV en tiempo real.

## 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un mecanismo, con su respectivo control, para el movimiento de la antena de forma gradual en el ángulo de inclinación β (Vertical respecto al plano terrestre) como el ángulo de rotación α (Horizontal respecto al norte terrestre).
- Diseñar e implementar una interfaz de comunicación con el usuario que muestre datos relevantes del seguimiento de la trayectoria del UAV tales como posición, elevación y, además, si existe pérdida de datos, ubicar el avión a partir de la predicción de su posición actual.

#### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Partiendo de la necesidad planteada en el punto anterior se propone la siguiente pregunta de investigación.

¿Cómo hacer un uso adecuado de la teoría de control para implementar un sistema preciso y automático para el seguimiento visual de la trayectoria de un sistema aéreo no tripulado?

### 4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las herramientas actuales con las que se cuentan para el seguimiento del aeromodelo en el semillero se limitan a una antena multidireccional con un receptor con el cual se recogen los datos enviados por el aeromodelo. Ya que la antena actual tiene un rango de recepción de 4 Km, no siempre captará la información enviada por el aeromodelo a distancias mayores (Aproximadamente 20 Km). Esto implica pérdida de comunicación debido a su corto alcance.

A partir de esto se buscó implementar una antena de mayor alcance, siendo en este caso necesario el uso de una antena unidireccional. Esto pretende graduar la dirección de la antena tanto en el ángulo de inclinación  $\beta$  (Vertical respecto al plano terrestre) como el ángulo de rotación  $\alpha$  (Horizontal respecto al norte terrestre) buscando enfocar visualmente al UAV en vuelo en tiempo real.

Esta antena está sobre una base conformada por un trípode convencional, y para su movimiento el trípode cuenta con una manija que permite graduar su rotación e inclinación, a continuación se muestra una imagen de la antena en su estado actual.



Ilustración 1. Antena Raspy 1 Autores.

## 5. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día se pueden encontrar gran cantidad de sistemas de seguimiento para sistemas aéreos no tripulados, sus especificaciones pueden variar en rango de alcance, velocidad de respuesta, precisión etc. Todos estos factores determinan también el precio que se deba pagar por ellos, dada la necesidad que se presenta en el grupo de investigación se hace complicado el adquirir uno debido su costo que oscila entre los 6000 y 8000 dólares.

Dicho lo anterior se plantea el proyecto con el fin de suplir la necesidad que se tiene en el grupo de investigación y así mismo automatizar el proceso de obtención de datos del UAV en tiempo real.

## 6. MARCO TEÓRICO

Los sistemas de seguimiento para UAV se pueden obtener de distintas empresas hoy día, para tener una mejor idea del trabajo a desarrollar, se muestra a continuación el trabajo que se ha desarrollado en esta temática.

"X/Y ANTENNA TRACKING SYSTEM ELIMINATES KEYHOLE EFFECT" es un artículo donde se detalla un sistema desarrollado para satélites ubicados en órbitas bajas y medianas alrededor de la tierra, el sistema permite hacer una observación detallada de la tierra, así como sensado remoto y telemetría, seguimiento y aplicaciones de control.

"THE MARCUS UAV. TRACKING ANTENNA SYSTEM" es un Sistema de seguimiento de UAV desarrollado por la empresa Marcus UAV INC. El sistema está diseñado para proveer los últimos avances en largo alcance, el sistema de seguimiento está diseñado para soportar grandes vientos y a su vez permite configurarse para distintos requerimientos de frecuencia.



Ilustración 2. Marcus UAV tracking antenna system[9]

"BASIC TRACKING ANTENNA SYSTEM" es un Sistema de seguimiento de UAV desarrollado por "LATITUDE, an engineering group", el sistema cuenta con 2 antenas de largo alcance capaces de incrementar el rango de vuelo de los UAV, es totalmente modular y fácilmente configurable para satisfacer las necesidades del usuario.



Ilustración 3. Basic tracking antenna system 2. [6]

"GTRACK TRACKING ANTENNA" Es un producto diseñado por UAV NAVIGATION para satisfacer las necesidades de aplicaciones demandantes en el área de UAV, El sistema está conformado por el GTRACK y el GCASE, ambos trabajan simultáneamente para proveer una comunicación rápida y portable a grandes distancias. El uso de una antena de alta ganancia permite comunicaciones en distancias cercanas a los 200 Kilómetros, El sistema de comunicación está soportado en la unidad TELEM06 desarrollada también por UAV NAVIGATION.



Ilustración 4. GTRACK tracking antenna 1. [5]

"THE MARCUS UAV. MEDIUM TRACKING ANTENNA SYSTEM" está diseñado para proveer lo último en portabilidad, calidad y eficiencia en el seguimiento y recepción de información proveniente del UAV, está antena ha demostrado la habilidad de proporcionar imágenes de video en tiempo real con una gran calidad en un rango máximo de 15 kilómetros. Haciendo uso de los datos de telemetría transmitidos desde el UAV el sistema de seguimiento apunta siempre hacia la aeronave dondequiera que esté en el cielo.



Ilustración 5. Marcus UAV médium tracking ant 1. [9]

"TRACKING ANTENNA SYSTEM" es un Sistema desarrollado por la empresa PERSISTENT SYSTEMS, en conjunto con el QUAD RADIO ROUTER el sistema provee un enlace de información digital encriptada hacia el UAV, además, transmite en tiempo real comandos de video. El sistema se compone de 3 partes, una antena parabólica de alta ganancia para alcanzar grandes distancias, un sistema motorizado para permitir una rotación de 360° en forma horizontal. De igual manera consta con un trípode fácilmente extensible y retraible para fácil transporte.



Ilustración 6. Tracking antenna system 1.[7]

"UAV TRACKING DEVICE USING 2.4GHZ Video Transmitter" fue un Proyecto de tesis desarrollado por Jonas Gustafsson y Fredrik Henriksson en la universidad tecnológica de Luleá, el propósito principal del proyecto fue seguir automáticamente un UAV con una antena dirigida electrónicamente. Se realizó todo el diseño mecánico correspondiente al sistema de posicionamiento de la antena así como el sistema de comunicación entre el UAV y el sistema de tierra.

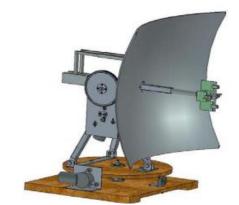


Ilustración 7. UAV Tracking device 1.[10]

# 7. MATERIALES Y MÉTODOS

## 7.1 MATERIALES

Tabla 1. Materiales de Construcción del mecanismo de la "Antena Raspy 1"

Material	Densidad g/cm3	Resistencia a la fluencia MPa	Resistencia a la Tracción MPa
Acero AISI 1020	7.87	393	469
Aluminio 2024 T4	2.78	324	469
EMPACK(acetal)	1.05	-	61
Acrílico	1.19	-	69
Acero 4.8 Tornillería	7.87	340	420
Acero 8.8 Tornillería	7.87	660	830

Tabla 2. Software utilizado en el proyecto

Software	Utilizado para:
Solid Edge ST8 Version Estudiantil	Desarrollo de piezas, planos y demás. (Licencia en Anexo 2)
Fritzing Beta V 0.9.2	Desarrollo de Esquemático de circuito y de Gerber para el desarrollo de la PCB del circuito utilizado. (Licencia gratuita)
Matlab 2013b - Simulink	Utilizado para el desarrollo de simulaciones del comportamiento del sistema y para la obtención de la función de transferencia de giro horizontal del mecanismo de la antena. (Licencia de la universidad)

#### 7.2 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto, se tuvieron en cuenta tres aspectos fundamentales para la realización del diseño y construcción mecatrónica del sistema de orientación controlado de la "Antena Raspy 1", como lo son los componentes mecánicos, electrónicos y de control para cumplir con su finalidad, proporcionando una base de resultados que permitan evaluar y establecer un funcionamiento confiable y seguro.

Para detallar el estado actual en el que se encuentra este tipo de tecnología a nivel local, se realizó un análisis de los equipos informáticos, sensores y de la forma de cómo se procesa la información del UAV en el controlador de las antenas ya existentes, además se tuvo en cuenta qué tipo de controles se han implementado y cómo es la comunicación usuario-sistema, así mismo de cómo desarrollan la interconexión de elementos entre los dispositivos de salida y entrada con los ordenadores utilizados.

Se realizó una recolección de información de características como: tamaño, peso, ubicación, asequibilidad, confiabilidad, consumo energético y diseño de cada elemento que se implementará y conformará el sistema de orientación, para de esta manera asegurar un sistema capaz de cumplir su labor.

A continuación, exponemos el diagrama de flujo seguido en todo el desarrollo de la "Antena Raspy 1":

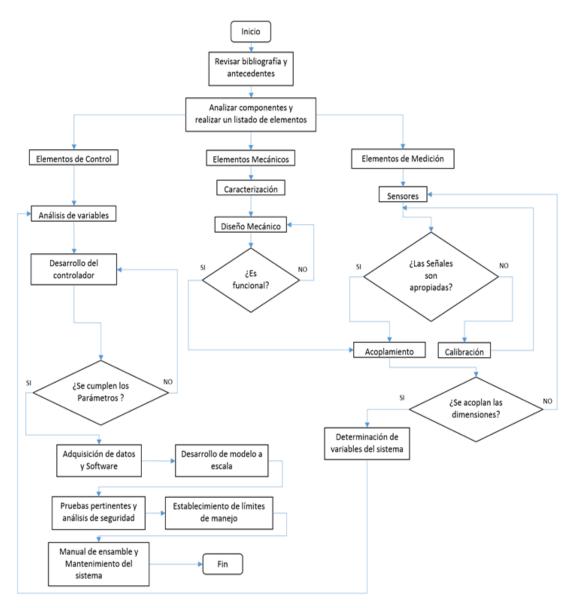


Ilustración 8. Diagrama de Flujo de la Metodología.

### 7.2.1 Enfoque de la investigación

Dentro de una de las grandes vertientes contemporáneas que orientan el trabajo científico, este estudio tiene como enfoque la investigación de tipo empírico-analítica; con una orientación metodológica al estudio y diseño detallado de un sistema domótico controlado.

### 7.2.2 Línea de investigación

Este proyecto se suscribe a la línea de investigación: Instrumentación y Control de procesos con un núcleo enfocado en Control, para los sistemas de seguimiento de UAV.

Para el diseño del sistema se parte de conocer el tipo de Antena con la que se cuenta y así mismo sus características.

Una antena es un dispositivo hecho para transmitir (radiar) y recibir ondas de radio electromagnéticas.

Hay varios tipos de antena entre los que se pueden destacar los siguientes:

- Antenas Dipolo
- Antenas Dipolo Multi-elemento
- Antenas Yaqi
- Antenas Panel Plano
- Antenas Parabólicas

El diseño se realizó para la antena Parabólica con la que contaba el semillero AEROTECH. Para conocer mejor su funcionamiento se da una breve explicación a continuación:

Las antenas parabólicas poseen ciertas características físicas que les permiten alcanzar una alta ganancia y mucha direccionalidad. Este tipo de antenas usan un plato o una grilla reflectora para enfocar las ondas de radio recibidas por la antena a un punto focal. Esto funciona para capturar la energía emitida por la antena y enfocarla en un haz estrecho al transmitir, este tipo de antenas son muy direccionales dado que concentran toda la potencia que llega a ellas y la enfocan en una sola dirección, este tipo de antena es capaz de proveer una ganancia muy alta.

Como se mencionó anteriormente, el diseño se hizo para la antena parabólica TDJ 5158SPL4 cuyas características se pueden encontrar en la siguiente tabla:

Tabla 3. Especificaciones de la Antena Parabólica TDJ - 5158SPL4

Modelo	TDJ-5158SPL4	TDJ-5158SPL6
Frequency Range-MHZ	5150-5850	
Bandwidth-MHZ	700	
Gain-dBi	23.5	26.5
Vertical Beamwidth-o	12	9
Horizontal Beamwidth-o	9	6
F/B Ratio-Db	>=20	>= 25
VSWR	<=1.5	
Impedance - Ω	50	
Polarization	Vertical or Horizontal	
Maximum Power – W	100	
Connector	N famale	
Dimensions – m	0.3 x 0.4	0.4x0.6
Weight-Kg	1.4	2.4
Mounting Mast Diameter - mm	Ø40 to 50	

Partiendo de la función unidireccional de la antena, se procede a plantear el diseño del sistema.

## 8. DISEÑO MECÁNICO

#### 8.1 Diseño mecánico del sistema

En este capítulo se detalla todo el proceso de diseño y construcción del sistema móvil de la antena. Se incluyen los cálculos mecánicos necesarios de los componentes utilizados y una explicación del funcionamiento de cada pieza y su rol en el sistema. También se realizó un análisis de aceleraciones y velocidades angulares necesarias para el enfoque visual del UAV por parte de la antena parabólica, y por último un cálculo de fuerzas que actúan en los componentes móviles los mecanismos.



Ilustración 9. Ensamble general del sistema

Un análisis correcto del sistema debe partir por conocer las velocidades y aceleraciones angulares críticas a las que deberán girar los dos mecanismos de posicionamiento de la antena en los respectivos ejes coordenados (X,Y). Conocidas estas constantes críticas se pudo determinar las fuerzas que actúan en los elementos mecánicos y datos relevantes como la potencia, el torque y las revoluciones por minuto requeridas en los motores de los mecanismos.

## 8.1.1 Cálculo de velocidades y aceleraciones angulares

$$Velocidad\ angular\ \omega=rac{d heta}{dt}$$
 Ecuación 1
$$Aceleración\ angular\ lpha=rac{d\omega}{dt}$$
 Ecuación 2

Para el cálculo de las velocidades y aceleraciones angulares, se realizó un método experimental en Simulink que se basó en la suposición de los instantes críticos a los que se verían expuestos los mecanismos de giro horizontal y de giro vertical de la "Antena Raspy 1". Cada caso es expuesto posteriormente y analizado matemáticamente, para luego realizar la simulación pertinente en Simulink y ver gráficamente el comportamiento de las velocidades y aceleraciones angulares en cada caso.

# 8.1.2 Cálculo de la velocidad y aceleración angular que debe tener el movimiento horizontal de la "Antena Raspy 1" a altura y velocidad crucero del UAV

Para el cálculo de la velocidad angular vertical se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La velocidad crucero es  $25\frac{m}{s}$  a altura máxima del UAV. Este dato se obtiene por la telemetría del aeromodelo compartida por el semillero Aerotech.
- La distancia mínima desde la antena hasta la proyección del vector dirección del avión en el suelo es de 1 metro.

Si el avión pasa a velocidad máxima sobre la antena, la velocidad angular tendería a infinito. Por efectos de cálculos, se asumió que mínimo pasará a un metro de distancia.

Tabla 4. Variables de las Ilustraciones 10 y 11.

Variable	Definición
Va	Velocidad del avión en (m/s)
Vt	Velocidad tangencial (m/s)
W	Velocidad angular (RPM)
Υ	Distancia variable entre el avión y el punto
	de intersección perpendicular entre su
	vector dirección y la distancia X.
Χ	Distancia de la antena a la proyección
	vector dirección del avión sobre el suelo.
DAA	Distancia de la antena al avión.

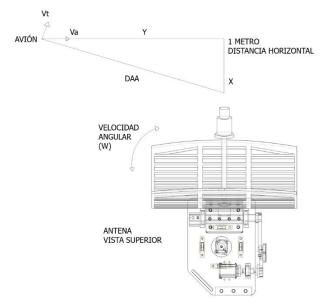


Ilustración 10. Esquema de movimiento del avión respecto a la Antena Raspy 1 en altura y velocidad crucero - Vista superior

Sabiendo que la velocidad máxima del Aeromodelo es aproximadamente de  $^{90\,Km}/_h$  (Dato de la telemetría proporcionada por el semillero Aerotech), se tiene entonces que Va es igual a 25 m/s.

Se procedió a calcular el valor de la velocidad angular horizontal  $(\omega)$ . Esta está definida por la siguiente ecuación:

$$\omega horizontal = \frac{v}{r}$$
 Ecuación 3

A continuación, con los parámetros descritos a continuación se definen las siguientes ecuaciones:

Va = velocidad lineal del avión.

DAA = radio de giro respecto a la antena (Distancia desde el Avión a la Antena).

Vt = Velocidad Tangencial.

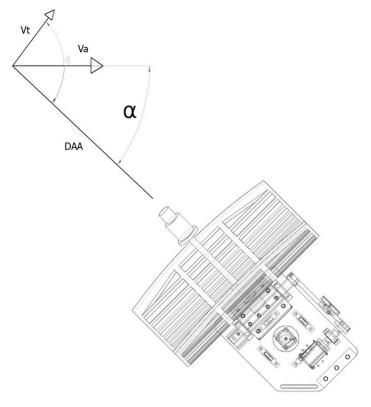


Ilustración 11. Esquema empleado para el cálculo de la velocidad tangencial del giro horizontal de la Antena Raspy 1.

Ahora, para hallar  $\alpha$  se realiza la siguiente operación, teniendo en cuenta la ilustración 10:

$$\alpha = \tan^{-1}(\frac{X}{V})$$
 Ecuación 4

Para calcular la velocidad tangencial (Vt) se emplea la siguiente ecuación:

$$Vt = Va * \sin \alpha$$
 Ecuación 5

Continuamente se procede a calcular el valor de DAA de la siguiente manera (revisar parámetros de ilustración 10 y 11:

$$DAA = \sqrt{X^2 + Y^2}$$
 Ecuación 6

Teniendo ya el valor de Vt y DAA, se procede a calcular la velocidad angular en términos de Rad/s:

$$\omega horizontal = \frac{Vt}{DAA}$$
 Ecuación 7

Por efectos de cálculos matemáticos, es importante convertir el valor de la velocidad angular que se encuentra en Rad/s a RPM:

$$W(RPM) = W(\frac{Rad}{s}) * \frac{60seg}{1min} * \frac{1rev}{2\pi rad}$$
 Ecuación 8

Al realizar el esquema en simulink, se tomó una distancia "Y" inicial de 30 Metros de distancia, para poder notar el cambio de velocidad, y se analiza gráficamente qué ocurre con la velocidad angular que debe tener el mecanismo de giro horizontal de la Antena Raspy 1.

El esquema realizado es el siguiente:

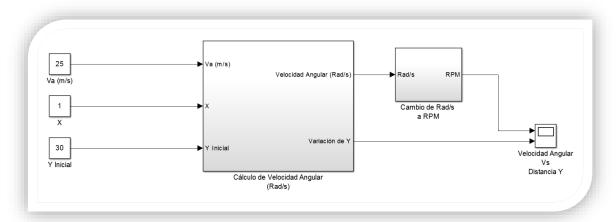
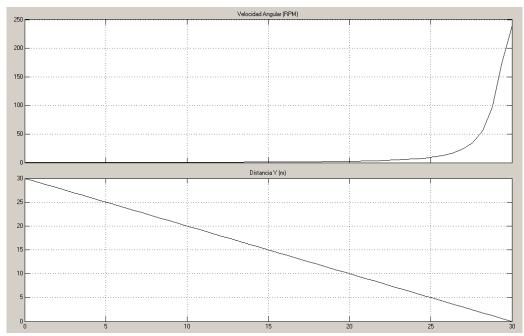


Ilustración 12. Cálculo de la velocidad angular de giro horizontal en revoluciones por minuto de la "Antena Raspy 1" a velocidad crucero.



Gráfica 1. Visualización gráfica del cambio de la velocidad angular del giro horizontal de la Antena Raspy 1 respecto a la distancia "Y" a la que se encuentre el avión a velocidad crucero. El eje "X" es la unidad en tiempo.

Cuando el avión se acerca a tal punto de quedar frente a la antena, a un metro de distancia (respecto a su proyección en el suelo), la velocidad tangencial del giro de la antena se vuelve igual a la velocidad del avión:

$$Vt = Va$$
 Ecuación 9

Y el radio de giro (DAA) se vuelve igual a la distancia horizontal mínima que tendría la antena del vector dirección del avión (X):

$$DAA = X$$
 Ecuación 10

Se obtiene entonces la siguiente igualdad:

$$\omega horizontal = \frac{Vt}{DAA} = \frac{Va}{x} = \frac{25 \, m/s}{1 \, m}$$
 Ecuación 11

$$whorizontal = 25 \frac{rad}{s} * \frac{60seg}{1min} * \frac{1rev}{2\pi rad} = 238,73 \frac{rev}{min}$$

Basados en Gráfica 1, podemos visualizar a qué distancia se produce la variación más notoria en la velocidad angular. Esta variación se usa para calcular la aceleración angular que debe tener el giro horizontal de la antena. Se usa el valor

final de la velocidad angular, menos el valor inicial de esa variación. El resultado de esa operación se divide en el rango de tiempo que le tomó esa variación de velocidad.

Haciendo referencia a la Ecuación 2, se calculó de la siguiente manera la aceleración angular desde que el avión se encuentra a 5 m de distancia de la antena hasta que llega a ésta:

Tabla 5. Rangos de variación en la velocidad angular horizontal a altura y velocidad crucero.

Distancia Y (m)	Velocidad angular (RPM)
5	9
0	238.73

$$\alpha horizontal = \frac{238.73 \frac{rad}{seg} - 9 \frac{rad}{seg}}{\Delta t} = \frac{229.73 \frac{rad}{s}}{\Delta t}$$

Ahora, sabiendo la velocidad del avión y la distancia en la que se tomaron los valores de variación, se calcula el rango de tiempo en el que recorrió esa distancia, haciendo uso de la ecuación de la que se derivan todos los modelos de movimiento rectilíneo uniforme (M.R.U):

$$x = v * t$$
 Ecuación 12

Siendo  $v = 25 \, m/s$  y x = 5m (según la gráfica, cuando el UAV está a 5 metros de distancia de la antena, la velocidad angular empieza a cambiar), dando un tiempo de:

$$t = \frac{5 m}{25 m/s} = 0.2s$$

Teniendo la variación en tiempo, la aceleración angular necesaria para el giro horizontal, a altura y velocidad crucero, vendría a ser:

$$avertical = \frac{229.73 \frac{rad}{s}}{0.2 s} = 1148.65 \frac{rad}{s^2}$$

# 8.1.3 Cálculo de la velocidad Angular que debe tener el movimiento horizontal de la "Antena Raspy 1" en su aterrizaje

Para el cálculo de la velocidad y aceleración angular horizontal, en el aterrizaje, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La velocidad es  $14\frac{m}{s}$ , aterrizando. Este dato se obtiene por la telemetría del aeromodelo propuesto por el semillero Aerotech.
- La distancia mínima desde la antena hasta pista es de 4 metros.
- El avión va a aterrizar y va alineado a la pista o lugar de aterrizaje.

Las variables son iguales a las expresadas en la Tabla 4.

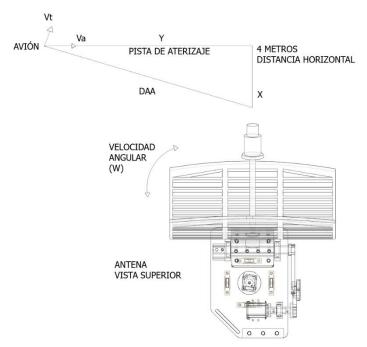


Ilustración 13. Esquema de movimiento del avión respecto a la Antena Raspy 1 en el aterrizaje - Vista superior.

Para este caso se puede repetir todo el proceso del inciso anterior, haciendo uso de la Ecuación 1 a la 11 y el anexo C.

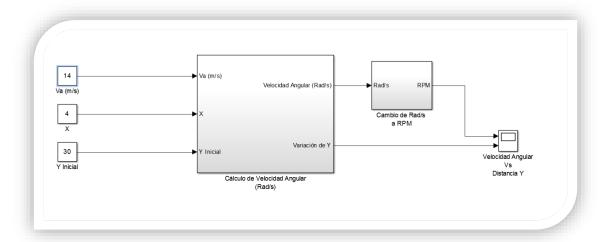
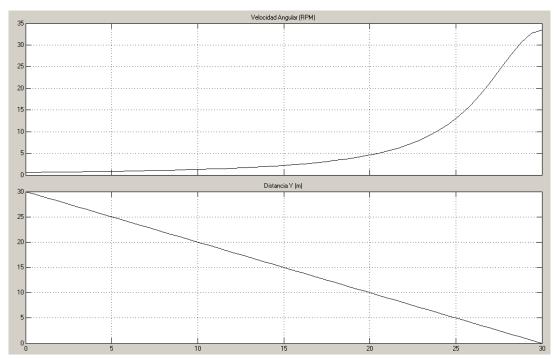


Ilustración 14. Cálculo de la velocidad angular de giro horizontal en revoluciones por minuto de la Antena Raspy 1 en el aterrizaje.

Dando como resultado la siguiente gráfica de velocidad angular:



Gráfica 2. Visualización gráfica del cambio de la velocidad angular del giro horizontal de la Antena Raspy 1 respecto a la distancia "Y" a la que se encuentre el avión en el aterrizaje. El eje "X" es la unidad en tiempo.

Con las características planteadas, se puede calcular el valor de la velocidad angular máxima requerida para el movimiento horizontal de la antena y verificar el valor máximo obtenido en la gráfica haciendo uso de la Ecuación 11:

$$\omega horizontal = \frac{14\frac{m}{s}}{4m} = 3.5\frac{rad}{s} * 60\frac{seg}{1min} * \frac{1rev}{2\pi rad} = 33.4225\frac{rev}{min}$$

Basados en la Gráfica 3, podemos visualizar a qué distancia se produce la variación más notoria en la velocidad angular.

Haciendo referencia a la Ecuación 2, se calculó de la siguiente manera la aceleración angular horizontal, a altura y velocidad de aterrizaje, desde que el avión se encuentra a 15 m de distancia de la antena hasta que llega a ésta:

Tabla 6. Rangos de variación en la velocidad angular horizontal a altura y velocidad de aterrizaje.

