



DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN OBSERVATORIO ASTRONÓMICO ROBÓTICO AUTÓNOMO BÁSICO

Julián Gálvez Serna

Tesis de Maestría en Ingeniería Electrónica

**Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia**

21 de abril de 2019

Información del trabajo

- **Título:** Diseño de un sistema de control para un observatorio astronómico robótico autónomo básico.
- **Repositorio del Código Desarrollado:**
<https://github.com/Piaktipik/OARAB-MJulian>
- **Programa:** Maestría en Ingeniería Electrónica.
- **Estudiante y grupos de investigación:**
Julian Andrés Galvez Serna
julian.galvezs@udea.edu.co
FACom (Física y Astrofísica Computacional)
- **Director:** Pablo Cuartas Restrepo
pablo.cuartas@udea.edu.co
Instituto de Física, Grupo FACom
- **Asesora:** Natalia Gaviria Gómez
natalia.gaviria@udea.edu.co
Facultad de Ingeniería, GITA.

Agradecimientos

Infinita gratitud a mis padres, mis hermanas, familia y amigos, sin su apoyo no hubiera sido posible explorar estos nuevos caminos. A los maestros que acompañaron este trabajo por su apoyo y consejos.

Índice

1. Introducción	10
1.1. Necesidad de una facilidad observacional para la UdeA	10
1.2. La robotización como solución	11
1.3. Caso LX850-UdeA	11
2. Conceptos de Astronomía	13
2.1. Definiciones Básicas	13
2.2. Coordenadas Celestes	14
2.2.1. Coordenadas horizontales	15
2.2.2. Coordenadas ecuatoriales horarias	15
2.2.3. Coordenadas ecuatoriales absolutas	16
2.3. Corrección de coordenadas	16
2.4. Movimiento aparente de los objetos celestes	17
2.5. Magnitudes y brillos de los objetos celestes	18
2.6. Observando a través de la atmósfera	19
3. Observatorios Astronómicos	20
3.1. Observatorios Robóticos, Autónomos y Teleoperados	20
3.2. Visitas técnicas	23
3.2.1. Visita IAFE (Argentina)	23
3.2.2. Visita al OPD (Brasil)	25
4. Identificación y caracterización del OARAB de la Universidad de Antioquia	33
4.1. Equipamiento básico de un OARAB	34
4.2. Telescopio	34
4.2.1. Análisis de la electrónica del telescopio	34
4.2.2. Ingeniería Inversa PCB para el control de los motores del telescopio	37
4.2.3. Ingeniería inversa de los motores	38
4.2.4. Modelación y fabricación de una pesa compatible con la latitud local	39
4.2.5. Base del telescopio y sistema de nivelación	41
4.3. Cámara CCD	43
4.4. Rueda de Filtros	44
4.4.1. Instalación de la Rueda de filtros	46
4.5. Cámara de Cielo	48
4.5.1. Configuración del hardware de la cámara	49
4.5.2. Configuración del software de la cámara	51
4.5.3. Problemas relacionados con el ambiente	59
4.6. Estación Meteorológica	61
5. Identificación de los sistemas de control para observatorios astronómicos	62
5.1. ASCOM	62
5.2. INDI	63
5.3. RTS2	64
6. Diseño del sistema de control para el OARAB	65

7. Desarrollos	70
7.1. Configuración del modulo Raspberry pi	70
7.1.1. instalación sistema operativo	70
7.1.2. Configuración de Periféricos	72
7.1.3. Configuración de software para acceso remoto	73
7.2. Cámara de Monitoreo	73
7.3. Control On/Off Web	76
7.4. Lámpara web para el monitoreo	78
7.5. Simulador cúpula y telescopio	78
7.6. Sistema de supervisión y diagnostico automático	79
8. Integración y pruebas del OARAB	83
8.1. Integración del hardware del Sistema de Control	83
8.2. Integración y pruebas de la rueda de filtros	86
8.3. Pruebas y análisis del desempeño del controlador	87
8.3.1. Determinación del campo visual del telescopio o FOV (Fiel Of View)	87
8.3.2. Pruebas de apuntamiento	88
9. Trabajo futuro	91
9.1. Guiado automático	91
9.2. Sistema de supervisión y diagnostico automático	91
9.3. Simulador cúpula y telescopio	92
9.4. Protección de la cámara de vigilancia	92
9.5. Automatización de la Cámara de cielo	92
9.6. Controlador de mano en Linux	94
9.7. Integración y desarrollos con KStars + INDI	95
9.8. Propuesta alterna de control de motores	95
10. Conclusiones	97

Índice de cuadros

1.	Histórico de mejoras significativas. Condensado de Castro-Tirado (2010).	20
2.	Datos empresas relevantes para el proyecto identificadas en BIEL Light + Building Buenos Aires.	25
3.	Instrumentos comunes en observatorios presentes en el estado del arte en la sección 3.1.	33
4.	Comparación de las soluciones para evitar el choque de la pesa con el trípode.	39
5.	Soluciones al problema de transporte y nivelación del telescopio.	42
6.	Comparación de las características de las cámaras CCDs usadas.	45
7.	Comparación de las posibles implementaciones de la cámara de cielo. . .	49
8.	Conformación de las soluciones del sistema de control del OARAB. . . .	68
9.	Análisis y selección de la mejor solución según criterios definidos.	69

Índice de figuras

1.	Definiciones básicas.	13
2.	Coordenadas horizontales, tomado de: Portilla Barbosa (2009).	15
3.	Coordenadas ecuatoriales horarias, tomado de: Portilla Barbosa (2009).	16
4.	Coordenadas ecuatoriales absolutas, tomado de: Portilla Barbosa (2009).	16
5.	Refracción Astronómica, tomado de: Portilla Barbosa (2009).	17
6.	Esquema observatorio básico.	21
7.	Diagrama Sistema de Control del Observatorio IAFE (CONICET/UBA).	24
8.	Pararrayos activos.	24
9.	Datos geográficos Observatorio Pico dos Dias - OPD.	26
10.	Rieles con canaleta.	26
11.	Entrega de potencia a rieles.	26
12.	Soporte vertical domo.	27
13.	Soporte radial domo.	27
14.	Codificador de posición.	27
15.	Vista lateral del codificador.	27
16.	Compuertas abiertas.	29
17.	Posición de captura de flat.	29
18.	Engranaje del eje de ascensión recta.	29
19.	Montura ecuatorial del telescopio.	29
20.	Conexiones de la cámara CCD, potencia en el centro, datos por cable USB del lado derecho, bajo uno de los conductos del liquido refrigerante.	30
21.	Refrigerador externo de la cámara CCD.	30
22.	Pestaña de control de la montura e indicadores, del software de control del telescopio del OPD.	31
23.	Pestaña de control de lamparas y cámara, del software de control del telescopio del OPD.	31
24.	Interfaz de guía del telescopio.	31
25.	Software de análisis de imágenes IRAF.	31
26.	Cámara de aluminización.	32
27.	Bombas de vacío.	32
28.	Pararrayos principal.	32
29.	Visita desde el observatorio del pararrayos.	32
30.	Cámara de cielo.	32
31.	Monitor de seeing.	32
32.	MEADE LX850-ACF 14" F/8.	35
33.	Parte posterior del circuito de control del telescopio MEADE LX850.	35
34.	Tarjeta de control de los motores del MEADE LX850 (Vista superior).	36
35.	Tarjeta de control de los motores del MEADE LX850 (Vista inferior).	36
36.	Compartimento motor ascensión recta.	37
37.	Equipos utilizados para la captura de la información de entrada y salida de los motores.	38
38.	Señal del decodificador incremental del motor.	39
39.	Señal entregada al motor por el PCB de control.	39
40.	Validación del diseño de la pesa nueva.	41
41.	Pesa original.	41
42.	Pesa nueva.	41

43.	Análisis computacional de las deformaciones de la Base.	42
44.	Detalle de la deformación de la pieza final.	42
45.	Detalle de la ubicación de los gatos mecánicos.	42
46.	Validación de la nivelación.	43
47.	Montaje del telescopio orientado al norte y nivelado.	43
48.	Cámara CCD SBIG STT-8300.	43
49.	Configuración de las cámaras ZWO usadas, una como cámara principal (ASI120) y la otra como cámara del buscador(ASI174).	44
50.	Rueda de filtros SBIG FW8-STT.	45
51.	Cámara sin cubierta frontal, se aprecia el disco obturador.	46
52.	Rueda de filtros acoplada con tornillos.	46
53.	Acomodación de la rueda de filtros.	46
54.	Vista lateral del ajuste de la rueda de filtros.	46
55.	Filtros disponibles: rojo, verde, azul, H alfa, SII, OIII, UV/IR-Cut/L y claro.	47
56.	Instalación de los filtros.	47
57.	Cubierta de la rueda de filtros con CCD guía.	47
58.	Montaje completo: micro-enfocador + rueda de filtros + cámara CCD en telescopio.	48
59.	Cámara AllSky de Moonglow Technologies.	48
60.	Diagrama de la electrónica para el control ON/OFF del capturador de vídeo.	50
61.	Diagrama de la distribución de componentes de la cámara de cielo.	50
62.	Caja de control de la cámara de cielo con Raspberry Pi instalada en la sede de oriente de la UdeA.	51
63.	Montaje general, solo se requiere potencia eléctrica y un cable de red.	51
64.	Diagrama general del software usado en la cámara de cielo.	52
65.	Diagrama general del código de la cámara.	52
66.	Interfaz VLC para el acceso a la cámara.	53
67.	Apertura del menú de preferencias.	54
68.	Configuraciones de vídeo completas y configuración de la ruta de guardado de las capturas.	55
69.	Configuración filtro de escena.	55
70.	Activación filtro de escena.	56
71.	Ejemplo de los datos entregados por el GPS en la consola.	59
72.	Problema de condensación de humedad sobre el domo de la cámara.	60
73.	Solución al problema de condensación, en la cual se uso: una resistencia que se conecta por USB para calentar el domo, una bolsa de gel de sílice para absorber la humedad y cinta adhesiva para sellar el espacio entre el domo y el soporte.	60
74.	Estación meteorológica DAVIS VANTAGE PRO2.	61
75.	Interfaz de comunicación serial de la estación meteorológica.	61
76.	Comparación estructura controladores de hardware de tipo: monolítico, extensible y abierto (ASCOM). Imagen tomada de: http://www.ascom-standards.org/	62
77.	Diagrama de operación de INDI, puede verse su función como interfaz entre clientes y dispositivos. Tomado de: http://indilib.org/about/discover-indi.html	63
78.	Diagrama elementos OARA.	65
79.	Diagrama del OARAB diseñado.	68

80.	Sistema operativo Raspbian en la pagina de descargas oficial.	70
81.	Etcher: software para cargar el sistema operativo de la Raspberry Pi. . .	71
82.	Escritorio del sistema operativo y asistente de configuraciones iniciales. .	72
83.	Comando <i>raspi-config</i> para la activación de periféricos.	72
84.	Interfaz acceso remoto RealVNC.	73
85.	Imagen remota del sistema de monitoreo visual del estado del telescopio.	74
86.	Componentes del sistema de monitoreo.	74
87.	Diagrama de la solución final del sistema de monitoreo.	75
88.	Opciones de configuración del sistema de monitoreo.	76
89.	Detalle del modulo de control ON/OFF.	77
90.	Detalle de la web que permite controlar desde la red local el encendido y apagado del los equipos.	77
91.	Diagrama final del modulo para encendido y apagado del telescopio y la cámara CCD.	77
92.	Código modulo para encendido y apagado del telescopio y la cámara CCD.	77
93.	Lámpara controlada por WiFi.	78
94.	Diagrama final de la lámpara de monitoreo.	78
95.	Simulador del domo.	79
96.	Simulador de la montura ecuatorial.	79
97.	Diagrama del código del simulador del domo y la montura.	79
98.	IMU (Inercial Measurment Unit).	80
99.	Sensor de Corriente.	80
100.	Diagrama del montaje del sistema de supervisión y diagnostico.	80
101.	Diagrama del código del sistema de supervisión y diagnostico.	80
102.	Posiciones validas del telescopio.	81
103.	Aceleraciones medidas.	82
104.	Velocidades angulares medidas.	82
105.	Campo magnético medido.	82
106.	Corriente medida.	82
107.	Sistema de control basado en StellarMate (Ubuntu Mate + KStars + INDI) para el control de telescopio, cámaras y accesorios.	83
108.	Diagrama de la integración del sistema de control.	84
109.	Diagrama de la integración del sistema de control con la Raspberry en modo servidor INDI.	85
110.	Configuración de los filtros en INDI-KStars.	86
111.	Prueba de captura de imagen con los filtros usando INDI-KStars.	86
112.	Configuración de las pruebas de apuntamiento.	88
113.	Error apuntamiento de la Luna. El circulo blanco tiene diámetro de 1 grado y esta cerca del error actual de la montura.	89
114.	Error de apuntamiento a Marte antes de realizar el proceso de sync, donde el error era mayor, se resalta el recuadro con la imagen entregada por la cámara principal con Marte centrado.	89
115.	Error de apuntamiento a la estrella Altair luego de 3 puntos sincronizados.	90
116.	Modelación de la protección de la cámara de vigilancia basada en Rasp- berry Pi.	92
117.	Montaje físico de la cámara de vigilancia basada en Raspberry Pi.	92
118.	Cielo completamente cubierto de nubes.	93
119.	Resultado procesamiento, nubes detectadas en Azul.	93

