



**Implementación de un sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes para análisis
espectral en imágenes digitales, en un telescopio astronómico con montura ecuatorial**

Quizhpe Córdova, Lenin Ismael y Yánez Briones, Cristian Alexis

Departamento de Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecatrónico

Ing. Constante Prócel, Patricia Nataly

Latacunga, 17 de marzo de 2021



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de Titulación, **“Implementación de un sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes para análisis espectral en imágenes digitales, en un telescopio astronómico con montura ecuatorial”**, fue realizado por los señores **Quizhpe Córdova, Lenin Ismael y Yánez Briones, Cristian Alexis**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad, por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 17 de marzo del 2021



Firmado electrónicamente por:
**PATRICIA NATALY
CONSTANTE PROCEL**

Ing. Constante Procel, Patricia Nataly

C.C.: 0503354029



Document Information

Analyzed document	QUIZHPE_YANEZ_Posicionamiento_continuo_montura_ecuatorial_y análisis_espectral.pdf (D98590371)
Submitted	3/17/2021 2:18:00 AM
Submitted by	
Submitter email	liquizhpe@espe.edu.ec
Similarity	5%
Analysis address	pnconstante.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis Libro Aimacaña - Montero.pdf Document Tesis Libro Aimacaña - Montero.pdf (D21439806) Submitted by: amgordon@espe.edu.ec Receiver: pnconstante.espe@analysis.orkund.com	1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS SANTOS,ALBARRACIN.pdf Document TESIS SANTOS,ALBARRACIN.pdf (D47260961) Submitted by: anaalbarracin_92@yahoo.com Receiver: hcteran.espe@analysis.orkund.com	1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TRABAJO TITULACION LAURA_RONQUILLO.pdf Document TRABAJO TITULACION LAURA_RONQUILLO.pdf (D47447825) Submitted by: mpjimenez@espe.edu.ec Receiver: mpjimenez.espe@analysis.orkund.com	1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS MAQUINA CNC PARA CIRCUITOS PCBS_2018-08-08.pdf Document TESIS MAQUINA CNC PARA CIRCUITOS PCBS_2018-08-08.pdf (D40776981) Submitted by: bhculqui@espe.edu.ec Receiver: bhculqui.espe@analysis.orkund.com	2
W	URL: https://www.castello.es/archivos/560/02%20Telescopios%20y%20sus%20monturas.pdf Fetched: 12/15/2020 9:45:02 AM	1
W	URL: http://www.astromarinaalta.org/wp-content/uploads/2017/12/2015_Comprar-un-telescop... Fetched: 3/17/2021 2:19:00 AM	3
W	URL: http://agrupacionio.com/nueva/wp-content/uploads/2014/10/Manual-manejo-de-telescop... Fetched: 3/17/2021 2:19:00 AM	3
W	URL: https://azslide.com/alineacion-ecuatorial-del-telescopio-meade-lx200_5a38ca001723d... Fetched: 3/17/2021 2:19:00 AM	4
W	URL: https://www.lbaindustrial.com.mx/que-es-un-encoder-absoluto/ Fetched: 3/17/2021 2:19:00 AM	4
W	URL: http://encoder.com/blog/encoder-basics/que-es-un-encoder/ Fetched: 3/17/2021 2:19:00 AM	1

1/44



Firmado electrónicamente por:
PATRICIA NATALY
CONSTANTE PROCEL

Ing. Constante Procel, Patricia Nataly

C.C.: 0503354029

Directora



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

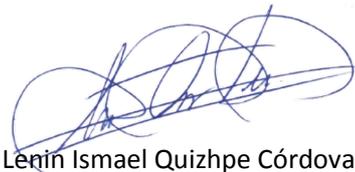
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Quizhpe Córdova, Lenin Ismael, con cédula de identidad N° 1104062425 y Yánez Briones, Cristian Alexis, con cédula de identidad N° 1722501713 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO CONTINUO DE CUERPOS CELESTES PARA ANÁLISIS ESPECTRAL EN IMÁGENES DIGITALES, EN UN TELESCOPIO ASTRONÓMICO CON MONTURA ECATORIAL”*** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 17 de marzo de 2021



Lenín Ismael Quizhpe Córdova

CI: 1104062425



Cristián Alexis Yánez Briones

CI: 1722501713



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Quizhpe Córdova, Lenin Ismael y Yáñez Briones, Cristian Alexis, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ***“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO CONTINUO DE CUERPOS CELESTES PARA ANÁLISIS ESPECTRAL EN IMÁGENES DIGITALES, EN UN TELESCOPIO ASTRONÓMICO CON MONTURA ECUATORIAL”*** en el repositorio institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 17 de marzo de 2021

Una firma manuscrita en tinta azul, con trazos fluidos y entrelazados.

Lenin Ismael Quizhpe Córdova

CI: 1104062425

Una firma manuscrita en tinta azul, con trazos más rectos y definidos.

Cristian Alexis Yáñez Briones

CI: 1722501713

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico a Dios, mis padres y hermanos por todo el apoyo brindado a lo largo de toda mi vida; y especialmente a mi madre Josefa Esteraliza Córdova Morillo quien ha sido un pilar fundamental para el poder culminar satisfactoriamente mi vida universitaria y formación profesional.

LENIN QUIZHPE.

Dedicatoria

A mi madre y a mi padre, quienes con amor y sacrificio me acompañaron durante esta etapa de mi vida brindándome su cariño y palabras de aliento en momentos en que los necesitaba, por ser mi inspiración para superarme. A mi hermana que siempre me han mostrado su apoyo a lo largo de toda mi vida y supo apoyarme en los momentos en que más lo necesité, A mis amigos en general que me acompañaron durante toda mi etapa universitaria

CRISTIAN YÁNEZ.

Agradecimiento

Primeramente, quiero agradecer a Dios por brindarme salud, fortaleza, sabiduría necesaria a lo largo de mi existencia y permitirme convertirme en profesional.

A mi madre Josefa Córdova, por su apoyo incondicional durante toda mi vida, especialmente durante el tiempo de mi formación académica y profesional.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, y a todo su cuerpo administrativo y docente, por su dedicación y profesionalismo brindado en los años de formación académica; especialmente a la Ing. Patricia Nataly Constante Prócel Mg. Sc., por su acertada dirección, dedicación, interés y guía durante el desarrollo de la presente Tesis.

Finalmente, a mis compañeros de Universidad, por su amistad y apoyo brindado.

A todos mis más sinceros agradecimientos.

LENIN QUIZHPE.

Agradecimiento

A mis padres Gustavo y Aracely, quienes fueron mi guía y mi fortaleza durante esta etapa guiándome y aconsejándome con sus valores.

A mi hermana Michelle que siempre me ha brindado su apoyo incondicional, y siendo mi inspiración de superación.

A mis amigos que, brindándome su sincera amistad, ayudaron a cumplir con este objetivo.

A mis profesores, por transferir sus conocimientos, sus consejos, y por guiarme en el transcurso de la carrera.

CRISTIAN YÁNEZ.

Tabla de contenido

Carátula.....	1
Certificación	2
Reporte de similitud.....	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización	5
Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento	8
Agradecimiento	9
Tabla de contenido	10
Índice de figuras.....	13
Índice de tablas.....	15
Resumen	16
Abstract.....	17
Introducción	18
Definición del problema a investigar	18
Estado del arte.....	20
Justificación e importancia	21
Objetivos	23
<i>Objetivo General</i>	23
<i>Objetivo Específico</i>	23
Hipótesis.....	24
Variables de la investigación.....	24
<i>Variable dependiente</i>	24
<i>Variable independiente</i>	24
Fundamento Teórico	25
Telescopios astronómicos.....	25
<i>Alineación de telescopio con montura ecuatorial</i>	30
Sistema de control para posicionamiento y seguimiento de telescopios.....	31
<i>Actuadores para el sistema de posicionamiento</i>	33
<i>Sensores para control del sistema de posicionamiento</i>	34
Técnicas de adquisición de imágenes	39

<i>Astrofotografía con trípode</i>	39
<i>Astrofotografía en paralelo</i>	39
<i>Astrofotografía a foco primario</i>	40
<i>Astrofotografía por proyección del ocular</i>	40
Procesamiento digital de imágenes.....	40
Diseño del sistema de posicionamiento continuo en una montura ecuatorial	45
Diseño conceptual.....	45
Diseño de detalle mecánico	49
<i>Relación de transmisión eje de ascensión recta</i>	49
<i>Relación de transmisión eje de declinación</i>	51
<i>Diseño y selección del sistema de transmisión</i>	52
<i>Diseño y selección de actuadores</i>	53
Integración del sistema mecánico de posicionamiento.	69
Selección de componentes e implementación del sistema de control y posicionamiento.	71
Método de selección de componentes.	71
Selección de sensor y controlador.....	72
Selección de sensor de posición.	72
Selección de drivers de control para motor nema.....	74
Selección de controlador.	76
Diagrama de conexión y de control eléctrico.	77
Selección de la unidad de procesamiento.....	79
Implementación del sistema de control.	80
Diseño de algoritmos de programación para el sistema de posición, seguimiento y de visión artificial.	84
Selección del equipo de visión para la adquisición de imágenes.....	84
Diseño de Algoritmos de programación para el posicionamiento de cuerpos celestes.	86
Diseño de algoritmos de programación para el seguimiento de cuerpos celestes.	93
Desarrollo de algoritmo de programación para análisis espectral de imágenes digitales.....	98
Cálculo de temperatura en base al espectro visible.	104
Pruebas y evaluación de resultados	110
Pruebas del sistema de posicionamiento continuo.	110
Precisión de la ubicación polar de la montura.	110
Precisión en el sistema de seguimiento.	115
Precisión en el sistema de posicionamiento.	117

Etapas del sistema de adquisición de imágenes.....	118
Evaluación de datos obtenidos mediante análisis espectral.	120
Validación de hipótesis.....	131
Conclusiones y recomendaciones	136
Conclusiones	136
Recomendaciones	137
Bibliografía	139
Anexos.....	146

Índice de figuras

Figura 1	<i>Tipos de telescopios astronómicos según la incidencia de la luz</i>	26
Figura 2	<i>Disposición de ejes en la montura azimutal</i>	28
Figura 3	<i>Disposición de los ejes en la montura ecuatorial</i>	29
Figura 4	<i>Motor paso a paso</i>	34
Figura 5	<i>Disco grabado con un patrón para interferencia</i>	36
Figura 6	<i>Sensor MEMS MPU 9250 nueve ejes</i>	38
Figura 7	<i>Espectro electromagnético de la luz</i>	42
Figura 8	<i>Circuito integrado con daño termal inducido y su espectro de Fourier</i>	44
Figura 9	<i>Diagrama de conceptos de los elementos del telescopio bresser y el diseño requerido.</i>	46
Figura 10	<i>Representación de los componentes mecánicos a ser incluidos en el telescopio astronómico</i>	48
Figura 11	<i>Acople de motor nema y montura ecuatorial</i>	52
Figura 12	<i>Distribución de los elementos en el tubo óptico</i>	55
Figura 13	<i>Diagrama de distribución de fuerzas de acción</i>	56
Figura 14	<i>Distancia de separación entre el engranaje de transmisión y el peso del telescopio</i>	57
Figura 15	<i>Análisis del momento de torsión resultante y el uso de simulador en el eje de declinación</i>	59
Figura 16	<i>Análisis del momento flector resultante y el uso de simulador en el eje de declinación</i>	60
Figura 17	<i>Distribución de los Elementos en el Eje de Declinación</i>	61
Figura 18	<i>Diagrama de distribución de fuerzas sobre el eje de declinación</i>	61
Figura 19	<i>Distancia de separación entre el engranaje de transmisión y el peso del telescopio</i>	63
Figura 20	<i>Análisis del momento de torsión resultante y el uso de simulador en el eje de ascensión recta</i>	65
Figura 21	<i>Análisis del momento flector resultante y el uso de simulador en el eje de ascensión recta</i>	66
Figura 22	<i>Montaje de los Equipos Mecánicos en los Ejes de la Montura Ecuatorial</i>	69
Figura 23	<i>Diagrama de conexión de sensores y actuadores</i>	78
Figura 24	<i>Diagrama de control eléctrico</i>	78
Figura 25	<i>Conexión del sensor MPU 9256 en el telescopio</i>	80
Figura 26	<i>Conector VGA para control de motores y RJ-11 para salida del sensor</i>	81
Figura 27	<i>Disposición de elementos electrónicos</i>	82
Figura 28	<i>Entrada de alimentación de 110V con interruptor de funcionamiento</i>	83
Figura 29	<i>Conexión entre unidad de procesamiento y unidad de control</i>	83
Figura 30	<i>Campo visual de imágenes obtenidas por la cámara QHY y el software planetario.</i>	88
Figura 31	<i>Cinturón de Orión para diferentes campos visuales.</i>	89
Figura 32	<i>Orientación de los ejes de coordenadas en la imagen generada por la cámara QHY 5L II</i>	91
Figura 33	<i>Diagrama de bloques para posicionamiento de cuerpos celestes</i>	92
Figura 34	<i>Mecánica de filtrado espacial con un Kernel de 3x3</i>	95
Figura 35	<i>Obtención de un objeto en movimiento para un fondo estacionario</i>	96
Figura 36	<i>Obtención de un ROI para el seguimiento de cuerpos celestes</i>	97
Figura 37	<i>Diagrama de bloques para el reconocimiento y seguimiento de un cuerpo celeste.</i>	98
Figura 38	<i>Lectura y conversión de imagen</i>	99
Figura 39	<i>Discretización de la función $f(x)$</i>	100
Figura 40	<i>Transformada de Fourier centrada en el origen</i>	102
Figura 41	<i>Espectro de potencia y longitud de onda para una imagen de Venus</i>	103
Figura 42	<i>Colores del espectro visible y sus extremos</i>	103
Figura 43	<i>Representación gráfica en el plano para datos</i>	113

Figura 44 Trayectorias realizadas por la estrella Sirio en el campo visual de $0,166^\circ$	113
Figura 45 Relación del tiempo de centrado para diferentes cámaras	117
Figura 46 Secuencia de seguimiento en adquisición de imagen	119
Figura 47 Longitud de onda del planeta venus para seguimiento en tiempo real	121
Figura 48 Longitud de onda del planeta marte para seguimiento en tiempo real	126

Índice de tablas

Tabla 1 Principales características técnicas para un telescopio astronómico	27
Tabla 2 Especificaciones técnicas del sistema de transmisión	53
Tabla 3 Fuerzas que actúan sobre el eje de declinación.....	54
Tabla 4 Valores de momento flector, torsor e inercia para el eje de declinación.....	58
Tabla 5 Valores de momento flector, torsor e inercia para el eje de ascensión recta	64
Tabla 6 Características Técnicas para el Modelo de Motor Nema	68
Tabla 7 Características Técnicas para la Selección del Sensor de Posición	73
Tabla 8 Selección del Sensor de Posicionamiento	73
Tabla 9 Características Técnicas de los Driver para Motor Nema 17.....	75
Tabla 10 Características Requeridas para la Selección del Controlador.....	76
Tabla 11 Características Técnicas para Selección de Controlador.....	76
Tabla 12 Características técnicas para la unidad de procesamiento	79
Tabla 13 Características requeridas del equipo de visión para la adquisición de imágenes	85
Tabla 14 Coordenadas de las estrellas del cinturón de orión.....	90
Tabla 15 Desplazamiento angular producido por cada paso realizado por el motor NEMA 17.....	90
Tabla 16 Distancia aparente entre estrellas en coordenadas de ascensión recta y declinación.....	91
Tabla 17 Periodo orbital expresado en años de menor a mayor.....	104
Tabla 18 Frecuencia de rotación.....	105
Tabla 19 Frecuencia de rotación amplificada.....	105
Tabla 20 Frecuencia de espectro de luz.....	106
Tabla 21 Frecuencias planetarias en el espectro visible.....	107
Tabla 22 Campo magnético existente en dos ciudades de la Provincia de Loja	111
Tabla 23 Valores máximos y mínimos en el eje XY, al rotar el sensor alrededor del eje Z.....	112
Tabla 24 Pasos por pixel generados por el campo de visión de cámara	116
Tabla 25 Resultados para posicionamiento de objetos.....	118
Tabla 26 Longitud de onda obtenidas mediante análisis espectral para venus.....	121
Tabla 27. Intervalo de longitud de onda para el espectro Visible	123
Tabla 28 Frecuencias obtenidas mediante análisis espectral para venus	124
Tabla 29 Longitud de onda de marte obtenidas mediante análisis espectral	127
Tabla 30 Frecuencias obtenidas mediante análisis espectral para marte.....	129
Tabla 31 Muestras de aciertos y fallos para cuerpos celestes respecto a su longitud de onda	131
Tabla 32 Frecuencias Observadas	133
Tabla 33 Frecuencias Esperadas.....	134
Tabla 34 Tabla de valores Chi cuadrado.....	134

Resumen

En el presente proyecto, se implementó un sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes para el análisis espectral de imágenes digitales, en un telescopio astronómico con montura ecuatorial. Para la implementación de este sistema, fue necesario acoplar un mecanismo de transmisión de movimiento, juntamente con actuadores electromecánicos sobre una montura ecuatorial pre fabricada, que permita el movimiento en el eje de ascensión recta de un grado cada cuatro minutos, que representa el movimiento aparente de los cuerpos celestes; y de esta manera permitir que el astro se mantenga centrado en una imagen digital. Además, al tener un objeto posicionado de manera continua en una imagen, permite que la luz generada por este cuerpo celeste incida en mayor medida sobre el telescopio y, por lo tanto, se obtenga mayor información espectral y con ello realizar un tratamiento digital mediante análisis del espectro electromagnético e identificar magnitudes físicas como la temperatura del cuerpo celeste observado. De acuerdo a las pruebas de funcionamiento realizadas, se identificó que la orientación polar de la montura y el campo de visión propio de cada equipo de adquisición de imagen influye en gran medida en la correcta implementación del sistema. Adicionalmente, la mala orientación polar genera desviación en el eje de declinación de la montura y en el caso de un inadecuado análisis del campo de visión, esto genera movimientos bruscos en el cuerpo celeste, obteniendo imágenes con aberraciones ópticas.

Palabras clave:

- **CUERPO CELESTE**
- **MONTURA ECUATORIAL**
- **CAMPO DE VISION**
- **ANALISIS ESPECTRAL**

Abstract

In this project, a system for the continuous positioning of celestial bodies was implemented for the spectral analysis of digital images, in an astronomical telescope with an equatorial mount. For the implementation of this system, it was necessary to couple a movement transmission mechanism, together with electromechanical actuators on a pre-manufactured equatorial mount, which allows movement in the right ascension axis of one degree every four minutes, which represents the apparent movement of the celestial bodies; and in this way allow the star to remain centered in a digital image. In addition, by having an object continuously positioned in an image, it allows the light generated by this celestial body to affect the telescope to a greater extent and, therefore, obtain more spectral information and thereby perform a digital treatment through analysis of the electromagnetic spectrum and identify physical magnitudes such as the temperature of the observed celestial body. According to the performance tests carried out, it was identified that the polar orientation of the frame and the field of vision of each image acquisition equipment greatly influences the correct implementation of the system. Additionally, the bad polar orientation generates deviation in the declination axis of the frame and in the case of an inadequate analysis of the field of view, this generates sudden movements in the celestial body, obtaining images with optical aberrations.

Key words:

- **CELESTIAL BODY**
- **EQUATORIAL MOUNT**
- **FIELD OF VIEW**
- **SPECTRAL ANALYSIS**

CAPÍTULO I

1 Introducción

1.1 Definición del problema a investigar

La astronomía a nivel mundial está enfocada principalmente a la obtención de datos científicos de los diferentes cuerpos celestes que se encuentran en el universo, para ello se hace uso de telescopios astronómicos ópticos y de radiofrecuencia. El costo de implementación de estos equipos es muy alto, y para su financiamiento es necesario realizar acuerdos entre diferentes países del mundo que pretendan participar en esta actividad científica. Los países potencia en el campo de la astronomía son: Estados Unidos, China, España y Chile; siendo este último en donde existe una gran inversión internacional en la instalación de grandes telescopios ópticos y de radiofrecuencia los que están valorados entre dos y mil millones de dólares. Además, Chile alberga el 70% de la infraestructura mundial para la observación astronómica (Ponce, 2018, pág. 6). Principalmente por las condiciones climáticas: baja humedad y contaminación lumínica; altas cumbres presentes en el desierto de Atacama (norte de Chile).

Para las personas aficionadas a la astronomía es complicada la adquisición de estos sofisticados equipos, por tanto, utilizan telescopios astronómicos personales, que tienen un costo dependiendo del diámetro del espejo primario, permitiendo realizar observaciones astronómicas, de ubicación y seguimiento de manera totalmente manual; sin embargo, no aporta en mayor medida la obtención de datos científicos. Para que el telescopio astronómico permita la obtención de datos científicos más detallados, es necesaria la implementación de un sistema de: autoguiado, ubicación y seguimiento de cuerpos celestes; esto como base principal, para la posterior adquisición de imágenes mediante cámaras fotográficas.

A nivel mundial, se encuentran astrónomos aficionados que realizan astrofotografía de cuerpos celestes mediante estos sistemas de seguimiento y la mayoría se estancan en la obtención de fotografías que superen al ojo humano. Sin embargo, no se profundiza en la adquisición de datos científicos mediante el tratamiento de imágenes que permitan la descomposición del espectro de luz de los cuerpos celestes, y de esta manera recabar detalles científicos significativos como: determinar el tipo de elemento químico que lo constituye; distinguir un planeta o una estrella; establecer la temperatura, brillo o color del astro, etc.

El Observatorio Astronómico de Quito está equipado con los implementos básicos para la observación astronómica. Por tanto, se efectúan estudios científicos relacionados al ámbito de la astronomía, mismos que son realizados por estudiantes de la Escuela Politécnica Nacional (EPN); y quienes lo requieran. Sin embargo, la ubicación céntrica del observatorio dificulta las observaciones astronómicas nocturnas aceptables, principalmente a causa de las condiciones climáticas de la capital; y altos niveles de contaminación lumínica existente en la zona (EPN, 2020). En consecuencia, los aficionados de la astronomía en Ecuador optan por lugares alejados de las ciudades, y óptimos para observaciones astronómicas por entretenimiento, dejando de lado el análisis científico. Además, el principal inconveniente para la realización de observaciones astronómicas de carácter científico, radica en los altos costos para la adquisición de equipos de calidad y con sistemas de guiado. En Ecuador, un telescopio astronómico de posicionamiento manual tiene un costo superior los 350 dólares, adicionalmente, al incluir un sistema de guiado y posicionamiento automático este valor incrementa en 150% (EquiposCotopaxi, 2020) y se debe considerar que éste último es independiente de un software de reconocimiento de cuerpos celestes. Igualmente, no existen software libre que permita el tratamiento de imágenes orientadas al análisis espectral de los cuerpos celestes.

1.2 Estado del arte

En la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, se planteó el “Estudio de factibilidad técnico económico para la automatización del posicionamiento de cúpula en el observatorio astronómico de la alameda e implementación de un prototipo experimental” (Gallardo, 2008). En este trabajo de titulación, se considera el diseño: mecánico, electrónico y de control, con el fin de realizar el seguimiento de cuerpos celestes para el observatorio astronómico de la ciudad de Quito, este observatorio cuenta como principal instrumento de observación un telescopio reflector fijo con montura dobson y anclado a la cúpula, se implementó un sistema de control para el posicionamiento de cuerpos celestes, partiendo de un punto HOME, en donde el eje de ascensión recta del telescopio debe apuntar hacia el norte geográfico, previo a la inserción de coordenadas de posición del cuerpo celeste a observar, el control de posición de los actuadores se realiza mediante encoders.

A nivel nacional no existen estudios relacionados a métodos de adquisición y procesamiento digital de imágenes orientadas a astronomía, por tanto, es necesario trascender a otros países que están realizando estos estudios, por ejemplo, Chile. En este sentido, Liberona (2015) ha realizado estudios sobre emisiones de radiación electromagnética de cuerpos celestes, la información captada por estos instrumentos puede ser pensada como la transformada de Fourier de la imagen a reconstruir, para recolectar información se utilizan telescopios de radio frecuencia, en lugar de telescopios ópticos.

El presente trabajo considera aspectos importantes a resaltar: la montura a ser automatizada es ecuatorial, el control de movimiento se realiza bajo las mismas coordenadas, ascensión recta y declinación. Adicionalmente, se emplea un telescopio móvil, mismo que permitirá ser ubicado en lugares alejados de la contaminación lumínica. En los componentes de

transmisión mecánicas en el diseño (Gallardo, 2008) son de mayor dimensión que los utilizados para un telescopio móvil, y esto hace que el uso de encoder sea inadecuada. Por tanto, se plantea el uso de un giroscopio y magnetómetro, permitiendo la correcta ubicación geográfica de la montura, la estabilidad y la orientación entre el eje de ascensión recta y el polar.

En este estudio, se realizará el procedimiento inverso al señalado por Liberona (2015) y se adquirirá imágenes digitales en dominio espacial mediante el uso de cámaras fotográficas, y posteriormente realizar el procesamiento digital de las mismas, haciendo uso de la transformada de Fourier. Además, al realizar el estudio de las imágenes en el dominio de la frecuencia, es posible adquirir datos científicos importantes de los cuerpos celestes como: temperatura, brillo, etc.

1.3 Justificación e importancia

El presente proyecto pretende brindar una solución técnica para la inserción en el estudio científico de la astronomía, ofreciendo sistemas tecnológicos de bajo costo, y alternativas de procesamiento de imágenes para la obtención de datos científicos de precisión orientados al estudio de cuerpos celeste.

La astronomía en Ecuador no se ha desarrollado de manera eficiente, el desarrollo científico de Ecuador se ha retrasado 50 años con respecto al mundo, todo lo que se conoce sobre el universo es producto de los estudios de nivel científico producidos por países desarrollados que tienen los recursos económicos necesarios para financiar los estudios en esta materia. Los ecuatorianos tienen un legado muy enriquecedor por parte de la cultura preincaica, quienes

tuvieron amplios conocimientos en astronomía, pero luego de la conquista española, esos conocimientos fueron desterrados de nuestra conciencia.

Los procedimientos técnicos que realizan los países desarrollados para obtener imágenes de cuerpos celestes, como es el caso de la fotografía recientemente presentada del agujero negro de la galaxia M87 de la constelación de virgo, no son de conocimiento general para los ecuatorianos. La obtención de esta imagen fue factible mediante el uso de la transformada de Fourier, “los astrónomos reconstruyen imágenes de un objeto en el espacio usando interferómetros: telescopios que observan la transformada de Fourier del patrón del brillo que tiene un objeto en el cielo” (Vincent L. Fish, 2014). Como bien se señala, el tratamiento de imágenes mediante análisis de Fourier es ampliamente utilizado en el ámbito de la astronomía, lo cual genera un precedente para su uso en el presente proyecto.

Ecuador cuenta con diferentes condiciones geográficas aptas para observaciones astronómicas, entre ellas se encuentran la parroquia de Vilcabamba con clima tropical, y el cantón zapotillo con clima seco, pertenecientes a la provincia de Loja. Estos lugares se caracterizan por su baja contaminación lumínica, baja humedad y cielos despejados durante varios meses del año. En la provincia de Cotopaxi, también se encuentran lugares que pueden ser óptimos para las observaciones astronómicas como lo es en la laguna del Quilotoa con clima templado, baja contaminación lumínica, y a altura superior a los 3800 metros sobre el nivel del mar, lo que disminuye en parte la humedad del ambiente- Otro lugar geográfico importante que sin duda es posible tema de futuras investigaciones y a la vez podría convertirse en la primera observación astronómica de gran altura en el mundo es la cumbre del volcán Cotopaxi, a 5897 metros de altura, en la cual la contaminación lumínica es despreciable, y en ella se sobrepasa el 50% de la atmósfera terrestre, y si se considera que está a una diferencia de 400 metros de la montaña más

alta del mundo medida desde el centro de la tierra como lo es el Chimborazo, hace un lugar donde es posible obtener datos astronómicos muy relevantes. Cabe acotar que el Observatorio Atacama de la Universidad de Tokio está ubicado en la cima del Cerro Chajnantor en el desierto de atacama a una altura de 5640 metros, siendo el telescopio astronómico de mayor altura en el mundo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Implementar un sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes para análisis espectral en imágenes digitales, en un telescopio astronómico con montura ecuatorial.

1.4.2 Objetivo Específico

- Identificar los parámetros necesarios para la implementación del sistema de posicionamiento continuo en un telescopio astronómico con montura ecuatorial.
- Realizar la selección de los elementos mecánicos, electrónicos, de control y de adquisición de imágenes.
- Desarrollar un sistema de control que permita el posicionamiento continuo en un telescopio astronómico con montura ecuatorial.
- Realizar los algoritmos de programación necesarios para el reconocimiento de cuerpos celeste.
- Aplicar las técnicas y métodos necesarios para la óptima adquisición de imágenes astronómicas.
- Realizar el análisis espectral en imágenes digitales para estimar frecuencia, longitud de onda y temperatura de radiación de los cuerpos celestes observados.
- Realizar las pruebas de funcionamiento y validación de hipótesis, que garanticen la robustez del sistema de posicionamiento continuo, de adquisición y análisis espectral de las imágenes digitales obtenidas.

1.5 Hipótesis

¿El sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes, permite el análisis espectral en imágenes digitales de un telescopio astronómico con montura ecuatorial?

1.6 Variables de la investigación

1.6.1 *Variable dependiente*

Análisis espectral en imágenes digitales.

1.6.2 *Variable independiente*

Sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes.

CAPÍTULO II

2 Fundamento teórico

En este capítulo, se hará uso de la investigación bibliográfica que permita conocer los diferentes trabajos de investigación realizados en torno al tema a tratar en el presente trabajo, también es necesario establecer la conceptualización teórica de los elementos o equipos que se requiere utilizar, con la finalidad de llevar a cabo en capítulos posteriores una selección de componentes idóneos y eficientes para elaborar un diseño robusto.