Distancia Y (m)	Velocidad angular (RPM)
15	2.2
0	33.4225

$$\alpha horizontal = \frac{33.4225 \frac{rad}{seg} - 2.2 \frac{rad}{seg}}{\Delta t} = \frac{31.2225 \frac{rad}{s}}{\Delta t}$$

Ahora, sabiendo la velocidad del avión y la distancia en la que se tomaron los valores de variación, se calcula el rango de tiempo en el que recorrió esa distancia, haciendo uso de la ecuación 12:

Siendo v = 14 m/s y x = 15m, dando un tiempo de:

$$\Delta t = \frac{15 \, m}{14 \, m/s} = 1.0714s$$

Teniendo la variación en tiempo, la aceleración angular necesaria para el giro horizontal, a altura y velocidad de aterrizaje, vendría a ser:

$$\alpha vertical = \frac{31.2225 \frac{rad}{s}}{1.0714 s} = 29.141 \frac{rad}{s^2}$$

## 8.1.4 Conclusión de velocidad angular horizontal

Se optó por usar la velocidad y aceleración angular máxima obtenida en los dos incisos anteriores. En este caso, la velocidad y aceleración angular necesarias se dan a la altura y velocidad crucero del avión, siendo:

$$w = 238.73 \, RPM$$

$$\alpha = 1148.65 \; \frac{rad}{s^2}$$

Esto indica la velocidad angular mínima requerida que debe tener el motor para hacer girar la antena de forma horizontal, a la salida de su caja reductora.

# 8.1.5 Cálculo de la velocidad y aceleración angular que debe tener el movimiento vertical de la "Antena Raspy 1" a altura y velocidad crucero

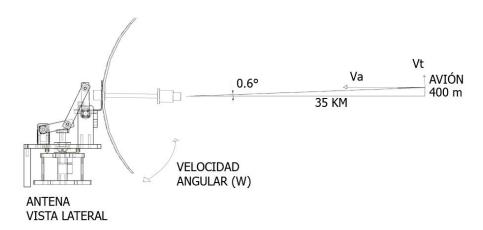


Ilustración 15. Esquema de movimiento del avión respecto a la Antena Raspy 1 a altura y velocidad crucero al máximo alcance de envío y recepción de datos de la antena - Vista lateral.

Tabla 7. Variables de la Ilustración 16 y 17.

Variable	Definición
Va	Velocidad del avión en m/s.
Vt	Velocidad tangencial en m/s.
W	Velocidad angular RPM.
Υ	Altura del avión.
X	Distancia de la antena hasta la proyeccion
	sobre el suelo del avión.
DAA	Distancia de la antena al avión.
В	Ángulo de inclinacion vertical que debe
	seguir la antena.
θ	Ángulo opuesto a Beta (β).

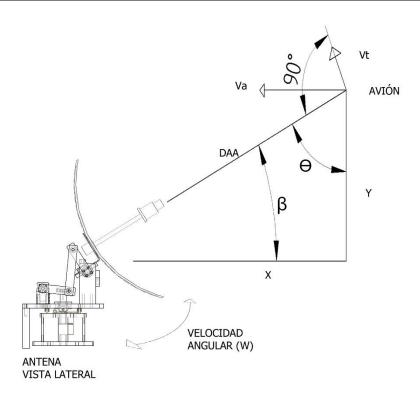


Ilustración 16. Esquema de movimiento del avión respecto a la "Antena Raspy 1" a altura y velocidad crucero a la mitad de alcance de envío y recepción de datos de la antena - Vista lateral.

Para entender el comportamiento del giro vertical de la "Antena Raspy 1", es importante tener en cuenta que la variación mayor va a ser mientras más cerca se encuentre el avión de ella.

Para predecir el comportamiento del sistema, se desarrolló un método experimental realizado en Simulink. Se optó primero por asumir que la variable "X" disminuye respecto al tiempo y la variable "Y" es un valor constante (constante que fue cambiada para hallar el caso más extremo para el movimiento vertical). El ángulo β es el ángulo de inclinación vertical al que debe llegar la antena para poder enfocar visualmente el avión y se puede hallar fácilmente.

Teniendo estas variables claras, hallar DAA se vuelve indispensable ya que, a partir de este valor variable en el tiempo, se calcula la velocidad tangencial de la antena respecto a la velocidad a la que el avión se encuentre. Con esta velocidad tangencial se procedió a calcular la velocidad angular a la que debe girar la antena en su dirección vertical.

Ahora, sabiendo que la velocidad crucero del Aeromodelo es aproximadamente de 25 m/s (Dato de la telemetría proporcionada por el semillero Aerotech).

$$Va = 25 m/s$$

El radio de giro respecto a la antena viene a ser igual a la distancia desde el avión hasta la antena:

$$r = DAA$$
 Ecuación 13

La velocidad angular vertical está definida por la siguiente ecuación:

$$\omega vertical = \frac{Va}{DAA}$$
 Ecuación 14

Ahora, para hallar β se realizó la siguiente operación:

$$\beta = \tan^{-1}(\frac{Y}{X})$$
 Ecuación 15

Sabiendo  $\beta$  y ya que contamos con ángulos relacionados a un triángulo recto, se pudo calcular fácilmente  $\Theta$ :

$$\theta = 90 - \beta$$
 Ecuación 16

Conociendo el valor de Theta  $(\Theta)$ , se procedió a calcular la velocidad tangencial:

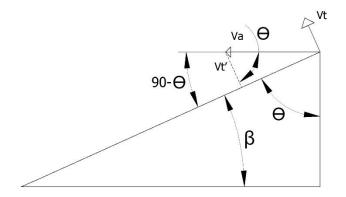


Ilustración 17. Esquema geométrico de las velocidades que actúan sobre el sistema.

$$Vt = Va * \cos \theta$$
 Ecuación 17

Continuamente se procede a calcular el valor de DAA de la siguiente manera:

$$DAA = \sqrt{X^2 + Y^2}$$
 Ecuación 18

Teniendo ya el valor de Vt y DAA, se procede a calcular la velocidad angular en términos de Rad/s basándonos en la Ecuación 11:

$$\omega vertical = \frac{Va}{DAA}$$

Por efectos de cálculos matemáticos, es importante convertir el valor de la velocidad angular que se encuentra en Rad/s a RPM haciendo uso de la Ecuación 8:

$$W(RPM) = W(\frac{Rad}{s}) * \frac{60seg}{1min} * \frac{1rev}{2\pi rad}$$
 Ecuación 19

Al realizar el esquema en simulink, se tomó una distancia "X" inicial de 1 Km de distancia, para poder notar el cambio de velocidad angular vertical en la antena. Se asume que el avión está a una altura "Y" de 400 m constantes a velocidad crucero y se analiza gráficamente qué ocurre con la velocidad angular que debe tener el mecanismo de giro vertical de la Antena Raspy 1.

# El esquema realizado es el siguiente:

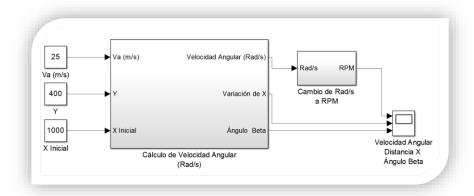
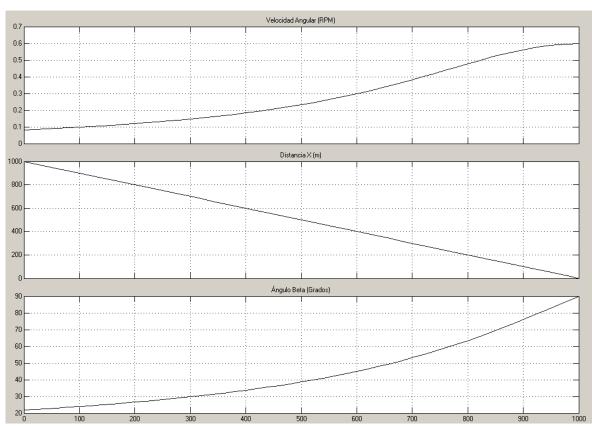


Ilustración 18. Cálculo de la velocidad angular de giro vertical en revoluciones por minuto de la Antena Raspy 1 a velocidad crucero.



Gráfica 3. Visualización gráfica del cambio de la velocidad angular del giro vertical de la Antena Raspy 1 respecto a la distancia "X" a la que se encuentre el avión a altura y velocidad crucero. El eje "X" es la unidad en tiempo.

Cuando el avión se acerca hasta el punto de quedar encima de la antena, la velocidad tangencial del giro de la antena se vuelve igual a la velocidad del avión:

$$Vt = Va$$
 Ecuación 20

Y el radio de giro (DAA) mínimo se vuelve igual a la distancia vertical (Y) que tendría la antena hasta el vector dirección del avión:

DAA = Y Ecuación 21

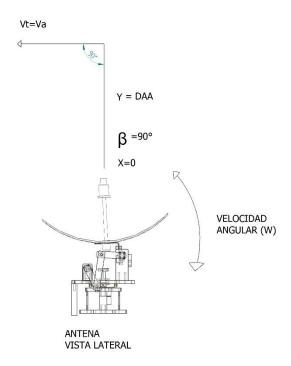


Ilustración 19. Esquema de movimiento del avión respecto a la "Antena Raspy 1" al máximo ángulo al que ésta puede girar de forma vertical - Vista lateral.

Se obtiene entonces la siguiente igualdad:

$$\omega vertical = \frac{vt}{DAA} = \frac{va}{Y} = \frac{25 \text{ m/s}}{400 \text{ m}}$$
 Ecuación 22 
$$\omega vertical = \frac{0.0625 rad}{s} * \frac{60 seg}{1min} * \frac{1rev}{2\pi rad} = 0.5968 \frac{rev}{min}$$

Basados en la Gráfica 5, podemos visualizar a qué distancia se produce la variación más notoria en la velocidad angular.

Haciendo referencia a la Ecuación 2, se calculó de la siguiente manera la aceleración angular vertical, a altura y velocidad crucero, desde que el avión se encuentra a 700 m de distancia de la antena hasta que llega a ésta:

Tabla 8. Rangos de variación en la velocidad angular vertical a altura y velocidad crucero.

Distancia Y (m)	Velocidad angular (RPM)
700	0.147
0	0.5968

$$\alpha vertical = \frac{0.5968 \frac{rad}{seg} - 0.147 \frac{rad}{seg}}{\Delta t} = \frac{0.4498 \frac{rad}{s}}{\Delta t}$$

Ahora, sabiendo la velocidad del avión y la distancia en la que se tomaron los valores de variación, se calcula el rango de tiempo en el que recorrió esa distancia, haciendo uso de la ecuación 12:

Siendo v = 14 m/s y x = 15m, dando un tiempo de:

$$t = \frac{700 \, m}{25 \, m/s} = 28s$$

Teniendo la variación en tiempo, la aceleración angular necesaria para el giro vertical, a altura y velocidad crucero, vendría a ser:

$$\alpha vertical = \frac{0.4498 \frac{rad}{s}}{28 s} = 0.0160 \frac{rad}{s^2}$$

# 8.1.6 Cálculo de la velocidad y aceleración angular que debe tener el movimiento vertical de la "Antena Raspy 1" a altura y velocidad de aterrizaje

Otro caso extremo para el cálculo de la velocidad angular de giro vertical de la antena es cerca al instante del aterrizaje. En este caso el avión se encuentra

planeando cerca de la pista, a una altura no menor de 4 metros y a una velocidad de vuelo, aproximadamente, de 14 m/s. La altura no puede ser menor a la descrita ya que puede darse el caso de que, el avión, choque contra la antena.

El avión va en dirección de la antena y pasa por arriba de ésta, tal cual como se describió en el inciso anterior, a diferencia de que en este caso está a menos altura y a menos velocidad.

Las variables son iguales a las expresadas en la Tabla 7.

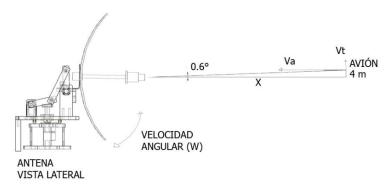


Ilustración 20. Esquema de movimiento del avión respecto a la Antena Raspy 1 a altura y velocidad crucero al máximo alcance de envío y recepción de datos de la antena - Vista lateral.

Para este caso se puede repetir todo el proceso del inciso anterior, haciendo uso de la ecuación 13 a la 21 y hacer uso del anexo C.

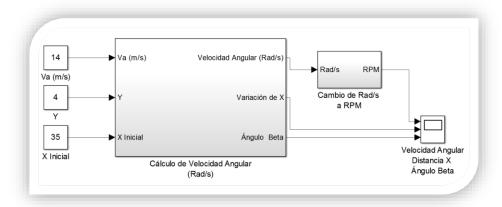
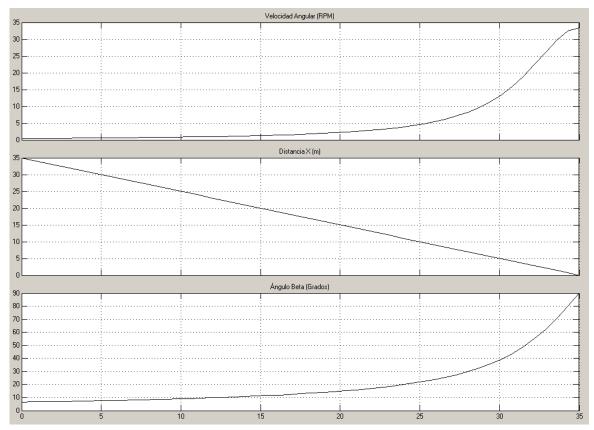


Ilustración 21. Cálculo de la velocidad angular de giro vertical en revoluciones por minuto de la Antena Raspy 1 a altura y velocidad de aterrizaje.



Gráfica 4. Visualización gráfica del cambio de la velocidad angular del giro vertical de la Antena Raspy 1 respecto a la distancia "X" a la que se encuentre el avión a altura y velocidad de aterrizaje. El eje "X" es la unidad en tiempo.

Con las características planteadas, se puede calcular el valor de la velocidad angular máxima requerida para el movimiento vertical de la antena y verificar el valor máximo obtenido en la gráfica haciendo uso de la Ecuación 22:

$$\omega vertical = \frac{Vt}{DAA} = \frac{Va}{Y} = \frac{14 \, m/s}{4 \, m}$$

$$\omega vertical = 3.5 \frac{rad}{s} * \frac{60seg}{1min} * \frac{1rev}{2\pi rad} = 33.4225 \frac{rev}{min}$$

Basados en la Gráfica 7, podemos visualizar a qué distancia se produce la variación más notoria en la velocidad angular.

Haciendo referencia a la Ecuación 2, se calculó de la siguiente manera la aceleración angular vertical, a altura y velocidad de aterrizaje, desde que el avión se encuentra a 15 m de distancia de la antena hasta que llega a ésta:

Tabla 9. Rangos de variación en la velocidad angular vertical a altura y velocidad de aterrizaje.

Distancia Y (m)	Velocidad angular (RPM)
15	2.22
0	33.4225

$$\alpha vertical = \frac{33.4225 \frac{rad}{seg} - 2.22 \frac{rad}{seg}}{\Delta t} = \frac{31.2025 \frac{rad}{s}}{\Delta t}$$

Ahora, sabiendo la velocidad del avión y la distancia en la que se tomaron los valores de variación, se calcula el rango de tiempo en el que recorrió esa distancia, haciendo uso de la ecuación 12:

Siendo v = 14 m/s y x = 15m, dando un tiempo de:

$$t = \frac{15 \, m}{14 \, m/s} = 1.0714s$$

Teniendo la variación en tiempo, la aceleración angular necesaria para el giro horizontal, a altura y velocidad de aterrizaje, vendría a ser:

$$avertical = \frac{31.2025 \frac{rad}{s}}{1.0714 s} = 29.1231 \frac{rad}{s^2}$$

## 8.1.7 Conclusión de aceleración y velocidad angular vertical

Se optó por usar la velocidad y aceleración angular máximas obtenidas en los dos incisos anteriores. En este caso, la velocidad y aceleración angular máxima necesaria se dan a la altura y velocidad de aterrizaje del avión, siendo:

$$w = 33.4225 RPM$$

$$\alpha = 29.1231 \frac{rad}{s^2}$$

Esto indica la velocidad angular mínima que debe tener el motor, que hará girar la antena de forma vertical, a la salida de su caja reductora.

## 8.1.8 Dimensionamiento del mecanismo para el giro vertical

Para el mecanismo de movimiento vertical se planteó un mecanismo de 4 barras, conocido por Robert Norton, en su tercera edición del libro "Diseño de maquinaria", como mecanismo de cadena encerrada.

El mecanismo se analizó desde la posición en la que la antena ejerce más torque en el eje de locomoción. El esquema es el siguiente:

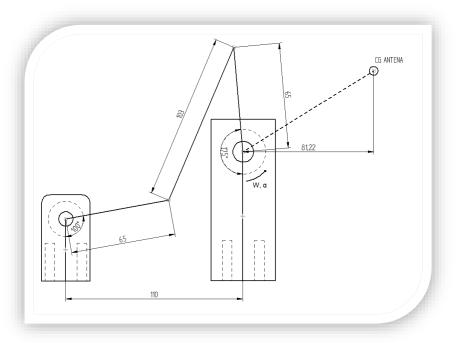


Ilustración 22. Mecanismo de 4 barras utilizado para el giro vertical de la "Antena Raspy 1" (cotas en mm)

Para calcular los grados de libertad del mecanismo, se usó la ecuación de Kutzbach:

$$M = 3(L-1) - 2J_1 - J_2$$
 Ecuación 23

Cuyos parámetros se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 10. Variables Ecuación de Kutzbach

Variable	Definición			
М	Grado de libertad o movilidad			
L	Número de eslabones			
$J_1$	Número de juntas de 1 GDL			
	(Completas)			
$J_2$	Número de juntas de 2 GDL			

Siendo:

$$L = 4$$

$$J_1 = 4$$

$$J_2 = 0$$

Haciendo uso de la Ecuación 23, se halló el número de grados de libertad del mecanismo de la siguiente manera:

$$M = 3(4-1) - 2(4) - 0$$

$$M = 1$$

El mecanismo es de 1 grado de libertad.

Luego, se calculó el número de centros instantáneos con la siguiente ecuación:

$$CI = \frac{n(n-1)}{2}$$
 Ecuación 24

El número de eslabones (n) es igual a 4, como se puede observar en la llustración 22. La cantidad de centros instantáneos son:

$$CI = \frac{4(4-1)}{2} = 6$$

Tabla 11. Centros instantáneos del mecanismo de 4 barras (Ver Anexo F e Ilustración 35).

12	13	14
23	24	
34		•

Centros instantáneos primarios: 12, 23, 34, 41. Centros instantáneos secundarios: 13 y 24.

Para hallar estos centros instantáneos secundarios, se usó el teorema de Kennedy:

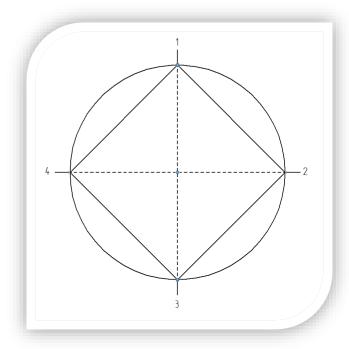


Ilustración 23. Teorema de Kennedy aplicado al cálculo de los centros instantáneos secundarios del mecanismo de la ilustración 22.

Parejas ordenadas para hallar el centro instantáneo 13:

$$13 \begin{cases} 12 & 23 \\ 14 & 34 \end{cases}$$

Parejas ordenadas para hallar el centro instantáneo 24:

$$24 \begin{cases} 23 & 34 \\ 12 & 14 \end{cases}$$

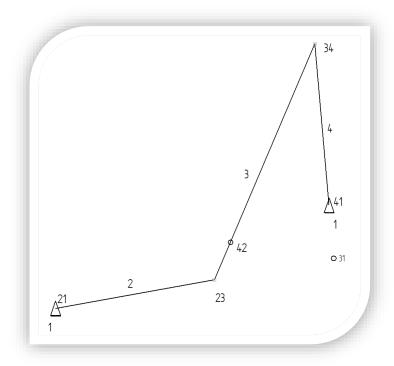


Ilustración 24. Eslabonamiento con juntas completas y la ubicación de los centros instantáneos.

Las velocidades y aceleraciones angulares en el centro instantáneo 14, son las obtenidas en el apartado 8.1.6:

$$w_{14} = 33.4225 \, RPM$$
 o  $w_{14} = 3.5 \frac{rad}{s}$   $\alpha_{14} = 29.1231 \, \frac{rad}{s^2}$ 

### 8.1.9 Cálculo de velocidades

La velocidad se define como la tasa de cambio de posición con respecto al tiempo.<sup>1</sup> En mecanismos giratorios, la velocidad está dada por la siguiente igualdad:

$$V_t = w * r$$
 Ecuación 25

<sup>1</sup> Tomado del libro "Diseño de maquinaria" de Robert Norton, pagina 231.

Siendo:

r = Radio de giro.

 $V_t = Velocidad tangencial.$ 

w = Velocidad angular.

Haciendo uso de la Ecuación 25, se procedió a calcular la velocidad en el centro instantáneo 43 o unión A:

$$V_{tA} = 3.5 \frac{rad}{s} * 65mm = 227.5 mm/s$$

Por medio de la ecuación de velocidades relativas:

$$V_{tA} = V_{tB} + V_{A/B}$$
 Ecuación 26

Se calcularon la velocidad en el centro instantáneo 23 o unión B y la velocidad relativa  $V_{A/B}$  del eslabón 3, desde la unión B a la unión A, por el método gráfico del Anexo I:

$$V_{A/B}=270.24\,mm/s$$

$$V_{tB} = 128.01 \, mm/s$$

Sabiendo la velocidad tangencial en el punto B, se procede a calcular la velocidad angular en el centro instantáneo 12, despejando w en la Ecuación 25:

$$w_{12} = \frac{v_{tB}}{r_{12-B}}$$
 Ecuación 27 
$$w_{12} = \frac{127.62 \ mm/s}{65mm} = 1.96338 \ \frac{rad}{s}$$
 
$$w_{12} = 1.96338 \frac{rad}{s} * \frac{60seg}{1min} * \frac{1rev}{2\pi rad} = 18.7489 \frac{rev}{min}$$

#### 8.1.10 Cálculo de aceleraciones

La aceleración se define como la tasa de cambio de la velocidad con respecto al tiempo. <sup>2</sup>

En mecanismos giratorios, la aceleración está dada por las siguientes ecuaciones:

$$a^n = \frac{v_t^2}{r}$$
 Ecuación 28 
$$a^n = w^2 * r$$
 Ecuación 29 
$$a^t = \alpha * r$$
 Ecuación 30 
$$a_{total} = \sqrt{(a^n)^2 + (a^t)^2}$$
 Ecuación 31 
$$\emptyset = \tan^{-1}\left(\frac{a^t}{a^n}\right)$$
 Ecuación 32

Siendo:

 $a^n = Aceleración normal.$ 

 $a^t = Aceleración tangencial.$ 

 $\alpha = Aceleracion$  angular.

r = Radio de giro.

 $V_t = Velocidad tangencial.$ 

ø = Ángulo de la aceleración total o resultante respecto al radio de giro.

Haciendo uso de la Ecuación 28, se procedió a calcular la aceleración normal en la unión A y en la unión B:

$$a^{n}_{A} = \frac{V_{tA}^{2}}{r_{14-A}} = \frac{(227.49 \text{ mm/s})^{2}}{65mm} = 796.18 \text{ mm/s}^{2}$$

$$a^{n}_{B} = \frac{V_{tB}^{2}}{r_{12-B}} = \frac{(127.62 \text{ mm/s})^{2}}{65mm} = 250.567 \text{ mm/s}^{2}$$

Haciendo uso de la Ecuación 30, se procedió a calcular la aceleración tangencial en la unión A:

$$a_{A}^{t} = \alpha_{14} * r_{14-A} = 29.1231 \frac{rad}{s^{2}} * 65mm = 1893 mm/s^{2}$$

Ya que no contamos con la aceleración angular en el centro instantáneo 12, no se puede calcular la magnitud de la aceleración tangencial en el punto A. Para este

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Tomado del libro "Diseño de maquinaria" de Robert Norton, pagina 287.

caso se vuelve indispensable calcular las aceleraciones relativas tangencial y normal del eslabón 3, desde la unión B a la unión A:

$$a^n_{B/A} = \frac{(V_{B/A})^2}{r_{14-12}}$$
 Ecuación 33

Haciendo uso de la Ecuación 33, se calcula la magnitud de la aceleración relativa  $a^{n}_{B/A}$ :

$$a^{n}_{B/A} = \frac{(270.24 \text{ mm/s})^{2}}{103 \text{ mm}} = 709.026 \text{ mm/s}^{2}$$

La aceleración tangencial relativa del eslabón 3 no se puede calcular a causa de que no se conoce la aceleración angular para éste. Se hizo necesario calcular la aceleración faltante  $a^t{}_B$ . Se usó el método gráfico de línea de proporcionalidad (ver Anexo F) para calcular esta aceleración.

$$a_{R}^{t} = 1065 \, mm/s^{2}$$

Con la aceleración tangencial en el punto B y haciendo uso de la Ecuación 30, se puede calcular la aceleración angular del centro instantáneo 12:

$$\alpha_{12} = \frac{a^t{}_B}{r_{12-B}}$$
 Ecuación 34 
$$\alpha_{12} = \frac{1065 \ mm/s^2}{65mm} = 16.384 \ \frac{rad}{s^2}$$

Sabiendo la aceleración angular en los centros instantáneo 12 y 14, se pueden hallar las aceleraciones respectivas de los centros de gravedad de estos eslabones. Es importante tener en cuenta que las piezas utilizadas en estos eslabones 2 y 4 no son simétricas y que los centros de gravedad se encuentran desplazados del centro. La distancia desde el centro de gravedad hasta el centro instantáneo de rotación es de 34 mm.

