



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

DISEÑO DE MONTURA DE ANTENA GOBERNADA POR COMPUTADORA PARA UN RADIOTELESCOPIO DE 3.2M

Christian José Serrano Padilla

Asesorado por el Ing. Félix Rolando Paz García

Guatemala, agosto de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE MONTURA DE ANTENA GOBERNADA POR
COMPUTADORA PARA UN RADIOTELESCOPIO DE 3.2M**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CHRISTIAN JOSÉ SERRANO PADILLA

ASESORADO POR EL ING. FÉLIX ROLANDO PAZ GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Narda Lucía Pacay Barrientos |
| VOCAL V | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma |
| EXAMINADOR | Ing. Romeo Nefalí López Orozco |
| EXAMINADOR | Ing. José Guillermo Bedoya Barrios |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE MONTURA DE ANTENA GOBERNADA POR COMPUTADORA PARA UN RADIOTELESCOPIO DE 3.2M

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 10 de agosto de 2014.


Christian José Serrano Padilla

Guatemala 17 de Junio del 2015

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ing. González:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que he tenido a bien revisar el trabajo de graduación de Christian José Serrano Padilla, número de carné 200512206 y DPI 2245888340101, titulado "Diseño de Montura de Antena Gobernada por Computadora para un Radiotelescopio de 3.2m", por lo cual me permito recomendar dicho trabajo para la respectiva revisión por parte de los entes encargados de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica y la facultad de Ingeniería.

Sin otro particular, me suscribo atentamente,



Ing. Félix Rolando Paz García
Félix Rolando Paz García
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado No. 8,459



Ref. EIME 36. 2015

Guatemala, 21 de JUNIO 2013.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**DISEÑO DE MONTURA DE ANTENA GOBERNADA POR
COMPUTADORA PARA UN RADIOTELESCOPIO DE 3.2M,** del
estudiante **Christian José Serrano Padilla,** que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área Potencia



SFO



REF. EIME 36. 2015.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; CHRISTIAN JOSÉ SERRANO PADILLA titulado: DISEÑO DE MONTURA DE ANTENA GOBERNADA POR COMPUTADORA PARA UN RADIOTELESCOPIO DE 3.2M, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Fuente Rome



GUATEMALA, 10 DE JULIO 2,015.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE MONTURA DE ANTENA GOBERNADA POR COMPUTADORA PARA UN RADIOTELESCOPIO DE 3.2M**, presentado por el estudiante universitario **Christian José Serrano Padilla**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Pó
Decano



Guatemala, agosto de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|---------------------|--|
| Dios | Por su misericordia, permitirme culminar esta primera meta y todas las que con su ayuda lograré. |
| Mis padres | Por su apoyo incondicional, amor, consejos y atención a lo largo de toda mi vida y de mi carrera profesional. |
| Mi prometida | Porque compartiremos el resto de nuestra vida juntos, disfrutando nuestros logros. |
| Mi hermana | Por estar presente y apoyarme en estos años. |
| Mis abuelos | Leoncio Rodrigo Padilla, José María Serrano Robles (q. e. p. d.), Argelia de Padilla y Juventina de Serrano (q. e. p. d.), por su cariño, apoyo, estima y estar siempre pendiente de mí. |
| Mis tías | Quienes han velado por mí en estos años. |
| Mis amigos | Por su apoyo y ayuda a lo largo de este proceso de aprendizaje y formación. |

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|--|
| Dios | Porque en sus planes me permitió alcanzar esta meta, por darme las fuerzas y sabiduría para realizarlo y la perseverancia para lograrlo. |
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por permitirme desarrollar mi carrera como profesional en tan prestigiosa casa de estudio. |
| Facultad de Ingeniería | En especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por brindarme los conocimientos y darme los valores necesarios para el ejercicio profesional. |
| Mis padres | Por su esfuerzo, brindarme su amor, cariño, comprensión y apoyo para ser un buen profesional. |
| Mi prometida | Por su amor, apoyo y comprensión en esta carrera. |
| Mi hermana | Por su apoyo en los momentos importantes. |
| Mi asesor | Ing. Félix Rolando Paz García, por brindarme sus conocimientos y darme parte de su tiempo para la realización de este trabajo de graduación. |

Mis tías

Por su apoyo en todos los aspectos, en especial a mi tía Nidia de Centeno, quien ha sido como una segunda madre para mí.

Mis amigos

Por su apoyo, compañía, cariño, todos los buenos momentos en esta casa de estudios, en especial a Rony Padilla, Jessicka Juárez y Manuel Mijangos, quienes me acompañaron en este camino.

| | | |
|------------|---|----|
| 1.2.2. | Momento..... | 15 |
| 1.2.3. | Resistencia de materiales..... | 16 |
| 1.2.3.1. | Fuerza axial | 17 |
| 1.2.3.2. | Fuerza cortante..... | 17 |
| 1.2.3.3. | Momento torsionante | 17 |
| 1.2.3.4. | Momento flexionante..... | 17 |
| 1.2.4. | Cojinetes de rodamientos | 17 |
| 1.2.5. | Engranajes..... | 20 |
| 1.2.5.1. | Engranajes rectos | 21 |
| 1.2.5.2. | Engranajes helicoidales | 22 |
| 1.2.5.3. | Engranajes cónicos..... | 23 |
| 1.2.5.4. | Engranaje con tornillo sin fin | 24 |
| 1.2.5.4.1. | Materiales del tornillo y corona..... | 25 |
| 1.2.5.4.2. | Tensiones admisibles..... | 26 |
| 1.2.5.4.3. | Otros parámetros | 27 |
| 1.3. | Resumen..... | 30 |
| 2. | CONCEPTOS DE ASTRONOMÍA..... | 31 |
| 2.1. | Astronomía..... | 31 |
| 2.1.1 | Astronomía óptica..... | 31 |
| 2.1.2. | Radioastronomía | 31 |
| 2.2. | Esfera celeste..... | 32 |
| 2.3. | Coordenadas altacimutales..... | 33 |
| 2.4. | Coordenadas ecuatoriales | 36 |
| 2.5. | Movimiento de los cuerpos celestes..... | 38 |
| 2.6. | Requerimientos observacionales | 40 |
| 2.6.1. | Observación óptica | 40 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.6.2. | Observación en ondas de radio | 41 |
| 2.7. | Resumen | 42 |
| 3. | DISEÑO DE LA MONTURA..... | 43 |
| 3.1. | Antecedentes..... | 43 |
| 3.2. | Modificaciones..... | 44 |
| 3.2.1. | Primera modificación: fijando el movimiento de altitud original..... | 45 |
| 3.2.2. | Segunda modificación: tornillo de movimiento de altura .. | 46 |
| 3.2.3. | Tercera modificación: movimiento de azimut | 50 |
| 3.3. | Análisis de fuerzas y momentos | 51 |
| 3.4. | Cálculos de fuerzas y momentos en el sistema..... | 53 |
| 3.4.1. | Primera posición: apuntando al cenit | 53 |
| 3.4.2. | Segunda posición: apuntando al horizonte matemático.... | 54 |
| 3.5. | Determinación de cojinetes y engranajes del sistema | 56 |
| 3.5.1. | Movimiento de altitud de la montura, cálculo para el sistema corona y tornillo sin fin | 56 |
| 3.5.2. | Movimiento de azimut, cálculo para sistema corona y tornillo sin fin | 62 |
| 3.5.3. | Rodamientos a utilizarse..... | 66 |
| 3.6. | Cálculo de motores basados al análisis de fuerzas y momentos completo | 67 |
| 3.6.1. | Motor para movimiento de altura..... | 68 |
| 3.6.2. | Motor de movimiento de azimut | 70 |
| 3.7. | Selección de motores por consideración de características calculadas | 70 |
| 3.8. | Análisis del funcionamiento de software PicGoto | 72 |

| | | |
|----------------------|---|----|
| 3.9. | Consideraciones de PicGoto y de los motores seleccionados para el diseño de circuito de control y de potencia | 73 |
| 3.10. | Planos del diseño mecánico..... | 75 |
| 3.10.1. | Elemento de sujeción en el punto D | 76 |
| 3.10.2 | Elemento de sujeción en el punto C | 78 |
| 3.10.3. | Montura | 80 |
| 3.11. | Diagramas eléctricos de circuitos..... | 82 |
| 3.12. | Desarrollo del diseño..... | 84 |
| CONCLUSIONES..... | | 89 |
| RECOMENDACIONES..... | | 91 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 93 |
| APÉNDICES..... | | 97 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Principio del motor CD | 4 |
| 2. | Motor de reluctancia variable | 8 |
| 3. | Plan de diseño mecánico | 14 |
| 4. | Ecuación de Stribeck..... | 19 |
| 5. | Ecuación capacidad estática..... | 19 |
| 6. | Partes de un diente de engranaje | 21 |
| 7. | Engranés cónicos externos | 23 |
| 8. | Corona dentada..... | 23 |
| 9. | Engranés cónicos internos | 24 |
| 10. | Tornillo sin fin elemental..... | 25 |
| 11. | Esfera celeste..... | 33 |
| 12. | Observadores..... | 34 |
| 13. | Coordenadas altacimutales..... | 35 |
| 14. | Altura y acimut..... | 36 |
| 15. | Coordenadas ecuatoriales | 37 |
| 16. | Latitudes y movimiento celeste | 39 |
| 17. | Modelo de antena..... | 45 |
| 18. | Montura AO..... | 46 |
| 19. | Montura, punto O | 47 |
| 20. | Simulación antena..... | 48 |
| 21. | Punto C | 48 |
| 22. | Puntos CD..... | 49 |
| 23. | Punto D | 49 |

| | | |
|-----|---|----|
| 24. | Montura, punto AO..... | 50 |
| 25. | D.C.L. apuntando al cenit..... | 51 |
| 26. | Apuntando al horizonte | 52 |
| 27. | Cálculo revoluciones..... | 56 |
| 28. | Motores de pasos de PicGoto..... | 74 |
| 29. | Motor de pasos de PicGoto..... | 74 |
| 30. | Circuito PicGoto | 75 |
| 31. | Vista de planta, elemento D | 76 |
| 32. | Vista de elevación, elemento D..... | 76 |
| 33. | Vista de perfil, elemento D | 77 |
| 34. | Vista 3D, elemento D | 77 |
| 35. | Vista de planta, elemento C | 78 |
| 36. | Vista de elevación, elemento C..... | 78 |
| 37. | Vista de perfil, elemento C | 79 |
| 38. | Vista 3D, elemento C | 79 |
| 39. | Elementos de sujeción C y D | 80 |
| 40. | Vista de planta, montura | 80 |
| 41. | Vista de elevación, montura..... | 81 |
| 42. | Vista de perfil, montura | 81 |
| 43. | Vista 3D, montura | 82 |
| 44. | Diagrama de componente etapa de mando picgoto | 83 |
| 45. | Diagrama de componentes etapa de potencia picgoto | 83 |
| 46. | Montura, apuntando al cenit..... | 84 |
| 47. | Montura, descendiendo desde el cenit | 85 |
| 48. | Montura, 75 grados..... | 85 |
| 49. | Montura, 65 grados..... | 86 |
| 50. | Montura, 55 grados..... | 86 |
| 51. | Montura, 40 grados..... | 87 |
| 52. | Montura, 20 grados..... | 87 |

TABLAS

| | | |
|------|---|----|
| I. | Valores normalizados de módulos | 27 |
| II. | Ángulo <i>versus</i> velocidad de desplazamiento..... | 30 |
| III. | Características de la antena..... | 43 |
| IV. | Conexión | 70 |
| V. | Especificaciones eléctricas..... | 71 |
| VI. | Características físicas | 71 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-----------------|---|
| bps | Bites por segundo |
| cm | Centímetro |
| grad/rev | Grados por revolución |
| gr. | Gramos |
| Kg-cm | Kilogramo centímetro |
| Kgf | Kilogramo fuerza |
| KHz | Kiloherthz |
| lb | Libra |
| lb-pulg | Libra pulgada |
| Mpa | Megapascales |
| m | Metro |
| m/s | Metros por segundo |
| mH | Milihenrios |
| mm | Milímetro |
| N-cm | Newton centímetro |
| N-m | Newton metro |
| Oz-in | Onza pulgada |
| pulg. | Pulgada |
| rad/seg | Radianes por segundo |
| RPM | Revoluciones por minuto |
| rev/seg | Revoluciones por segundo |
| T | Tesla equivale al Gauss en el sistema internacional |
| V | Voltios |

GLOSARIO

| | |
|-------------------|--|
| ASCOM | Protocolo de comunicación común para dispositivos de fines astronómicos. |
| Astro | Cuerpo celeste con forma definida. |
| Axial | Es aquello relativo o vinculado a un eje. |
| Azimut | Es el ángulo formado entre la referencia (norte) y un punto de interés en el mismo plano del punto de referencia y el observador. |
| Bucle | Lazo cerrado. |
| Buje | Elemento en el que un eje se apoya y gira. |
| Cenit | Es al punto de la esfera celeste que se encuentra justo sobre el observador. Es el punto más alto en la bóveda celeste para el observador. |
| Cinemática | Es el estudio de las leyes del movimiento de los cuerpos. |
| Eclíptica | Es la línea que describe el sol en su movimiento aparente durante el año, por la esfera celeste. |

| | |
|----------------------------------|---|
| Engranaje | Elemento utilizado para transmitir potencia de un elemento a otro. |
| Espectro electromagnético | Amplitud de la variedad de frecuencias del conjunto de ondas electromagnéticas. |
| Estator | Parte fija bobinada de un motor eléctrico. |
| Filete | En este contexto es la hélice del tornillo. |
| Firmware | Bloque de programación en lenguaje máquina grabado en un chip para un propósito específico. |
| Fuerza | Se refiere a la magnitud vectorial de la capacidad de cambiar la cantidad de movimiento o forma de un material . |
| Interfaz | Conexión entre dos sistemas. |
| Interferometría | Técnica de radio astronomía en que se utiliza un arreglo de radio telescopios para aumentar la resolución de la imagen. |
| Maquina virtual | Sistema operativo funcionando dentro de otro sistema operativo anfitrión. |
| Mástil | Palo o tubo que sostiene algo. |

| | |
|----------------------------|--|
| Momento | Es la capacidad que posee una fuerza de generar un giro o rotación alrededor de un punto. |
| Montura | Es una interfaz entre el mástil que sostiene el telescopio o radio telescopio. |
| Montura altacimutal | Montura con movimiento en un plano horizontal llamado azimut y un plano vertical llamado elevación. |
| Montura ecuatorial | Montura con movimiento que compensa la rotación de la tierra. |
| Objeto celeste | Cuerpo celeste, astro. |
| Picgoto | Sistema de software y circuitos eléctricos utilizado para control de monturas desde una computadora. |
| Radioastrónomo | Astrónomo que estudia los fenómenos astronómicos en ondas de radio. |
| Radiotelescopio | Dispositivo colector de ondas de radio provenientes de cuerpo celestes. |
| Reluctancia | Resistencia del material al flujo magnético en él. |
| Telescopio | Dispositivo colector de ondas electromagnéticas provenientes de cuerpos celestes que se encuentran en el sector visible del espectro |

electromagnético.

Velocidad sidérea

Velocidad a la que los astros se desplazan por la esfera celeste.

RESUMEN

El diseño de montura, para un radiotelescopio gobernada por medio de una computadora, involucra el conocimiento mecánico, eléctrico, astronómico y de software.

En el capítulo uno se introduce a los conocimientos necesarios para la comprensión del diseño propuesto, principios que fueron utilizados para realizarlo. El capítulo está dividido en conceptos de automatización y elementos de diseño mecánico. Para los primeros se enfoca en las partes de un proceso de automatización y para los elementos de diseño mecánico se enfoca en los conceptos básicos de mecánica. Comienza desde la metodología en el proceso de diseño hasta el cálculo utilizado para los engranajes, culmina con un resumen del capítulo para mostrar su interrelación con el diseño que se encontrará en el capítulo tres.

El capítulo dos trata aquellos conceptos astronómicos necesarios para la comprensión de los requerimientos que el movimiento de la montura debe satisfacer; se hace referencia inicial a la astronomía y su rama de estudio en ondas de radio, la radioastronomía. Se tratarán los sistemas de coordenadas utilizados en astronomía y el movimiento de los cuerpos celestes para comprender el movimiento de la montura. Se termina con un resumen que muestra la interrelación de estos conceptos con el capítulo tres.

El tercer capítulo presenta la propuesta de diseño. Se muestra la montura en su forma original y las modificaciones propuestas para el funcionamiento. Posterior a esto se hacen análisis de fuerzas y momentos para determinar las

condiciones del sistema y estimar los cojinetes, engranes y motores. Se expondrán las consideraciones de PicGoto y se discute el funcionamiento de este sistema y cómo el diseño se apega a sus necesidades de funcionamiento.

Se agregan como apéndices procedimientos para la conexión física del circuito PicGoto a la computadora y la interconexión con otro software de propósito radioastronómico, mostrando así su versatilidad y ventajas.

OBJETIVOS

General

Diseñar una montura de antena gobernada por computadora para un radiotelescopio.

Específicos

1. Presentar los conceptos básicos necesarios para diseño de la montura de la antena que funcionará como radiotelescopio.
2. Presentar los conceptos de astronomía a considerar para el diseño de la montura del radiotelescopio.
3. Proponer el diseño de la montura de antena para ser gobernada por computadora mediante sistema PicGoto.

INTRODUCCIÓN

Como describe Rodrigo Hinojosa en la edición 16 de la revista Argo Navis, la radioastronomía es escuchar al universo, es esa rama de observación sin ver, la observación de lo invisible del universo. Esta observación requiere de radiotelescopios y sofisticada instrumentación para el manejo e interpretación de señales.

El desarrollo de un proyecto radioastronómico situaría al país como participante de un selecto grupo de países que buscan el desarrollo científico. Sin embargo, estos proyectos son muy costosos, tanto en tiempo, recursos y requieren del personal capacitado y comprometido con el proyecto. Por estas causas, en Latinoamérica, fuera de Chile, solo se sabe de proyectos hechos en algunas universidades sudamericanas y en México. Se desarrollan algunos proyectos también en universidades españolas.

La Asociación Guatemalteca de Radioastronomía (AGRA) impulsa este proyecto en Guatemala, un plan con limitaciones de espacio y recursos, buscando abrir la puerta a la investigación en este campo en el país. Su fin es brindar un espacio para estudiantes, institutos, colegios, universidades, para desarrollo de tesis e investigaciones.

El presente trabajo de graduación comprende el diseño de la montura para una antena de 3,2 metros controlada por medio de una computadora para ser usada como radiotelescopio; este tendría la capacidad de ser manejada de forma remota. Se refiere, en este sentido, a automatizar la montura, como el darle a la montura la capacidad de ejecutar los movimientos necesarios

mediante la introducción de coordenadas sencillas, sin necesidad de mas intervención manual y que esta mantenga el curso programado. No es un sistema de lazo cerrado pues no existen sensores para el caso, más bien, mediante la configuración de los parámetros mecánicos del sistema en el programa PicGoto se calcula todo el tiempo la posición de la antena.

Esta montura proveerá a la antena el movimiento necesario para que todas las demás interfaces, que intervienen en el estudio radioastronómico, puedan obtener la información necesaria para la investigación.

1. CONCEPTOS DE INGENIERÍA PARA EL DISEÑO

1.1. Conceptos de automatización

Los procesos automáticos gobernados por ordenador se conciben como un sistema artificial que se comporta de determinadas maneras, se relacionan los comandos o señales de entrada con el estado de un sistema a fin de obtener la salida necesaria para brindar una solución a una determinada tarea.

En la automatización intervienen muchas áreas de las ciencias de ingeniería entre las que se mencionan:

- Ingeniería Eléctrica
- Ingeniería Electrónica
- Ingeniería Mecánica
- Ingeniería de Software
- Ingeniería Industrial

En la configuración de procesos automatizados existen tres tipos de componentes esenciales:

- Sensores que detecten los estados del sistema
- Actuadores que emitan los comandos de control
- Unidades de control (ordenador) que tome decisiones para la ejecución.

1.1.1. Sensores o detectores

Su función es la de captar informaciones y transmitir las en forma de señales procesables hacia las unidades de control. Los sensores pueden clasificarse de acuerdo a los siguientes criterios:

- Modo de funcionamiento
 - Óptico
 - Inductivo
 - Mecánico
 - Capacitivo

- Magnitud de medición
 - Presión
 - Distancia
 - Temperatura
 - Ph
 - Luminosidad
 - Presencia
 - Otros

- Señal de salida
 - Análoga
 - Digital
 - Mecánica

1.1.2. Actuadores

Son los encargados de “actuar” frente a las órdenes de la Unidad de Control. Estos los hay principalmente de dos grandes tipos:

- Neumáticos
- Eléctricos

Los neumáticos tienen la finalidad de transformar la energía contenida en el aire comprimido en energía cinética. En su mayoría estos actuadores son cilindros, entre los cuales existe una gran variedad de tipos.

Los actuadores eléctricos convierten la energía eléctrica en movimiento rotacional o lineal. Estos son mayormente motores, que van desde los de corriente directa hasta grandes motores trifásicos y desde motores de algunos gramos hasta varias toneladas.

En un sentido muy específico al tema solo interesan los motores CD y se dedicarán las siguientes líneas a ellos.

1.1.2.1. Motores CD

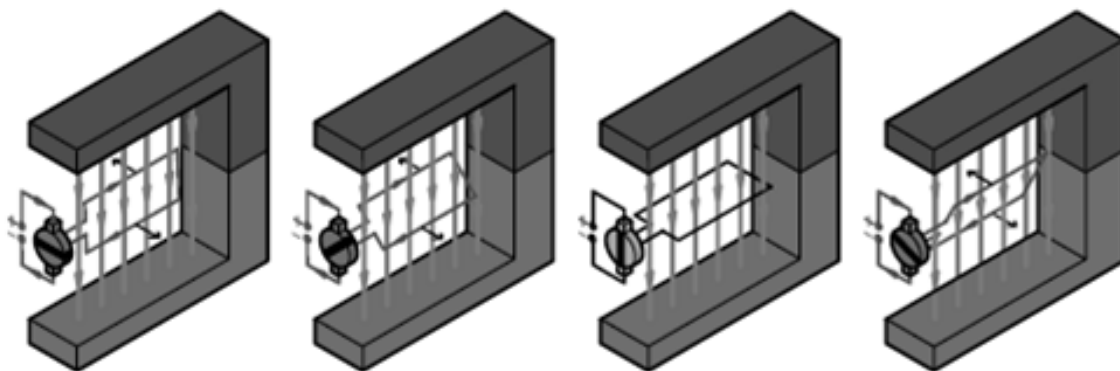
Un motor CD es un motor que funciona por corriente directa, es decir, un campo eléctrico con polaridad constante en el tiempo. Esto generará el flujo de corriente eléctrica e interactuará con un campo magnético para generar un par sobre el eje del motor y movimiento de rotación deseado.

1.1.2.1.1. Principio del motor CD

Si un cable conductor por el que fluye una corriente I se encuentra en un campo magnético B actuará sobre él una fuerza F . El vector de fuerza resultante F será ortogonal al plano formado por los vectores I y B . El sentido de este vector se puede determinar fácilmente utilizando la “regla de la mano derecha”. Todo ello significa que el cable experimentará una aceleración en sentido de la fuerza F . El motor CD aprovecha este principio efecto de la fuerza para generar un movimiento giratorio.

Para conseguirlo se coloca un bucle conductor giratorio entre los dos polos del imán, como se observa en la figura 1. La corriente fluye a través de las dos mitades del bucle conductor en sentido contrario, generando fuerzas en sentido contrario que a su vez generan un momento resultante que provoca un giro sobre el bucle conductor. Luego de media vuelta el conmutador del bucle invierte el sentido de la corriente y se repite la operación descrita anteriormente.