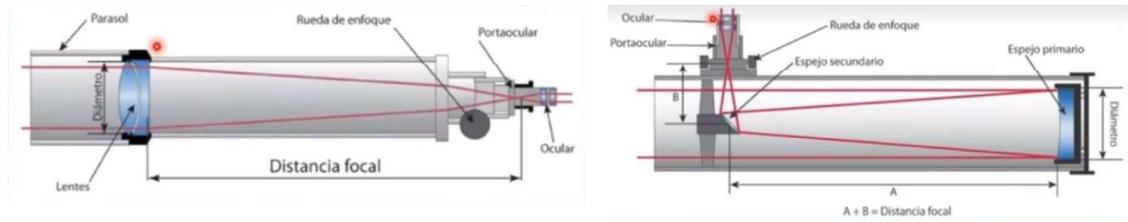
2.1 Telescopios astronómicos

El telescopio es un instrumento óptico capaz de aumentar la luminosidad y tamaño aparentes de los objetos que se observan. Las raíces de su nombre, tele («lejos») y scopio («observar»), lo definen perfectamente Garzón, David, y Duran (2009). La aplicación del telescopio astronómico hace que se puedan observar aquellos cuerpos que el ojo humano no es capaz percibir, captando la luz del objeto y aumentando sus detalles. Sin duda, la astronomía se destaca por ser una de las ramas más extasiante de la física, permitiendo al ser humano satisfacer su deseo de conocer su entorno más allá de los límites imaginados. (Quintero, 2008)

Los telescopios astronómicos son de tipo refractores y reflectores, esto depende de la incidencia de la luz. Actualmente, los telescopios refractores están en desuso, al presentar limitantes ópticas muy perceptibles al momento de generar la imagen, como: aberraciones cromáticas y el uso de lentes de gran tamaño, haciendo que tenga un costo elevado. Por tanto, los telescopios astronómicos reflectores son los más empleados por aficionados a la astronomía; y de centros especializados, en este sentido, en la Figura 1 se observan las características de los tipos de telescopios astronómicos; el telescopio reflector usa lentes de gran tamaño, mientras que los telescopios reflectores usan espejos cóncavos.

Figura 1

Tipos de telescopios astronómicos según la incidencia de la luz.



a) Telescopio astronómico refractor

b) Telescopio astronómico reflector

Nota: La figura muestra los tipos de telescopios astronómicos según la incidencia de luz. Tomado de AstroCiencias Ecuador, La primera casa abierta de astronomía por M. Rosero, 2020.

En el telescopio reflector, la superficie colectora es un espejo primario que la redirige, mediante otros espejos de menor diámetro hasta el plano focal. Entonces, la implementación de espejos se puede aumentar mucho el diámetro del telescopio con un límite de ocho metros para espejos monolíticos (una pieza). La solución adoptada en telescopios mayores consiste en combinar un conjunto de segmentos que simulan una superficie de gran tamaño. Éste es el caso del Gran Telescopio Canarias (10,4 m de diámetro). (Garzon, David, & Duran, 2009, pág. 81)

El espejo primario de los telescopios reflectores puede ser construido, mediante procesos de pulido haciendo uso de abrasivos de diferente tamaño, generando una forma cóncava en el espejo, la que permitirá la concentración de la luz sobre el espejo secundario plano, siendo la que transmite la imagen hacia el ocular y posteriormente al observador. Adicionalmente, se utilizan pequeños lentes para maximizar o tener mayor definición de la imagen, y menor costo a los utilizados en telescopios refractores.

Las características principales de un telescopio están basadas en la intensidad de luz que se puede captar. Así mismo, la eliminación de problemas de aberraciones ópticas producidas por

la posición de los espejos. Respecto a lo antes mencionado, la Tabla 1 describe las principales características técnicas de un telescopio astronómico y las cuales se deben considerar para su adquisición.

Tabla 1

Principales características técnicas para un telescopio astronómico

Característica técnica	Descripción
Apertura	El diámetro de la lente o espejo principal, denominado "objetivo".
Distancia focal	La distancia geométrica desde el objetivo al punto donde se forma la imagen. En este punto colocamos el ocular.
Relación focal	La luminosidad del telescopio, del mismo modo que en las cámaras fotográficas.
Poder de captación de luz	Los aumentos de un objetivo (más aumentos es igual a menos luminosidad).
Campo de visión angular	A mayores aumentos, menos campo de visión (o ángulo), y el resultado será una imagen más oscura.

Nota. La tabla muestra las principales características técnicas para un telescopio astronómico.

Tomado de Asociación astronómica marina alta. Telescopios por (Ortuño, J., 2020)

La montura es una estructura donde se acopla el tubo óptico para realizar movimientos controlados y explorar todo el cielo. Además, las vibraciones que se transmite al tubo y la precisión en sus mecanismos determinan una observación astronómica de calidad.; suelen fabricarse en serie y en fundición de aluminio, sin embargo, las mecanizadas y con acero las superan (Ortuño, 2015). Entre las monturas más comunes para la observación astronómica de aficionados se encuentran: la azimutal y la ecuatorial

2.1.1 Montura azimutal

La sencillez al mover telescopios pequeños hace que esta montura sea la más usada. Consiste en dos ejes perpendiculares: uno vertical y otro horizontal, que permiten hacer los movimientos “arriba-abajo” e “izquierda- derecha”. El primero, se denomina eje de altura y se mueve desde la posición horizontal (0°) hasta el cenit (90°) y presenta un tope como límite. El segundo, es el eje de acimut y completa un giro de 360° siguiendo la línea del horizonte y es un eje sin fin (Blanco, Tosar, & Gómez, 2018, pág. 12); en la Figura 2 se observa una montura azimutal que cuenta con dos grados de libertad llamados, el eje azimutal y el eje vertical.

Figura 2

Disposición de ejes en la montura azimutal



Nota: La figura muestra la disposición de ejes en la montura azimutal. Tomado de SEDA/LIADA, Montura Altacimuntal por J. Sanabria, 2020.

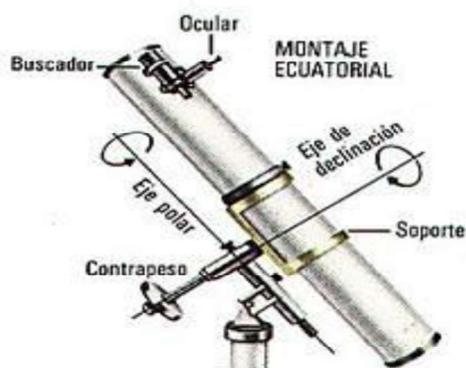
Además, es una montura perfecta si las observaciones son realizadas desde los polos, considerando que el movimiento de los cuerpos celestes sería paralelo al horizonte. Por tanto, la Figura 2 muestra la disposición de los ejes de la montura azimutal.

2.1.2 Montura ecuatorial

La montura ecuatorial es la más utilizada por las personas aficionadas a la astronomía, esta montura permite compensar el movimiento de rotación, permitiendo que los cuerpos celestes permanezcan centrados en el ocular del telescopio mediante el movimiento de un solo eje (eje de ascensión recta), lo que hace que las observaciones sean más cómodas y precisas. En telescopios automatizados para el posicionamiento es necesario el movimiento de los dos ejes, esperando una correcta alineación del eje polar hacia el polo norte magnético; si la alineación es correcta, el seguimiento de los cuerpos se realiza mediante el movimiento de un solo eje. En este sentido, la Figura 3 señala la disposición de los ejes de la montura ecuatorial, la montura azimutal cuenta con dos grados de libertad llamados, el eje de declinación y el eje polar.

Figura 3

Disposición de los ejes en la montura ecuatorial



Nota: La figura muestra la disposición de los ejes en la montura ecuatorial. Tomado de SEDA/LIADA, Montura Ecuatorial por J. Sanabria, 2020.

La montura ecuatorial dispone de dos ejes principales de movimiento durante la observación y dos ejes secundarios que se mueven en la instalación previa del instrumento. Estas monturas son como relojes de precisión y necesitan estar en buenas condiciones, cuidando su

transporte y manejo. Las monturas ecuatoriales, se mueven en los ejes de Ascensión Recta y Declinación. (Blanco, Tosar, & Gómez, 2018, pág. 13)

2.1.3 Alineación de telescopio con montura ecuatorial

La alineación de la montura previa a la observación astronómica es de vital importancia, porque permitirá una búsqueda y posicionamiento eficiente del telescopio hacia los cuerpos celestes que se requiera observar. Además, podrá mantener centrado al cuerpo celeste con el único movimiento del eje de ascensión recta (eje polar). Del mismo modo, la alineación es necesaria considerando que no nivela el momento de inercia del telescopio sobre los ejes, y evita un exceso de esfuerzo de los motores al transmitir el movimiento rotacional hacia los engranes.

Antes de realizar la observación astronómica es necesario realizar tres pasos importantes en el armado del telescopio, mismos que se detallaran a continuación:

a) Nivelación del trípode

El suelo debe ser firme para evitar que el trípode se hunda y genere desnivel a medida que se carga peso sobre el mismo (montura, telescopio, dispositivos de captura de imagen). Sería muy adecuado nivelar el trípode con un buen nivel en dos direcciones perpendiculares o con un nivel redondo de buena calidad. Se debe extender las patas telescópicas lo mínimo posible (no intentar aprovechar para ganar altura) a fin de mejorar la estabilidad. (López Arlandis, 2017, pág. 10)

b) Orientación polar

Para la orientación polar es necesario ubicar la montura sobre el trípode y orientar el eje de Ascensión Recta (AR) hacia el eje polar, mediante la ayuda de una brújula magnética para esta orientación se debe considerar la declinación magnética; este es el ángulo que forma el norte

magnético con el geográfico (es positiva a la derecha del geográfico y viceversa). Además, es importante conocer la declinación magnética del punto habitual de observación. No obstante, es más práctico ubicar la brújula sobre la base de la montura y cuando esté orientada correctamente al polo norte, comprobar la declinación magnética en el lugar. (López Arlandis, 2017, págs. 12-14)

c) Montaje del telescopio y balance

Para evitar que el giro en el eje de ascensión recta y en el eje de declinación produzca grandes variaciones en el esfuerzo del motor, es imprescindible ajustar el balance, permitiendo distribuir el peso de los instrumentos del telescopio y establecer un mínimo de inercia rotacional, y evitar afectaciones al movimiento de los motores, e impedir un sobrecalentamiento de los mismos.

2.2 Sistema de control para posicionamiento y seguimiento de telescopios

El posicionamiento y seguimiento de estrellas mediante equipos motorizados es una herramienta relativamente complicada. Para el posicionamiento de un telescopio destinado a observaciones astronómicas, se requiere identificar las coordenadas de ascensión recta y declinación las cuales son utilizadas en astronomía para ubicación de cuerpos celestes. Por otro lado, para poder mantener un objeto celeste en el ocular de un telescopio es necesario diseñar un sistema capaz de controlar un motor de cd acoplado al eje de declinación para que se realice una revolución cada 24 horas. (Avalos, 2009)

Las monturas ecuatoriales utilizan el sistema ecuatorial de coordenadas. Este sistema estaría en los catálogos de cuerpos celestes para representar su posición sobre la esfera celeste.

El sistema ecuatorial es independiente de la ubicación geográfica del observador, las coordenadas son válidas en cualquier sitio de observación. Para el posicionamiento de cuerpos celestes, se realiza el giro en dos ejes. El primero denominado “eje polar o de ascensión recta” es paralelo al eje de la Tierra, y la rotación aparente del cielo puede ser compensada al girar el telescopio alrededor de este eje a una velocidad constante. Y el segundo es conocido como “eje perpendicular o de declinación” al de ascensión recta. (Gallardo, 2008, pág. 56)

Celestron Nexstar es un sistema de guiado que cuenta con una unidad de control (NexStart GT) para el posicionamiento y seguimiento astronómico, el cual cuenta con una base de datos de cuatro mil objetos. Además, presenta diferentes modos de ajuste para alineación de estrellas, considerando que el sistema más utilizado y básico es la *Two-Start Alignment* (Alineación con Dos Estrellas).

Para la alineación de estrellas mediante este método, requiere que el usuario conozca la posición de dos estrellas brillantes para alinear el telescopio de manera precisa con el cielo y poder empezar a buscar objetos. Entonces, el primer paso es alinear y centrar una estrella brillante de referencia al buscador y posteriormente ocular del telescopio de manera manual; además, el sistema de alineación pedirá insertar información como: fecha, hora y coordenadas de posición de la primera estrella, ascensión recta y declinación; posteriormente, el sistema requerirá alinear y centrar la segunda estrella de la misma manera e insertar sus coordenadas de posición. Además, es recomendable seleccionar una estrella distante a la anterior (40° o 60° aproximadamente) porque proporcionan una alineación más precisa a diferencia de las situadas a menor distancia. (CELESTRON, 2010)

Cabe recordar que previamente el eje de ascensión recta del telescopio debe estar en posición norte. Una vez realizada la alineación del telescopio, es posible el posicionamiento del mismo hacia cualquier cuerpo celeste a observar. Para el seguimiento del cuerpo celeste, únicamente es necesario el movimiento del eje de ascensión recta, considerando que una rotación completa del cielo toma 24 horas en completarse. Entonces, el movimiento de una estrella significa $(360 \text{ grados}/24 \text{ horas}) = 15 \text{ grados/hora}$, equivalente a que la estrella se mueva un grado por cada cuatro minutos, este es el movimiento rotación que deben ejercer los motores sobre el eje de ascensión recta para mantener centrado el cuerpo celeste, y realizar fotografías de larga exposición. (Gallardo, 2008)

2.2.1 Actuadores para el sistema de posicionamiento

Un actuador es un dispositivo con la capacidad de generar una fuerza a un cambio de posición, velocidad o estado de un elemento mecánico, a partir de la transformación de energía.

Los actuadores más utilizados en robótica son los motores paso a paso como se observa en la Figura 4, este tipo de actuador electromecánico convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares, su avance está determinado en grados. La característica de este desplazamiento es importante, ya que el movimiento de rotación de la tierra está dado en la misma variable, la tierra rota un grado cada cuatro minutos, por lo mismo, se puede utilizar el desplazamiento del motor y relacionarlo con el movimiento de la tierra, y realizar el seguimiento del cuerpo celeste de una manera precisa y coordinada, el motor a pasos Nema 17, tiene un desplazamiento angular de $1,8^\circ$.

Figura 4*Motor paso a paso*

Nota: Tomado de Ingeniería Mecafenix, Motor paso a paso ¿Qué es y cómo funciona? por Mecafenix, 2020.

El motor a pasos es un dispositivo electromecánico que a partir de una serie de pulsos puede desplazarse en forma angular una cantidad definida de “pasos”. Este tipo de motores, se emplea para tareas que requieren movimientos muy precisos, como en impresoras de alto rendimiento, proyectos de robótica, etc. (Corona, Abarca, & Mares, 2014, pág. 294)

2.2.2 Sensores para control del sistema de posicionamiento

Los sensores para el sistema de posicionamiento aportan con el control de movimiento de los motores paso a paso, y contribuyen con el primer paso para la alineación correcta de la montura ecuatorial. Es decir, nivelar el trípode, poner la base del mismo en una posición horizontal al piso en donde se ubicará el telescopio. Por otro lado, si se considera hacer esta alineación de forma manual y con instrumentos mecánicos, siempre existe el inconveniente de cometer errores de medición, lo que conlleva al desenfoque en el centro del ocular del seguimiento de los cuerpos celestes, sin embargo, si la alineación se la realiza mediante instrumentos electrónicos, los errores de medición son bajos, y permiten ser calibrados continuamente sin afectar la observación astronómica.

Del mismo modo que en los seres humanos, los robots tienen que recabar amplia información sobre su ambiente a fin de funcionar de manera efectiva; además, recoger un objeto e identificar qué es el mismo, mediante un brazo robótico y el uso de visión artificial; y cuando éste se mueve a través del espacio cartesiano, tiene que evitar obstáculos y acercarse a los objetos con una velocidad controlada. Las características de los objetos dependen de su peso, fragilidad, temperatura, composición, etc.; y estos factores son cruciales para determinar el comportamiento del robot con su entorno, estos elementos deben reconocerse e introducirse en la computadora que controla los movimientos del robot. (Kumar Saha, 2010, pág. 52)

2.2.2.1 Encoder

Estos sensores miden la posición de cada articulación, es decir, el ángulo de articulación de un robot entre los sensores que permiten la medición del desplazamiento angular se encuentra el encoder, el cual es un dispositivo óptico que interpreta el movimiento rotacional de un elemento mediante una secuencia de pulsos digitales que pueden ser relativas o absolutas.

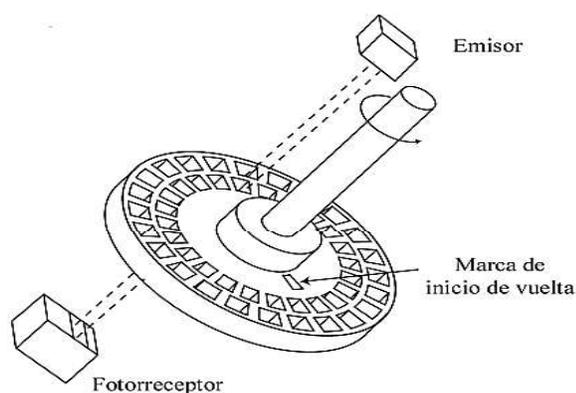
Existen dos tipos de encoder, el incremental y el absoluto. La principal diferencia entre estos radica en que el encoder absoluto indica la posición actual del eje. Mientras el encoder incremental ofrece datos referentes al movimiento del eje, desprendiendo valores de velocidad, distancia y posición. Por un lado, el encoder incremental lleva registro del movimiento relativo a un punto de inicio definido al momento de arrancar. Por otro lado, el encoder absoluto lleva registro del movimiento dentro de su propio marco de referencia absoluto. Además, cuando se enciende un encoder incremental, este debe ser recalibrado antes de comenzar a operar; mientras que un encoder absoluto siempre conoce su posición y su punto de inicio puede ser definido electrónicamente a gusto del operador. Entonces, los encoders incrementales son análogos y los

encoders absolutos son digitales (brinda mayor funcionalidad y robustez). Además, el encoder absoluto típico especifica un solo código de ángulo, y es más costoso. (LBA, Industrial, 2019)

En la Figura 5 se presenta los patrones de interferencia para la lectura de pulsos; el encoder óptico cuenta con un fotodiodo emisor y receptor, en la que al rotar el disco se generan interferencias por las ranuras que contiene dando una secuencia de pulsos digitales.

Figura 5

Disco grabado con un patrón para interferencia



Nota: La figura muestra los elementos que tiene un disco de grabado. Tomado de Universidad de Alicante, Optativa ingenierías informáticas por F.Torres, 2016.

En un observatorio astronómico, los encoders comunican a los actuadores cuál es la posición de un espejo móvil, proporcionando información de posicionamiento (Gutierrez, 2020). En este contexto, un encoder absoluto sería útil en el supuesto caso de que el telescopio astronómico fuese fijo. Sin embargo, el telescopio de este trabajo es móvil y tiene un cambio de posición en el tiempo y el espacio, que conlleva a que sea imprescindible la calibración permanente y continua del sensor antes de hacer las observaciones astronómicas, haciendo que se usen métodos convencionales de alineación de telescopios, dónde la referencia son dos cuerpos celestes más

brillantes en el espacio que posteriormente permita triangular su posición, y así calibrar el sensor encoder.

2.2.2.2 Sensores inerciales

Un sensor inercial tiene la capacidad de medir posición, velocidad y aceleración angular; además, su aplicación está relacionada al análisis del movimiento. Estos sensores inerciales, están compuestos por acelerómetro, giroscopio y magnetómetro.

Inertial Magnetic Unit que traducido al español se denomina Unidad Inercial Magnética (IMU) es un dispositivo que integra hasta nueve ejes; tres giróscopos, tres acelerómetros y tres magnetómetros; junto con un reloj que permite asignar tiempo tanto a los valores medidos por IMU como a los valores obtenidos por mecanismos de calibración y debidos a posibles perturbaciones originadas por cambios de temperatura o a otros agentes externos.

Este tipo de sensores son ampliamente utilizados para determinar la inclinación y vibración de un objeto en configuración estática. Por otro lado, en la configuración dinámica estos sensores, son utilizados para determinar la aceleración traslacional, por ejemplo, para la ingeniería automotriz y aeronáutica. El inconveniente de estos sensores radica en pueden estar desbalanceados, debido a problemas de fábrica, y es necesario compensar este desbalance mediante el sistema de lectura. Los giroscopios aprovechan los efectos de las fuerzas de Coriolis presentes en un movimiento rotacional, un giroscopio es un *Micro-Electro-Mechanical Systems* que traducido al español es Sistemas Micro Electromecánicos (MEMS) formado por un cuerpo que representa simetría en su rotación. (Corona, Abarca, & Mares, 2014, pág. 104)

Uno de los beneficios que aporta el uso de las IMU es la sencillez del sistema, gran cantidad de datos en simultáneo son enviados del sensor a un dispositivo externo como un

controlador para su posterior análisis. Además, su peso y tamaño facilitan su movilidad por lo que es posible llevar el sensor a diferentes lugares; y el coste de los sensores inerciales es menor que otro tipo de sensores, para el control de movimiento. (Rodero, Martinez, & Gómez, 2016, págs. 14-16)

2.2.2.3 Magnetómetro

López (2017) estableció la importancia y manera de alinear un telescopio astronómico de montura ecuatorial antes de realizar las observaciones astronómicas. Además, la nivelación correcta del trípode, señalando la orientación paralela entre el eje ascensión recta y el eje de rotación de la tierra, considerando la declinación magnética, y sabiendo este ángulo forma el norte magnético con el geográfico. Esta orientación es posible realizarla mediante el uso de brújula o direccionando el eje polar con la estrella polar (constelación de la Osa Menor).

En la Figura 6 se observa el sensor MPU 9250 tiene incorporada tres funciones elementales, acelerómetro, giroscopio y magnetómetro, característica importante en la orientación correcta en los telescopios.

Figura 6

Sensor MEMS MPU 9250 nueve ejes



Nota: Sensor MEMS MPU 9256. Tomado de Datasheet, MPU 9250 Product Specification por InvenSense, 2014.

El sensor MEMS MPU 9250, cuenta con todos los instrumentos electrónicos capaces de nivelar correctamente el trípode y la montura ecuatorial, evitando errores de paralaje producidos por el humano. Entonces, faltaría establecer manualmente el balance de los ejes para impedir la generación de esfuerzos indeseados a los actuadores respecto al movimiento de los ejes.

2.3 Técnicas de adquisición de imágenes

La astrofotografía consiste en captar imágenes de cuerpos celestes; y su práctica en la astronomía permite ciertas ventajas respecto de una observación común, porque en largas exposiciones, la emulsión fotográfica imprime radiaciones de intensidad demasiado débiles para ser percibidas por el ojo humano (incluso usando un potente telescopio), independiente de la utilización de una cámara réflex o una digital. Además, existen distintos tipos de astrofotografía, los que dependen del tipo de fotografía que se quiera realizar.

2.3.1 Astrofotografía con trípode

Se suelen conseguir trazos de estrellas (astrofotografías circumpolares) considerando que gracias a la rotación de la Tierra las estrellas parecen girar en torno al polo celeste, registrando la película fotográfica de estos movimientos estelares. Adicionalmente, si es requerida la obtención de las estrellas como puntos y no como trazos, entonces, habría que disminuir el tiempo de exposición a sólo unos segundos, o bien compensar el movimiento de la Tierra.

2.3.2 Astrofotografía en paralelo

En esta técnica, la cámara se ubica sobre el telescopio con el que se realizará el seguimiento a las estrellas para evitar los trazos. Esto permite tiempos de exposición bastante largos, consiguiendo imágenes detalladas. Siempre que el telescopio guía realice un seguimiento preciso de las estrellas, se garantiza estrellas puntuales independientemente del tiempo de

exposición de la toma, permitiendo concentrarnos en otros factores importantes como: la apertura del diafragma o la sensibilidad de la película fotográfica. (SERNATUR, 2019)

2.3.3 Astrofotografía a foco primario

Esta técnica es ideal para captar objetos de cielo profundo como nebulosas, cúmulos o galaxias; y para hacerlo se sustituye el objetivo tradicional de la cámara por el telescopio, conectándola directamente a éste. Este tipo de astrofotografía muestra imágenes de mayor resolución en un campo menor y es aplicable para cámaras réflex y digitales.

2.3.4 Astrofotografía por proyección del ocular

Consiste en poner un ocular entre la cámara y el telescopio, ampliando la imagen. Es una técnica poco utilizada porque la calidad que ofrece es baja y conlleva problemas como: a un mayor aumento, el seguimiento será crítico; además, es muy sensible a cualquier movimiento. Entonces, se utiliza básicamente para astrofotografía planetaria, porque es excelente para grandes aumentos de relativa luminosidad y poco tamaño. (Stockebrand, 2018)

2.4 Procesamiento digital de imágenes

Una imagen digital es una función $f(x, y)$ que ha sido discretizada en coordenadas espaciales y en luminosidad. Una imagen digital puede ser considerada como una matriz, cuyos índices de renglón y columna identifican un punto (lugar en el espacio bidimensional) en la imagen y el correspondiente valor del elemento en la matriz, identifica el nivel de gris. Los elementos de estos arreglos digitales son denominados elementos de imagen o píxeles. (Escalante, 2006)

La importancia del procesamiento digital de imágenes, consiste en la discretización de la información contenida en una imagen digital. Por tanto, es necesario realizar un procesamiento de una imagen, el cual conlleve a obtener esa información que es requerida utilizando filtros digitales, u operaciones morfológicas. En astronomía, se realiza este tipo de filtros para eliminar el ruido producido por las vibraciones de telescopio, por los cambios bruscos de temperatura, etc., esto con la finalidad de obtener una imagen de buena calidad y apreciable al ojo humano.

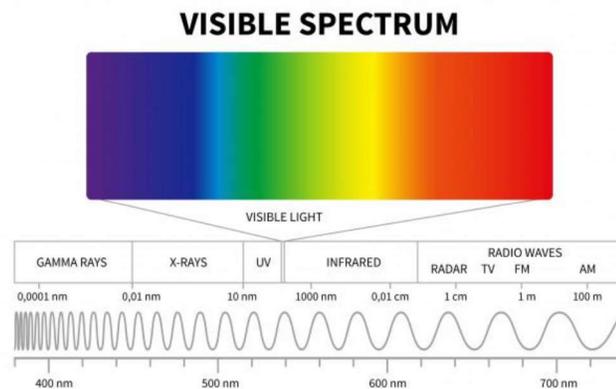
A nivel científico, la información requerida de una imagen digital es su espectro electromagnético, donde las ondas electromagnéticas se pueden visualizar como ondas sinusoidales propagadas de longitud de onda λ , o como una corriente de partículas sin masa, viajando en un patrón con forma de onda y moviéndose a la velocidad de la luz. Cada partícula, sin masa contiene cierta cantidad de energía; dichos paquetes de energía se denominan fotones, y estos son directamente proporcionales a la frecuencia. Por otro lado, la luz es un tipo particular de radiación electromagnética que puede ser detectada por el ojo humano. Además, la banda visible del Espectro Electro-Magnético (EEM) se extiende en un rango de aproximadamente 0,43 micrómetros (violeta) a 0,79 micrómetros (rojo). (Vilet, 2005)

Los telescopios astronómicos de radiofrecuencia usan la técnica de interferometría, esta técnica consiste en combinar la información obtenida a través de aparatos conocidos como interferómetros, que captan datos y permiten construir una imagen de los objetos estudiados con una resolución considerablemente mayor a la obtenida mediante el uso de telescopios convencionales, para obtener imágenes de calidad que permitan ser usadas con fines científicos. Los datos obtenidos por los radiotelescopios son del espectro de frecuencias de ondas radioeléctricas, por lo cual, al momento de sintetizar y discriminar las frecuencias fundamentales, se puede construir una imagen mediante el uso de la transformada de Fourier. (Liberona, 2015)

En la Figura 7 se observa la representación del espectro electromagnético a diferentes frecuencias, de menor longitud de onda, a mayor longitud.

Figura 7

Espectro electromagnético de la luz



Nota: La figura muestra el espectro electromagnético de la luz. Tomado de Freepik Visible spectrum, por Copyright 2010-2021 Freepik Company S.L.

La transformada de Fourier es una herramienta importante dentro del procesamiento digital de imágenes. Es utilizada para descomponer una imagen en sus componentes seno (*sin*) y coseno (*cos*). La salida de la transformación representa a la imagen en el dominio de Fourier o dominio de la frecuencia, mientras que la imagen de entrada está en el dominio espacial. Cada punto de la imagen en el dominio de Fourier representa una frecuencia particular contenida en la imagen en el dominio del espacio. La transformada de Fourier de una imagen permite aplicar distintos tipos de filtros a la imagen para contribuir a una correcta visualización de esta. (Friedrich, 2013)

Considerando lo antes señalado, es posible realizar un análisis inverso de la información obtenida de telescopios astronómicos de tipo ópticos. Es decir, obtener una imagen de un cuerpo celeste, y mediante la transformada de Fourier realizar el análisis frecuencial para obtener detalles característicos, como: temperatura, composición, tamaño o forma del cuerpo celeste observado. (Ruiz Fernández, 2016)

La transformada de Fourier discreta, es la base para el análisis frecuencial de una imagen digital y se expresa en la siguiente ecuación (1):

$$F(u) = \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-j2\pi \frac{xu}{M}} \quad (1).$$

Donde:

$F(u)$: Transformada de Fourier de la función continua

M : Número muestras de la transformación continua

X : Valor incremental

$f(x)$: función continua de la imagen digital

La frecuencia se relaciona directamente con la velocidad de cambio, no es difícil asociar intuitivamente frecuencias de la transformada de Fourier con patrones de variación de intensidad de una imagen, los patrones tienen las siguientes características para ser analizadas:

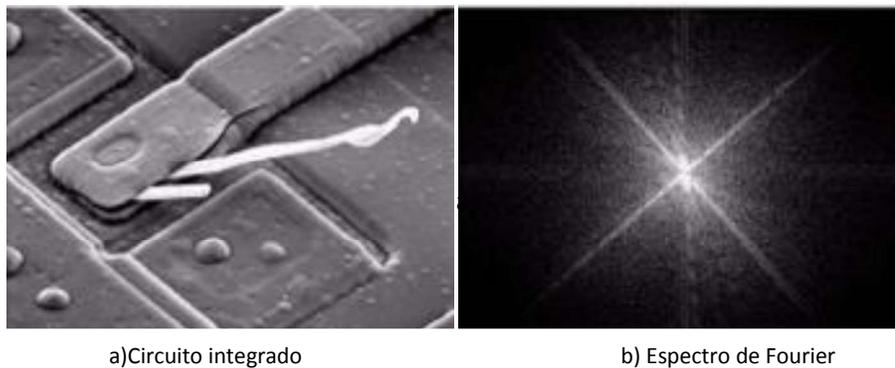
- El componente de frecuencia que varía más lentamente ($u = v = 0$) corresponde a nivel de gris promedio.