Las aceleraciones tangenciales de los centros de gravedad se calculan haciendo uso de las Ecuación 30:

$$a^{t}_{cg2} = 16.384 \frac{rad}{s^{2}} * 34 mm = 557.056 mm/s^{2}$$

$$a^{t}_{cg4} = 29.1231 \frac{rad}{s^{2}} * 34 mm = 990.1854 mm/s^{2}$$

La aceleración tangencial del centro de gravedad del eslabón 3 se calculó mediante el método gráfico de línea de proporcionalidad (ver Anexo F):

$$a^{t}_{ca3} = 1043.25 \, mm/s^{2}$$

Se calculó la aceleración angular en el centro instantáneo 13, haciendo uso de la Ecuación 30:

$$\frac{a^t_{cg3}}{r_{13-cg3}} = \alpha_{13}$$
 Ecuación 35

$$\alpha_{13} = \frac{1043.25 \ mm/s^2}{47.67 \ mm} = 21.88 \ \frac{rad}{s^2}$$

Las aceleraciones normales del centro de gravedad se calcularon haciendo uso de la Ecuación 29:

$$a^{n}_{cg2} = w^{2}_{12} * r_{12-B} = 1.96338 \frac{rad}{s} * 34 mm = 66.75 mm/s^{2}$$
  
 $a^{n}_{cg4} = w^{2}_{14} * r_{14-B} = 3.5 \frac{rad}{s} * 34 mm = 119 mm/s^{2}$ 

Para calcular la aceleración normal del centro de gravedad del eslabón 3, se hizo necesario calcular la velocidad tangencial de éste por el método gráfico de línea de proporcionalidad (ver Anexo F):

$$V_{cg3} = 136.17 \ mm/s$$

Con la velocidad en el centro de gravedad del eslabón 3, se pudo calcular la aceleración normal del centro de gravedad de éste eslabón haciendo uso de la ecuación 28:

$$a^n_{cg3} = \frac{(V_{cg3})^2}{r_{13-cg3}}$$
 Ecuación 36

$$a^{n}_{cg3} = \frac{(136.17 \text{ mm/s})^{2}}{47.67 \text{ mm}} = 388.971 \text{ mm/s}^{2}$$

Es indispensable el cálculo de la aceleración resultante. Para esto se usaron las ecuaciones 31 y 32:

$$a_{t.cg2} = \sqrt{(a^n_{cg2})^2 + (a^t_{cg2})^2} = \sqrt{(66.75 \text{ } mm/s^2)^2 + (557.056 \text{ } mm/s^2)^2} = 561.0409 \text{ } mm/s^2$$

$$\emptyset_{a_{t.cg2}} = \tan^{-1} \left( \frac{557.056 \text{ } mm/s^2}{66.75 \text{ } mm/s^2} \right) = 83.16^{\circ}$$

$$a_{t.cg4} = \sqrt{(119 \text{ } mm/s^2)^2 + (990.1854 \text{ } mm/s^2)^2} = 997.31 \text{ } mm/s^2$$

$$\emptyset_{a_{t.cg4}} = \tan^{-1} \left( \frac{990.1854 \text{ } mm/s^2}{119 \text{ } mm/s^2} \right) = 83.1471^{\circ}$$

$$a_{t.cg3} = \sqrt{(388.971 \text{ } mm/s^2)^2 + (1043.25 \text{ } mm/s^2)^2} = 1113.4 \text{ } mm/s^2$$

$$\emptyset_{a_{t.cg3}} = \tan^{-1} \left( \frac{1043.25 \text{ } mm/s^2}{388.971 \text{ } mm/s^2} \right) = 69.5^{\circ}$$

Hallando el ángulo respecto al radio de giro de cada eslabón y su respectiva aceleración de centro de gravedad, se tuvo que hallar el ángulo respecto a la horizontal. De esta manera la aceleración en Y se puede sumar fácilmente con la aceleración de la gravedad.

$$a_{t.cg2} = 561.0409 \frac{mm}{s^2} \ll -89.53^{\circ}$$

$$a_{t.cg2}y = \left(561.0409 \frac{mm}{s^2} * \sin -89.53^{\circ}\right) - 9800 \frac{mm}{s^2} = -10361.02 \frac{mm}{s^2}$$

$$a_{t.cg2}x = \left(561.0409 \frac{mm}{s^2} * \cos -89.53^{\circ}\right) = 4.6019 \frac{mm}{s^2}$$

$$a_{t.cg4} = 997.31 \frac{mm}{s^2} \ll -168.15^{\circ}$$

$$a_{t.cg4}y = \left(997.31 \frac{mm}{s^2} * \sin -168.15\right) - 9800 \frac{mm}{s^2} = -10004.7 \frac{mm}{s^2}$$

$$a_{t.cg4}x = \left(997.31 \frac{mm}{s^2} * \cos -168.15\right) = -976.05 \frac{mm}{s^2}$$

$$a_{t.cg3}x = 1113.4 \frac{mm}{s^2} \ll -124$$

$$a_{t.cg3}y = (1113.4 mm/s^2 * \sin -124) - 9800 \frac{mm}{s^2} = -10723.05 \frac{mm}{s^2}$$

$$a_{t.cg3}x = (1113.4 mm/s^2 * \cos -124) = -622.6 \frac{mm}{s^2}$$

#### 8.1.11 Momentos de Inercia en las Barras

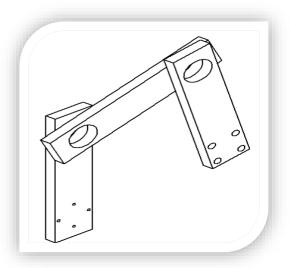


Ilustración 25. Mecanismo de 4 barras utilizado para el giro vertical de la "Antena Raspy 1".

En el mecanismo se tienen 3 eslabones de aluminio 2024 T4 (Ver ANEXO A), las dimensiones se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 12. Propiedades brazos mecanismo 4 barras

Barra	Distancia entre centros de giro(mm)	Masa(Kg)
Eslabón 2	65mm	0,028
Eslabón 3	103mm	0.039
Eslabón 4	65mm	0,028

# 8.1.11.1 Eslabones 2 y 4 (65 mm)



Ilustración 26. Dimensiones de eslabones 2 y 4.

$$Iy = 19,833x10^{-6}Kg * m^2$$

# 8.1.11.2 Eslabón 3 (103mm)

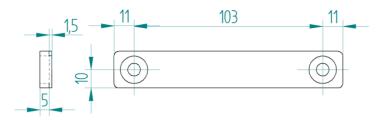


Ilustración 27. Dimensiones de Eslabón 3.

$$Iz = 88.5417 * 10^{-6} Kg * m^2$$

#### 8.1.12 Análisis de fuerzas en el mecanismo

Una vez obtenidas todas las inercias de las piezas y realizados los respectivos análisis de velocidades y aceleraciones en el mecanismo se procede a realizar el análisis de fuerzas del mismo a fin de determinar el torque requerido en el motor:

El mecanismo a analizar es el siguiente:

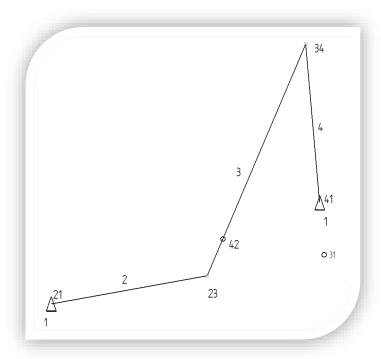


Ilustración 28. Eslabonamiento con juntas completas y la ubicación de los centros instantáneos.

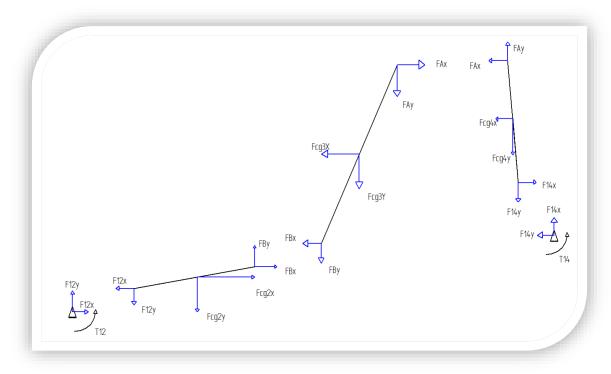


Ilustración 29. Esquemático de fuerzas del mecanismo de 3 barras.

Para este mecanismo se realizaron los análisis gráficos de velocidades y aceleraciones tomando el mecanismo en una sola posición, esto permite obtener un equivalente dinámico cinetostático de éste para el análisis de fuerzas.

Se cuenta con los siguientes valores:

Tabla 13. Dimensiones y constantes dinámicas de cada eslabón del mecanismo.

Eslabón 3	Eslabón 4
Longitud = 0.103m	Longitud = 0.065m
$M_3 = 0.039 Kg$	$M_4 = 0.028Kg$
$I_3 = 88.5417 * 10^{-6} Kg$	$I_4 = 19,833x10^{-6}Kg * m^2$
$*m^2$	
$a_{t.cg3}y = -10.723 \frac{m}{s^2}$	$a_{t.cg4}y = -10.0047 \frac{m}{s^2}$
$a_{t.cg3}x = -0.6226 \frac{m}{s^2}$	$a_{t.cg4}x = -0.97605 \frac{m}{s^2}$
$\alpha_{13} = 21.88 \frac{rad}{s^2}$	$\alpha_{14} = 29.1231 \frac{rad}{s^2}$
	$Longitud = 0.103m$ $M_3 = 0.039Kg$ $I_3 = 88.5417 * 10^{-6}Kg$ $* m^2$ $a_{t.cg3}y = -10.723 \frac{m}{s^2}$ $a_{t.cg3}x = -0.6226 \frac{m}{s^2}$

## Sabiendo que:

 $a_{t.cgn}$ = Aceleración en el centro de gravedad de cada eslabón n.

 $I_n$ = Momento de inercia de cada eslabón n.

 $\alpha_n$ = Aceleración angular del centro instantáneo respectivo.

 $M_n$ = Masa del respectivo eslabón.

Para calcular las fuerzas totales que actúan sobre el mecanismo y el torque requerido para el motor, se debió analizar cada eslabón por separado y determinar las fuerzas que actúan sobre cada uno. Se inició el análisis desde el último hasta el primer eslabón (del 4 al 2 respectivamente).

Dado que se está realizando un análisis dinámico cinetostático del mecanismo cuando esté está en una posición determinada, se deben cumplir las siguientes condiciones:

$$\sum F = m * a$$
 Ecuación 37

Dónde:

F = fuerza

m = masa objeto

a = aceleración en el centro de masa

$$\sum m_{cq} = I * \alpha$$
 Ecuación 38

Dónde:

 $m_{cg} = momentos$  en el centro de masa del objeto

 $I=momento\ de\ inercia\ del\ objeto$ 

 $\alpha = aceleración angular en el eslabón$ 

#### 8.1.12.1 Análisis Eslabón 4

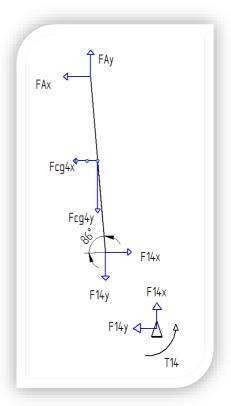


Ilustración 30. Diagrama de cuerpo libre eslabón 4.

En el diagrama anterior se pueden ver las fuerzas a las que está sometido el eslabón. Están presentes dos fuerzas en el centro instantáneo 14, de igual forma hay 2 fuerzas en el punto A.

Haciendo uso de las condiciones de equilibro planteadas en las ecuaciones 37 y 38 para el análisis del eslabón 4 se obtuvo:

$$\sum Fx = M_4 * a_{t.cg4}x = F14x - FAx = \left(0.028Kg * -0.97605 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$\sum Fx = M_4 * a_{t.cg4}x = F14x - FAx = -0.027 N$$

$$\sum Fy = M_4 * a_{t.cg4}y = -F14y + FAy = \left(0.028Kg * -10.0047 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$\sum Fy = M_4 * a_{t.cg4}y = -F14y + FAy = -0.280 N$$

Observando la Ilustración 22, se puede notar que la distancia horizontal desde el centro instantáneo 14 hasta el centro de masa de la antena es de 0.08122 m. Sabiendo que la carga generada por la antena es de 9.06 N, el torque generado es:

$$T = 9.06 N * 0.08122m = 0.735 N * m$$

Realizando sumatoria de momentos:

$$\sum m_{cg4} = I_4 * \alpha_{14}$$

$$= -F14y * 0.034m * \cos(86) - FAy * 0.031m * \cos(86) + F14x$$

$$* 0.034m * \sin(86) + FAx * 0.031m * \sin(86) - 0.735 N * m$$

$$= 29.1231 \frac{rad}{s^2} * 19,833x10^{-6}Kg * m^2$$

$$\sum m_{cg4} = I_4 * \alpha_4$$

$$= -F14y * 0.002371 m - FAy * 0.00216m + F14x$$

$$* 0.0339 m + FAx * 0.0309m = 0.0005775 N * m + 0.735N * m$$

$$\sum m_{cg4} = I_4 * \alpha_4$$

$$= -F14y * 0.002371 m - FAy * 0.00216m + F14x$$

$$* 0.0339 m + FAx * 0.0309m = 0.736N * m$$

Realizado el análisis se obtuvieron las primeras 3 ecuaciones que son:

$$F14x - FAx = -0.027 N$$
  
 $-F14y + FAy = -0.280 N$ 

-F14y \* 0.002371 m - FAy \* 0.00216m + F14x \* 0.0339 m + FAx \* 0.0309m = 0.736N \* m

#### 8.1.12.2 Análisis Eslabón 3

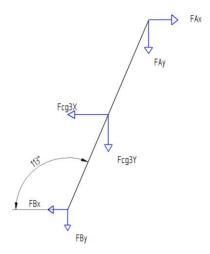


Ilustración 31. Diagrama de cuerpo libre eslabón 3.

$$\sum Fx = M_3 * a_{t.cg3}x = -FBx + FAx = \left(0.039Kg * -0.6226 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$\sum Fx = M_3 * a_{t.cg3}x = -FBx + FAx = -0.024 N$$

$$\sum Fy = M_3 * a_{t.cg3}y = -FBy - FAy = \left(0.039Kg * -10.723 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$\sum Fy = M_3 * a_{t.cg3}y = -FBy - FAy = -0.418 N$$

$$\sum m_{cg3} = I_3 * \alpha_{13}$$

$$= -FAx * 0.0515m * \sin(67) - FAy * 0.0515m * \cos(67) - FBx$$

$$* 0.0515m * \sin(67) + FBy * 0.0515m * \cos(67)$$

$$= 21.88 \frac{rad}{s^2} * 88.5417 * 10^{-6}Kg * m^2$$

$$\sum m_{cg3} = I_3 * \alpha_{13} = -FAx * 0.047m - FAy * 0.0201 - FBx * 0.047m + FBy * 0.0201$$
$$= 0.001937 N * m$$

Realizado el análisis se obtuvieron las segundas 3 ecuaciones que son:

$$-FBx + FAx = -0.024 N$$
$$-FBy - FAy = -0.418 N$$

$$-FAx * 0.047m - FAy * 0.0201 - FBx * 0.047m + FBy * 0.0201 = 0.001937 N * m$$

#### 8.1.12.3 Análisis Eslabón 2

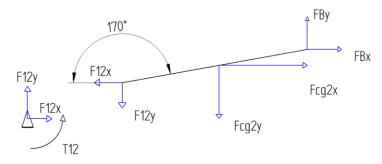


Ilustración 32. Diagrama de Cuerpo Libre Eslabón 2.

$$\sum Fx = M_2 * a_{t.cg2}x = FBx - F12x = \left(0.028Kg * -0.0046 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$\sum Fx = M_2 * a_{t.cg2}x = FBx - F12x = -0.000128 N$$

$$\sum Fy = M_2 * a_{t.cg2}y = -F12y + FBy = \left(0.028Kg * -10.36102 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$\sum Fy = M_2 * a_{t.cg2}y = -F12y + FBy = -0.29 N$$

$$\sum m_{cg2} = I_2 * \alpha_2$$

$$= FBy * 0.031m * \cos(10) - FBx * 0.031m * \sin(10) + F12y$$

$$* 0.034m * \cos(10) - F12x * 0.034m * \sin(10) + T_{motorV}$$

$$= 16.384 \frac{rad}{s^2} * 19,833x10^{-6}Kg * m^2$$

$$\sum m_{cg2} = I_3 * \alpha_2$$

$$= FBy * 0.0305m - FBx * 0.00538m + F12y$$

 $*0.0334m - F12x *0.00590m + T_{motorV} = 0.000324 N * m$ 

Realizado el análisis se obtuvieron las 3 últimas ecuaciones:

$$FBx - F12x = -0.000128 N$$
 
$$-F12y + FBy = -0.29 N$$
 
$$FBy * 0.0305m - FBx * 0.00538m + F12y * 0.0334m - F12x * 0.00590m - T_{motorV}$$
 
$$= 0.000324 N * m$$

Una vez realizado el análisis a los 3 eslabones, se procedió a montar la matriz con todas las ecuaciones halladas para determinar el valor de todas las fuerzas y de igual forma el Torque requerido en el centro instantáneo 12:

Tabla 14. Matriz de reacciones y torques para cálculo de potencia requerida en el motor.

F14x	F14y	FAx	FAy	FBx	FBy	F12x	F12y	Τ	
1	0	-1	0	0	0	0	0	0	-0.027
0	-1	0	1	0	0	0	0	0	-0.280
0.0339	-0.00237	0.0309	-0.0021	0	0	0	0	0	0.736
0	0	1	0	-1	0	0	0	0	-0.024
0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	-0.418
0	0	-0.047	-0.0201	-0.047	0.0201	0	0	0	0.001937
0	0	0	0	1	0	-1	0	0	-
									0.000128
0	0	0	0	0	1	0	-1	0	-0.29
0	0	0	0	-0.00538	0.0305	-0.0059	0.0334	-1	0.000324

Las unidades están en el siguiente orden

Las acciones y las reacciones se dan en Newtons = 
$$Kg \frac{m}{s^2}$$
  
El torque del motor se da en N \* m

Dada la complejidad de resolver un sistema 9x9 a mano, se recurre a la ayuda de MATLAB para dar solución a la matriz planteada arriba, al ingresar la matriz se muestra de la siguiente forma:

Tabla 15. Matriz de reacciones en Matlab.

F14x	F14y	FAx	FAy	FBx	FBy	F12x	F12y	Т	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	9,7823
0	1	0	0	0	0	0	0	0	-22,524
0	0	1	0	0	0	0	0	0	9,8093
0	0	0	1	0	0	0	0	0	-22,804
0	0	0	0	1	0	0	0	0	9,8333
0	0	0	0	0	1	0	0	0	23,222
0	0	0	0	0	0	1	0	0	9,8334
0	0	0	0	0	0	0	1	0	23,512
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,3823

De esta matriz se puede obtener el valor del torque requerido para el motor:

$$Tmotor = 1.3823 N * m$$

La potencia requerida se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Potmotor = Tmotor * Wangular$$

Ecuación 39

Obtenido el torque de la matriz del análisis de fuerzas y conocida la velocidad angular en el centro instantáneo 12, usando la Ecuación 39, la potencia del motor dio:

$$Potmotor = 1.3823 N * m * 1.96338 \frac{rad}{s}$$

$$Potmotor = 2.7139 Watts$$

## 8.2 Selección del motor para el giro vertical

Características requeridas:

$$w_{12} = 18.7489 \frac{rev}{min}$$

$$Tmotor = 1.3823 N * m$$

$$Potmotor = 2.7139 Watts$$

Para mayor precisión en el giro vertical, se precisó adquirir un servo que cumpla con estas características.

Tabla 16. Características del servo motor seleccionado.

Servo Motor	Características				
	Resolución: 0.29°				
3	Velocidad sin carga: 59RPM				
AX=124  we official seen	Ángulo de giro: 0° - 300°				
Ilustración 33. Dynamixel AX-12.	Torque: 1.5 N*m (dándonos un factor de				
	seguridad de 1.087)				

# 8.3 Descripción y cálculo de las piezas del mecanismo

En este apartado se desglosó todo el diseño realizado para calcular mecánicamente los elementos que están sometidos a cargas no despreciables, para detallar bien el ensamble general referirse al plano de ensamble.

El apartado se divide en 3 partes:

- Explosionado Mecanismo de 4 Barras
- Explosionado ensamble superior
- Explosionado ensamble inferior

## 8.3.1 Explosionado mecanismo de 4 barras

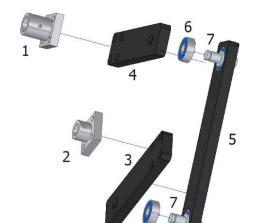


Tabla 17. Tabla de componentes Mecánicos de la Ilustración 34.

N° de pieza	Nombre de pieza	
1	Acople Brazos y eje antena	
2	Acople Brazos y eje Motor	
3	Brazo Eje Dynamixel	
4	Brazo Eje Antena	
5	Brazo Intermedio	
6	Rodamientos Mecanismo 4 barras	
7	Ejes Mecanismo 4 Barras	

Ilustración 34. Explosionado mecanismo de 4 barras.

## 8.3.1.1 Acople Brazos y eje antena



Ilustración 35. Vista Isométrica Acople Brazos y eje antena.

Este acople une el eje que hace girar la antena con los "Brazos" del mecanismo de 4 barras utilizado en el movimiento vertical de la antena. Este se sujeta del eje de rotación de la antena en su orificio más grande y en los agujeros pequeños se fija al brazo de 65 mm o eslabón 4 del mecanismo de 4 barras. Cuenta con 4 tornillos M5 para la sujeción con los brazos del mecanismo de 4 barras, además de 2 prisioneros M4 para el acople fijo con el eje de movimiento vertical de la antena, está fabricado de acero AISI 1020.

# Cálculo de Tornillos de Sujeción

Para la unión se decide escoger un tornillo con las siguientes características:

Longitud total= 20mm

Diámetro Mayor d = 5mm

Longitud Roscada en el Soporte=5mm

Longitud de las placas a unir con los Soportes=11.5mm

Tabla 18. Cálculo de Tornillos de Sujeción

PARAMETRO	ECUACIÓN	RESULTADO
Módulo Elasticidad		E = 207Gpa
Acero		
Fuerza externa	$Wacople + \frac{Wbarra}{2}$	Fe = 0.09N Fuerza en los 4 tornillos
sobre el tornillo Fe	$Fe = \frac{Wacople + \frac{Wbarra}{2}}{4}$	ruerza em los 4 torninos
Longitud de la Rosca <i>Lt</i>	. 21.6	Lt = 2d + 6mm $Lt = 2(5mm) + 6mm$ $Lt = 16mm$
Agarre efectivo I'	$I' = \begin{cases} h + t_2/2 , & t_2 < d \\ h + d/2 , & t_2 \geq d \end{cases}$ h=Longitud total del primer elemento a unir t2=Longitud roscada deseada de 5mm d=diámetro mayor del tornillo	$l' = 6.5mm + \frac{5}{2} = 9mm$
$\begin{array}{ccc} \text{Longitud} & L & \text{del} \\ \text{sujetador} & \end{array}$	L > h + 1.5 * d	L > 6.5 + 1.5(4mm) 20mm > 12.5mm
Longitud de la parte Útil roscada lt	lt = l' - ld	lt = 9mm - 4mm $lt = 5mm$
Longitud de la parte Útil sin rosca <i>ld</i>	ld = L - Lt	ld = 20mm - 16mm $ld = 4mm$
Área de la parte sin rosca $Ad$	$Ad = \frac{\pi d^2}{4}$	$Ad = \frac{\pi * 5mm^2}{4}$ $Ad = 19.63mm^2$
Longitud de la perforación roscada <i>Lr</i>	$Lr \ge d$	5 <i>mm</i> ≥ 5 <i>mm</i>
Área de la parte roscada <i>At</i>	At se obtuvo por medio de la tabla A1.7 ANEXO A	$At = 14.2mm^2$
Rigidez del Tornillo Kb	$Kb = \frac{Ad * At * E}{Ad * lt + At * ld}$	$Kb = 372.380 * 10^9 \frac{N}{m}$

Rigidez de los elementos sujetados $Km$	$Km = A^{(B*d)/l} * E * d$ A y B se obtienen de la tabla A1.8 ANEXO A	$Km = 996.8 * 10^6 \frac{N}{m}$
Fuerza de apriete <i>Fi</i>	$Fi = Nsep * Fe * \left( \frac{Km}{Km + Kb} \right)$ Nsep = Factor de seguridad que varía entre 1.5 y 2	$Fi = 0.480 * 10^{-3}N$
Torque <i>Ti</i>	Ti = Ki * d * Fi  Ti= par de apriete  Ki= coeficiente de par de torsión(tabla A1.11)  d= diámetro mayor del tornillo  Fi= fuerza de apriete	Ti = 0.0001008 * m
Fuerza total sobre el tornillo <i>Fbt</i>	$Fbt = Fi + Fe * \frac{Kb}{(Km + Kb)}$	Fbt = 0.0902N
Área de la rosca del tornillo Aba	$Aba = \pi * d(Wi*p) * nF$ Wi= constante que depende del tipo de rosca y se obtiene de la tabla A1.10 ANEXO A para filete ACME. p= paso de la rosca nF= número de filetes que toman la carga, este valor oscila entre $1 \le nf \le NF$ , $NF = \frac{Lt}{p}$	$Aba = 60.47 * 10^{-9}m^2$
Esfuerzo <i>Ssba</i>	$Ssba = \frac{Fbt}{Aba}$	Ssba = 1.4916Mpa
Esfuerzo de apriete Si	$Si \geq 0.75Sy$ Carga Dinámica $Si = 0.90Sy$ Carga Estática	Si = 306MPa

Con todos los datos de la tabla anterior se procede a verificar la resistencia de fluencia Sy del material del tornillo para confirmar que resistirá. Se debe cumplir que:

$$Ssba \le \frac{Sy}{Nba}$$
 Ecuación 40

Siendo:

Ssba: esfuerzo cortante en el filete del tornillo:

Sy: Resistencia a la fluencia del material del tornillo:

Nba: Número de uniones que sujeta el tornillo:

Reemplazando los valores se obtiene:

$$1.4916Mpa \leq \frac{340MPa}{2}$$

$$1.4916Mpa \leq 170MPa$$

Por tanto, el tornillo diseñado cumple con los requisitos.

Dado que el procedimiento a seguir para los tornillos de las demás piezas es similar, de aquí en adelante solo se darán los valores del esfuerzo hallado y su comparación con el Sy del material

Cabe aclarar que el peso combinado del acople y la barra sobre el los tornillos es demasiado pequeña, basta con conocer la fuerza de apriete mínima para evitar la separación de la junta para determinar el esfuerzo normal al que está sometido el tornillo.

# 8.3.1.2 Acople brazos y eje motor

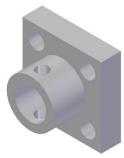


Ilustración 36. Vista Isométrica Acople brazos y eje motor.