120. Cielo parcialmente cubierto.	93
121. Resultado procesamiento, nubes detectadas en azul.	93
122. Cielo levemente cubierto.	94
123. Resultado procesamiento, nubes detectadas en amarillo.	94
124. Diagrama del simulador HandBox intermedio para Linux.	95

1. Introducción

Los observatorios robóticos han cambiado el acceso al cielo ya que estos pueden ser operados desde cualquier lugar del mundo con acceso a internet, reduciendo los costos operativos del equipo, al no tener que desplazarse hasta el sitio donde se encuentra el telescopio, idealmente alejado de fuentes de contaminación lumínica como ciudades o pueblos y a gran altura (menores distorsiones atmosféricas), además en zonas tropicales como Colombia donde los cielos están cubiertos por nubes gran parte del año, resulta un gran ahorro de tiempo el no realizar desplazamientos con la intención de observar el cielo, para terminar viendo nubes o lluvia, en un lugar remoto y frío.

Que el observatorio sea autónomo implica no tener que esperar mientras el instrumento realiza las observaciones, ya que éstas pueden ser programadas y recuperadas con posterioridad. Pero para realizar esto, el observatorio debe ser capaz de obtener datos de su ambiente para tomar decisiones de manera automática, como cancelar una observación y cerrar el domo en caso de detectar condiciones ambientales desfavorables (lluvia, cielo nublado, fuertes vientos).

En la actualidad existen gran número de telescopios robóticos ([Gomez and Fitzgerald, 2017](#)), los cuales son una pieza fundamental para todo observatorio robótico. Estos se encuentran ubicados en algunos de los lugares más privilegiados para observación en nuestro planeta, desiertos a gran altura como el de Atacama en Chile, lugares remotos alejados de los centros urbanos y pueblos, lejos de la contaminación lumínica. Estas locaciones presentan bajas temperaturas, bajos niveles de oxígeno y fuertes vientos, condiciones hostiles para los equipos, instalaciones y humanos.

1.1. Necesidad de una facilidad observacional para la UdeA

Desde que se creó el pregrado de Astronomía en la Universidad de Antioquia en el año 2009, tanto estudiantes como profesores e investigadores, han carecido de un observatorio astronómico propio por medio del cual se puedan realizar prácticas académicas e investigativas. En el año 2012 la Universidad adquirió un telescopio MEADE de 14 pulgadas de referencia LX850 ([MEADE, 2016](#)). Dicho telescopio integra tecnología de guía automática, seguimiento de estrellas y cuenta con un catálogo de más de 140,000 cuerpos celestes, además posee un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) que asiste el proceso de orientación del equipo. Pese a lo novedoso del mismo, no contaba con un espacio propicio para su continua operación.

En la actualidad el telescopio LX850 se encuentra ubicado en un espacio provisional en el observatorio astronómico del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM); con el cual la UdeA ha establecido un convenio de cooperación. El ITM cuenta con una oficina y una cúpula como parte del observatorio, que están disponibles para personal del ITM y la UdeA, pero el lugar se encuentra en un área próxima al centro de la ciudad lo que limita la observación astronómica debido al alto índice de contaminación lumínica producto del alumbrado público de la ciudad.

Con el fin de trasladar y permitir el debido funcionamiento del telescopio LX850, este debía ser desensamblado; ya que el peso del sistema completo que incluye el trípode,

montura, contrapesos y tubo óptico, es cercano a los 100 Kg. El sistema era transportado por partes y ensamblado de nuevo en un lugar con los requerimientos mínimos para su uso. El proceso de transporte es de extremo cuidado debido a la fragilidad de los espejos y lentes que se encuentran contenidos dentro del tubo óptico. Se debe aclarar que, al finalizar la observación, el telescopio era desmontado, transportado y ensamblado para su almacenamiento, quedando así a la espera de una nueva operación. Si el cielo anticipaba malas condiciones se cancelaba la observación evitando arriesgar los equipos, lo que limitó enormemente el tiempo de observación y pruebas.

El extenso y difícil proceso que requiere el telescopio LX850 para su transporte y puesta en funcionamiento, ha generado grandes periodos de inactividad del mismo, ha sido implementado en algunas observaciones de fenómenos astronómicos particulares como tránsitos planetarios. Para las prácticas observacionales, los investigadores han utilizado instrumentos de menor tamaño y capacidad, con una mayor facilidad de manipulación.

El determinar un lugar apto para la instalación permanente del equipo daría solución parcial al problema, pero dependiendo del lugar elegido, sea en la ciudad o en lugar con clima adecuado, complicaría respectivamente o la observación del cielo ([Comunicaciones Planetario, 2014](#)) o el transporte a este lugar. En la ciudad de Medellín hay observatorios ([ITM, 2016](#)), así resulta pertinente que el observatorio sea ubicado fuera de la zona urbana, en un lugar más apto para realizar observaciones (con mínima contaminación lumínica). Sin embargo, se resalta que una ubicación más remota y a mayor altura hace evidente el problema de los observatorios no robóticos, que es desplazarse para poder trabajar con los equipos, sin garantías de cielos despejados.

1.2. La robotización como solución

Avanzar en la robotización del telescopio de la UdeA fue el problema a resolver durante el desarrollo de este trabajo, de forma que este pueda ser montado en casi cualquier lugar siendo operado de forma remota, lo que optimiza el uso por parte de los estudiantes e investigadores del pregrado de Astronomía, además, de la comunidad que gira alrededor de dicha área. Según concluye [Castro-Tirado \(2010\)](#), los OARABs (Observatorios Astronómicos Robóticos Autónomos Básicos), optimizan el tiempo de observación, ya que observan el cielo siempre que el clima es propicio y pueden ser ubicados en sitios con mejores propiedades observacionales. En el ámbito global existen más de 100 observatorios de tipo OARAs (Observatorios Astronómicos Robóticos Autónomos) y OARABs ([Castro-Tirado, 2010](#)), pero a nivel nacional no se han desarrollado este tipo de equipos. El desarrollo de este proyecto aporta al esfuerzo de consolidar facilidades observacionales, que soporten la recolección de datos astronómicos en Colombia.

1.3. Caso LX850-UdeA

Para abordar el problema de robotizar el telescopio se inició con la búsqueda de los equipos con los cuales contaba la universidad, esta actividad incluyó identificar los alcances en términos de presupuestos de los equipos adicionales que serían requeridos. Esta búsqueda dio como resultado la identificación de componentes faltantes como el cable USB serial

para la comunicación y control del telescopio desde un computador, también fueron identificados la cámara CCD, rueda de filtros y la estación meteorológica. Para iniciar las pruebas de control de los equipos fue preciso fabricar algunos dispositivos y facilidades, como un cable USB a Serial específico para el telescopio lo que requirió realizar un proceso de ingeniería inversa.

Este trabajo hace un recorrido histórico por los proyectos de observatorios robóticos y autónomos, cubriendo los más reconocidos en la literatura, luego presenta dos experiencias de Argentina y Brasil en la operación de observatorios astronómicos y sus sistemas de control. Posteriormente se abordan conceptos de la astronomía de posición que deben ser tenidos en cuenta para la correcta operación del sistema de control del observatorio. Finalmente se describe el proceso realizado para avanzar en el objetivo de desarrollar un OARAB, exponiendo la ingeniería inversa realizada y los desarrollos y pruebas adelantadas. Adicionalmente se presenta el estado actual del equipo y se proponen una serie de trabajos futuros.

2. Conceptos de Astronomía

En esta sección se dará un vistazo general de los conceptos del área de la astronomía de posición que resultan de importancia para el funcionamiento de los observatorios astronómicos, tales como las coordenadas celestes que permiten rastrear la ubicación de los cuerpos celestes y los movimientos aparentes de estos objetos, que deben tenerse en cuenta para poder seguirlos y registrarlos de forma efectiva. La información de este capítulo es tomada principalmente del libro *Elementos de astronomía de posición* del profesor José Gregorio Portilla (Portilla Barbosa, 2009).

2.1. Definiciones Básicas

Bóveda celeste

La bóveda celeste o esfera celeste es una esfera de radio indefinido, concéntrica a la Tierra, en la cual aparentemente se mueven los astros.

Cenit:

El cenit es el punto en la esfera celeste sobre el observador, justo encima desde el lugar desde donde se encuentra.

Nadir:

El nadir es el punto contrario al cenit, justo abajo del lugar donde se encuentra el observador.

Horizonte matemático

Se define como horizonte matemático el plano tangente a la Tierra en el punto desde donde se observa. Este plano al ser tangente a la tierra es perpendicular a la línea que conecta el cenit con el nadir.

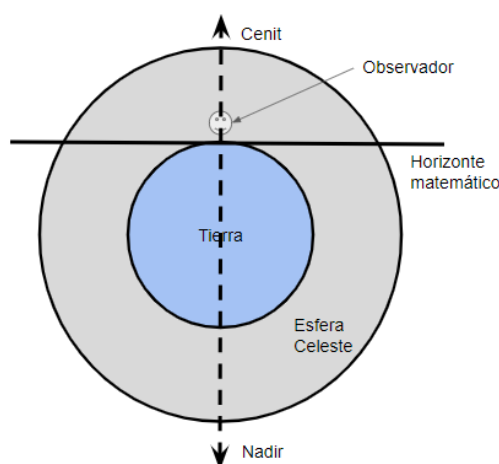


Figura 1: Definiciones básicas.

Puntos cardinales

Los puntos cardinales son los cuatro ejes de un plano cartesiano aplicados a la orientación en mapas o localización terrestre. Estos ejes por convención se usan en el eje vertical Norte arriba y Sur en el lado opuesto (abajo), del lado derecho tenemos el Oriente y a la izquierda el Occidente.

Polo norte y sur celeste

Son los puntos imaginarios sobre la esfera celeste donde el eje de rotación de la Tierra la intercepta.

Ecuador celeste

Es el plano perpendicular al eje de rotación de la Tierra que pasa por su centro, dividiendo la Tierra y la esfera celeste en un hemisferio sur y uno norte.

Meridiano del observador

El meridiano del observador es la línea o arco sobre la esfera celeste que intercepta: el polo sur celeste, el polo norte celeste y el cenit del observador.

Distancia Cenital

La distancia cenital es la distancia medida en grados sobre la esfera celeste que va desde el cenit del observador hasta el punto de interés.

Vertical de un astro

La vertical de un astro es una línea o arco sobre la esfera celeste que intercepta: el cenit, el nadir y el astro.

Circulo de declinación

El circulo de declinación de un astro es una línea o arco sobre la esfera celeste que intercepta: el polo norte celeste, el polo sur celeste y el astro.