Figura 1. Principio del motor CD



Fuente: EBEL, F. *Fundamentos de la técnica de automatización*, p. 72.

En general, dado que el motor CD produce un momento muy pequeño a altas revoluciones se utilizan trenes de engranajes para reducir la velocidad y aumentar el momento en el eje de salida del tren de engranajes.

Como se observa en la figura 1, el sentido de giro del motor de CD será dependiente de la polaridad con que se conecte el mismo a la red.

1.1.2.2. Tipos de motores CD

Existen diversidad motores de corriente directa en tamaño, forma, utilidad, capacidad, entre otros. Sin embargo, se agrupa toda esta diversidad y se clasifican por su construcción y principio de funcionamiento.

1.1.2.2.1. Excitación separada y excitación en derivación

Un motor con excitación separada es un motor cuyo circuito de campo es alimentado por una fuente de potencia separada de voltaje constante. Un motor con excitación en derivación es aquel que su circuito de campo obtiene la potencia directamente de los terminales del motor. Si se estima que el voltaje de alimentación es constante no existirá diferencia en el comportamiento entre las dos máquinas.

1.1.2.2.2. De imán permanente

Un motor de imán permanente es un motor cuyos polos están hechos de imanes permanentes. En algunas aplicaciones estos motores ofrecen un mayor rendimiento que los motores en derivación. El hecho de no necesitar un devanado de campo permite construir motores de menor tamaño a un

correspondiente motor en derivación. La desventaja de un motor de imán permanente frente a un motor de excitación en derivación radica, en que el imán permanente no es capaz de generar un flujo mayor, y a su vez corre riesgo de desmagnetización debida a la corriente de armadura, durante largos periodos de sobrecarga.

1.1.2.2.3. En serie

Un motor CD serie es un motor cuyo devanado de campo consta de unas pocas espiras conectadas en serie con el circuito de inducido. Por consiguiente, en un motor serie, la corriente de inducido, la corriente de campo y la corriente de línea son iguales. Esto trae consigo una diferencia en su comportamiento y el motor en derivación.

1.1.2.2.4. Compuesto

Un motor CD compuesto es un motor que posee campo en derivación y campo en serie. Este motor pretende reunir las características favorables de ambos tipos e motor, en derivación y en serie.

1.1.2.2.5. Motores de pasos

Son dispositivos electromecánicos que convierten pulsos eléctricos en movimientos mecánicos discretos. El eje del motor rota en pasos discretos cuando un pulso eléctrico es aplicado al motor en la secuencia apropiada. La rotación del eje está directamente relacionada con los pulsos eléctricos recibidos. La dirección de la rotación está directamente relacionada con la secuencia de los pulsos. La velocidad de rotación está directamente relacionada con la frecuencia de los pulsos eléctricos. Por último, la magnitud

del ángulo de rotación está directamente relacionado con la cantidad de pulsos eléctricos generados.

Ventajas y desventajas de los motores de pasos:

- Ventajas:
 - El ángulo de rotación del eje del motor es proporcional al pulso de entrada.
 - El motor tiene el torque completo de frenado (con los devanados energizados).
 - Posición precisa y repetible dado que un buen *stepper* tiene una precisión de 3-5 % y este error no es acumulativo entre un paso y el siguiente.
 - Excelente respuesta para arranque, freno y reversa.
 - Muy confiables, dado que no poseen contactos de carbón o escobillas la vida del motor *stepper* depende únicamente de la vida del cojinete.
 - Responden a pulsos digitales enviados desde un lazo abierto de control. Esto los hace sencillos y económicos.
 - Es posible lograr una muy baja velocidad de sincronismo con la carga acoplada directamente al eje del motor.
 - Un amplio rango de velocidades puede ser obtenido dado que la velocidad de rotación depende de la frecuencia de los pulsos.

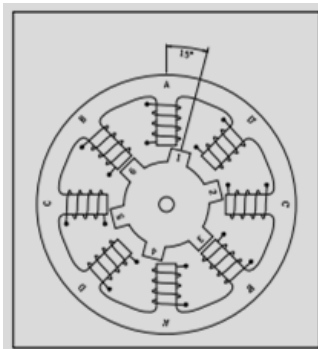
- Desventajas:
 - Resonancias pueden ocurrir si no se controla adecuadamente
 - Difícil de operar en altas revoluciones

Una de las mayores ventajas del motor de pasos es la posibilidad de ser precisamente controlados por sistemas de lazo abierto; esto significa que no es necesario usar sensores para retroalimentar el sistema con la posición, basta con llevar el recuento de los pulsos para conocer la posición exacta del eje motor.

Existen tres tipos de motor de pasos:

- Reluctancia variable (figura 2): compuesto por un rotor dentado y un estator dentado bobinado. Estos tienen un desfase entre sí que cuando es energizado uno de los bobinado atraen uno de los dientes del rotor de forma que son colocados de frente, así, siguiendo la secuencia se alinearán los otros dientes y entonces iniciará la rotación.

Figura 2. **Motor de reluctancia variable**



Fuente: Stepper Motor Basics. <http://www.solarbotics.net>. Consulta: 1 de Julio de 2014.

- Imán permanente: el más económico provee una baja resolución, entre 7,5 y 15 grados de rotación por paso. Este tiene imanes que alinean sus polos norte y sur de forma sucesiva con unos devanados del estator. Estos

motores tienen notables características de torque frente a los de reluctancia variable.

- Híbrido: es una combinación entre los dos primeros mencionados. Tienen una alta resolución que puede estar entre los 3,6 a 0,9 grados (100-400 pasos por revolución). Son más costosos, sin embargo muestran mejores características de torque, freno y retención.

Los motores de pasos más usados son los del tipo híbrido e imán permanente. Lo conveniente será evaluar, según la aplicación, primero el motor tipo imán permanente por ser de menor costo y si no se ajusta al diseño será mejor utilizar un híbrido.

Los motores de pasos se califican por el tamaño, está regido por el diámetro del cuerpo del motor, por ejemplo un motor tipo 11 es un motor de 1,1 pulgadas de diámetro y un motor 23 es un motor de 2,3 pulgadas de diámetro. El tamaño del cuerpo del motor puede variar de motor a motor a pesar de tener el mismo diámetro. La potencia de cada motor varía en función del tamaño del cuerpo para mismos tamaños frontales de motor. En general los motores vienen predispuestos para disipar energía hasta 65 °C sobre la temperatura ambiente, sin embargo, usando disipadores de calor se pueden llevar a trabajar a una potencia más alta.

En los motores de pasos el torque mecánico de salida es proporcional al flujo magnético en el devanado cuando este es energizado.

Este viene dado por la relación:

$$H = (N \times i) \div l \quad (1)$$

Donde H es la intensidad de flujo magnético, N es el número de espiras, i es la intensidad de la corriente y l es la longitud de espira.

Se aprecia, por tanto, que motores de pasos del mismo tamaño pueden tener distintas salidas de potencia variando solo las características del devanado.

Se habla también, de forma específica, de las unidades de control y cómo estas actúan durante su intervención en el tema.

1.1.3. Unidades de control

Son los elementos principales en la automatización; sus tareas principales son:

- Controlar
- Regular
- Vigilar
- Recolectar datos
- Comunicar
- Diagnosticar

Estos pueden gobernar cadenas de control abiertas o cerradas, según el tipo de proceso que se realice.

1.1.4. Algoritmo

Es un término común tanto a informática como a matemática y se refiere a la definición de una sucesión de pasos ordenados para realizar un cálculo o

proceso. Un algoritmo puede ser usado para cálculos, procesamiento de datos o para automatizar un proceso.

Otra forma de definirlo, quizá más amplia, es decir que es un método efectivo expresado como una lista definida de instrucciones para realizar una tarea, es decir solucionar un problema conocido.

Un algoritmo tendrá una señal de entrada la cual bien podría ser nula. Este la procesará de una forma determinada y actuará según lo estipulado en él para obtener una salida definida. El CPU (Central Processing Unit) es el encargado de procesar este algoritmo y llevarlo a producir una salida como resultado de su ejecución. El CPU tendrá la señal de entrada proveniente de sensores, quizás señales de control intermedias para corregir posibles errores y mejorar la salida. En general, el CPU interactuará con el exterior, conocerá el estado de las variables y tomará decisiones al respecto de cómo trabajará sobre los actuadores para llevarla salida a un resultado deseado el cual, si fuera un lazo cerrado, se verá reflejado en la señal de entrada del CPU.

Pero, ¿cómo el CPU contiene un algoritmo y este a su vez interactúa con el exterior? El CPU está dividido en dos grandes partes, la Unidad Lógica Aritmética, que será la que realice cálculos y tome decisiones, es decir la que contiene el algoritmo. La Unidad de Control será capaz de ejecutar las órdenes colocadas en memoria por parte de la Unidad Lógica Aritmética. Este algoritmo depurado es capaz de realizar un procesamiento de datos, de tomar decisiones y seguramente brindar una interfaz cómoda al operador, recibirá el nombre de software.

¿Qué clase de dispositivos puede ser el CPU? Puede ser desde un controlador inteligente programable (PIC), pasando por controlador lógico

programable (PLC) hasta llegar a un ordenador, o bien podría ser una combinación de dos o más de estos trabajando en conjunto para obtener el resultado.

El CPU será el encargado de evaluar el proceso, determinar la calidad y hacer los ajustes necesarios para que brinde el resultado deseado. Sabrá todo esto con la ayuda de sensores, lo ejecutará mediante las órdenes a los actuadores y tomará sus decisiones basado al algoritmo que habrá sido desarrollado mediante algún lenguaje de programación para que sea entendido por el CPU.

En esta extraordinaria aventura de automatizar tiene gran relevancia la ingeniería mecánica. En la gran mayoría de procesos industriales la automatización tiene lugar en la realización de tareas físicas realizadas por maquinaria que está plagada de sistemas mecánicos, tanto para la ejecución por medio de distintos mecanismos como para el control mediante sensores de accionamiento mecánico. En este caso específico más que solo para el control y automatización; la ingeniería mecánica tiene un papel importante en el diseño estructural del proyecto a automatizar. Se definen los pesos, momentos, fuerza del viento, momento, torque, esfuerzos, fricción, engranes y otros.

1.2. Elementos del diseño mecánico

En ingeniería el diseño es la creación de planos necesarios para que las máquinas, estructuras, sistemas o bien los procesos desarrollen las funciones deseadas.

En el proceso del diseño se incluyen los siguientes pasos:

- Reconocer una necesidad y establecerla en términos generales.
- Considerar distintos esquemas para resolver el problema y seleccionar uno para estudiarlo con detalle. El análisis de factibilidad respaldado por el análisis especial es parte de ese paso.
- Realizar un diseño preliminar de la máquina, estructura, proceso o sistema seleccionado. Esto permite establecer características generales y comenzar a definir especificaciones de componentes del sistema.
- Realizar el diseño de todos los componentes, preparar dibujos y todas las especificaciones detalladas.

Se muestra en la figura 3 el plan que deberían tomarse al realizar el diseño de una máquina.

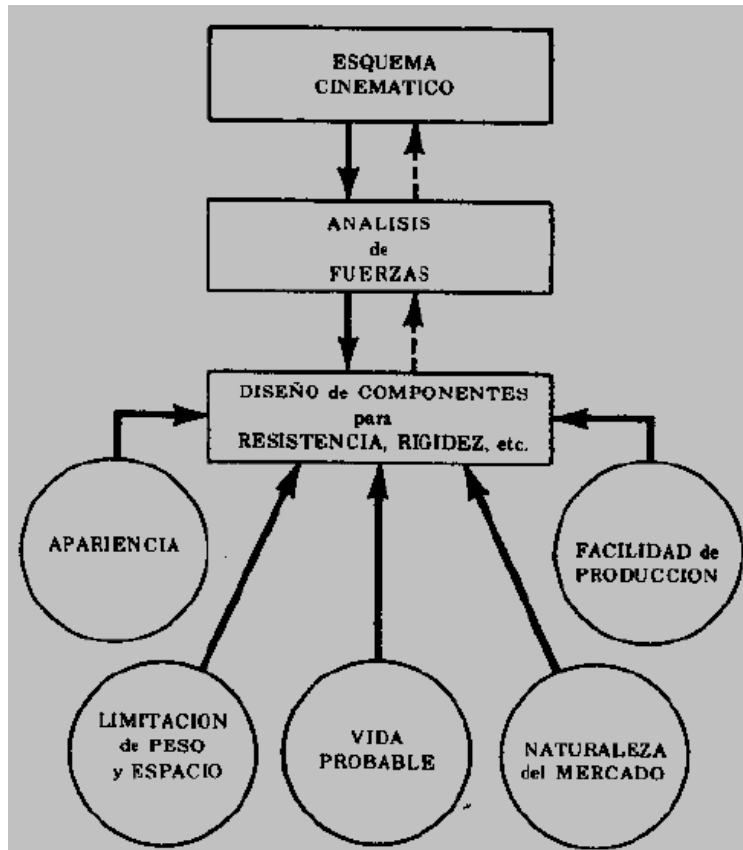
Posterior a realizar las especificaciones generales se debe fijar una disposición cinemática o esqueleto de la máquina. Esto con el fin de realizar un análisis preliminar de fuerzas en la máquina, ya que no tendrán todos los pesos aun en consideración, sin embargo esto permitirá empezar a estimar las formas y pesos de dichos componentes. Posteriormente ya podrá realizarse un análisis más refinado del diagrama considerando estos pesos.

Las decisiones finales vendrán afectadas por muchos otros aspectos que exceden a la resistencia y a la rigidez de la máquina tales como la apariencia, peso, espacio físico disponible, disponibilidad de materiales, técnicas de fabricación, entre otros.

El diseño de máquinas requiere también de otras consideraciones como el dimensionamiento adecuado de un elemento de una máquina para que soporte

con seguridad el esfuerzo máximo que se produce en su interior cuando está sometido alguna combinación de cargas de flexión, torsión, axiales o transversales. En general los materiales dúctiles se diseñan con base en el esfuerzo cortante máximo y los materiales duros se diseñan con base al esfuerzo normal máximo tanto en tensión como en compresión.

Figura 3. **Plan de diseño mecánico**



Fuente: HALL, A.S. *Diseño de Máquinas*. p. 1.

A continuación se definirán los conceptos básicos que será aplicados posteriormente en el diseño de la montura.

1.2.1. Fuerza

Es la acción de un cuerpo sobre otro que cambia o tiende a cambiar su movimiento o forma. Una fuerza se aplica por contacto físico directo o mediante un campo gravitacional, eléctrico o magnético. Las fuerzas en realidad son distribuidas en un área finita o volumen, sin embargo, generalmente se reducen a fuerzas puntuales para su análisis.

Las fuerzas tienen dos características que deben conocerse para analizar sus efectos. Una es la magnitud, que indica el tamaño relativo o intensidad de la fuerza. Otra característica es la dirección, que queda definida cuando se conocen su orientación y su sentido. La orientación queda determinada por una recta en el espacio a lo largo de la cual actúa la fuerza, y el sentido indica la forma en que actúa la fuerza a lo largo de la recta.

La fuerza (F) se define matemáticamente como la masa (m) del objeto multiplicado por el cambio de la velocidad en el tiempo (a).

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a} \quad (2)$$

1.2.2. Momento

El momento de una fuerza puede definirse como el efecto de giro que produce sobre un cuerpo alrededor de un punto. Si se coloca la línea de acción de la fuerza sobre el punto fijo en referencia el momento sobre este es cero. Si se desplaza la línea de acción fuera de este punto fijo, el momento está definido como el vector fuerza (F) multiplicado por el vector distancia (l) del punto fijo al

punto de aplicación de la fuerza por el seno del ángulo entre ellos, esto en las unidades propias de cada sistema.

$$M = Fl \sin \theta = Fb \quad (3)$$

El momento es una cantidad vectorial ya que posee dirección y magnitud. Su orientación coincide con la normal al plano formado por el vector de la fuerza y el vector que va del punto fijo de rotación al punto de aplicación de la fuerza.

Dado que se usa la línea de acción de la fuerza, el efecto será el mismo para cualquier punto donde se aplique la fuerza dentro de esta línea de acción. Esto es conocido como principio de transmisibilidad. Este principio se puede enunciar de la siguiente forma: el efecto externo de una fuerza que actúa sobre un cuerpo rígido es independiente del punto de aplicación, pero depende de la magnitud, dirección y línea de acción de la fuerza.

1.2.3. Resistencia de materiales

El campo de la mecánica abarca principalmente las relaciones entre las fuerzas que actúan sobre un sólido indeformable. La estática estudia a los sólidos en equilibrio y la dinámica estudia los cuerpos sólidos acelerados. La resistencia de materiales extiende el estudio de la mecánica. La resistencia de materiales estudia y establece las relaciones entre las cargas exteriores aplicadas y sus efectos en el interior de los sólidos. Además, se deja de asumir que los cuerpos son indeformables, sino que las deformaciones por pequeñas que sean son de gran interés.

1.2.3.1. Fuerza axial

Corresponde a la acción de tirar (o de empujar) sobre la sección de material en que se aplica la fuerza. Tirar representa una fuerza de extensión o tracción que tiende a alargar el sólido, mientras que empujar representa una fuerza de compresión que tiende a acortarlo.

1.2.3.2. Fuerza cortante

Son componentes de la fuerza que tiene a generar un deslizamiento entre bloques del sólido en el punto de estudio.

1.2.3.3. Momento torsionante

Es la componente de la fuerza que genera una torsión del sólido considerado.

1.2.3.4. Momento flexionante

Es la componente de la fuerza que tiende a provocar que el cuerpo se curve o flexione, provocando esfuerzos internos de tracción o compresión.

1.2.4. Cojinetes de rodamientos

La aplicación de cojinetes de rodamientos implica una selección, montaje, lubricación y protección adecuados. Esto se hace con el fin de que el funcionamiento del cojinete bajo las condiciones especificadas sea satisfactorio. Los cojinetes de rodamientos se llaman también cojinetes antifricción, aunque

su rozamiento es comparable al de un cojinete ordinario bien diseñado que opere bajo condiciones de película gruesa.

Algunas de las características y ventajas de los cojinetes de rodamientos son:

- Son ventajosos en momentos altos de arranque debido a la acción giratoria de las bolas o de los rodillos.
- Cuando se desea hacer un aislamiento eléctrico la película de aceite ayuda proporcionar un aislamiento.
- Los cojinetes de rodamientos dan señales de falla pues se hacen ruidosos cuando están próximos a fallar, los cojinetes convencionales fallan de forma repentina y pueden tener resultados desastrosos.
- Los cojinetes de rodamientos (con excepción de los de rodillos rectos) pueden soportar cargas axiales y radiales combinadas.
- Se pueden precargar si se desea, esto con el fin de reducir las deformaciones y mejorar la exactitud.
- Pueden engrasarse previo al montaje con lo cual se evita mantenimiento posterior. La falla en la lubricación de un cojinete de rodamientos no es calamitosa como podría serlo en uno convencional.

El coeficiente de rozamiento es función de la velocidad, la carga, la lubricación, el montaje y la temperatura de funcionamiento. Para cálculos aproximados con condiciones de lubricación favorable se puede utilizar un coeficiente constante, estas condiciones se conocen como condiciones normales de funcionamiento.

La capacidad estática (que es la carga máxima radial que puede causar una deformación permisiva) de los cojinetes viene dada por las condiciones

subsiguientes a la aplicación de la carga estática, así como por las dimensiones físicas. La capacidad estática de un cojinete que no gire será mucho mayor que la de uno que si gire después de aplicada la carga.

La ecuación de Stribeck para la capacidad estática C_o de un cojinete de bolas está se muestra en la figura 4.

Figura 4. **Ecuación de Stribeck**

$$C_o = \frac{KZD^2}{5}$$

Fuente: HALL, A.S. *Diseño de Máquinas*. p. 256.

Donde K es una constante que depende del diámetro de las bolas, Z es el número de las bolas, D el diámetro de las bolas. La ecuación para la capacidad estática C_o de un cojinete de rodillos rectos se muestra en la figura 5.

Figura 5. **Ecuación capacidad estática**

$$C_o = \frac{KZDL}{5}$$

Fuente: HALL, A.S. *Diseño de Máquinas*. p. 256.

Donde D es el diámetro de los rodillos y L la longitud de los mismos.

La capacidad dinámica de un cojinete se basa en su resistencia a la fatiga, esto en contraparte a la capacidad estática que se basa en la deformación causada por una fuerza estática. Un cojinete que gira a baja velocidad tiene una capacidad normal más alta que la capacidad normal estática, ya que la deformación permanente que tiene lugar se distribuye mas uniformemente, como consecuencia, en rotación baja se puede tolerar una mayor deformación permanente.

La duración del cojinete puede definirse por horas de funcionamiento a cierta velocidad o bien por el número de revoluciones.

La capacidad base dinámica de un cojinete se define como la carga radial constante que puede soportar un cojinete radial o la carga axial de empuje que puede soportar un cojinete axial para que la duración mínima sea de 1 000 000 de revoluciones, que es equivalente a 500 horas a 33,8 rpm.

1.2.5. Engranajes

Se define como un medio para transmitir potencia entre ejes. Se tienen cuatro grandes grupos en los cuales podemos dividirlos:

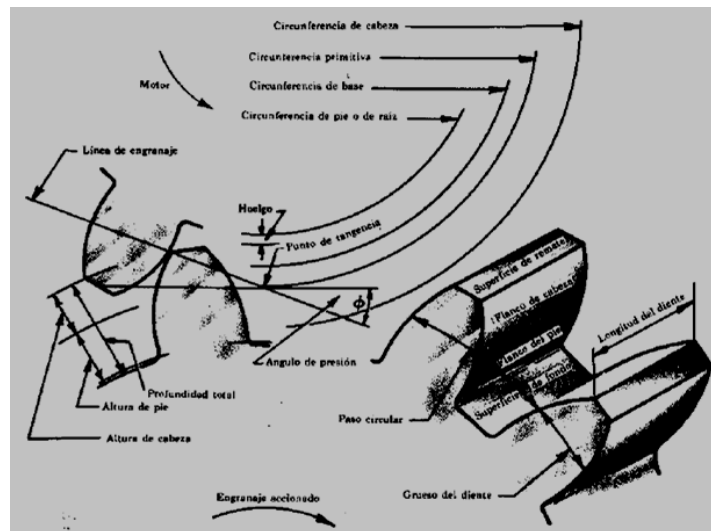
- Engranajes rectos
- Engranajes helicoidales
- Engranajes cónicos
- Engranajes con tornillo sin fin

1.2.5.1. Engranajes rectos

Estos constituyen un medio muy conveniente para transmitir potencia entre ejes paralelos, con una relación de velocidades angulares constante. El valor de la relación de velocidades es el mismo que se obtendría con dos cilindros imaginarios presionados uno contra el otro y girando sin deslizar su línea de contacto.

Las partes principales de un diente de engranaje se denominan como se indica en la figura 6.

Figura 6. Partes de un diente de engranaje



Fuente: HALL, A.S. *Diseño de Máquinas*. p. 222.

Paso circular es la distancia desde un punto de un diente hasta el punto correspondiente de un diente adyacente, medida sobre la circunferencia primitiva.

Paso diametral es el número de dientes de un engranaje por pulgada de diámetro.

Línea de engranaje es una línea normal al perfil de un par de dientes engranados en su punto de contacto.

Ángulo de presión es el ángulo entre la línea de engranaje y la tangente común a las circunferencias primitivas.

Punto de tangencia es el punto de tangencia de las circunferencias primitivas.