Este acople permite la unión entre el eje del servomotor con el mecanismo de 4 barras que permite el movimiento vertical de la antena, se une al eje por medio de un tornillo M3 y una tuerca de seguridad para el mismo y al mecanismo de 4 barras por medio de 4 tornillos M4 . Está fabricado de acero AISI 1020, tiene un peso aproximado de 0.006Kg.

# Tornillos de Sujeción

El esfuerzo encontrado fue:

$$Ssba = 1347.25KPa$$

$$Ssba \leq \frac{Syacero}{2}$$

 $1347.25KPa \le 170MPa$ 

### 8.3.1.3 Brazo eje dynamixel



Ilustración 37. Vista Isométrica Barra eje dynamixel.

Este brazo va conectado al eje que transmite el movimiento del servomotor, cuenta con 4 agujeros para tornillo M4, de igual forma tiene un agujero con tope para ensamblar un rodamiento con su respectivo eje. Está hecha en aluminio 2024 T4 y tiene un peso aproximado de 0.028Kg.

#### Selección de Rodamiento

Para esta barra se seleccionó un rodamiento NIS referencia R1560 que se puede encontrar en la tabla A1.4 ANEXO A.

El rodamiento estará sometido a una carga radial considerablemente pequeña ( el peso del eje sobre el cual está apoyado) así:

$$Fr = Wejebrazo$$

$$Fr = 0.036N$$

Dado que la carga radial es considerablemente pequeña (casi despreciable) basta con dar la especificación de carga estática del rodamiento cuyo valor se puede encontrar de igual forma en la tabla A1.4 ANEXO A.

# Tornillos de Sujeción

El valor del esfuerzo obtenido es:

$$Ssba = 1347.25KPa$$

$$Ssba \leq \frac{Syacero}{2}$$

 $1347.25KPa \le 170MPa$ 

#### 8.3.1.4 Brazo eje antena



Ilustración 38. Vista Isométrica Barra eje antena.

La tercera barra del mecanismo se encarga de transferir el movimiento al eje de la antena, tiene 4 agujeros para unión por tornillo M4 a perforación roscada. De igual forma cuenta con un agujero para colocación de rodamiento con eje pasante para unión con barra intermedia. Está hecha de aluminio 2024 T4, tiene un peso aproximado de 0.028Kg.

## Tornillos de Sujeción

El esfuerzo encontrado fue:

$$Ssba \leq \frac{Syacero}{2}$$
$$927.345Kpa \leq \frac{340MPa}{2}$$

$$927.345$$
*Kpa*  $\leq 170$ *MPa*

# 8.3.1.5 Brazo intermedio

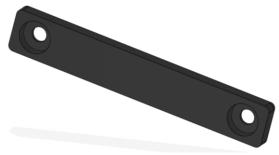


Ilustración 39. Vista Isométrica Barra intermedia.

Esta es la segunda barra del mecanismo, se encarga de conducir movimiento de la primera a la tercera barra, cuenta con dos agujeros para ensamble de rodamientos son sus respectivos ejes. Está hecha de aluminio 2024 T4 y tiene un peso aproximado de 0.039Kg.

#### Selección de Rodamiento

Para esta barra se seleccionó un rodamiento NIS referencia R1560 que se puede encontrar en la tabla A1.4 ANEXO A.

El rodamiento estará sometido a una carga radial considerablemente pequeña ( el peso del eje sobre el cual está apoyado) así:

$$Fr = Wejebrazo$$

$$Fr = 0.036N$$

Dado que la carga radial es considerablemente pequeña (casi despreciable) basta con dar la especificación de carga estática del rodamiento cuyo valor se puede encontrar de igual forma en la tabla A1.4 ANEXO A.

# 8.3.1.6 Eje Mecanismo 4 Barras



Ilustración 40. Vista Isométrica Eje Barras.

Este eje está encargado de permitir el movimiento entre los brazos del mecanismo de 3 barras que permiten el movimiento vertical de la antena, se acoplan a él dos barras para formar uno de los eslabones del mecanismo. Está fabricado en aluminio 2024 T4 y su peso es despreciable.

# 8.3.2 Explosionado ensamble Superior

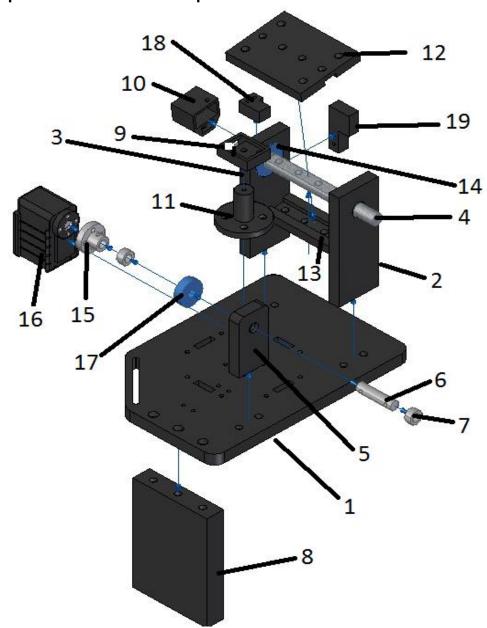


Ilustración 41. Explosionado Parte Superior

Tabla 19. Lista de piezas explosionado ensamble superior

N° de Pieza	Nombre de pieza	
1	Base Superior	
2	Base Barra antena	
3	Base antena frenos	
4	Eje antena	
5	Base eje giro motor	
6	Eje motor vertical	
7	Buje eje Servomotor	
8	Bloque contrapeso	
9	Base Brújula	
10	Soporte Acelerómetro	
11	Soporte Base Brújula	
12	Placa Superior Soporte Antena	
13	Placa Inferior Soporte Antena	
14	Rodamiento Eje antena	
15	Acople Eje dynamixel	
16	Dynamixel Ax-12	
17	Rodamiento Eje motor vertical	
18	Freno Mecánico superior	
19	Freno Mecánico inferior	

### 8.3.2.1 Base Superior

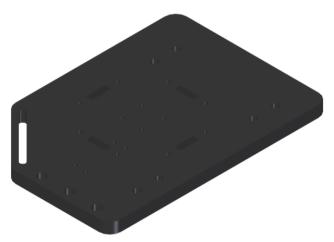


Ilustración 42. Vista Isométrica Base Superior.

Esta base permite la conexión entre el mecanismo inferior y la parte superior del sistema, además de acoplar y sostener todos los elementos pertenecientes al mecanismo superior, además de los soportes para los sensores.

Está fabricada en acrílico y tiene un peso aproximado de 0.301Kg.

# 8.3.2.2 Base Barra Antena y Base antena frenos



Ilustración 43. Vista Isométrica Base Barra antena.

Este soporte apoya el eje de rotación vertical de la antena, tiene un espacio para colocar un rodamiento sobre el cual gira el eje, se une a la placa superior por medio de dos tornillos M6, está hecha de Aluminio 2024 T4 y tiene un peso aproximado de 0.090Kg.

#### Selección de rodamiento

Para estos dos soportes se escogió un rodamiento de bolas NIS ref. 6001 cuyas especificaciones se pueden encontrar en la tabla A1.6 ANEXO A.

Cada rodamiento estará sometido a una carga radial equivalente al peso de la antena y el eje de la misma dividida en 2 así:

$$Fr = \frac{9.24N + 0.31N}{2} = 4,775N$$
 Ecuación 41

Dado que las condiciones de trabajo para el rodamiento son poco demandantes (bajas rpm, cargas pequeñas) basta con especificar la clasificación de carga estática del rodamiento *Co* que se puede encontrar de igual forma especificada en la tabla A1.6 ANEXO A.

# Tornillos de Sujeción

El valor del esfuerzo obtenido es:

$$\sigma_n = 665.805 Pa$$

$$\sigma_n \leq Sytornillo$$

$$22.5273Pa \le 660MPa$$

#### **8.3.2.3 Eje Antena**



Ilustración 44. Vista Isométrica eje antena.

Este eje apoya la antena, tiene 4 huecos equidistantes entre sí para soportar la antena con tornillos M6 y tuercas de seguridad, tiene dos ranuras para inserción de anillos Seger para evitar deslizamientos. En el borde izquierdo cuenta con una cuña para la inserción de un acople para sensores, está fabricado de acero AISI 1020 y tiene un peso aproximado de 0.031Kg.

## 8.3.2.4 Base eje giro motor



Ilustración 45. Vista Isométrica Base eje giro motor.

Este Soporte apoya al eje encargado de transmitir el movimiento del servomotor al mecanismo de 3 barras para la rotación vertical de la antena, en su interior se acopla un rodamiento donde girará el eje, se une a la placa superior por medio de 2 tornillos M6, está hecha de acero AISI 1020 y tiene un peso aproximado de 0.092Kg.

#### Selección de rodamiento de bolas

Para este soporte se escogió un rodamiento de bolas NIS Ref. 608 cuyas especiaciones se pueden encontrar en la tabla A1.5 ANEXO A.

Al igual que en los soportes de la antena este rodamiento estará sometido a una carga radial equivalente al peso del eje que transmite el movimiento entre el dynamixel y el mecanismo de 3 barras así:

$$Fr = Weje$$

$$Fr = 0.1384N$$

Dado que esta carga es muy pequeña solo se requiere indicar la clasificación de carga estática *Co* del rodamiento cuyo valor se puede encontrar de igual forma en la tabla A1.5 ANEXO A.

### Tornillos de Sujeción

El valor del esfuerzo obtenido es

 $\sigma_n = 26.283 Pa$ 

 $\sigma_n \leq Syacero$ 

 $26.283Pa \le 660MPa$ 

#### 8.3.2.5 Eje motor Vertical



Ilustración 46. Vista Isométrica Eje motor Vertical.

Este eje se encarga de transferir el movimiento desde el servomotor hasta el mecanismo de 3 barras, tiene 2 agujeros de 3mm para tornillo pasante y tuerca de seguridad a fin de sujetarse de los acoples en ambos extremos del mismo. Está hecho en acero AISI 1020 y su peso aproximado es de 0.013Kg

#### 8.3.2.6 Buje eje Servomotor



Ilustración 47. Vista Isométrica Buje eje servomotor.

Este buje ayuda a fijar los acoples del eje que transmite movimiento entre el Servomotor y el mecanismo de 3 barras. Está hecho de acero AISI 1020 y tiene un peso aproximado de 0.003Kg.

### 8.3.2.7 Bloque de Contrapeso



Ilustración 48. Vista Isométrica Bloque de contrapeso.

Este bloque se encarga de contrarrestar el peso de la antena cuando está ubicada a cero grados respecto al eje vertical, Conociendo el peso total de la antena (0,950Kg aproximadamente) se calculan las dimensiones del bloque a partir de la densidad de un material conocido.

Para este caso se decidió hacer uso de un ACERO AISI 1020 con una densidad

$$d = \frac{7,87g}{cm^3}$$

Sabiendo que:

$$d = \frac{m}{v}$$

Ecuación 42

Se despejó el volumen obteniendo:

$$v = \frac{m}{d}$$

Con los valores de densidad y masa requerida, se pudo obtener el volumen necesario del bloque.

$$v = \frac{950g}{7,87g/cm^3}$$
$$v = 120.711 cm^3$$

Con el valor del volumen requerido se hallaron unas dimensiones que dieran el valor aproximado requerido de acuerdo al diseño del mecanismo.

Una vez realizado un proceso de iteración, se obtuvo el siguiente valor:

$$v = l * l * l$$

Ecuación 43

$$v = 10cm * 7,5cm * 1,7cm$$

$$v = 127.1cm^3$$

Con estas dimensiones se calculó el peso del bloque:

$$m = v * d$$

$$m = 127,1cm^3 * 7,87g/cm^3$$

$$m = 1000,277$$

Calculando el error:

$$e = \frac{1000,277 - 985}{985} * 100\%$$
$$e = 1.55\%$$

Éste contrapeso se unió a la placa superior por medio de 3 tornillos M8. El material con el que se maquinó es: acero AISI 1020.

# Cálculo de Tornillos de sujeción

Para este contrapeso se usaron 3 tornillos ubicados de forma equidistante a lo largo de una de las caras axiales del mismo, estos tornillos estarán sometidos a una carga de tensión que genera el peso del contrapeso y a la fuerza de apriete del mismo:

El valor del esfuerzo normal es:

$$\sigma_n = \frac{5.024N}{0.0366m^2} = 137.26Pa$$

Comparando con el Sy:

$$\sigma_n \leq Sy$$

$$137.26Pa \le 660MPa$$

#### 8.3.2.8 Base Brújula

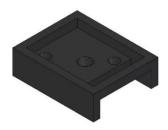


Ilustración 49. Vista Isométrica Base Brújula.

Está base sirve de socket para la brújula, cuenta con 3 agujeros para sujeción de la brújula y de la base al soporte de la misma. Está fabricada en empack y tiene un peso aproximado de 0.005Kg.

#### 8.3.2.9 Soporte Acelerómetro



Ilustración 50. Vista Isométrica Soporte Acelerómetro.

Este soporte sirve para sostener el sensor de inclinación de la antena, se une al eje de la antena por medio de dos prisioneros M6. De igual forma cuenta con un agujero de 3mm para tornillo pasante con tuerca de seguridad a fin de fijar el sensor. Está fabricada de aluminio y tiene un peso aproximado de 0.015Kg.

#### 8.3.2.10 Soporte Base Brújula



Ilustración 51. Vista Isométrica Soporte Base Brujula.

Esta Base se encarga de soportar la brújula magnética, se ubicó con 4 tornillos pasantes M3 y tuerca de seguridad, de igual forma cuenta con un agujero en el centro de la pieza para rosca M3. Está hecha en empack y tiene un peso aproximado de 0.013Kg. Se fabricó en este material para tener una lectura precisa ya que materiales ferrosos impedirían una lectura adecuada del sensor.

#### 8.3.2.11 Placa Superior Soporte Antena



Ilustración 52. Vista Isométrica Placa Superior Soporte Antena.

Esta placa completa el conjunto encargado de unir y soportar la antena sobre el eje de la misma, tiene 4 huecos equidistantes entre sí para poner tornillos M6 pasantes con tuerca de seguridad, Está hecha de aluminio 2024 T4 y tiene un peso aproximado de 0.085Kg.

#### **Tornillos Sujeción**

El valor del esfuerzo obtenido fue:

$$Ssba = 34.016MPa$$

$$Ssba \leq \frac{Syacero}{3}$$

 $34.016MPa \le 113.3MPa$ 

#### 8.3.2.12 Placa Inferior Soporte Antena



Ilustración 53. Vista Isométrica Placa inferior soporte antena.

Esta placa se encarga de unir y soportar la antena sobre el eje de la misma, tiene 4 huecos equidistantes entre sí para tornillos M6 pasantes con tuerca de seguridad, Está hecha de aluminio 2024 T4 y tiene un peso aproximado de 0.032Kg

## **Tornillos Sujeción**

El valor del esfuerzo obtenido fue:

$$Ssba = 34.016MPa$$

$$Ssba \le \frac{Syacero}{3}$$

$$34.016MPa < 113.3MPa$$

## 8.3.2.13 Acople Eje Dynamixel



Ilustración 54. Vista Isométrica Acople Eje Dynamixel.

Este acople se adapta al servomotor destinado a realizar el movimiento vertical de la antena, se une por medio de 4 tornillos M2 al servomotor, de igual forma se adapta a un eje encargado de transmitir el movimiento rotacional del motor al mecanismo de 3 barras, se sujeta al eje por medio de un tornillo M3 y una tuerca de seguridad para el mismo. está fabricado de acero AISI 1020 y tiene un peso aproximado de 0.007Kg.

#### Tornillos de Sujeción

El dynamixel cuenta con tornillos de un diámetro de 2mm y una longitud de 15mm para la sujeción de acoples a éste.

El valor del esfuerzo obtenido es:

$$Ssba = 723.439KPa$$

$$Ssba \le \frac{Syacero}{2}$$

$$723.439KPa \le 170MPa$$

### 8.3.2.14 Freno Mecánico Superior



Ilustración 55. Vista Isométrica Freno Mecánico Superior.

Este freno mecánico impide a la antena superar un ángulo mayor a 90°, está fabricado de aluminio 2024 T4 y su peso es despreciable.

## Tornillos de Sujeción

Estos tornillos al igual que los del freno inferior están sometidos a una carga excéntrica, el procedimiento de cálculo de la Fuerza sobre cada tornillo es la misma al descrito en el punto anterior, por lo cual solo se da el valor de la *Ftornillo*:

$$Ftornillo = 68.51N$$

$$Ssba \leq \frac{Syacero}{2}$$

 $143.324Mpa \le 170MP$ 

#### 8.3.2.15 Freno Mecánico Inferior



Ilustración 56. Vista Isométrica Freno Mecánico Inferior.

Este freno mecánico impide a la antena bajar de un ángulo menor a 0°, está fabricado de aluminio 2024 T4 y su peso es despreciable.

## Tornillos de Sujeción

Los tornillos de este freno están sometidos a carga excéntrica, por lo que se debe conocer el valor de la carga total sobre cada tornillo:

La carga sobre ambos tornillos es una fuerza puntual aplicada sobre el centro de masa de la antena de tal forma:

$$F = 9.825N$$

Se calculó el momento que genera la carga sobre los pernos:

$$M = F * d$$
  
 $M = 9.825N * 0.045m = 0.442N * m$ 

Se determinó un centroide del grupo de tornillos a fin de calcular las fuerzas totales sobre cada uno así:

$$r=rac{distancia entrecentros tornillos-2 radio tornillos}{2}+radio tornillo$$
 Ecuación 44  $r=4.3mm$ 

Se calculó la carga primaria cortante por cada tornillo:

$$F' = \frac{F}{ntornillos} = \frac{9.825N}{2} = 4.9125N$$

Las fuerzas cortantes secundarias sobre cada tornillo son iguales por tanto:

$$F'' = \frac{M * r}{2 * r^2} = \frac{M}{2 * r} = \frac{0.442N * m}{2 * 0.0043m} = 51.39N$$

La carga total sobre cada tornillo es:

$$Ftornillo = F' + F''$$
  
 $Ftornillo = 56.307N$ 

Los procedimientos para el cálculo de Ssba se obvian y se da únicamente el valor de Ssba:

$$Ssba = 138.497MPa$$

$$Ssba \leq \frac{Syacero}{2}$$

$$138.497MPa \leq 170MPa$$

# 8.3.3 Explosionado ensamble inferior

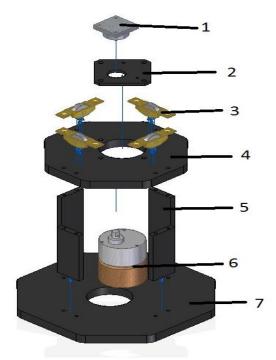


Ilustración 57. Explosionado ensamble inferior.

Tabla 20. Lista de piezas explosionado ensamble inferior

N° de Pieza	Nombre de pieza	
1	Acople motor horizontal a base superior	
2	Platina soporte motor horizontal	
3	Rodachina	
4	Platina base motor horizontal	
5	Soporte inferior vertical	
6	Motor horizontal	
7	Platina base unión trípode	

### 8.3.3.1 Acople Motor Horizontal a Base Superior



Ilustración 58. Vista Isométrica Acople motor horizontal a Base Superior.

Este acople adapta el eje del motor inferior encargado del movimiento horizontal de la antena con la parte superior de la misma, se une a la placa superior por medio de 4 tornillos M3 con tuerca de seguridad para cada uno y al eje del motor por medio de 2 prisioneros de 3mm. Está fabricado en acero AISI 1020 y tiene un peso aproximado de 0.041Kg.

# Tornillos de Sujeción

El valor del esfuerzo obtenido es:

 $\sigma_n = 665.805 Pa$ 

 $\sigma_n \leq Syacero$ 

 $665.805Pa \le 340MPa$ 

### 8.3.3.2 Platina soporte Motor Horizontal



Ilustración 59. Vista Isométrica Platina soporte motor horizontal.

Esta lámina está diseñada para soportar el motor inferior sobre la placa de acrílico debajo de ella, cuenta con un agujero de 15mm para dar cabida a la base del eje del motor, este agujero está desplazado del centro con el fin de centrar el eje del mismo, como se explicó anteriormente el eje del motor está desplazado respecto al centro de la estructura del mismo.

Tiene dos agujeros de 3mm que sirven para soportar el motor con tornillos M3 y 4 agujeros con tornillos M4 y tuerca de seguridad para unir a la placa de acrílico debajo, está hecha de aluminio 2024 T4 y tiene un peso aproximado de 0.014Kg.

#### 8.3.3.3 Rodachina

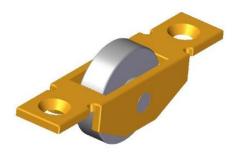


Ilustración 60. Vista isométrica de Rodachina.

Esta rueda de diámetro 17 mm fue adquirida en la Mundial de Aluminios. Ya que no se contaba con un catálogo propio del producto, se procedió a hacer un experimento sencillo para verificar los límites de esta rodachina. Principalmente se le colocó una carga de 10 Kilogramos y la soportó con un movimiento fluido. Continuamente se hicieron pruebas con una carga de 25 Kilogramos y esta ya no pudo girar con facilidad.

Teniendo en cuenta el peso máximo del ensamble superior (2,76 Kilogramos) y que este se dividirá entre 4 rodachinas, se aprobó el uso de este en el mecanismo de giro horizontal.

Para poder verificar que las rodachinas rodarán, se debe conocer la resistencia a la rodadura que presentarán las rodachinas, la resistencia a la rodadura se muestra claramente en la siguiente ilustración.

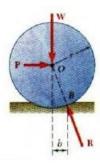


Ilustración 61. Resistencia a la rodadura.

Sobre la rueda actúan la carga W que soporta, la Fuerza P aplicada en el centro de la rueda para mantenerla en movimiento y una Fuerza R generada por rozamiento a lo largo del área de contacto entre la rueda y el suelo. Realizando un análisis se obtiene que:

$$Pr \geq W * b$$

Donde:

*r*=radio de la rueda

*b*= distancia horizontal entre O y B

La distancia b se conoce como el coeficiente de resistencia a la rodadura, cabe resaltar que este coeficiente no es adimensional dado que representa una distancia. Según Beer y Russell³ este coeficiente para una rueda sobre un piso blando varía entre 0.25 y 125mm, para este caso se toma  $b=0.25\ mm$ .

Si se tiene que:

P = 0.279N, r = 16,7mm, W = 6.975N  $0.279N * 16.7mm \ge 6.975N * 0.25mm$  $4.65N * mm \ge 1.75N * mm$ 

Dado que la relación cumple, las rodachinas rodarán.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Mecánica Vectorial Para Ingenieros 8ta Edición Ferdinand P. Beer-E.Rusell Johnston, Jr pags 445-446

# Cálculo de tornillos de sujeción

Tabla 21. Cálculo de tornillos de sujeción

PARÁMETRO	ECUACIÓN	RESULTADO
Módulo Elasticidad Acero		E = 207Gpa
Fuerza externa sobre el tornillo <i>Fe</i>	$Fe = rac{Wmecanismo}{8}$ En cada tornillo	Ft = 3.395N
Longitud de la Rosca	$L_T \begin{cases} 2d + 6 mm, & L \le 125, d \le 48 \text{ mm} \\ 2d + 12 mm, & 125 < L \le 200 mm \\ 2d + 25 mm, & L > 200 mm \end{cases}$	Lt = 12mm
agarre del tornillo I	I = etuerca + ebasesup + earandela + erueda el prefijo e denomina espesor.	I=17.5mm
Longitud <i>L</i> del sujetador	L>I+H L= longitud total del tornillo I= agarre, H= longitud de la tuerca	L > 17.5mm + 6mm 25mm > 23.5mm
Longitud de la parte Útil sin rosca $ld$	ld = L - Lt	ld = 25mm - 12mm $ld = 13mm$
Longitud de la parte Útil roscada lt	lt = l - ld	lt = 17.5mm - 13mm $lt = 4.5mm$
Área de la parte sin rosca $Ad$	$Ad = \frac{\pi d^2}{4}$	$Ad = \frac{\pi * 3mm^2}{4}$ $Ad = 7.06mm^2$
Área de la parte roscada $At$	At se obtuvo por medio de la tabla A1.7 ANEXO A	$At = 5.03mm^2$
Rigidez del Tornillo <i>Kb</i>	$Kb = \frac{Ad * At * E}{Ad * lt + At * ld}$	$Kb = 75.658 * 10^9 \frac{N}{m}$
Rigidez de los elementos sujetados <i>Km</i>	$Km = A^{(B*d)/l} * E * d$ A y B se obtienen de la tabla A1.8 ANEXO A	$Km = 609.891 * 10^6 \frac{N}{m}$
Fuerza de apriete Fi	$Fi = Nsep * Fe * \left( \frac{Km}{Km + Kb} \right)$ Nsep = Factor de seguridad que varía entre 1.5 y	Fi = 0.054N
Carga total de tensión <i>F b</i>	Fb = Pb + Fi Fb= la carga total de tensión sobre el tornillo: Pb= parte de la carga que toma el tornillo Fi= la fuerza de apriete	Fb = 3.449N

Conocido el valor de Fb se procedió a calcular el esfuerzo normal sobre el tornillo como:

$$\sigma_n = \frac{Fb}{at}$$
 Ecuación 45

Reemplazando se obtiene:

$$\sigma_n = \frac{3.349N}{0.00503m^2} = 665.805Pa$$

La longitud mínima de la Tuerca debe cumplir que:

*Ltmin* ≥ 
$$0.5d$$

$$6mm \ge 1.5mm$$

Una vez se ha obtenido el valor del esfuerzo se procede a realizar la comparación con el Sy del material del tornillo que en este caso es SyAcero = 340MPa para verificar su resistencia:

$$\sigma_n \leq Sy$$

$$665.805Pa \le 340MPa$$

El tornillo deseado cumple con los requisitos.

#### 8.3.3.4 Platina Base motor Horizontal



Ilustración 62. Vista Isométrica Platina base motor Horizontal.

Esta placa igual en forma y diferente en tamaño a la de soporte de todo el sistema, sirve para dar soporte al motor inferior que permite el giro horizontal de la antena, de igual forma soportar las rodachinas del mecanismo superior, tiene de igual forma un agujero desplazado de la parte central para apoyar al motor, el desplazamiento del agujero se hizo con el fin de centrar el eje del motor dado que esta desplazado cierta distancia respecto al centro de la estructura del mismo, la placa tiene 8 agujeros de 3mm para unirse con los soportes del mismo. Está fabricada de acrílico y tiene un peso aproximado de 0,111Kg.