2.2. Coordenadas Celestes

Permiten especificar con exactitud y de forma univoca la posición de los astros en la bóveda celeste, existen diferentes sistemas de coordenadas: horizontales, ecuatoriales horarias, ecuatoriales absolutas, eclípticas y galácticas. A continuación se exponen algunas de las más relevantes para el trabajo:

2.2.1. Coordenadas horizontales

Permiten ubicar la posición aparente de un astro respecto a la latitud y longitud de un observador para un instante de tiempo específico, tomando como referencia el horizonte matemático del observador (Figura 2). Estas coordenadas son:

- **Azimut (A)** (Intervalo: $0^\circ \leq A < 360^\circ$): Es un ángulo contado sobre el horizonte que se mide desde el punto cardinal norte en dirección al este (oriente) hasta la vertical del astro correspondiente.
- **Altura (h)** (Intervalo: $-90^\circ \leq h \leq 90^\circ$): Es el ángulo sobre la vertical del astro que se mide desde el horizonte hasta el astro correspondiente y su complemento es la distancia cenital z .

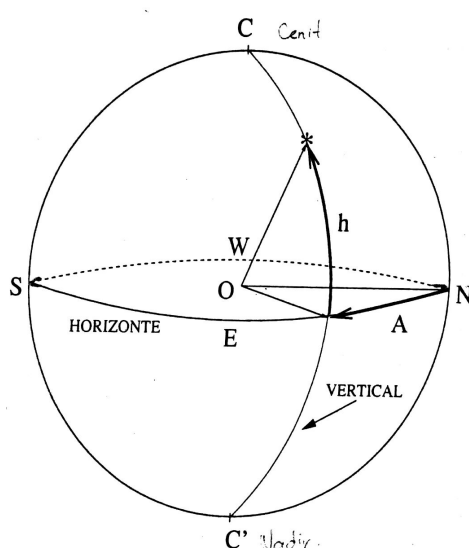


Figura 2: Coordenadas horizontales, tomado de: [Portilla Barbosa \(2009\)](#).

2.2.2. Coordenadas ecuatoriales horarias

Tienen como plano de referencia el ecuador celeste, estas coordenadas son parcialmente absolutas, ya que el ángulo horario (mostrado a continuación) depende de la ubicación del observador (Figura 3), veamos sus coordenadas:

- **Ángulo horario (H)** (Intervalo: $0^\circ \leq H < 360^\circ$ ó $0^h \leq H < 24^h$): Es medido sobre el ecuador celeste desde el meridiano del observador en dirección hacia el oeste hasta el círculo de declinación del astro.
- **Declinación (δ)** (Intervalo: $-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$): Es el ángulo medido sobre el círculo de declinación desde el ecuador celeste hasta el astro.

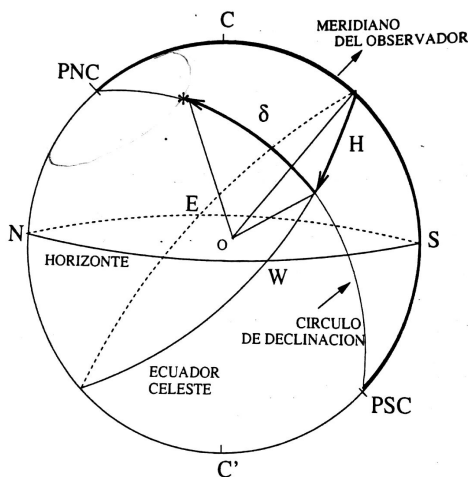


Figura 3: Coordenadas equatoriales horarias, tomado de: [Portilla Barbosa \(2009\)](#).

2.2.3. Coordenadas equatoriales absolutas

Tienen como plano de referencia el ecuador celeste, estas coordenadas son absolutas, ya que la ascensión recta se mide desde un punto particular (punto vernal (Υ), donde se cruza la eclíptica con el ecuador) independiente de la ubicación del observador (Figura 4), veamos sus coordenadas:

- **Ascensión recta (α)** (Intervalo: $0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$ ó $0^h \leq \alpha < 24^h$): Es medido sobre el ecuador celeste desde el punto vernal en dirección hacia el oeste o contraria a las manecillas del reloj, hasta el círculo de declinación del astro.
- **Declinación (δ)** (Intervalo: $-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$): Es el ángulo medido sobre el círculo de declinación desde el ecuador celeste hasta el astro.

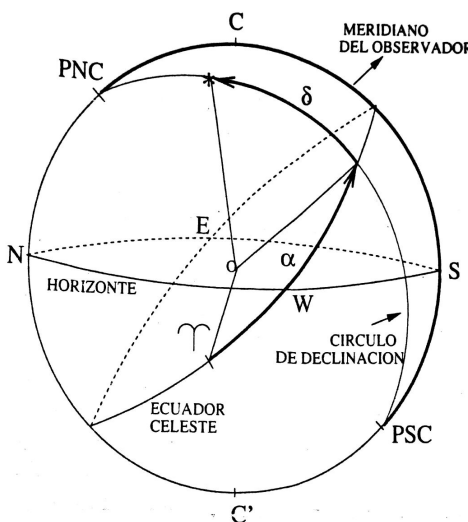


Figura 4: Coordenadas equatoriales absolutas, tomado de: [Portilla Barbosa \(2009\)](#).

2.3. Corrección de coordenadas

Existen diferentes fenómenos que afectan las coordenadas de los cuerpos celestes, entre ellas la precesión, la nutación, la aberración, el movimiento propio en el espacio, el pa-

ralaje, la refracción astronómica y la deflexión gravitacional de la luz. Muchas de estas afectan las coordenadas en pequeñas magnitudes y sus efectos son solo notables en periodos de tiempo muy grandes (miles de años), es por esto que se aborda la que resulta pertinente en magnitud a este trabajo como es el fenómeno de la refracción astronómica.

Refracción astronómica

Se denomina refracción al cambio de velocidad y dirección que experimenta la luz al pasar de un medio a otro con diferente índice de refracción. Este índice indica la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio, ($n = c/v$, donde n es el índice de refracción, c la velocidad de la luz en vacío y v la velocidad en el medio). La atmósfera de la tierra se comporta como un medio que tiende a modificar la dirección de la luz que proviene de los cuerpos celestes, de forma que al llegar a un observador en tierra, si el objeto observado esta cercano al horizonte, su luz se ha desviado en aproximadamente 34 minutos de arco, lo que es similar al diámetro del Sol (\odot) o la Luna (\circ), por lo que el objeto observado se ve mas alto en el cielo. Esto significa que cuando vemos el Sol salir por completo, realmente aun sigue oculto, y cuando toca el horizonte al atardecer, su posición real o geométrica ya esta bajo el horizonte, mientras que en el cenit presenta su posición geométrica en el cielo, este fenómeno se puede apreciar en la Figura 5.

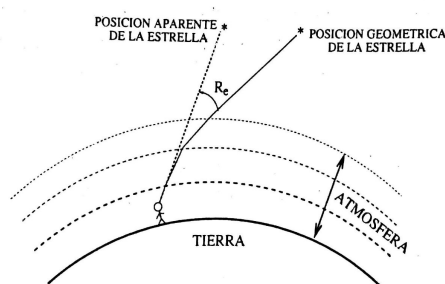


Figura 5: Refracción Astronómica, tomado de: [Portilla Barbosa \(2009\)](#).

2.4. Movimiento aparente de los objetos celestes

Todos los cuerpos celestes giran sobre si mismos, la Tierra (\oplus) en 24 horas, la Luna en 27 días y el Sol en 25 días, además se trasladan como el Sol por la Galaxia, la Tierra alrededor del Sol en 365,25 días y la Luna alrededor de la Tierra en 27 días.

Movimiento diurno

Se conoce como movimiento diurno al movimiento aparente de la bóveda celeste (cielo) de este (oriente) a oeste (occidente), que es debido a la rotación de la Tierra en sentido contrario (oeste-este). Este movimiento es tal, que pasadas 24 horas la bóveda celeste ha rotado 360° , debido a que la Tierra giro 360° , así su velocidad es de $360^\circ/24h$ ó $15^\circ/h$.

Movimiento del Sol y la Luna

Estos objetos debido a su marcada cercanía a la Tierra, se mueven separados de la bóveda celeste por lo que se encuentran de-sincronizados del movimiento diurno.

Todos los planetas de nuestro Sistema Solar, se mueven alrededor del Sol describiendo orbitas casi circulares, estos se mueven en dirección contraria a las agujas del reloj, si

miramos el Sistema Solar desde el polo norte celeste. Sabemos que la Tierra le da una vuelta al Sol en 365,25 días, por lo que en un día se mueve $360^\circ/365,25 = 0,98^\circ/\text{día}$ en dirección oeste-este (contraria al movimiento diurno), lo que se traduce en que el cielo o bóveda celeste se mueve respecto al Sol a un ritmo de $0,98^\circ/\text{día}$, así los objetos en la bóveda celeste se posicionan 4 minutos mas temprano respecto a noche anterior (recordado que la tierra gira a $15^\circ/\text{hora}$ ó $0,25^\circ/\text{minuto}$ y conociendo que los objetos aparecen $0,98^\circ$ antes en el cielo, encontramos que en minutos se ubican $(0,98^\circ/0,25^\circ) * \text{minutos}$ ó 3 minutos con 55,2 segundos antes).

La Luna, el único satélite natural de la Tierra, tarda 27 días en darle la vuelta, por lo que la velocidad que lleva respecto a la Tierra, o la bóveda celeste es de $360^\circ/27 = 13,3^\circ/\text{día}$, su dirección es contraria al movimiento diurno al igual que el Sol, y es por esto que su movimiento aparente es una combinación del movimiento de la Luna alrededor de la Tierra y el movimiento diurno, de modo que cada día la Luna sale retrasada respecto al día anterior $13,3^\circ$ lo que equivale a 53 minutos $((13,3^\circ/0,25^\circ) * \text{minutos} = 53,2 \text{ minutos}$ ó 53 minutos y 12 segundos).

Movimiento de los planetas

Los planetas de nuestro Sistema Solar (llamados antes estrellas errantes) se desplazan vistos desde el norte celeste en dirección contraria a las manecillas del reloj. Este movimiento visto desde la Tierra se ve como que todos los planetas van en dirección oeste-este, lo que se conoce como movimiento directo, pero en ocasionalmente debido a que la Tierra también se mueve, es posible ver que los planetas se detienen, cambian de dirección, este-oeste (movimiento retrogrado) y avanzan en este sentido un par de días para luego detenerse nuevamente, retomando su dirección inicial. Esto es soportado por el hecho que los planetas se mueven a diferentes velocidades, las cuales dependen de su distancia promedio al Sol, por lo que, por ejemplo, en el tiempo que la Tierra completa un vuelta, Mercurio completa cuatro (los planetas interiores a la Tierra, completan giros mas rápidos), mientras que en lo que Júpiter completa una revolución al Sol, la Tierra paso las 11. A causa de estas diferencias en velocidades, los planetas observados desde la Tierra aparentan realizar pequeños bucles en el cielo.

2.5. Magnitudes y brillos de los objetos celestes

Una de las propiedades más importantes de los objetos en el cielo es su brillo. Para medirlo se usa una escala denominada magnitud. La primera escala de magnitud fue implementada por Hiparco de Nicea en el Siglo II a.c., la cual presentaba 6 categorías las cuales fueron usadas para categorizar los objetos vistos con el ojo desnudo (sin óptica adicional). La escala fue actualizada en los 90 obedeciendo a los nuevos desarrollos en óptica que permiten ver objetos cada vez más tenues y respetando lo realizado por Hiparco, así la nueva convención va de los objetos más tenues (magnitudes grandes como de galaxias muy lejanas de alrededor de 30) hasta el objeto más brillante del cielo, el Sol con magnitud muy pequeña igual a -26,5. La magnitud 0 en todas las longitudes de onda fue atribuida por convención a la estrella Vega.

2.6. Observando a través de la atmósfera

La mayor parte de la historia de la observación astronómica estuvo limitada por la atmósfera. En los últimos años la ubicación de los equipos (en desiertos a gran altura y el espacio) y la tecnología (uso de técnicas como interferometría u óptica adaptativa) ha permitido sobrepasar estas limitaciones, algunas de las más importantes son expuestas a continuación:

Extinción

Este proceso reduce el flujo de luz y tiene como origen la absorción y emisión de fotones que se da en la atmósfera producto de la interacción de la luz con la materia la cual cambia su dirección, reflejando en gran medida ciertas longitudes de onda lo que termina extinguiendo la luz que llega, las principales moléculas que participan en este fenómeno son el H_2O , CO_2 , O_2 y O_3 .