Razón de las velocidades angulares es la razón de la velocidad angular del piñón a la velocidad angular del engranaje acoplado. Es inversamente proporcional a la razón de los números de dientes de los dos engranajes y para el caso de los engranajes rectos también es proporcional a la razón de los diámetros primitivos.

Los esfuerzos máximos permisibles en el diseño del diente del engranaje, dependen del material y de la velocidad de la línea primitiva.

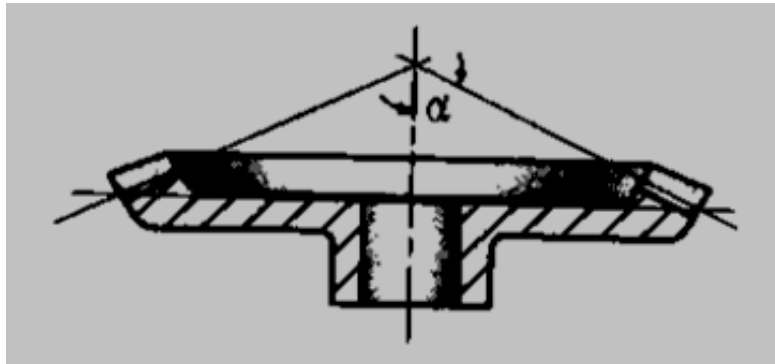
1.2.5.2. Engranajes helicoidales

Se diferencian de los engranajes rectos en que tienen los dientes tallados alrededor de los cilindros primitivos, en lugar de ser paralelos al eje de rotación. Los engranajes helicoidales se pueden usar para conectar ejes paralelos y no paralelos. En este caso, una hélice diestra engrana siempre con una hélice siniestra.

1.2.5.3. Engranajes cónicos

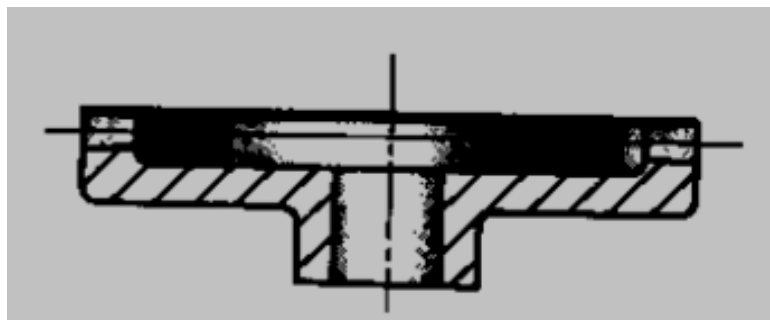
Se utilizan para conectar ejes que se cortan y se pueden clasificar de acuerdo con el ángulo primitivo. Los que tienen un ángulo primitivo menor que 90° son engranajes cónicos externos como los de la figura 7.

Figura 7. Engranajes cónicos externos



Fuente: HALL, A.S. *Diseño de Máquinas*. p. 241.

Figura 8. Corona dentada

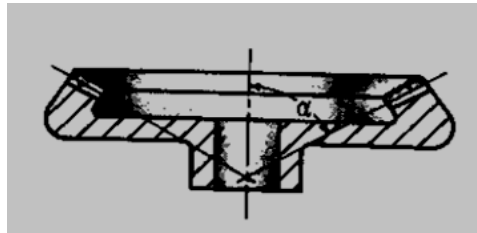


Fuente: HALL, A.S. *Diseño de Máquinas*. p. 256.

Los que tienen ángulos primitivos de 90° se llaman coronas dentadas, son como se muestra en la figura 8.

Los que tienen un ángulo primitivo mayor de 90° son los engranajes cónicos internos como los de la figura 9.

Figura 9. **Engranajes cónicos internos**



Fuente: HALL, A.S. *Diseño de Máquinas*. p. 256.

La suma de dos ángulos primitivos de dos engranajes cónicos acoplados es igual al ángulo formado por los ejes. Con respecto a un elemento del cono, los dientes pueden ser rectos o espirales.

1.2.5.4. **Engranaje con tornillo sin fin**

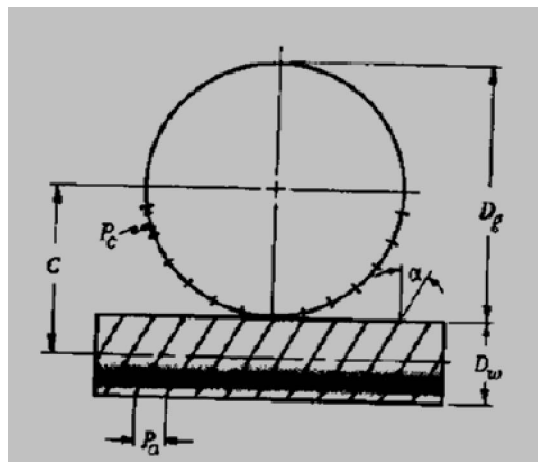
Se utiliza ampliamente para transmitir potencia con altas relaciones entre ejes que no se cortan, los cuales usualmente (pero no necesariamente) forman ángulo recto. La transmisión de tornillo sin fin consta de un tornillo sin fin acoplado a un engranaje, denominado a veces rueda dentada del tornillo sin fin como en la figura 10.

El tornillo puede tener uno, dos, tres o más filetes. El paso axial del tornillo sin fin (denominado P_a) es igual al paso circular del engranaje. El avance es la

distancia que avanza la hélice del tornillo sin fin a lo largo del eje, por cada revolución.

Dado que el sistema propuesto para este trabajo involucrará tornillo sin fin y corona, ahondaremos ligeramente en este tema para brindarle al lector el conocimiento por medio del cual se calculará en el capítulo tres los parámetros del sistema.

Figura 10. **Tornillo sin fin elemental**



Fuente: HALL, A.S. *Diseño de Máquinas*. p. 249.

1.2.5.4.1. **Materiales del tornillo y corona**

Los tornillos sin fin se fabrican generalmente de acero al carbono de bajo contenido de carbono y cementados de baja aleación. En todos los casos de fabricación resultará imprescindible el rectificado y pulido de las superficies de trabajo de las espiras del tornillo sin fin.

Las coronas de las ruedas sin fin se fabrican generalmente de bronce, cuya composición depende de la velocidad de deslizamiento y de la longevidad de la transmisión. Dicha velocidad de deslizamiento es la velocidad a la cual las espiras del tornillo de deslizarán contra los dientes de la corona y se tendrá como opción su cálculo, cuando se carezca de este dato, mediante la ecuación empírica:

$$v_s = (4,3\omega_2u/10^3)^{\frac{1}{3}}\sqrt{T_2} \quad (4)$$

Para bajas velocidades, es decir menores a 2 m/s, se utilizará fundición gris ordinaria.

Para velocidades medias, es decir entre 2 a 5 m/s, se utilizará bronce con aleación de hierro y aluminio.

Para altas velocidades, de entre 5 a 25 m/s, se utilizara bronce aleado con estaño y plomo.

1.2.5.4.2. Tensiones admisibles

Se determinan por fórmulas empíricas que dependen del material, los dientes de la rueda, la dureza de las espiras del tornillo, la velocidad de deslizamiento y la longevidad de la transmisión.

Para bronce y latones se utiliza la siguiente ecuación:

$$[\sigma]_H = 300-25v_s \quad (5)$$

Para fundición gris se utiliza la siguiente ecuación:

$$[\sigma]_H = 175 - 35v_s \quad (6)$$

1.2.5.4.3. Otros parámetros

Habiendo determinado el valor de la relación que se quiere, definida como $U = Z_1/Z_2$ donde el subíndice 1 indica al tornillo y el 2 a la corona y las Z representan el número de dientes, se debe determinar la distancia interaxial mínima mediante la inecuación siguiente:

$$a_w \geq 6100 \sqrt[3]{T / [\sigma]_H^2}, \text{ en m} \quad (7)$$

Valor con el cual se calcula el módulo del engranaje. El módulo, para estos propósitos de explicación general, no es más que la parte del diámetro de la rueda que ocupará un diente del engranaje y está definida por:

$$m = (1,5 \dots 1,7) a_w / Z_2 \quad (8)$$

Tabla I. Valores normalizados de módulos

| Filas | Módulo, mm | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|------------|-------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| 1 | 1,0 | 1,25 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | 12,0 | 16,0 | 20,0 | 25,0 |
| 2 | 1,125 | 1,375 | 1,75 | 2,25 | 2,75 | 3,5 | 4,5 | 5,5 | 7,0 | 9,0 | 11,0 | 14,0 | 18,0 | 22,0 | 28,0 |

Fuente: BRINDIS, Eleno. *Transmisiones por engranajes, Metodología de cálculo*. p. 12

Y se normaliza mediante la tabla 1. El coeficiente del diámetro del tornillo, factor que será importante en los cálculos se estimará mediante la ecuación (9).

$$q_{\min} = 0,212Z_2 \quad (9)$$

Se calcula con este, el coeficiente de desplazamiento de la herramienta de mecanizado, coeficiente que debe estar en valores desde -1 a 1 utilizando la siguiente ecuación:

$$x = a_w/m - 0,5 (q + Z_2) \quad (10)$$

Con estos valores calculados se obtienen los parámetros geométricos del sistema:

- Diámetro primitivo del tornillo:

$$d_1 = qm. \quad (11)$$

- Diámetro de la cresta del tronillo:

$$d_{a1} = m (q + 2). \quad (12)$$

- Diámetro del pie del tornillo:

$$d_{f1} = m (q - 2,4) \quad (13)$$

- Diámetro primitivo de la rueda:

$$d_2 = mZ_2 \quad (14)$$

- Diámetro de la cresta de la rueda:

$$d_{a2} = m (Z_2 + 2 + 2x) \quad (15)$$

- Diámetro del pie de la rueda:

$$d_{f2} = m (Z_2 - 2,4 + 2x) \quad (16)$$

- Ancho de la corona dentada:

$$b_2 \leq 0,75 d_{a1} \quad (17)$$

- Eficiencia:

$$\eta = \tan \gamma / \tan (\gamma + \rho') \quad (18)$$

en donde:

$$\tan \gamma = Z_1/q \quad (19)$$

y el parámetro ρ se toma de la tabla 2.

Tabla II. **Ángulo versus velocidad de desplazamiento**

| v_s : 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 |
|--|--|--|--|
| ρ' : 2 ⁰ 30'... 3 ⁰ 10' | 2 ⁰ 00'... 2 ⁰ 30' | 1 ⁰ 30'... 2 ⁰ 00' | 1 ⁰ 20'... 1 ⁰ 40' |

Fuente: BRINDIS, Eleno. *Transmisiones por engranajes, Metodología de cálculo*. p. 26

1.3. Resumen

La unidad de control, el algoritmo y los actuadores serán una parte vital en el diseño del sistema de control de esta montura. Los sensores para este caso práctico no estarán incluidos retroalimentando el sistema para que conozca su posición, esa será tarea del software PicGoto, que será el encargado de calcular mediante el algoritmo y los parámetros ingresados sobre la relación de los engranes, la posición del sistema en todo momento.

Los elementos del diseño mecánico serán la base para llegar a obtener esa relación del sistema que se debe ingresar el PicGoto y será concordante con el sistema mecánico diseñado. Esto se verá en el capítulo 3.

2. CONCEPTOS DE ASTRONOMÍA

2.1. Astronomía

Es el estudio científico del universo más allá de la tierra. Describe la naturaleza, posición, movimiento, energía, tamaño composición y evolución de los cuerpos celestes, incluidos en estos estrellas, nebulosas, cúmulos estelares, galaxias, pulsares, quásares y otros. Los astrónomos inicialmente estudiaban los objetos basados en la observación de fenómenos dentro del rango visible del espectro electromagnético. Actualmente estas observaciones se han extendido a otros segmentos del espectro electromagnético como los rayos X, las microondas y las ondas de radio emitidas por cuerpos celestes. Sin embargo, el estudio en la superficie de la tierra se limita al espectro visible y de ondas de radio ya que la atmósfera terrestre impide el paso del espectro de microondas y rayos X. Dichos espectros se estudian en observatorios espaciales.

2.1.1. Astronomía óptica

Es la rama de la astronomía que estudia a los astros y los fenómenos astronómicos ocurridos dentro del rango visible del espectro electromagnético. Este se apoya del telescopio y sensores fotosensibles para llevarlo a cabo.

2.1.2. Radioastronomía

La radioastronomía, una rama de la astronomía, es la ciencia que estudia los astros y fenómenos astronómicos que emiten en el espectro

electromagnético, en el rango correspondiente a las ondas de radio, que comprende longitudes de onda desde un centímetro hasta varios kilómetros. Longitudes de onda para las cuales la atmósfera terrestre es transparente y permite sean estudiadas desde la superficie terrestre. Existen también otras ventanas por debajo del centímetro e incluso del milímetro llamadas ventanas milimétricas o submilimétricas.

2.2. Esfera celeste

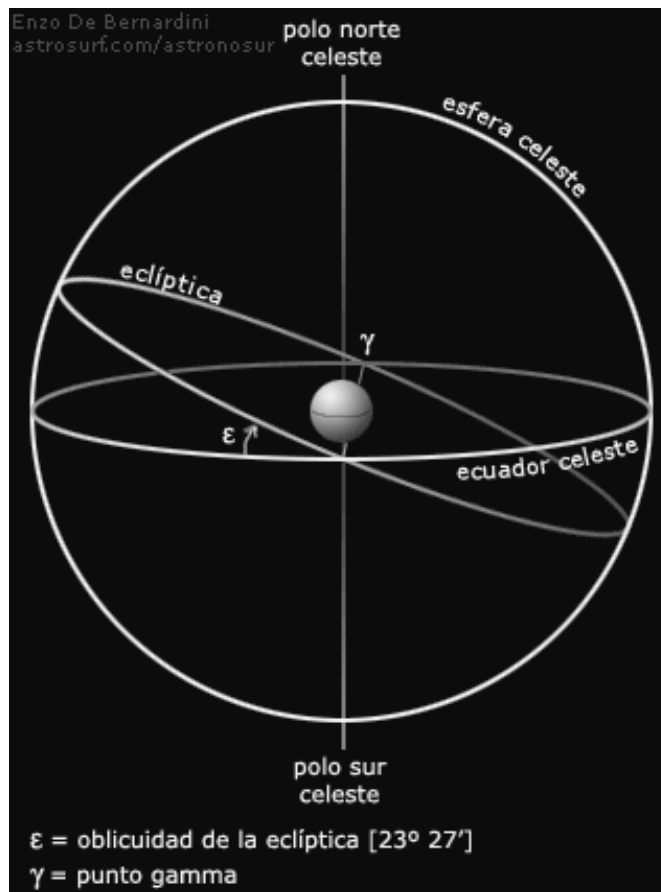
Se denomina esfera celeste a la esfera imaginaria de radio arbitrario, con centro en cualquier punto del espacio, en cuya superficie se disponen los astros tal como se observan en el cielo en un momento dado desde ese punto dado en el espacio. Sirve para el estudio de las posiciones aparentes y movimientos de los astros. Para tal propósito se fijan en su superficie los puntos y líneas principales respecto a los cuales se efectúan precisamente las mediciones correspondientes.

Los planos fundamentales de la esfera celeste, en los que se basan los diferentes sistemas de coordenadas se observan en la figura 11. Estos son: el ecuador celeste, proyección del ecuador terrestre; los polos norte y sur celeste, proyección del eje de rotación de la Tierra hacia el norte y sur; y la eclíptica, que es la línea por la cual se mueve el Sol a lo largo del año, y los planetas en las cercanías de ella.

En la imagen anterior se muestran los planos fundamentales. La oblicuidad de la eclíptica es de 23 grados 27 minutos y representa la inclinación del eje de rotación de la Tierra. El punto en donde la eclíptica cruza el ecuador celeste de sur a norte se denomina punto gamma (también punto vernal) y es el

origen de la ascensión recta en el sistema de coordenadas ecuatoriales celestes.

Figura 11. **Esfera celeste**



Fuente: *Coordenadas*. www.astrosurf.com. Consulta: 18 de julio de 2014.

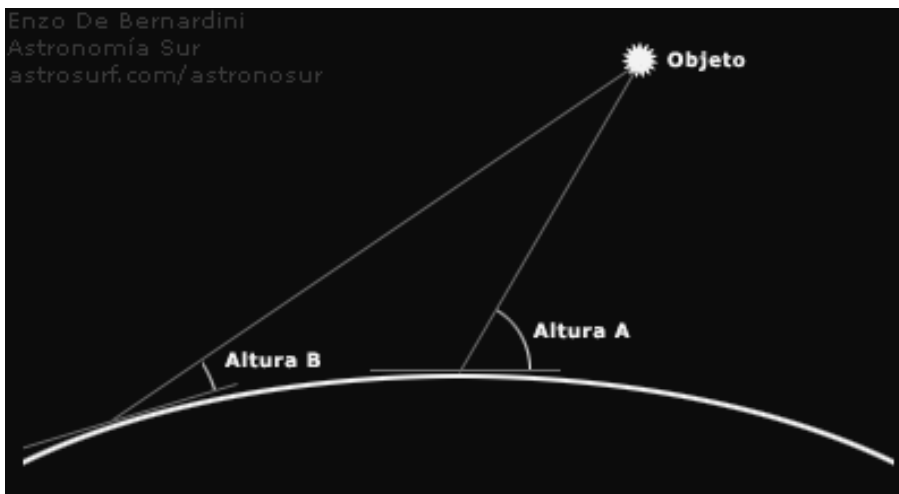
2.3. **Coordenadas altacimutales**

Las coordenadas altacimutales llamadas también horizontales utilizan dos planos fundamentales: la altura y el acimut. El acimut (abreviado AZ por su denominación en inglés, azimuth), ángulo que se mide desde el punto cardinal

norte hacia el este. Así es como suele aparecer en software astronómico y otras fuentes, pero en realidad, si el observador se encuentra ubicado en el hemisferio sur, se mide al revés, desde el sur hacia el oeste. Pocas referencias toman esto en cuenta, por tanto todos suelen utilizar el primer método: desde el norte (0°) hacia el este.

La altura (Al) se mide desde el horizonte matemático (plano que pasa por el círculo máximo de la esfera celeste que toca los puntos sur-oeste-norte-este, que es perpendicular al punto de observación y el cenit) (0°) hasta el cenit (90°). Por tanto esta coordenada es el ángulo que forma el objeto observado con el horizonte como se observa en la figura 12. Se menciona una altura negativa cuando el objeto se encuentra por debajo del horizonte, el punto a 90° por debajo del horizonte (Al.: -90°) se lo denomina nadir.

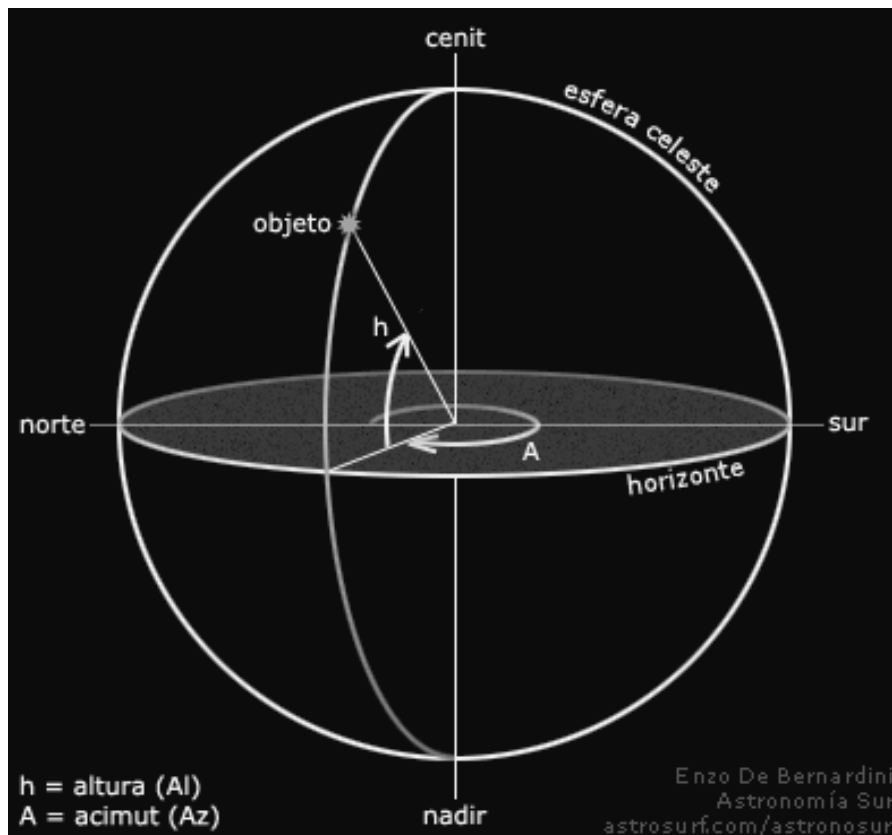
Figura 12. **Observadores**



Fuente *Coordenadas*. www.astrosurf.com. Consulta: 18 de julio de 2014.

Al tratarse de un sistema de coordenadas que utiliza valores locales (horizonte y altura sobre el horizonte) el valor de esas coordenadas para un objeto dado depende de la posición del observador. Como muestra la figura 13, dos observadores en la superficie de la Tierra medirán un ángulo de altura diferente para un mismo objeto.

Figura 13. **Coordenadas altacimutales**



Fuente: *Coordenadas*. www.astrosurf.com. Consulta: 18 de julio de 2014.

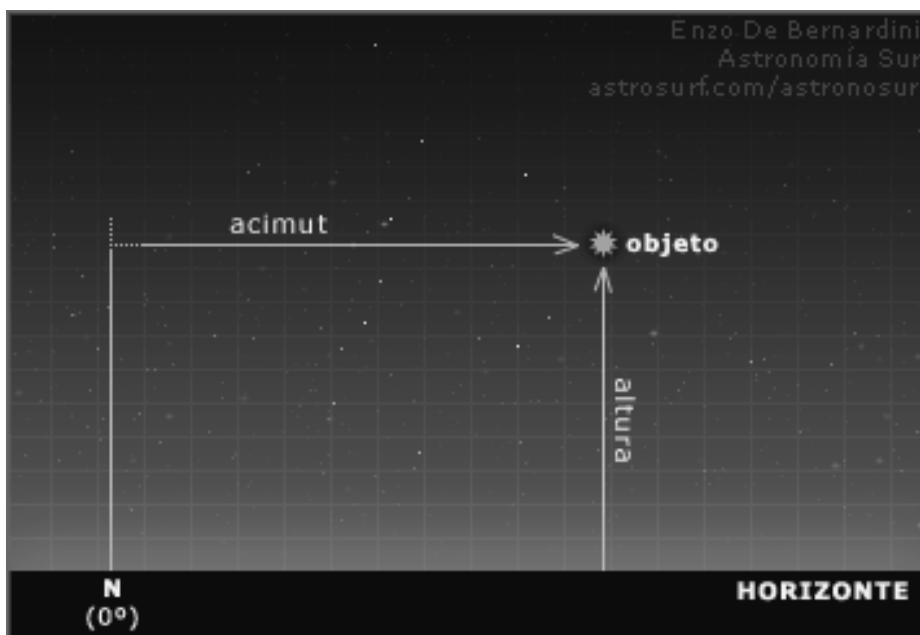
Por este motivo también suelen ser usadas para eventos locales, como el paso de un satélite. Para dos observadores ubicados a una distancia

significativa, la altura y el acimut de un objeto que ambos observen serán diferentes. La altura y acimut se esclarecen en la figura 14.

2.4. Coordenadas ecuatoriales

En la figura 15 se muestra una esfera celeste, construida para el hemisferio Sur, donde el polo elevado es el Polo Sur Celeste (Ps, en el gráfico).