#### 8.3.3.5 Soporte inferior vertical



Ilustración 63. Vista Isométrica Platina Soporte Sistema Vertical.

4 de estas platinas soportan el peso de todo el sistema, se apoyan en la base inferior de acrílico y se unen a ella por medio de 4 agujeros ubicados en la cara inferior y superior con rosca de M3.

Dado que tienen que soportar el peso del mecanismo, están sometidas a compresión, por lo que es necesario calcularlas como columnas,

Para el cálculo de la carga crítica *Pcr* de la columna se hizo uso de la ecuación de Euler o la ecuación de Johnson para columnas, Cada ecuación se usa de acuerdo a un criterio particular que compara la razón de esbeltez de la columna con la razón de esbeltez de transición.

Sabiendo que:

$$Re = Raz$$
ón de Esbeltez

C = Razón de esbeltez de transición

El criterio estima lo siguiente:

Si Re > C se estima la carga crítica mediante la ecuación de Euler, por el contrario, si  $Re \le C$  se estima haciendo uso de la ecuación de Johnson.

Partiendo de este criterio se procede con el cálculo de la Columna

Para el cálculo es necesario conocer las siguientes características físicas tanto del material como de la columna:

- La carga centrada aplicada en la Columna
- El módulo de elasticidad del material
- La resistencia a la fluencia Sy del material en MPa
- El Área transversal de la Columna
- El momento de inercia respecto al eje y.

\_

La masa total del mecanismo es de 3.1 Kg aproximadamente, partiendo de esto se sabe que la fuerza total aplicada sobre las 4 columnas es de 30,27N aproximadamente, dado que el peso se distribuye de forma equitativa entre los 4 apoyos, se tiene que:

$$Ft = 30,27N$$

$$Ftcolumna = \frac{30,27N}{4}$$

Por tanto:

$$Ftcolumna = 7,56N$$

El material con el cual se desea fabricar la columna es Aluminio 2024 grado T4. Según la tabla A1.3 ubicada en el ANEXO A el Aluminio 2024 grado T4 tiene un módulo de elasticidad E = 73.000Mpa y una resistencia a la fluencia Sy = 324Mpa.

El área transversal de la columna es:

$$Ac = 0.005m * 0.0024m$$

$$Ac = 0.12 * 10^{-3}m^2$$

El momento de inercia de la Columna respecto al eje Y es:

El momento Iy para una figura rectangular está dado por la siguiente ecuación

$$Iy = \frac{1}{12}b^3 * h$$
 Ecuación 46

Reemplazando los valores se obtiene:

$$Iy = \frac{1}{12} * (0.06m)^3 * (0.024m)$$

$$Iy = 2,592 * 10^{-3}m^4$$

Para poder determinar el valor de la Re es necesario conocer 2 variables las cuales son:

- Radio de Giro r mínimo de la sección transversal de la columna
- Longitud Efectiva Le

El radio de giro está definido por la siguiente ecuación:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$
 Ecuación 47

Siendo I el momento de inercia respecto a Y y A el área transversal de la columna. Sustituyendo valores se obtuvo:

$$r = \sqrt{\frac{2,592 * 10^{-3} m^4}{0,12 * 10^{-3} m^2}}$$

$$r = 0.146969m$$

La longitud efectiva Le está definida por la siguiente ecuación:

$$Le = K * l$$
  
Ecuación 48

#### Siendo

k = longitud e fectiva de conexión con extremos

l = longitud axial de la columna

El valor k se determina por el tipo de conexión que tenga la columna con los extremos, en la siguiente tabla se muestran los valores de K para distintos tipos de conexión con los extremos:

Tabla 22. Valor de K para distintos tipos de conexión con los extremos.

Tipo de Conexión con los Extremos	Valor K(adimensional)	
Doblemente Articulada	1	
Articulada y empotrada	0.65-0.7	
Extremo Libre y empotrada	2.1	
Doblemente Empotrada	0.7-0.8	

Fuente. Clase

El valor de K a tomar para este caso es de 0.7 dado que la columna está doblemente empotrada.

Conocidos tanto la longitud axial de la columna como el valor de K se obtuvo:

$$Le = 0.7 * 0.06m$$

$$Le = 0.042m$$

Conocidas Le y K se obtuvo la razón de esbeltez

$$Re = \frac{Le}{r}$$

Ecuación 49

Reemplazando:

$$Re = \frac{0.042m}{0.146969m}$$

$$Re = 0.2876$$

La razón de esbeltez de transición C está definida por la siguiente ecuación:

$$C = \sqrt{\frac{2\pi^2 * E}{Sy}}$$

Ecuación 50

Reemplazando:

$$C = \sqrt{\frac{2\pi^2 * 73.000Mpa}{324Mpa}}$$
$$C = 66.68$$

Obtenidos Re y C se puede decir que:

Dado que:

$$Re \leq C$$

$$0,2876 \le 66,68$$

Se aplica la ecuación de Johnson para determinar *Pcr*.

La ecuación de Johnson se define así:

$$Pcr = Ac * Sy * \left(\frac{1 - Sy*(Re^2)}{4*\pi^2*E}\right)$$
 Ecuación 51

Reemplazando se obtuvo:

$$Pcr = (0.12 * 10^{-3}m^{2}) * 324Mpa * \left(1 - \frac{324Mpa * (0.2876^{2})}{4 * \pi^{2} * 73.000Mpa}\right)$$

$$Pcr = 0.03887N$$

Con el valor de Pcr se puede calcular el valor del esfuerzo y así mismo compararlo con el Sy del material para verificar que cumple con el requisito

$$\sigma \leq Sy$$

Reemplazando:

$$\frac{0.03887N}{0,12*10^{-3}m^2} \le 324Mpa$$

$$323,99Pa \le 324Mpa$$

Dado que  $\sigma \leq Sy$  el material seleccionado es el adecuado para la fabricación de las columnas.

# Cálculo de Tornillos de Sujeción

Para la unión se decide escoger un tornillo con las siguientes características:

Longitud total= 25mm

Diámetro Mayor= 3mm

Longitud Roscada en el Soporte= 15mm

Longitud de las placas a unir con los Soportes=10mm

Tabla 23. Cálculo de tornillos de sujeción

PARÁMETRO	RESULTADO	
Fuerza externa sobre el tornillo		
Fe		
Longitud de la Rosca $Lt$	Lt = 12mm	
Agarre efectivo I'	$l' = 10mm + \frac{3mm}{2} = 11,5mm$	
Longitud $L$ del sujetador	$20mm \ge 14.5mm$	
Longitud de la parte Útil sin rosca $ld$	ld = 20mm - 12mm $ld = 8mm$	
Longitud de la parte Útil roscada <i>lt</i>	lt = 11,5mm - 8mm $lt = 3.5mm$	
Área de la parte sin rosca $Ad$	$Ad = 7.06mm^2$	
Longitud de la perforación	Lr = 2 * 3mm = 6mm	
roscada $Lr$	$15mm \ge 6mm$	
Área de la parte roscada At	$At = 5,03mm^2$	
Rigidez del Tornillo Kb	$Kb = 113,178601.870 * 10^9 \frac{N}{m}$	
Rigidez de los elementos	$Km = 601.870 * 10^6 \frac{N}{M}$	
sujetados <i>Km</i>	m	
Fuerza de apriete <i>Fi</i>	Fi = 0.0399N	
Torque <i>Ti</i>	Ti = 0.000025137N * m	
Fuerza total sobre el tornillo Fbt	Fbt = 3.79N	
Área de la rosca del tornillo Aba	$Aba = 37.69 * 10^{-9}m^2$	
Esfuerzo <i>Ssba</i>	Ssba = 100.557Mpa	
Esfuerzo de apriete Si	Si = 353.7MPa	

Se realizó la verificación de Ssba con el Sy del material

$$Ssba \leq \frac{Sy}{Nba}$$

$$100.557Mpa \leq \frac{340MPa}{2}$$

$$100.557Mpa \leq 170MPa$$

Por tanto, el tornillo diseñado cumple con los requisitos.

### 8.3.3.6 Platina Base unión Trípode



Ilustración 64. Vista Isométrica Platina Base unión Trípode.

Esta placa sirve de soporte a todo el sistema, tiene un agujero un poco desplazado de la parte central a fin de adaptarse al trípode, cuenta con 8 agujeros para la sujeción de todo el mecanismo a la misma por medio de tornillos M3, está fabricada en acrílico y tiene un peso aproximado de 0.216Kg.

# 8.4 Piezas sin requerimiento de cálculo por resistencia

A continuación se presentan 3 tablas donde se da una breve explicación acerca del no cálculo por resistencia de algunas piezas del mecanismo.

Tabla 24. Explicación de no Cálculo por resistencia piezas Ilustración 34

N° de pieza	Nombre de pieza	Material	Explicación
1	Acople Brazos y eje antena	Acero AISI 1020	La pieza está sometida a cargas demasiado pequeñas:  - Carga por torsión no superior a 1.5N*m  - Carga estática despreciable
2	Acople Brazos y eje Motor	ACERO AISI 1020	La pieza está sometida a cargas demasiado pequeñas: - Carga por torsión no superior a 1.5N*m - Carga estática despreciable
3	Brazo eje dynamixel	ALUMINIO 2024 T4	La pieza está sometida a cargas demasiado pequeñas: - Carga por torsión no superior a 1.5N*m - Carga estática despreciable
4	Brazo eje antena	ALUMINIO 2024 T4	La pieza está sometida a cargas demasiado pequeñas:  - Carga por torsión no superior a 1.5N*m  - Carga estática despreciable
5	Brazo intermedio	ALUMINIO 2024 T4	La pieza está sometida a cargas demasiado pequeñas: - Carga por torsión no superior a 1.5N*m - Carga estática despreciable
7	Ejes Mecanismo 4 Barras	ALUMINIO 2024 T4	La pieza está sometida a cargas demasiado pequeñas: - Carga por torsión despreciable - Carga estática despreciable

Tabla 25. Explicación de no cálculo por resistencia piezas ilustración 41

N° de pieza	Nombre de pieza	Material	Explicación
1	Base Superior	Acrílico	Cargas pequeñas:  - Carga estática no superior a 3Kg Carga por torsión despreciable
2	Base Barra antena	Aluminio 2024 T4	- Carga estática no superior a 0.6Kg
3	Base antena frenos	Aluminio 2024 T4	- Carga estática no superior a 0.6Kg
4	Eje antena	ACERO AISI 1020	<ul> <li>Carga estática no superior a 1Kg</li> <li>No completa ciclos dado que nunca realiza un giro completo</li> <li>Carga por torsión no superior a 1.5N*m</li> </ul>
5	Base eje giro motor	ACERO AISI 1020	- Carga estática despreciable
6	Eje motor vertical	ACERO AISI 1020	- Carga estática despreciable - No completa ciclos, nunca realiza un giro completo - Carga por torsión no superior a 1.5N*m
7	Buje eje Servomotor	ACERO AISI 1020	<ul> <li>Pieza de ajuste</li> <li>Carga estática</li> <li>Nula</li> <li>Carga por torsión</li> <li>Nula</li> </ul>
8	Bloque contrapeso	ACERO AISI 1020	<ul> <li>No está sometido a ningún tipo de carga considerable</li> </ul>
9	Base Brújula	EMPACK	<ul> <li>Pieza de adecuación</li> <li>Carga por torsión despreciable</li> </ul>

10	Soporte Acelerómetro	ALUMINIO 2024 T4	<ul> <li>Pieza de adecuación</li> <li>Carga estática y torsional despreciable</li> </ul>
11	Soporte Base Brújula	EMPACK	<ul> <li>Pieza de adecuación</li> <li>Carga estática y torsional despreciable</li> </ul>
12	Placa Superior Soporte Antena	ALUMINIO 2024 T4	<ul><li>Pieza</li><li>adecuación</li><li>Carga estática</li><li>despreciable</li></ul>
13	Placa Inferior Soporte Antena	ALUMINIO 2024 T4	<ul> <li>Pieza de adecuación</li> <li>Carga estática despreciable</li> </ul>
15	Acople Eje dynamixel	ACERO AISI 1020	<ul> <li>Carga estática despreciable</li> <li>Carga por torsión no superior a 1.5N*m</li> </ul>
18	Freno Mecánico superior	ALUMINIO 2024 T4	<ul> <li>Carga estática nula</li> <li>Carga por impacto no superior a 5Kg</li> </ul>
19	Freno Mecánico inferior	ALUMINIO 2024 T4	<ul> <li>Carga estática no superior a 500g</li> <li>Carga por impacto no superior a 5kg</li> </ul>

Tabla 26. Explicación de no cálculo por resistencia piezas ilustración 57

N° de pieza	Nombre de pieza	Material	Explicación
1	Acople motor horizontal a base superior	ACERO AISI 1020	<ul> <li>Carga estática Nula</li> <li>Carga por torsión no Superior a 0.5N*m</li> </ul>
2	Platina soporte motor horizontal	ALUMINIO 2024 T4	- Carga estática despreciable
4	Platina base motor horizontal	ACRÍLICO	- Carga estática no superior a 3Kg
7	Platina base unión trípode	ACRÍLICO	- Carga estática no Superior a 4Kg

## 8.5 Cálculo y selección del motor para el movimiento en el plano horizontal

Para el cálculo del torque y la potencia de este motor se debe conocer:

- Fuerza de Fricción Fr entre las ruedas y la placa en la que están soportadas
- La Carga total que están soportando las 4 Ruedas
- La distancia que hay desde el centro de aplicación del torque (centro del eje del motor) hasta el punto de aplicación de la carga en cualquiera de las 4 ruedas(las ruedas son equidistantes respecto al centro del eje del motor).

En la siguiente ilustración se puede ver el comportamiento de las cargas:

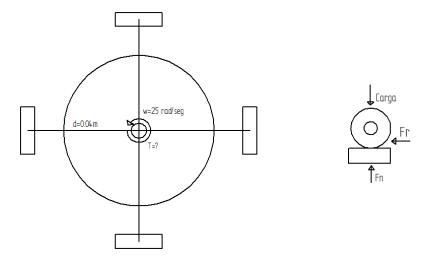


Ilustración 65. Vista superior de mecanismo de giro horizontal.

Como se Puede apreciar en la Ilustración 65, cada rueda está siendo sometida al Peso total del mecanismo superior, dado que son 4 ruedas, esta carga se divide en 4:

$$Fcarga = 27.6N$$

$$Fcargarueda = \frac{27.6N}{4} = 6.975N$$

Para poder determinar el torque que debe tener el motor necesitamos conocer la fuerza de fricción total que hay entre las 4 ruedas, para esto se hace necesario conocer primero la Fuerza de Fricción Fr que actúa sobre una rueda:

$$Fr = Fn * \mu_d$$
 Ecuación 52

Donde:

Fn = fuerza normal que hace la superficie en contra de la carga  $\mu_d$  = Coeficiente de fricción Dinámico que depende de las superficies en contacto

Dado que se conoce la Carga sobre cada rueda se puede obtener la Fuerza normal Fn. Dado que es una carga igual y opuesta se tiene que:

$$Fn = 6.975N$$

El valor de  $\mu_d$  se puede obtener de la tabla A1.12 ANEXO A, dado que no fue posible encontrar un valor exacto para Acero-acrílico se opta por tomar el valor del coeficiente para Acero-Teflón que es:

$$\mu_d = 0.04$$

Conocido este valor se calcula el valor de Fr para una rueda como sigue:

$$Fr_{rueda} = Fn * \mu_d$$

$$Fr_{rueda} = 6.975N * 0.04 = 0.279N$$

Ahora se puede calcular el valor de la fuerza de fricción total que se halla multiplicando  $Fr_{rueda}$  por la cantidad de ruedas así:

$$Frtotal = 0.279N * 4 = 1.116N$$

La ecuación de torque quedó definida así:

$$Tmotor = Frtotal * d$$

Reemplazando en la ecuación anterior se obtuvo:

$$Tmotor = 1.116N * 0.04m = 0.04464 N * m$$

Conocido el valor de *Tmotor* se pudo obtener la potencia.

La potencia está definida por la siguiente ecuación:

$$P = T * W$$

Donde:

T= Torque en N \* m

W= Velocidad Angular en rad/seg

Reemplazando en la ecuación anterior se obtuvo:

$$Pmotor = 0.0464N * m * 25 rad/seg$$

$$Pmotor = 1.16 Watts$$

Una vez Calculadas Potencia y Torque se obtiene un motor con las Siguientes Características:

$$Torquemotor = 0.4464Kg * cm$$

$$Pmotor = 1.16Watts$$

Ahora se procede a calcular la Potencia Eléctrica del motor:

Para un factor de seguridad Fs = 1.5 y una eficiencia del 90% se tiene:

$$Pelecmotor = \frac{Pmotor*Fs}{Eficiencia} = \frac{1.16Watts*1.5}{0.9} = 1.93Watts$$

Dadas las condiciones de diseño de sistema se escoge un motor de Corriente Directa cuyas especificaciones se pueden encontrar en la tabla A1.14 ANEXO A. Como se observa en la tabla, el motor escogido cumple con los requerimientos de carga y velocidad del sistema.

#### 9. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DEL ANTENA RASPY

Este capítulo enmarca todos los aspectos relacionados al diseño del sistema de control del Antena Raspy 1.

Para el funcionamiento del sistema se deben implementar dos controladores:

- Un control para el movimiento de la antena en el plano horizontal, este control relaciona un motor de corriente DC con una brújula magnética, como feedback, que da como valor el ángulo de la misma respecto al Norte de la Tierra.
- Un control para el movimiento de la antena en el plano vertical, este control relaciona un servomotor con un acelerómetro (sensor de inclinación) el cual da un valor de inclinación respecto al plano horizontal, dado que el servomotor implementado en el diseño (Dynamixel AX-12) tiene integrado un controlador propio no se hace necesario diseñar un controlador como tal, esto se explicara en el punto 9.2.

# 9.1 Diseño y Obtención del Controlador para el movimiento del sistema en el plano horizontal.

Para el diseño del controlador se parte de conocer los parámetros de estabilidad del sistema:

- Tiempo de establecimiento requerido para enfocar a la antena
- Tiempo Pico máximo que puede tener el sistema

## 9.1.1 Tiempo de establecimiento del Controlador

Como se aprecia en el punto 8.1.4, el valor de la velocidad angular requerida en el movimiento horizontal de la antena es de 238.73 revoluciones por minuto, es decir, el momento cuando el avión pasa cerca a la antena y está debe girar a máxima velocidad.

Para poder obtener el tiempo de estabilización que requiere el sistema se parte de conocer la cantidad de revoluciones que dará el sistema en un segundo, si se tiene que la velocidad de giro máxima es de 238.73 RPM, el valor de las rev/s es:

$$\frac{Rev}{s} = \frac{238.73RPM}{60seg} = 3.978833 \cong 4rev/s$$

Conocida la cantidad de revoluciones en un segundo se debe conocer el tiempo que toma dar una revolución, de esta forma:

$$1seg \rightarrow 4rev$$
  
 $xseg \rightarrow 1rev$ 

$$xseg = \frac{1rev * 1seg}{4rev} = 0.25seg$$

De esta forma se obtiene que el tiempo requerido para estabilizar el sistema en condiciones críticas de operación será de 0,25 segundos, dado que en la práctica las condiciones críticas no tendrán aplicabilidad (debido a factores de peso y tamaño propios del UAV, también por seguridad) y sabiendo que está velocidad se toma cuando el avión pasa a un metro de la antena, se decide tomar un tiempo de estabilidad un poco mayor, por lo cual:

$$Ts \cong 1s$$

## 9.1.2 Tiempo pico del Sistema

Como se describió en el apartado anterior, dadas las condiciones reales de funcionamiento del objeto a seguir(UAV) no se hace necesario tomar un tiempo pico tan pequeño basado en el tiempo de estabilidad obtenido, por lo cual:

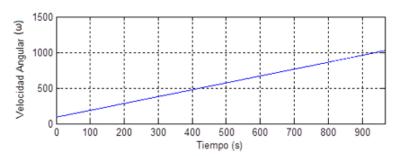
$$Tp \cong 0.8s$$

#### 9.1.3 Identificación de la planta

Como primer paso en el diseño del control se debe encontrar una relación adecuada entre las variables de entrada y salida a medir, es decir, la relación existente entre la Variable de entrada que es la velocidad angular  $\omega$  del motor y la variable de salida que es la posición angular  $\theta$ . Para la identificación del sistema se tomaron un total de 48568 datos para poder tener un estimativo adecuado del comportamiento del sistema, al graficar estos datos respecto al tiempo se obtienen las siguientes gráficas:



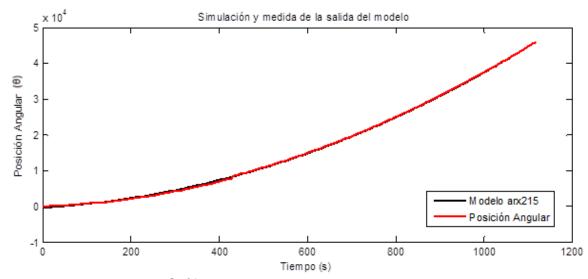
Gráfica 5. Posición Angular θ vs t tiempo.



Gráfica 6. Velocidad Angular ω vs t tiempo.

Conocido el comportamiento de las variables de entrada y salida del sistema, se procede a realizar la identificación del mismo haciendo uso de la herramienta IDENT de Simulink del Software Matemático MATLAB.

Después de analizados varios modelos en el IDENT se encontró que el modelo que de mayor con el comportamiento del sistema fue el obtenido mediante el proceso de *modelo de polinomios arx215* presentando una compatibilidad del 98.76% cuyo comportamiento se puede ver en la siguiente gráfica:



Gráfica 7. Modelo arx215 vs Tiempo.

Una vez usada la herramienta IDENT y usado el modelo de polinomios arx215 se obtiene la siguiente función de transferencia  $G_p(z)$ :

$$G_p(z) = \frac{0.001 * z}{z^2 - 1.4006 * z + 0.4006}$$

Conocida la función de transferencia del sistema, se puede trabajar con ella y aplicar diversos métodos de control para encontrar el más adecuado, para el diseño del control se trabajaron los siguientes métodos:

- Obtención de una Constante *K* que estabilice el sistema por el método de Jurv.
- Diseño de un Compensador por el Método de la Bisectriz
- Diseño de un Controlador PI
- Diseño de un Controlador PID

#### 9.1.4 Método de Jury

El método de Jury [11] permite determinar los valores de K en los cuales el sistema es estable:

Dado que este método no permite hacer un cálculo de K relacionando directamente los parámetros básicos de diseño tales como tiempo de establecimiento Ts y Tiempo pico Tp, se dan unos valores tentativos a fin de verificar en la simulación si están en una cercanía aceptable, de esta manera:

$$T_s = 5seg$$

$$T_P = 4seg$$

Con una función de transferencia:

$$G_p(z) = \frac{0.001 * z}{z^2 - 1.4006 * z + 0.4006}$$

La función de transferencia de lazo cerrado se define mediante la siguiente ecuación:

$$G_{lc}(z) = \frac{k*G_p(z)}{k*G_p(z)+1}$$
 Ecuación 53

Multiplicando G(z) con K se obtiene:

$$G_{lc}(z) = \frac{k * 0.001 * z}{z^2 + 0.001 * (k - 1400.6) * z + 0.4006}$$

Aplicando los criterios de Jury:

Se toma el denominador de la función de lazo cerrado P(z):

$$P(z) = z^2 + 0.001 * (k - 1400.6) * z + 0.4006$$

Se evalúa el primer criterio de Jury:

Reemplazando se obtuvo:

$$P(1) > 0 = 1^2 + 0.001 * (k - 1400.6) * 1 + 0.4006 > 0$$
  
 $k > 0$ 

Se evalúa el segundo criterio de Jury:

$$P(-1) > 0$$

Reemplazando se obtuvo:

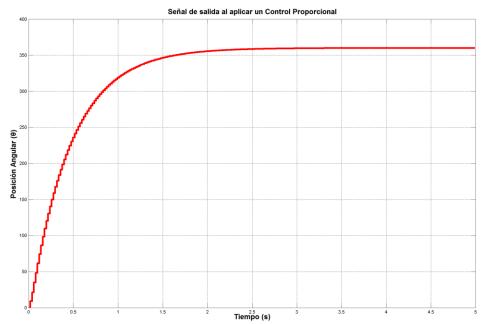
$$P(-1) > 0 = (-1)^2 + 0.001 * (k - 1400.6) * (-1) + 0.4006 > 0$$
  
 $k < 2801.2$ 

Como la constante K no se encuentra en el primer y último término de P(z) resultaría innecesario evaluar el tercer criterio de Jury, por lo tanto podemos afirmar que al

aplicar el método de Jury a nuestra función de transferencia los rangos válidos para k aplicando un control proporcional son:

Obtenido este rango de valores en los cuales K hace el sistema estable, se procede a realizar una simulación con un valor de K cualquiera:

Con una k = 25 se obtiene la siguiente respuesta del sistema:



Gráfica 8. Comportamiento de la Salida de la Antena Raspy 1 (Valores de la brújula magnética).

Al analizar la gráfica se obtuvieron los siguientes parámetros de estabilidad:

$$Ts \cong 4s$$

$$Tp \cong 3.5s$$

Una vez se ha comprobado que un valor de K obtenido mediante el método de jury permite estabilizar el sistema, se procede a determinar el valor de la K que permite obtener el tiempo de estabilización y pico de acuerdo a los requerimientos planteados arriba.