Emisión lineal y térmica

Durante el día la energía proveniente del Sol genera un fondo de ruido indeseado al calentar la atmósfera, que satura los espectros visibles e infrarrojos, en la noche además de la luz de la Luna, la des-excitación de moléculas en la alta atmósfera generan un resplandor de las nubes en el infrarrojo lo que limita las observaciones en estas longitudes de onda.

Refracción

Es el fenómeno óptico, que altera la posición aparente de los objetos en el cielo y dispersa la imagen espectralmente, debido a la densidad de la atmósfera que curva la luz que llega de los objetos en función del ángulo en el cual entra la luz, su longitud de onda, la humedad y altura. Empieza en 0 en el cenit y va hasta cerca de medio grado en el horizonte. Algo interesante de destacar es que la atmósfera funciona como un prisma, dispersando más las longitudes de onda pequeñas (hacia el azul o ultravioleta).

Turbulencia

La turbulencia reduce la nitidez de los objetos en el cielo y tiene como origen la naturaleza de los vientos y la convección de los gases de la atmósfera, lo que mezcla las diferentes capas de la atmósfera con índices de refracción distintos cambiando esporádicamente el ángulo de incidencia de la luz que la atraviesa, generando cambios en la intensidad y posición de la luz que llega al telescopio. Este fenómeno es conocido como "seeing", la distorsión generada por la atmósfera es mayor entre más cerca está al nivel del mar, ya que el índice de refracción es mayor y su interacción con la luz por consiguiente es mayor. El índice de refracción es proporcional a la densidad del aire (que es proporcional a la presión e inversa a la temperatura) y es despreciable por encima de los 20 Km donde la atmósfera presenta bajas presiones y un índice de refracción bajo.

El seeing degrada la imagen principalmente de dos formas, moviendo la imagen y difuminándola o tornándola borrosa.

3. Observatorios Astronómicos

Los observatorios astronómicos robóticos autónomos básicos (OARAB) están compuestos por diferentes subsistemas (Schmitt et al., 2014). Cada uno de estos se comunica con el sistema de control maestro (SCM), el cual monitorea y responde a las órdenes de los usuarios conectados vía internet. En la Figura 6 se puede apreciar la estructura básica de un OARAB.

3.1. Observatorios Robóticos, Autónomos y Teleoperados

Los telescopios robóticos surgieron de la mano del desarrollo de los dispositivos electrónicos, datan del 1968 (Castro-Tirado, 2010), y fueron evolucionando, presentando mejoras significativas en la autonomía, las épocas claves con las características más importantes de estos equipos se listan en el cuadro 1.

Años	Tipo de Observatorios	Descripción
1968-1975	Telescopios con agenda automatizada	Pequeño computador, que almacenaba una agenda precargada
1975-1984	Telescopios operados remotamente	Operado remotamente por medio de ondas de microondas y computadoras
1984-2000	Observatorios robóticos autónomos	Responden al clima, poseen una agenda precargada y operan usando internet
2001-2010	Redes de observatorios robóticos autónomos	Redes de telescopios, alertas de observaciones de interés, protocolos comunes

Cuadro 1: Histórico de mejoras significativas. Condensado de Castro-Tirado (2010).

ROTSE-III es una red de telescopios robóticos que buscan eventos específicos en el cielo relacionados con destellos de rayos gamma (Akerlof et al., 2002). Esta red es presentada como un sistema económico que puede ser instalado en lugares remotos de la Tierra; el cual cuenta con siete sistemas principales: los instrumentos ópticos (lentes), el tubo óptico que contiene los lentes, una cámara CCD (en inglés Charge-Coupled Device), la montura del tubo óptico, una cubierta que protege todo el sistema del medio ambiente, sensores para medir condiciones ambientales, además, posee un sistema de adquisición

de información que permite gestionar el almacenamiento de información de la cámara y los sensores ambientales, entre otros. Este trabajo usó sensores de posición angular de tipo codificación (encoders) de ranura optoelectrónicos incrementales, los cuales ajustan llevando a ceros el equipo, girando en un sentido hasta que el tubo óptico acciona un sensor de tipo fin de carrera, sin embargo este procedimiento implica un desajuste que posteriormente se calibra al tomar una serie de fotografías de prueba durante el crepúsculo.

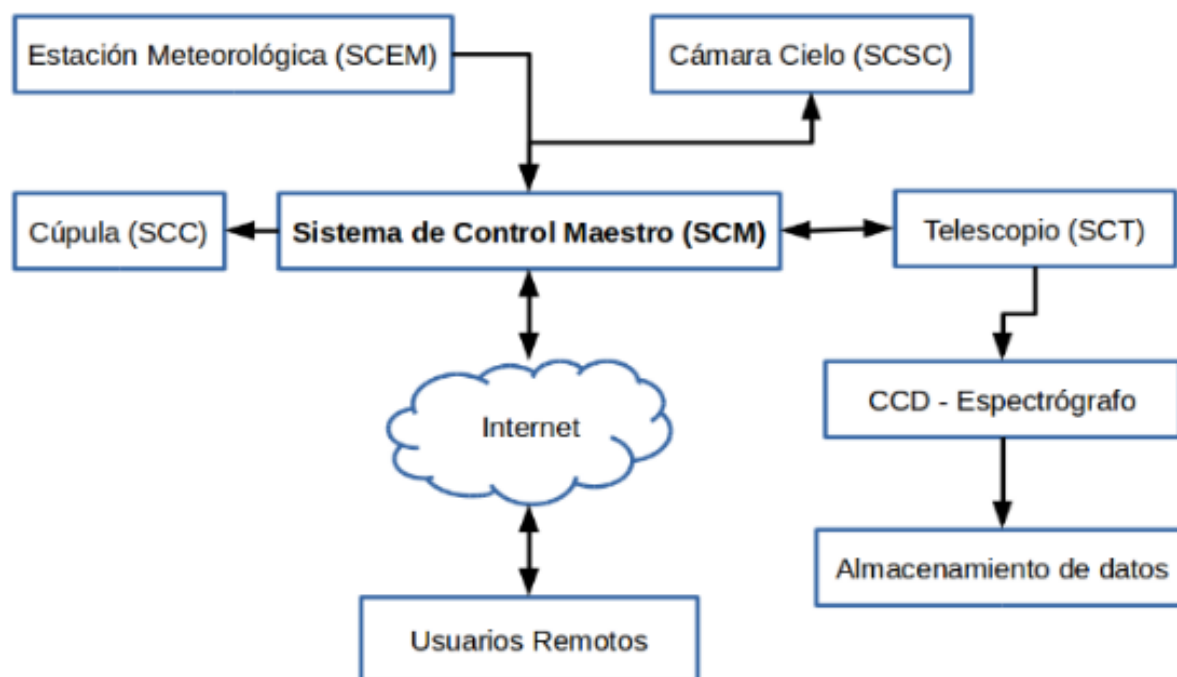


Figura 6: Esquema observatorio básico.

Los telescopios robóticos Wolfgang y Amadeus (Strassmeier et al., 1997), poseen tres servomotores que controlan el enfoque de los espejos primarios, el circuito principal que posee dos computadoras que operan a 133MHz y seis tarjetas electrónicas para el control y manejo de los siguientes sistemas:

- Servomotores
- Fotómetros y medidores de variables lumínicas
- Grabación de imágenes de la cámara CCD
- Conversores análogos-digitales para los sensores de temperatura de los fotómetros
- Puerto Ethernet
- Puerto rs-232

Estos telescopios usan el sistema operativo Red Hat Linux. Poseen sistemas de potencia para los motores y el computador, fuentes de alto voltaje para los fotómetros, un monitor y un teclado para cada telescopio. Adicionalmente cuentan con un sistema de respaldo eléctrico el cual consiste en una UPS (Sistema de alimentación ininterrumpida del inglés Uninterrupted Power Supply) de 5 kW que puede entregar energía por al menos 15 minutos, aunque al transcurrir 10 segundos sin energía eléctrica, se activa un generador que

funciona mediante la combustión de petróleo que extiende el suministro de energía hasta 4 días.

El KELT (del inglés Kilodegree Extremely Little Telescope) (Pepper et al., 2007), es un pequeño telescopio robótico diseñado para buscar planetas alrededor de estrellas. Funciona al detectar el cambio de brillo de las mismas cuando un planeta pasa frente a ellas. Para el desarrollo de este equipo fueron usadas una cámara CCD con un controlador termoeléctrico de temperatura, además, se implementaron elementos como una montura robótica Paramount ME; que básicamente es una montura ecuatorial diseñada para operar de forma robótica integrada a un telescopio y una cámara, con un error periódico menor o igual a 5 arsec, error que resulta menor que los píxeles de la cámara CCD que usaron.

Este sistema está controlado por un computador que ejecuta el software Bisque Observatory desarrollado por Software Bisque, pero usa tres aplicaciones independientes:

- Aplicación para la montura robótica.
- Aplicación para la cámara.
- Aplicación para integrar la operación de las primeras.

El KELT es usado en dos modos diferentes de operación; modo campaña con un lente de 200 mm y un modo de inspección con un lente 80 mm, que respectivamente, permiten que el equipo posea un aumento mayor o menor.

La cantidad de información generada por estos equipos también se ha convertido en un tema de estudio emergente (Vestrand et al., 2004), debido a que las cámaras de los observatorios son cada vez más avanzadas y entregan imágenes con un mayor nivel de detalle, cubren diferentes espectros y pueden observar durante largos periodos de tiempo, lo que ha alargado la tarea de realizar el procesamiento de los datos por parte del ser humano. Debido a esto surge la necesidad de desarrollar un observatorio que no solo se encargue de captar información, sino que pueda procesar y entregar datos condensados y útiles para los investigadores.

En trabajos mas recientes como el de Smith et al. (2016) se plantea como es el proceso de agregar un telescopio robótico a la red de telescopios robóticos Skynet¹. Esto muestra la importante tendencia de estos equipos de operar en red, lo que permite hacer un mejor uso de estos, compartiendo e intercambiando tiempo de observación en telescopios ubicados en diferentes latitudes. Otra red de telescopios robóticos es la red GLORIA², la cual es presentada como la primera red de acceso libre, que empezó con 18 telescopios (Castro-Tirado et al., 2014), que busca acercar la ciencia al público.

La red de telescopios robóticos Master-2 (Gorbovskoy et al., 2013), localizada en Rusia, comparte igual interés por la detección de eventos de explosiones de rayos Gamma, esta red permite mas de 1000 noches de observaciones al año, lo que es una capacidad sorprendente, además a 2010 esta red superaba el numero de observaciones exitosas de eventos de rayos gamma. Estas observaciones son soportadas por la red GCN³, la cual es un sistema

¹Red de Telescopios Roboticos: <https://skynet.unc.edu/>

²GLObal Robotic-telescopes Intelligent Array: <http://gloria-project.eu/es/>

³The Gamma-ray Coordinates Network: <https://gcn.gsfc.nasa.gov/>

que publica las coordenadas de diferentes eventos transitorios, que son detectados por una red de satélites, esta red es mantenida por el Goddard Space Flight Center de la NASA.

Otras actividades que realizan las redes de telescopios es la búsqueda de exoplanetas (Bakos et al., 2012). Algunas de las redes especiales para esta tarea es la Hatsouth⁴, la cual cuenta con 6 telescopios diseñados para detectar planetas orbitando estrellas relativamente brillantes en el hemisferio sur. Este proyecto ha encontrado 35 exoplanetas (De Val-Borro et al., 2016).

3.2. Visitas técnicas

Debido a la ausencia de antecedentes en el país en procesos de robotización de observatorios y con el objetivo de aprender de experiencias previas, se realizaron 2 visitas académicas en el exterior. Estas permitieron identificar problemas en el proceso de operación del equipo (visita al IAFE en Argentina), y los detalles asociados al proceso de realizar una observación astronómica (visita al Observatorio Pico Dos Dias en Brasil).