Figura 14. **Altura y acimut**

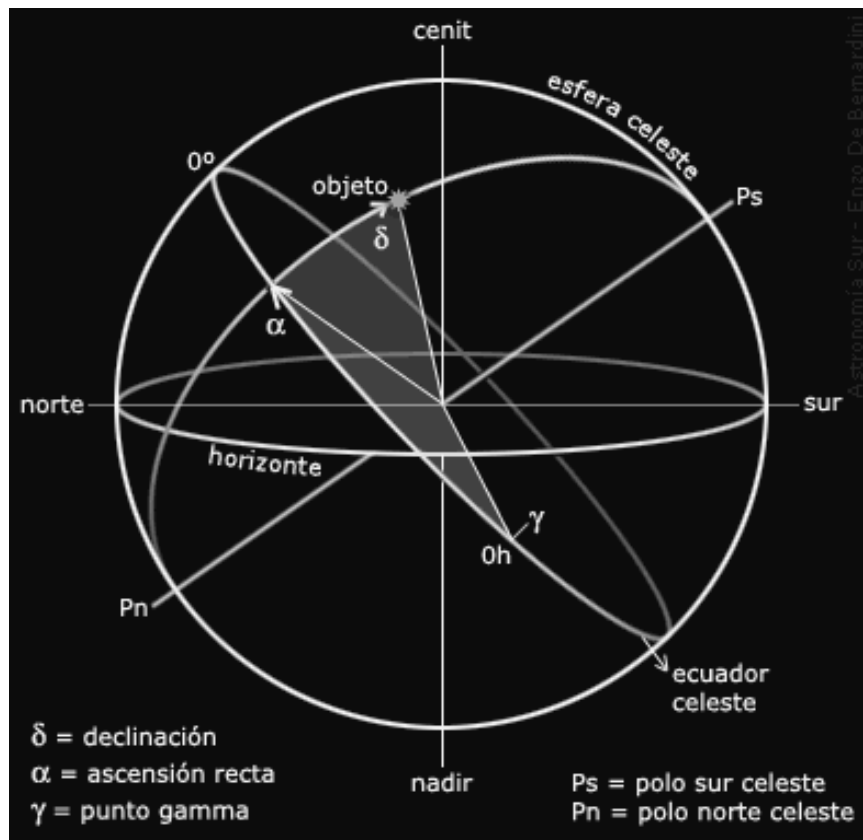


Fuente: *Coordenadas*. www.astrosurf.com. Consulta: 18 de julio de 2014.

Como se ve, la línea norte-sur que une ambos polos y pasa por el objeto determina su declinación. La declinación es medida desde el ecuador celeste hacia los polos, positiva hacia el norte y negativa hacia el sur. El ecuador celeste tiene declinación igual a cero, y los polos declinaciones +90 (norte) y -90 (sur).

La ascensión recta se mide sobre el ecuador celeste desde el punto gamma (o punto vernal) hacia el este, de 0 a 24 horas (1 hora equivale a 15 grados) El punto gamma es el punto en el que la eclíptica (no graficada) cruza al ecuador celeste de sur a norte. En el gráfico se ha ubicado en una posición arbitraria, dado que con la rotación y translación de la Tierra la ubicación relativa cambia.

Figura 15. **Coordenadas ecuatoriales**



Fuente: *Coordenadas*. www.astrosurf.com. Consulta: 18 de julio de 2014.

El punto gamma se localiza en una de las dos intersecciones del ecuador con la eclíptica. La línea por donde se observa desplazarse al Sol durante el

periodo de un año. Por tanto en el momento del equinoccio de otoño (hemisferio sur) el Sol posee una ascensión recta de 0 horas 0 minutos 0 segundos (R.A.: 0h 0m 0s). Unos seis meses después, en el momento del equinoccio de primavera (hemisferio sur) la ascensión recta del Sol es de 12 horas 0 minutos 0 segundos (R.A.: 12h 0m 0s).

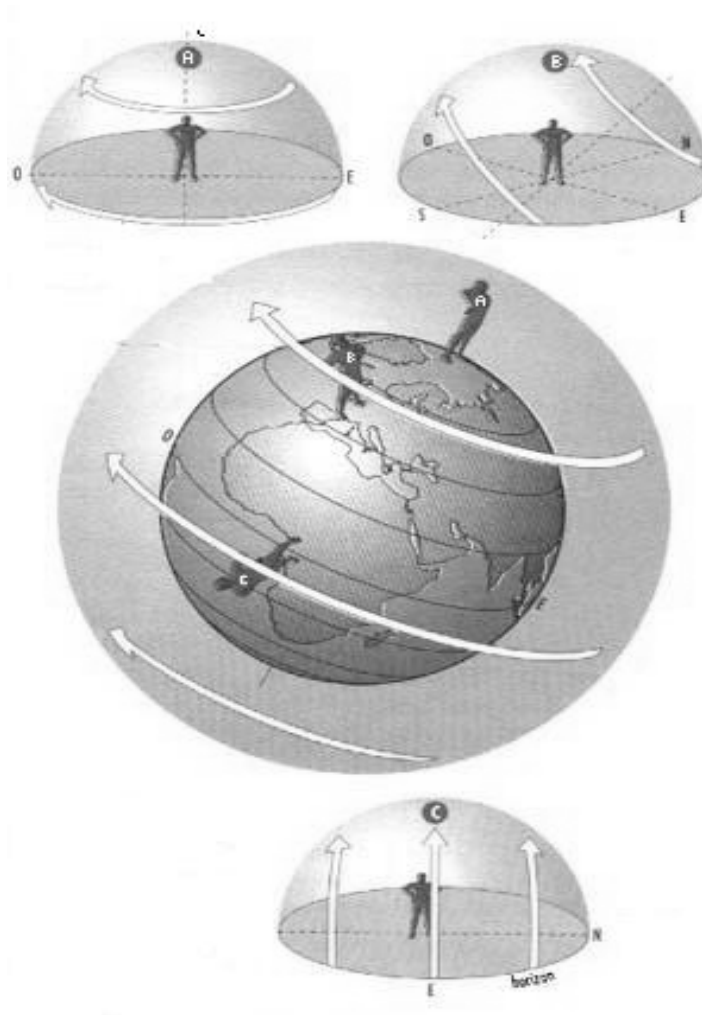
La altura del polo elevado es igual a la latitud del lugar de observación, por tanto para Guatemala que posee una latitud aproximada de unos 14 grados, la altura del polo norte celeste es de unos 14 grados sobre el horizonte. Esto es muy importante en las monturas ecuatoriales donde el eje de ascensión recta debe ser paralelo al eje de rotación de la tierra (eje de rotación en el gráfico) y por tanto apuntando directamente hacia el polo elevado.

2.5. Movimiento de los cuerpos celestes

Los cuerpos celestes se mueven, pero con excepción de los del sistema solar su movimiento es realmente imperceptible y solo puede ser medido bajo ciertos métodos y técnicas muy precisas que exceden a este trabajo, quien realmente se mueve, es la Tierra. La rotación de la Tierra es la que da la sensación de que el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas “salen” y “se ponen”.

Al movimiento de rotación de la tierra que es de oeste a este se le llama movimiento directo. La esfera celeste tiene un movimiento inverso, de este a oeste, a este movimiento se le llama retrogrado. Es por esto que se ve a los astros aparecer en el este y ocultarse en el oeste.

Figura 16. **Latitudes y movimiento celeste**



Fuente: RODRIGUEZ, Julio. *Curso en línea Astronomía Básica*. 2013.

El movimiento que se ve de las estrellas también dependerá de la latitud en la que se encuentre en la Tierra. En el ecuador terrestre, las estrellas parecerán moverse en forma perpendicular al horizonte (figura 16-C). En el polo norte o sur las estrellas nunca se ponen, parecerán moverse en forma paralela al horizonte (figura 16-A). En cualquier otra latitud intermedia las estrellas parecerán moverse de forma inclinada con respecto al horizonte,

dando la sensación de una esfera oblicua (figura 16-B). En sí, toda la esfera siempre parecerá rotar alrededor del mismo punto se observe desde donde se observe.

Estos aspectos deben ser considerados por el diseño mecánico del movimiento de la montura para el correcto desempeño del seguimiento de los cuerpos celestes y permitir mediante un seguimiento preciso prolongados tiempos de muestreo.

2.6. Requerimientos observacionales

Se enfocará la observación a dos tipos:

- Observación óptica
- Observación en ondas de radio.

Existen, sin embargo, observaciones realizadas en otros segmentos del espectro electromagnético, pero no son afines a estos propósitos.

2.6.1. Observación óptica

La astronomía tiene sus bases en la observación, la cual inició con el uso del único instrumento disponible en sus inicios, el ojo. Se observó el movimiento de los planetas, el sol, la luna y el brillo de las estrellas.

La observación astronómica se hace valer del uso del telescopio, por medio del cual se recoge más luz proveniente de cuerpos lejanos. Existen en este aspecto ciertos conceptos a manejarse sobre los telescopios, los cuales se descubren a continuación.

- Poder de captación de luz: el cual proporcional al cuadrado de su superficie, entre mas área se tenga más luz es posible percibir.
- Poder de resolución: que indica la facultad del telescopio a mostrar claramente separados dos objetos que se encuentran juntos en el cielo. Se expresa en términos de la separación angular mínima que debe existir entre los objetos para que su imagen aparezca claramente separada.
- Movimiento de seguimiento a los cuerpos celestes: que es una característica de la montura que se utilice, para largas observaciones es necesario mantener el objeto dentro del objetivo del telescopio.

2.6.2. Observación en ondas de radio

Los principios básicos de los radiotelescopios son similares a los de los telescopios. Las diferencias se deben principalmente a la longitud de onda que ambos manejan, incidiendo esto principalmente en la capacidad de resolución del radio telescopio que es mucho menor que la de un telescopio óptico. Para obtener con un radiotelescopio un resolución similar a un telescopio, se tendría que aumentar la superficie del radiotelescopio hasta valores que no son prácticos.

Para resolver este problema los radioastrónomos usan la interferometría, que es un técnica en la cual se utilizan arreglos de radiotelescopio situados a diversas distancias, con lo que les permite tener una mayor resolución en la observación sin la necesidad de aumentar el tamaño de los radiotelescopio.

En la observación radioastronómica se aplican conceptos similares a los de la práctica de la astrofotografía como la larga exposición, en el cual el sensor de una cámara se expone por largos tiempos a la luz proveniente de objetos

difusos y tenues hasta acumular cierta cantidad de información para construir una imagen distinguible. Para conseguir esto las monturas de los equipos fotográficos deben cumplir con requisitos basados en el movimiento de los astros.

Similares requisitos debe cumplir la montura de un radiotelescopio para dar seguimiento a un mismo objeto durante horas, manteniéndolo dentro del ancho de haz de la antena, que para este propósito se dirá que es el campo de visión de la antena y permitir así, el estudio del objeto.

2.7. Resumen

Considerando los conceptos revisados en este capítulo, como los tipos de coordenadas para el manejo de la montura, datos que servirán para el control por medio del software y circuito PicGoto, así como el movimiento de los astros.

Es fundamental conocerlos para delimitar el tipo de movimiento que se necesita para la antena, se inicia el diseño al relacionarlos con las limitantes que se posean al considerar los conceptos revisados en el capítulo uno.

3. DISEÑO DE LA MONTURA

3.1. Antecedentes

Antena: es direccional del tipo parabólico. Son muy usadas en radioastronomía debido a su facilidad de construcción y a las ventajas que brinda su geometría particular, como por ejemplo la muy alta ganancia y el estrecho ancho de haz.

En este tipo de antena las ondas electromagnéticas son recibidos en una dirección paralela al eje de la parábola. El reflector está compuesto de cuatro secciones fabricadas de una maya sobre una estructura de tubo cuadrado. Esta construcción hace que cada sección sea muy liviana. Cada sección se ensambla entre sí, y a su vez con la montura.

Tabla III. **Características de la antena**

| | |
|--------------------------|-------------------------|
| Frecuencia | 1.0-12.75 GHz. |
| Diametro | 120" (3.0 m) |
| Distancia Focal | 45.6" |
| Distancia Focal/Diametro | 0.38 |
| Ganancia a 1.42 GHz. | 30 dBi (eficiencia 60%) |
| Ancho de Haz a 1.42 GHz. | 4.8 grados. |
| Numero de secciones | 4 |

Fuente: Kaul-Tronics. *Radio Astronomy Supplies Kaul-Tronics*. p. 1.

Montura: la montura de la antena tiene dos movimientos controlados mediante tornillos de ajuste, el movimiento de altitud y declinación. El movimiento de altitud tiene un ángulo de movimiento limitado por un tornillo de ajuste a unos 45 grados mientras que el movimiento de declinación tiene unos 75 grados de ángulo de movimiento.

3.2. Modificaciones

Se busca transformar la montura de la antena en una montura altacimutal aprovechando al máximo sus recursos propios y reduciendo al máximo las modificaciones necesarias para no afectar la estructura actual de la misma. Para esto se eliminará uno de estos movimientos descritos anteriormente, el movimiento de altitud, permitiendo únicamente el movimiento actual de declinación y que este pase a ser el movimiento de altitud de la montura en su nueva versión, altacimutal.

Se utilizará el actual movimiento de declinación como movimiento de altitud de la montura porque este dispone de un cojinete buje diseñado para soportar el movimiento y ofrece ventajas para mantenimiento a largo plazo. El otro movimiento, originalmente de altitud, el cual se deja inmóvil tiene por eje de rotación un tornillo, el cual no está dispuesto para rotación constante como necesitará el sistema y su ángulo de movimiento permisible es menor por la construcción misma de la antena.

En la figura 17 se aprecia cómo debe ser la montura posterior a estas modificaciones.

3.2.1. Primera modificación: fijando el movimiento de altitud original

En la figura 18 se observa la pieza denominada L. Esta debe ser cortada de manera que permita que la pieza M rotar sobre el punto O hasta formar un ángulo recto con la pieza OA que es donde se colocará el mástil y deberá ser soldada a esta en el extremo del tornillo T. El tornillo T quedara sin uso y debe ser removido.

Figura 17. **Modelo de antena**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

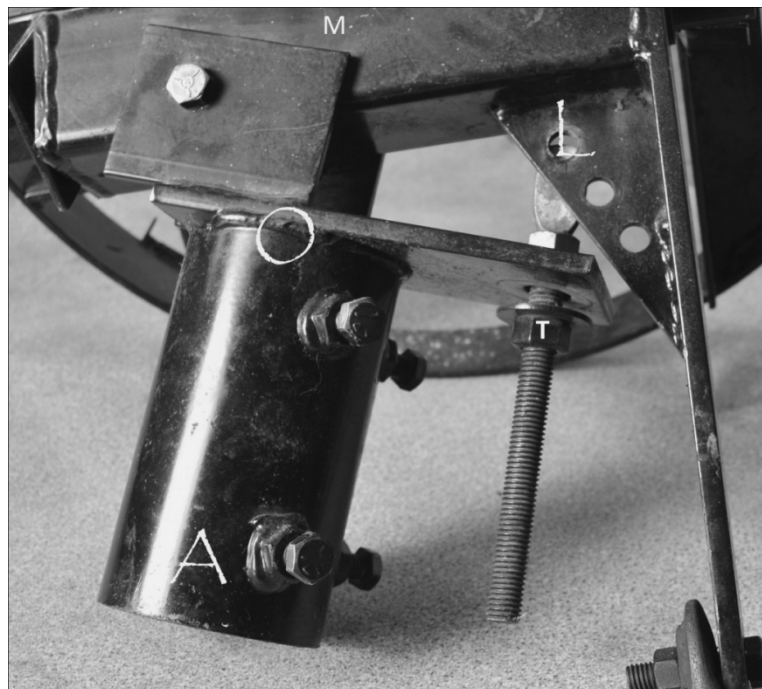
Como se aprecia en la figura 19 el corte en la pieza L debe ser en ángulo recto para coincidir con la pieza OA y ser fácilmente soldada a ella.

Todos los puntos mostrados en las figuras son correspondientes con los puntos mostrados en los diagramas de cuerpo libre en la sección 3,3 de este capítulo.

3.2.2. Segunda modificación: tornillo de movimiento de altura

Entre los puntos C y D mostrados en la figura 20 está colocado el tornillo de ajuste restante. Dicho tornillo será modificado para ser recibir su movimiento desde un sistema corona y tornillo sin fin para brindar el movimiento de altura a la montura.

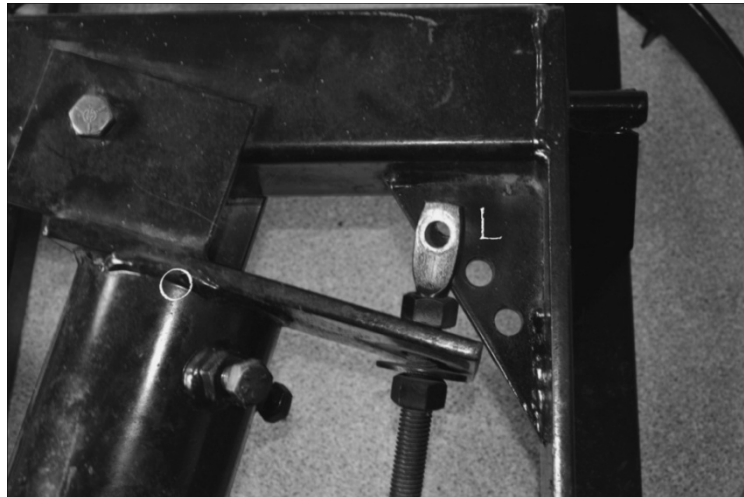
Figura 18. **Montura AO**



Fuente: Laboratorio AGRA.

A su vez, en estos extremos existirán unos elementos de sujeción adecuados para sujetar el tornillo que brindará el movimiento a la montura, los cuales permitirán el reacomodo del ángulo que sufrirá el tornillo respecto al eje vertical de la antena, así como servirán de guía para el movimiento del tornillo. Los planos de esto se agregan en la sección 3,10,1 y 3,10,2 de este capítulo.

Figura 19. **Montura, punto O**

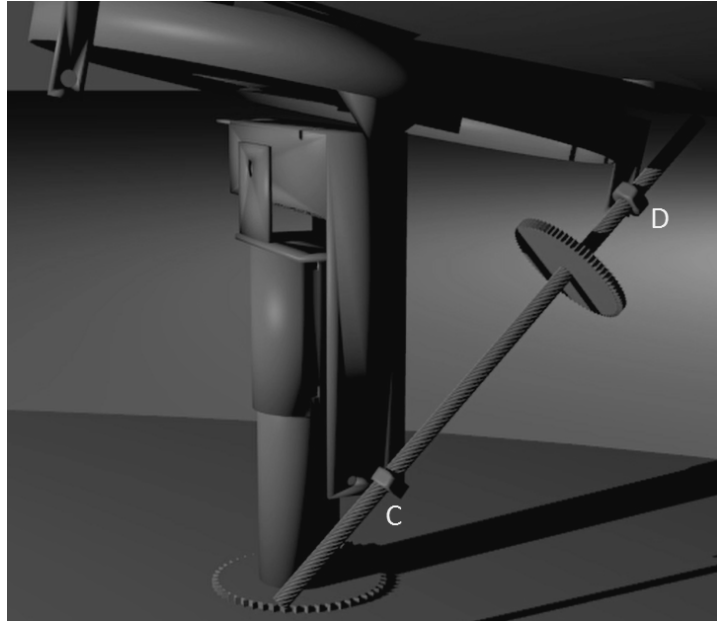


Fuente: Laboratorio AGRA.

En las figuras restantes (21, 22 y 23) se aprecian los puntos a los cuales se sujetará el tornillo. En la sección 3,5 se realizan los cálculos de los rodamientos que se colocaran en los elementos de sujeción de los puntos C y D para permitir el movimiento y reacomodo del ángulo del tornillo que regulara la altura.

La montura cuenta con un punto en simetría del punto D mostrado en la figura. Es irrelevante cual se utilice para el montaje.

Figura 20. **Simulación antena**



Fuente: elaboración propia, con programa Blender.

Figura 21. **Punto C**



Fuente: Laboratorio AGRA.

Figura 22. **Puntos CD**



Fuente: Laboratorio AGRA.

Figura 23. **Punto D**



Fuente: Laboratorio AGRA.

3.2.3. Tercera modificación: movimiento de azimut

El movimiento de azimut se conseguirá mediante un sistema de tornillo sin fin y corona en el punto A de la figura 24.

Figura 24. Montura, Punto AO



Fuente: Laboratorio AGRA.

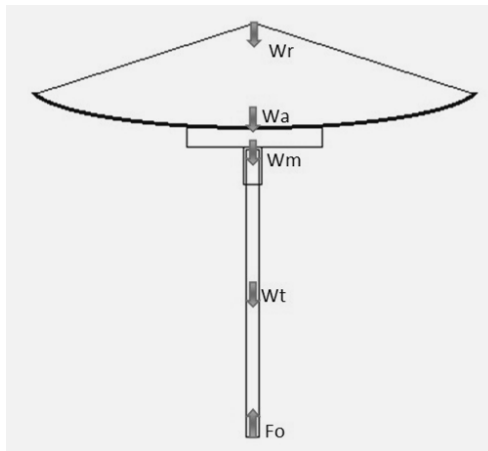
La montura estará conectada al mástil mediante rodamientos en su interior en los puntos A y O para que tenga movimiento independiente respecto de este. El motor de pasos que transmitirá el movimiento al sistema estará sujeto al mástil. La corona, en cambio, estará montada en el punto A de la montura.

3.3. Análisis de fuerzas y momentos

A partir de la estructura de la antena y montura se realizaron los siguientes diagramas de cuerpo libre para estimar las fuerzas y momentos que actuarán en el sistema en dos distintas posiciones, donde se consideran las fuerzas y momentos que poseen valores críticos y de sobreesfuerzo para los motores.

El primero, cuando la antena este apuntando directamente al cenit (figura 25).

Figura 25. **D.C.L. Apuntando al cenit**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

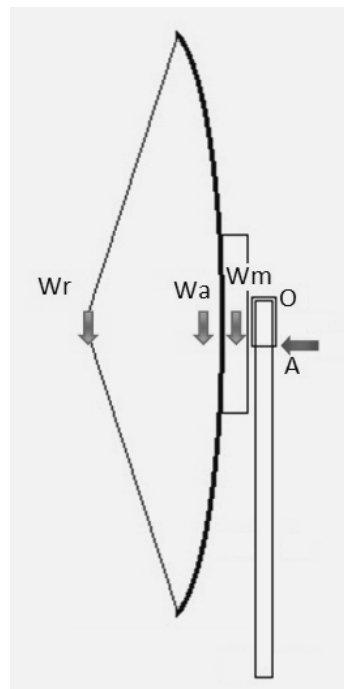
Donde:

- W_r es la fuerza debida al peso del receptor
- W_a es la fuerza debida al peso del plato de la antena
- W_m es la fuerza debida al peso de la montura
- W_t es la fuerza debida al peso del tubo mástil.

- F_o es la fuerza resultante en la base y opuesta a todas estas para el equilibrio del sistema.

El segundo, cuando la antena este apuntando hacia el horizonte matemático (figura 26), es decir, formando un ángulo de 90° con el mástil.

Figura 26. **Apuntando al horizonte**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

Donde:

- W_r es la fuerza debida al peso del receptor
- W_a es la fuerza debida al peso del plato de la antena
- W_m es la fuerza debida al peso de la montura

El efecto de W_t no es tomado en este diagrama por no incidir en el momento respecto al punto de referencia O, ya que el punto O se encuentra sobre la línea de acción de la gravedad del peso del tubo. Se indican en diagrama las fuerzas en el punto A necesarias para contrarrestar el momento debido a W_r , W_a y W_m .