Realizado un proceso de iteración se obtiene el siguiente valor de K para:

$$Ts = 1s$$
  
 $Tp = 0.8s$ 

$$K = 60$$

Aplicando este valor de K al sistema se obtiene la siguiente respuesta:

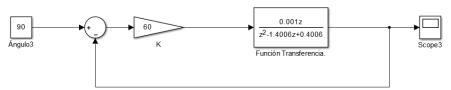
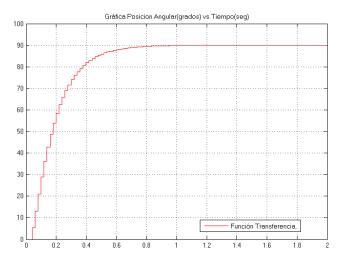
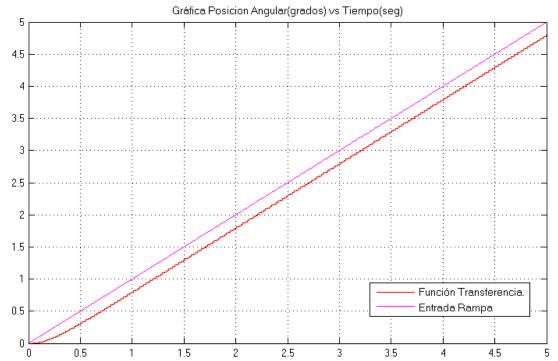


Ilustración 66. Diagrama de Bloques Sistema con Compensador Proporcional



Gráfica 9 Comportamiento de Salida del sistema para parámetros de estabilidad requerido.

Haciendo la prueba de este controlador con una entrada rampa (simulando que el UAV se acerca en dirección de la antena) se obtuvo la siguiente gráfica:



Gráfica 10. Visualización del error del control proporcional con entrada rampa de 0° a 5° de giro horizontal.

Se puede observar en la gráfica 14 que el control proporcional tiene un error aproximado del 20% en cada grado de giro avanzado.

Como último se aplica el criterio de estabilidad de Nyquist para determinar si el margen de estabilidad del sistema es superior a 0.4

Para obtener el margen de estabilidad se hace necesario aplicar el criterio de Nyquist al sistema con el controlador proporcional en lazo abierto como se muestra en la siguiente ilustración:

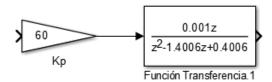
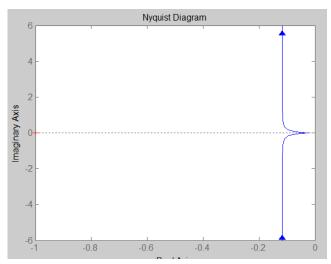


Ilustración 67. Función de transferencia del sistema con Kp en lazo abierto

Se procede a realizar el diagrama de Nyquist mediante Matlab obteniendo la siguiente gráfica:



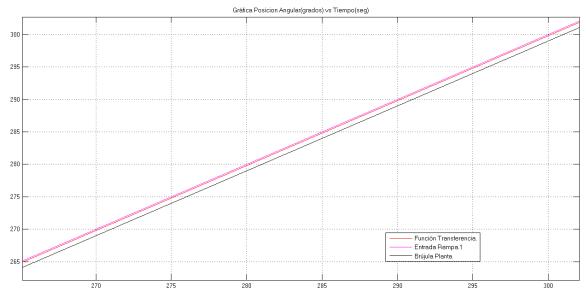
Gráfica 11. Diagrama de estabilidad de Nyquist del sistema con el controlador en lazo abierto.

Para determinar si el sistema es estable se deben realizar los siguientes pasos:

- Medir la distancia desde el punto (-1,0) en el diagrama hasta el punto más cercano de la respuesta del sistema.
- Verificar si la distancia obtenida entre los dos puntos mencionados arriba es superior a 0.4, si lo es se puede decir que el sistema es estable.

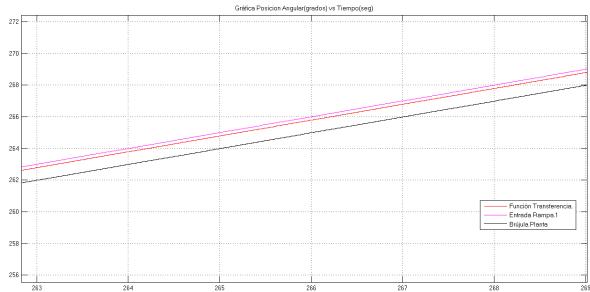
Como se puede apreciar en la gráfica 15, la distancia medida desde el punto (-1,0) hasta el punto más cercano de la respuesta (la línea azul en cualquier sector del plano) es de 0.9 el cual es mayor al valor requerido de 0.4.

De las gráficas 13,14 y 15 se puede concluir que un compensador proporcional cumple a cabalidad con los parámetros de diseño requeridos.



Gráfica 12. Comportamiento de la Antena Raspy Vs Comportamiento del sistema identificado y la referencia deseada.

En la gráfica 16 se puede observar el comportamiento del sistema real vs el comportamiento del sistema diseñado y calculado, se presenta una variación cercana al grado.



Gráfica 13. Acercamiento de la gráfica 16 para hacer visible la diferencia entre la entrada, la función de transferencia y la salida de la planta (valores de la Brújula magnética).

## 9.1.5 Diseño de un compensador por el método de la bisectriz

El método de la bisectriz permite obtener un compensador para el sistema el cual está definido por la siguiente expresión:

$$K_{LEAD} = Kc \frac{z-z_0}{z-p_0}$$
 Ecuación 54

Para este compensador se tienen los siguientes parámetros:

Tiempo de muestreo St = 0.0199

Tiempo de establecimiento = 1s

$$Tiempo\ pico=0.8s$$

Conocidos estos valores se obtuvieron los valores de  $\xi$  y  $\omega_n$ 

$$\xi = 0.71359$$

$$\omega_n = 5.6054$$

Con los valores hallados anteriormente se procedió a calcular el polo de diseño  $\mathbf{z}_d$ 

El valor de  $z_d$  es:

$$z_d = 0.9207 + 0.0721i$$

Con el polo de diseño se calculó el valor de los ángulos  $\theta$  y  $\phi$ 

$$\theta = tan^{-1} \left( \frac{imagZ_d}{1 - realZ_d} \right)$$
 Ecuación 55

Haciendo uso de la Ecuación 67:

$$\theta = 42.2633 \, deg$$

El ángulo φ:

$$\varphi = 180 - \text{ángulo}(Gz)$$

El valor del ángulo de Gz se obtiene al evaluar Gz en el polo deseado  $Z_d$ , por tanto:

$$\varphi = 325.6291 deg$$

P<sub>0</sub> está definido por la siguiente ecuación:

$$P_0 = (1 - |magnitudz_d|) * \frac{\cos(\frac{\theta - \varphi}{2})}{\cos(\frac{\theta + \varphi}{2})}$$
 Ecuación 56

De esta manera:

$$P_0 = 0.9157$$

 ${\bf Z}_0$  está definido por la siguiente ecuación:

$$Z_0 = (1 - |magnitudz_d|) * \frac{\cos(\frac{\theta + \varphi}{2})}{\cos(\frac{\theta - \varphi}{2})}$$
 Ecuación 57

De esta manera:

$$Z_0 = 0.8637$$

 $K_C$  está definido por la siguiente ecuación:

$$K_C = \frac{1}{|K_{leadgorrito}*Gz|_{zd}}$$
 Ecuación 58

Sabiendo que:

$$K_{leadgorrito} = \frac{z - 0.8637}{z - 0.9157}$$

Se obtuvo el valor de Kc:

$$K_C = 44.2641$$

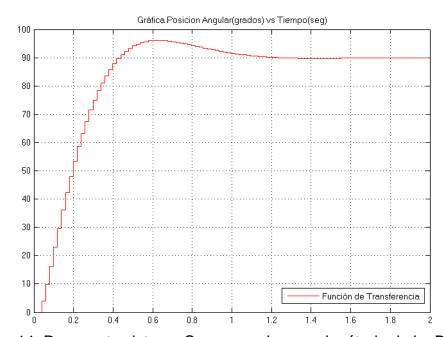
Con el valor de Kc se obtienen todos los valores del Compensador, de esta forma se obtiene:

$$K_{LEAD} = 44.2641 * \frac{z - 0.8637}{z - 0.9157}$$



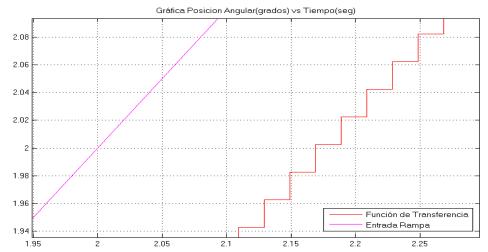
Ilustración 68. Diagrama de Bloques Sistema con compensador por el método de la Bisectriz.

En la siguiente Gráfica se puede apreciar el comportamiento del sistema adecuado con este compensador:



Gráfica 14. Respuesta sistema Compensador por el método de la Bisectriz

Como se puede apreciar en la gráfica 18 el compensador por el método de la bisectriz logra estabilizar el sistema según los criterios de diseño escogidos presentando un sobre pico que puede no ser tan favorable al desempeño del sistema en el seguimiento del UAV.



Gráfica 15. Visualización del error del controlador por el método de la bisectriz con una entrada rampa

Como se observa en la gráfica 19, el error del compensador por el método de la bisectriz es cercano al 8% en cada grado desplazado.

Este compensador puede ser una opción válida a implementar en el sistema.

#### 9.1.6 Diseño de controlador PI

El controlador Pi [11] está definido por la siguiente ecuación:

$$P_i = Kp + \frac{Ki}{z-1}$$
 Ecuación 59

Donde:

$$K_P = 0.45 \, \mathrm{K_{cr}}$$
 Ecuación 60

$$Ki = \frac{K_p * S_t}{t_i}$$
 Ecuación 61

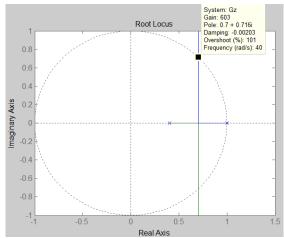
 $t_i$  Se calcula como:

$$t_i = 0.5P_{cr}$$
 Ecuación 62

Para diseñar este controlador se deben encontrar dos parámetros:

- $K_{Cr} = Kcrítica$
- $P_{Cr} = Periodo de Oscilación Crítico$

 $K_{Cr}$  se obtiene del lugar geométrico de las raíces de Gz el cual se puede obtener por medio de MATLAB como se aprecia en la siguiente gráfica:

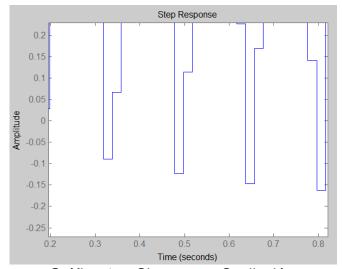


Gráfica 16. . Lugar Geométrico de las Raíces.

De aquí se pudo obtener el valor de  $K_{Cr}$  que es:

$$K_{Cr} = 603$$

Una vez se ha obtenido el  $K_{\it Cr}$ , se le aplicó a la función de transferencia para poner al sistema en un estado oscilante como se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 17 . Sistema en Oscilación.

De la gráfica anterior se obtiene  $P_{Cr}$  que es aproximadamente:

$$P_{Cr} = 0.16$$

Con los valores de  $K_{Cr}$  y  $P_{Cr}$  se puede calcular el valor de las constantes  $K_P$  y  $K_i$ 

$$K_P = 0.45 * (603)$$

$$K_P = 271.35$$

$$t_i = 0.5 * 0.16 = 0.08$$

$$K_i = \frac{K_{Cr} * S_t}{t_i}$$

$$K_i = \frac{271.35 * 0.0199}{0.08}$$

$$K_i = 67.4983125$$

Obtenidos los valores de  $K_P Y K_i$  se obtiene lo siguiente:

$$Pi = 271.35 + \frac{67.4983125}{z - 1}$$

Haciendo la simulación en Simulink en Matlab se obtiene el comportamiento del sistema el cual se puede observar en la siguiente gráfica con su respectivo de diagrama de bloques:

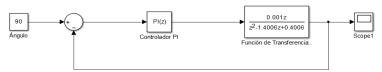
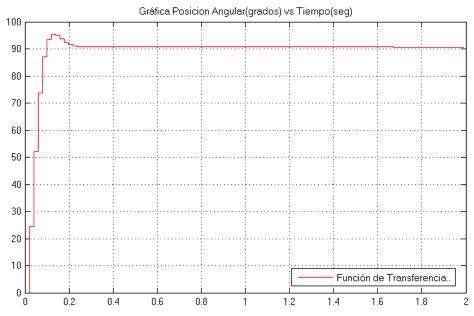


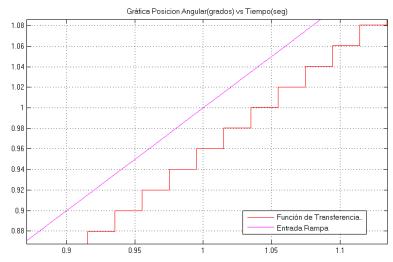
Ilustración 69. Diagrama de Bloques Sistema con Controlador PI.



Gráfica 18. Respuesta Sistema con Controlador PI.

Al analizar la gráfica 22 se puede observar que el controlador PI estabiliza el sistema presentando una leve oscilación y presentando un sobre pico considerable.

El error al aplicar al sistema una entrada rampa se puede apreciar en la siguiente gráfica:



Gráfica 19. Visualización del error del control PI con entrada rampa de 0° a 5° de giro horizontal.

En la gráfica 23 se puede apreciar que el error es de aproximadamente un 5% en cada grado desplazado.

#### 9.1.7 Diseño de control PID

El controlador PID está definido por la siguiente ecuación:

$$PID = K_P + \frac{K_i}{z-1} + K_d * (1 - z^{-1})$$
 Ecuación 63

Donde:

$$K_P = 0.6 \, \mathrm{K_{cr}}$$
 Ecuación 64

$$K_i = \frac{K_P S_t}{\tau_i}$$
 Ecuación 65

$$K_d = \frac{K_p * t_d}{S_t}$$
 Ecuación 66

Calculando  $K_P$ :

El valor de K<sub>cr</sub> es el mismo al obtenido en el diseño del Controlador PI, por tanto:

$$K_P = 0.6 * (603) = 361.8$$

Calculando K<sub>i</sub>:

El valor de  $\tau_i$  y  $P_{cr}$  es el mismo al obtenido en el diseño del Controlador PI, por tanto:

$$t_i = 0.08$$

$$K_i = \frac{361.8 * 0.0199}{0.08} = 89.978$$

Calculando K<sub>d</sub>:

Para el cálculo de  $K_d$  se debe obtener el valor de  $t_d$ , por tanto:

$$t_d = 0.125 * P_{cr}$$

P<sub>cr</sub> es el mismo al obtenido en el diseño del controlador PI, entonces:

$$t_d = 0.125 * 0.16 = 0.02$$

Conocido  $t_d$  se calcula  $K_d$ :

$$K_d = \frac{361.8 * 0.02}{0.0199} = 363.6181$$

El controlador PID es entonces:

$$PID = 361.8 + \frac{89.978}{z - 1} + 363.6181(1 - z^{-1})$$

Haciendo la simulación en Simulink en Matlab se obtiene el comportamiento del sistema el cual se puede observar en la siguiente gráfica con su respectivo de diagrama de bloques:

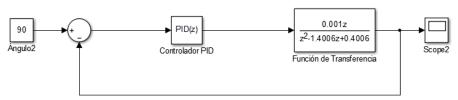
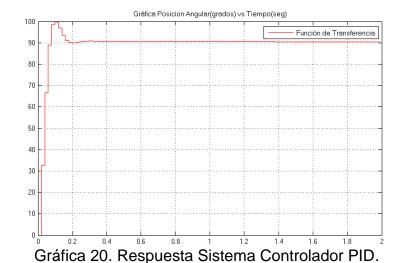
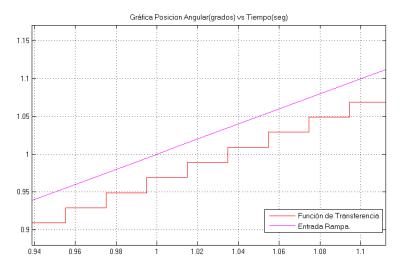


Ilustración 70. Diagrama de Bloques Sistema Con controlador PID.



Como se puede ver en la gráfica 24 el controlador PID estabiliza el sistema generando un sobre pico cercano al 10% que puede resultar desfavorable para el seguimiento del UAV. Por tanto no se implementa en el sistema.



Gráfica 21. Visualización del error del controlador PID con entrada Rampa de 0 a 5° de giro horizontal.

Como se puede apreciar en la gráfica 25, el error del controlador es cercano al 3% en cada grado desplazado.

Una vez diseñados y simulados los 4 controladores posibles se presenta la siguiente tabla donde se realiza una comparación breve entre los mismos:

Tabla 27. Comparación de controladores calculados.

TIPO CONTROLADOR	ESTABILIZA EL	TIEMPO ESTABLECIMIENTO	TIEMPO	SOBREPICO	ERROR DEL CONTROLADOR(por
	SISTEMA		PICO	JODNEI ICO	grado desplazado)
P por Jury	Si	Cumple	Cumple	No	20%
Compensador Adelanto	Si	Cumple	Cumple	Si	8%
Controlador Pl	Si	No cumple	No cumple	Si	5%
Controlador PID	Si	No cumple	No cumple	Si	3%

De la tabla anterior se pueden sacar las siguientes Conclusiones:

- El controlador Proporcional obtenido por el método de Jury prueba ser bastante efectivo dado que cumple a cabalidad los parámetros requeridos usados en su cálculo, presenta el error por grado desplazado más grande, sin embargo esto solo representa un desfase entre la entrada y la salida de 0.2° que para este sistema es despreciable dado que el sistema se desplaza en ángulos mucho mayores a los mostrados en la gráfica 12. Presenta además la ventaja de ser de fácil implementación en el sistema dado que se configura como una ganancia en el software (Python) del microordenador.

- El compensador por el método de la bisectriz resulta bastante efectivo para el control del sistema ya que cumple de igual forma con los parámetros de diseño especificados para el mismo, a pesar de tener un error por grado desplazado considerablemente menor al controlador Proporcional, no representa un cambio significativo dado el rango de ángulos que el sistema está en capacidad de cubrir, de igual manera, presenta un sobre pico que puede resultar desfavorable en el seguimiento del UAV.
- El controlador PI cumple con el requisito primario de estabilizar el sistema, presenta problema al no cumplir con los parámetros de diseño establecidos, presenta un error por grado desplazado menor que los dos controladores anteriores (cercano al 5%), pero como se mencionó en el caso del controlador por el método de la bisectriz, el cambio no es significativo para el rango de trabajó de la antena en el giro horizontal.
- El controlador PID estabiliza el sistema pero no en los parámetros de diseño requeridos, presenta el menor error por grado desplazado de los 4 controladores trabajados.

Una vez analizados detenidamente los 4 controladores diseñados, se opta por escoger el controlador proporcional obtenido por el método de Jury, a pesar de presentar el mayor error por grado desplazado no presenta problema en su implementación dado que el desfase es menor a 0.2° que medidos en el rango de ángulos que el sistema trabaja en el giro horizontal (360°) son ínfimos. Al aplicar el controlador en la práctica, este siguió con una variación de 1 a 2 grados el valor deseado. Es difícil de estimar el error mínimo con el que puede contar el sistema ya que no se tuvo en cuenta el patrón de radiación de la Antena proporcionada por el semillero de investigación AEROTECH.

## 9.2 Controlador para el movimiento del sistema en el plano vertical

Como se mencionó en las consideraciones sobre el diseño de los controladores, el motor usado para permitir el movimiento de la antena en el plano vertical cuenta con un control integrado en su circuito interno.

Para este caso solo es necesario conocer el valor de inclinación entregado por el acelerómetro y así obtener el valor de la referencia como se mostró al inicio del capítulo, una vez se ha conocido la referencia se le indica al motor por medio de una librería disponible en arduino el valor del ángulo en el cual debe ubicarse.

## 9.2.1 Librería arduino con Dynamixel ax-12

Esta librería permite controlar parámetros del motor tales como:

- Máximo y Mínimo Torque de operación
- Valores Máximos y Mínimos de Temperatura interna del motor
- Funcionamiento como Motor Dc o Servomotor
- Valor del ángulo en el que se quiere posicionar.

Para conocer con mayor detalle el funcionamiento de la Librería y el funcionamiento del Dynamixel se invita al lector a visitar los siguientes Links de interés:

- Savage Electronics, Electronics for everyone. Arduino y Dynamixel Ax-12
   <a href="http://savageelectronics.blogspot.com.co/2011/01/arduino-y-dynamixel-ax-12.html">http://savageelectronics.blogspot.com.co/2011/01/arduino-y-dynamixel-ax-12.html</a>> [citado el 04 de noviembre de 2015]
- Trossen Robotics. Dynamixel Ax-12a Robot Actuator User Manual <a href="http://support.robotis.com/en/techsupport\_eng.htm#product/dynamixel/axseries/dxl">http://support.robotis.com/en/techsupport\_eng.htm#product/dynamixel/axseries/dxl</a> actuator.htm>[citado el 04 de noviembre de 2015]

## 9.3 Obtención de los ángulos de referencias

Antes de entrar en detalle acerca del proceso para la obtención de las referencias que debe seguir el sistema antena Raspy 1, es necesario aclarar un aspecto relacionado al error que presentan los módulos GPS utilizados para determinar las respectivas referencias.

Dado que en distancias cercanas los módulos GPS incorporados al sistema y al UAV presentan errores de ubicación considerablemente grandes (4 metros aproximadamente), se hace complicado el obtener una estimación correcta del ángulo en el cual debe ubicarse la antena para cuando debe enfocarse el UAV estando éste a corta distancia de la Antena. Una solución a este problema la aporta el semillero AEROTECH comunicándose con el UAV a corta distancia con otro emisor y receptor omnidireccional. Cuando el avión excede un mínimo de 50 metros de distancia, aquí ya es posible localizarlo dentro del cono de apertura del patrón de radiación de la antena sin que el error de los GPS afecte esta comunicación y seguimiento.

## 9.3.1 Obtención del Ángulo de referencia en el Plano Horizontal

Para el cálculo del ángulo se parte de conocer las coordenadas geográficas en las cuales están ubicados el sistema de seguimiento (Antena Raspy) y el objeto a seguir (UAV).

Para la obtención de estos datos se hace uso de los módulos GPS integrados en el sistema de seguimiento (antena) y en el UAV así:

- Se obtienen los datos de Latitud y Longitud del GPS integrado en el sistema de seguimiento y de igual forma en el módulo acoplado al UAV
- Se trabaja con un punto base o punto de referencia, en este caso el norte terrestre y se toma su dato de Latitud y Longitud.

Una vez se han obtenido los valores de Latitud y Longitud de todos los puntos a considerar se puede hacer un estimativo de las distancias entre:

- El sistema de seguimiento y el UAV
- El sistema de seguimiento y el punto base o de referencia(Norte Terrestre)
- El UAV y el punto base o de referencia(Norte Terrestre)

Calcular la distancia entre dos puntos sobre un plano puede ser relativamente sencillo, sin embargo, cuando los puntos se ubican sobre la esfera terrestre, el proceso de cálculo tiende variar debido a que se debe tener en cuenta la curvatura de la tierra. Para hacer el cálculo de la distancia entre los dos puntos tomando en cuenta la curvatura de la tierra se hace uso de la ecuación de HAVERSINE:

La ecuación de HAVERSINE relaciona los datos de longitud y Latitud de los puntos involucrados para determinar mediante el uso de reglas trigonométricas la distancia aproximada entre los dos puntos, la ecuación está definida por la siguiente Expresión:

$$dhaversine = Rtierra * C$$
 Ecuación 67

Donde:

Rtierra = Radio de la tierra, este valor es comúnmente 6371Km si se mide desde la línea ecuatorial, dado que la tierra no es una esfera perfecta, este valor tiende a variar dependiendo del punto de medición del mismo, si se hace la medición desde el Polo el radio sería de aproximadamente 6357 Km. Dada la variación se hace un cálculo rápido del error que se presenta en esta medida a fin de validar el uso del radio medido desde el ecuador:

$$e\% = \frac{6371km - 6357Km}{6357Km} * 100\% = 0.2\%$$

El error no supera el 1%, por lo que el estimativo tomando el radio medido desde el ecuador es válido.

*C*= constante de Haversine que está definida por la siguiente ecuación:

$$C = 2 * \arctan(\sqrt{a}, \sqrt{1-a})$$
 Ecuación 68

Donde a es otra constante que está definida por la siguiente ecuación:

$$a = sin^2 \left(\frac{\Delta Lat}{2}\right) + \cos(Lat1) * \cos(Lat2) * sin^2 \left(\frac{\Delta Lon}{2}\right)$$
 Ecuación 69

Siendo:

$$\Delta Lat = Lat2 - Lat1$$
  
 $\Delta Lon = Lon2 - Lon1$ 

Una vez se ha aplicado la fórmula de HAVERSINE se puede obtener la distancia entre los 3 puntos mencionados arriba.

Cuando se conocen las 3 distancias, se genera en la esfera terrestre un triángulo esférico como el que se puede apreciar en la siguiente Ilustración:

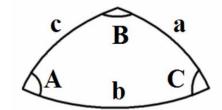


Ilustración 71. Triángulo esférico.

Donde los vértices A, B y C representan la posición del sistema de seguimiento, el UAV y el punto base o de referencia y a, b y c representan la distancia existente entre los mismos las cuales se calculan con el criterio de HAVERSINE mencionado anteriormente.

Si tomamos que:

A= Posición de la Antena

B= Punto base o de referencia

C= Posición del UAV

Y conocidos los valores de a, b y c calculados previamente se puede conocer el valor de cualquiera de los 3 ángulos que se generan entre los vértices A, B y C.

Para el control del sistema de seguimiento, el ángulo en el plano horizontal que se debe conocer es el generado en el vértice A. Si se mira este ángulo desde el punto base o de referencia, es el ángulo en el cual debe ubicarse la antena para enfocar al UAV.

Para entender de forma más clara supóngase que la antena está enfocada mirando hacia el vértice B (Punto base o de referencia) como se muestra en la siguiente ilustración:

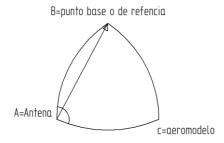


Ilustración 72. Antena enfocada hacia el norte.

Si la antena está enfocada hacia el norte y se desea que la misma enfoque al UAV, el ángulo que se genera en el Vértice A es el que la misma debe desplazarse para poder enfocarlo.

Para el cálculo de este ángulo se hace uso del Teorema del Coseno.