3.2.1. Visita IAFE (Argentina)

Entre el 15 y el 20 de septiembre de 2017, se realizó una visita al Instituto de Astronomía y Física del Espacio - IAFE y se participó en un evento internacional de electrónica, en la ciudad de Buenos Aires, Argentina. Durante esta estadía se conocieron experiencias en el área de electrónica e instrumentación astronómica, la visita fue atendida por el doctor Mario Daniel Melita, del Instituto de Astronomía y Física del Espacio, el cual amablemente compartió información valiosa, entre la que se pueden destacar diagramas de control de telescopios, código e información procedente de la tesis de Kevin Allekotte Hallberg titulada: “Reducción de datos astronómicos basada en procesamiento de imágenes para la robotización de telescopios” (Hallberg, 2013). Uno de los diagramas compartidos se puede apreciar en la figura 7, donde se muestran las partes que componen el Observatorio Robótico del IAFE.

Luego de la visita al IAFE, se visitó el BIEL Light + Building Buenos Aires, este es el evento internacional más importante para la industria eléctrica, electrónica y luminotécnica de toda Latinoamérica. Es considerado el evento líder en el sector de habla hispana⁵.

En la visita a este evento se pudo identificar empresas que proveen equipos y servicios de interés para el proyecto, como son sistemas de protección contra rayos (como los de la Figura 8), y fabricantes de circuitos impresos, los contactos de estas empresas son listados en el Cuadro 2.

⁴Hungarian-made Automated Telescope Network-South: <https://hatsouth.org/>

⁵Bienvenidos a BIEL Light + Building: <https://biel-light-building.ar.messefrankfurt.com>

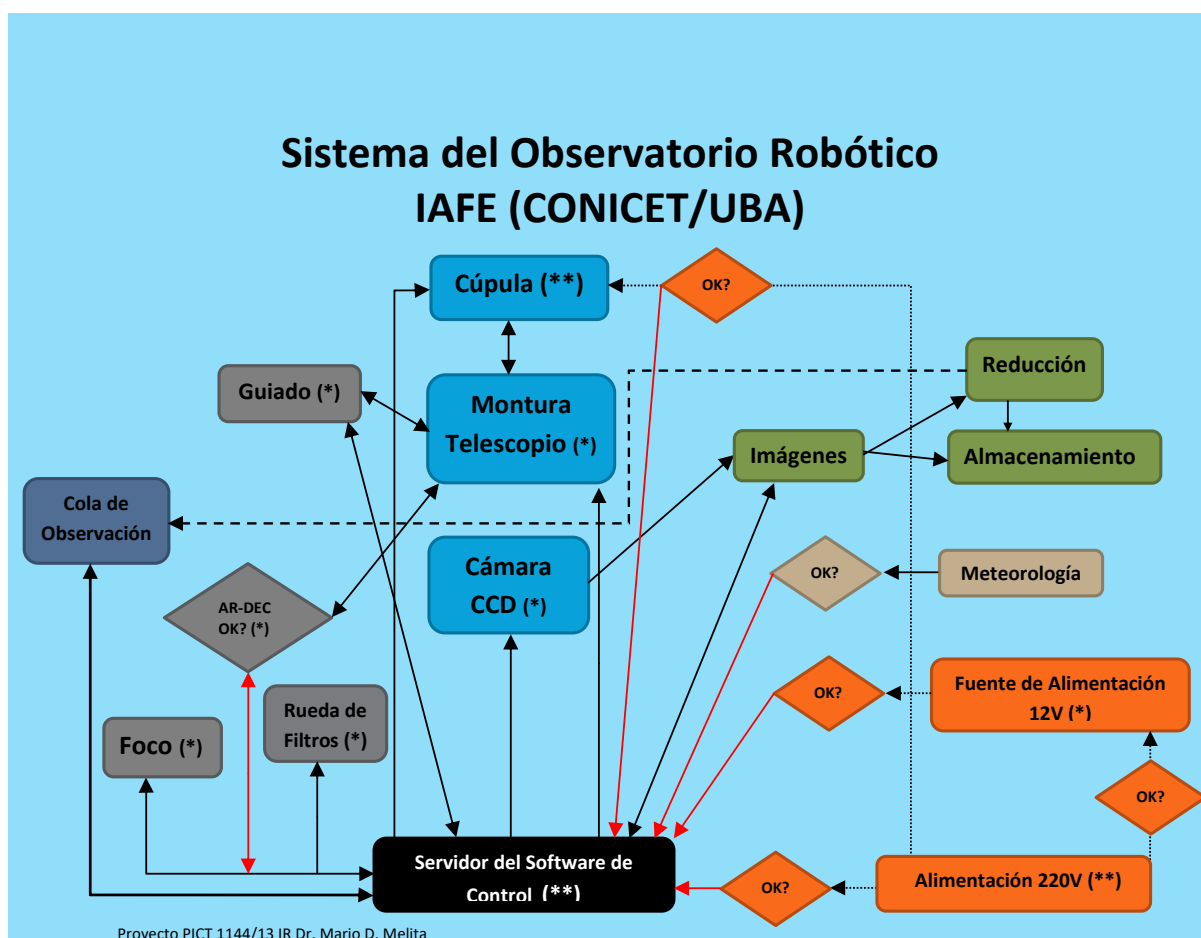


Figura 7: Diagrama Sistema de Control del Observatorio IAFE (CONICET/UBA).



Figura 8: Pararrayos activos.

Nombre Empresa	Producto o Servicio	Contacto
ENEXAR	Pararrayos activos y descargadores de sobretensión	www.enexar.com.ar Mauro Garcia (Socio y Gerente) mau-ro.garcia@enexar.com.ar Cel: +598 99 682 093 Tel: +54 11 4799 3319
ABB	Protecciones ante descargas atmosféricas y sobretensiones	www.abb.com Centro atención cliente argentina: 0810 222 0638
MICRO CONTROL	Gel de silicona aislante, para relleno y sellado de cajas de conexiones eléctricas	www.microcontrol.com.ar ven-tas@microcontrol.com.ar
Intertek	Certificación e inspección de productos eléctricos y electrónicos	www.intertek-ar.com +5411 5217 9487
IQC	Certificación de productos eléctricos	www.iqcsa.com.ar +5411 4342 7669
ERNESTO MAYER S.A.	Circuitos impresos	www.mayerpcb.com.ar +5411 4760 1322
SEI	Circuitos Impresos	www.seicircuits.com luciano Targón (Dir Comercial) +5111 4573 5807

Cuadro 2: Datos empresas relevantes para el proyecto identificadas en BIEL Light + Building Buenos Aires.

3.2.2. Visita al OPD (Brasil)

En el Observatorio Pico dos Dias (OPD) (Figura 9) en la ciudad de Itajubá, Brasil, se participó en observaciones astronómicas realizadas por estudiantes del pregrado de astronomía de la Universidad de Antioquia, lo que permitió identificar los detalles involucrados en una observación astronómica no robótica, también permitió conocer desde el aspecto técnico, el estado de un observatorio astronómico profesional de gran tamaño (1.6 metros), muy por encima de los equipos presentes en nuestro país, lo que permitió

dimensionar los desafíos técnicos y logísticos, asociados a este tipo de equipos.



Figura 9: Datos geográficos Observatorio Pico dos Dias - OPD.

Transmisión de potencia al domo

Debido al movimiento rotatorio que debe realizar el domo del observatorio, y el hecho que este requiere contar con diferentes mecanismos tales como grúas, lámparas y las compuertas que abren o cierran el domo, es necesario transferir potencia y cablear resulta una solución poco práctica, ya que los cables pueden fallar debido al constante movimiento. Así en el OPD se usa un conjunto de rieles y pedales que aseguran la transferencia de potencia eléctrica, los cuales pueden ser apreciados en las Figuras 10 y 11.

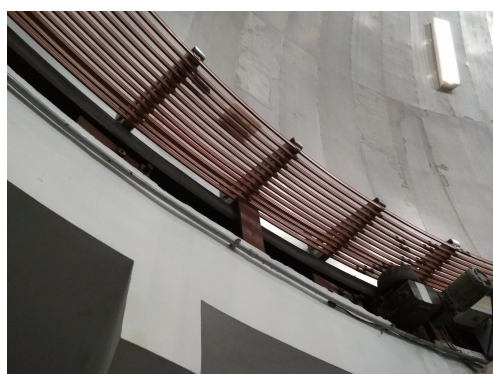


Figura 10: Rieles con canaleta.



Figura 11: Entrega de potencia a rieles.

Soporte domo

Los soportes de la cúpula o domo son los que la mantiene en posición, además permiten que la misma pueda rotar libremente. Los soportes usados presentan dos configuraciones: 1) vertical como el de la Figura 12 y 2) horizontal o radial como el de la Figura 13. El primero soporta la estructura y como podemos ver presenta un resorte que sirve de amortiguador, el segundo evita que el domo se salga y mueva excesivamente debido a vientos o deslizamientos laterales.



Figura 12: Soporte vertical domo.



Figura 13: Soporte radial domo.

Ubicación domo

El domo que protege el telescopio presenta una ranura por la cual el telescopio observa el cielo, esta ranura debe coincidir durante las observaciones con la posición del telescopio de forma que no se vea interrumpida la observación. Para esto es necesario conocer la posición del domo en todo momento. En el OPD usan códigos de barras con un lector de estos códigos, donde los códigos de barras son pegados en el perímetro del domo como se ve en las Figuras 14 y 15. Un mecanismo simple y practico que permite conocer la posición de forma absoluta y real (a diferencia de un codificador incremental en un motor, donde una falla en la transmisión, entregaría datos errados) del domo con precisión alrededor de los 10 cm, lo cual es mas que suficiente para cumplir con el objetivo de conocer la orientación del domo.



Figura 14: Codificador de posición.



Figura 15: Vista lateral del codificador.

Uso del telescopio

La finalidad del observatorio es obtener imágenes de objetos celestes. Estas imágenes denominadas por convención lights, capturan la luz proveniente del objeto de interés mas diferentes imperfecciones producto del paso de los fotones por los elementos ópticos hasta la cámara CCD. La cámara CCD en el proceso de transformar la luz en señales digitales también agrega error a la imagen final. Algunas de las imperfecciones que pueden ser corregidas, con el uso de procesamiento digital son las siguientes:

- Suciedad y partículas de polvo en los espejos y filtros.
- Píxeles defectuosos.
- Errores en el proceso de lectura de las cargas presentes en los píxeles.
- Ruido producto del calor presente en el sensor (que causa que los electrones salten por el detector CCD generando variaciones en las cargas capturadas de cada píxel).

Durante el proceso de observación en OPD se realizaron capturas de imágenes flats, darks y bias con el fin de identificar y remover las imperfecciones. Estas imágenes son capturadas en formato RAW (sin compresión y sin procesar) y sus características son:

Imágenes Flats:

Las imágenes flats permiten identificar las imperfecciones de la óptica, como bordes oscurecidos (viñeteo), mala alineación de la óptica que causa iluminación no uniforme y suciedad en espejos y filtros. Los flats son tomados en la posición de flat como se ve en la Figura 17, la cual consiste en apuntar el telescopio a un plano uniforme que es iluminado con una luz tenue (también puede usarse zonas del cielo sin nubes al atardecer o amanecer, sin Sol), generando una fuente uniforme de luz que pasa por las diferentes partes ópticas del telescopio, entregando información de su estado. Es importante antes de realizar un flat, que el foco, la ganancia o ISO, la rueda de filtros y cualquier elemento óptico adicional estén configurados y no sean modificados hasta realizar la captura de la imagen light. Cada cambio en la configuración de la óptica requiere realizar un nuevo conjunto de imágenes flat. El número de imágenes que se debe capturar es idealmente 20 o un poco mayor, pero el tiempo suele ser el problema, por lo que al menos 5 imágenes permiten realizar un promedio válido.

Imágenes Darks:

Estas imágenes capturan los problemas en píxeles y los errores generados por la temperatura del sensor. Estas imágenes devén ser capturadas usando la misma configuración que serán usadas en las tomas de imágenes lights, como son la sensibilidad o ISO, tiempos de exposición y temperatura del sensor. Realizar tomas de darks puede ser demorado dependiendo del objeto de interés y el tiempo de exposición elegido, ya que se requieren al menos 5 tomas para realizar el promedio.