3.4. Cálculos de fuerzas y momentos en el sistema

Se hará el cálculo de las fuerzas y momentos en el orden planteado anteriormente. Se inicia con la posición de la antena apuntando al cenit para calcular las fuerzas y posteriormente con la antena apuntando al horizonte para el cálculo de los momentos.

3.4.1. Primera posición: apuntando al cenit

Definiendo las fuerzas:

$$W_t = 30 \text{ lbs.}$$

$$W_m = 44 \text{ lbs.}$$

$$W_a = 35 \text{ lbs.}$$

$$W_r = 5 \text{ lbs.}$$

W_t es el peso estimado de un tubo tipo UNE-E10244L2 de 3 pulgadas nominales por 70 pulgadas de largo.

Para estimar el peso que la base debe soportar se hará la sumatoria de fuerzas debidas a los pesos de todos los componentes. La posición de la antena para esto es apuntando hacia el cenit para que todos los pesos estén

exactamente sobre la base teniendo así el máximo peso sobre ella y sin generar momentos respecto de la misma.

$$\sum M_o = 0$$

Entonces, según la figura 25, el peso en la base estará dado por la sumatoria de los pesos de esta manera:

$$\begin{aligned}\sum Fb &= Wt + Wm + Wa + Wr \\ \sum Fb &= 30 + 44 + 35 + 5 = 114.0\end{aligned}$$

Para determinar el peso que debe soportar el cojinete en el punto O en la parte superior de la montura se realizan las sumatorias de fuerzas excluyendo la fuerza debida al tubo.

$$\begin{aligned}\sum Fo &= Wm + Wa + Wr \\ \sum Fo &= 44 + 35 + 5 = 84.0\end{aligned}$$

3.4.2. Segunda posición: apuntando al horizonte matemático

Para determinar las fuerzas axiales en el punto O y en el punto A para una distancia Y bajo el punto O, se hace la sumatoria de momentos respecto del punto A y respecto del punto O (la parte superior del mástil común al punto superior de la montura).

Como se observa en la figura 26, por principio de transmisibilidad se pueden reducir los efectos de los pesos que generan momento al eje Y y el efecto de la fuerza en A al eje X. La posición seleccionada de la antena para

este caso es la de formar un ángulo de 90° con la vertical del mástil pues es el punto de máxima distancia de los pesos y por ende máximo momento.

Las distancias en el eje de las abscisas respecto al punto O son:

$$\begin{aligned}D_m &= 6" \\D_a &= 14.667" \\D_r &= 53.6"\end{aligned}$$

Las ecuaciones para los momentos respecto a los puntos O y A respectivamente son:

$$\begin{aligned}\sum M_o &= 0 \\A\bar{y} &= 6W_m + (8 + 6.667)W_a + (8 + 45.6)W_r \\ \sum M_a &= 0 \\O\bar{y} &= 6W_m + (8 + 6.667)W_a + (8 + 45.6)W_r\end{aligned}$$

Donde \bar{y} es el valor de la ordenada que le corresponde al punto A respecto al punto O, en otras palabras, es la distancia de O hacia A.

De las ecuaciones de momento respecto al punto O y al punto A se deduce que la fuerza experimentada en O y A para el empuje radial será la misma. Si se sustituyen los valores y se operan se encuentra:

$$A\bar{y} = 1045.45 \text{ lb-pulg.}$$

Si se considera que el rodamiento del punto A se colocará a 9" abajo del punto O se obtiene:

$$A = \frac{1045.45}{9} = 116.16 \text{ lbs.}$$

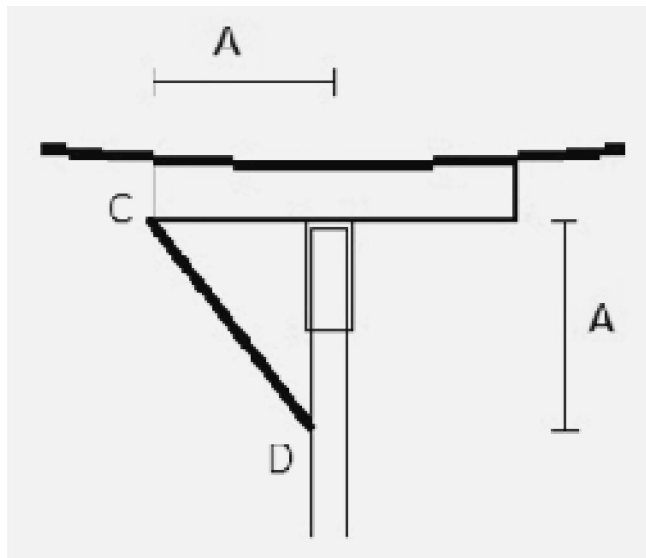
3.5. Determinación de cojinetes y engranajes del sistema

Relacionado a los movimientos de altitud y azimut que se plantearon en la sección 3,2, se calcularán los parámetros de los engranajes necesarios.

3.5.1. Movimiento de altitud de la montura, cálculo para el sistema corona y tornillo sin fin

Para calcular los parámetros de la corona y del tornillo del movimiento de altitud de la montura es necesario determinar la velocidad angular de la corona.

Figura 27. Cálculo revoluciones



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

Se toma como referencia la figura 27, esta muestra el caso de la posición del tornillo cuando la antena está apuntando al cenit.

La longitud del tornillo para este escenario es:

$$\sqrt{12^2 + 12^2} = 16.971$$

Se imagina que el tornillo rota y con ellos genera que la antena se incline 75°. Esto generará un cambio en la distancia entre el punto C y D, así también, habrá un cambio en el ángulo entre el tornillo y el mástil y, entre el tornillo y la montura. Ahora, para este escenario por ley de cosenos se obtiene:

$$x = A^2 + A^2 - 2A^2 \cos 15^\circ$$

Si A=12 entonces X será:

$$x = 2 * 12^2 * \left(1 - \cos\left(15 * \frac{\pi}{180}\right)\right)$$
$$x = 9.8134$$

Lo que lleva a decir que la distancia recorrida por el tornillo es:

$$16.971 - 9.8134 = 7.1576 \text{ pulg. o } 182 \text{ mm.}$$

Con el paso de 1 mm se harán necesarias 182 revoluciones para desplazar el sistema a lo largo de los 75° que tendrá como su campo visible. Por lo tanto la relación del sistema entre los grados recorridos por la antena respecto de las revoluciones de la corona es:

$$\frac{75}{182} = 0.41209 \text{ grad/rev.}$$

La velocidad sidérea, la cual será referencia y se tomara como 1X, está dada por la relación de los grados de la circunferencia completa entre el tiempo en segundo que se toma la tierra en una rotación completa:

$$\frac{360}{86400} = 4.1667 \times 10^{-3} \text{ grad/seg}$$

Ahora, la velocidad del eje de la corona para satisfacer la velocidad sidérea es:

$$\frac{4.1667 \times 10^{-3}}{0.41209} = 1.0111 \times 10^{-2} \text{ rev/seg.}$$

En radianes por segundo es:

$$1.0111 \times 10^{-2} * 2\pi = 6.3529 \times 10^{-2} \text{ rad/seg.}$$

Para estar a 8x, es decir, 8 veces la velocidad sidérea que la velocidad de desplazamiento utilizada por PicGoto para desplazarte entre un objeto celeste y otro.

$$8x = 8 * 6.3529 \times 10^{-2} = 0.50823$$

Para iniciar los cálculos del diseño se a hacen algunas suposiciones. La forma de calcular estos engranes es iterativa hasta encontrar una solución verdadera. En este trabajo quedarán indicadas las suposiciones iniciales y

algunas decisiones finales, no así las iteraciones y todo el proceso intermedio al no ser el objetivo de este trabajo el detalle de esta explicación.

Partiendo de una transmisión de 20 Nm en la corona y una relación U = 20, la velocidad de deslizamiento está dada por la ecuación (4) así:

$$V_s = \frac{4.3 * 50823 * 20}{10^3} * \sqrt[3]{20} = 0.11864 \text{ m/s}$$

Velocidad de deslizamiento a 1x.

$$V_s = \frac{4.3 * 6.3529 * 10^{-2} * 20}{10^3} * \sqrt[3]{20} = 4.9429 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Lo que lleva a estimar que es posible realizar la corona de fundición gris ordinaria sin inconveniente de rozamiento, que por la ecuación (6) se tiene que la tensión admisible es:

$$\sigma_H = 175 - (35 * 0.11864) = 170.85 \text{ Mpa.}$$

Para estimar la distancia interaxial se tiene, por la ecuación (7):

$$a_w = 6100 * \sqrt[3]{\frac{10}{(170847600)^2}} = 4.2683 \times 10^{-2} \text{ m.}$$

Donde para este caso se asume una transmisión de potencia en la corona de 10 Nm, esto es un valor al que se llegó durante las iteraciones. La distancia interaxial convertida en milímetros es:

$$4.2683 \times 10^{-2} * 1000 = 42.683 \text{ mm}$$

El módulo M se calcula por:

$$m = 1.7 * \frac{42.683}{34} = 2.1342$$

Normalizado por la tabla 1.1

$$m = 1$$

El factor Q, que se refiere a un coeficiente de diámetro de la herramienta de maquinado, por la ecuación (9) se estima para un mínimo de:

$$q_{\min} = .212 * 34 = 7.208$$

Para el cual se escoge usar:

$$q = 7.21$$

El coeficiente de desplazamiento de la herramienta, según la ecuación (10), esta dado por:

$$x = \frac{19.812}{1} - .5(7.21 + 34) = -0.793$$

Se observa que los valores de los parámetros Z2 y Q garantizan que el valor de X se mantenga dentro del rango deseado $-1 < x < 1$. En realidad, este

factor Q es calculado realizando iteraciones entre los valores de Z2 y Q, para garantizar que se cumpla este requisito. Como puede notarse en la ecuación del valor de X y de Qmin, en este punto queda U=34. Como se vio en capítulo primero, el valor mínimo para Q es función de Z2, por lo cual al variar Z2 se varía también el Qmin. Con ello se permite cambiar el Q a utilizar y esto converge pronto al sistema de ecuaciones para obtener una solución viable para el sistema calculado.

Ángulo primitivo de elevación de la línea de la espiral por la ecuación (19):

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{1}{7.21}\right) = 0.13782 * \frac{180}{\pi} = 7.8965$$

La eficiencia de transmisión de potencia del sistema está dada, según la ecuación (18) por:

$$\eta = \frac{\tan\left(7.8965 * \frac{\pi}{180}\right)}{\tan\left((7.8965+2.5) * \frac{\pi}{180}\right)} = 0.75597$$

Con estos resultados se realizan los cálculos de los parámetros geométricos del tornillo y de la corona, utilizando las ecuaciones (11) a la (16) con los resultados en milímetros:

$$d_1 = 2 * 7.21 = 14.42$$

$$d_{a1} = 2(7.21 + 2) = 18.42$$

$$d_{f1} = 2(7.21 - 2.4) = 9.62$$

$$d_2 = 2 * 34 = 68.0$$

$$d_{a2} = 2(34 + 2 + 2 * -.793) = 68.828$$

$$d_{f2} = 2(34 - 2.4 + 2 * -.793) = 60.028$$

Donde d_1 es el diámetro primitivo del tornillo, d_{a1} es el diámetro de la cresta de los dientes, d_{f1} es el diámetro al del pie de los dientes como se planteó en el capítulo primero. Los valores del subíndice dos se refieren a la corona para los mismos parámetros. La longitud de la parte talla del tornillo viene dada por:

$$b_1 \geq (10.5 + 0.6) * 1 = 11.1$$
$$b_1 \geq 11.1$$

Ancho de la corona máximo en milímetros:

$$b_2 \geq .75 * 18.42 = 13.815$$

3.5.2. Movimiento de azimut, cálculo para sistema corona y tornillo sin fin

Se calcula ahora los parámetros del tornillo sin fin y corona del movimiento de azimut.

La velocidad sidérea está dada por:

$$\frac{360}{86400} = 4.1667 \times 10^{-3} \text{ grad/seg}$$

En radianes por segundo:

$$4.1667 \times 10^{-3} * \frac{\pi}{180} = 7.2723 \times 10^{-5} \text{ rad/seg.}$$

A 8x:

$$8 * 7.2723 \times 10^{-5} = 5.8178 \times 10^{-4} \text{ rad/seg.}$$

Si se toma la relación del sistema tornillo sin fin y corona como U=50 para las estimaciones iniciales se tiene que la velocidad de deslizamiento está dada por la ecuación (4) así:

$$V_s = \frac{4.3 * 5.8178 \times 10^{-4} * 50}{10^3} * \sqrt[3]{20} = 3.3953 \times 10^{-4} \text{ m/s.}$$

Donde 20 son los Newtons de torque estimado inicial de la corona.

Lo que nos lleva a estimar que es posible realizar la corona de fundición gris ordinaria sin inconveniente de rozamiento, que por la ecuación (6) se tiene que la tensión admisible es:

$$\sigma_H = 175 - (35 * 3.3953 \times 10^{-4}) = 174.99 \text{ MPa}$$

Para estimar la distancia interaxial se calcula por la ecuación (7):

$$a_w = 6100 \sqrt[3]{\frac{25}{174990000^2}} = 5.7012 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Que ya en milímetros es:

$$5.7012 \times 10^{-2} * 1000 = 57.012 \text{ mm}$$

El módulo M se calcula por:

$$m = 1.7 * \frac{57.012}{95} = 1.0202$$

Normalizado por la tabla 1.1:

$$m = 1$$

El factor Q, que se refiere a un coeficiente de diámetro de la herramienta de maquinado, por la ecuación (9) se estima para un mínimo de:

$$q_{\min} = .212 * 95 = 20.14$$

Para el cual se escoge usar:

$$q = 20.15$$

El coeficiente de desplazamiento de la herramienta, según la ecuación (10), esta dado por:

$$x = \frac{57.012}{1} - .5(20.15 + 95) = -0.563$$

Se observa que los valores de los parámetros Z2 y Q garantizan que el valor de X se mantenga dentro del rango deseado $-1 < x < 1$. En realidad, este factor Q es calculado realizando iteraciones entre los valores de Z2 y Q, para garantizar que se cumpla este requisito. Como puede notarse en la ecuación del valor de X y de Qmin, en este punto queda U=95. Al igual que el cálculo para el engrane anterior y como se vio en capítulo primero, el valor mínimo para Q es función de Z2, por lo cual al variar Z2 se varía también el Qmin, con lo cual

se permite variar el Q a utilizar y esto converge pronto al sistema de ecuaciones para obtener una solución viable para el sistema calculado.

Ángulo primitivo de elevación de la línea de la espiral por la ecuación (19):

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{1}{20.15}\right) = 4.9587 \times 10^{-2} * \frac{180}{\pi} = 2.8411$$

La eficiencia de transmisión de potencia del sistema está dada, según la ecuación (18) por:

$$\eta = \frac{\tan(2.8411 * \frac{\pi}{180})}{\tan((2.8411 + 2.5) * \frac{\pi}{180})} = 0.53083$$

Con estos resultados se realizan los cálculos de los parámetros geométricos del tornillo y de la corona, utilizando las ecuaciones (11) a la (16) con los resultados en milímetros:

$$\begin{aligned} d_1 &= 20.15 * 1 = 20.15 \\ d_{a1} &= 1(20.15 + 2) = 22.15 \\ d_{f1} &= 1(20.15 - 2.4) = 17.75 \\ d_2 &= 1 * 95 = 95.0 \\ d_{a2} &= 1(95 + 2 + 2 * -0.5624) = 95.875 \\ d_{f2} &= 1(95 - 2.4 + 2 * -0.5624) = 91.475 \end{aligned}$$

Donde d1 es el diámetro primitivo del tornillo, da1 es el diámetro de la cresta de los dientes. df1 es el diámetro al del pie de los dientes como se planteó en el capítulo primero. Los valores del subíndice dos se refieren a la corona para los mismos parámetros. La longitud de la parte talla del tornillo viene dada por:

$$b_2 \geq 1(10.5 + .06)$$

$$b_2 \geq 10.56$$

El máximo ancho de la corona será

$$b_2 = .75 * 22.15 = 16.613$$

3.5.3. Rodamientos a utilizarse

Los coeficientes de rozamientos, según Motion&Control NSK son:

- Rodamiento de agujas: 0,0015
- Rodamiento de rodillos cónicos: 0,0022
- Rodamiento de rodillos cilíndricos: 0,0010

Los esfuerzos y velocidades a los que los cojinetes se verán sometidos en este trabajo están muy por debajo de lo previsto por los fabricantes. Los esfuerzos están en el orden de los 1000 Kgf y superiores y las velocidades en el orden de las 15 000 RPM. Por lo cual la selección del rodamiento para este caso es más un problema de medidas y ajustes que de esfuerzos y capacidades.

Como se observa en los planos de la sección 3.10.1 para el elemento de sujeción en el punto D, se tienen dos elementos rodantes. Uno en el punto D2, en el extremo del eje y el otro en el punto D1, más cercano al punto de sujeción. En el medio de estos rodamientos un eje estará sujeto mediante tuerca y contratuerca al extremo D de la montura. De la misma forma, el elemento de sujeción en el punto C, cuyos planos se observan en la sección 3,10,2, se tienen los elementos rodantes y el eje irá en la misma configuración.

En vano D, del elemento de sujeción en el punto D de la montura, se colocará un rodamiento de cilindros cónicos en el cual se recibirá el tornillo del movimiento de altura de la antena.

Los elementos propuestos, en los cuales se basó el diseño son tomados del catálogo de Motion&Control NSK.

- Puntos D2 y C2: cojinete de agujas código FWF-121613, de 18 mm de diámetro exterior, 14 mm de diámetro interior y 13 mm de espesor con una masa de 11 gr. Más externo.
- Puntos D1 y C1: cojinete de agujas código FWF-121613, 19 mm de diámetro exterior, 15 mm de diámetro interior y 13 mm de espesor con una masa de 11 gr.
- Punto D: cojinete de rodillos cónicos código 30322, de 35 mm de diámetro exterior, 15 mm de diámetro interior y 11,75 mm de espesor.
- Para el punto O: cojinete de rodillos cónicos, código HR32913 J, de 90 mm de diámetro exterior, 65 mm de diámetro interior y 17 de espesor.
- Para el punto A: cojinete de bolas, código 6913, de 90 mm de diámetro exterior, 65 mm de diámetro interior y 13 de espesor.

3.6. Cálculo de motores basados al análisis de fuerzas y momentos completo

Se utilizan los cálculos de fuerzas y momentos para obtener los parámetros de los motores necesarios para dar a la montura el movimiento en altura y azimut.

3.6.1. Motor para movimiento de altura

Se hace referencia a la imagen de la montura (figura 3.11). Se supone que la montura se encuentra apuntando 20° sobre el horizonte matemático. Aplicando la sumatoria de momentos respecto al punto de rotación, donde para equilibrar debe ser igual a cero se obtiene la fuerza mínima que debe realizar el tornillo para sostener la montura, se necesita una fuerza superior a esta para generar movimiento.

Esta viene dada por:

$$\begin{aligned} & A \cos\left(10 * \frac{\pi}{180}\right) \cos\left(20 * \frac{\pi}{180}\right) + \sin\left(20 * \frac{\pi}{180}\right) \sin\left(10 * \frac{\pi}{180}\right) \\ & = (6 * 44 + (6 + 8.667) * 35 + (6 + 8.667 + 40.933) * 5) * \cos\left(20 * \frac{\pi}{180}\right) \end{aligned}$$

Despejando A de la ecuación se tiene:

$$A = \frac{991.66}{11.818} = 83.911 \text{ lbs.}$$

Para obtener el par necesario en función del diámetro del tornillo y de la fuerza W se utiliza la ecuación que se aplica para tornillos normalizados.

$$T = 0.2dW$$

Donde $W = A$. y $d = 1,2 \text{ cm}$. Como el torque debe ser dado en Kg-cm la ecuación queda de la siguiente manera.

$$T = 0.2 * 1.2 * \frac{83.911}{2.2} = 9.1539 \text{ Kg-cm.}$$

Dada la relación:

$$P = \omega T$$

Y sabiendo que la potencia de salida y entrada es idealmente la misma y que la variación de ω es en función de la relación U del sistema de engranes, el torque T variará en función de $1/U$, lo cual lleva a que cuando la velocidad angular disminuye, el par aumenta en la misma proporción que la velocidad angular disminuyó.

Por lo tanto si:

$$T_2 = 9.1539 \text{ Kg-cm}$$

Entonces:

$$T_1 = \frac{T_2}{U} = \frac{9.1539}{34} = 0.26923 \text{ Kg-cm}$$

En N-m sería:

$$0.26923 * 9.80665 * \frac{1}{100} = 2.6402 \times 10^{-2} \text{ N-m.}$$

Y en N-cm:

$$2.6402 \times 10^{-2} * 100 = 2.6402 \text{ N-cm}$$

3.6.2. Motor de movimiento de azimut

Debido al bajo coeficiente de rozamiento que se tendrá en el rodamiento del punto O, la ausencia de otro momento ejercido respecto al punto O y la alta relación del sistema corona y tornillo sin fin. Esto proporcionará un elevado par en la salida de la corona se usará un motor de las mismas características que para el movimiento de altura.

3.7. Selección de motores por consideración de características calculadas

Basado al cálculo, el motor seleccionado para ambos movimientos debe ser un motor Nema 17 o superior, con un torque superior a 5,0 Ncm o 0,050 Nm. Esto es ya considerando la eficiencia del sistema tornillo sin fin-corona calculado y debe trabajar a una tensión de 12- 24 Voltios.

Por ejemplo, existe el motor de la marca Stepperonline modelo 17HS19-0854S, el cual cumple con todas las características requeridas y que son listadas a continuación.

Tabla IV. **Conexión**

| Color del Cable | Negro | Verde | Rojo | Azul |
|----------------------|-------|-------|------|------|
| Identificador Borne. | A | C | B | D |

Fuente: StepperOnline. www.omc-stepperonline.com. Consulta: 3 de Noviembre de 2014.

Tabla V. Especificaciones eléctricas

| | |
|----------------------|-------------------|
| Modelo | 17HS19-0854S |
| Tipo de Motor | Bipolar Stepper |
| Angulo de paso. | 1.8° |
| Torque | 44Ncm(61.1oz.in) |
| Intensidad por fase. | 0.85 ^a |
| Resistencia por fase | 6.2ohms |
| Voltaje recomendado | 12-24V |
| Inductancia | 11mH±20%(1KHz) |

Fuente: StepperOnline. www.omc-stepperonline.com. Consulta: 3 de noviembre de 2014.

Tabla VI. Características físicas

| | |
|--------------------|-----------|
| Frente | 42 x 42mm |
| Longitud | 48mm |
| Diámetro eje | Φ5mm |
| Longitud Eje | 24mm |
| Longitud muesca | 15mm |
| Numero conductores | 4 |
| Longitud conductor | 500mm |
| Peso | 350g |

Fuente: StepperOnline. www.omc-stepperonline.com. Consulta: 3 de noviembre de 2014.

3.8. Análisis del funcionamiento de software PicGoto

El Picgoto es un software desarrollado sobre el lenguaje C por Ángel Caparrós, fue desarrollado sin fines de lucro para un evento astronómico hacia el año 2003. Picgoto: diseñado específicamente para telescopios puede controlar monturas ecuatoriales y altacimutales, controla el enfoque en los telescopios. Es capaz de controlar motores de pasos de hasta 20 micro pasos. Utiliza el protocolo ASCOM, el cual es un estándar que sirve para comunicación entre dos software de propósito astronómico; también entre software y montura de telescopios, permite su conexión con diversos programas de mapas astronómicos. Está pensado en que sea de bajo costo, al ser desarrollado sin fines de lucro se creó como algo para compartir, un diseño replicable y de fácil acceso a los componentes en cualquier lugar del mundo.