El teorema del coseno hace una relación entre los lados y los ángulos de un triángulo a fin de determinar alguno de estos, el Teorema del coseno está definido por las siguientes ecuaciones:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 * b * c * sen(A)$$
 Ecuación 70  
 $b^2 = a^2 + c^2 - 2 * a * c * cos(B)$  Ecuación 71  
 $c^2 = a^2 + b^2 - 2 * a * c * cos(C)$  Ecuación 72

Conocidos los 3 lados del triángulo esférico se puede hacer uso de cualquiera de estas ecuaciones para determinar el valor de los ángulos, para este caso el valor del ángulo en el vértice A estaría dado al despejarlo en la ecuación 70.

Despejando A queda:

$$A^{\circ} = sen^{-1} \left( \frac{c^2 + b^2 - a^2}{2*h*c} \right)$$
 Ecuación 73

El valor del ángulo que se genera en el vértice A es el valor de la referencia que el controlador deberá seguir cuando el sistema esté realizando el seguimiento al aeromodelo.

## 9.3.2 Obtención del Ángulo de referencia en el Plano Vertical

A parte de proveer datos como la Latitud y Longitud, los Módulos GPS incorporados en el sistema de seguimiento y en el UAV proporcionan el dato de altitud al que se encuentran, esto es la altura respecto al nivel del mar. Para conocer el valor del ángulo en el cual debe ubicarse la antena en el plano vertical es necesario conocer la diferencia de alturas existente entre el aeromodelo y el sistema de seguimiento, esta diferencia se define como:

$$\Delta Alt = Altitudaeromodelo - Altitudsistemase quimiento$$
 Ecuación 74

Conocida la diferencia y con el valor de la distancia b entre la antena y el UAV (se obtiene por medio de la fórmula de HAVERSINE descrita en el apartado anterior) se puede calcular el valor del ángulo haciendo uso de las funciones trigonométricas básicas.

En la siguiente llustración se puede detallar el ángulo a hallar:

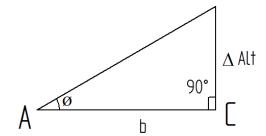


Ilustración 73. Cálculo del Ángulo en el plano vertical.

El valor del Ángulo Ø es:

$$\emptyset = tan^{-1} \left( \frac{\Delta A l t}{b} \right)$$
 Ecuación 75

Este ángulo será el ángulo de referencia que el controlador del Servomotor deberá seguir en el plano vertical para hacer un enfoque adecuado del UAV.

## 9.4 Diagramas de bloque del sistema de control.

Se presenta a continuación el diagrama de bloques general del sistema de control del Antena Raspy 1:

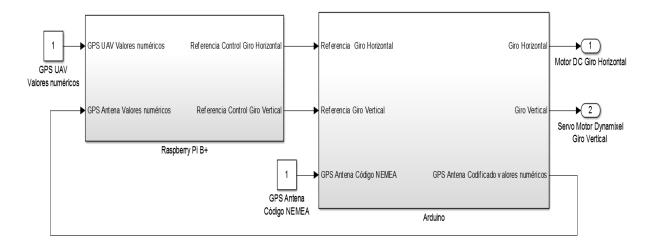


Ilustración 74. Esquema de Funcionamiento de Control

## 10. ADECUACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DEL ANTENA RASPY

Para el correcto funcionamiento del sistema se debe implementar un circuito que regule y entregue los valores adecuados de corriente a todos los elementos electrónicos del sistema (sensores, reguladores, drivers etc). En la siguiente Tabla se pueden apreciar los elementos utilizados y su descripción:

ELEMENTOS ELECTRÓNICOS					
Batería DHB 12-5	Batería	CMPS-10	Brújula magnética		
LM7809	Regulador Voltaje	GY-85	Acelerómetro		
L293D	Puente H	TARJETA L26	Módulo GPS		

	DRIVER-BUFFER		Módulos Inalámbricos
74LS241			Comunicación Serial
	mann	XBEE S2	KEEC
			N. C.
ARDUINO MEGA ADK	Micro-controlador		Módulo Gps
		GTPA 010	
	Micro-ordenador		
RaspBerry Pi B+			

Tabla 28. Elementos usados en el circuito de la antena raspy

Para información detallada de cada uno de los componentes mostrados arriba mirar anexo D.

Dado que no se requiere diseñar algún tipo de circuito específico en el sistema, solo es necesario conocer el consumo general de sistema, se parte de conocer la corriente consumida por cada elemento para así hacer un cálculo acertado de la corriente total consumida por el sistema:

El consumo total del sistema está definido por la siguiente ecuación:

#### Donde:

Ireguladorvoltaje= Corriente entregada por el regulador IpuenteH= Corriente consumida por el puente H Idynamixel= Corriente Consumida por el Dynamixel I74ls241= Corriente consumida por el Driver

Se parte de conocer el valor de la corriente de la batería:

Ibateria = 5A \* 24h

#### 10.1 Corriente entregada por el Regulador Iregulador voltaje

Esta Corriente depende del consumo de los elementos que se alimentan del regulador, dicho esto:

Ireguladorvoltaje = Iarduino

Donde *Iarduino* es la corriente total consumida por la tarjeta y los sensores alimentados por ella:

Iarduino = Ibr'ujula + Igpsl26 + IgpsGTPO + Ixbee + IGy85 + Ibluetooth

El regulador de voltaje es capaz de entregar una corriente máxima de 1.5A, para poder conocer el valor de la corriente consumida por el mismo se debe conocer el valor de la corriente consumida por la arduino y conociendo los valores de la corriente consumida por cada sensor se tiene:

Iarduino = 0.025A + 0.050A + 0.048A + 0.040A + 0.00024A + 0.010A = 0.173A

Esta corriente es el valor que consumen los sensores sin tomar en cuenta el valor de corriente que consume la misma tarjeta con sus componentes integrados, un valor aproximado de esta corriente es de 1A, entonces:

Iarduino = 1.0A + 0.163A = 1.173A

De esta manera:

Ireguladorvoltaje = 1.173A

#### 10.2 Corriente consumida por el puente H

Para conocer el valor de la corriente consumida por el inversor de giro se debe conocer el valor de la corriente consumida por el motor Dc conectado a el.

Experimentalmente se obtiene que la corriente consumida por el motor a 12 voltios es:

Imotor = 700mA

*IpuenteH* está definida por:

IpuenteH = ImotorIpuenteH = 700mA

El puente h l293D está diseñado para suplir corrientes máximas de 800mA, por lo que cumple con el requisito de corriente del motor.

#### 10.3 Corriente Consumida por el Dynamixel

Según las especificaciones del motor:

Idynamixel = 1.5A a 12v a su torque nominal

#### 10.4 Corriente Consumida por el 74ls241

Según las especificaciones del integrado:

I74ls241 = 24mA

#### 10.5 Corriente Consumida por la Raspberry Pi B+

Según las especificaciones:

Iraspberry = 1A

Conocidos todos los valores de consumo de corriente se calcula el consumo total del sistema:

$$Itotal = 1.173A + 0.7A + 1.5A + 0.024mA + 1A = 4.397A$$

El consumo total del sistema es de aproximadamente 4.4A, al comparar este valor de consumo con la corriente entregada por la Batería se tiene:

Ibatería > Itotal

Por tanto, la batería escogida es adecuada para implementar como fuente alimentación de todo el sistema.

Partiendo de la especificación de la batería y sabiendo que tiene una autonomía de 24h con 5A de carga, se tiene:

$$5A \rightarrow 24horas$$
  
 $4.4A \rightarrow x$ 

Se obtiene que la autonomía aproximada del sistema será de aproximadamente 21 horas.

A continuación se muestran los esquemáticos de los componentes del circuito. Esquemas realizados en Fritzing:

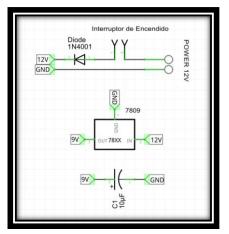


Ilustración 75. Circuito de entrada de potencia y regulación a 9V.

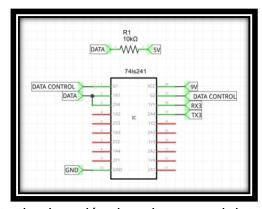


Ilustración 76. Circuito de elevación de pulso para el dato de entrada del motor Dynamixel AX-12.

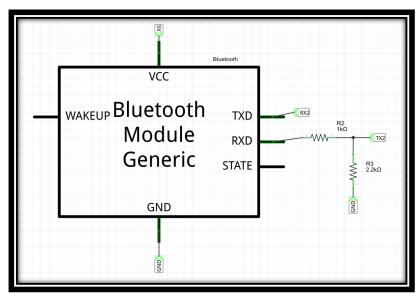


Ilustración 77. Circuito del JY-MCU utilizado para la comunicación por Bluetooth con Android.

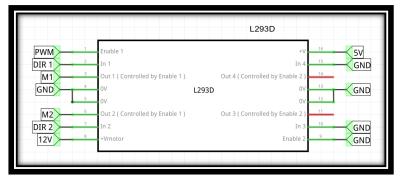


Ilustración 78. Circuito de potencia para el Motor DC de 12V usado para el giro horizontal de la Antena Raspy 1.

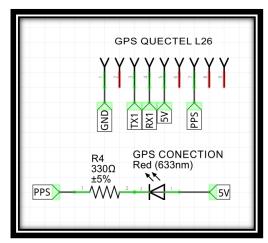


Ilustración 79. Conexión del GPS Quectel L26.

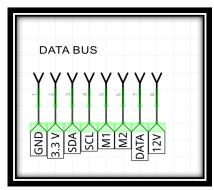


Ilustración 80. Conexión del Bus de Datos para la Antena Raspy 1.

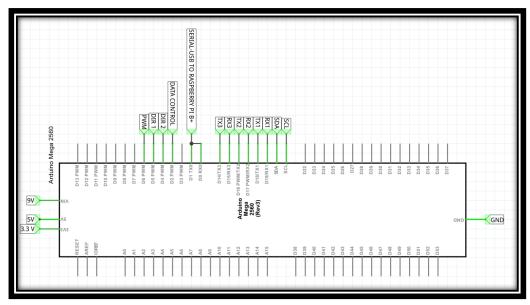


Ilustración 81. Conexión del Arduino Mega 2560.

## 10.6 Caracterización de la programación y niveles de control.

El manejo y control de la Antena Raspy fue basado en un modelo Maestro-Esclavo en el cual el Raspberry Pi B+ es el cerebro de las operaciones matemáticas y el Arduino Mega 2560 es el micro controlador que lee los sensores y mueve los diferentes motores.

El sistema se inicializa de forma manual por medio de un celular con sistema operativo Android y la aplicación desarrollada propiamente para la antena. En esta aplicación se pueden monitorear las coordenadas GPS del avión y si hay comunicación con este o no.

Ya que hay la posibilidad de que el avión pierda conexión con la antena por obstáculos que se atraviesen en la línea de visión, esta se basará en una base de datos que se tenga previa al vuelo con la ruta estimada que el avión llevará a cabo. Esto servirá en caso de que se pierda comunicación con el avión y la antena tenga que buscarlo para comunicarse nuevamente con el.

Cuando el sistema es encendido la antena buscara una posición inicial que será enfocada hacia el norte en posición horizontal. Luego de esto deberá enfocarse de forma manual al avión para que queden comunicados. Al realizar esto, el movimiento de la antena se basará en la posición GPS y la Altura suministrada por el sistema de telemetría del avión.

La antena cuenta con tres sensores de los cuales se basó el control realizado. Entre estos están:

- GPS
- Acelerómetro GY-85
- Brújula Magnética

El GPS se usa para comparar la posición de la antena y la posición del avión para de esta manera girar y enfocarlo de forma visual para lograr la transferencia de este a no más de 30 km de distancia.

El Acelerómetro GY-85 se usa para inclinar la antena respecto a la superficie terrestre para que esta enfoque el avión a lo largo de una línea horizontal que dependerá de la altura del avión.

La Brújula Magnética sirve para saber hacia que ángulo respecto al norte terrestre está apuntando la Antena Raspy. Esta es la referencia para enfocar el avión según la posición GPS que este tenga.

La Antena Raspy tiene un panel de control el cual muestra de forma gráfica el comportamiento de todo el sistema. Aquí se puede monitorear las coordenadas GPS y las alturas sobre el nivel del mar del avión y de la antena.

Con un Mouse y un teclado tradicional podrá modificarse características básicas del sistema como 2 offset para corregir errores que se puedan presentar con el continuo uso de los sensores. También se puede reprogramar y hacer modificaciones en el código desde este panel de control. Aquí también se indicará si hay comunicación o no con el sistema.

#### 10.7 Prueba y demostración

Como hacer la prueba del sistema no será fácil por disponibilidad de los equipos de Aeronáutica, se realizará con un cuadricóptero y un módulo GPS conectado a este. La información será transmitida de forma inalámbrica a la antena por medio de Xbee S2 para ver como la antena enfoca al cuadricóptero a partir de la posición GPS que el Gps le transmita a esta.

## 10.8 Código y programación:

El Raspberry Pi B+ cuenta con todo un código basado el control matemático del sistema de posicionamiento vertical y horizontal de la Antena Raspy. Este maneja las diferentes ecuaciones diferenciales y ecuaciones de control obtenidas anteriormente en la caracterización de los dos sistemas de control necesarios para el posicionamiento vertical y el posicionamiento horizontal. Es importante tener en cuenta que el Raspberry sólo recibe la información que le suministra el Arduino

Mega 2560 y que este no está conectado directamente con ningún elemento de sensado y actuadores.

## 10.9 Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema

Para detallar el diagrama de bloques donde se explica la lógica general del sistema se invita al lector a mirar el anexo F.

#### 11. CONCLUSIONES

- El diseño de distintos tipos de controladores permite tener un criterio más acertado sobre la naturaleza del sistema y así mismo conocer el más efectivo para una aplicación en particular, es decir, que se adecúa más a mi sistema partiendo de diseños previos.
- Los sistemas de seguimiento automático para aeromodelos prueban ser una herramienta infalible en la obtención de datos de comportamiento y dinámica de los mismos. Una lectura constante permite alta precisión en cualquier estudio que se lleve a cabo.
- La correcta adecuación del código NMEA de los sistemas GPS facilita en gran medida el trabajo de adecuación del sistema para la ubicación del UAV, sin una interpretación adecuada, el código NMEA puede acomplejar el proceso de seguimiento.
- Los errores en estado estacionario de los diferentes controladores diseñados no presentan una variación considerable dado que el rango de giro de la antena es mucho mayor al máximo error presentado en los mismos (0.2° por cada grado desplazado).
- No siempre la aplicación de un control más robusto garantiza el adecuado funcionamiento de un sistema. calculados otros controladores de forma teórica, se optó por implementar un controlador PID y un compensador por el método de la bisectriz, se presentó un inconveniente al momento de

ejecutar el código en el microcontrolador, el sistema perdía velocidad en el tiempo de respuesta volviéndose incapaz de realizar el seguimiento en tiempo real. Al implementar el control proporcional, la velocidad de respuesta del microcontrolador mejoró considerablemente y ya fue posible seguir el UAV en tiempo real.

- El seguimiento automático del UAV implica contar con equipos de comunicación considerablemente especializados. El alcance a mas de 50 metros debe ser obligatorio para cumplir con el minimo error establecido de 20°. Es importante considerar el error de los GPS que es aproximadamente de 4 metros.
- Para la sustentación del proyecto no se podrá realizar el seguimiento predictivo (en caso de pérdida de señal) ya que es necesario contar con un piloto automático que siga una trayectoria predefinida. Se deseaba contar con esa base de datos de coordenadas respecto a un tiempo estimado, que sería proporcionada por el semillero de Investigación AEROTECH. Teniendo esta base de datos se podía estimar una coordenada a la que estaría el UAV según el tiempo transcurrido en el vuelo en caso de pérdida de la señal.

\_

#### 12. RECOMENDACIONES

- Se invita al lector a hacer un estudio exhaustivo sobre la teoría de declinación magnética para hacer un cálculo más exacto sobre los ángulos de referencia para la ubicación del sistema. De igual forma profundizar en todos los aspectos relacionados al uso de las fórmulas de Haversine para hacer un cálculo más preciso de la distancia entre dos puntos cuando la distancia es menor a 20Km.
- Trabajar las ecuaciones de Vincenty para determinar de forma más precisa la distancia entre dos puntos a partir de sus datos de longitud y latitud, estas ecuaciones tienen en cuenta más parámetros para dar un resultado sumamente preciso sobre estas distancias.
- Para los interesados en profundizar y mejorar el proyecto, es importante analizar la teoría sobre patrones de radiación en antenas unidireccionales para una mejor estimación del error máximo tolerable en las variables de posicionamiento del sistema. En este documento se asumió que el avión debe permanecer enfocado en línea recta por la antena.
- Es importante trabajar en la recolección de la información necesaria para obtener un dato acertado de la referencia a seguir dado que el sistema actual trabaja con módulos gps que presentan un error demasiado grande en distancias muy pequeñas, por lo cual se requiere determinar mejores formas de obtener la referencia adecuada a cortas distancias.

## 13. BIBLIOGRAFÍA

- 1. BUDYNAS,NISBETT. Richard,J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. Mexico D.F. McGraw-Hill Interamericana. 2008. 1062p.
- 2. BEER, JOHNSTON, EISENBERG. Ferdinand, E. Rusell, Elliot R. Mecánica vectorial para ingenieros. Estática. Mexico D.F. McGraw-Hill Interamericana. 2007. 621p.
- 3. BEER, JOHNSTON, CORNWELL. Ferdinand E, E. Rusell. Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica. Mexico D.F. McGraw-Hill Interamericana. 2010. 1365p.
- 4. "X/Y Tracking Antenna Systems eliminate keyhole effect." Thomasnet News (January 22, 2014): 1. Regional Business News, EBSCOhost (accessed February 1, 2015).
- 5. Uav Navigation, gtrack-tracking.antenna<a href="http://www.uavnavigation.org/products/gtrack-tracking-antenna">http://www.uavnavigation.org/products/gtrack-tracking-antenna</a>[citado el 06 de enero de 2016]

- 6. Unmanned systems source, basic-tracking-antennasystem<a href="http://www.unmannedsystemssource.com/product/basic-tracking-antenna-system">http://www.unmannedsystemssource.com/product/basic-tracking-antenna-system</a>[citado el 06 de enero de 2016]
- 7. Persistent systems, Tracker-antenna<a href="http://www.persistentsystems.com/pdf/TrackerAntenna\_SpecSheet.">http://www.persistentsystems.com/pdf/TrackerAntenna\_SpecSheet.</a> pdf>[citado el 06 de enero de 2015]
- 8. Uav Navigation, Gtrack-tracking-antenna<a href="http://www.uavnavigation.org/products/gtrack-tracking-antenna>[citado el 06 de enero de 2016]</a>
- 9. Marcus Uav, med-tracking-antenna<a href="http://www.marcusuav.com/medtrackingantenna/">http://www.marcusuav.com/medtrackingantenna/<a href="http://www.marcusuav.com/medtrackingantenna/">http://www.marcusuav.com/medtrackingantenna/</a>>[citado el 06 de enero de 2016]
- 10. GUSTAFSSON, HENRIKSSON, Jonas, Fredrik. UAV Tracking Device using 2.4 GHz Video Transmitter. Luleå, 2005, 102. Tesis de maestría (Programas de maestría en ingeniería). Universidad de Tecnología de Luleå. Ingeniería. Departamento de ciencia computacional e Ingeniería Eléctrica.
- 11. OGATA. Katsuhiko. Sistemas de control en tiempo discreto. México D.F. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 1996. 757p.

# ANEXO A. Tablas

Tabla A1.1 Propiedades Mecánicas aproximadas de algunos aceros al carbono

	Material	fluencia e	ncia de n tracción ).2%)	Esfuerzo en tra	cción	Elongación (en 2 in)	Dureza Brinell
SAE/ AISI	Estado	ksi	MPa	ksi	MPa	%	НВ
1010	Laminado en caliente	26	179	47	324	28	95
	Laminado en frío	44	303	53	365	20	105
1016	Laminado en caliente	40	275	57	390	25	160
**	Estirado en frío (calibrado)	54	370	78	540	10	200
1020	Laminado en caliente	30	207	55	379	25	111
*	Laminado en frío	57	393	68	469	15	131
	Recocido	43	296	60	414	38	121
1030	Laminado en caliente	38	260	68	469	20	137
	Normalizado @ 1650 °F	50	345	75	517	32	149
	Laminado en frío	64	441	76	524	12	149
	Templado y revenido @ 1000 °F	75	517	97	669	28	255
	Templado y revenido @ 800 °F	84	579	106	731	23	302
	Templado y revenido @ 400 °F	94	648	123	848	17	495
1035	Laminado en caliente	40	276	72	496	18	143
*	Laminado en frío	67	462	80	552	12	163
1040	Laminado en caliente	42	290	76	524	18	149
	Normalizado @ 1650 °F	54	372	86	593	28	170
	Laminado en frío	71	490	85	586	12	170
	Templado y revenido @ 1200 °F	63	434	92	634	29	192
	Templado y revenido @ 800 °F	80	552	110	758	21	241
	Templado y revenido @ 400 °F	86	593	113	779	19	262
1045	Laminado en caliente	45	310	82	565	16	163
*	Laminado en frío	77	531	91	627	12	179
1050	Laminado en caliente	50	345	90	621	15	179
	Normalizado @ 1650 °F	62	427	108	745	20	217
	Laminado en frío	84	579	100	689	10	197
	Templado y revenido @ 1200 °F	78	538	104	717	28	235
	Templado y revenido @ 800 °F	115	793	158	1089	13	444
	Templado y revenido @ 400 °F	117	807	163	1124	9	514
1060	Laminado en caliente	54	372	98	676	12	200
*	Normalizado @ 1650 °F	61	421	112	772	18	229
	Templado y revenido @ 1200 °F	76	524	116	800	23	229
	Templado y revenido @ 1000 °F	97	669	140	965	17	277
	Templado y revenido @ 800 °F	111	765	156	1076	14	311
1095	Laminado en caliente	66	455	120	827	10	248
	Normalizado @ 1650 °F	72	496	147	1014	9	293
	Templado y revenido @ 1200 °F	80	552	130	896	21	269
	Templado y revenido @ 800 °F	112	772	176	1213	12	363
	Templado y revenido @ 600 °F	118	814	183	1262	10	375

<sup>\*</sup> La Siderúrgica del Pacífico S.A. (Sidelpa) produce aceros similares a éstos en perfiles redondos y platinas y en diferentes estados (laminado en caliente, estirado en frio (calibrado), recocido, normalizado, bonificado y hipertemple) y acabados (laminado en caliente, torneado, rectificado, premaquinado y calibrado). Para obtener mayor información puede visitar el sitio http://www.sidelpa.com.

Tomada de <a href="http://www.utp.edu.co/~lvanegas/disl/Cap8.pdf">http://www.utp.edu.co/~lvanegas/disl/Cap8.pdf</a>

Tabla A1.2 Propiedades Mecánicas y físicas de algunos plásticos de ingeniería

<sup>\*\*</sup> Las propiedades dadas para este acero son aproximadas y provienen de la tabla de manejo de aceros especiales: Diaco Ltda., Sidelpa S.A..

Material	Módulo de elasticidad aproximado E		Resistencia máxima a la tracción Su		Resistencia máxima a la compresión Suc		Elonga- ción (en 2 in)	Tempera -tura máxima	Densidad de masa P
	10 <sup>6</sup> psi	GPa	ksi	MPa	ksi	MPa	%	°C	Mg/m <sup>3</sup>
ABS	0.3	2.1	6.0	41	10.0	69	5 a 25	70-95	1.05
ABS con 20-40% de vidrio	0.6	4.1	10.0	69	12.0	83	3	95-110	1.30
Acetal	0.5	3.4	8.8	61	18.0	124	60	105	1.41
Acetal con 20-30% de vidrio	1.0	6.9	10.0	69	18.0	124	7	85-105	1.56
Acrílico	0.4	2.8	10.0	69	15.0	103	5	60-90	1.18
Fluoroplástico (FTFE)	0.2	1.4	5.0	35	6.0	41	100	175-165	2.10
Nylon 6/6	0.2	1.4	10.0	69	10.0	69	60	80-150	1.14
Nylon 11	0.2	1.3	8.0	55	8.0	55	300	80-150	1.04
Nylon 11, 20-30% de vidrio	0.4	2.5	12.8	88	12.8	88	4	120-170	1.26
Policarbonato	0.4	2.4	9.0	62	12.0	83	100	120	1.20
con 10-40% de vidrio	1.0	6.9	17.0	117	17.0	117	2	135	1.35
Polietileno HMW	0.1	0.7	2.5	17	-	-	525	-	0.94
Oxido de polifenileno	0.4	2.4	9.6	66	16.4	113	20	100	1.06
con 20-30% fibra de vidrio	1.1	7.8	15.5	107	17.5	121	5	125	1.23
Polipropileno	0.2	1.4	5.0	35	7.0	48	500	120-160	0.90
con 20-30% de vidrio	0.7	4.8	7.5	52	6.2	43	2	150-160	1.10
Poliestireno de alto impacto	0.3	2.1	4.0	28	6.0	41	2 a 80	60-80	1.07
con 20-30% de vidrio	0.1	0.7	12.0	83	16.0	110	1	80-95	1.25
Polisulfona	0.4	2.5	10.2	70	13.9	96	50	150-175	1.24

Modificada de Norton4.

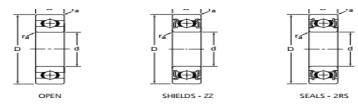
Tomada de http://www.utp.edu.co/~lvanegas/disl/Cap8.pdf

Tabla A1.3 Propiedades Mecánicas de algunas aleaciones de aluminio forjadas y fundidas.

Material			Resiste fluencia e S <sub>v</sub> (0	n tracción	Esfuerzo últi- mo en tracción S <sub>u</sub>		Elongación (en 2 in)	Dureza Brinell
Tipo	Número AA*	Grado	ksi	MPa	ksi	MPa	%	HB
	2017	O	10	69	26	179	22	45
	2024	O	11	76	27	186	22	47
	2024	T3	50	345	70	483	16	120
	2024	T4	47	324	68	469	19	
	3003	H12	17	117	19	131	20	35
Forjado	3003	H16	24	165	26	179	14	47
	3004	H34	27	186	34	234	12	63
	3004	H38	34	234	40	276	6	77
	5052	H32	27	186	34	234	18	62
	5052	H36	34	234	39	269	10	74
	7075	T6	73	503	83	572	11	
	319.0**	T6	24	165	36	248	2.0	80
	$333.0^{\Psi}$	T5	25	172	34	234	1.0	100
Fundido	$333.0^{\Psi}$	T6	30	207	42	290	1.5	105
	355.0**	T6	25	172	35	241	3.0	80
	355.0**	T7	36	248	38	262	0.5	85
* Aluminum	Association.	** Colade	o en arena.	Ψ Colac	do en mold	le permane	nte.	