Imágenes Bias o Offset:

Las imágenes bias permiten identificar el ruido de obturación del sensor y ruido de lectura de los píxeles. Se toman con el tiempo de obturación mínimo de la cámara CCD,

disparando varias fotografías con el domo cerrado y luces apagadas, luego se realiza un promedio de las imágenes tomadas, se recomiendan alrededor de 20 capturas. Estas imágenes pueden ser tomadas solo al inicio y final de la sesión de observación ya que a diferencia de las imágenes de flats y darks no depende de la configuración óptica del equipo.

Imágenes Light:

Estas imágenes son de los objetos celestes de interés, como planetas estrellas, galaxias, entre otras. Vienen acompañadas de las imperfecciones del equipo y devén ser sometidas a un proceso de reducción, el cual requiere imágenes flat, dark y bias.



Figura 16: Compuertas abiertas.



Figura 17: Posición de captura de flat.

Montura

La montura del observatorio de 1.6 metros del OPD es ecuatorial al igual que la del MEA-DE LX850. Es importante en este tipo de monturas tener un balance perfecto alrededor de los ejes, debido a que de no ser así pueden ocurrir esfuerzos excesivos que pueden dañar los equipos. Además, si los ejes se encuentran bien balanceados es mucho menos demandante para los motores mover el telescopio. En la Figura 18 se aprecia el juego de engranajes y motores que dotan de movimiento al eje de ascensión recta, mientras que en la Figura 19 se aprecia la montura ecuatorial.

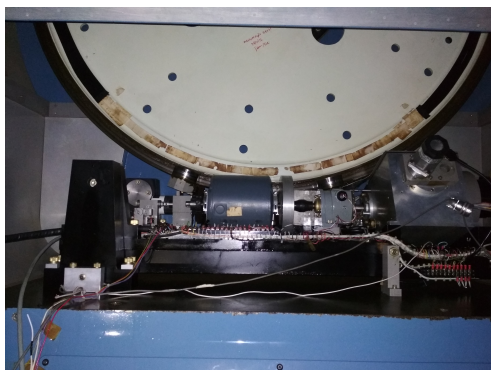


Figura 18: Engranaje del eje de ascensión recta.



Figura 19: Montura ecuatorial del telescopio.

Captura de imágenes y enfriamiento CCD

Para la toma de imágenes en el espectro visible se usó una cámara iKon-L, conectada por USB, la cual se presenta en la Figura 20. El sensor de la cámara CCD usada requiere operar a temperaturas de -75 grados centígrados en busca de reducir el ruido térmico de la electrónica, el calor extraído del sensor no puede ser enviado de inmediato al medio a través de un extractor debido a que este aire caliente puede contaminar la observación, por lo que resulta más apropiado transportar el calor por medio de un fluido a otro refrigerador más alejado del telescopio el cual irradia este calor al medio. Este proceso se presenta en las Figuras 20 y 21.



Figura 20: Conexiones de la cámara CCD, potencia en el centro, datos por cable USB del lado derecho, bajo uno de los conductos del líquido refrigerante.



Figura 21: Refrigerador externo de la cámara CCD.

Sistema de control de la montura

El sistema que controla el OPD 1.6, y otros de los observatorios más pequeños, está basado en una interfaz desarrollada en Labview, la cual permite, controlar la montura, el domo, las lámparas, la rueda de filtros, también muestra vídeo en vivo de las afueras del telescopio, y muestra el estado de los diferentes sistemas por medio de indicadores, esta interfaz puede verse en las Figuras 22 y 23.

Sistemas de guía y análisis de imágenes capturadas

Para guiar la observación y la toma de imágenes, se usaba un computador diferente al que corre el sistema de control del telescopio, este corre otras interfaces desarrolladas en LabView las cuales se ven en la Figura 24.

Para el análisis y la verificación de las capturas se usa el software IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)⁶. que se aprecia en la Figura 25, el cual permite, entre otras cosas, verificar la configuración del equipo y ajustar el foco, el cual se corría en otro ordenador independiente.

⁶IRAF: <http://iraf.noao.edu/>



Figura 22: Pestaña de control de la montura e indicadores, del software de control del telescopio del OPD.



Figura 23: Pestaña de control de lámparas y cámara, del software de control del telescopio del OPD.

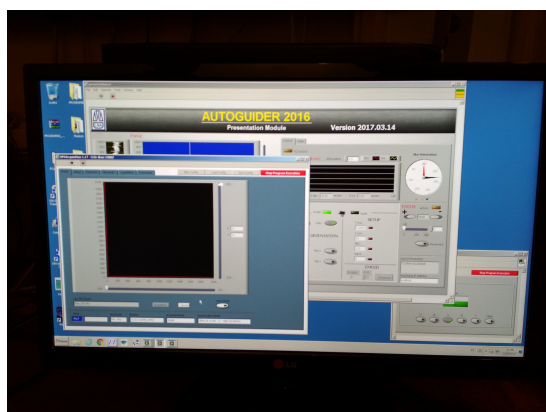


Figura 24: Interfaz de guía del telescopio.

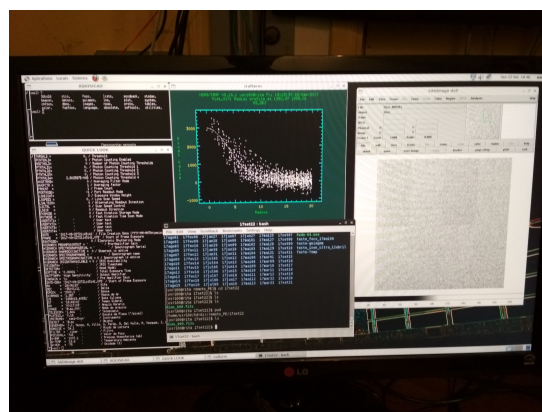


Figura 25: Software de análisis de imágenes IRAF.

Aluminización del espejo

El espejo al estar expuesto al medio ambiente, empieza a perder su desempeño el cual es reactivado por medio de un proceso de aluminización periódica, la cual se realiza en la cámara de vacío de la Figura 26. Luego de haber sido sometido a procesos químicos para limpiarlo, el espejo se somete a vacío por medio de las bombas de la Figura 27, y posteriormente se sublima aluminio dentro de la cámara usando resistencias eléctricas, así el aluminio sublimado se deposita uniformemente sobre la superficie del espejo, dándole vida nuevamente.

Protección contra rayos

Este sistema es uno de los de mayor importancia en relación con las condiciones del lugar del ODP, debido a que este observatorio está ubicado unos 800 metros por encima del nivel medio de la región y es una zona muy propensa a recibir descargas eléctricas, que pueden destruir la electrónica de los equipos. Por eso en el sitio podemos encontrar unos 4 pararrayos distribuidos sobre la planicie del cerro, en las Figuras 28 y 29 podemos ver el más grande todos.



Figura 26: Cámara de aluminización.



Figura 27: Bombas de vacío.

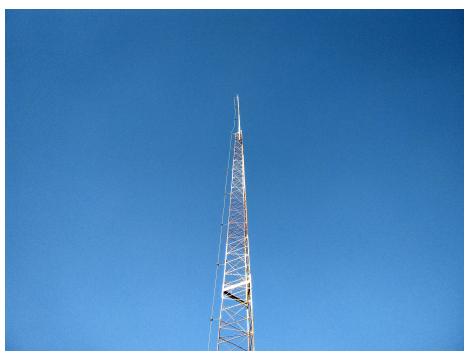


Figura 28: Pararrayos principal.



Figura 29: Visita desde el observatorio del pararrayos.

Calidad del Cielo

La calidad del cielo es uno de factores más importantes a la hora de observar. Las nubes pueden afectar capturas de larga exposición, también complican el proceso de enfoque y guía del telescopio, ya que si una nube interrumpe el sistema de guía el telescopio se pierde y el objeto se puede mover en la imagen. También puede modificar la observación al punto de que no aporte información relevante. El OPD cuenta con una cámara de cielo especial para el cielo nocturno la cual expone durante unos 30 segundos y permite identificar un gran número de objetos en el cielo. También el OPD cuenta con un monitor de seeing que da información de la cantidad de nubes sobre el cenit, estos equipos se pueden apreciar en las Figuras 30 y 31.



Figura 30: Cámara de cielo.



Figura 31: Monitor de seeing.

4. Identificación y caracterización del OARAB de la Universidad de Antioquia

Antes de iniciar el proceso de diseño del OARAB para la Universidad de Antioquia, fueron identificados los equipos disponibles, para usarlos como restricciones del diseño. Además se realizaron varios desarrollos con la intención de permitir la operación de los mismos, solucionando las limitaciones operativas debido a la latitud y los espacios disponibles. De la búsqueda realizada en la literatura fueron plasmados los instrumentos mas importantes en el cuadro 3.

Observatorio	Equipo	Características
Master-2	CCD Montura propia	FOV 8 °, 4000 x 4000 pixels Alta velocidad, retroalimentación de posición
Wolfgang y Amadeus	2 CCD Pulnix 840N Montura propia	Se usan en conjunto con foto multiplicadores para el azul (EMI-9124QB) y el rojo (EMI-9828) Error periódico luego de calibración de $\pm 30''$
El KELT	CCD Apogee AP16E Montura Paramount ME	4096x4096 pixels Robótica ecuatorial, error periódico luego de calibración de $\pm 5''$, hasta 75Kg de equipos
ROTSE-III	CCD Marconi Montura propia	2048 x 2048 pixels Ecuatorial en tenedor, apertura de 18 pulgadas.

Cuadro 3: Instrumentos comunes en observatorios presentes en el estado del arte en la sección 3.1.

4.1. Equipamiento básico de un OARAB

Para identificar el equipamiento básico que conforma un OARAB se realizó una búsqueda sistemática de información de observatorios astronómicos robóticos autónomos, conforme a la teoría descrita en Pérez Rave (2011) analizando la literatura relevante en todas las fuentes posibles. Como resultado de esta etapa se obtuvo información ordenada y actual del estado del arte de estos equipos. Esta información se presentó en la sección 3, así se identificó la ausencia de trabajos relacionados en la región, consignados en la literatura académica, pero de modo más informal se percibió el creciente interés en instrumentar telescopios al punto que puedan ser usados de forma remota. Instituciones como el ITM (Instituto Tecnológico Metropolitano), la UTP (Universidad Tecnológica de Pereira) y la Universidad de los Andes trabajan en estas áreas. También existen diversos observatorios en colegios, muchos de ellos pendientes de mejoras que faciliten la observación.

Conociendo los equipos más importantes que conforman otros observatorios astronómicos, se procedió a identificar los equipos disponibles en la Universidad de Antioquia. Además con el objetivo de conocer estos equipos, se realizó una búsqueda de las respectivas hojas de datos, información en foros y en general en la web, logrando identificar experiencias previas de integración de los mismos, iniciando con el telescopio MEADE LX850, considerando la existencia de accesorios e interfaces compatibles. Este proceso, acompañado de un trabajo de ingeniería inversa, permitió conocer mejor el equipo y sus interfaces, permitió el desarrollo de interfaces locales, agilizando el proceso de adquisición de partes y accesorios. Uno de los procesos de ingeniería inversa más extensos fue realizado sobre el telescopio, durante el cual se detectaron la presencia de componentes obsoletos y discontinuados. Esto condena al equipo a una obsolescencia programada, que esta de la mano de un control por parte de la empresa fabricante de los repuestos y precios ya que como ciertos componentes no se fabrican más, el mercado es cerrado. Es por esto que es de vital importancia realizar un proceso de ingeniería inversa que permita a futuro desarrollar una propuesta electrónica con la disponibilidad local de dispositivos que permita prolongar el uso y mantenimiento del equipo.

4.2. Telescopio

El telescopio usado en este trabajo es el *MEADE LX850* de 14 pulgadas (Figura 32). Está conformado por el elemento principal del telescopio el OTA (Optical Tube Assembly), el cual capta los fotones y una montura ecuatorial motorizada. En la figura 32 se observa un instrumento adicional cerca a donde la montura se une al OTA, el equipo es un telescopio guía, que contiene una cámara CDD que permite tener una imagen más amplia del cielo y permite orientar más precisamente el telescopio.