Su funcionamiento está basado en el PIC16F628A, comunica por el puerto serial a la PC o bien usando un puerto USB con adaptador serial a transmisiones desde 9600 hasta 38400 bps. Es configurable cualquier reducción mediante software, es decir, para cualquier montura, bastará con indicar cuál es la relación de reducción de los engranajes para que él haga el cálculo de posicionamiento y velocidad. PicGoto también puede ser usado para controlar una montura en red mediante el protocolo TCP/IP.

Se divide en dos partes, la aplicación de escritorio y el *firmware* que se instala en el pic 16F628A. Todos los cálculos y el control se realizan en el ordenador, el *firmware* del PIC solo es un esclavo que responde a las órdenes de la aplicación de escritorio convirtiéndolas en señales ordenadas para los motores.

Hasta el momento, el PicGoto no ha sido utilizado más que para proyectos de astronomía óptica, utilizando telescopios de hasta 65 cm de apertura. Esta es la primera vez que PicGoto se usará para motorizar antenas para fines de radioastronomía.

Existe en tres versiones de PicGoto, originalmente se publicaron las versiones ecuatorial y altacimutal y posteriormente la versión PicGoto++ , que permite usar el mismo software para ambos tipos de monturas y trabaja con una versión superior del protocolo ASCOM.

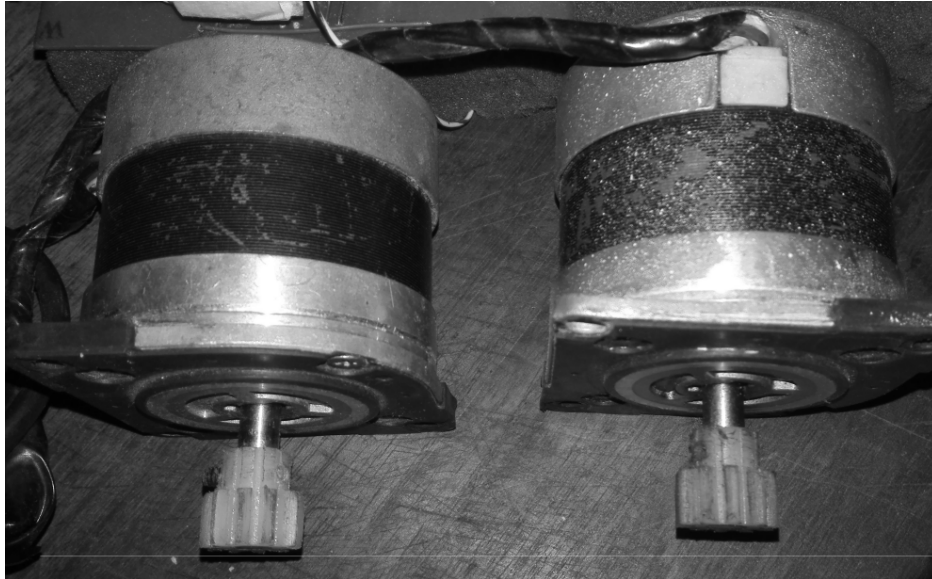
El software PicGoto corresponde a un diseño del circuito eléctrico específico. Sin embargo, existen diversas versiones realizadas con éxito por terceros bajo aprobación o soporte del creador de PicGoto. El diseño de PicGoto se adjunta en la sección 3,11 de diagramas eléctricos de circuitos.

3.9. Consideraciones de PicGoto y de los motores seleccionados para el diseño de circuito de control y de potencia

El software y circuito de PicGoto fueron diseñados pensando en el uso de motores de pasos y micropasos por las ventajas que estos suponen para la precisión en la posición, el control de velocidad y el fácil control del sentido de la rotación.

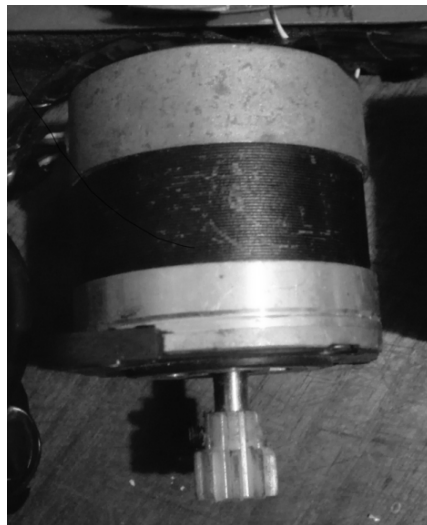
Los motores seleccionados para este diseño son de este mismo tipo y no es necesario realizar modificaciones los circuitos de control. La selección adecuada del sistema mecánico permite grandes relaciones entre las velocidades y pares de trabajo de los ejes involucrados, lo que permite mantener el tipo de motores para el control de la montura.

Figura 28. **Motores de pasos de PicGoto**



Fuente: Laboratorio AGRA.

Figura 29. **Motor de pasos de PicGoto**



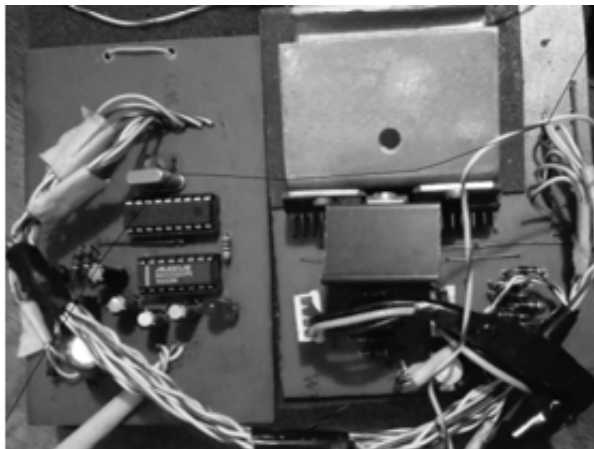
Fuente: Laboratorio AGRA.

Existe como modificación de PicGoto una opción para motores de mayor potencia. Esta consiste en una nueva etapa de potencia que permite el manejo de motores de hasta 4A a 12V.

Los motores sugeridos para este diseño se encuentran dentro los límites que el circuito PicGoto puede soportar, por tanto, no es necesario realizar ninguna modificación, ni agregado al circuito PicGoto en su etapa de potencia.

En las figuras 28 a la 30 se muestran fotografías del circuito PicGoto creado para las pruebas de este proyecto.

Figura 30. **Circuito PicGoto**



Fuente: Laboratorio AGRA.

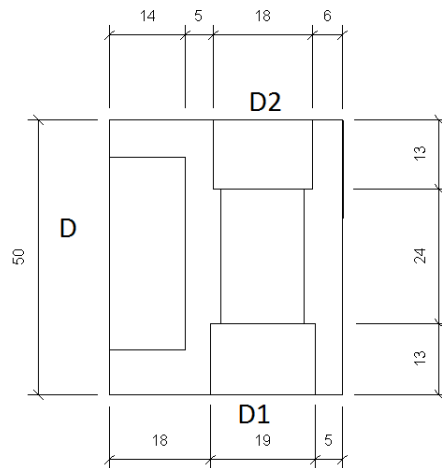
3.10. Planos del diseño mecánico

Se presentan a continuación los planos de las piezas para sujeción en los punto D y C en milímetros. El levantamiento de planos de la montura se plasma en la sección 3,10,3 con sus medidas en centímetros.

3.10.1. Elemento de sujeción en el punto D

- Vista de planta:

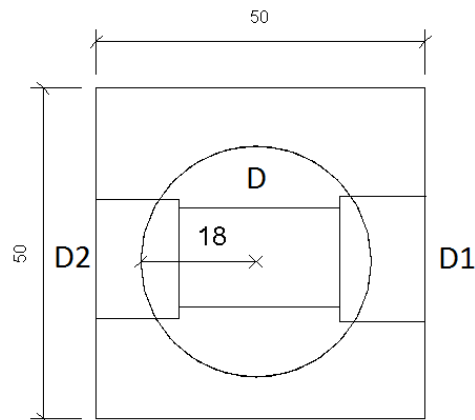
Figura 31. **Vista de planta, elemento D**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

- Vista de elevación:

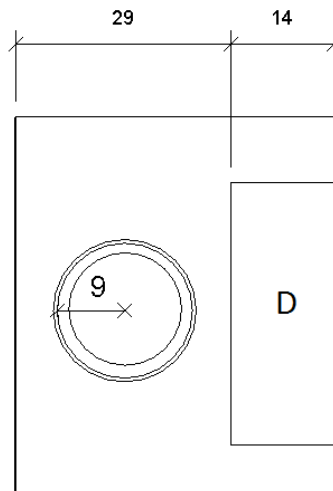
Figura 32. **Vista de elevación, elemento D**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

- Vista de Perfil:

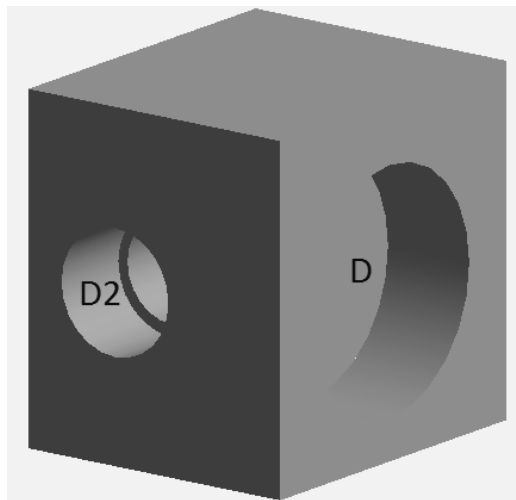
Figura 33. **Vista de perfil, elemento D**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

- Vista 3D:

Figura 34. **Vista 3D, elemento D**

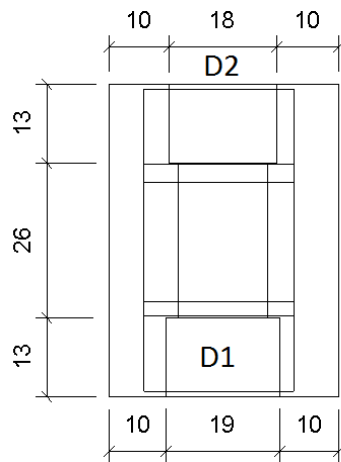


Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

3.10.2 Elemento de sujeción en el punto C

- Vista de planta:

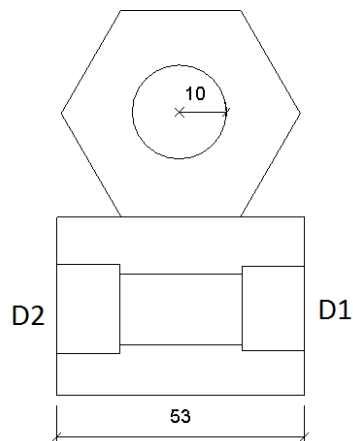
Figura 35. **Vista de planta, elemento C**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

- Vista de elevación:

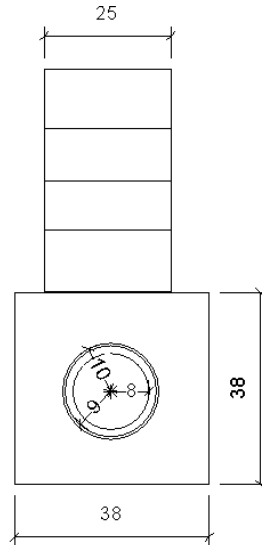
Figura 36. **Vista de elevación, elemento C**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

- Vista de perfil:

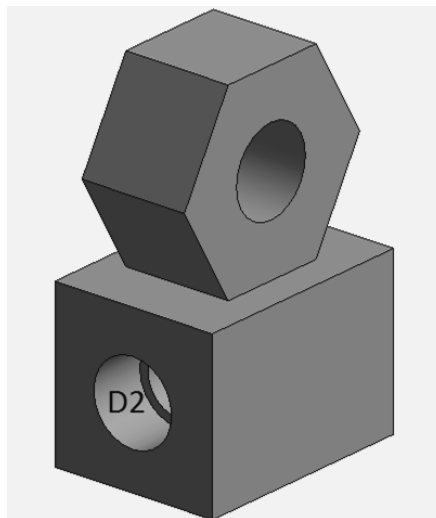
Figura 37. **Vista de perfil, elemento C**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

- Vista 3D:

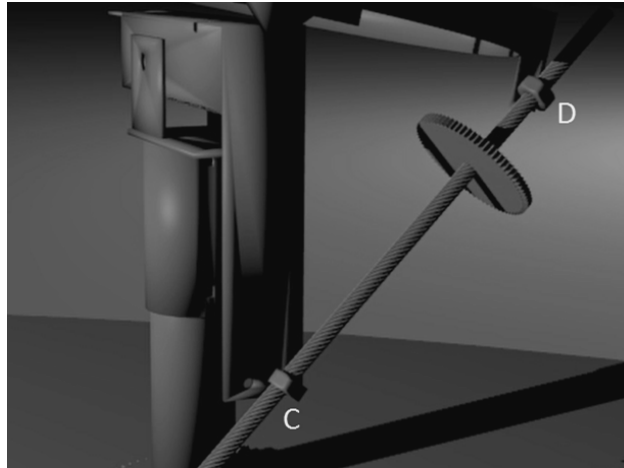
Figura 38. **Vista 3D, elemento C**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

- Elementos de sujeción en la montura:

Figura 39. Elementos de sujeción C y D

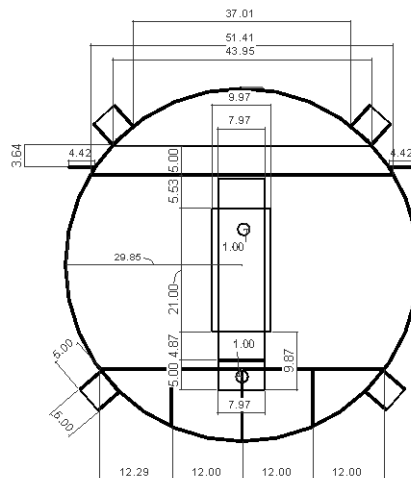


Fuente: elaboración propia, con programa Blender.

3.10.3. Montura

- Vista de planta:

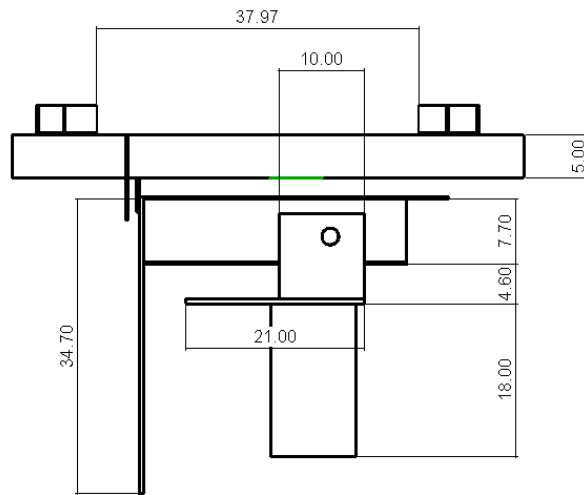
Figura 40. Vista de planta, montura



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

- Vista de elevación:

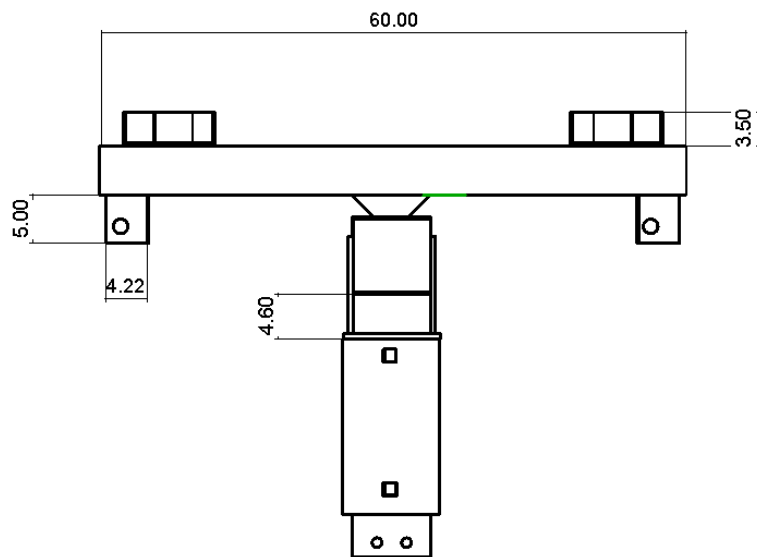
Figura 41. **Vista de elevación, montura**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

- Vista de perfil:

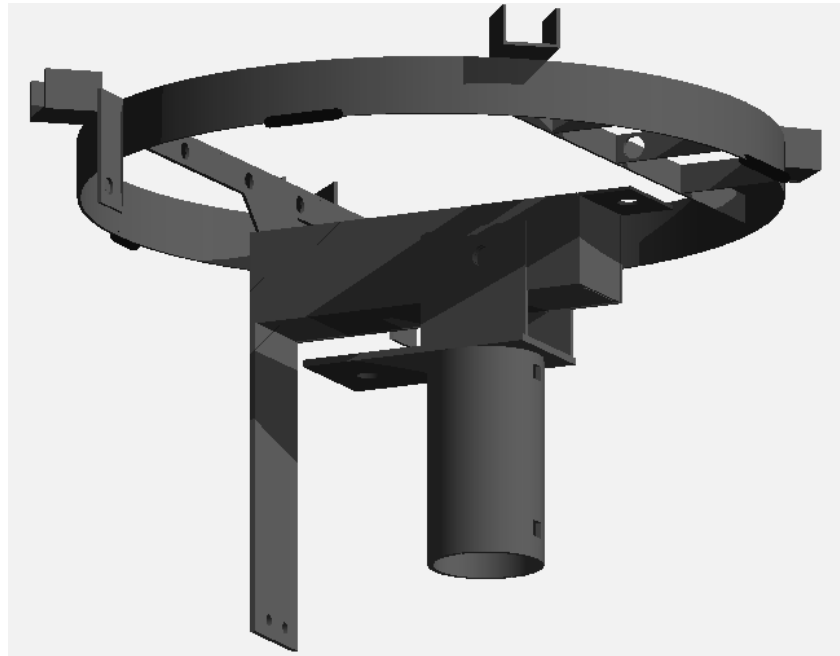
Figura 42. **Vista de perfil, montura**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

- Vista 3D:

Figura 43. **Vista 3D, Montura**



Fuente: elaboración propia, con programa Revit 2014.

3.11. Diagramas eléctricos de circuitos

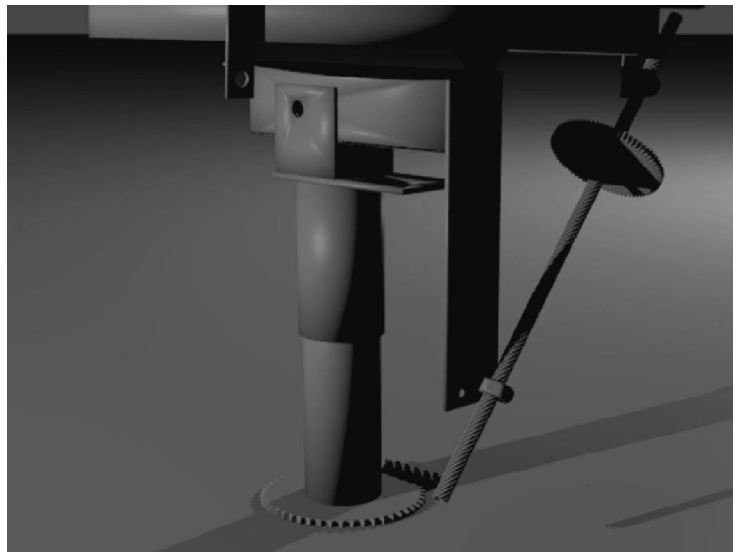
Mediante los cálculos de los motores se determinó que no es necesario hacer modificaciones al sistema PicGoto en su etapa de potencia. Se colocan a continuación los diagramas proporcionados por Aldo Moraga en su sitio de internet. En dicho sitio se encuentra paso a paso descrita la realización del PicGoto así como el listado de componentes usados. Aldo Moraga publica en su página algunas variaciones propias realizadas al sistema PicGoto en su etapa de potencia. También en el sitio de internet de Ángel Caparros está la documentación del proyecto PicGoto para quien desee emprender el proyecto.

3.12. Desarrollo del diseño

La antena usada para la realización del presente trabajo fue prestada temporalmente lo que imposibilita, al momento, la implementación del proyecto. Se adjunta a este trabajo una corta animación del funcionamiento final de la montura con las modificaciones descritas a lo largo de este trabajo.

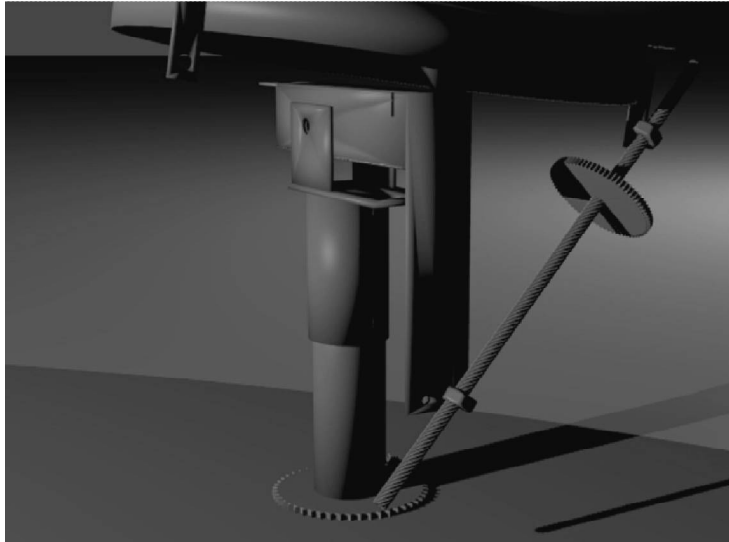
Se observa en las imágenes mostradas a continuación el movimiento de la antena, su giro respecto al mástil así como su cambio de inclinación. En la primer captura la antena se encuentra apuntando al cenit. En las siguientes figuras se aprecia a la antena descendiendo al mismo tiempo que rota sobre el mástil para mostrarse en la última captura en su punto más bajo, apuntando a unos 20° sobre el horizonte. Cada figura tiene una descripción aproximada de la inclinación que tiene en el momento de la captura.

Figura 46. **Montura, apuntando al cenit**



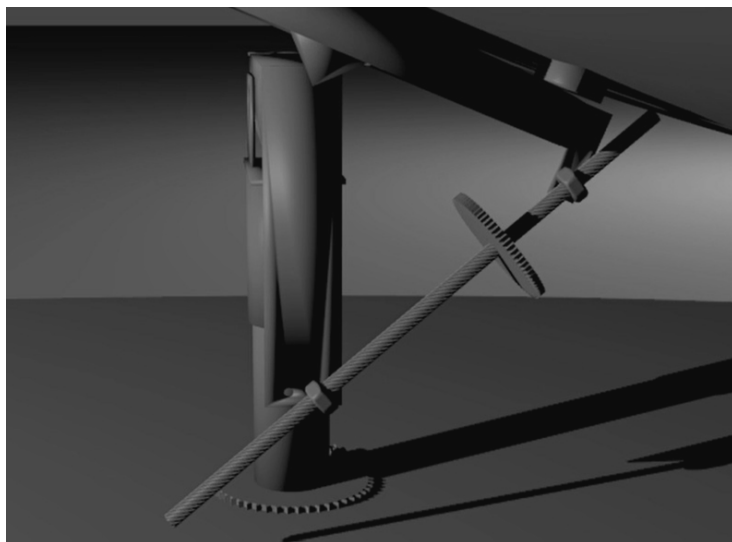
Fuente: elaboración propia, con programa Blender.