- Al alejarse del origen las frecuencias bajas corresponden a componentes que varían lentamente.
- Lejos del origen, las frecuencias altas corresponden a cambios cada vez más rápidos en el nivel de gris de la imagen (bordes, ruido).

La Figura 8a muestra una imagen digital del daño en un circuito electrónico, a esta se aplica la transformada de Fourier obteniendo una nueva imagen en el dominio de la frecuencia como se observa en la Figura 8b.

Figura 8

Circuito integrado con daño termal inducido y su espectro de Fourier



Nota: La figura muestra el circuito integrado y su espectro de Fourier. Tomado de Procesamiento Digital de Imágenes. San Luis Potosí: UASLP, por J.M. Vilet, 2005.

Un filtro que atenúa las altas frecuencias mientras deja pasar las bajas se llama filtro pasabajas, este tendrá detalles menos finos que el original porque se han atenuado las altas frecuencias, además tendrá menos variaciones suaves de nivel de gris porque se han enfatizado el detalle tradicional del nivel de gris.

CAPÍTULO III

3 Diseño del sistema de posicionamiento continuo en una montura ecuatorial

En este capítulo, se realizará el diseño conceptual de lo que se pretende efectuar en el presente trabajo; además, un acercamiento esquemático de la disposición de los elementos mecánicos y electrónicos, que serán acoplados a la montura ecuatorial. Seguidamente, se elaborará el diseño de los elementos mecánicos que permitan el movimiento coordinado entre el telescopio y el cuerpo celeste a observar, la selección de componentes mecánicos debe estar basados en un análisis matemático y físico del momento flector y torsor; estas variables influyen en el movimiento rotacional del telescopio sobre cada eje, y son de interés para la correcta selección de los actuadores.

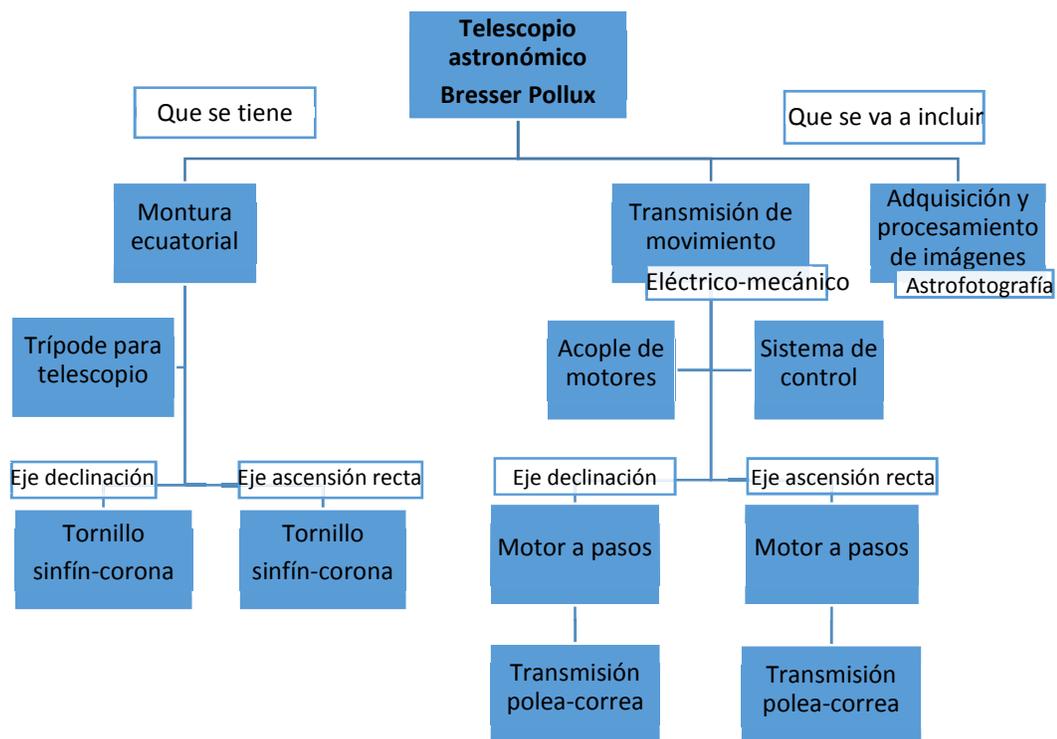
3.1 Diseño conceptual

Para determinar el movimiento de los ejes de la montura ecuatorial y por ende del telescopio astronómico es necesario identificar el movimiento aparente de los cuerpos celestes, producido por la rotación de la tierra, en el estado de arte del presente trabajo, se estableció que el movimiento aparente de los cuerpos celestes es de un grado por cada cuatro minutos transcurrido de la observación, la montura ecuatorial cuenta con un engrane en el eje de declinación de 88 dientes, y del eje de ascensión recta de 139 dientes, la transmisión del movimiento hacia los ejes se realiza mediante tornillo sin fin, de acuerdo a este antecedente, se obtendrá el cálculo del movimiento de arco por segundo, que deberá ser realizado por los motores a pasos para el posicionamiento y seguimiento de cuerpos celestes.

La Figura 9 muestra un diagrama de conceptos que evidencia la existencia de los elementos a diseñar para ser acoplados a los ya existentes en el telescopio. Además, se detallan los elementos de transmisión mecánicos (tornillo sinfín-corona) que cuenta el telescopio astronómico, y también se detallan otros elementos también mecánicos y eléctricos que se adaptarán a la montura.

Figura 9

Diagrama de conceptos de los elementos del telescopio bresser y el diseño requerido.



El telescopio astronómico a ser utilizado es el presente trabajo es el Telescopio astronómico Bresser Pollux, Reflector Newton, con montura ecuatorial de diámetro de espejo primario 150 mm, y de distancia focal de 1400 mm, como se observa en la Figura 10a, su especificación técnica se encuentra detalladas en Gonzales (2017). Para diseñar el acople de los

motores a la montura, es necesario considerar algunos aspectos importantes para generar una estructura robusta, que permita la transmisión de movimiento de los motores hacia cada eje de la montura ecuatorial. Esta estructura evita vibraciones que influyen posteriormente en la adquisición de imágenes.

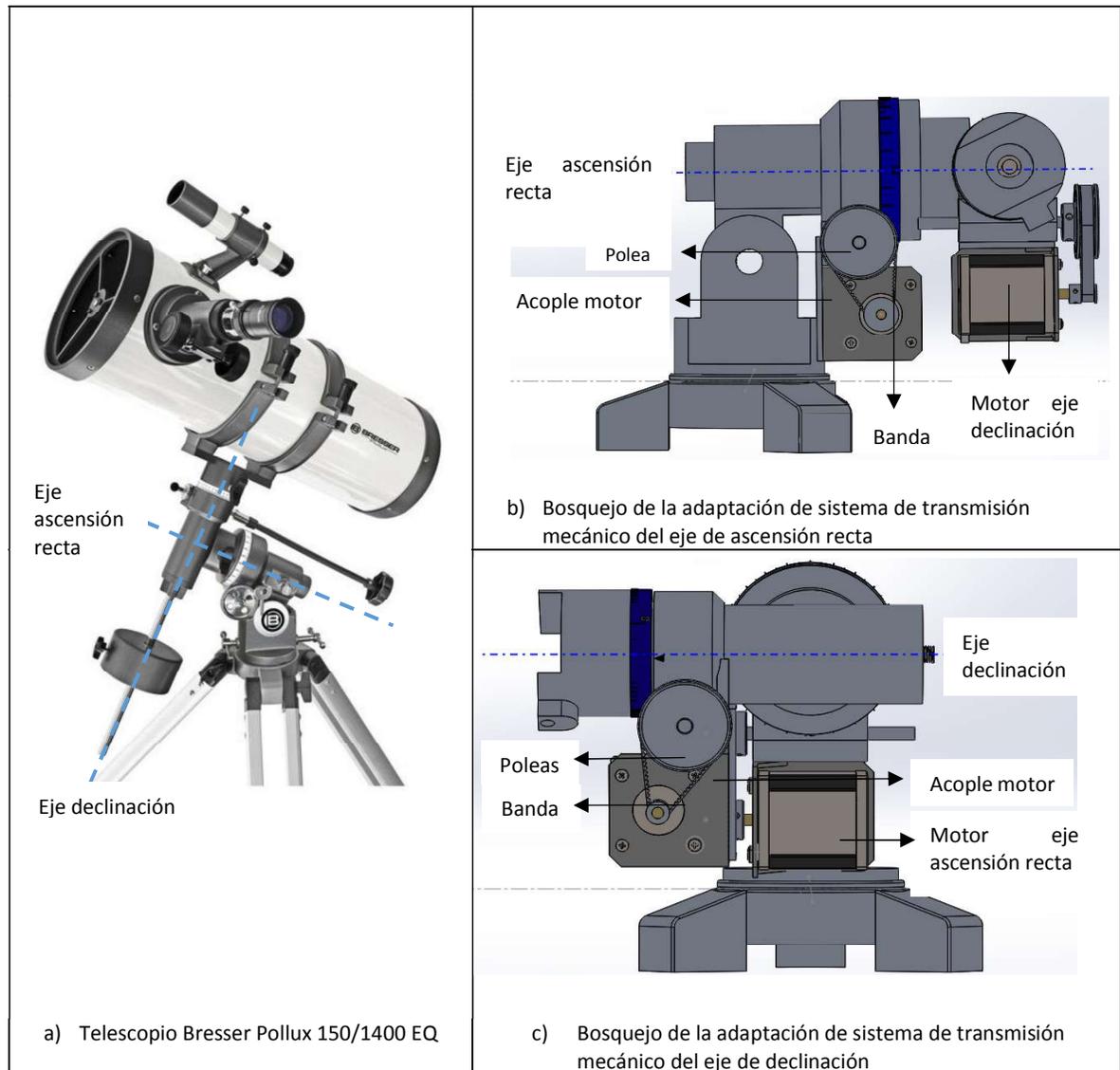
Corona, Abarca, y Mares (2014) consideran que para movimientos de precisión utilizados en robótica es imprescindible el uso de motores paso a paso, en el cual su movimiento es angular, y considerando que el seguimiento de cuerpos celestes está relacionado a la rotación del planeta Tierra, haciendo el uso de motores idóneo para el presente trabajo. Las características técnicas de los motores a utilizarse, deben estar basadas en un análisis mecánico del torque, y momentos de inercia, para el sistema cinemático. Los motores seleccionados deben soportar la masa total del telescopio que es de 3,8 Kg; además, debe considerar las variaciones de esta masa, producidos por los accesorios que serán incluidos en el telescopio para los equipos de adquisición de imágenes, entre ellos, cámaras, lentes, filtros etc.

El movimiento generado por los motores debe ser de alta precisión, y se requiere de un control del ángulo girado, esto se consigue mediante motores paso a paso de corriente continua, estos motores requieren de un control electrónico preciso de la posición, sin la necesidad de retroalimentación.

En La Figura 10a representa el telescopio astronómico a ser utilizado en el presente trabajo, mientras tanto: en la Figura 10b y 10c, se observa un bosquejo de los elementos a ser diseñados y adaptados a la montura. En la Figura 10b y 10c se identifica el sistema de acople que requiere ser diseñado para que los actuadores se sostengan sobre cada uno de los ejes de la montura, de tal manera que permitan la transmisión del movimiento hacia los elementos de transmisión mecánica y posteriormente al tornillo sinfín-corona propio de la montura ecuatorial.

Figura 10

Representación de los componentes mecánicos a ser incluidos en el telescopio astronómico



Nota: La Figura 10a fue Tomado de Fotografía y Astronomía por Gonzales, 2017.

3.2 Diseño de detalle mecánico

3.2.1 Relación de transmisión eje de ascensión recta

El movimiento rotacional de los motores, se transmite hacia un engranaje de tornillo sin fin con rueda helicoidal respecto al eje de ascensión recta la relación de transmisión es de 1/139, la rotación de la tierra es de 23 horas, 56 minutos y 4 segundos. Esto se representa en la resolución de la ecuación (2).

$$23h * 3\,600 \frac{seg}{hora} + 56 * 3\,600 \frac{seg}{hora} + 4\,seg = 86\,164\,seg \quad (2).$$

Posteriormente, el giro completo de la tierra en arcos por segundo (*arc/seg*) expresado en la resolución de la ecuación (3).

$$360\,grad * 3\,600 \frac{arcseg}{grad} = 1\,296\,000\,arcseg \quad (3).$$

Además, la velocidad de rotación de la tierra presentada en la ecuación 4.

$$\frac{1\,296\,000\,arcseg}{86\,164\,seg} = 15,041 \frac{arcseg}{seg} \quad (4).$$

Lo que significa que la tierra recorre 15,041 arc/seg y considerando que mediante programación digital es posible generar impulsos eléctricos necesarios para que el motor nema genere desplazamientos angulares discretos. Es decir, avance una serie de grados (pasos), se tiene que aplicar la ejecución de la ecuación (5) como se muestra a continuación:

$$1\,paso = 15,041\,arcseg \quad (5).$$

De acuerdo a lo señalado por Corona, Abarca y Mares (2014, pág. 294) se estableció que el actuador idóneo para el presente trabajo es el motor paso a paso, el cual genera 200 pasos por cada vuelta, recorriendo 1,8 grados por cada paso, por ende, se aplica la realización de la ecuación (6):

$$\frac{1\,296\,000 \frac{\text{arcseg}}{\text{giro}}}{200 \frac{\text{pasos}}{\text{giro}}} = 6\,480 \frac{\text{arcseg}}{\text{pasos}} = 6\,480 \text{ arcseg} \quad (6).$$

Finalmente, es necesario que el motor se desplace 6 480 arcseg en el eje del motor para que el eje de ascensión recta se desplace 15,041 al mismo tiempo.

Por otro lado, la reducción de transmisión de movimiento debe ser la establecida en la ejecución de la ecuación (7) a continuación:

$$n_t = \frac{6\,480 \text{ arcseg}}{15,041 \text{ arcseg}} = 430,822 \quad (7).$$

La reducción que genera el tornillo sin fin y la rueda helicoidal de número de dientes n_2 es igual a 139, y esto se ve reflejado en la resolución de la ecuación (8) que se muestra a continuación:

$$n_t = n_{1p} * n_{2p} \therefore n_{1p} = \frac{n_t}{n_{2p}} = \frac{430,822}{139} = 3,099 \quad (8).$$

La relación de transmisión en el eje polar $n_{1p} = 3,099$ es la que se debe implementar entre el eje del motor y el tornillo sin fin, al seleccionar el diámetro de uno de los engranajes, es posible calcular el diámetro necesario del segundo engranaje, en el caso de que la transmisión sea mediante los mismos.

3.2.2 *Relación de transmisión eje de declinación*

Una correcta alineación en la orientación del eje polar (ascensión recta) hacia la estrella polar, hará que este sea el único eje en el que sea necesario ejercer movimiento, garantizando el seguimiento del cuerpo celeste observado. Existen diferentes técnicas y software para la alineación eficiente de un telescopio astronómico; así mismo, algunos telescopios cuentan con instrumentos de alineación como el “introscopio” que eleva el costo de adquisición del telescopio.

Los telescopios de montura ecuatorial básicos y que no cuentan con introscopio, tienen baja exactitud en la alineación del eje de ascensión recta, motivados principalmente por errores de precisión en los mecanismos de movimiento, así como de errores de paralaje propios del ser humano. Por tanto, se implementa un solo actuador en la montura ecuatorial al eje de ascensión recta el centrado y seguimiento de cuerpo celeste para adquisición de imágenes, va a ser deficiente.

Por ello, la compensación de una posible mala alineación del eje de ascensión recta hacia la estrella polar, es necesario ubicar un segundo actuador para ejercer movimiento sobre el eje de declinación. El movimiento aparente del cuerpo celeste será similar al calculado para el eje de ascensión recta, y la reducción de transmisión de movimiento de acuerdo a la Ecuación 6, se obtiene $n_t = 430,822$.

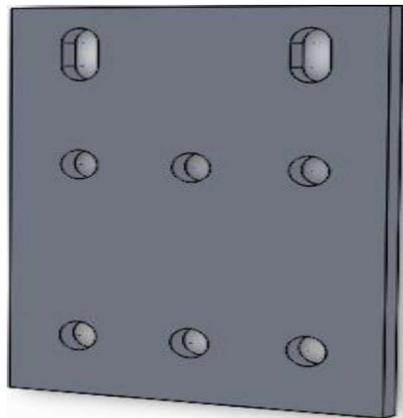
Además, la reducción que genera el tornillo sin fin y la rueda helicoidal de número de dientes $n_{2d} = 88$. Por tanto, haciendo uso de la Ecuación 8 se obtiene que la relación de transmisión $n_{1d} = 4,896$ es la que se debe implementar entre el eje del motor y el tornillo sin fin.

3.2.3 *Diseño y selección del sistema de transmisión*

El primer paso a establecer es el soporte para el acople entre los motores y los ejes de transmisión de la montura ecuatorial, los motores nema cuentan con soporte metálico en “L”, a este se le añade otro soporte, que se acoplará hacia cada base de los ejes de transmisión, como se observa en la Figura 11; Nota; el acople del motor Nema con la montura Ecuatorial será diseñado en material de aluminio.

Figura 11

Acople de motor nema y montura ecuatorial



El diseño del acople del motor nema hacia la montura, se realizó bajo el criterio de que sea la montura quien soporte el peso de los motores y no la base de los ejes; además, se realizará la transmisión de movimiento desde el eje de motor hacia el eje del tornillo sin fin. Los ejes son paralelos y las especificaciones para cada eje se detallan en la Tabla 2 así como los valores técnicos para el sistema de transmisión.

Tabla 2*Especificaciones técnicas del sistema de transmisión*

Eje	Relación transmisión teórica	Relación transmisión real	Distancia entre ejes (mm)	Diámetro polea conductor (mm)	Diámetro polea conducida (mm)	Tipo de transmisión
Ascensión recta	3,099	3,00	40,04	42,00	16,00	Correa
Declinación	4,896	5,00	40,04	42,00	10,00	Correa

La selección del tipo de transmisión por correa está basada principalmente en la distancia relativamente alta entre el eje conductor y el eje conducido, al considerar la transmisión mediante engranajes, se realiza un diseño propio porque en el mercado no hay engranajes que tengan la distancia entre ejes requerida. Además, el diámetro del engrane conducido debe ser mayor a 50 milímetros, reduciendo el espacio de movilidad de los elementos en la montura ecuatorial. La Figura 10c y 10b muestra el diseño del mecanismo de transmisión acoplado a la montura.

3.2.4 Diseño y selección de actuadores

3.2.4.1 Análisis de momentos de inercia y torsión en el eje de declinación y ascensión recta.

El telescopio Bresser Pollux reflector tiene una masa de 3,8 Kg es un tubo óptico (T) el cual, mediante un sistema de sujeción, acoplado la montura. Este tubo es el soporte de los

elementos ópticos, en uno de sus extremos se encuentra el espejo principal (E1); el cual refleja y concentra la luz hacia el espejo secundario (E2) y este a su vez hacia el ocular (Oc).

Estos son los implementos primarios que constituyen el telescopio en la Tabla 2, se observa los pesos de las elementos ópticos y equipos de adquisición de imagen, para el análisis de momento flector y torsor, los mismos que conlleven a selección del motor que permita el movimiento de los ejes en la montura. La Tabla 3 especifica la masa de cada instrumento óptico y de soporte del telescopio reflector, estos datos son importantes al determinar el torque necesario para el movimiento eficaz de los actuadores, en ella también se designan los valores de las fuerzas que actúan sobre el eje de declinación.

Tabla 3

Fuerzas que actúan sobre el eje de declinación

Designación	Característica	Masa (Kilogramos)	Peso (Newtons)
E2	Espejo secundario y soporte	0,325	3,185
Oc	Ocular y soporte	0,325	3,185
E1	Espejo primario y soporte	1,2	11,760
T	Tubo y sujeción a montura	1,775	17,395
Mo	Motor y sistema de transmisión	0,400	3,920
Md	Montura del eje de declinación	0,950	9,310
Va	Varilla de contrapeso	0,210	2,058
Co	Contrapeso	2,850	27,930
CQ	Cámara QHY 5-II	0,045	0,441
CR	Cámara Réflex	0,765	7,497
If	Intercambiador de filtros	0,400	3,920

El primer paso para la alineación de la montura ecuatorial en un telescopio astronómico es establecer el equilibrio rotacional en cada uno de los ejes de la montura ecuatorial, siendo

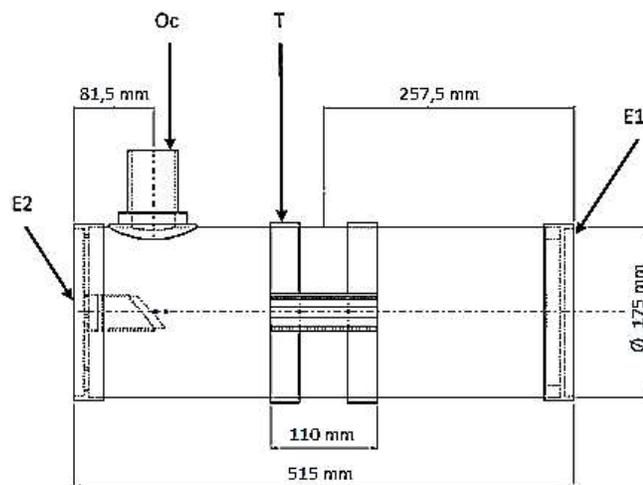
necesario identificar un punto de equilibrio, considerando diferentes fuerzas que actúan perpendicularmente al eje de rotación, generando un par torsor el cual reducirá el esfuerzo de torsión del motor.

a) Eje de declinación

La Figura 12 presenta la distribución de los elementos ópticos principales del telescopio refractor, incluyendo elementos adicionales como es el intercambiador de filtros, y los dispositivos de adquisición de imágenes, los cuales serán detallados en el diagrama de distribución de fuerzas.

Figura 12

Distribución de los elementos en el tubo óptico

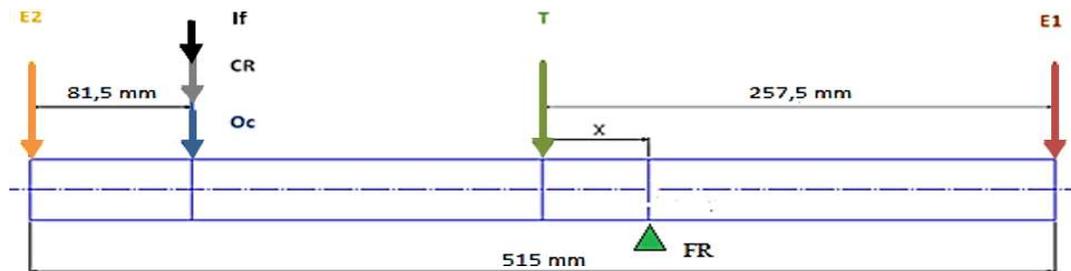


En la Figura 13 se observa el diagrama de distribución de fuerzas que se requiere para determinar el centro de gravedad (x) que se determina aplicando la ecuación (9), en el cual debe ubicarse el centro del tubo óptico y el eje de rotación, y establecer el equilibrio rotacional del sistema. El peso del intercambiador de filtros y del equipo de adquisición de imágenes es coincidente con la del ocular, ya que sobre este son colocados estos elementos. La Fuerza de Reacción (FR) es producida por la aplicación de las fuerzas que constituyen el tubo óptico y sus

elementos. En esta reacción, se ubica el punto de equilibrio del momento de inercia del sistema giratorio “y” representado las fuerzas adicionales al ocular que serán incluidas durante las observaciones astronómicas.

Figura 13

Diagrama de distribución de fuerzas de acción



$$E2(257,5 + x) + (y + Oc)(257,5 - 81,5 + x) + T(x) = E1(257,5 - x)$$

$$E2(257,5 + x) + (y + Oc)(176 + x) + T(x) = E1(257,5 - x)$$

$$3,185(257,5 + x) + (y + 3,185)(176 + x) + 17,395(x) = 11,76(257,5 - x)$$

$$3,185(257,5 + x) + (y + 3,185)(176) + (y + 3,185)x + 17,395(x) = 11,76(257,5 - x)$$

$$820,1375 + 3,185x + (y + 3,185)(176) + (y + 3,185)x + 17,395x = 3\,028,2 - 11,76x$$

$$3,185x + (y + 3,185)x + 17,395x + 11,76x = 3\,028,2 - 820,1375 - (y + 3,185)(176)$$

$$(32,34 + (y + 3,185))x = 2\,208,0625 - (y + 3,185)(176)$$

$$x = \frac{2\,208,0625 - (y + 3,185)(176)}{[32,34 + (y + 3,185)]} \quad (9).$$

La sumatoria del momento de torsión de acuerdo a la resolución de la ecuación (10) de acuerdo al centro de gravedad “x” debe ser igual a cero, porque en este punto se ubica el equilibrio del momento de inercia del sistema giratorio. Sin embargo, la ubicación manual del telescopio en el centro de gravedad tiene cierto error, que para los cálculos presentes se hizo entre ± 5 milímetros (mm), esto al evidenciar mediante prueba y error que en la posición equilibrio, el desbalance fue notorio y produciéndose movimientos bruscos de rotación; además,

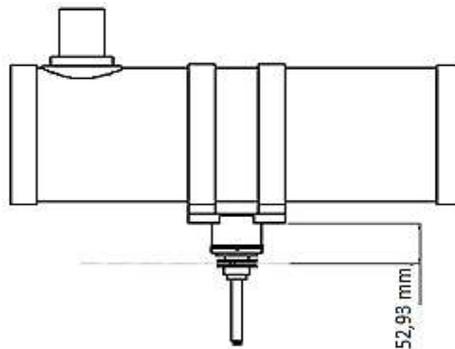
la variación del momento de torsión es más significativa al utilizar una cámara réflex, la cual tiene un mayor peso que los otros instrumentos ópticos, por cada mm de separación del centro de gravedad el momento de torsión se incrementa en un 20%.

$$\sigma T_{FR} = E2(257,5 + x) + (y + Oc)(257,5 - 81,5 + x) + T(x) - E1(257,5 - x) \quad (10).$$

En la Figura 14, se observa la distancia de separación entre el engranaje de transmisión del eje de declinación y el telescopio.

Figura 14

Distancia de separación entre el engranaje de transmisión y el peso del telescopio



Por tanto, el momento flector de acuerdo a la ecuación (11) y el torque total mediante la ecuación 12.

$$\sigma M_{FR} = (y + 35,53)(52,93) \quad (11).$$

$$\tau = \sqrt{T_{FR}^2 + M_{FR}^2} \quad (12).$$

Entonces, para determinar el valor de la inercia rotacional se plantea la ecuación (13).

$$I = \sum M x^2 \quad (13).$$

Dónde:

$M = \text{masa en Kilogramos (Kg)}$

$x = \text{distancia al eje de rotación dada en milímetros (mm)}$

$$I = E2(257,5 + x)^2 + \frac{(y+0c)}{9,8} (257,5 - 81,5 + x)^2 + T(x)^2 - E1(257,5 - x)^2 \quad (13.1)$$

La expresión anterior (13.1) representa el planteamiento de la resolución de la ecuación (13) como paso previo a la obtención de la ecuación (14), dónde se desarrolla el momento de inercia rotacional en función de las variables “x”, “y”. Además, reemplazando los valores de masa de la Tabla 3 se presenta lo siguiente:

$$I = 0,325(257,5 + x)^2 + \frac{(y+0c)}{9,8} (257,5 - 81,5 + x)^2 + 1,775(x)^2 - 1,2(257,5 - x)^2 \quad (14).$$

En este sentido, la Tabla 4 especifica los valores calculados para los momentos flector, torsor y de inercia para el eje de declinación de acuerdo a la Ecuación 10, 11 y 13, de diferentes equipos de adquisición de imagen ubicados sobre el telescopio.