4.2.1. Análisis de la electrónica del telescopio

Se adelantó un proceso de ingeniería inversa en el cual se identificaron los componentes que conforman la placa electrónica principal del telescopio. Allí se identificaron los siguientes componentes:

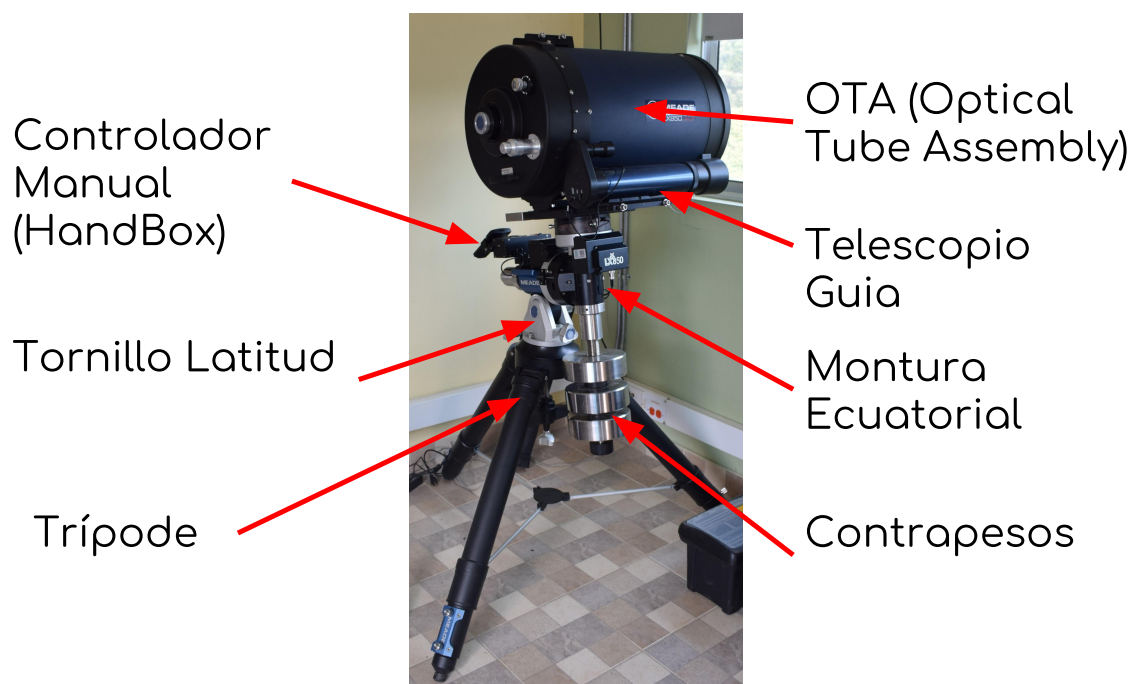


Figura 32: MEADE LX850-ACF 14" F/8.



Figura 33: Parte posterior del circuito de control del telescopio MEADE LX850.

Componentes de la capa trasera del circuito electrónico principal

- (AMD-Fujitsu) Am29F040B (6) (OBSOLETA) Memoria Flash 4 Megabit (512 K x 8-Bit) 6 unidades o 24 Mbytes de memoria Flash
- (NXP) 74HC02D 4 compuertas NOR de dos entradas cada una
- (TI) MAX232 (Conector serial discontinuado en ordenadores, requiere adaptador) conversor voltajes seriales
- (NS) LM2931 Regulador low dropout (0.2V)
- (CADDOCK) MP915-5.00-1 Resistencia de potencia
- (Microchip) (LX200BSE.hex) PIC16C62B microcontrolador 8 bits

Componentes de la capa superior del circuito electrónico principal

- (NXP-Freescale) MC68HC11E1CFNE2 microcontrolador 8 bits
- (NS) PC16552D Dual Universal Asynchronous Receiver/Transmitter with FIFOs
- (NS) PC16552D Dual Universal Asynchronous Receiver/Transmitter with FIFOs
- (TI) MAX232 conversor voltajes seriales
- (FAIRCHILD) MM74HC373 3-STATE Octal D-Type Latch
- (CYPRESS) CY62256N 256-Kbit (32 K x 8) Static RAM
- (International Rectifier) IRF7313 HEXFET power mosfet
- (Vishay Siliconix) Si4947ADY (2) Dual P-Channel 30-V (D-S) MOSFET
- (FAIRCHILD) MM74HC32 Quad 2-Input OR Gate
- (FAIRCHILD) MM74HC00 Quad 2-Input NAND Gate
- (FAIRCHILD) MM74HC138 3-to-8 Line Decoder

De los componentes anteriormente listados, es importante mencionar aquellos que se encuentran descontinuados como las memorias de referencia Am29F040B. De este proceso se puede concluir que la electrónica usada por este equipo es conveniente reemplazarla debido a que posibles fallas en ella, como las ocurridas en dos telescopios MEADE en Brasil, pueden dejar inoperante el equipo. Se sugiere desarrollar un sistema electrónico fabricado con componentes de bajo costo comerciales, que permita controlar el telescopio, facilitando el mantenimiento y las reparaciones futuras.

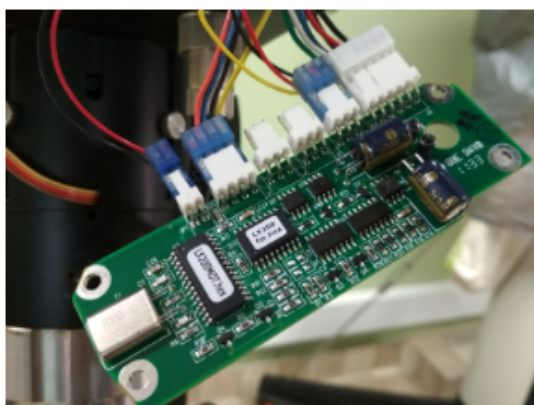


Figura 34: Tarjeta de control de los motores del MEADE LX850 (Vista superior).

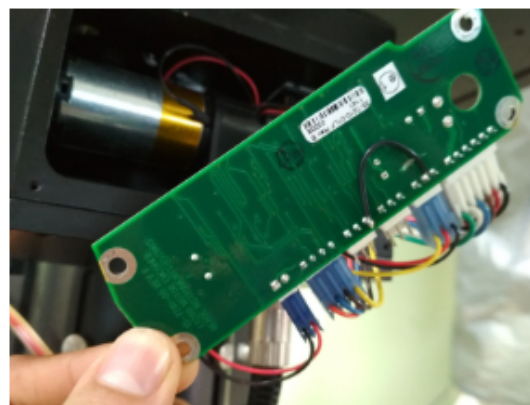


Figura 35: Tarjeta de control de los motores del MEADE LX850 (Vista inferior).

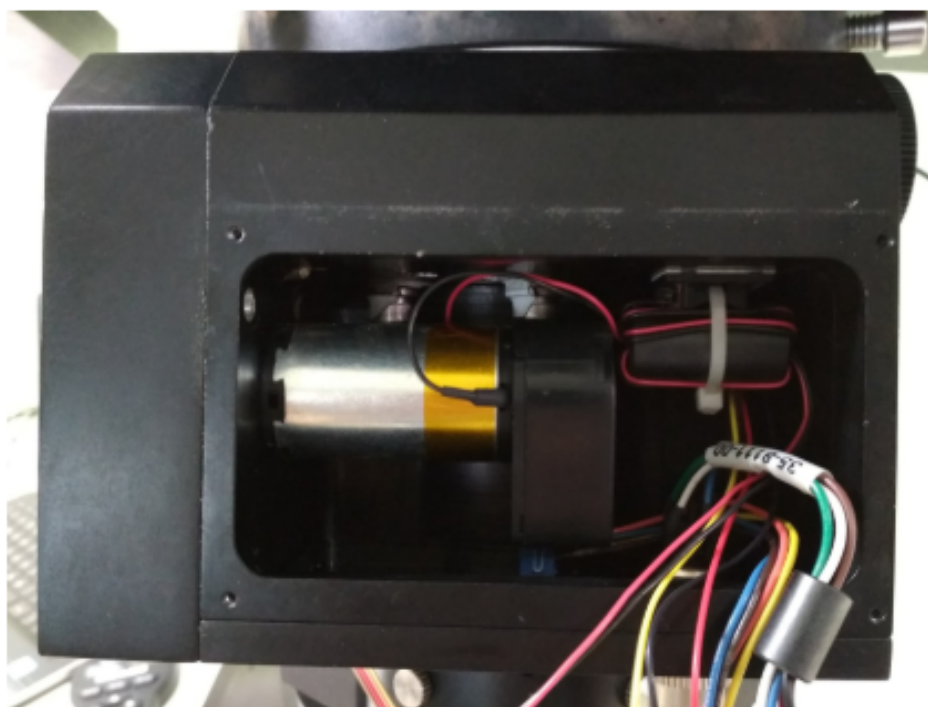


Figura 36: Compartimento motor ascensión recta.

4.2.2. Ingeniería Inversa PCB para el control de los motores del telescopio

La placa de control de los motores del telescopio MEADE LX850 que puede ser apreciada en Figura 34, esta presente dos veces en el telescopio, ya que controla ambos ejes, el de Ascensión Recta y el de Declinación. Estas placas están alojadas en la cavidad del motor (Figura 36). Esta placa tiene puertos para conectar el motor, el codificador de posición del motor, el puerto de conexiones del eje a la caja de control principal y un sensor para la detección del punto cero o "home" del eje.

Se realizó el levantamiento de los componentes que integran la placa electrónica de control de motores, con el fin de conocer como los motores son controlados y poder desarrollar, en trabajos futuros, una propuesta que permita el control de estos motores desde módulos compatibles con la plataforma Arduino.

- **PIC16C62B-20/SO:** Microcontrolador de 8 bits, encargado de comunicarse con el control principal, además de capturar las señales del sensor de home.
- **PIC16C54C-20/SO:** Microcontrolador de 8 bits encargado de responder a las señales entregadas por el codificador del motor para enviarla a microcontrolador encargado de comunicarse con el controlador principal del telescopio.
- **74HC02D:** Compuerta NOR usada para el acondicionamiento de la señal de control de motores y codificador.
- **74HC08D:** Compuerta AND usada para el acondicionamiento de la señal de control de motores y codificador.
- **Regulador LM2931M-5.0:** Regulador de 5V para la alimentación de los microcontroladores y compuertas, ya que del control principal provienen 12V.

- **Transistores SMD PNP y NPN:** Usados para la amplificación e inversión de señales, presente en pines no utilizados posiblemente por compatibilidad de placas entre telescopios.
- **RF7313:** Mosfet NPN, para el control de giro del motor.
- **Si4947ADY:** Mosfet PNP, este se encuentra fuera del mercado pero existen dispositivos compatibles como el Mosfet 4961.

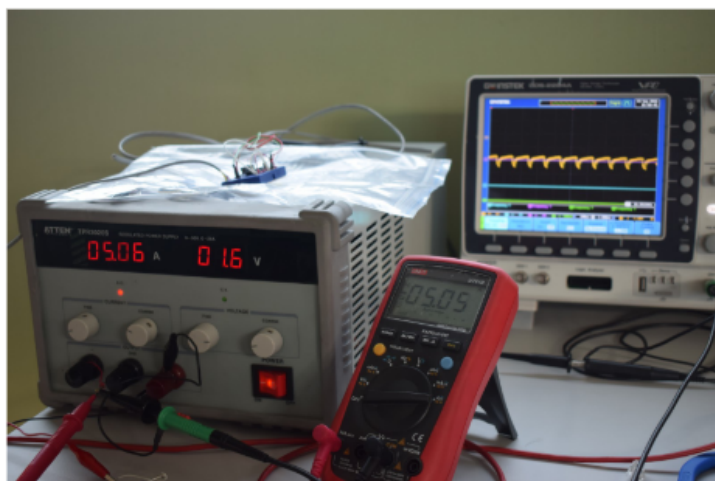


Figura 37: Equipos utilizados para la captura de la información de entrada y salida de los motores.