Figura 47. **Montura, descendiendo desde el cenit**



Fuente: elaboración propia, con programa Blender.

Figura 48. **Montura, 75 grados**



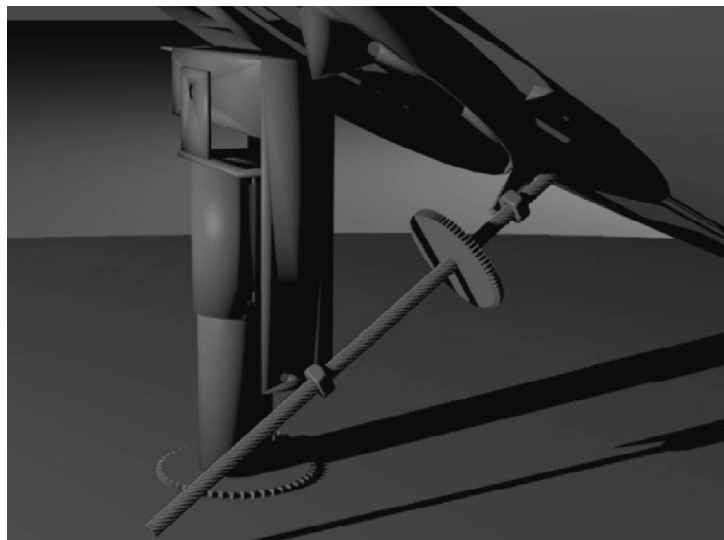
Fuente: elaboración propia, con programa Blender.

Figura 49. **Montura, 65 grados**



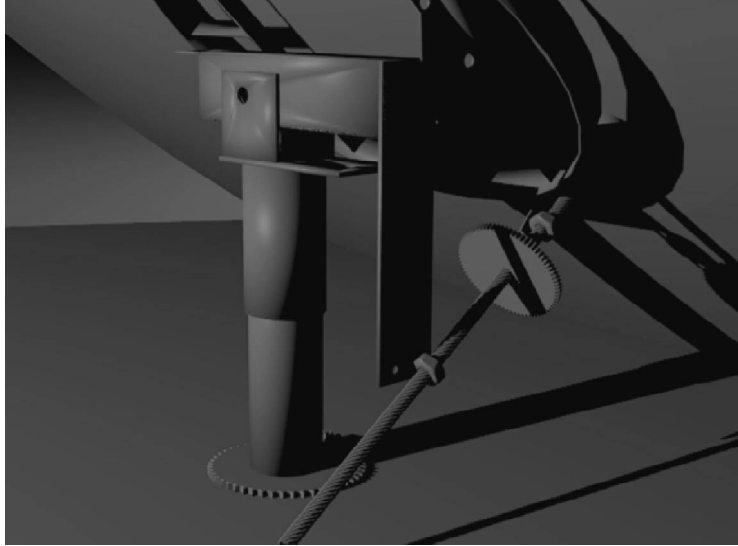
Fuente: elaboración propia, con programa Blender.

Figura 50. **Montura, 55 grados**



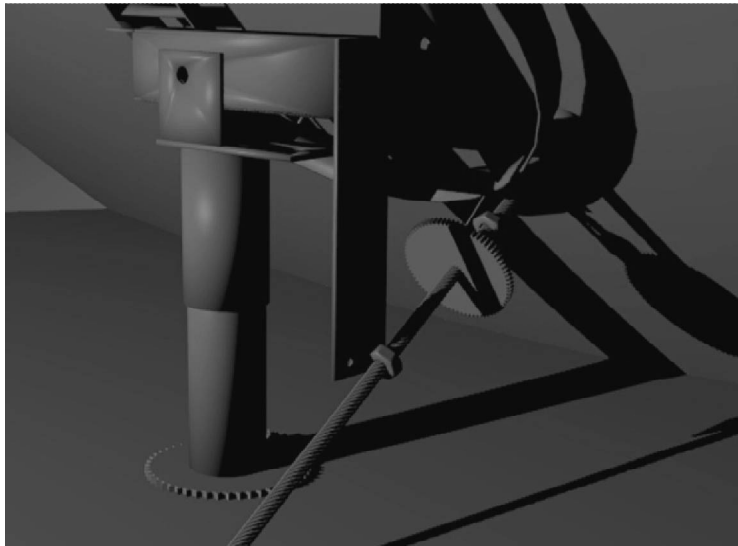
Fuente: elaboración propia, con programa Blender.

Figura 51. **Montura, 40 grados**



Fuente: elaboración propia, con programa Blender.

Figura 52. **Montura, 20 grados**



Fuente: elaboración propia, con programa Blender.

CONCLUSIONES

1. La unidad de control (PicGoto), actuadores (motores de pasos) y diseño mecánico tienen una íntima relación, para proponer una modificación a uno de estos tres elementos es necesario pensar en la incidencia en los otros dos.
2. El diseño mecánico del proyecto se ve delimitado al comportamiento de los cuerpos celestes y su movimiento respecto a la tierra; así también al sistema PicGoto que está hecho considerando los principios astronómicos del movimiento.
3. La selección del sistema corona-tornillo sin fin permite utilizar motores de pasos, de relativo bajo costo y que cumplan con los requerimientos de par y precisión solicitados por el sistema para realizar el movimiento de la antena.
4. Según los requerimientos eléctricos de los motores se hizo innecesaria la modificación del sistema PicGoto.
5. La selección del sistema tornillo sin fin y corona para la montura hace que el sistema no sea reversible, es decir, no permite que el giro se aplique desde la corona, evitando así el uso de frenos adicionales al sistema.

RECOMENDACIONES

1. Para el mantenimiento, considerar ante el cambio de motores que estos cumplan con las condiciones mínimas requeridas de torque sin exceder la máxima potencia que puede entregar PicGoto.
2. Al maquinista de los elementos motrices, queda a su experiencia la elaboración del método de sujeción de los tornillos sin fin hacia el eje de los motores adquiridos.
3. Utilizar el software PicGoto con sistema operativo WindowsXP para evitar conflictos de conexión con software que utilice protocolo ASCOM.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARROYAVE LONDOÑO, Juan. *Ingeniería inversa de un reductor de tornillo sin fin corona*. Arroyave Londoño, Juan; Romero Piedrahita, Carlos; Montilla Montaña, Carlos. *Scientia et Technica*. Año XVII, No 52, Diciembre de 2012. 204-210 p.
2. Astronomía Sur. *Coordenadas* [en línea]. <<http://www.astrosurf.com/astronosur/coordenadas.htm>>. [Consulta: 18 de julio de 2014].
3. *Ascom Protocol* [en línea]. <<http://ascom-standards.org>>. [Consulta: 14 de diciembre de 2014].
4. BRINDIS, Eleno Alfonso. *Transmisiones por engranajes, Metodología de cálculo*. Cuba: Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, 2004. 40 p.
5. CAPARROS, Ángel. *Sitio Picgoto* [en línea]. <<https://sites.google.com/site/picgoto/Home>>. [Consulta: 18 de julio de 2014].
6. EBEL, F. et al. *Fundamentos de la técnica de automatización*. Pittschellis, Reinhard (Red.). Alemania: Festo Didactic GmbH & Co., 2008. 106 p.

7. GARZÓN, Julia. et al. *100 Conceptos básicos de Astronomía*. España: Sociedad Española de Astronomía, 2009. 102 p.
8. HALL, A.S. *Diseño de Máquinas*. Hall, A.S.; Holowenco, A.R.; Laughlin, H.G.; Serie Schaum. 346 p.
9. Industrial Circuits Application Note. *Stepper Motor Basics* [en línea]. <<http://www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/6>>. [Consulta: 1 de julio de 2014].
10. Kaul-Tronics. Radio Astronomy Supplies Kaul-Tronics. *Catálogo* [en línea]. <http://www.nitehawk.com/rasmit/ant_tr_coax.pdf>. [Consulta: 5 de junio de 2014].
11. MORAGA, Aldo. Sitio *Picgoto* [en línea]. <<https://sites.google.com/site/aldomoraga/Home/motorizacion-picgoto>>. [Consulta: 20 de agosto de 2014].
12. Motion&Control NSK. Rodamientos. *Catálogo* [en línea]. <<http://www.nsk.com>>. [Consulta: 12 de noviembre de 2014].
13. PIDDINGTON, J.H. *Radio Astronomy*. Inglaterra: Hutchinson & Co. (Publishers) LTD, 1961. 128 p.
14. Radio Sky. *Software RadioEyes*. [en línea]. <<http://www.radiosky.com/radioeyesishere.html>>. [Consulta: 14 de diciembre de 2014].

15. ZABALZA VILLAVA I. *Síntesis de mecanismos y máquinas 2010*.
España: Universidad Pública Navarra. 2010. 185 p.

APÉNDICES

Apéndice 1: **Conexión de la placa PicGoto a la computadora (PC)**

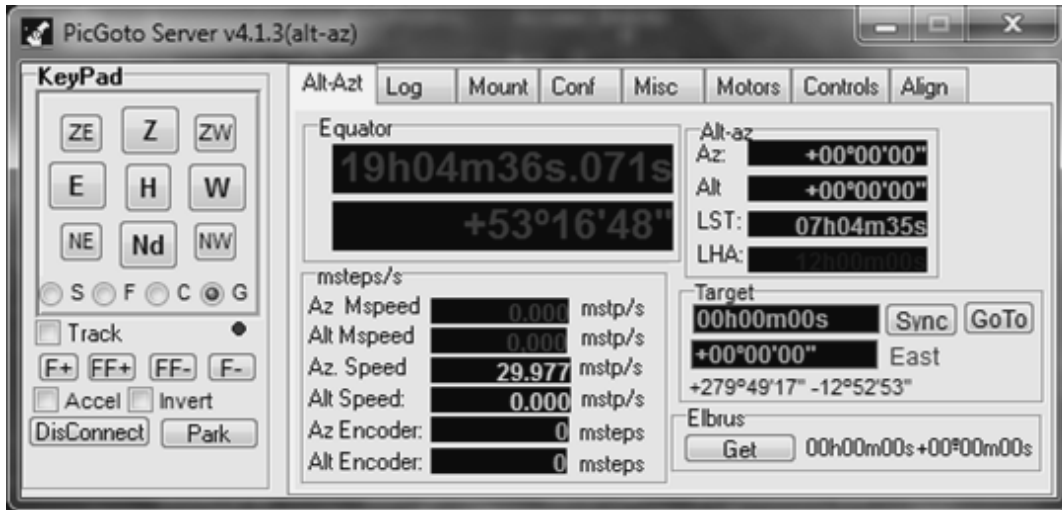
La conexión del PicGoto hacia la PC se realiza por medio de una interfaz serial (COM), o bien utilizando un convertidor serial a USB.

Existen varias versiones del PicGoto Server para controlar el hardware del PicGoto, sin embargo para el desarrollo de este trabajo de graduación se utilizó la versión original de la placa, por lo que el Server correspondiente es la versión 4.1.3 (Alt-Az).

Lo primero que debe hacerse es configurar los parámetros del puerto COM de la PC, considerando que son programados en el PicGoto Server y deben coincidir con los parámetros programados en la PC. Algunas versiones de PicGoto Server intentarán la conexión con la placa al momento de iniciarse, si el puerto COM que intenta conectar por default no coincide con el puerto COM en el que está conectada la placa a la PC, se generará un error que mostrará el mensaje "Port Error". Pulsando aceptar continuará a la pantalla de inicio.

La siguiente figura muestra la pantalla de inicio del software PicGoto. Se puede observar las pestañas que nos facilitan acceder a las diversas opciones del software, la opción KeyPad para el manejar la montura y las coordenadas a las que apunta la montura en ese momento.

Figura 1. Picgoto Server



Fuente: elaboración propia.

Dentro del PicGoto Server se debe seleccionar la pestaña “Conf”, y dentro se encontrarán todos los parámetros que deben programarse en el puerto COM de la PC. Dicha configuración se observa en el apartado “Serial Settings”.

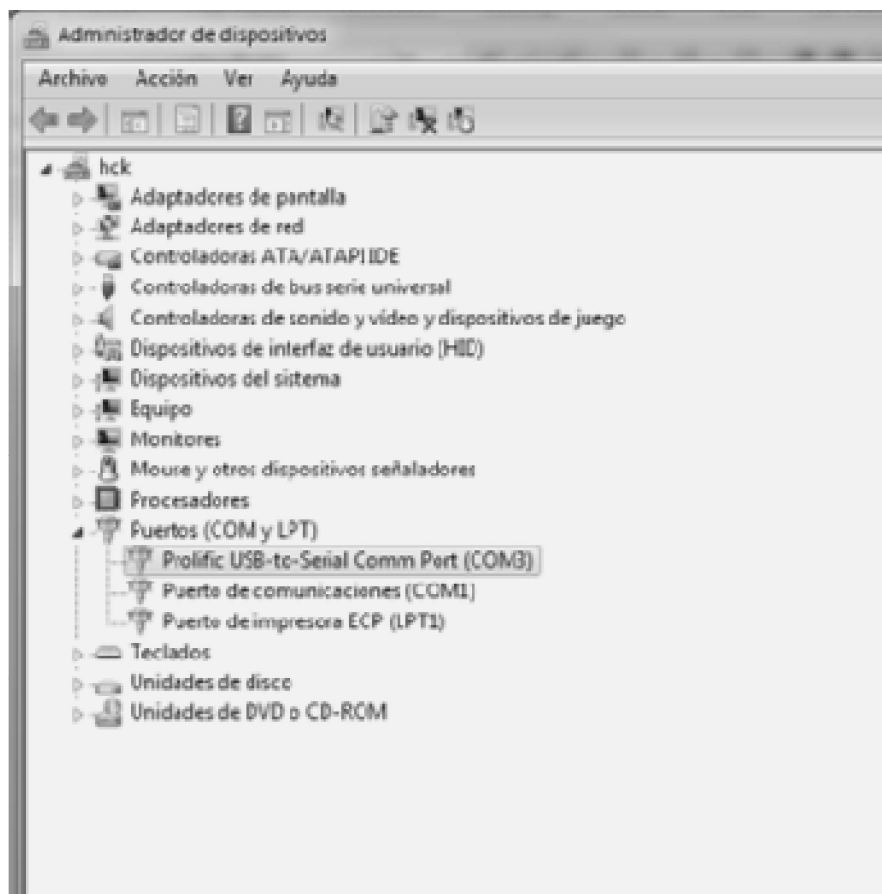
Figura 2. Configuración Picgoto



Fuente: elaboración propia.

Para programar los parámetros correctos en el PicGoto Server se debe ir al apartado de “Administrador de Dispositivos”, y determinar el puerto COM utilizado para comunicarse con la placa PicGoto. Se utilizó en este caso un convertidor USB-to-Serial asignado al puerto COM3.

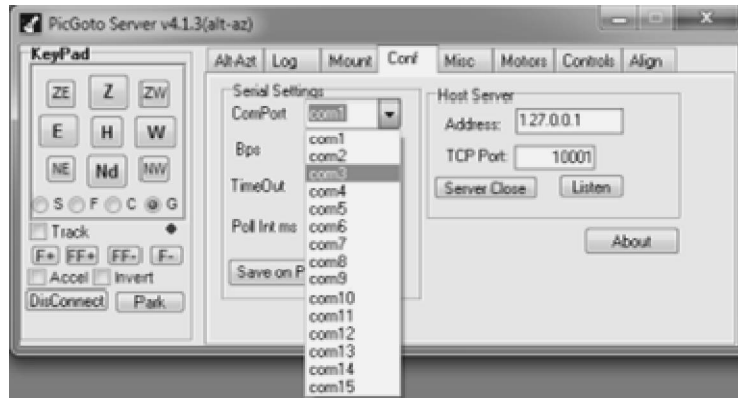
Figura 3. **Administrador de dispositivos**



Fuente: elaboración propia.

Conociendo el puerto COM utilizado de la PC se procede a configurar el puerto de comunicación serial en el PicGoto Server.

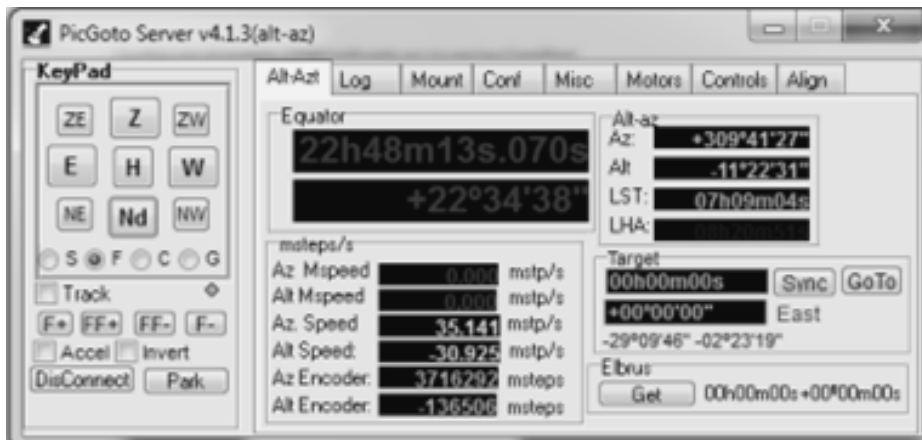
Figura 4. Pestaña Conf



Fuente: elaboración propia.

Al regresar a la pestaña “Alt-Azt”, se debe presionar el botón DISCONNECT, esto a pesar de estar desconectado (es un paso requerido), asegurando así que el puerto este libre para la conexión deseada.

Figura 5. Pestaña Alt-Azt

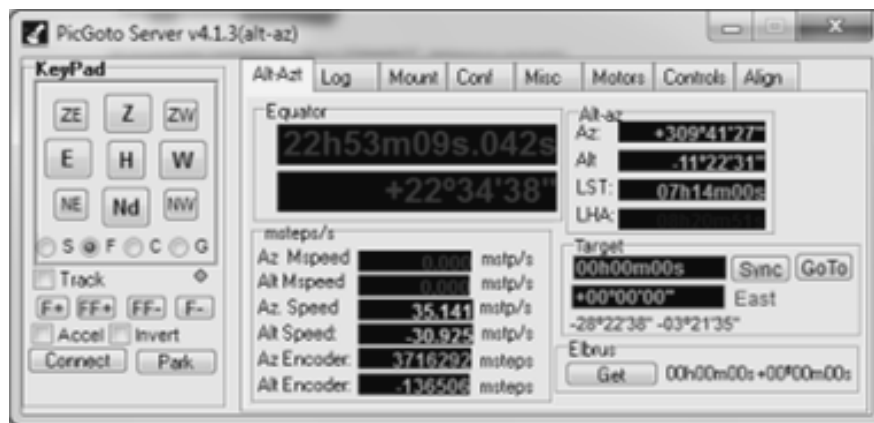


Fuente: elaboración propia.

La indicación del botón “DisConnect” cambiará a “Connect” como se aprecia en la figura 6.

Pulsando nuevamente el botón Connect, y teniendo conectada físicamente la placa PicGoto al PC, quedará conectado el software con la placa, y los datos en pantalla estarán sincronizándose con el PIC que controlará los motores PAP.

Figura 6. **Connect**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2: **Conectando PicgotoPlus Server con Radio Eyes (RE)**

Como fue mencionado en el capítulo 3 de este trabajo, existe un software llamado Radio Eyes que es un mapa de radio fuentes celestes conocidas y que permite, mediante un entorno gráfico y amigable, la sincronización del software con otro software para control a distancia de telescopios o radiotelescopios.

También es posible manejar el telescopio o radiotelescopio directamente sin un software controlador. Esto va a depender del tipo de diseño y equipo utilizado. En nuestro caso, PicgotoPlus Server será el driver que maneje la montura y por lo tanto RE debe de sincronizarse con este para gobernar la montura desde el entorno gráfico provisto por RE.

Para realizar este trabajo se necesita tener compatibilidades de software muy específicas, que no necesariamente son las últimas versiones de cada software pero son las que para este propósito son compatibles y funcionales.

Se lista a continuación los elementos de software con sus versiones respectivas utilizadas para el efecto:

- Sistema Operativo Windows XP service pack 2. Para este caso se utilizó de forma virtual usando Oracle VirtualBox que es de licenciamiento gratuito.
- Radio Eyes 1.3.16. Descargado desde la fuente provista por el creador <http://www.radiosky.com/radioeyesishere.html>. Para esto se usó un licenciamiento provisional que permitiera al menos la configuración básica necesaria.
- Ascom 4.1, versión que trae RE y que requiere que sea Windows XP service pack 2 el sistema operativo para su funcionamiento. Esta no se encuentra disponible para descarga actualmente. Sin embargo, se encuentra en la carpeta ASCOM dentro de la carpeta de instalación de RE que por default es C:\Archivos de Programa\RadioEyes1.
- PicgotoPlus Server 2.2.15 compilado con Ascom 4.1, esta versión especial fue provista por Ángel Cáparros, creador de Picgoto y PicgotoPlus. La versión original de PicgotoPlus Server 2.2.15 esta compilada con ASCOM 6sp1, sin embargo, Radio Eyes no es compatible con dicha versión.

Teniendo instalados los componentes en sus versiones adecuadas podemos iniciar la configuración de la sincronización entre RE y PicgotoPlus Server que se detalla a continuación.

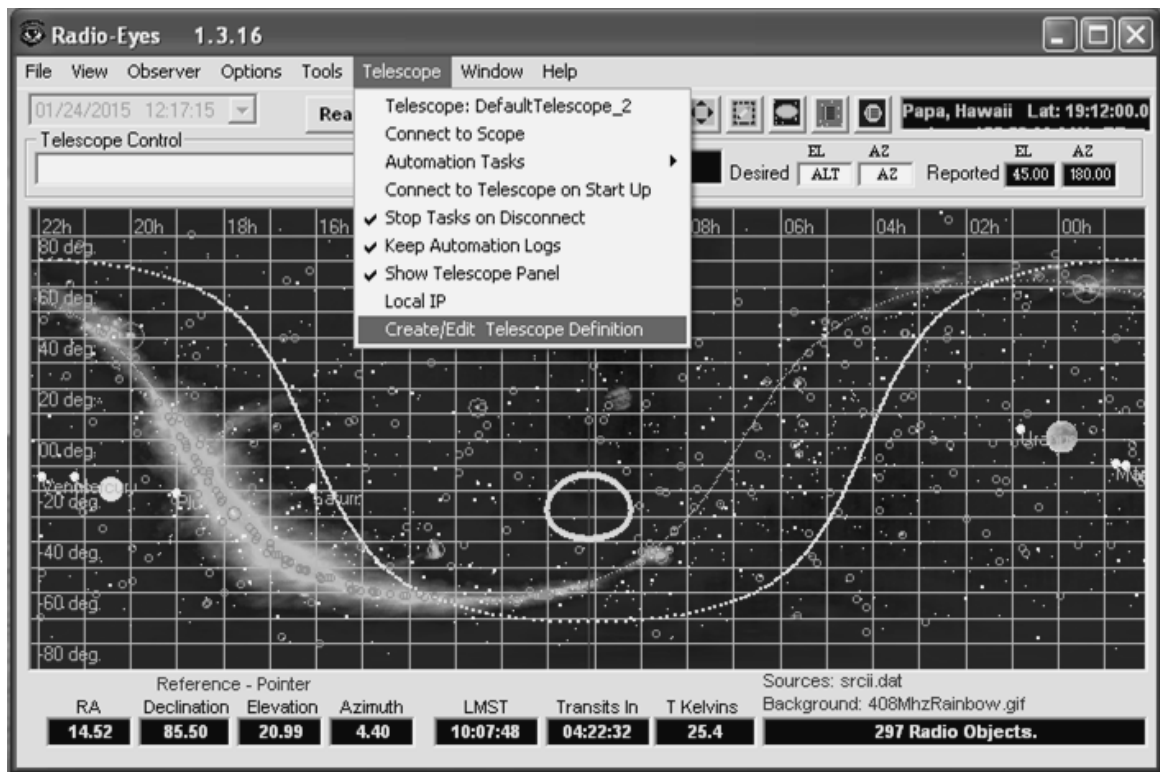
Figura 7. **Icono Radio Eyes**



Fuente: elaboración propia.