Tabla 4

Valores de momento flector, torsor e inercia para el eje de declinación

Elementos adicionales en el ocular	Peso adicional en el ocular “y”	Centro de gravedad “x”	Momento Flector	Momento de torsión ± 5mm	Torque Max (N mm)	Inercia Rotacional (Kg m ²)
Cámara QHY 5-II	0,441	43,650	1 903,940	179,400	1 912,370	0,042
Intercambiador de filtros y cámara QHY 5-II	4,361	22,060	2 111,430	199,700	2 120,850	0,010
Cámara Réflex	7,497	7,625	2 277,420	215,700	2 287,600	0,015
Intercambiador de filtros y cámara Réflex	11,417	-7,709	2 484,900	234,600	2 495,950	0,021

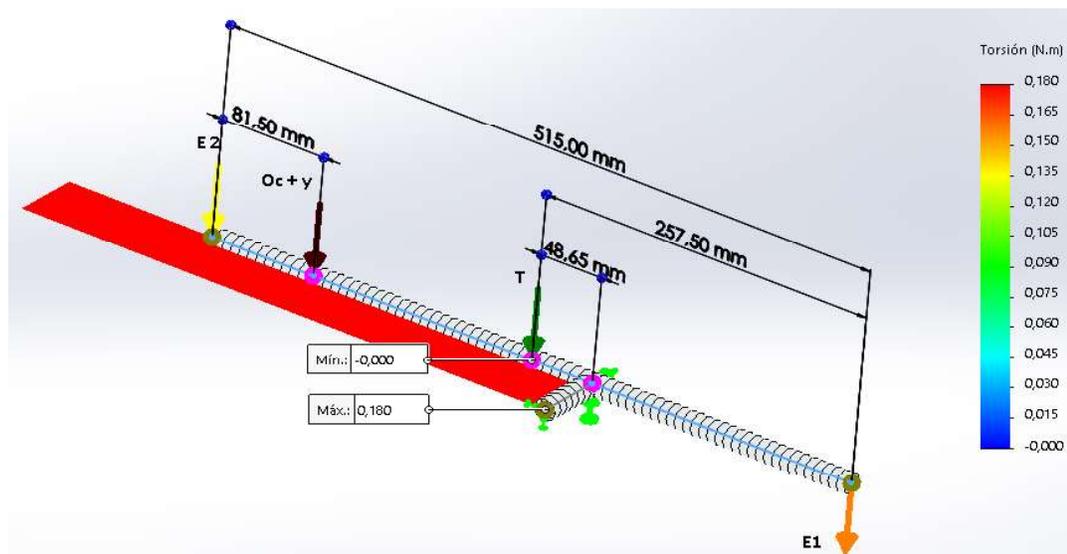
En la Figura 15, se observa la simulación de la distribución de fuerzas que actúan sobre el telescopio, para $x = 48,65 \text{ mm} (\pm 5\text{mm})$, $y = 0,441 \text{ N}$ valores obtenidos de la Tabla 4, en la simulación se obtiene el valor del momento torsor de $0,180 \text{ Nm}$ lo que es igual a $\cup T_{FR(\text{Simulado})} = 180 \text{ Nmm}$, en los cálculos matemáticos realizados de la ecuación 10, el momento torsor es $\cup T_{FR(\text{Calculado})} = 179,4 \text{ mm}$, los cuales son valores muy próximos, y con lo cual se validan los resultados obtenidos.

También fue realizada la simulación para $x = 22,060 \text{ mm} (\pm 5\text{mm})$, $y = 4,361 \text{ N}$ obteniendo el valor de momento flector de $\cup T_{FR(\text{Simulado})} = 201,3 \text{ Nmm}$ siendo un valor muy cercano al obtenido de acuerdo a la ecuación 10, que es de $\cup T_{FR(\text{Calculado})} = 199,7 \text{ Nmm}$.

En la figura 15 se puede observar la simulación de las fuerzas que se tiene en el eje de declinación siendo la torsión máxima de $0,18 \text{ Nm}$. Este valor se procederá a tener en cuenta al momento de realizar la sujeción en la montura ecuatorial.

Figura 15

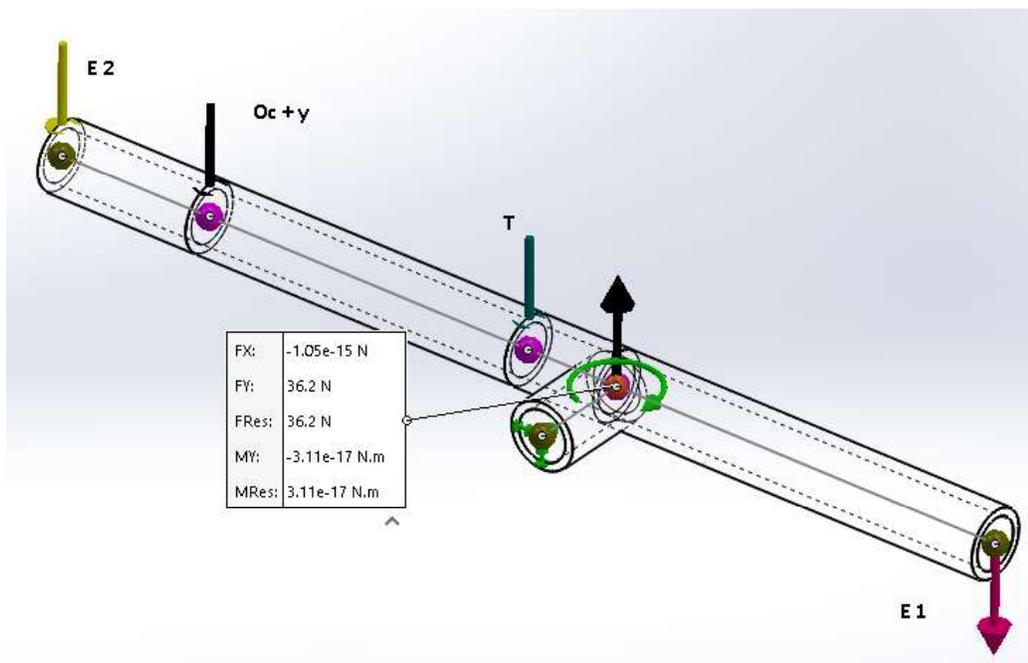
Análisis del momento de torsión resultante y el uso de simulador en el eje de declinación



En la Figura 16, se observa que mediante simulación se obtuvo la reacción FR, la cual es de $FR = 36,2 \text{ N}$ producto de la aplicación de las fuerzas asociadas al telescopio, al hacer uso de la ecuación 11, se obtiene el momento flector que es de: $\sigma M_{FR(\text{Simulado})} = 1\,916,066 \text{ Nmm}$ el cuál es un valor muy cercano al establecido en la Tabla 4, que es de $\sigma M_{FR(\text{Calculado})} 1\,912,370 \text{ Nmm}$, con lo cual se validan los resultados obtenidos.

Figura 16

Análisis del momento flector resultante y el uso de simulador en el eje de declinación

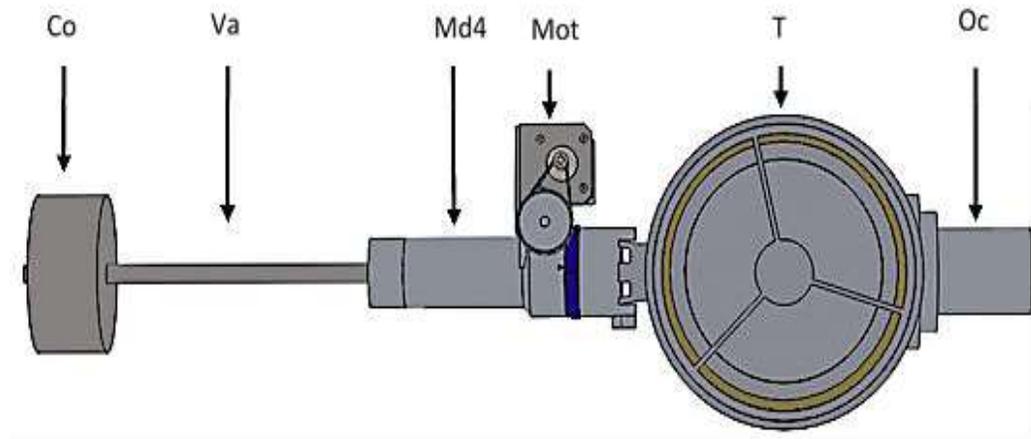


b) Eje de ascensión recta

La Figura 17 muestra la distribución de los elementos ópticos, electrónicos y mecánicos sobre el eje de declinación. El peso de estos componentes genera momentos de flexión y torsión sobre el eje de ascensión recta, siendo necesario determinar el centro de gravedad de todo el sistema, y establecer el punto de equilibrio rotacional para generar el menor esfuerzo en el eje de ascensión recta y por ende en el actuador.

Figura 17

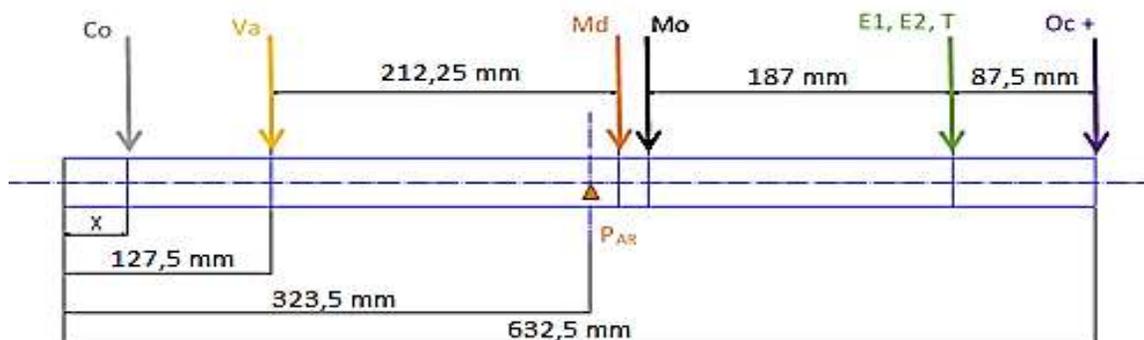
Distribución de los Elementos en el Eje de Declinación



Por otro lado, la Figura 18 presenta el diagrama de distribución de fuerzas que requiere determinar la posición "x" planteada en la ecuación (15) en dónde se ubicará el contrapeso; este punto del equilibrio rotacional variará según la inserción de diferentes equipos ópticos y adquisición de imágenes, ubicados en el ocular del telescopio, como el intercambiador de filtros, la cámara QHY o cámara réflex.

Figura 18

Diagrama de distribución de fuerzas sobre el eje de declinación



El punto de acople entre el eje de declinación y el de ascensión recta de la montura ecuatorial está representado por “P_{AR}”. Este punto de acople es fijo, el momento flector hacia la derecha de este punto debe ser igual al momento flector a la izquierda del mismo, esto será posible al variar la posición del contrapeso, es decir, encontrar el equilibrio rotacional necesario. La variable “y” representa las fuerzas adicionales al ocular que serán incluidas durante las observaciones astronómicas.

$$\begin{aligned}
 Co(323 - x) + Va(195,5) &= Md(16,75) + Mo(35) + (E1 + E2 + T)(222) + \\
 &+ (Oc + y)(309,5) \\
 +27,93(323 - x) + 2,058(195,5) &= 9,31(16,75) + 3,92(35) + 32,34(222) + (3,185 + y)(309,5) \\
 -x &= \frac{9,31(16,75) + 3,92(35) + 32,34(222) + (3,185 + y)(309,5) - 2,058(195,5)}{27,93} - 323
 \end{aligned}$$

$$x = - \left(\frac{7\,070,3 + (3,185 + y)(309,5)}{27,93} - 323 \right) \quad (15).$$

De la misma manera que en el caso anterior, se considerará un error de posición del contrapeso entre ± 5 mm, por lo tanto, el momento de torsión esta expresada en la ecuación (16), misma que es un desglose de la simplificación de la expresión anterior a la ecuación (16):

$$\begin{aligned}
 \cup T_{P_{AR}} &= Co(323 - x) + Va(195,5) - Md(16,75) - Mo(35) - (E1 + E2 + T)(222) - (Oc \\
 &+ y)(309,5)
 \end{aligned}$$

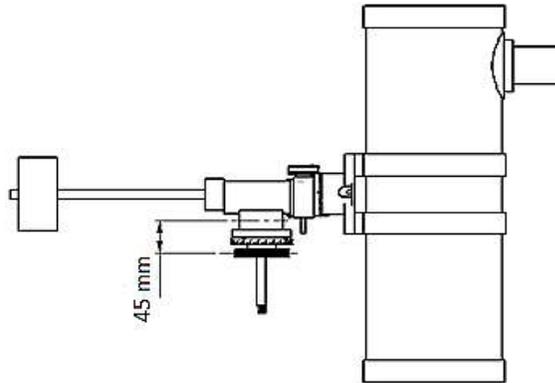
$$\cup T_{P_{AR}} = 27,93(323 - x) - 7\,070,451 - (3,185 + y)(309,5) \quad (16).$$

En la figura 19 se aprecia la vista lateral de los componentes del eje de ascensión recta, en el que se señala la distancia que existe entre el engranaje de transmisión y el telescopio, en este

también se observa las principales fuerzas de acción aplicadas, el contra peso y el tubo del telescopio junto a sus elementos ópticos.

Figura 19

Distancia de separación entre el engranaje de transmisión y el peso del telescopio



La Figura 19 determina la distancia de separación entre el engranaje de transmisión del eje de ascensión recta y el punto de acople con el eje de declinación.

Por tanto, el momento flector está representado en la ecuación (17).

$$\sigma M_{FR} = (y + 78,743)(45) \quad (17).$$

Para determinar el valor de la inercia rotacional, se hace uso de la ecuación (13) y se tiene la siguiente expresión para obtener la ecuación (18):

$$I = Co(323 - x)^2 + Va(195,5)^2 - Md(16,75)^2 - Mo(35)^2 - (E1 + E2 + T)(222)^2 - (Oc + y)(309,5)^2$$

$$I = 2,85(323 - x)^2 + 0,21(195,5)^2 - 0,95(16,75)^2 - 0,4(35)^2 - (1,2 + 0,325 + 1,775)(222)^2 - \frac{(3,185 + y)}{9,8}(309,5)^2$$

$$I = 2,85(323 - x)^2 - 155367,5 - \frac{(3,185 + y)}{9,8}(309,5)^2 \quad (18).$$

Tabla 5

Valores de momento flector, torsor e inercia para el eje de ascensión recta

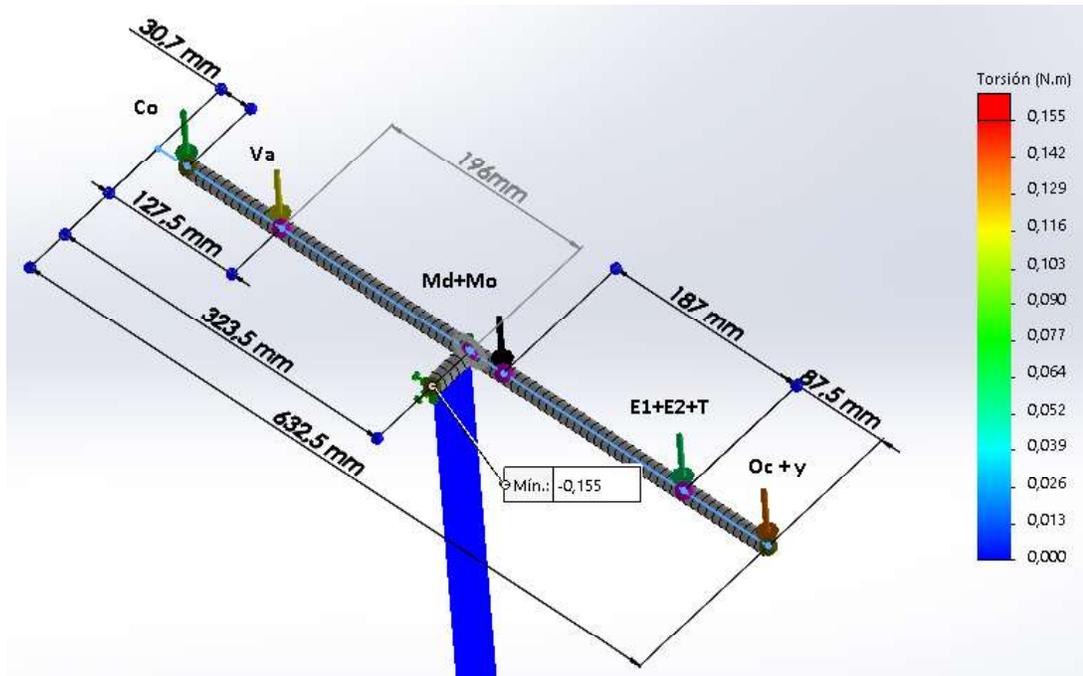
Elementos adicionales en el ocular	Peso adicional ocular "y"	Centro de gravedad "x"	Momento Flector	Momento de torsión ± 5mm	Torque Max (N mm)	Inercia Rotacional (Kg m²)
Cámara QHY 5	0,441	29,700	3 563,280	140,500	3 566,040	0,164
Intercambiador de filtros y Cámara QHY 5	4,361	-13,760	3 739,680	139,650	3 742,300	0,052
Cámara Réflex	7,497	-48,510	3 880,800	139,900	3 883,320	0,045
Intercambiador de filtros y Cámara Réflex	11,417	-91,000	4 057,200	139,200	4 059,600	0,138

En la Tabla 5, se especifican los valores calculados de acuerdo a las ecuaciones: 16, 17 y 18 de diferentes equipos de adquisición de imagen ubicados sobre el telescopio.

En la Figura 20, se observa la simulación de la distribución de fuerzas que actúan sobre el telescopio, para $x = 29,7 \text{ mm}$, $y = 0,441 \text{ N}$ valores obtenido de la Tabla 5, en la simulación se obtiene el valor del momento torsor de $0,155 \text{ Nm}$ lo que es igual a $\cup T_{FR(\text{Simulado})} = 155 \text{ Nmm}$, en los cálculos matemáticos realizados de la ecuación 16, el momento torsor es $\cup T_{FR(\text{Calculado})} = 140,5 \text{ Nmm}$, aquí se observa una ligera diferencia de valores, provocados por el proceso de mallado en la simulación, ya que generaba inconvenientes al ubicar las fuerzas Md y Mo, por separado, es así que se prefirió unificar esas fuerzas, por lo cercanas que están entre sí, y de esta manera poder realizar la simulación.

Figura 20

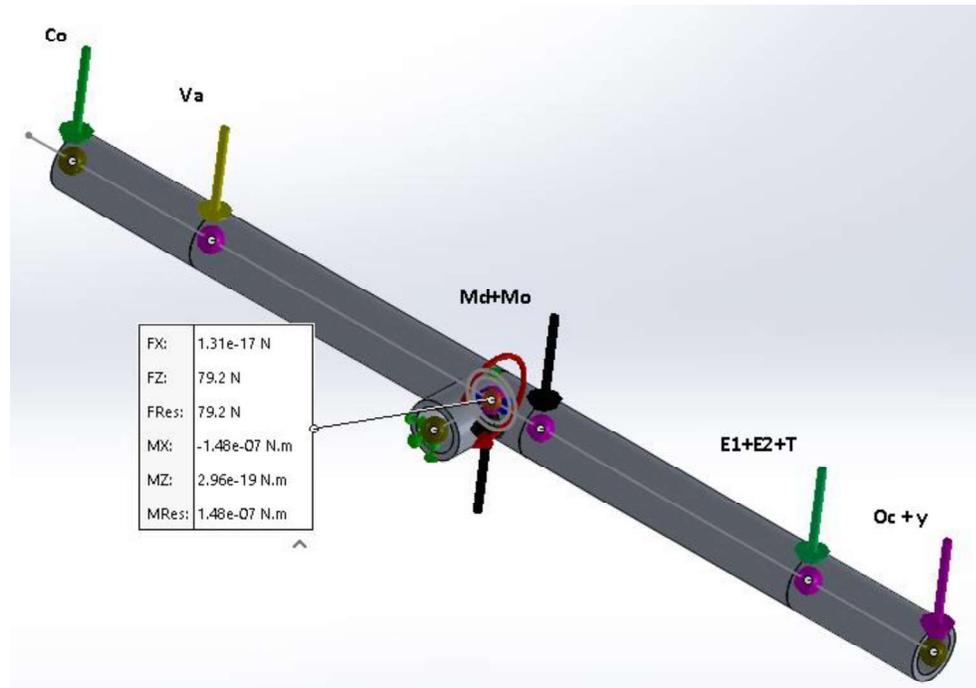
Análisis del momento de torsión resultante y el uso de simulador en el eje de ascensión recta



En la Figura 21, se observa que mediante simulación se obtuvo la reacción P_{AR} , la cual es de $P_{AR} = 79,2 \text{ N}$ producto de la aplicación de las fuerzas asociadas al telescopio sobre el eje de declinación, al hacer uso de la ecuación 17, se obtiene el momento flector que es de: $\cup M_{FR(\text{Simulado})} = 3\,564 \text{ Nmm}$ el cuál es un valor muy cercano al establecido en la Tabla 4, que es de $\cup M_{FR(\text{Calculado})} = 3\,563,28 \text{ Nmm}$, con lo cual se validan los resultados obtenidos, para el caso del momento flector.

Figura 21

Análisis del momento flector resultante mediante el uso de simulador en el eje de ascensión recta



3.2.4.2 Selección de actuadores.

La selección de actuadores está basada en el torque necesario requerido para vencer el momento de inercia, para cada eje de rotación de la montura ecuatorial, según la Tabla 4 se observan los valores de torque para el movimiento del eje de declinación. Estos valores están comprendidos entre 1 912,37 – 2 495,95 *Newton milimetro (Nmm)*; en el caso del eje de ascensión recta los valores de torque están comprendidos entre 3 566,04 – 4 059,6 *Nmm* cómo se observa en la Tabla 5.

a) Eje de declinación

En la ecuación (19) se expresa que para determinar el torque requerido se considera que la relación entre el torque final y el torque inicial es directamente proporcional a la relación entre el número de dientes de la polea conducida y la conductora. Específicamente, en la ecuación (20) se presenta la obtención del torque mínimo y en la ecuación (21) el torque máximo como se representa a continuación:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{N_2}{N_1} \therefore T_1 = \frac{T_2 N_1}{N_2} \quad (19).$$

Y el torque mínimo requerido es:

$$T_1 = \frac{3\,566,04 * 12}{60} = 713,21 \text{ Nmm} \quad (20).$$

El torque máximo requerido es:

$$T_1 = \frac{4\,059,6 * 12}{60} = 812,9 \text{ Nmm} \quad (21).$$

b) Eje de ascensión recta

Al igual que en la ecuación (19); la ecuación (22) muestra el cálculo para obtener el valor del torque mínimo y en la ecuación (23) el torque máximo como se presenta a continuación:

El torque mínimo requerido es:

$$T_1 = \frac{1\,912,37 * 20}{60} = 637,46 \text{ Nmm} \quad (22).$$

El torque máximo requerido es:

$$T_1 = \frac{2\,495,95 * 20}{60} = 831,98 \text{ Nmm} \quad (23).$$

Para el presente trabajo se usa solamente la cámara QHY 5, misma que permitirá la observación del cuerpo celeste y la concerniente adquisición de imágenes, para posteriormente ser tratada digitalmente. Entonces, se requiere un motor nema 17 con un torque mayor a 713,21 Nmm y mayor a 637,46 Nmm en el eje de declinación y en eje de ascensión recta respectivamente.

De acuerdo a MotionKing (2020) el motor nema 17 que se aproxima al torque calculado en las ecuaciones 20 y 22 es el modelo 17HS9425, el cual tiene un torque de 760 Nmm, valor superior en un 7% al torque requerido. Este motor se utilizará en los dos ejes de la montura ecuatorial, la relación de transmisión y movimiento serán de acuerdo a los cálculos realizados anteriormente.

En la Tabla 6, se observa el motor nema seleccionado para el movimiento automático de los ejes de rotación de la montura ecuatorial y sus características técnicas.

Tabla 6

Características Técnicas para el Modelo de Motor Nema

Modelo	Paso	Torque	Inercia	Corriente	Precio
	(deg)	(N.mm)	(g.cm²)	(Amperios)	(Dólar)
17HS9425	1,80	760,00	75,00	2,50	40,00

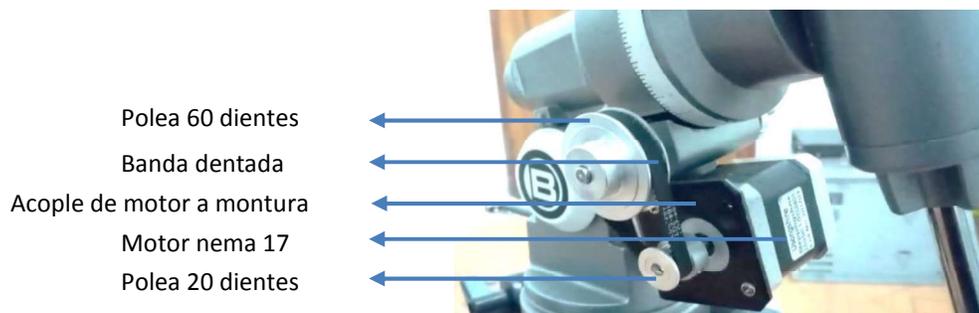
Nota: La tabla muestra las características técnicas para un motor nema. Tomado de MotionKing the power motion your future. por (MotionKing, 2020)

3.3 Integración del sistema mecánico de posicionamiento.

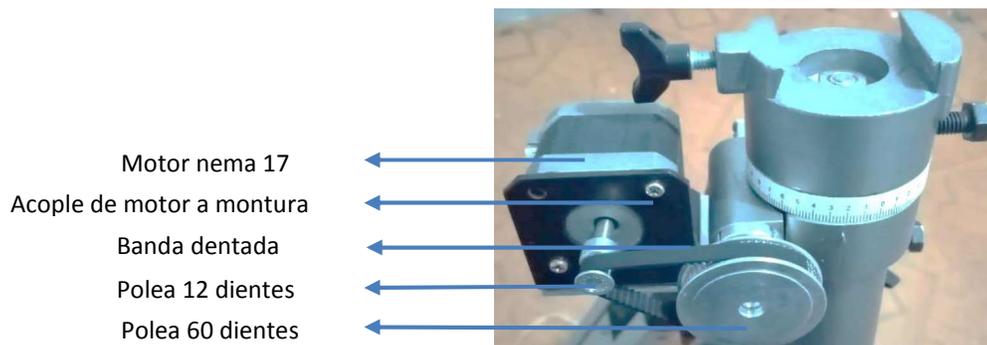
Una vez adquiridos los actuadores, poleas, bandas serán instalados en cada eje, en la Figura 22a Representa el montaje que se obtuvo para el eje de ascensión recta mientras que la figura 22b muestra el montaje para el eje de declinación.

Figura 22

Montaje de los Equipos Mecánicos en los Ejes de la Montura Ecuatorial



a) Montaje en el eje de ascensión recta



b) Montaje en el eje de declinación

Al realizar pruebas de movimiento, se identificó que el apriete entre el eje del engrane, y de la montura, generaba un esfuerzo adicional hacia los motores muy significativo. Si el apriete no era el suficiente, la tuerca tendía a aflojarse y, por tanto, no había transmisión de movimiento de

los motores a los engranes. Por tanto, fue necesario ubicar doble tuerca para que permita una correcta sujeción y a la vez un esfuerzo mínimo por apriete.

Además, se generó el movimiento automático de los motores en ángulos comprendidos entre 0° y 180° ; en donde fue ubicado el telescopio sobre la montura y el equipo de adquisición de imágenes QHY y se evidencio que el movimiento rotacional era continuo, estable y robusto.

CAPÍTULO IV

4 Selección de componentes e implementación del sistema de control y posicionamiento.

En el presente capítulo se realizará la selección de los componentes eléctricos de control, sensores y actuadores; necesarios para la automatización del sistema de posicionamiento. En esta selección, se considera criterios determinantes que puedan influir en la eficiente gestión técnica y aumento del rendimiento de procesos. Estos criterios de selección permiten generar una eficiencia energética eléctrica, buscando una optimización técnica y económica. Es decir, reducción de costes técnicos y económicos, algunos criterios de selección son: el peso (estrictamente relacionado al esfuerzo mecánico de los motores), la corriente de consumo mínimo (considerando que las observaciones astronómicas sean en sectores alejados de fuentes eléctricas convencionales, y en algunos casos, es necesario el uso de baterías), el costo y accesibilidad de los elementos electrónicos para poder ser reemplazados fácilmente si es requerido.

4.1 Método de selección de componentes.

Los criterios y metodologías de selección de componentes deben estar orientados a obtener los elementos electrónicos óptimos y eficientes que deben ser usados en el presente trabajo. Respecto a la metodología Baca (2010) propone el método cualitativo por puntos, mismo que consiste en efectuar la asignación de factores cuantitativos a diferentes series de factores que sean relevantes e imprescindibles para la selección, obteniendo una comparación cuantitativa de componentes, considerando los equipos que se requieren en este trabajo y la ponderación de los factores de acuerdo a los criterios del investigador son los siguientes:

- Desarrollar una lista de factores relevantes.

- Asignar un peso a cada factor para indicar su importancia relativa (los pesos deben sumar uno), y el peso asignado dependerá exclusivamente del criterio del investigador.
- Asignar una escala común a cada factor (por ejemplo: 0 - 10) y elegir cualquier mínimo.
- Calificar a cada sitio potencial de acuerdo con la escala designada y multiplicar la calificación por el peso.
- Sumar la puntuación de cada sitio y elegir el de máxima puntuación.

La ventaja del método está en la facilidad y rapidez de realizarlo, mientras que su desventaja está en que el peso asignado y la calificación otorgada a cada factor relevante dependen de las preferencias del investigador.

4.2 Selección de sensor y controlador.

Para la selección del controlador es necesario realizar previamente la selección del sensor y de los drivers o controladores para los motores nema, en base a la necesidad de análisis de la corriente que requieren estos elementos, y la disposición de la misma en el controlador.

4.2.1 Selección de sensor de posición.

En la sección 1.4.2 se estableció la existencia de dos tipos de sensores de posición factibles a utilizar para el presente trabajo. En primer lugar, el motor con encoder EM 1H3H-04D que guarda relación en torque al que fue descrito en la Tabla 6, este sensor cuenta con su propio motor integrado. Por otro lado, el sensor MPU 9250 que es un integrado, mismo que contiene tres tipos de sensores: acelerómetro, giroscopio y magnetómetro, este último es importancia para el proceso de alineación como lo fue señalado por López (2017). En este contexto, la Tabla 7 detalla las características principales de estos sensores para su funcionamiento, mismas que serán útiles para su selección mediante el método cualitativo por puntos.