Tomada de http://www.utp.edu.co/~lvanegas/disl/Cap8.pdf

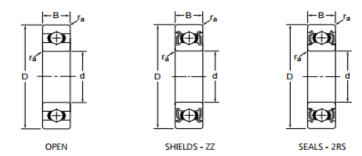
Tabla A1.4 Especificación Rodamiento de Bolas NIS R1560



		Ba	sic Dimens	ions			Basic Load Ratings		Limiting	g Speed	Chamfer Dimension
							Dynamic	Static	Grease	Oil	
d	D	Df	В	Bf	B1	Bf1	c	C <sub>o</sub>			6
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kN	kN	r/min	r/min	max
4.0	10	11.2	3.0	0.6	4.0	8.0	711.00	272.00	48.0	56.0	0.15
4.0	11	12.5	4.0	1.0	4.0	1.0	957.00	350.00	48.0	56.0	0.15
4.0	12	13.5	4.0	1.0	4.0	1.0	957.00	350.00	48.0	56.0	0.20
4.0	13	15.0	5.0	1.0	5.0	1.0	1301.00	488.00	40.0	48.0	0.20
4.0	16	18.0	5.0	1.0	5.0	1.0	1340.00	523.00	36.0	43.0	0.30
5.0	8	9.2	2.0	0.6	-	-	308.00	120.00	53.0	63.0	0.10
5.0	8	9.2	-	-	2.5	0.6	218.00	90.00	53.0	63.0	0.10
5.0	9	10.2	2.5	0.6	3.0	0.6	431.00	169.00	50.0	60.0	0.15
5.0	10	11.2	3.0	0.6	4.0	8.0	431.00	169.00	50.0	60.0	0.15
5.0	11	12.6	-	-	4.0	8.0	716.00	282.00	45.0	53.0	0.15
5.0	11	12.5	3.0	8.0	5.0	1.0	716.00	282.00	45.0	53.0	0.15
5.0	13	15.0	4.0	1.0	4.0	1.0	1077.00	432.00	43.0	50.0	0.20
5.0	14	16.0	5.0	1.0	5.0	1.0	1329.00	507.00	40.0	50.0	0.20
5.0	16	18.0	5.0	1.0	5.0	1.0	1729.00	675.00	36.0	43.0	0.30
5.0	19	22.0	6.0	1.5	6.0	1.5	2336.00	896.00	32.0	40.0	0.30
6.0	10	11.2	2.5	0.6	3.0	6.0	496.00	218.00	45.0	53.0	0.15
6.0	10	11.2	2.5	0.6	3.0	6.0	496.00	218.00	45.0	53.0	0.10
6.0	12	13.2	3.0	0.6	4.0	8.0	716.00	295.00	43.0	50.0	0.20
6.0	12	13.2	3.0	0.6	4.0	8.0	716.00	295.00	43.0	50.0	0.15
6.0	13	15.0	3.5	1.0	5.0	1.1	1082.00	442.00	40.0	50.0	0.15
5.0	15	17.0	5.0	1.2	5.0	1.2	1340.00	523.00	40.0	45.0	0.20
б.0	16	-	5.0	-	5.0	-	1340.00	523.00	40.0	45.0	0.20
6.0	17	19.0	6.0	1.2	6.0	1.2	2263.00	846.00	38.0	45.0	0.30
6.0	19	22.0	6.0	1.5	6.0	1.5	2336.00	896.00	32.0	40.0	0.30
6.0	22	-	7.0	-	7.0	-	3333.00	1423.00	30.0	36.0	0.30
7.0	11	12.2	2.5	0.6	3.0	0.6	455.00	202.00	43.0	50.0	0.15
7.0	11	12.2	2.5	0.6	3.0	0.6	455.00	202.00	43.0	50.0	0.10
7.0	13	14.2	3.0	0.6	4.0	8.0	541.00	276.00	40.0	48.0	0.20
7.0	13	14.2	3.0	0.6	4.0	8.0	541.00	276.00	40.0	48.0	0.15
7.0	14	16.0	3.5	1.0	5.0	1.1	1173.00	513.00	40.0	50.0	0.15
7.0	17	19.0	5.0	1.2	5.0	1.2	1605.00	719.00	36.0	43.0	0.30
7.0	19	22.0	6.0	1.5	6.0	1.5	2336.00	896.00	36.0	43.0	0.30

Tomade de: NIS Bearings General Catalogue

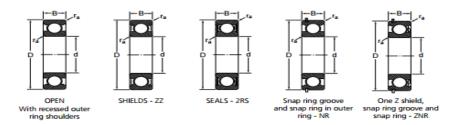
Tabla A1.5 Especifiación Rodamiento de Bolas NIS 608



		Ba	sic Dimens	ions			Basic Loa	d Ratings	Limiting	g Speed	Chamfer Dimension
							Dynamic	Static	Grease	Oil	
d mm	D mm	Df mm	B mm	Bf mm	B1 mm	Bf1 mm	C kN	C₀ kN	r/min	r/min	r <sub>a</sub> max
7.0	22	25.0	7.0	1.5	7.0	1.5	3287.00	1379.00	30.0	36.0	0.30
7.0	26	-	9.0	-	9.0	-	4563.00	1983.00	28.0	34.0	0.30
8.0	12	13.2	2.5	0.6	3.5	0.8	543.00	274.00	40.0	48.0	0.15
8.0	12	13.2	2.5	0.6	3.5	0.8	543.00	274.00	40.0	48.0	0.10
8.0	14	15.6	3.5	8.0	4.0	0.8	817.00	386.00	38.0	45.0	0.20
8.0	14	15.6	3.5	8.0	4.0	0.8	817.00	386.00	38.0	45.0	0.15
8.0	16	18.0	4.0	1.0	5.0	1.1	1252.00	592.00	36.0	43.0	0.20
8.0	19	22.0	6.0	1.5	6.0	1.5	2237.00	917.00	36.0	43.0	0.30
8.0	22	25.0	7.0	1.5	7.0	1.5	3293.00	1379.00	34.0	40.0	0.30
8.0	24	-	8	-	8.0	-	3333.00	1432.00	28.0	34.0	0.30
8.0	28	-	9	-	9.0	-	4563.00	1983.00	28.0	34.0	0.30
9.0	14	15.5	3	0.8	4.5	0.8	919.00	468.00	36.0	42.0	0.10
9.0	17	19.0	4	1.0	5.0	1.1	1327.00	668.00	36.0	43.0	0.20
9.0	20	23.0	6	1.5	6.0	1.5	2467.00	1081.00	34.0	40.0	0.30
9.0	24	27.0	7	1.5	7.0	1.5	3356.00	1444.00	32.0	38.0	0.30
9.0	26	-	8	-	8.0	-	4563.00	1983.00	28.0	34.0	0.60
9.0	30	-	10	-	10.0	-	4659.00	2080.00	24.0	30.0	0.60

Tomada de: NIS Bearings General Catalogue

Tabla A1.6 Especificación Rodamiento de Bolas NIS 6001



Basi	c Dimen	sions	Basic Loa	d Ratings	Limiting	g Speed	Chamfer Dimension	Mass			Designati	ion	
			Dynamic	Static	Grease	Oil			Open	Shielded	Sealed	With Snap Ring Groove	With Snap Ring
d	D	В	C	Co			r <u>a</u> max			72	2RS	N	NR
mm	mm	mm	kN	kN	r/min	r/min	mm	kg					
10	15	3	0.540	0.200	30,600	36,720	0.2	0.002	6700	ZZ	2RS	-	-
10	19	5	1.260	0.680	23,400	30,600	0.3	0.005	6800	ZZ	2RS	N	NR
10	22	6	2.970	1.260	22,500	28,800	0.3	0.011	6900	ZZ	2RS	N	NR
10	26	8	4.130	1.790	18,000	25,200	0.3	0.019	6000	ZZ	2RS	N	NR
10	26	12	4.160	1.770	17,100	-	0.3	0.025	63000	-	2RS	-	-
10	28	8	4.130	1.790	16,200	23,400	0.3	0.022	16100	ZZ	-	-	-
10	30	9	4.590	2.150	17,100	23,400	0.6	0.032	6200	ZZ	2RS	N	NR
10	30	14	4.570	2.130	15,300	-	0.6	0.040	62200	-	2RS	-	-
10	35	11	6.890	3.140	16,200	21,600	0.6	0.053	6300	ZZ	2RS	N	NR
10	35	17	7.260	3.060	13,500	-	0.6	0.060	62300	-	2RS	-	-
12	18	4	0.580	0.250	28,800	34,560	0.2	0.002	6701	ZZ	2RS	-	-
12	21	5	1.260	0.810	19,800	27,000	0.3	0.007	6801	ZZ	2RS	N	NR
12	24	6	3.050	1.340	18,000	25,200	0.3	0.013	6901	ZZ	2RS	N	NR
12	28	7	4.580	2.150	17,100	23,400	0.3	0.019	16001	ZZ	-	-	-
12	28	8	4.590	2.150	17,100	23,400	0.3	0.022	6001	ZZ	2RS	N	NR
12	28	12	4.570	2.130	15,300	-	0.3	0.029	63001	-	2RS	-	-
12	32	10	6.140	2.750	16,200	21,600	0.6	0.035	6201	ZZ	2RS	N	NR
12	32	14	6.210	2.790	13,500	-	0.6	0.045	62201	-	2RS	-	-
12	37	12	8.750	4.580	15,300	19,800	1.0	0.057	6301	ZZ	2RS	N	NR
12	37	17	8.780	3.740	12,600	-	1.0	0.070	62301	-	2RS	-	-
15	21	4	0.590	0.270	24,300	29,160	0.2	0.004	6702	ZZ	2RS	-	-
15	24	5	1.730	1.070	18,000	25,200	0.3	800.0	6802	ZZ	2RS	N	NR
15	28	7	3.600	1.820	17,100	23,400	0.3	0.018	6902	ZZ	2RS	N	NR
15	32	8	5.040	2.300	16,200	21,600	0.3	0.025	16002	ZZ	-	-	-
15	32	9	5.030	2.570	16,200	21,600	0.3	0.031	6002	ZZ	2RS	N	NR
15	32	13	5.040	2.570	12,600	-	0.3	0.039	63002	-	2RS	-	-
15	35	11	6.890	3.350	15,300	19,800	0.6	0.045	6202	ZZ	2RS	N	NR
15	35	14	7.020	3.380	11,700	-	0.6	0.054	62202	-	2RS	-	-
15	42	13	10.350	4.880	14,400	18,000	1.0	0.080	6302	ZZ	2RS	N	NR
15	42	17	10.260	4.860	10,800	-	1.0	0.110	62302	-	2RS	-	-
17	23	4	0.630	0.320	21,600	25,920	0.2	0.002	6703	ZZ	2RS	-	-
17	26	5	1.970	1.160	17,100	23,400	0.3	0.008	6803	ZZ	2RS	N	NR

Tomada de Nis Bearings General Catalogue

Tabla A1.7 Diámetros y Áreas de roscas métricas de paso fino y Paso Grueso

Diámetro	Se	erie de paso	grueso		Serie de pas	o fino
mayor nominal <i>d,</i>	Paso P,	Área de esfuerzo de tensión	Área del diámetro menor	Paso P,	Área de esfuerzo de tensión	
mm	mm	A <sub>t</sub> , mm <sup>2</sup>	A <sub>r</sub> , mm²	mm	A,, mm²	mm <sup>2</sup>
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	8.0	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	1 <i>57</i>	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	81 <i>7</i>	759	2	915	884
42	4.5	1 120	1 050	2	1 260	1 230
48	5	1 470	1 380	2	1 670	1 630
56	5.5	2 030	1 910	2	2 300	2 250
64	6	2 680	2 520	2	3 030	2 980
72	6	3 460	3 280	2	3 860	3 800
80	6	4 340	4 140	1.5	4 850	4 800
90	6	5 590	5 360	2	6 100	6 020
100	6	6 990	6 740	2	7 560	7 470
110				2	9 180	9 080

<sup>\*</sup>Las ecuaciones y los datos utilizados para elaborar esta tabla se obtuvieron de la norma ANSI B1.1-1974 y B18.3.1-1978. El diámetro menor se determinó mediante la ecuación  $d_r=d-1.226$  869p, y el diámetro de paso a partir de  $d_p=d-0.649$  519p. La media del diámetro de paso y el diámetro menor se usaron para calcular el área de esfuerzo de tensión.

Tomada de: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley 8va Edición Pag 398.

Tabla A1.8 Parámetros de la Rigidez de Varios Materiales

Material	Relación	Módulo de	e elasticidad,		
usado	de Poisson	GPa	Mpsi	A	В
Acero	0.291	207	30.0	0.787 15	0.628 73
Aluminio	0.334	71	10.3	0.796 70	0.638 16
Cobre	0.326	119	17.3	0.795 68	0.635 53
Hierro fundido gris	0.211	100	14.5	0.778 71	0.616 16
Expresión general				0.789 52	0.629 14

Tomada de: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley 8va Edición, pag 416.

Tabla A1.9 Clases métricas de propiedad mecánica de pernos, tornillos y birlos de acero:

Clase de propiedad	Intervalo de tamaños, inclusive	Resistencia de prueba mínima,† MPa	Resistencia mínima a la tensión,† MPa	Resistencia mínima a la fluencia,† MPa	Material	Marca en la cabeza
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero de bajo o medio carbono	4.6
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Acero de bajo o medio carbono	4.8
5.8	M5-M24	380	520	420	Acero de bajo o medio carbono	5.8
8.8	M16-M36	600	830	660	Acero de medio carbono, T y R	8.8
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Acero de medio carbono, T y R	9.8
10.9	M5-M36	830	1 040	940	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	10.9
12.9	M1.6-M36	970	1 220	1 100	Acero aleado, T y R	12.9

Tomada de: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley 8va edición Pag 420.

Tabla A1.10 Coeficientes Wi y Wo para Roscas Estándar

Tipo de filete	$W_i$	$W_o$
UNS/ISO	0.80	0.88
Cuadrada	0.50	0.50
Acme	0.77	0.63
Diente de sierra	0.90	0.83

Tabla A1.11 Valores de Ki(coeficiente de par de torsión)

 $K_i \approx 0.18$ , para pernos lubricados  $K_i \approx 0.21$ , para pernos no lubricados.

Tabla A1.12 Coeficientes de Fricción entre distintos Materiales

Coeficientes de Fricción

Materiales	Coef. de Fricción Estática $\mu_{_{\rm S}}$	Coef. de Fricción Cinética $\mu_{ m k}$
Acero - Acero	0.74	0.57
Aluminio - Acero	0.61	0.47
Cobre - Acero	0.53	0.36
Latón - Acero	0.51	0.44
Cinc - Hierro colado	0.85	0.21
Caucho - Concreto	1.0	0.8
Madera - Madera	0.25-0.5	0.2
Vidrio - Vidrio	0.94	0.4
Cobre - Vidrio	0.68	0.53
Hielo - Hielo	0.1	0.03
Teflón - Teflón	0.04	0.04
Teflón - Acero	0.04	0.04

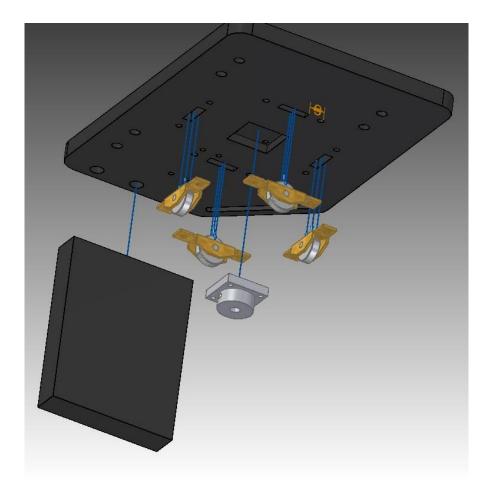
Tomada de http://didactica.fisica.uson.mx/tablas/coefficients\_of\_friction.htm

Tabla A1.13 Especificaciones Motor Dc

Motor St MicroDrive XXX	Velocidad(RPM)=350RPM	Torque(Kg*cm)=4Kg*cm
-------------------------	-----------------------	----------------------

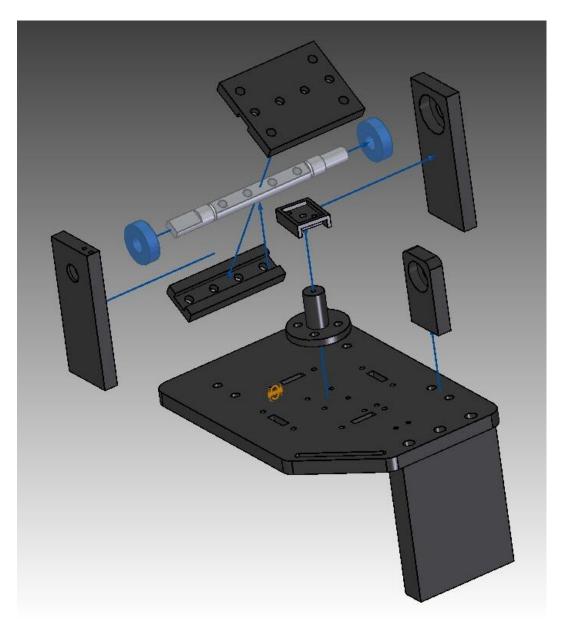
ANEXO B. Explosionados y pasos de ensamblaje del sistema mecánico:

Paso 1: Se unen las rodachinas, el acople del motor para el giro horizontal y el contrapeso a la placa de acrílico. Se atornillan únicamente las rodachinas y el contrapeso. El acople se atornillará en el paso 2.

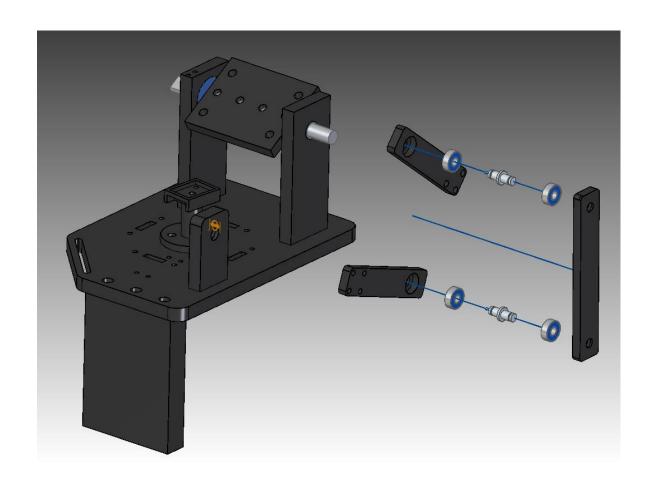


Paso 2: Se agregan los respectivos rodamientos a las bases de los ejes. Al eje de la antena se atornillan las dos placas bases para la placa de aluminio de la antena.

Se incrusta el eje entre los dos rodamientos respectivos y se atornillan las bases a la placa de Acrílico. Luego se sujeta la base del eje del dynamixel a la placa de acrílico. Por último, se acomoda la base del soporte de la brújula, haciendo coincidir sus 4 huecos para tornillos con los 4 huecos del centro de la placa de Acrílico, para de esta manera, atreves de estos, colocar 4 tornillos que sujeten este soporte con el acople que se encontraría al otro lado (acomodado en esa posición en el paso 1). Luego se atornilla el soporte de la brújula a este soporte.

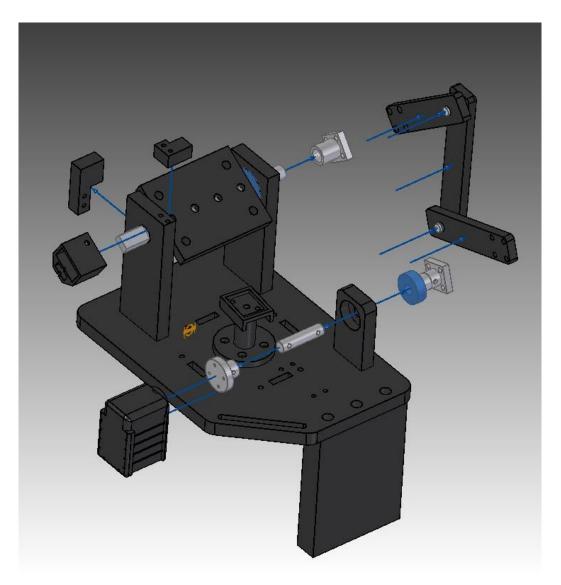


Paso 3: se incrustan los respectivos rodamientos en los eslabones del mecanismo de tres barras. Seguidamente se incrustan los ejes correspondientes.

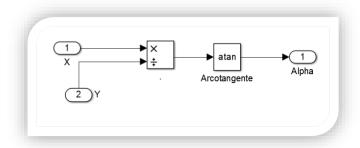


Paso 4: El rodamiento del eje del Dynamixel se incrusta en la base pequeña. El eje del Dynamixel se introduce en este rodamiento hasta la mitad. El acople del

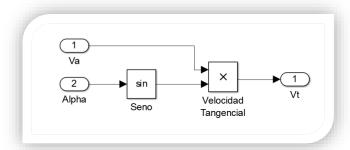
Dynamixel se atornilla con los tornillos de M3. Luego en los dos extremos del eje se agregan los dos acoples respectivos y se sujetan al eje con los pasadores M3. Luego se atornilla el mecanismo de 3 barras al acople del extremo contrario al Dynamixel. El acople del eje de la antena se incrusta en el eje y se asegura con el respectivo prisionero M4. Este se atornilla al 3er eslabón del mecanismo de 3 barras. En el otro extremo del eje de la antena se agrega el soporte para el sensor Acelerometro GY-85. En el soporte más cercano a este elemento se atornillan los frenos mecánicos como se ve en la siguiente ilustración.



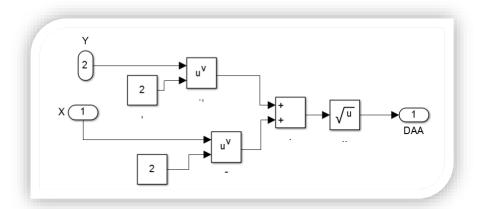
ANEXO C. Diagramas de bloques en Simulink.



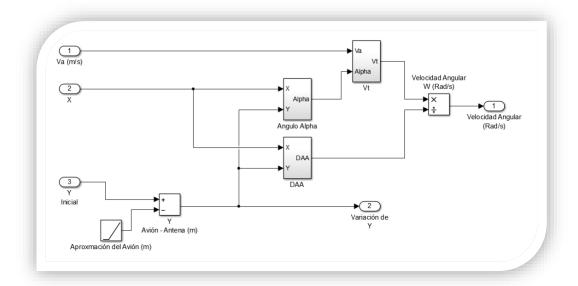
Subsistema para el cálculo de Alpha ( $\alpha$ ).



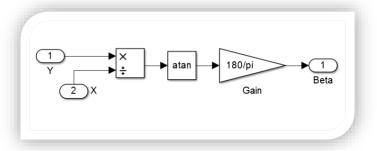
Subsistema para el cálculo de Velocidad Tangencial (Vt)



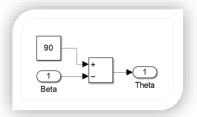
Subsistema para el cálculo de la distancia del avión a la Antena.



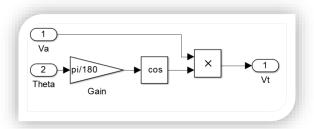
Subsistema para el cálculo de la velocidad angular horizontal en Rad/s.



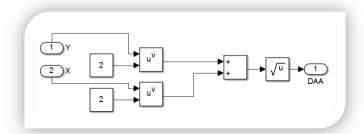
Subsistema para el cálculo de Beta ( $\beta$ ).



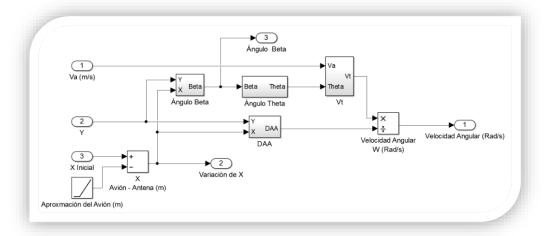
Subsistema para el cálculo de Theta.



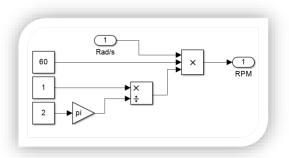
Subsistema para el cálculo de la velocidad tangencial.



Subsistema para el cálculo de la distancia del avión a la Antena Raspy 1 (DAA).



Subsistema para el cálculo de la velocidad angular vertical en Rad/s.

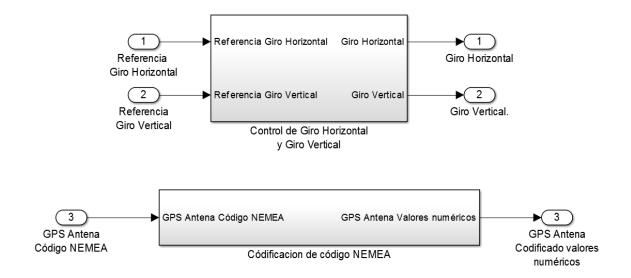


Subsistema para la conversión de Rad/s a RPM.

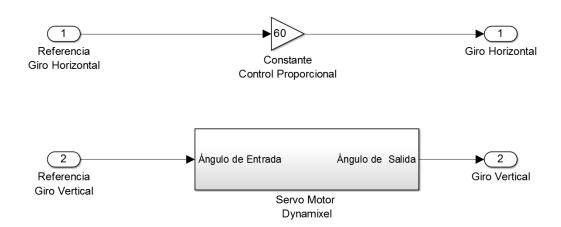
# Esquema de Funcionamiento Maestro (Raspberry Pi)



# Esquema de funcionamiento Esclavo (Arduino Mega ADK)



# Controladores Giro Vertical y Horizontal



### ANEXO G. LICENCIA SOLID EDGE.