Haciendo doble *click* en el icono de Radio Eyes (Figura 7), en la barra superior escoges la opción de menú “Telescope” y la sub opción “Create/Edit Telescope Definition”.

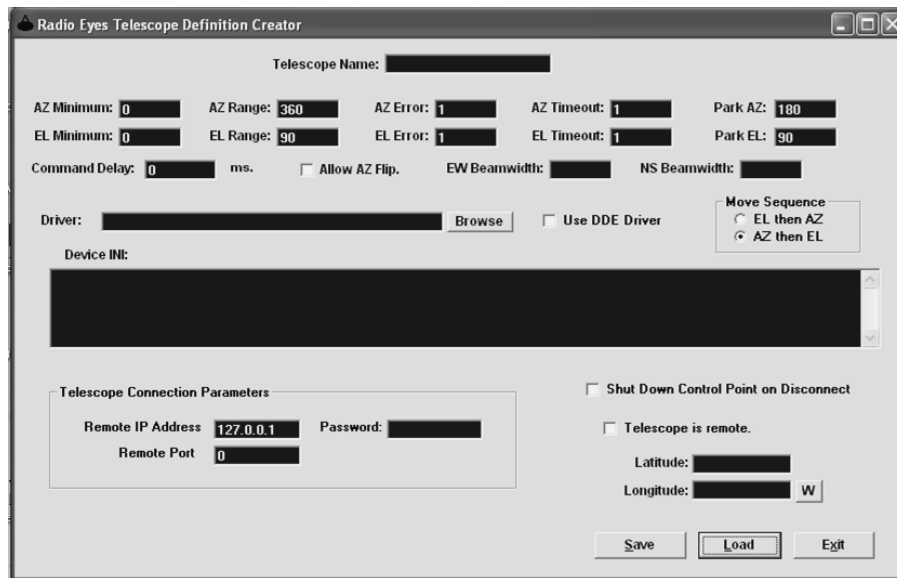
Figura 8. **Pantalla principal de RE**



Fuente: elaboración propia.

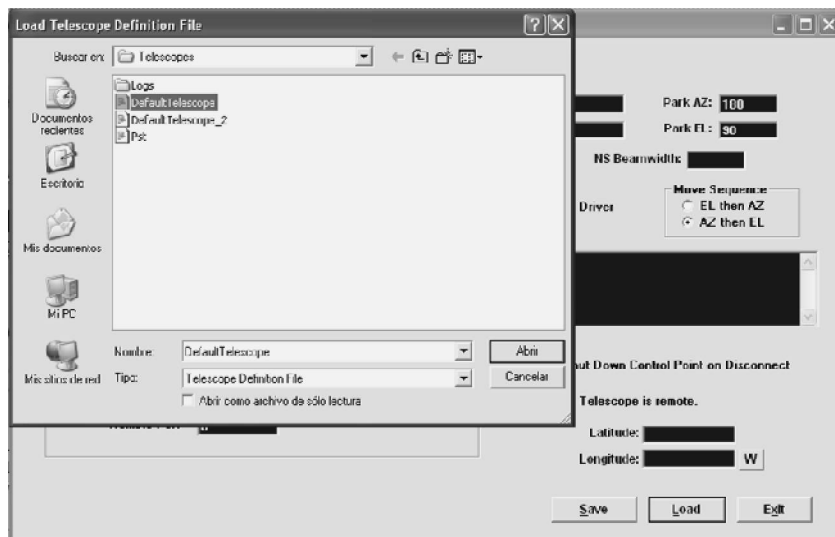
Al hacerlo mostrará la ventana emergente mostrada en la figura 9.

Figura 9. Pantalla de configuración



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Cargando configuración de telescopio

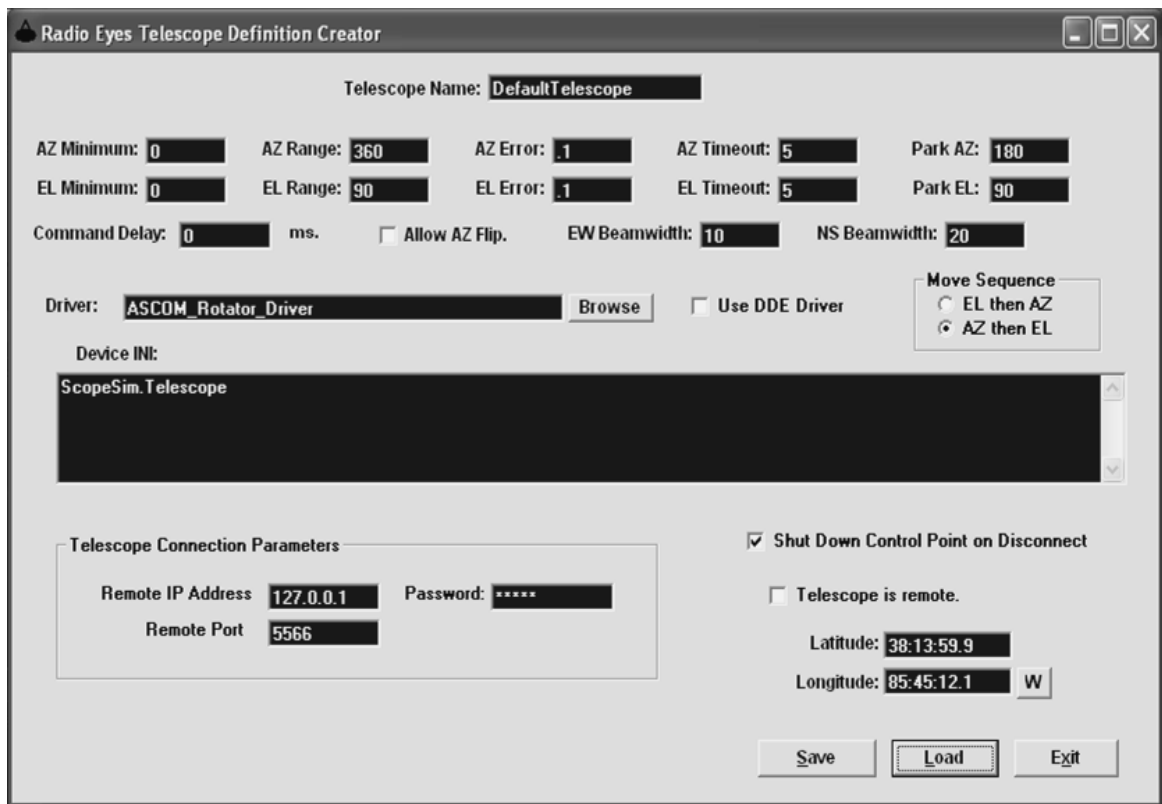


Fuente: elaboración propia.

Pulsando botón "Load" se despliega un nuevo cuadro emergente. En el escogemos el Default Telescope como se muestra en la figura 10.

Con el botón "Abrir" el programa cargará la configuración predeterminada de telescopio que tiene RE que se muestra en la figura 11. Este funcionará perfectamente con el simulador de telescopio de Ascom 4.1.

Figura 11. **Configuración cargada**



Fuente: elaboración propia.

Aprovechando la configuración default por el momento, se toma esta y se hacen solo las modificaciones necesarias para su funcionamiento con PicgatoPlus Server.

Inicialmente se modifican las coordenadas de la ubicación del proyecto, para este caso usare las de ciudad de Guatemala para ser coherente con la ubicación configurada en PicgotoPlus Server. En el campo Device INI, se coloca PicgotoPlus.Telescope, que le indica al Telescope Control cual es el programa destino a controlar. De momento se mantienen los parámetros de la parte superior sin modificar ya que esto dependerá de cada sistema en particular. En el campo DRIVER, se selecciona: ASCOM_Rotator_Driver, pues es el compatible con PicgotoPlus Server.

Figura 12. **Coordenadas para Guatemala**

Radio Eyes Telescope Definition Creator

Telescope Name: **DefaultTelescope**

AZ Minimum: **0** AZ Range: **360** AZ Error: **.1** AZ Timeout: **5** Park AZ: **180**
EL Minimum: **0** EL Range: **90** EL Error: **.1** EL Timeout: **5** Park EL: **90**

Command Delay: **0** ms. Allow AZ Flip. EW Beamwidth: **10** NS Beamwidth: **20**

Driver: **ASCOM_Rotator_Driver** Use DDE Driver

Move Sequence
 EL then AZ
 AZ then EL

Device INI:
PicgotoPlus.Telescope

Telescope Connection Parameters

Remote IP Address: **127.0.0.1** Password: *********
Remote Port: **5566**

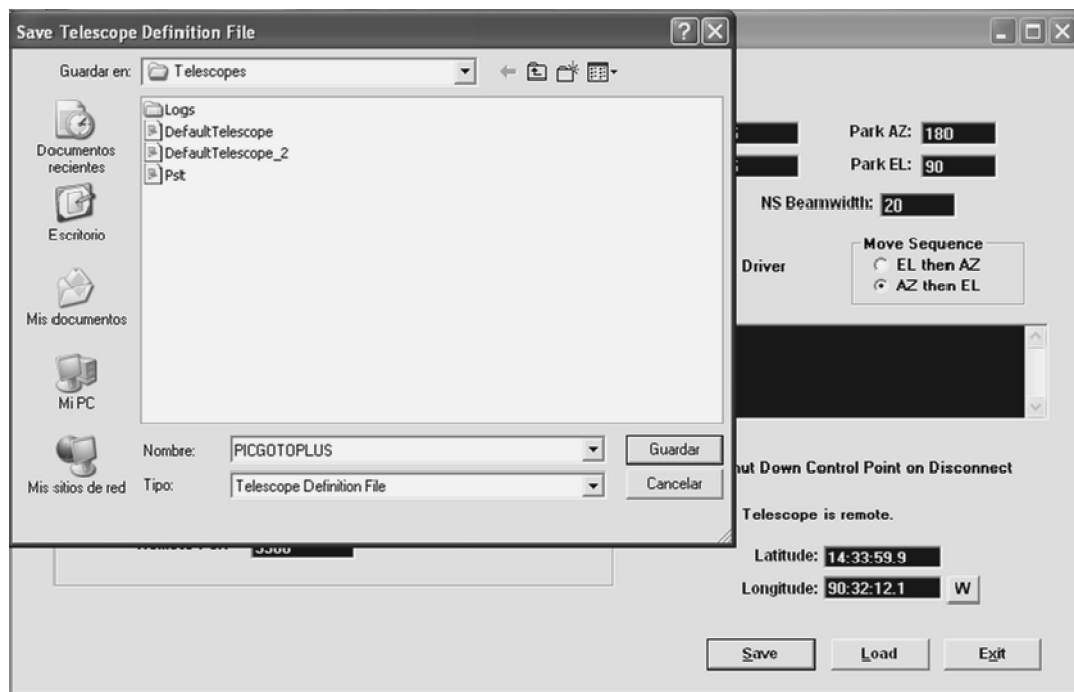
Shut Down Control Point on Disconnect
 Telescope is remote.

Latitude: **14:33:59.9**
Longitude: **90:32:12.1** W

Fuente: elaboración propia.

Utilizando el botón Save se guardan los cambios utilizando otro nombre para el archivo y tener referencia de lo que se hace. Por ejemplo, para este caso será PicGotoPlus:

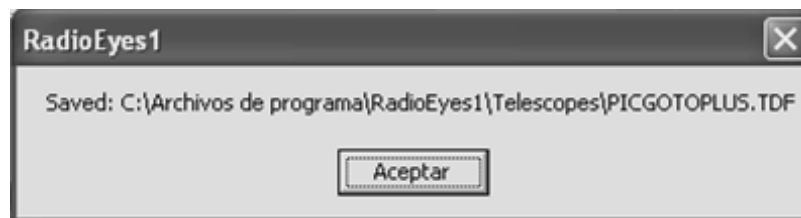
Figura 13. **Guardando la configuración**



Fuente: elaboración propia.

Se guarda y el programa confirma que fue exitoso:

Figura 14. **Mensaje de confirmación**



Fuente: elaboración propia.

Se acepta y pulsa Exit para salir de la configuración. Antes de continuar se inicia PicgotoPlus Server. Haciendo doble *click* en el ícono:

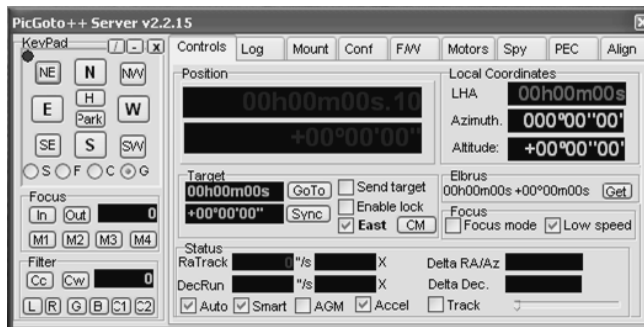
Figura 15. **Ícono PicgotoPlus**



Fuente: elaboración propia.

Y se desplegará la siguiente ventana:

Figura 16. **Inicio PicgotoPlus**

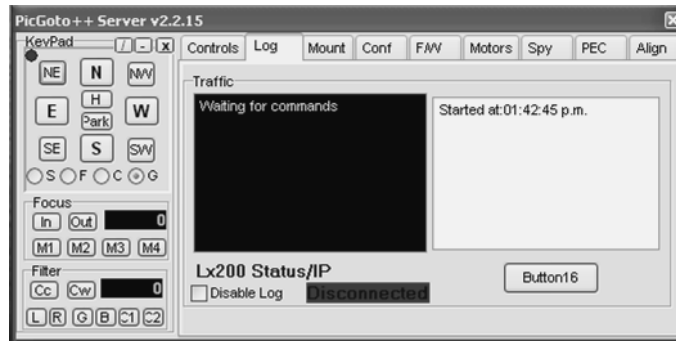


Fuente: elaboración propia.

Y se selecciona la pestaña Log donde se verifica que existe conexión entre RadioEyes y PicgotoPlus.

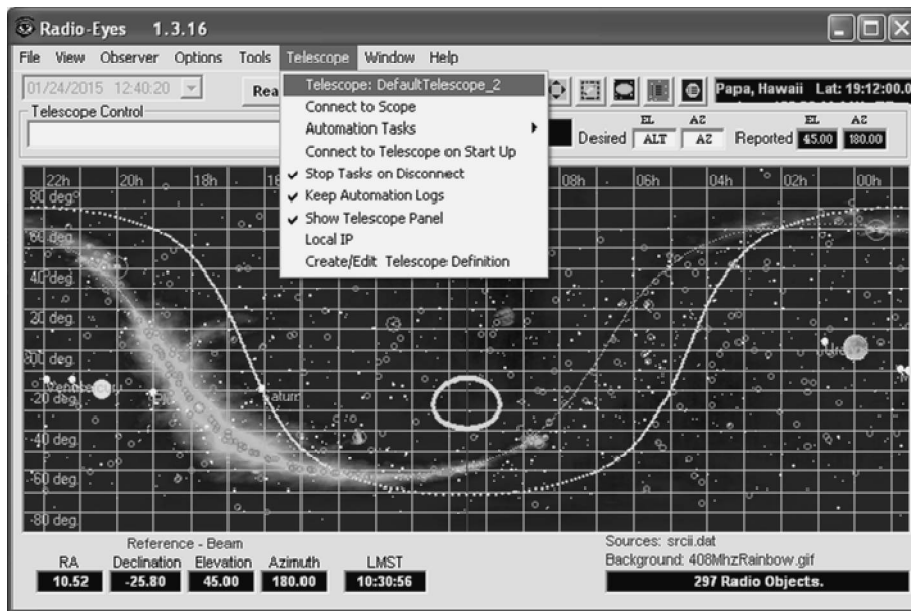
De vuelta a la pantalla de RE se selecciona el menú Telescope y luego la opción Telescope dentro de este, como se observa en la figura 18.

Figura 17. Pestaña Log



Fuente: elaboración propia.

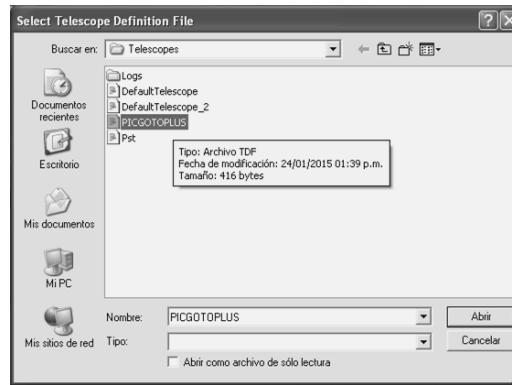
Figura 18. Menú Telescope



Fuente: elaboración propia.

Muestra una nueva ventana emergente en donde se debe seleccionar el archivo que se guardó.

Figura 19. **Abrir archivo de definición**



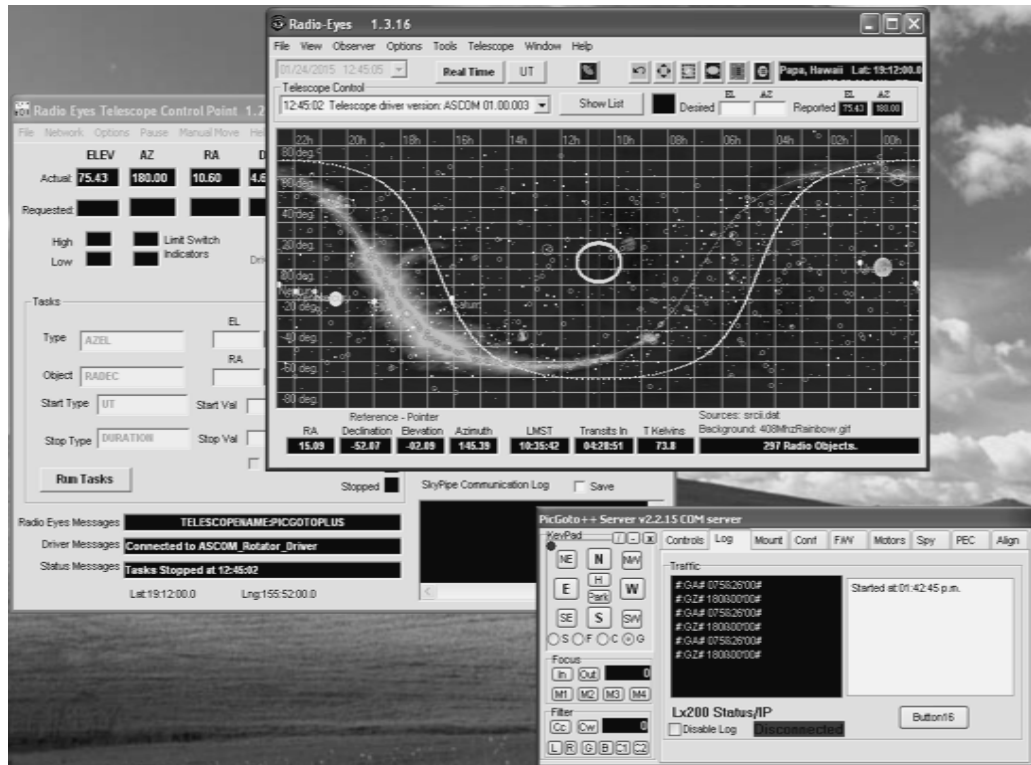
Fuente: elaboración propia.

Al presionar Abrir de forma inmediata se abrirá un módulo que Radio Eyes utiliza para la comunicación con PicgotoPlus, “Radio Eyes Telescope Control Point”. Al mismo tiempo se valida en la pestaña log de PicgotoPlus Server que existe comunicación entre él y RE.

Si se observa la ventana de Telescope Control Point se podrá validar que ASCOM está realizando su trabajo en la conexión utilizando el telescopio definido en RE con el nombre PicGotoPlus. También como se aprecia en la figura 20 en la ventana de RE, se observa el campo Telescope Control, el cual es del tipo “DropList”, que tiene el mensaje “12:45:02 Telescope driver versión ASCOM 01:00:003”, que indica la hora a la que se dio la conexión, verifica que está conectado al telescopio configurado mediante el driver de ASCOM 01:00:003.

Se puede encontrar amplia información sobre el manejo de Radio Eyes en la página del desarrollador del software para manejos avanzados del software y su funcionamiento posterior al enlace, temas que exceden al propósito de este trabajo.

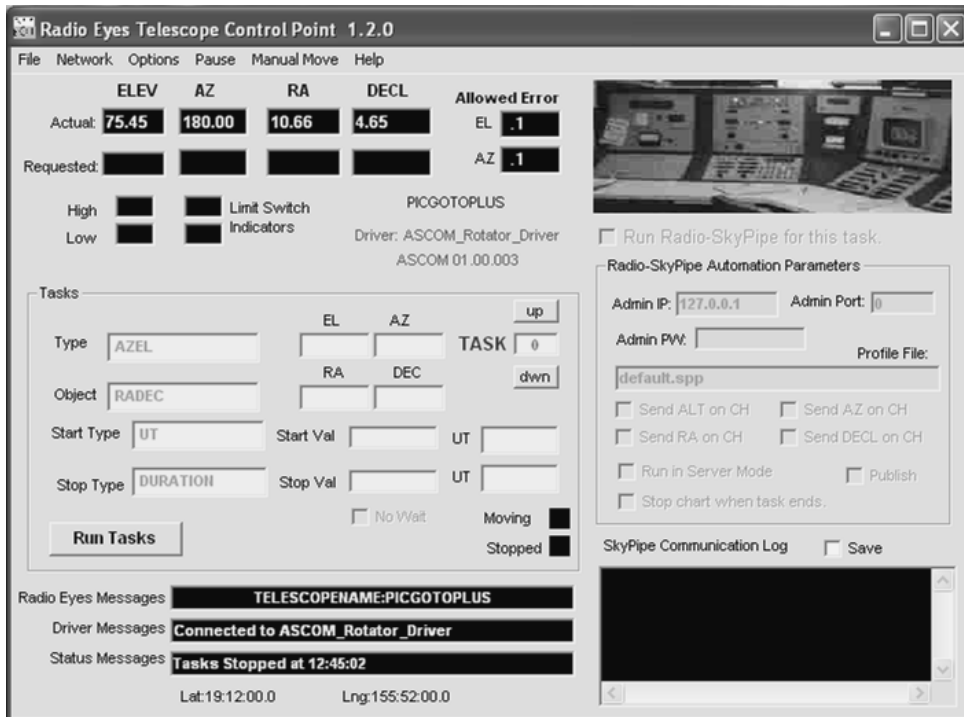
Figura 20. Verificando la conexión



Fuente: elaboración propia.

En la figura 21 se muestra la ventana de Telescope Control Point. En ella se aprecian ciertos parámetros que están relacionados al funcionamiento del telescopio. Para este propósito, lo interesante es que mediante esta ventana se comprueba que existe conexión con PicgotoPlus Server, esto queda de manifiesto en las letras azules, donde se indica que se conectó utilizando el telescopio configurado como PicGoto. También se aprecia en la parte inferior derecha el campo "Radio Eyes Messages" que indica se conectó mediante dicho archivo y que el software está conectado mediante el ASCOM rotatordriver como indica el campo Driver Messages.

Figura 21. Verificación de configuración usada



Fuente: elaboración propia.