Tabla 7*Características Técnicas para la Selección del Sensor de Posición*

Características	Motor con encoder EM 1H3H-04D	Sensor MEMS MPU 9250
Tipo de sensor	Posición	Posición (Giroscopio y magnetómetro)
Voltaje (V)	5	3,30
Corriente (mA)	2 000	3,93
Masa (Kg)	0,50	0,01
Ejes de control	1	3
Precio dólares	60	15
Resolución	400 ciclos / rev	$\pm 4800 \mu T$

Nota: La tabla muestra las características técnicas para la selección del sensor. Tomado de RTA Motion Control Systems. (RTA, Iberica, 2018), InvenSense. (InvenSense, 2014)

Ya analizadas las alternativas de la Tabla 7, se procede a evaluar a cada una de ellas y poder establecer la selección adecuada del sensor de posición como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8*Selección del Sensor de Posicionamiento*

Criterios	Alternativas					
	Peso	Motor con encoder			Sensor MEMS	
		Eva	%	EM 1H3H-04D	Eva	MPU 9250
Tipo de sensor	20 %	5	1	5	1	
Voltaje	5 %	4	0,20	4	0,80	
Corriente	20%	3	0,60	4	2,40	

Alternativas					
Criterios	Peso	Motor con encoder		Sensor MEMS	
		Eva	%	Eva	%
		EM 1H3H-04D		MPU 9250	
Masa	15%	2	0,30	4	1,20
Ejes de control	15%	1	0,15	5	0,75
Precio	10%	3	0,30	5	1,50
Resolución	15%	4	0,60	5	3
Total	100%		3,15		8,55
Lugar			2		1
Seleccionar			NO		SI

Nota: Los valores obtenidos para cada criterio respecto al peso y la evacuación son criterios de los diseñadores y puede ser sujeto a cambios para futuras investigaciones

En base al contenido de la Tabla 8, se evidencia que el sensor de posición más adecuado es el MEMS MPU 9250, cuya principal característica es controlar al mismo tiempo los dos ejes de inclinación de la montura ecuatorial, y con esto evitar problemas de inestabilidad y de nivelación con el piso en donde se va a ubicar el trípode. Además, una ventaja añadida es que el sensor cuenta con una brújula digital (magnetómetro) que permite direccionar con exactitud al eje de ascensión recta hacia el polo norte magnético, beneficiando el seguimiento del objeto celeste y la optimización de energía.

4.2.2 Selección de drivers de control para motor nema.

Un driver o controlador para motores es un circuito integrado que controla los motores de corriente continua, estos manejan voltajes y corrientes a los que se está alimentando al motor,

para controlar la velocidad de giro. Además, sirve como método de protección para evitar que la electrónica de los motores pueda resultar dañada, limitando la corriente que circula.

La Tabla 9, plantea cinco características de importancia para la selección del driver, aunque de acuerdo con la Tabla 6 se habría determinado la corriente de 2,5 amperios (A) que consumirá el motor nema que previamente fue seleccionado. Por tanto, se descarta el driver A4988, porque tiene una corriente limitada hasta 2 A. Por otro lado, en lo referente a los drivers DRV 8855 Y TB6600, se observa una gran diferencia en el precio, y también se considera que el uso del driver TB6600, tiene mayor aplicación para motores nema de alta potencia; esto hace discernir que el mejor driver para el presente trabajo es el DRV 8855, porque cumple con las especificaciones técnicas para el correcto funcionamiento del motor nema 17, y por su bajo costo de adquisición.

Tabla 9

Características Técnicas de los Driver para Motor Nema 17

Características	A4988	DRV8855	TB6600
Corriente de consumo (mA)	0,20	0,30	15
Voltaje Referencia (V)	3,30	3,30	9
Corriente salida motor (A)	2	2,50	4
Microsteps	16	32	32
Precio (Dólares)	1	1,50	28

Nota: La tabla muestra las características técnicas para la selección del motor. Tomado de MCI Electrónicos. TB6600 por (Sorotec, 2018), (Allegro MicroSystems, 2014), y Texas Instruments. (TexasInstruments, 2016)

4.3 Selección de controlador.

Para la selección del controlador es necesario detallar algunas características que debe tener; esto de acuerdo al sensor y del driver seleccionados anteriormente, como se señala en la

Tabla 10

Características Requeridas para la Selección del Controlador

Características requeridas	MPU 9250	DRV8855
Cantidad	1	2
Corriente (mA)	3,93	0,30
Voltaje (V)	3,30	3,30
Puertos digitales	-	4
Comunicación	I2C	Serial

Nota: La tabla muestra las características técnicas para la selección del controlador. Tomado de AllDatasheet. (Instrument, 2011), InvenSense. (InvenSense, 2014)

Además, para la selección del controlador se ha considerado dispositivos que sean de fácil acceso y de disponibilidad en el mercado local, en la Tabla 11 se detallan las características técnicas de algunos controladores para su selección.

Tabla 11

Características Técnicas para Selección de Controlador

Características	Arduino nano	ESP32	ATTiny85
Corriente fuente de alimentación (mA)	500	500	80
Voltaje de fuente de alimentación (V)	3,30	3,60	5

Características	Arduino nano	ESP32	ATtiny85
Comunicación serial	Si	Si	si
Comunicación I2C	Si	Si	Si
Puertos digitales	14	16	8
Corriente de consumo (mA)	19	25	20
Voltaje de alimentación (V)	7	5,50	5,50
Entorno de desarrollo	IDE Arduino	IDE Arduino	IDE Arduino
Costo (Dólares)	8	14	3,50

Nota: La tabla muestra la comparación de distintos controladores. Tomado de Farnell an avnet company. (Farnell, 2015), ESP32 series datasheet. Shangai: Espressif system. (ESPRESSIF, 2020), ATtiny25/45/85 [DATASHEET] . San José: Atmel corporation. (Atmel, 2017)

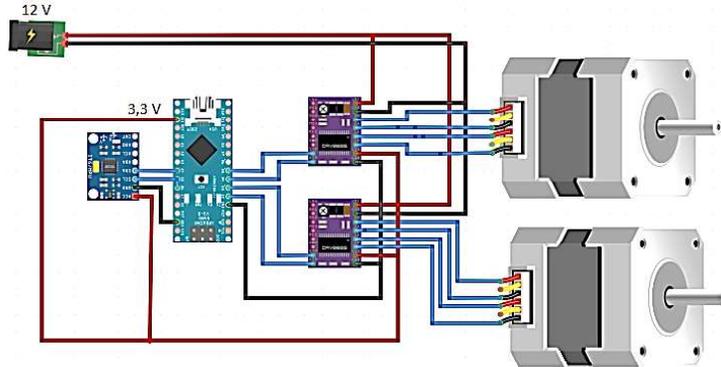
En la Tabla 11, se evidencia que los tres controladores cuentan con las características requeridas según la Tabla 10. Por tanto, cualquiera de estos dispositivos puede ser usados para el presente trabajo, la diferencia radica en el precio, siendo el controlador Attiny85 el más económico, y probablemente el más conveniente a utilizar y evitar sobredimensionar recursos. Aunque, por la disponibilidad se utilizará el controlador Arduino.

4.4 Diagrama de conexión y de control eléctrico.

A continuación, se presenta los diagramas de conexión de sensores y actuadores a ser aplicados en el presente trabajo. En la Figura 23 se observa el esquema de conexión de los drivers de control para los motores, el sensor y lectura de datos para el posicionamiento del telescopio.

Figura 23

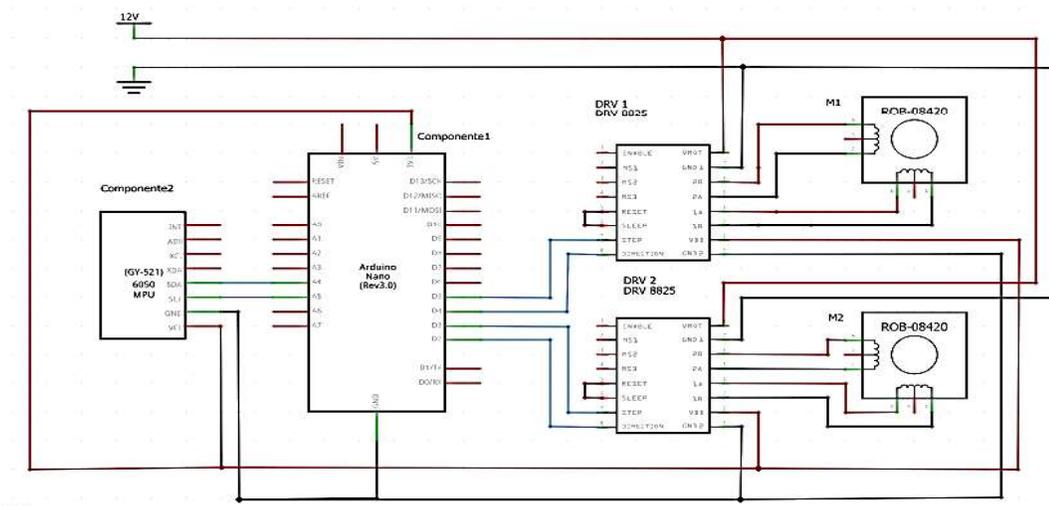
Diagrama de conexión de sensores y actuadores



El diagrama de control eléctrico de la Figura 24, en el cual se observa que se requiere de dos fuentes de voltaje una de 3,3 voltios (V) para alimentación del sensor MPU 9250, los drivers de alimentación DRV 8850 y una fuente de mayor potencia (mínimo 5A) que permita la alimentación y correcto funcionamiento de los motores nema 17HS9425 en simultaneo, según los requerimientos establecidos como se observa en la Tabla 6.

Figura 24

Diagrama de control eléctrico



Cabe mencionar que, la corriente máxima que puede entregar el Arduino desde el pin de 3,3V es de 50mA (Arduino, 2012), la corriente de funcionamiento máximo para los drivers es de 8mA y para el magnetómetro y giroscopio del sensor es 3,48 mA en total, por lo tanto, la corriente consumida por los elementos es de 19,48mA.

4.5 Selección de la unidad de procesamiento.

Existen varios tipos de mini ordenadores para el procesamiento de información, entre los más destacados por sus prestaciones, se encuentran los presentados en la Tabla 12.

Tabla 12

Características técnicas para la unidad de procesamiento

Características	Raspberry Pi3 B+	RockPi 4	NanoPi M4	Udo X86 Ultra
Alimentación	5V	9V-20V	5V	12V
Corriente	2A	2A	3A	3A
Procesador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit	ARM hexa-core, RK3399 Dual Cortex-A72 64 bits	Rockchip RK3399 hexa- core dual Cortex A-72	CPU Intel Pentium N3710 4 núcleos 64 bits
Frecuencia de Reloj	1,4 GHz	1,8 GHz	2 GHz	2,56 GHz
Memoria	1 GB	1GB-2GB	2 GB	8 GB
Puertos	GPIO 40 pines	GPIO 40 pines	GPIO 64 pines	GPIO 35 pines
Costo	\$65	\$109	\$98	\$267

Nota: La tabla muestra las características técnicas para la unidad de procesamiento. Tomado de RaspberryPi por RaspberruPi, s.f., ROCKPI por ROCKPI, s.f., FRIENDIELEC por FRIENDIELEC, s.f., UDOO Shop, por UDOO, s.f.

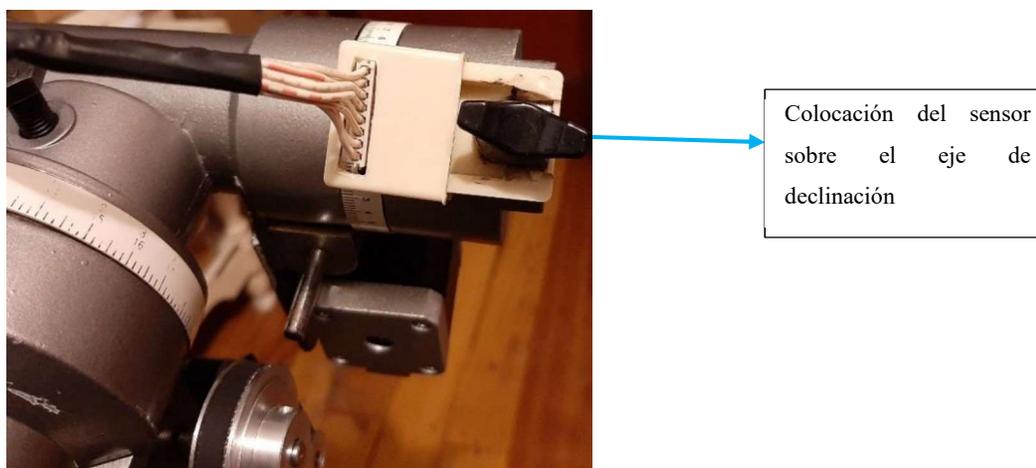
En la Tabla 12, se puede apreciar que casi todas las unidades de procesamiento prestan similares características, sin embargo, la mejor opción para abaratar costos y por disponibilidad es la Raspberry pi 3B+. Así mismo al seleccionar esta unidad de procesamiento a la vez se está eligiendo el lenguaje de programación Python y su biblioteca para visión artificial OpenCV.

4.6 Implementación del sistema de control.

En base a los datos técnicos de cada uno de los componentes electrónicos, se procede a conectar el sensor MPU como se observa en la Figura 25; donde, el eje “Y” del sensor permitirá conocer el valor de las coordenadas del eje de ascensión recta de la montura, igualmente, el eje “X” del sensor permitirá conocer el valor de las coordenadas del eje de declinación.

Figura 25

Conexión del sensor MPU 9256 en el telescopio

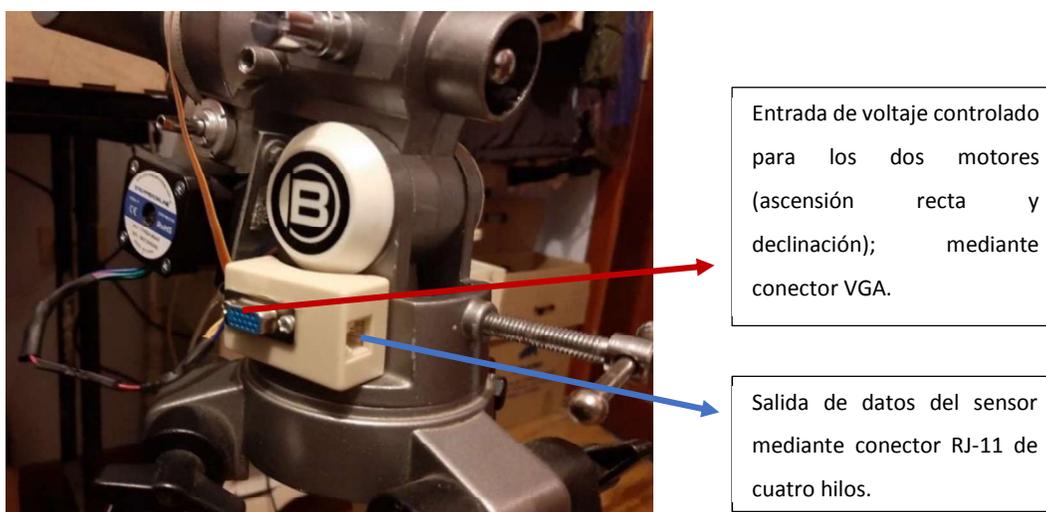


Nota: El sensor está aislado del metal de la montura puesto que el magnetómetro es muy sensible y se puede llegar a obtener mediciones erróneas

Para la entrada de voltajes de los motores nema, se ocupó un conector VGA como se observa en la Figura 26; empleando los pines 1,2,4 y 5 para el control del eje de declinación y los pines 11,12,14 y 15 para el control del eje de ascensión recta. Además, la utilización del conector de 4 hilos RJ-11 para la salida de datos del sensor.

Figura 26

Conector VGA para control de motores y RJ-11 para salida del sensor

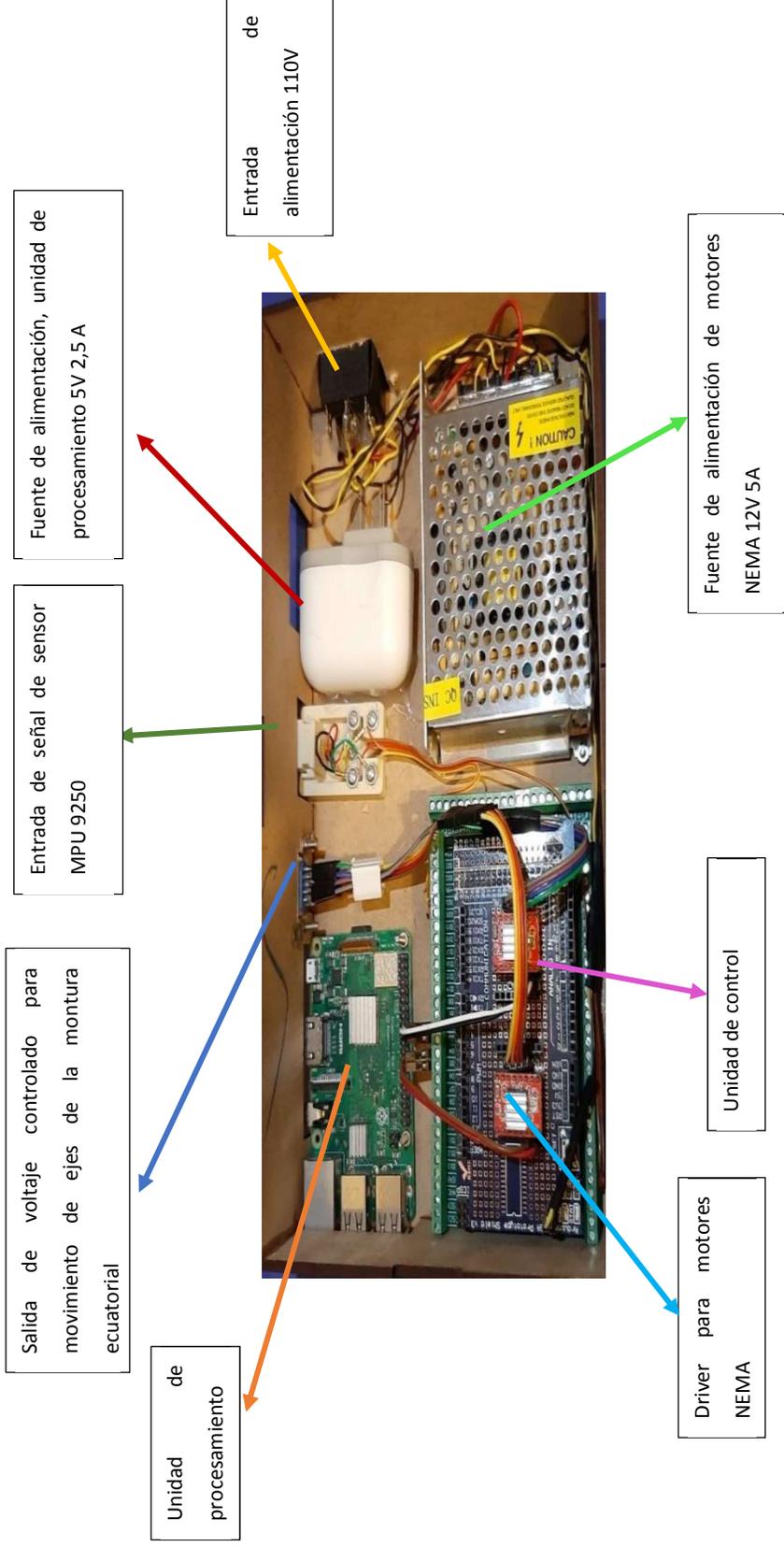


Nota: Se ocupó el conector RJ-11 de cuatro hilos y el conector VGA por la facilidad que estos dan al momento de conectar y desconectar los cables.

La disposición de los elementos electrónicos se observa en la Figura 27, mismos que constan de: unidad de procesamiento, salida de voltaje para el control de los motores, entrada de señal del sensor MPU9250, fuente de alimentación para la unidad de procesamiento de 5V 2A, y fuente de alimentación para los motores NEMA de 12V 5A; En esta figura también se muestra la disposición de los elementos electrónicos los mismos que se encuentran separados la parte de control a la izquierda y la etapa de potencia a la derecha.

Figura 27

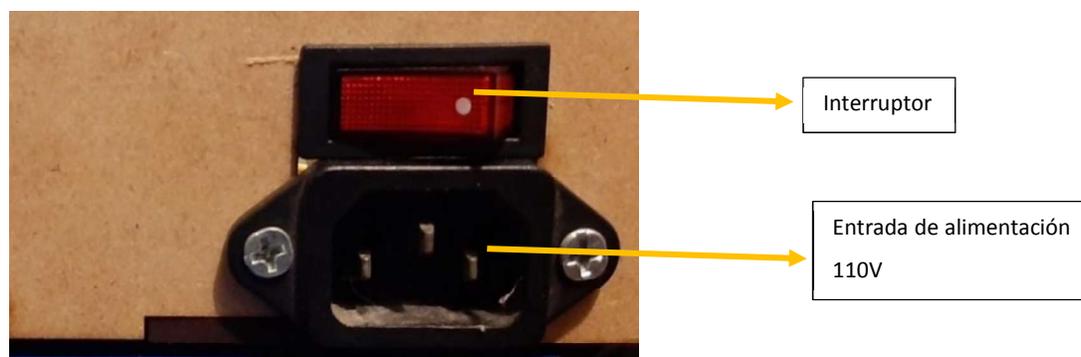
Disposición de elementos electrónicos



En la Figura 28, se observa la entrada de alimentación de 110V, misma que va conectada a un selector para su encendido y apagado.

Figura 28

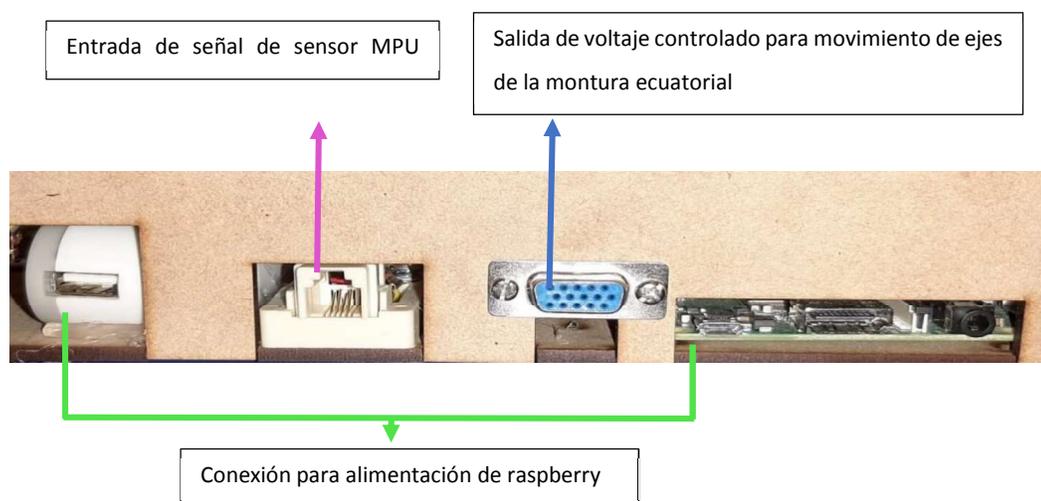
Entrada de alimentación de 110V con interruptor de funcionamiento



En la Figura 29 se observa la disposición del conector para la entrada de datos del MPU9259 y la salida del voltaje controlado para la activación de los actuadores mediante una terminal VGA, en esta también se identifica la conexión para la alimentación de la unidad de procesamiento raspberry.

Figura 29

Conexión entre unidad de procesamiento y unidad de control



CAPÍTULO V

5 Diseño de algoritmos de programación para el sistema de posición, seguimiento y de visión artificial.

En el presente capítulo, se desarrollan los algoritmos de programación necesarios para el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos, y su operación mediante la unidad de procesamiento. Estos elementos fueron analizados y seleccionados en el Capítulo III. En el caso de la programación para el posicionamiento de cuerpos celestes, es necesario que la orientación polar del telescopio sea lo más precisa posible; siendo el paso previo al posicionamiento de objetos, esta orientación es posible realizarla de manera manual, manteniendo la precisión y la reducción en el consumo de energía. Para verificar la correcta orientación polar, se consideran los datos proporcionados por el sensor MPU9250 y los generados por institutos de medición de campos magnéticos como es el caso de NOAA (National oceanic and atmospheric administration), de acuerdo a las coordenadas de latitud y longitud del lugar en que se realizará la observación astronómica. Adicionalmente, se debe realizar el análisis de los algoritmos necesarios para el reconocimiento y centrado de cuerpos celestes; y con ello el seguimiento de manera continua, permitiendo obtener imágenes con mejores detalles para el posterior análisis espectral.

5.1 Selección del equipo de visión para la adquisición de imágenes.

Para el caso de la selección del equipo de adquisición de imágenes es necesario considerar algunos aspectos importantes que son presentados a continuación:

- Tipo de observación: El telescopio astronómico tiene un diámetro de 150 mm, lo que hace óptimo para observaciones planetarias, pero no para observaciones del cielo profundo.

- Tipo de cámara: Para realizar un tratamiento de imagen con mejor detalle para el análisis espectral es necesario considerar la eficiencia cuántica, magnitud relacionada a la cantidad de fotones que puede recibir el sensor.
- Diámetro de la cámara: El ocular del telescopio es de 1,25" por lo tanto es la característica primordial para que la cámara se acople correctamente hacia el ocular del telescopio.
- Refrigeración: Al realizar observación planetaria no requiere de refrigeración ya que no se requiere tiempos de exposición extensos.
- Peso: El peso no debe exceder los 100 gramos, que es el permisible según los cálculos realizados para el momento flector y torsor.
- Tamaño de pixel: para la observación planetaria es preferible usar un tamaño de pixel pequeño.

De acuerdo a las características señaladas anteriormente se realizará la selección del equipo de adquisición de imagen comparando tres cámaras que son accesibles de adquirirlas, la selección debe estar orientada a obtener imágenes de calidad para su posterior análisis espectral, como se detallan en la Tabla 13:

Tabla 13

Características requeridas del equipo de visión para la adquisición de imágenes

Características requeridas	QHY 5L II Monocromática	QHY 5L II Color	ZWO ASI 183MC Pro
Sensor	Cmos MT9M034	Cmos MT9M034	Sony IMX183
Tamaño del sensor	4,8 x 3,6 mm	4,8 x 3,6 mm	13,2 x 8,8 mm
Tamaño del pixel	3,75 um	3,75 um	2,4 um

Características requeridas	QHY 5L II Monocromática	QHY 5L II Color	ZWO ASI 183MC Pro
Tamaño de la imagen	1280 x 960	1280 x 960	5496 x 3672
Resolución	1,2 Mpx	1,2 Mpx	20,18 Mpx
Campo de Observación	16,51 x 12,38	16,51 x 12,38	14 x 10,5
Eficiencia cuántica	74 %	azul 52%, verde 62%, rojo 58%.	84 %
Peso	51 g	51 g	410 g
Precio	\$170	\$140	\$890

Nota: La tabla muestra las características técnicas y comparación entre diferentes equipos de visión.

Tomado de: (ZWO, 2018), (QHY, 2018).

De acuerdo a la Tabla 13, se observa que el factor económico, mismo que es relevante al momento de seleccionar el equipo de visión artificial. Entonces, el equipo ZWO, aunque tiene unas características de resolución muy interesante, su costo es muy elevado; sin embargo, existe un factor primordial en la selección de este dispositivo como es la eficiencia cuántica, que se define como “la radiación espectral es la potencia por unidad de área y unidad de longitud de onda, en otras palabras, es la capacidad de un dispositivo para interactuar con los fotones” (Cardona Aristizábal, 2015). Esta característica se tiene presente en los tres dispositivos, siendo la cámara QHY 5L II monocromática con valor de eficiencia cuántica de 74% muy cercana a la presentada por la cámara ZWO, sin embargo, con un costo muy inferior. Por tanto, en el presente trabajo se aplicará la cámara QHY 5L II monocromática.

5.2 Diseño de Algoritmos de programación para el posicionamiento de cuerpos celestes.

Previo al posicionamiento de cuerpos celestes, resulta necesario alinear la montura ecuatorial como fue señalado en la sección 1.3.2. En primer lugar, se requiere orientar el eje de

ascensión recta hacia el polo norte magnético, utilizando el magnetómetro presente en el sensor MPU9250. Adicionalmente, como se mencionó en la introducción de este capítulo, la orientación de la montura ecuatorial puede ser realizada de manera manual, obteniendo una precisión considerable.

Una vez realizada la orientación de los ejes de la montura ecuatorial, es necesario direccionar el objetivo del telescopio hacia un cuerpo celeste de referencia (el más brillante del cielo) y mediante la ayuda de un simulador planetario obtener las coordenadas en ascensión recta y declinación, estas coordenadas se deberán ingresar como dato inicial en la consola de Python. Posteriormente, se podrá ingresar las coordenadas del nuevo astro, que se requiere posicionar en la montura y así realizar las observaciones; y una vez posicionada la montura ecuatorial, el seguimiento de los objetos es instantáneo, primando el movimiento del eje de ascensión recta.

Para el posicionamiento y control de los actuadores, es necesario realizar un análisis del error máximo al momento de orientar el ocular el telescopio hacia un determinado cuerpo celeste. Para esto es necesario analizar el campo de observación (campo visible que transmite un equipo de adquisición de imágenes FOV). Según la Tabla 14, se especificó que el campo de observación de la cámara es de 16,51 x 12,38 (diámetro angular de 0,116°); además, como referencia se considera que el ser humano tiene un campo de observación de 80 grados. Entonces, “El campo visual de un telescopio hace referencia al tamaño de cielo que se puede observar a través de él. Por ejemplo, si el campo visual es de 4 grados y la Luna Llena tiene medio grado de diámetro, nuestro campo visual será el equivalente al de 8 lunas llenas” (Rodríguez Bergali , 2019) y el campo visual de la cámara QHY se presenta en la Figura 30.

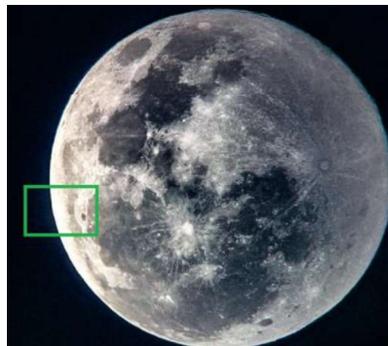
Figura 30

Campo visual de imágenes obtenidas por la cámara QHY y el software planetario.



a) Campo visual Júpiter y sus cuatro lunas cámara QHY 5L II

b) Campo visual Júpiter y sus lunas software planetario 0,117 °



c) Campo visual de la Luna 0,053° de su totalidad

d) Campo visual 0,5 ° de la Luna llena.

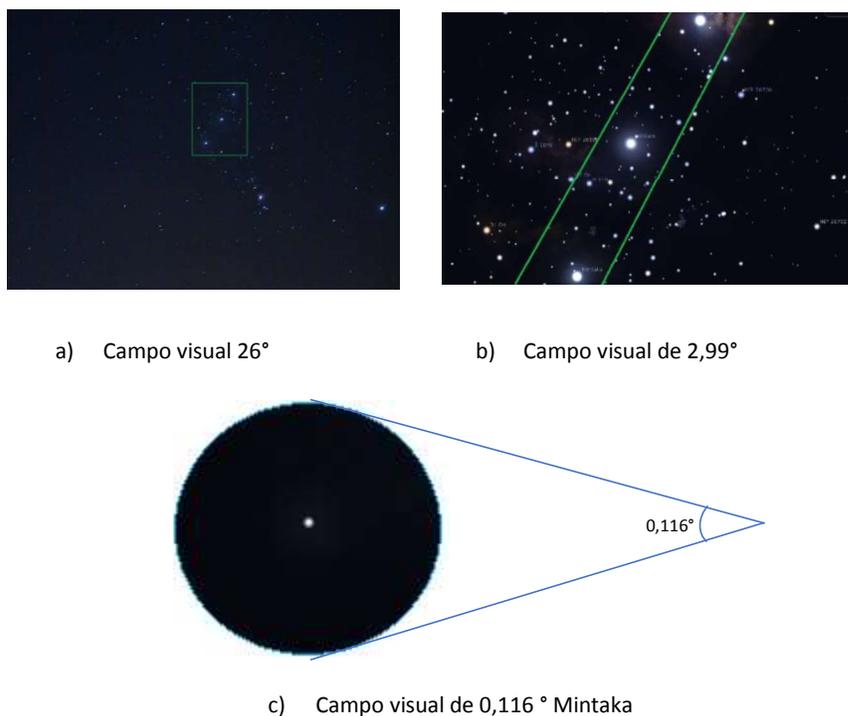
La Figura 30a y 30c representa imágenes obtenidas por la cámara QHY 5L II, en las cuales se identifica el campo visual que ofrece esta cámara; en la Figura 30b, se observa para el mismo campo visual de la Figura 30a, pero desde un software planetario; en la Figura 30d, se observa la luna llena y en esta un recuadro que hace referencia al campo visual presente en la Figura 30c.

Tomando en consideración el campo visual que presenta la cámara QHY 5L II, se puede realizar un estimado del máximo error posible, mismo que se puede generar en el posicionamiento del cuerpo celeste, y se efectuará con los astros más fáciles de detectar a simple

vista en el cielo, determinados por el Cinturón de Orión, el cual está formado por tres estrellas denominadas: Mintaka, Alnilam y Alnitak, la Figura 31a, y 31b tienen un campo visual de 26° y $2,53^\circ$ respectivamente, en ellas se observa las tres estrellas que conforman el cinturón de orión, de arriba hacia abajo Alnitak, Alnilab y Mintaka, esta última se observa con un campo visual de $0,116^\circ$ en la Figura 31c.

Figura 31

Cinturón de Orión para diferentes campos visuales.



Para el desarrollo del posicionamiento de cuerpo celeste, se tomará como estrella de referencia a Mintaka, a partir de esta se realizará el posicionamiento del ocular del telescopio hacia las otras estrellas que conforman el Cinturón de Orión. En la Tabla 14 se observan las coordenadas en ascensión recta y declinación que tienen las tres estrellas.

Tabla 14

Coordenadas de las estrellas del cinturón de orión.

Estrella	Ascensión Recta (PITCH)	Declinación (ROLL)
Alnitak	5h40m45,54s	-1°56'33,2''
Alnilab	5h36m12,82s	-1°12'6,9''
Mintaka,	5h32m0,41s	-0°17'56,7''

En Tabla 15 se presenta el valor teórico y real del diseño de transmisión realizado en la sección 2.2.1. (un paso del motor NEMA genera 15,042 arcseg, lo que representa 0,004178°).

Tabla 15

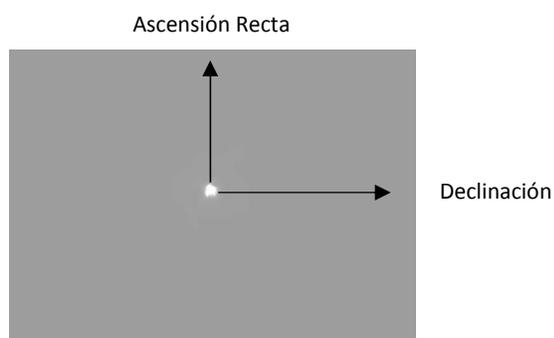
Desplazamiento angular producido por cada paso realizado por el motor NEMA 17.

Ejes	Teórico	Real
Ascensión Recta	0,004178°	0,004167°
Declinación	0,004178°	0,003833°

El eje de ascensión recta tiene un movimiento vertical y el eje de declinación un movimiento horizontal, en la imagen generada por la cámara QHY 5L II como se observada en la Figura 32. Por lo tanto, el movimiento por cada pixel de la imagen es de $1,73 \times 10^{-4}$ grados. En la Figura se observa la estrella doble Sirio con coordenadas Ascensión Recta (6h 45m 8,02s), y Declinación (-16° 42' 63'') y se encuentra a una distancia de 8,6 años luz.

Figura 32

Orientación de los ejes de coordenadas en la imagen generada por la cámara QHY 5L II



En la Tabla 16 se observa la distancia de separación entre las coordenadas de ascensión recta y declinación que existe entre cada una de las estrellas, esta separación es el ángulo al que deberán rotar los actuadores nema 17; el control de su posición será controlada por el valor generado del sensor MPU9250, aunque para el desarrollo de pruebas técnicas de posicionamiento se consideraran otros parámetros adicionales como los pasos que genera el actuador por cada pixel.

Tabla 16

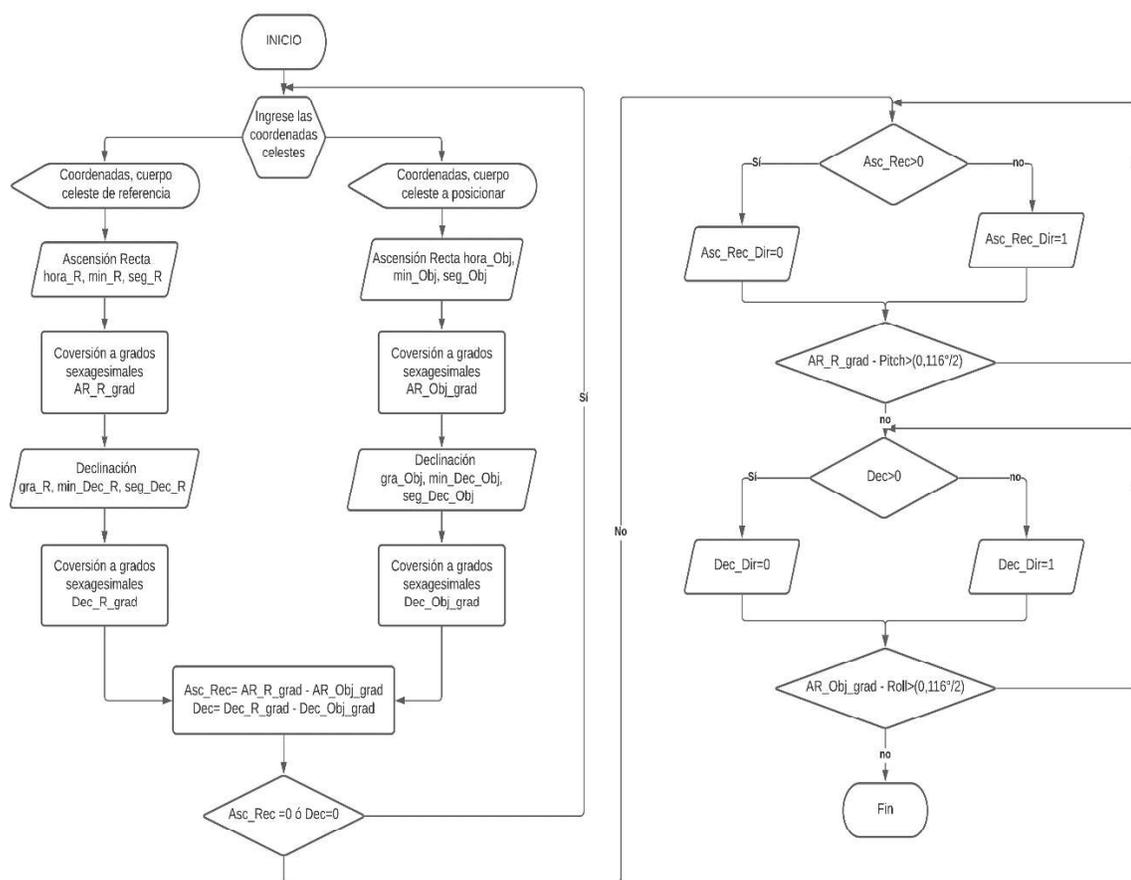
Distancia aparente entre estrellas en coordenadas de ascensión recta y declinación.

Estrellas	Ascensión Recta				Declinación			
	Coordenadas celestes	Grados	Pasos	Pixel	Coordenadas celestes	Grados	Pasos	Pixel
Alnitak-Alnilab	4 m 32,72s	1,136°	273	6566	0°44'26,3''	0,74°	178	4277
Alnitak-Mintaka	8 m 45,13 s	2,188°	525	12647	1°38'36,5''	1,64°	393	9479
Alnilab-Mintaka	4 m 12,41 s	1,052°	252	6080	0°54'10,2''	0,902°	216	5213

En base a lo anteriormente explicado se genera el diagrama de bloques que registrará el algoritmo para el posicionamiento de cuerpos celestes presente en la Figura 33, se debe considerar que las variables Pitch y Roll, representan la variación angular que genera el sensor MPU9250, el cual permitirá el control del desplazamiento angular de los actuadores, además de ello, se considera que el error máximo que puede existir en el posicionamiento del cuerpo celestes es igual al radio del campo visual presente en el ocular del telescopio,

Figura 33

Diagrama de bloques para posicionamiento de cuerpos celestes



5.3 Diseño de algoritmos de programación para el seguimiento de cuerpos celestes.

Para la implementación de reconocimiento y seguimiento de cuerpos celestes, se hace uso de las librerías: Numpy (tiene la mayor parte de funciones matemáticas que se ocupan para realizar la programación), Opencv (se ocupa para implementar visión artificial) y Time (librería de tiempo); para el proceso de adquisición de imágenes, se emplea la función cv2.VideoCapture que permite usar videos previamente grabados u obtener imágenes en tiempo real.

Para el seguimiento de objetos celestes, se emplea una herramienta de OpenCv para restar información innecesaria de dos imágenes secuenciales. Para ello, se emplea la función absdiff que permite encontrar la diferencia absoluta entre los pixeles de las dos matrices de imágenes, y para usar esta función es necesario que las imágenes se encuentren en escala de grises; el método matemático para pasar una imagen a escala de grises es el modelo YIQ o de luminosidad, que consiste en una decodificación de RGB (Red Green Blue) a escala de grises, formando una suma ponderada de los valores de $R(x, y)$; $G(x, y)$; $B(x, y)$, por lo tanto, el modelo empleado por la función rgb2gray es el mostrado en la ecuación (24) de software de procesamiento de imágenes como Matlab y opencv (OPENCV, 2019).

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (24).$$

Al tener en cuenta la componente “Y” de la imagen, se adquiere una nueva imagen en escala de grises, partiendo de una imagen RGB. Entonces, se obtiene la ecuación (25):

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (25).$$

Otra forma de obtener una imagen en escala de grises, es el método del promedio simple que consiste en promediar la suma de los canales RGB. Es un método más simple y que funciona bastante bien y se refiere a la ecuación (26):

$$Gris(x, y) = \frac{R(x, y) + G(x, y) + B(x, y)}{3} \quad (26).$$

En el proceso de convertir las imágenes a escala de grises, se realiza un preprocesamiento para reducir el ruido el cual se aplica un suavizado gaussiano con un Kernel de 3x3, además esto evita inferir en el análisis espectral, ya que, si el filtro es mayor, los valores obtenidos más adelante serán errados.

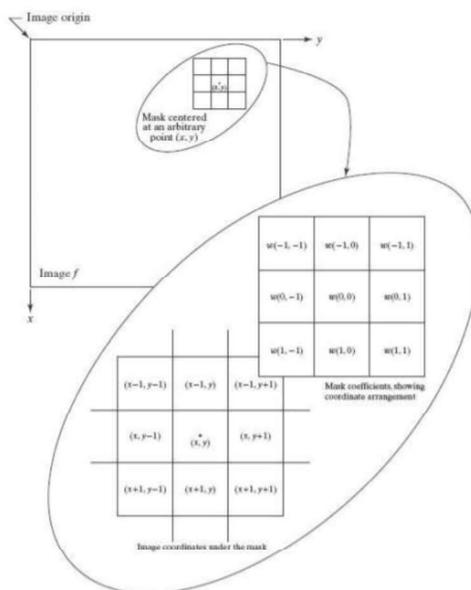
Un filtro en el dominio espacial, consiste en una operación predefinida que se aplica a los pixeles de la imagen, tomando en cuenta los pixeles vecinos. Existen varios filtros como los lineales o no lineales; dentro de los cuales se encuentran el mínimo, máximo, mediana, moda etc.

La Figura 34 ilustra el mecanismo de filtrado, utilizado a una vecindad de 3x3 en cualquier punto de (x, y) de la imagen. Por otro lado, la respuesta $g(x, y)$ del filtro es la suma de los coeficientes de filtro y los pixeles de la imagen como se muestra en la ecuación (27).

$$g(x, y) = w(-1,1)f(x - 1, y - 1) + w(-1,0)f(x - 1, y) + \dots + w(0,0)f(x, y) + \dots + w(1,1)f(x + 1, y + 1) \quad (27).$$

Figura 34

Mecánica de filtrado espacial con un Kernel de 3x3



Nota: La figura muestra el mecánico de filtrado para un kernel de 3x3. Tomado de: (Viera, 2017)

El centro del filtro $w(0,0)$ se alinea con el pixel en la posición (x, y) , para una máscara de tamaño $m \times n$; en donde $(m=2a+1)$ y $(n=2b+1)$, donde a y b son números enteros positivos; en general, el filtrado espacial lineal de una imagen de tamaño $m \times n$ con un filtro de tamaño $m \times n$, está dado por la expresión determinada por la ecuación (28) (Viera, 2017).

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (28).$$

Donde x e y varían de manera que cada pixel en w visita cada pixel de f .

Una vez obtenida la diferencia entre el fondo y el frame del video, se procede a realizar operaciones morfológicas para mejorar la imagen, y se emplea un umbral entre 70 y 255 pixeles para obtener los pixeles más blancos; posteriormente, la aplicación del método de dilatación para

obtener de mejor manera el objeto a seguir con un kernel de 3x3 y una sola interacción para obtener un contorno más uniforme.

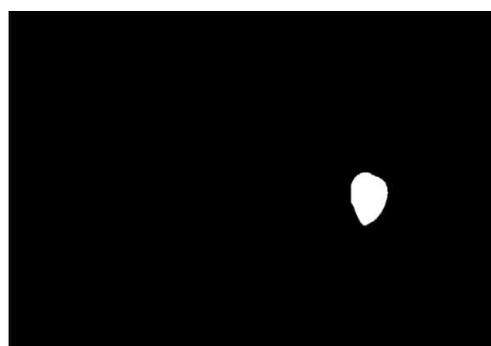
En la Figura 35a, se puede apreciar la imagen original del planeta Venus obtenida por la cámara QHY 5L, mientras que en la Figura 35b, se observa el tratamiento de imagen a escala de gris para el mismo planeta, en la cual se distingue un contorno uniforme y sin ruido del cuerpo celeste a seguir.

Figura 35

Obtención de un objeto en movimiento para un fondo estacionario



a) Imagen original Venus



b) Imagen a escala de gris Venus

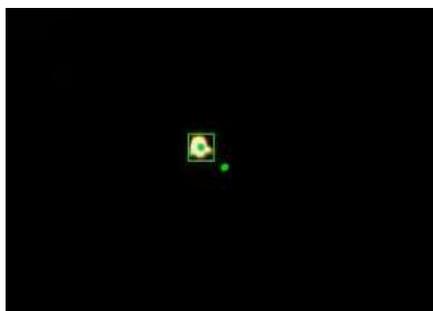
A continuación, se obtiene el contorno del objeto mediante la función `findContours`, en el caso de presentarse un objeto en la imagen la librería reconocerá los puntos que rodean al objeto de interés, el método de aproximación de contornos a utilizar es: `cv.CHAIN_APPROX_SIMPLE` ya que elimina puntos redundantes y comprime el contorno ahorrando memoria en la unidad de procesamiento.

Para dibujar el contorno en la imagen principal, se emplea el método de región de interés ROI (Región de Interés), el mismo que dibuja en color verde encerrando al contorno obtenido, la función empleada es `cv2.boundingRect` que permite a la vez obtener las coordenadas de la ROI,

paso esencial para el control del seguimiento del cuerpo celeste, la función `cv2.rectangle` dibuja un rectángulo delimitador alrededor del objeto a seguir; en la Figura 36 se puede observar la detección del planeta Venus en donde se dibuja la ROI que de acuerdo a los datos obtenidos es de 20 x 20 píxeles y se encuentra a una distancia con coordenadas de (24,24) del centro de la imagen.

Figura 36

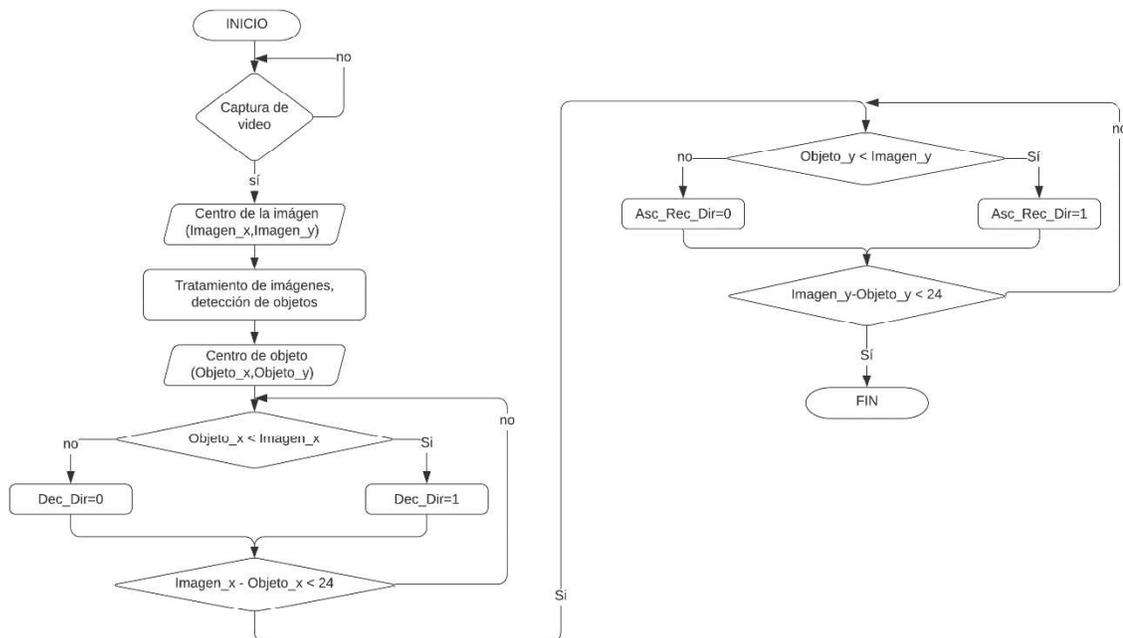
Obtención de un ROI para la detección del planeta Venus.



Para el seguimiento de cuerpos celestes, el control está basado en la separación que existe entre el centro de la imagen y el centro del objeto a seguir, previamente se identificó en la Tabla 15, que un paso del actuador genera un desplazamiento angular de 0,004167 grados, además de ello también se estableció que el desplazamiento angular por píxel es de $1,73 \times 10^{-4}$ grados, por lo tanto, se deduce que un paso del actuador generará un desplazamiento de 24 píxeles, este será el rango de control para el seguimiento de cuerpos celestes. En la Figura 37 se observa el diagrama de bloques para el seguimiento de cuerpos celestes que será implementado en el lenguaje de programación Python, y la comunicación serial entre Raspberry - Arduino para el control de los actuadores.

Figura 37

Diagrama de bloques para el reconocimiento y seguimiento de un cuerpo celeste.



5.4 Desarrollo de algoritmo de programación para análisis espectral de imágenes digitales.

Para la implementación de código, se hace uso de librerías de Python que vienen pre instaladas con el mismo paquete; en la Figura 38, se observa como encabezado la importación de las librerías scipy (Algoritmos matemáticos), numpy (Análisis de datos), matplotlib (Generación de gráficas), PIL (Edición de imágenes), librerías que permitirán realizar el análisis espectral de cuerpos celestes. Posteriormente se procede a leer las imágenes mediante la librería OPENCV, y se la redimensionan en 480x640 píxeles para obtener un mínimo y un máximo de píxeles pre establecidos, seguidamente, se transforma la imagen a escalas de grises y se convierte en un array de tipo flotante mediante la librería de Numpy.

Figura 38

Lectura y conversión de imagen

```

from __future__ import division # hace que se utilice la división en p
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from PIL import Image
from numpy.fft import fft2, fftshift, ifft2

from scipy import signal
from scipy import ndimage
import cv2
import sys

I = cv2.imread("C:/Users/Cristian/OneDrive/Escritorio/ANALISIS ESPECTRAL/venusreal
I = cv2.resize(I,(480,640))
I = cv2.cvtColor(I, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
I = cv2.GaussianBlur(I, (3, 3), 0)

A3 = np.asarray(I, dtype = np.float32) # Convertimos la imagen I en
# un array Numpy A3 con elementos tipo flo

```

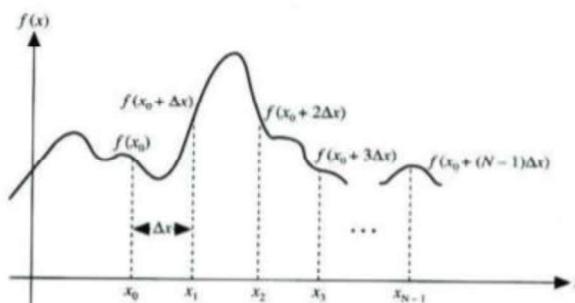
La transformada de Fourier tiene diversas aplicaciones en el campo de la matemática, física y astronomía; en el caso del tratamiento de imágenes digitales es útil para el análisis de datos mediante técnicas de filtrado, reconstrucción y compresión de la mismas, aunque para ello se requiere hacer uso de la DFT (transformada discreta de Fourier). En la ecuación 29 se observa la expresión matemática de la DFT para funciones bidimensionales del tipo $f(x, y)$.

$$F(u, v) = \iint_{-\alpha}^{\alpha} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (29).$$

En la Figura 39 se observa una representación gráfica de una función $f(x)$ no continua, discretizada para valores con distancia Δx y de la cual se puede tomar un número indefinido de muestras "N".

Figura 39

Discretización de la función $f(x)$



Nota: La figura muestra la discretización de una función $f(x)$. Tomado de (Medina, 2021).

El rango de valores de la función discretizada se expresada en términos matemáticos como los representados en la ecuación (30), mientras tanto, es posible también expresar esta notación matemática mediante sumatorias de un número infinito de muestras como se lo observa en la ecuación (31).

$$\{f(x_0), f(x_0 + \Delta x), f(x_0 + 2\Delta x), \dots, f(x_0 + (N - 1)\Delta x)\} \quad (30).$$

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} F(x) e^{-j2\pi \frac{ux}{N}} \quad (31).$$

Los valores de "u" de la DFT, corresponden a las muestras de $0, \Delta u, 2\Delta u, \dots, (N-1)\Delta u$, os términos Δx y Δu están relacionados de la siguiente manera en la ecuación (32):

$$\Delta u = \frac{1}{N\Delta x} \quad (32).$$

La DFT no posee todas las frecuencias que forman una imagen, posee un conjunto lo suficientemente grande para describirlas y en este contexto, para una imagen de tamaño $m \times n$, la DFT está dada por la ecuación (33) descrita a continuación:

$$F(u, v) = \frac{1}{mn} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{m} + \frac{vy}{n}\right)} \quad (33).$$

Donde " f " es el valor de la imagen en el dominio espacial y los valores de " F " en el dominio de la frecuencia llamados coeficientes de Fourier. La transformada inversa discreta de Fourier viene dada por la ecuación (34) expresada a continuación:

$$f(x, y) = MN \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} F(u, v) e^{-j2\pi\left(\frac{u}{M}x + \frac{v}{N}y\right)} \quad (34).$$

Incluso si $f(x, y)$ es real, su transformada $F(u, v)$ es en general, una función compleja. Para visualizarla se utiliza el espectro de potencias descrito en la ecuación (35).

$$P(u, v) = F(u, v) \overline{\overline{F(u, v)}} \quad (35).$$

Donde $\overline{\overline{F}}$ es el conjugado del complejo F

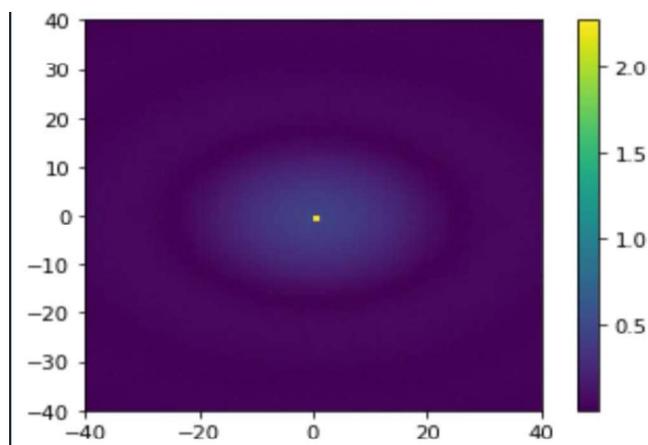
En la práctica, para encontrar la DFT y su inversa Python se utiliza el algoritmo de la transformada rápida de Fourier. Además, las funciones correspondientes de la librería Numpy para la transformada directa y la inversa son `fft2` que utiliza la ecuación (33) y `ifft2` que emplea la ecuación (34) respectivamente. Para calcular el espectro de potencia, se usa la función "`abs`" de Numpy que devuelve el módulo del complejo ecuación (35), para mover el origen de la transformada al centro del rectángulo de frecuencias, se emplea la función `fftshift` y para obtener un mejor resultado visual se emplea una escala logarítmica.

Con la imagen convertida en un array de tipo flotante, se obtiene una tupla de dimensiones de la imagen "`W`", "`H`" mediante el comando `Shape` de la librería Numpy, y se procede a calcular la transformada de Fourier discreta centrada en el origen, y mostrar la figura del

espectro de potencia o su raíz cuadrada. Finalmente, se imprime por consola el valor de la potencia, en la Figura 40 se Puede observar cómo es el espectro de potencia para la imagen de Venus la misma que está centrada en el origen con una escala logarítmica de radio 40 y es netamente ilustrativo ya que los colores no afectan los cálculos ni representan valores reales.

Figura 40

Transformada de Fourier centrada en el origen



Además, se procede a sumar primero los pixeles con etiqueta r para $0 \leq r$ y $0 \leq mH$ siendo mH la mitad de la altura de la imagen los valores de la matriz de potencia; y se procede a convertir en un vector para optimizar su cálculo, dicha adición es la suma de todos los armónicos de la imagen en el eje "X" y el eje "Y" para obtener la longitud de onda de la imagen, y en este caso en particular se trabaja con una foto real de Venus. En la Figura 41 se pueden observar los valores que se obtiene del espectro de potencia de una imagen del planeta Venus con longitud de onda de 548,25 nm y temperatura de radiación de 5285,21 K, calculada a partir del espectro visible.

Figura 41

Espectro de potencia y longitud de onda para una imagen de Venus

```
In [12]: runfile('C:/Users/Cristian/OneDrive/Escritorio/ANALISIS ESPECTRAL/cv_copia.py',
wdir='C:/Users/Cristian/OneDrive/Escritorio/ANALISIS ESPECTRAL ')
Espectro de potencia es: [[6.34765625e-04 5.41076033e-04 1.39912964e-04 ... 5.14032922e-04
1.39912964e-04 5.41076033e-04]
[6.82693531e-04 3.97369824e-04 3.70602709e-04 ... 7.22145326e-04
3.07452966e-04 4.22267778e-04]
[9.06040555e-04 2.62389248e-05 4.65827634e-04 ... 1.80268723e-04
5.12705274e-04 6.15167937e-04]
...
[5.98087408e-04 9.85614942e-05 7.03366186e-04 ... 5.34555555e-04
4.37381935e-04 4.68975372e-04]
[9.06040555e-04 6.15167937e-04 5.12705274e-04 ... 7.32173356e-04
4.65827634e-04 2.62389248e-05]
[6.82693531e-04 4.22267778e-04 3.07452966e-04 ... 2.58435885e-04
3.70602709e-04 3.97369824e-04]]
La longitud de onda es: 548.25 nm
La temperatura de radiacion es: 5285.21 °K
```

El resultado de la longitud de onda para una imagen de Venus, captado el equipo de adquisición de imagen QHY 5L, utilizando un telescopio con montura ecuatorial es de 548,25 nm y según (Inzuna, 2019) de la Figura 42, los resultados se encuentran en la escala de espectro visible de color verde y amarillo.

Figura 42

Colores del espectro visible y sus extremos

Color	λ (μm)
Ultravioleta	< 0.35
Violeta	0.4
Azul	0.45
Verde	0.5
Amarillo	0.55
Naranja	0.6
Rojo	0.7
Infrarrojo	> 0.75

Nota: La figura muestra la longitud de onda para el espectro visible. Tomado del libro *Meteorología descriptiva* capítulo 3: Radiación solar y terrestre de (Inzuna, 2019)

5.4.1 Cálculo de temperatura en base al espectro visible.

Para asignar el color del espectro visible a los planetas, se parte del tiempo de rotación que tarda cada planeta en dar una vuelta completa respecto al sol, ese tiempo se llama periodo, y la frecuencia es el inverso del tiempo.

Por otro lado, la luz es una onda y entre sus características, se encuentra el periodo que es el tiempo que tarda un punto de la onda por ejemplo en estar en el pico más alto, hasta llegar nuevamente al pico más alto. En este sentido, la Tabla 17 muestra el periodo orbital ordenado de forma ascendente.

Tabla 17

Periodo orbital expresado en años de menor a mayor

Planeta	Periodo Orbital en años
Mercurio	0,24
Venus	0,61
Tierra	1
Marte	1,88
Júpiter	11,86
Saturno	26,46
Urano	84,01
Neptuno	164,79

Nota: La tabla muestra el periodo orbital en años de los planetas del sistema solar. Tomado de *Jugar y aprender Astronomía: (Rafael García, 2008)*

Se sabe que el periodo es inverso a la frecuencia por lo cual se puede obtener la frecuencia de rotación expresado en la Tabla 18.

Tabla 18*Frecuencia de rotación*

Planeta	Periodo de rotación (inverso de año)
Mercurio	4,17
Venus	1,63
Tierra	1
Marte	0,53
Júpiter	0,080
Saturno	0,03
Urano	0,01
Neptuno	0,006

Se multiplica por 1000, los valores obtenidos en la Tabla 18 para trabajar con valores enteros los cuales se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19*Frecuencia de rotación amplificada*

Planeta	Frecuencia de rotación (inverso de año)
Mercurio	4170
Venus	1630
Tierra	1000
Marte	530
Júpiter	80
Saturno	30

Planeta	Frecuencia de rotación (inverso de año)
Urano	10
Neptuno	6

La amplitud de la frecuencia de rotación de los planetas es de 4154; y para encajar estas frecuencias en el espectro visible se necesita un factor que permita ir trasplantando las frecuencias de rotación al espectro de frecuencias planetarias.

Tabla 20

Frecuencia de espectro de luz

Espectro de Luz	Frecuencia
Rojo	$4,2x10^{14}$
Violeta	$7,5x10^{14}$

Respecto a la Tabla 20, se sabe que la amplitud del espectro visible es $3,22x10^{14}$ con el valor de estas dos amplitudes se puede obtener el factor de conversión que sirve para encajar el intervalo del espectro de frecuencias planetarias dentro del espectro visible

$$\mu = \frac{3,22x10^{14}}{4154} = 7,75x10^{10} \quad (36).$$

Con este factor, se hace una interpolación lineal multiplicando dicho valor por la diferencia de frecuencias de rotación y sumando a la frecuencia de espectro visible para obtener el valor de la frecuencia planetaria en la escala del espectro visible, para calcular la longitud de onda se emplea la ecuación (37). Además, se expresan resultados en la Tabla 21.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (37).$$

Dónde v es la velocidad de la luz que equivale a $300 \times 10^6 \text{ m/s}$.

Tabla 21

Frecuencias planetarias en el espectro visible

Planeta	Frecuencias	Longitudes nm
Mercurio	$7,5 \times 10^{14}$	400
Venus	$5,54 \times 10^{14}$	541
Tierra	$5,05 \times 10^{14}$	594
Marte	$4,69 \times 10^{14}$	640
Júpiter	$4,34 \times 10^{14}$	692
Saturno	$4,30 \times 10^{14}$	698
Urano	$4,28 \times 10^{14}$	700
Neptuno	$4,28 \times 10^{14}$	701

Las frecuencias y longitud de onda de la Tabla 21 son los valores a usar como referencia según los datos obteniendo mediante visión artificial, respecto a los planetas observados y de esta manera calcular el error en cada medición. La ecuación (38) conocida como la ley de Wien, permite calcular la temperatura de radiación de un cuerpo negro o de una estrella, tomando en consideración la mayor intensidad de longitud de onda que emite el cuerpo celeste.

$$\lambda_{max} * T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (38).$$

Para el caso del planeta Venus la longitud de onda que se obtuvo fue de 548,25 nm, y de acuerdo a la ecuación (38) la temperatura del planeta es de 5285,18 K representada en la ecuación (39).

$$T = \frac{0,0028976 \text{ m } ^\circ K}{548,25 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5285,18^\circ K \quad (39).$$

En la ecuación (40) se calcula la frecuencia de la onda electromagnética en función de la longitud de onda y de la velocidad de propagación de la onda, que es igual a la velocidad de la luz.

$$f = \frac{300 \times 10^6 \text{ m/s}}{0.548 \times 10^6 \text{ m}} = 5.47 \times 10^{14} \text{ Hz} = 547 \text{ THz} \quad (40).$$

Para obtener la temperatura de equilibrio, se debe igualar la energía incidente con la energía irradiada de esta manera se obtiene la ecuación (41) planteada a continuación:

$$G_{SC} * \pi R^2 * (1 - \alpha) = 4\pi R^2 * \sigma T^4 \quad (41).$$

Donde:

GSC: Constante solar del planeta

R: Radio de la tierra

α : Albedo

σ : Constante de Boltzmann

T: Temperatura Absoluta

Despejando T de la ecuación (28) se obtiene la ecuación (42):

$$T = \sqrt[4]{\frac{G_{SC} * (1 - \alpha)}{4 * \sigma}} \quad (42)$$

Para el caso de Venus se tiene:

GSC: 2610 W m⁻²

α : 0,77

$$\sigma: 5,6866 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

Sustituyendo los valores se obtiene que la temperatura de equilibrio para Venus es:

$$T = \sqrt[4]{\frac{2610 \text{ W m}^{-2} * (1 - 0,77)}{4 * (5,6866 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4})}} = 226,65 \text{ } ^\circ\text{K} \quad (43)$$

Para el caso del cálculo de longitud de onda, frecuencia, temperatura de radiación y temperatura de equilibrio del planeta Marte, los resultados se observan en el Anexo A.

CAPÍTULO VI

6 Pruebas y evaluación de resultados

En el presente capítulo, se pondrá en evidencia los resultados obtenidos luego de realizar las pruebas técnicas y de funcionamiento de los equipos. Las pruebas están principalmente orientadas a comprobar los efectos producidos por una correcta alineación polar hacia el campo magnético de la Tierra. Seguidamente, se realizarán las pruebas para el posicionamiento de objetos, las variables a considerar son el ángulo de diferencia entre el cuerpo celeste de referencia y el nuevo astro a posicionar, la segunda variable a analizar es el número de pasos realizados por los actuadores tanto para el eje de ascensión recta y declinación. Cabe señalar que el error máximo para el posicionamiento de cuerpos celestes es la mitad del campo visual de la cámara QHY 5LL, si el error es menor al señalado, el sistema de seguimiento podrá detectar el objeto y centrarlo en la imagen. Con respecto a las pruebas de adquisición de imágenes, están basadas al sistema de seguimiento de objetos, esto permitirá obtener imágenes más detalladas del cuerpo celeste a estudiar, como la intensidad lumínica y el análisis del espectro electromagnético.

6.1 Pruebas del sistema de posicionamiento continuo.

6.1.1 *Precisión de la ubicación polar de la montura.*

De acuerdo a la sección 1.3.2, en la que se plantea la necesidad de una correcta alineación entre el eje polar de la Tierra y eje de ascensión recta con la finalidad que el seguimiento de cuerpos celestes sea realizado principalmente por el actuador ubicado sobre este eje; el sensor MPU9250 cuenta con un magnetómetro de 3 ejes como fue detallado en su selección en la sección 3.2.1. Para el correcto funcionamiento de este sensor, es necesario la calibración: El magnetómetro se calibra girando la IMU 360 ° alrededor de un eje, a partir de ello se calcula la

compensación hacia los ejes restantes, esto contrarrestará los efectos del hierro duro (compensación de campos magnéticos cercanos al sensor) (Hrisko, 2021) .

En el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) se puede estimar los valores del campo magnético de acuerdo a la ubicación geográfica del lugar en donde se realizará la observación astronómica; mediante el uso de la librería mpu9250_i2c desarrollada por (Hrisko, 2021), en la Tabla 22 se evidencia los campos magnéticos medidos desde el NOAA y desde el MPU9250 en las pruebas de campo realizadas.

Tabla 22

Campo magnético existente en dos ciudades de la Provincia de Loja

Ciudad	Latitud	Longitud	Campo magnético NOAA	Campo magnético MPU
Loja	-3,9787	-79,2292	27,177	27,171
Gonzanamá	-4,1765	-79,4341	27,198	27,193

En la Tabla 23 se evidencian los datos obtenidos por el sensor MPU9250 en dos ubicaciones en las que se realizó las pruebas de campo, los valores de compensación fueron obtenidos realizando un giro de 360° alrededor del eje Z, con ello se reconoce los valores máximos y mínimos tanto para el eje X, como para el eje Y; el promedio estos valores será la corrección que se debe realizar a los datos generados por el sensor.

Tabla 23

Valores máximos y mínimos en el eje XY, al rotar el sensor alrededor del eje Z.

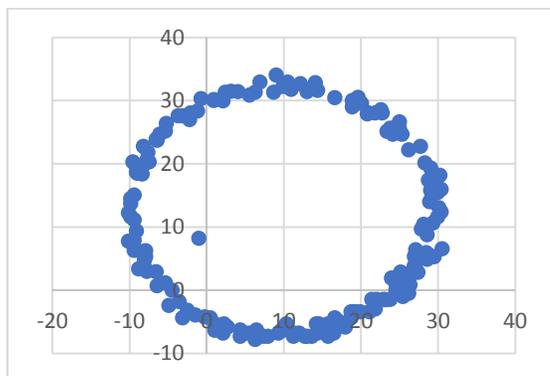
	Gonzanamá			Loja		
	Máximo	Mínimo	Corrección	Máximo	Mínimo	Corrección
Eje x	29,6082	-7,6263	10,9999	14,8641	-1,9440	6,4601
Eje y	30,5454	-10,1685	10,1685	26,1688	-2,6917	11,7385
Eje z	-41,8701	-50,3937	-46,1319	-46,9543	-59,6649	-53,3096

Es posible realizar una representación en el plano de los efectos del hierro duro; la rotación alrededor del eje Z genera una respuesta magnética en el plano XY, los mismos que están representados en la Figura 43a, en la que se observa que el centro de la misma no se encuentra ubicado en el origen del sistema coordenado, sino desplazada hacia el eje positivo de las ordenadas. Una vez realizada la compensación, se espera que el centro de la imagen coincida con el del eje coordenado como se observa en la Figura 43b.

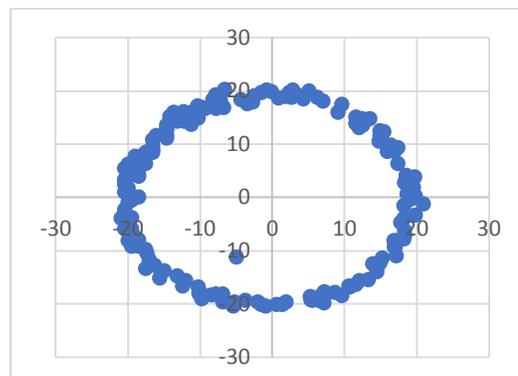
Como se evidencia en los datos obtenidos en la Tabla 23, al cambiar el lugar de la observación astronómica es necesario realizar la compensación del hierro duro, y de esta manera la orientación polar del eje de ascensión recta sea lo más exacta posible. Para poder comparar los efectos de una inadecuada orientación polar, se realizó pruebas usando dos métodos cotidianos para esta orientación, como lo es una brújula de mano de uso militar y el uso de brújulas contenidas en teléfonos celulares.

Figura 43

Representación gráfica en el plano para datos



a) Lectura de datos sin compensación

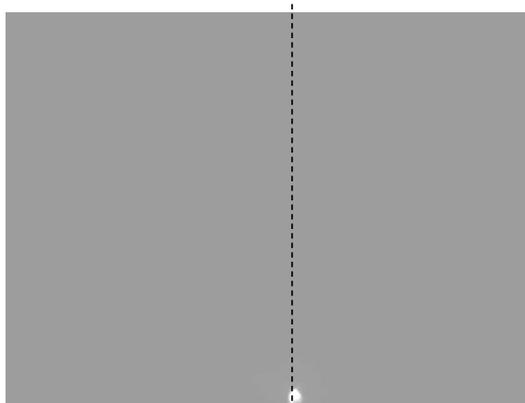


b) Lectura de datos con compensación

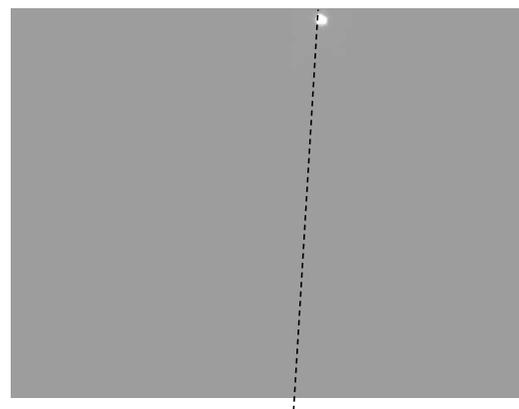
En la Figura 44a, 44c y 44e, se observa la trayectoria ideal que deberá seguir cualquier astro durante su desplazamiento en el campo visual de la cámara QHY 5LL, mientras tanto en las Figuras 44b, 44d y 44f se evidencia cual es la trayectoria real que tiene el astro según la brújula utilizada para la orientación polar.

Figura 44

Trayectorias realizadas por la estrella Sirio en el campo visual de $0,166^\circ$



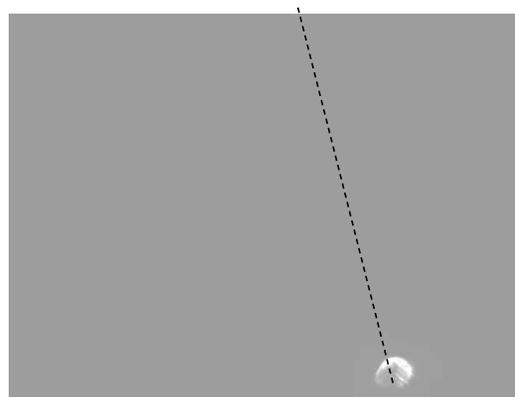
a) Posición inicial brújula de celular



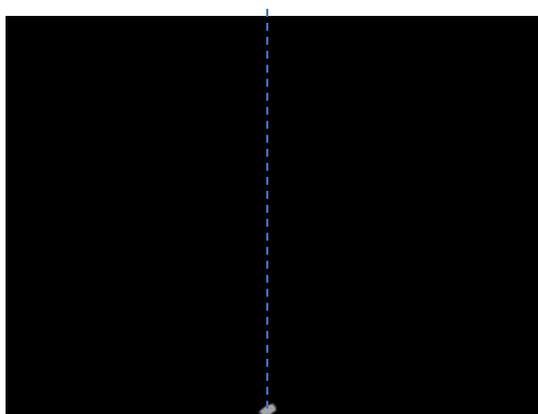
b) Posición final brújula celular



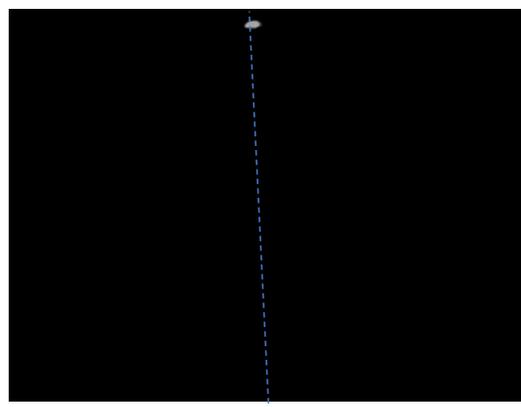
c) Posición inicial brújula de mano



d) Posición final brújula de mano



e) Posición inicial brújula MPU9250



f) Posición final brújula MPU9250

Como se observa en la Figura 44, hay una mayor desviación con el uso de la brújula de mano, esto es de esperarse, principalmente por los errores de paralaje que existen en la lectura de instrumentos por parte del ojo humano y la calidad del material del que está constituida la aguja que direcciona el norte magnético; en el caso del uso de brújula de celular, aunque la medición del norte magnético es muy precisa, la orientación paralela entre el norte magnético que indica el celular y el eje de ascensión recta genera cierto error de ubicación nuevamente generado por errores de paralaje.

El cálculo de desviación en la trayectoria del astro, se calculó de acuerdo a la diferencia de pixels entre el centro de la imagen y el centro del objeto, generando un error de trayectoria del

21% en el uso de una brújula de mano, 6% de error para el uso de una brújula de celular y finalmente un error del 0,5% con el uso de la brújula del sensor MPU9250.

De acuerdo a los datos previstos de la Tabla 16, para posicionar el telescopio desde la estrella Alnitak hacia Mintaka, se va a generar un error total del 9,4 %, la estrella a posicionar, podrá ubicarse en el campo de visión de la cámara sin ningún inconveniente, aunque para posicionar a cuerpos celestes más lejanos es necesario compensar esta desviación.

6.1.2 Precisión en el sistema de seguimiento.

Para el análisis en la precisión del sistema de posicionamiento, se ha considerado el comportamiento del sistema para objetos cotidianos del entorno, y cuerpos celestes; para ello se debe establecer que la cámara QHY 5LL por si sola, no es capaz de visualizar objetos de cualquier tipo de manera directa, esta cámara requiere de un conjunto de lentes y espejos cóncavos, los mismos que están presentes en un telescopio astronómico. Para observar objetos de nuestro entorno, es necesario acudir a cámaras web, que requieren también de lentes, aunque estas ya están incluidas en la cámara. Para el uso de estas cámaras web en la observación astronómica es necesario el uso de prismáticos, los mismos que son utilizados en las observaciones astronómicas directas del ojo humano y permiten reducir el campo visual; el acople entre la cámara web y el prismático no es del todo precisa, ya que las cámaras web no están diseñadas en su estructura física, para ser usadas en telescopios astronómicos.

Este análisis del seguimiento de objetos para dos cámaras de aplicaciones diferentes es necesario realizarlo, ya que de acuerdo a las pruebas efectuadas se ha evidenciado que el control de los actuadores en el número de pasos generados para el movimiento en cada pixel, es diferente para el uso de una u otra cámara, este cambio está relacionado directamente al campo visual propio de cada equipo de adquisición de imagen.

En La Tabla 24, se observa el campo de visión y la cantidad de pasos mínimos que se debe programar para que el objeto tienda a centrarse en el centro de la imagen, si los pasos se incrementan, el movimiento del objeto en la imagen será muy brusco generando distorsión en la imagen, mientras que si los pasos son menores al señalado no se podrá compensar el movimiento aparente del objeto, y por lo tanto este saldrá del campo de visión de la cámara. Cabe señalar también que la velocidad por paso para el movimiento en el actuador debe ser la mínima posible para el presente trabajo de investigación y el uso de la cámara QHY, la velocidad se configuro en 2000.

Tabla 24

Pasos por pixel generados por el campo de visión de cámara

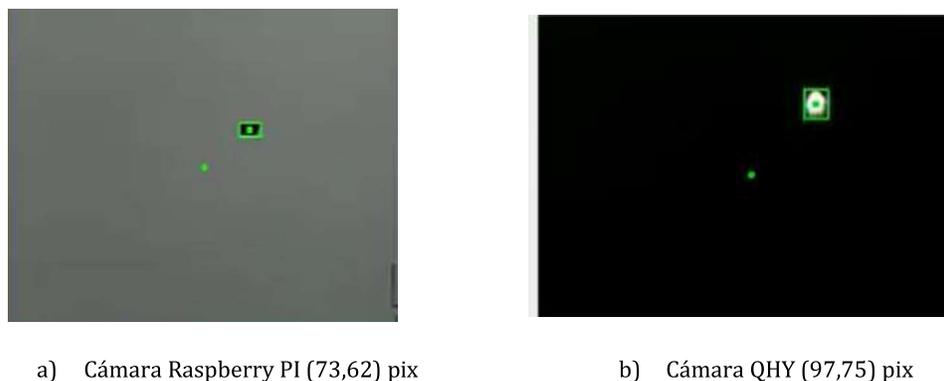
	Campo de Visión	Tamaño del pixel (um)	Movimiento del objeto	
			Pixel	Pasos
QHY 5LL	0,116°	3,75	44	1,5
SVBONY 105	0,2°	3,7	38	1.5
Raspberry PI cámara	65 °	3,64	1	20
FaceCam 1000X	90°	3	1	34

La Figura 45a representa la posición de un objeto dónde su sistema de referencia se encuentra en el centro de la imagen, su posición es de (73,62) pixeles en el eje de declinación y ascensión recta respectivamente, al sistema le tomó 79 segundos en centrar la imagen; mientras tanto en la Figura 45b, la posición del objeto es de (97,75) pixeles y al sistema le tomo 15 segundos en centrar el objeto. Se evidencia que al utilizar diferentes equipos de adquisición de

imágenes en el que varía el campo de visión, el comportamiento del sistema debe ser diferente en relación a los pasos por pixel.

Figura 45

Relación del tiempo de centrado para diferentes cámaras



6.1.3 Precisión en el sistema de posicionamiento.

En lo referente al sistema de posicionamiento, se debe considerar que el cuerpo celeste a observar se encuentra en continuo movimiento a razón de un grado por cada cuatro minutos transcurridos, y el tiempo que debería durar el objeto al estar en el campo de visión de la cámara QHY es de 28 segundos, de acuerdo a los datos de campo obtenidos se evidencia que el tiempo en el que el cuerpo celeste se encuentra en el campo visual de la cámara es de 32 segundos. Por lo tanto, al posicionar el telescopio hacia un nuevo cuerpo celeste, la velocidad de movimiento de los actuadores debe ser casi instantánea, caso contrario deberá compensarse ese retardo dentro de la programación y evitar que el nuevo cuerpo celeste a posicionar salga del campo de visión.

De acuerdo a las pruebas de campo realizadas se evidencio que para ángulos de posicionamiento pequeños del orden de los minutos de arco, la sensibilidad del sensor MPU9250 es muy variable, lo que complicaba realizar el control exacto para el movimiento de los actuadores, en el caso de las estrellas del cinturón de ori3n y la Tabla 17, se evidenció que el

máximo ángulo a recorrer es de 2,188 grados, el valor decimal se aproxima considerablemente al campo de visión en que debería estar el cuerpo celeste; la variación del sensor fluctúa entre los $\pm 0,3$ grados, esta imprecisión genera fallos continuos en posicionamiento de objetos, es por ello que fue necesario hacer uso del control por pasos de los actuadores, realizando una conversión entre los ángulos a recorrer y los pasos que debería generar para realizar aquellos avances, obteniendo en la Tabla 25 los siguientes resultados.

Tabla 25

Resultados para posicionamiento de objetos

Estrellas	Ascensión Recta			
	Pasos calculados	Pasos reales	Diferencia	Error %
Alnitak-Alnilab	273	265	8	2,9
Alnitak-Mintaka	525	513	13	2,3
Alnilab-Mintaka	252	243	9	3,57

Como se observa en los resultados hay una diferencia media 10 pasos de error en el posicionamiento, esto representa aproximadamente 264 píxeles de distancia del centro de la imagen con lo cual se puede asegurar que el cuerpo celeste a posicionar se encontrará dentro del campo de visión de la cámara.

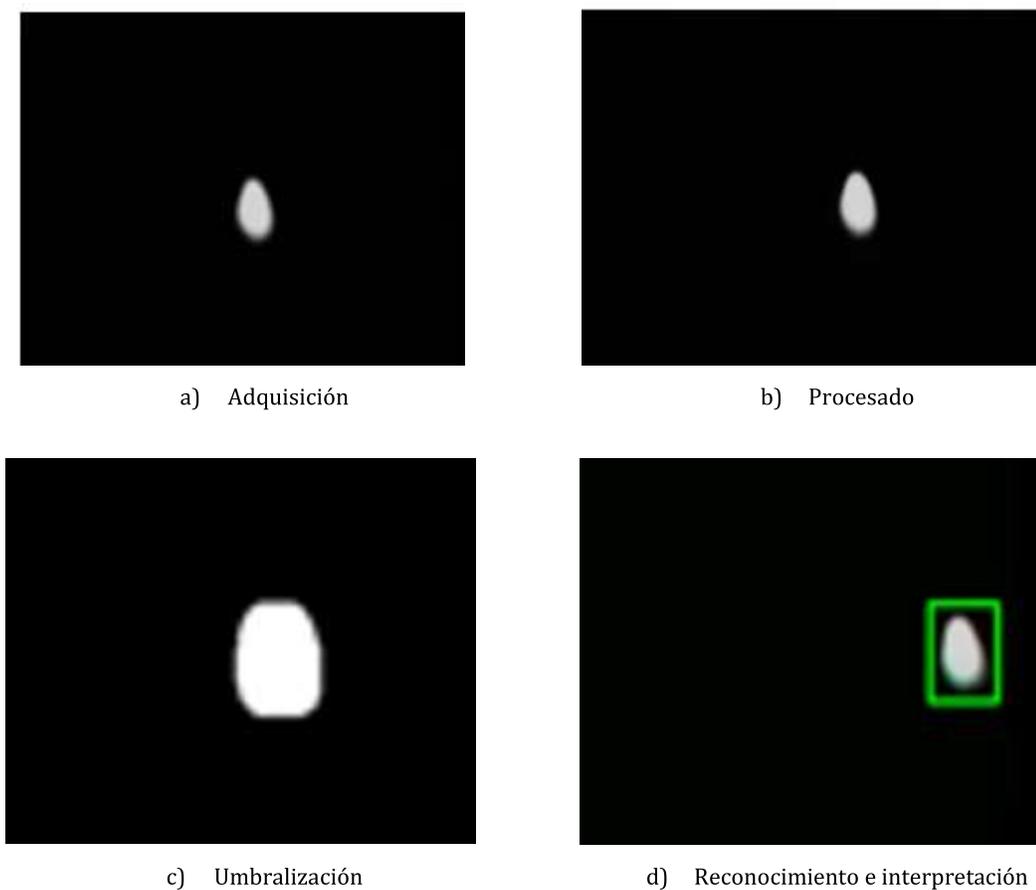
6.2 Etapas del sistema de adquisición de imágenes

En la Figura 46 se observa una secuencia de las imágenes de Venus al momento de realizar la adquisición de imágenes, donde se aprecia las etapas involucradas para el procesamiento de las mismas. En la Figura 46^a se observa la etapa de adquisición que fue realizada mediante una

cámara QHY 5L monocromática, en la Figura 46b se observa la etapa de preprocesamiento transformando la imagen de RGB a escala de grises y posteriormente aplicar un filtro gaussiano con un kernel de 3x3. En la Figura 46c se realiza la etapa de Umbralización, con un umbral mínimo de 70 y máximo de 255 y se agregó una operación morfológica de dilatación con un kernel de 3x3. Finalmente, en la Figura 46d se genera la etapa de reconocimiento en la cual se determina el contorno del objeto y discriminado la detección de objetos menores a un radio de 300 y así generar un ROI que encierre dicho contorno en un rectángulo delimitador.

Figura 46

Secuencia de seguimiento de venus en adquisición de imagen



Al realizar la adquisición de imágenes de planetas o estrellas se observa habitualmente un solo objeto en ocular del telescopio y, por lo tanto; no hay mayor complicación al momento de reconocer y realizar el seguimiento de dicho objeto. Para el caso de realizar un seguimiento a la Luna, es aquí donde hay que ser muy específico en la discriminación del ROI, ya que este estará relacionado al tamaño de los cráteres, se debe recordar que el campo de visión de la cámara QHY 5L es de $0,166^\circ$, mientras que la Luna requiere un campo de visión de $0,5^\circ$; por lo tanto, la imagen generada en la cámara QHY 5L de la Luna es únicamente del 23,2%, en otras palabras se podrá observar únicamente un cuarto de la Luna y por lo tanto, el ROI reconocerá una gran cantidad de cráteres.

6.3 Evaluación de datos obtenidos mediante análisis espectral.

Para la evaluación de datos se trabajó con un video de Venus, del cual se fueron obteniendo varios frames para realizar el análisis espectral. Estos frames se observan en la Figura 47, al realizar el análisis espectral se obtuvieron valores de longitud de onda que son descritos en la Tabla 26, de igual manera los frame de Venus, donde se aprecia de mejor manera sus valores como longitud de onda y frecuencia se aprecian en el Anexo B.

Para ello se va a tomar una muestra de 35 frame, del cual se obtendrá el promedio de su longitud de onda y comparar con el valor real de ese planeta de la Tabla 21 y así obtener el error máximo del mismo, dicho error debe ser menor al 5% para considerar que los resultados obtenidos en el análisis espectral son correctos y se pueden considerar como válidos.

En la Figura 47a se observa la detección de la región de interés del planeta Venus, mientras que en la Figura 47b, se evidencia un extracto de las longitudes de onda para diferentes frame, generando un valor máximo de 47,92 nm y un valor mínimo de 41,36 nm.

Figura 47

Banco de datos empleada en análisis espectral para Venus



En la Tabla 26 se pueden observar los distintos valores obtenidos a partir de un video captado con el equipo de adquisición de imágenes, si bien el rango de frecuencias promedio obtenido es de 547.16 nm, se tiene un error del 0.95% respecto al valor de Venus presentado en la Tabla 21 que es de 541 nm, utilizando un suavizado con un kernel de 3x3 que viene siendo un valor muy acertado respecto al real ya que el error es menor a 1%.

Tabla 26

Longitud de onda obtenidas mediante análisis espectral para venus

IMAGEN	Longitud de onda	Longitud de onda
	calculada (nm)	real (nm)
Venus_1	544,23	542
Venus_2	543,61	542
Venus_3	541,36	542
Venus_4	543,96	542
Venus_5	547,30	542

IMAGEN	Longitud de onda calculada (nm)	Longitud de onda real (nm)
Venus_6	545,73	542
Venus_7	546,30	542
Venus_8	550,61	542
Venus_9	547,91	542
Venus_10	552,12	542
Venus_11	551,09	542
Venus_12	554,74	542
Venus_13	541,74	542
Venus_14	542,68	542
Venus_15	549,49	542
Venus_16	548,25	542
Venus_17	546,87	542
Venus_18	546,16	542
Venus_19	549,37	542
Venus_20	551,11	542
Venus_21	546,48	542
Venus_22	544,94	542
Venus_23	550,02	542
Venus_24	546,66	542
Venus_25	546,08	542
Venus_26	547,14	542
Venus_27	546,90	542
Venus_28	547,17	542

IMAGEN	Longitud de onda calculada (nm)	Longitud de onda real (nm)
Venus_29	546,91	542
Venus_30	552,97	542
Venus_31	546,73	542
Venus_32	545,16	542
Venus_33	544,23	542
Venus_34	543,13	542
Venus_35	541,36	542
TOTAL	547.16	542

Con la longitud de onda promedio determinada de 547 nm según la Tabla 27 el color representado por el planeta Venus es en el espectro de color verde que va desde los 492 nm hasta los 577nm

Tabla 27.

Intervalo de longitud de onda para el espectro Visible

Visible	Intervalo (um)
Rojo	0.78-0.622
Naranja	0.622-0.597
Amarillo	0.597-0.577
Verde	0.577-0.492
Azul	0.492-0.455
Violeta	0.455-0.38

Nota: La tabla muestra el intervalo de frecuencias. Tomado de: (Alonso & Finn, 1970, págs. 791-792)

El valor de las Frecuencias obtenidas para cada caso se lo realiza mediante la ecuación 36 de tal manera que se muestra en la Tabla 28 las frecuencias calculadas a partir de su respectiva longitud de onda de la Tabla 26

Tabla 28

Frecuencias obtenidas mediante análisis espectral para venus

IMAGEN	Frecuencia calculada (THz)	Frecuencia real (THz)
Venus_1	551,98	554
Venus_2	547,79	554
Venus_3	547,53	554
Venus_4	551,24	554
Venus_5	552,35	554
Venus_6	554,16	554
Venus_7	551,51	554
Venus_8	548,15	554
Venus_9	549,72	554
Venus_10	549,15	554
Venus_11	544,85	554
Venus_12	547,54	554
Venus_13	543,38	554
Venus_14	544,38	554
Venus_15	540,79	554
Venus_16	553,77	554
Venus_17	552,12	554

IMAGEN	Frecuencia calculada (THz)	Frecuencia real (THz)
Venus_18	545,96	554
Venus_19	547,06	554
Venus_20	548,58	554
Venus_21	549,29	554
Venus_22	546,08	554
Venus_23	544,36	554
Venus_24	548,97	554
Venus_25	550,96	554
Venus_26	545,43	554
Venus_27	548,79	554
Venus_28	549,37	554
Venus_29	548,31	554
Venus_30	548,55	554
Venus_31	548,28	554
Venus_32	548,54	554
Venus_33	542,52	554
Venus_34	548,72	554
Venus_35	550,30	554
Promedio	548,31	554

Para obtener el porcentaje de error de la frecuencia se emplea la ecuación (44):

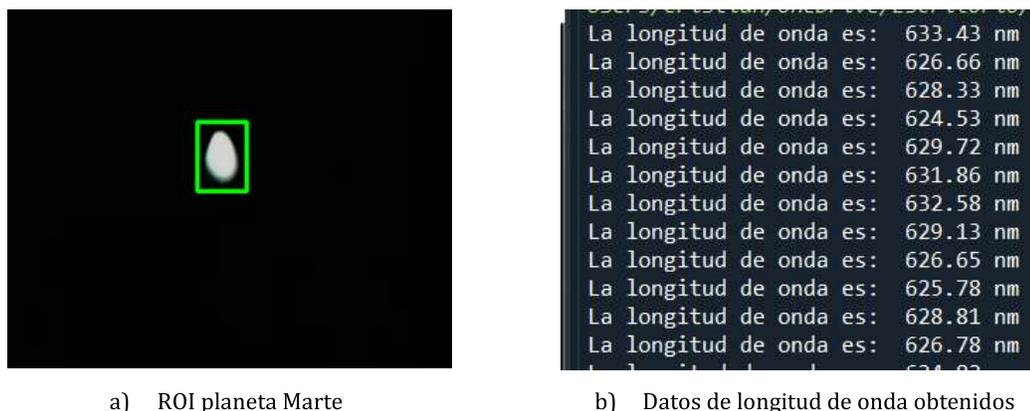
$$\%error = \frac{5.54 \times 10^{14} - 5.48 \times 10^{14}}{5.54 \times 10^{14}} * 100 = 1.08\% \quad (44).$$

El error obtenido para la frecuencia es de 1.08% que es un error aceptable para el presente trabajo de investigación.

En la Figura 48a se observa la detección de la región de interés del planeta Marte, mientras que en la Figura 48b, se evidencia un extracto de las longitudes de onda para diferentes frame, generando un valor máximo de 633,43 nm y un valor mínimo de 624,53 nm.

Figura 48

Base de datos empleada en análisis espectral para Marte



Estas longitudes de onda obtenidas del planeta Marte se encuentran completamente detalladas en la Tabla 29, y las imágenes analizadas del planeta se aprecian en el apéndice C

De igual manera se va a tomar una muestra de 35 frame, se va a obtener el promedio de su longitud de onda y comparar con el valor real de ese planeta y así obtener el error máximo del mismo, el cual debe ser menor al 5% para considerar que los resultados obtenidos en el análisis espectral son correctos y se pueden considerar como válidos.

Tabla 29*Longitud de onda de Marte obtenidas mediante análisis espectral*

IMAGEN	Longitud de onda calculada (nm)	Longitud de onda real(nm)
Marte_1	633,43	640
Marte_2	626,6	640
Marte_3	628,33	640
Marte_4	624,53	640
Marte_5	629,73	640
Marte_6	631,86	640
Marte_7	632,58	640
Marte_8	659,45	640
Marte_9	626,65	640
Marte_10	625,78	640
Marte_11	628,81	640
Marte_12	626,78	640
Marte_13	624,82	640
Marte_14	624,91	640
Marte_15	615,81	640
Marte_16	621,95	640
Marte_17	628	640
Marte_18	632,65	640

IMAGEN	Longitud de onda calculada (nm)	Longitud de onda real(nm)
Marte_19	645,35	640
Marte_20	624,52	640
Marte_21	620,79	640
Marte_22	627,87	640
Marte_23	632,03	640
Marte_24	625,8	640
Marte_25	628,69	640
Marte_26	634,87	640
Marte_27	645,89	640
Marte_28	626,6	640
Marte_29	627,48	640
Marte_30	629,32	640
Marte_31	624,69	640
Marte_32	628,39	640
Marte_33	624,66	640
Marte_34	625,77	640
Marte_35	625,79	640
TOTAL	629.14	640

Dentro de la Tabla 29, se pueden observar los distintos valores obtenidos a partir del seguimiento en tiempo real, si bien la longitud de onda promedio obtenido es de 629.14 nm se

tiene una diferencia de 10.86 nm, que representa un error del 1.69% respecto a los detallados en la Tabla 21 donde la longitud de onda es de 640 utilizando un suavizado con un kernel de 3x3 que es un error aceptable para el presente trabajo de investigación.

Teniendo en cuenta el valor de 629.14nm y según la Tabla 27, el planeta Marte se encuentra en el rango de naranja-rojo. El valor de las Frecuencias obtenidas para cada frame se lo realiza mediante la ecuación (36) de tal manera que se muestra en la Tabla 30 las frecuencias calculadas a partir de su respectiva longitud detalladas en la Tabla 29.

Tabla 30

Frecuencias obtenidas mediante análisis espectral para Marte

IMAGEN	Frecuencia calculada (THz)	Frecuencia real (THz)
Marte_1	473,61	469
Marte_2	478,77	469
Marte_3	477,46	469
Marte_4	480,36	469
Marte_5	476,40	469
Marte_6	474,79	469
Marte_7	474,25	469
Marte_8	455,26	469
Marte_9	478,74	469
Marte_10	479,40	469
Marte_11	477,09	469
Marte_12	478,64	469
Marte_13	480,14	469
Marte_14	480,07	469

IMAGEN	Frecuencia calculada (THz)	Frecuencia real (THz)
Marte_15	487,16	469
Marte_16	482,35	469
Marte_17	477,71	469
Marte_18	474,20	469
Marte_19	464,86	469
Marte_20	480,37	469
Marte_21	483,26	469
Marte_22	477,81	469
Marte_23	474,66	469
Marte_24	479,39	469
Marte_25	477,18	469
Marte_26	472,54	469
Marte_27	464,48	469
Marte_28	478,77	469
Marte_29	478,10	469
Marte_30	476,71	469
Marte_31	480,24	469
Marte_32	477,41	469
Marte_33	480,68	469
Marte_34	479,41	469
Marte_35	479,39	469
<i>Promedio</i>	476,90	469

Respecto a los valores promedios obtenidos de las frecuencias de la Tabla 24 se puede apreciar que el error es:

$$error\% = 100 - \frac{4.76 \times 10^{14} * 100}{4.69 \times 10^{14}} = 1.72\% \quad (45).$$

Siendo un valor muy acertado para la frecuencia obtenida del planeta Marte.

Las muestras de Venus son obtenidas a partir de un video del cual se extraen las imágenes, al validar la frecuencia obtenida si el resultado cae por debajo del valor de 520 nm o excede el valor de 560 nm se tomarán como datos erróneos de una muestra de 35 fotos que se obtuvo. De igual manera para las muestras de Marte se procedió con la diferencia de los rangos permisibles para su longitud de onda que son entre 624 a 660 nm valores fuera de este rango se consideran como erróneos de esta forma se establece la Tabla 31.

Tabla 31

Muestras de aciertos y fallos para cuerpos celestes respecto a su longitud de onda

Cuerpo Celeste	Muestra	Aciertos	Fallas	%
Venus	35	35	0	100%
Marte	35	31	4	88.57%

6.4 Validación de hipótesis

La Hipótesis que se plantea al inicio del proyecto es:

¿Se puede implementar un sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes, para el análisis espectral en imágenes digitales de un telescopio astronómico con montura ecuatorial?

De la que se obtiene las variables dependiente e independiente:

- **Variable Dependiente:**

Análisis espectral en imágenes digitales

- **Variable Independiente:**

Sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes

- **Hipótesis nula (H0):**

No es factible implementar un sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes, para el análisis espectral en imágenes digitales de un telescopio astronómico con montura ecuatorial

- **Hipótesis Alternativa (H1):**

Es factible implementar un sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes, para el análisis espectral en imágenes digitales de un telescopio astronómico con montura ecuatorial

Se utiliza el método de Chi-cuadrado para analizar las variables cuantitativas de acuerdo a su distribución de frecuencias, y llegar a determinar si cumple o no la hipótesis que se planteó. Para la ejecución de este método se plantea dos posibilidades, la hipótesis nula e hipótesis alternativa.

Se relacionan los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas para obtener la distribución de frecuencias.

Tabla 32*Frecuencias Observadas*

Valor obtenido correcto	Longitud de onda Venus	Longitud de Onda Marte	TOTAL
SI	35	31	66
NO	0	4	4
TOTAL	35	35	70

Después de haber obtenido los datos presentados en la Tabla 26, se calcula las frecuencias esperadas con la ecuación (46), que corresponden a los valores que se debería obtener si la hipótesis nula fuera verdadera.

$$E_{ij} = \frac{O_i - O_j}{O} \quad (46)$$

Donde:

E_{ij} : Frecuencia esperada

O_i : Valor total de la fila

O_j : Valor total de la columna

O : Valor total de todas las muestras

Después de aplicar la ecuación (46) para todas las frecuencias, se obtiene la Tabla de frecuencias esperadas, que se observa en la Tabla 33.

Tabla 33*Frecuencias Esperadas*

Valor obtenido correcto	Longitud de onda Venus	Longitud de onda Marte
SI	33	33
NO	2	2

Con los valores de la Tabla 33 se calcula el estadístico de prueba con la ecuación (47):

$$x^2 = \sum \frac{(fo - fe)^2}{fe} \quad (47)$$

$$x^2 = \frac{(35 - 33)^2}{33} + \frac{(0 - 2)^2}{2} + \frac{(31 - 33)^2}{33} + \frac{(4 - 2)^2}{2}$$

$$x^2 = 4.2424 \quad (48)$$

Se establece un margen de error del 5% ($\alpha = 0.05$), con eso se calcula el grado de libertad (v) de la prueba que se realizó, esto depende de la cantidad de filas y columnas de las tablas de distribución de frecuencia

$$v = (\text{filas} - 1)(\text{columnas} - 1)$$

$$v = (2 - 1)(2 - 1) = 1 \quad (49)$$

Tabla 34*Tabla de valores Chi cuadrado*

g.d.l	0.001	0.005	0.01	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.10
1	10,828	7,879	6,635	5,412	5.024	4.709	4.218	3.841	2.706
2	13,816	10,597	9,210	7,824	7.378	7.013	6.438	5.991	4.605

g.d.l	0.001	0.005	0.01	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.10
3	16,266	12,838	11,345	9,837	9.348	8.947	8.311	7.815	6.251
4	18,467	14,860	13,277	11,668	11.143	10.712	10.026	9.488	7.779
5	20,515	16,750	15,086	13,388	12.833	12.375	11.644	11.070	9.236

Con estos datos se determina el valor de Chi-cuadrado de la Tabla 34, de acuerdo a estos valores es: $x_{teórico} = 3,841$

Con los valores de Chi-cuadrado calculado y el Chi-cuadrado teórico, se compara de acuerdo a las consideraciones:

$$\text{Si } x_{calculado}^2 > x_{teórico}^2 \text{ se descarta } H_0 \quad (50)$$

$$\text{Si } x_{calculado}^2 < x_{teórico}^2 \text{ se descarta } H_1 \quad (51)$$

Comparando los valores se obtuvo que

$$4.24 > 3.841 \quad (52)$$

Por este motivo se acepta la hipótesis alternativa y como es de esperar se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que es factible implementar un sistema de posicionamiento continuo de cuerpos celestes, para el análisis espectral en imágenes digitales de un telescopio astronómico con montura ecuatorial.

CAPÍTULO VII

7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- El diseño mecánico para el seguimiento continuo de cuerpos celestes fue muy satisfactorio, el mecanismo permitió compensar el movimiento aparente de los cuerpos celestes a razón de 1,5 pasos por 15 arcos por segundo, el cuerpo celeste estuvo centrado de manera continua en la imagen, aunque para mejorar la suavidad en el movimiento del astro se configuro los drivers de los actuadores y generen medio paso a la vez.
- Para la realización de las observaciones astronómicas se requiere realizar en primera instancia la calibración del MPU9250, con la finalidad de determinar los valores que compensen los efectos del hierro duro, y de esta manera lograr una orientación polar óptima del eje de ascensión recta, permitiendo así el movimiento de los actuadores se dé principalmente en el eje de ascensión recta y en menor medida en el eje de declinación de tal manera que la distorsión de las imágenes en el seguimiento sea mínima.
- El cambio del equipo de adquisición de imagen con lleva a realizar un análisis en los pasos por pixel que deberá general el actuador, en el presente trabajo se realizó el seguimiento y objetos mediante una cámara QHY con un campo de visión de 0,166 grados, realizando un recorrido de 44 pixeles en 1,5 pasos, un campo de visión diferente al señalado deberá tener su propia configuración de pasos por pixel de tal manera que las imágenes obtenidas no generen aberraciones.
- De acuerdo a las pruebas realizadas se evidencio que, para ángulos del orden de minutos de arco, el sensor MPU9250 tiene variaciones entre los $\pm 0,3$ grados, lo cual complica generar un control de posición mediante esta variable, es por ello que se hace uso del

control por pasos del actuador, mediante una conversión entre el ángulo a recorrer y los pasos que deberá generar el actuador.

- Se desarrolló un sistema de visión artificial encargado del seguimiento en tiempo real de cuerpos celestes mediante la utilización de software libre como lo es Python y OpenCV.
- El sistema de visión ha sido desarrollado mediante la ayuda de las librerías de OpenCV las mismas que permitieron un adecuado tratamiento de las imágenes adquiridas a través de la cámara QHY posibilitando un correcto seguimiento de cuerpos celestes.
- Se empleó el análisis espectral en imágenes digitales ya que la investigación trabaja principalmente con frecuencias, que es importante para el presente trabajo puesto que el espectro de potencia de una imagen nos permite obtener el espectro de longitud de onda de una imagen. Por esto el procesamiento digital de imágenes mediante la transformada de Fourier cumple un rol muy importante ya que es una herramienta que permite obtener la representación de una señal en el espacio de frecuencias.
- El sistema desarrollado permite realizar el análisis espectral en imágenes digitales para estimar datos de los cuerpos celestes como lo es longitud de onda, frecuencia, y temperatura de radiación, para el caso de venus estos valores obtenidos fueron de $\lambda=547,16$ nm, $f=548,31$ THz, $T= 5295,7$ K mientras que para el caso de marte sus valores obtenidos fueron de $\lambda=629,14$ nm, $f=476,90$ THz, $T= 4605,65$ K.

7.2 Recomendaciones

- Se recomienda que las observaciones astronómicas sean realizadas en lugares aislados de las zonas urbanas, esto ayudará en gran medida para la obtención de imágenes de mejor calidad, adicionalmente al sistema de seguimiento de cuerpos celestes.

- Hay ciertos procesos en la obtención de imágenes astronómicas que no fueron analizados en el presente trabajo de investigación como es: el tiempo de exposición, el ruido por las tomas del objeto celeste llamadas darks, la temperatura del medio etc., que al hacer analizadas permitirían comparar la eficiencia de la obtención de imágenes mediante seguimiento continuo.
- Se debe revisar de manera cotidiana que los ejes de transmisión de movimiento de la montura ecuatorial estén acoplados correctamente, así como la tensión correcta de las correas dentadas y así evitar que se genere juego en los acoples.
- En el caso que se tenga una montura azimutal y se requiera automatizar su movimiento, este debe realizarse de manera obligatoria en sus dos ejes, a diferencia de la montura ecuatorial, que se puede prescindir del movimiento automático del eje de declinación.
- Para el análisis espectral se recomienda utilizar videos o fotos de un tamaño definido, ya que si bien el programa redimensiona los frame el excesivo número de pixeles llega a saturar la información con lo cual se altera el resultado esperado.
- El uso de imágenes espectrales es de mucha utilidad para obtener datos dentro de un rango de longitud de onda específico, se aplican para astronomía, agricultura, medicina hasta el análisis de documentos o pintura.

Bibliografía

- Allegro. (2012). *AllDatasheet*. Recuperado el 05 de Septiembre de 2020, de <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/455036/ALLEGRO/A4988.html>
- Allegro MicroSystems. (22 de Marzo de 2014). *DMOS Microstepping Driver with Translator*. Recuperado el 21 de Junio de 2020, de Allegro: https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf
- Alonso, M., & Finn, E. J. (1970). *Campos y Ondas* (Vol. II). México: FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO.
- Arduino. (16 de Julio de 2012). *Datasheet*. Recuperado el 06 de Marzo de 2021, de Octopart: <https://datasheet.octopart.com/A000066-Arduino-datasheet-38879526.pdf>
- Atmel. (2017). *ATtiny25/45/85 [DATASHEET]*. San José: Atmel corporation.
- Avalos, A. (2009). *Sistema de control para un telescopio con montura ecuatorial usando un pic16f877*. México DF: Instituto Politécnico Nacional.
- Baca Urbina, G. (2010). *Evaluación de proyectos* (Sexta ed.). México: McGraw Hill.
- Blanco, O., Tosar, B., & Gómez, D. (17 de Junio de 2018). *Manual sobre manejo de telescopios astronómicos*. Recuperado el 5 de Enero de 2020, de Agrupación astronómica coruñesa ÍO: <http://agrupacionio.com/nueva/wp-content/uploads/2014/10/Manual-manejo-de-telescopios.pdf>
- Cardona Aristizábal, A. J. (2015). *Método para calcular la eficiencia cuántica y la respuesta espectral de celdas solares usando LabVIEW*. Bogota: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

CELESTRON. (2010). *Manual de instrucciones*. Madrid.

Corona, L., Abarca, G., & Mares, J. (2014). *Sensores y actuadores, aplicaciones con arduino*. México:

GRUPO EDITORIAL PATRIA, S.A. DE C.V.

Electronic, A. (2011). *Arrow Electronic*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2020, de

https://www.arrow.com/en/products/tb6560aftgc8el/toshiba?utm_source=FindChips&utm_medium=buyNow

EPN. (2020). *Observatorio Astronómico de Quito*. Recuperado el 03 de Enero de 2021, de

<https://oaq.epn.edu.ec/>

EquiposCotopaxi. (2020). *Equipos Cotopaxi*. Recuperado el 18 de Junio de 2020, de

<https://equiposcotopaxi.com/51-telescopios-celestron>

Escalante, B. (2006). *Procesamiento Digital de Imágenes*. México: UNAM.

ESPRESSIF. (2020). *ESP32 series datasheet*. Shanghai: Espressif system.

Farnell. (2015). *Arduino Nano*. Recuperado el 21 de Junio de 2020, de Farnell an avnet company:

<http://www.farnell.com/datasheets/1682238.pdf>

Freepik. (2015). *Freepik*. Recuperado el 16 de Julio de 2020, de [https://www.freepik.es/vector-](https://www.freepik.es/vector-premium/diagrama-luz-visible-espectro-electromagnetico-color-frecuencia-onda-luz_6625300.htm)

[premium/diagrama-luz-visible-espectro-electromagnetico-color-frecuencia-onda-luz_6625300.htm](https://www.freepik.es/vector-premium/diagrama-luz-visible-espectro-electromagnetico-color-frecuencia-onda-luz_6625300.htm)

Friedrich, V. (2013). *Transformada de Fourier de una Imagen y filtrado de una imagen en el dominio de la frecuencia*. Bahia clanca: Universidad Nacional del Sur.

FRIENDIELEC. (s.f.). *FRIENDIELEC*. Obtenido de

https://www.friendlyarm.com/index.php?route=product/product&product_id=234

- Gallardo, I. (2008). *Estudio de factibilidad técnico económico para la automatización del posicionamiento de cúpula en el observatorio astronómico de la alameda e implementación de un prototipo experimental*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Garzon, J., David, E., & Duran, C. (2009). *100 conceptos básicos de astronomía*. Madrid: Sociedad española de astronomía.
- Gozáles, T. (2017). *Gonzales Fotografía y Astronomía*. Recuperado el 11 de Julio de 2020, de <http://www.fotoastrogonzalez.com/reflectores/347-telescopio-bresser-pollux-150-1400-eq.html>
- Gutierrez, C. (16 de Octubre de 2020). *Encoder Products Company*. Recuperado el 17 de Septiembre de 2020, de <http://encoder.com/blog/encoder-basics/que-es-un-encoder/>
- Hrisko, J. (11 de Enero de 2021). *Marker Portal*. Recuperado el 23 de Febrero de 2021, de <https://makersportal.com/blog/calibration-of-a-magnetometer-with-raspberry-pi>
- Instrument, T. (2011). *DRV8825 : stepper motor controller ic*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2020, de AllDatasheet: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/432263/TI/DRV8825.html>
- InvenSense. (2014). *MPU 9250 Product Specification*. Recuperado el 20 de Junio de 2020, de InvenSense In: <https://datasheet.octopart.com/MPU-9250-InvenSense-datasheet-104530018.pdf>
- InvenSense. (06 de Mayo de 2016). *InvenSense*. Recuperado el 16 de Junio de 2020, de <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>
- Inzuna, J. (2019). *Meteorología descriptiva*. Santiago de Chile: Universitaria.

Kumar Saha, S. (2010). *Introducción a la robótica*. México: Mc Graw Hill.

LBA, Industrial. (2019). *¿Qué es un encoder absoluto? ¿Cómo funciona? Ventajas y Desventajas*.

Recuperado el 6 de Junio de 2020, de LBA Industrial:
<https://www.lbaindustrial.com.mx/que-es-un-encoder-absoluto/>

Liberona, G. (2015). *Aplicaciones del procesamiento de imágenes digitales astronomía*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

López Arlandis, J. M. (2017). *Alineación ecuatorial del telescopio MEADE LX200*. Alicante: Agrupación astronómica de Alcoy.

Mecafenix. (14 de 06 de 2020). *Ingeniería Mecafenix*. Obtenido de
<https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>

Medina, J. (14 de 01 de 2021). *DESARROLLO DE UN SISTEMA EMBEBIDO PARA AYUDA A LA NATACIÓN DE PERSONAS NO VIDENTES MEDIANTE EL RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES*.
Riobamba: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO. Obtenido de
<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/3036/1/UNACH-ING-ELC-TEL-2016-0028.pdf>

MotionKing. (2020). *17HS Stepper Motor -42mm(1.8 degree)* . Recuperado el 18 de Junio de 2020,
de MotionKing the power motion your future:
http://www.motionking.com/Products/Hybrid_Stepper_Motors/17HS_Stepper_Motor_42mm_1.8degree.htm

OPENCV. (31 de Diciembre de 2019). *Documentación de OpenCv*. Recuperado el 10 de Marzo de 2021,
de Transformación de Imágenes Varias:
https://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/miscellaneous_transformations.html#

void%20cvtColor%28InputArray%20src,%20OutputArray%20dst,%20int%20code,%20int%20dstCn%29

Ortuño, J. (2015). *Asociación astronómica marina alta*. Recuperado el 17 de Junio de 2020, de http://www.astromarinaalta.org/wp-content/uploads/2017/12/2015_Comprar-un-telescopio.pdf

Ponce, M. (2018). *Cielos de Chile: Desde la Tierra al Universo*. Santiago: Ministerio de medio ambiente.

QHY. (2018). *QHY5-II Download And Document*. Recuperado el 15 de Enero de 2021, de Qhyccd: <https://www.qhyccd.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=133&id=8&cut=2>

Quintero, A. (2008). Construcción de un telescopio reflector newtoniano de 15 cm. *Scientia et Technica*, 6.

Rafael García, M. B. (2008). *Jugar y aprender Astronomía*. Barcelona: Network for Astronomy school education Unawe. Obtenido de http://sac.csic.es/unawe/juegos/JUGANDO_SISTEMA_SOLAR.pdf

RaspberryPi. (s.f.). *RaspberryPi*. Obtenido de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>

ROCKPI. (s.f.). *ROCKPI*. Obtenido de <https://rockpi.org/>

Rodero, M., Martínez, A., & Gómez, M. (2016). *Procesado de señales proporcionadas por sensores inerciales*. Pamplona: Universidad de Pamplona.

Rodríguez Bergali , F. (2019). *Poder de resolución y campo visual*. Recuperado el 15 de Enero de 2020, de Astro Ilusión: <https://www.astroilusion.es/poder-de-resolucion-y-campo-visual/>

Rosero, M. (15 de Diciembre de 2018). *La primera casa abierta de astronomía*. Recuperado el 15 de Julio de 2020, de AstroCiencias Ecuador: <https://astrocienciasecu.blogspot.com/2018/12/el-planetario-y-la-asociacion-amateur.html>

RTA, Iberica. (Marzo de 2018). *RTA Motion Control Systems*. Recuperado el 20 de Junio de 2020, de https://www.rta-iberica.es/uploads/EM1H3H-04D0_.pdf

Ruiz Fernández, L. Á. (2016). *La transformada de Fourier. Aplicación al filtrado de imágenes*. Valencia: Universidad politécnica de valencia.

Sanabria, J. (17 de 06 de 2020). *SEDA/LIADA*. Obtenido de <https://sedaliada.wordpress.com/2015/06/26/mi-primer-telescopio/#jp-carousel-453>

SERNATUR. (2019). *PortalAstronómico*. Recuperado el 14 de Junio de 2020, de <https://www.portalastronomico.com/tecnicas-para-realizar-astrofotografia/>

Sorotec. (01 de Enero de 2018). *Stepper Motor Driver*. Recuperado el 21 de Junio de 2020, de MCI Electrónicos: https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/TB6600_data_sheet.pdf

Sorotec. (22 de 01 de 2018). *TB6600*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2020, de https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/TB6600_data_sheet.pdf

Stockebrand, H. (2018). *Portal Astronómico*. Recuperado el 22 de Agosto de 2019, de <https://www.portalastronomico.com/tecnicas-para-realizar-astrofotografia/>

- TexasInstruments. (2016). *Texas Instruments*. Recuperado el 21 de Junio de 2020, de https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf?ts=1592809526757&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- Torres, F. (17 de 06 de 2020). *Universidad de Alicante*. Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/18434/1/Tema%203_Sensores%20II.pdf
- Viera, G. (2017). *Procesamiento de imágenes usando OpenCv aplicado en raspberry Pi para la clasificación del cacao*. Piura, Perú: Universidad de Piura. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2916/IME_218.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vilet, J. M. (2005). *Procesamiento Digital de Imágenes*. San Luis Potosi: UASLP.
- Vincent L. Fish, M. D.-S. (2014). *IMAGING AN EVENT HORIZON: MITIGATION OF SCATTERING TOWARD SAGITTARIUS A*. Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology.
- ZWO. (2018). *Astronomy Imaging Camera*. Recuperado el 15 de Enero de 2021, de <https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi183mc-pro-color>

ANEXOS