4.2.3. Ingeniería inversa de los motores

Los motores que son iguales para ambos ejes del LX850, son los encargados de mover el telescopio. Para entender su funcionamiento fue preciso usar los equipos que se ven en la Figura 37, los cuales incluyen una fuente regulada, un multímetro y un osciloscopio. Estos equipos permitieron identificar tanto las entradas como las salidas de los motores. La entrada es una señal de PWM (Figura 39) que es generada por un puente H de Mosfets, mientras que la salida es generada por un codificador incremental que, a máxima velocidad del motor, genera pulsos cercanos a los 50 Khz (Figura 38), lo que resulta un desafío para los microcontroladores de 8 bits a la hora de ser usados para capturar los pulsos y obtener una medida precisa de la velocidad y el ángulo de los ejes de la montura.

En la Figura 39 puede apreciarse el voltaje entregado al motor. Pueden apreciarse dos velocidades diferentes, una a la derecha y otra a la izquierda. En el lado izquierdo tenemos el voltaje máximo un 95 % del tiempo, lo que entrega como resultado un 95 % del máximo de energía al motor, mientras que en el lado derecho el voltaje máximo está un 80 % del tiempo, produciendo una velocidad menor en el motor. Variando el tiempo en que se le suministra voltaje máximo y apagado, usando un periodo fijo, es como se controla la cantidad de energía que va al motor y por consiguiente su velocidad. Esta técnica es conocida como PWM (Pulse-Width Modulation).

La Figura 38 nos presenta dos señales desfasadas casi en medio período una respecto a la otra. Esta señal proviene del decodificador de posición (encoder) incremental del motor.

Este desfase permite identificar la dirección del giro del motor, también puede usarse para evitar el falso conteo por oscilaciones.

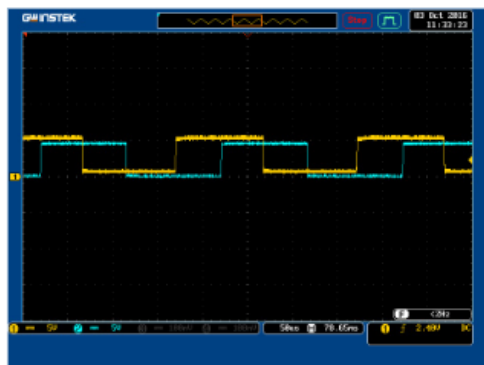


Figura 38: Señal del decodificador incremental del motor.

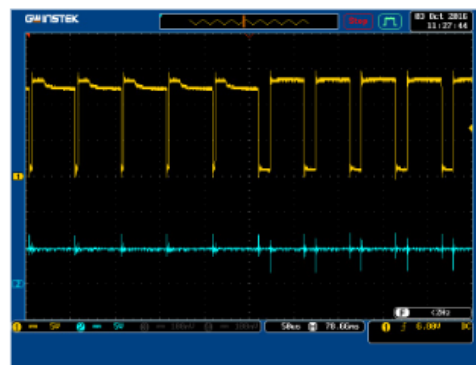
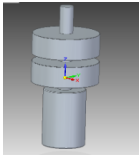
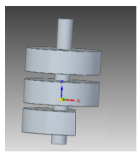



Figura 39: Señal entregada al motor por el PCB de control.

4.2.4. Modelación y fabricación de una pesa compatible con la latitud local

Se realizó un rediseño de las pesas originales del telescopio esto es debido a que las originales no permiten operar el equipo en lugares a latitudes menores de 10 grados del ecuador. Medellín se encuentra a 6° 15' N, por lo que se debió diseñar una solución para que la pesa que no golpee el trípode, devolviendo el rango de operación completo al eje de Ascensión Recta. Para ello se exploraron varias posibles soluciones las cuales fueron comparadas en el cuadro 4.

Propiedad	Solución 1	Solución 2	Solución3
Imagen			
Descripción	Diseñar una nueva pesa con un diámetro tal que no choque con el trípode	Realizar un maquinado sobre la ultima de las pesas para que no choque con el trípode	Realizar una cuña que permita alejar la montura del trípode
Análisis	Mejor solución en términos de costo y viabilidad	El maquinado es irreversible, no se tenía permiso para realizar la modificación, peso final menor	Mover el centro de masa arriba o a un lado disminuye la estabilidad del equipo

Cuadro 4: Comparación de las soluciones para evitar el choque de la pesa con el trípode.

Del análisis realizado en el cuadro 4, fue seleccionada la solución 1, diseñar una nueva pesa de diámetro menor, con igual volumen. El diseño de la nueva pesa fue realizado con base en la información de la pesa original. El nuevo diseño además de tener como objetivo principal igualar el peso, debe cumplir las restricciones dimensionales asegurando su uso en la latitud local y evitando colisiones con el trípode.

Se inicio calculando el volumen total de la pesa usando la ecuación 3, teniendo en cuenta parámetros como el diámetro exterior de 190mm (D_E), la altura de 61mm (h) y el agujeró en el centro de diámetro 35.5mm (D_I).

Formula del volumen de un cilindro:

$$V = \pi r^2 h \quad (1)$$

ó

$$V = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 h \quad (2)$$

El volumen total de la pesa es igual a la diferencia de volúmenes entre un cilindro de diámetro igual al externo de la pesa menos un cilindro del diámetro igual al diámetro interior de la pesa (donde esta la rosca). En esta simplificación, no se consideran las áreas de los bordes maquinados de la pesa, y se asume que la altura es la misma para ambos cilindros, así calculamos el volumen de la pesa usando la ecuación 2 para los dos volúmenes y obtenemos la ecuación 3, cuyo resultado es: 1669147.6 mm^3 .

$$V_T = \pi h \left(\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2}\right)^2 \right) \quad (3)$$

Conocido el volumen de la pesa original, se despejo de la ecuación 3 la altura h obteniendo la ecuación 4, esta ecuación nos permite hallar el h que iguala el volumen de la pesa original, con la restricción del diámetro menor seleccionado D_S que cumple la condición de no chocar con el trípode.

$$h = \frac{V_T}{\pi \left((D_S/2)^2 - (D_I/2)^2 \right)} \quad (4)$$

La ecuación 4 fue usada con varios diámetros y el diseño fue validado como se aprecia en la Figura 40, el diámetro elegido fue de 116mm. Este diseño se presenta en las Figuras 41 y 42.



Figura 40: Validación del diseño de la pesa nueva.

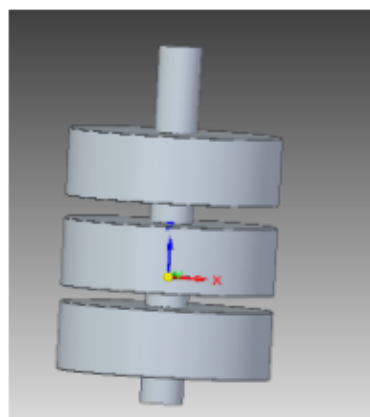


Figura 41: Pesa original.

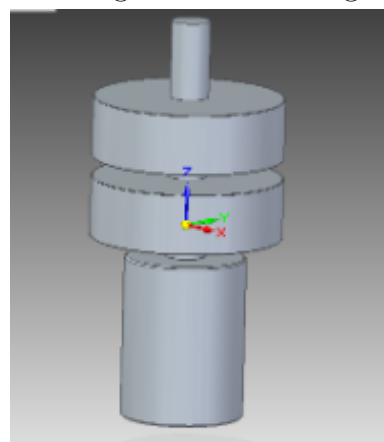


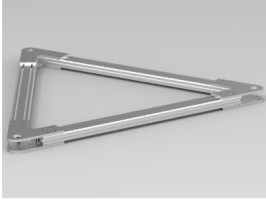


Figura 42: Pesa nueva.

4.2.5. Base del telescopio y sistema de nivelación

Una de las grandes dificultades a la hora de usar el equipo es su desplazamiento desde el lugar de almacenamiento hasta el sitio donde se realizan las observaciones. Anteriormente debido a su peso, el equipo requería ser desarmado completamente. Con el fin de facilitar el desplazamiento del equipo, se consideraron varios diseños, que sin modificar la estructura del telescopio, permitieran desplazarlo entre el lugar seguro para su almacenamiento y el sitio de observación. Estas propuestas de solución son presentadas y analizadas en el cuadro 5.

Identificada la mejor solución se inicio este desarrollo modelando y validando el diseño por medio de cargas simuladas de 100Kg (Figuras 43 y 44) usando el software CAD Solid Edge⁷, antes de iniciar la construcción. La nivelación horizontal del telescopio, garantiza una mayor precisión al apuntar el telescopio al polo celeste, proceso fundamental en la búsqueda de mejorar la precisión del apuntamiento del equipo. Dentro de la infinidad de posibles soluciones, tornillos, cuñas, topes, se eligió usar dos gatos mecánicos como se aprecia en la Figura 45. En las Figuras 46 y 47 se presenta el detalle de la nivelación.

⁷Solid Edge: <https://solidedge.siemens.com/es/>

Propiedad	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Imagen			
Descripción	Base en delta con ruedas acoplada al trípode + gatos	Pedestal con ruedas + tornillos niveladores	Pedestal fijo nivelado
Análisis	Mejor solución ya que consta de pocas piezas, usa el trípode existente y gatos mecánicos comerciales	Resulta una solución mas compleja y costosa por el mayor numero de partes	No se cuenta con un lugar para ubicar un pedestal fijo, tampoco un domo

Cuadro 5: Soluciones al problema de transporte y nivelación del telescopio.

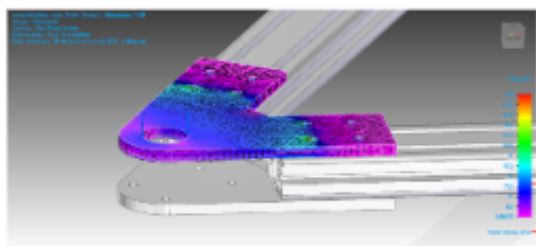


Figura 43: Análisis computacional de las deformaciones de la Base.

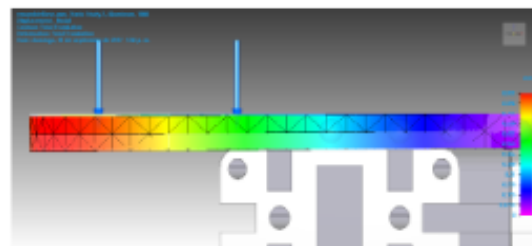


Figura 44: Detalle de la deformación de la pieza final.



Figura 45: Detalle de la ubicación de los gatos mecánicos.



Figura 46: Validación de la nivelación.



Figura 47: Montaje del telescopio orientado al norte y nivelado.

4.3. Cámara CCD

Este instrumento es el que transforma los fotones recolectados por el OTA (Optical Tube Assembly) en señales eléctricas que pueden ser analizadas con un computador. Es de gran importancia a la hora de observar, ya que permite ver muchos mas objetos de los que se ven a simple vista, además, para objetos muy tenues, puede recolectar fotones durante largos tiempos de exposición para aumentar la cantidad de información de una toma determinada, teniendo presente que entre mas larga la toma, mas importante es el papel de la montura de forma que la imagen capturada no se vea afectada por el movimiento relativo entre el lugar de observación (la Tierra) y el cuerpo celeste de interés. La UdeA tiene una cámara *STT-8300* (figura 48) de la empresa *SBIG*.



Figura 48: Cámara CCD SBIG STT-8300.

Se debe anotar que no fue posible el uso de esta cámara CCD durante todas las pruebas, debido a que no se tenía disponible permanentemente. Como alternativa en muchas de las pruebas se utilizaron dos cámaras ZWO ASI120 y ASI174, del ITM, las cuales fueron usadas como cámara principal y de búsqueda, esta configuración puede apreciarse en la Figura 49. Esta configuración es contra intuitiva debido a que la cámara de mayores prestaciones (ASI174) esta siendo usada como buscador, pero se eligió hacerlo de esta manera debido a que presenta un mayor campo visual.



Figura 49: Configuración de las cámaras ZWO usadas, una como cámara principal (ASI120) y la otra como cámara del buscador(ASI174).

4.4. Rueda de Filtros

Este dispositivo permite intercambiar los filtros de la cámara CCD, dependiendo de la longitud de onda en la cual se desee hacer la observación. La mayoría de cámaras CCD miden la intensidad de la radiación recibida, sin importar su longitud de onda (o color). La Universidad de Antioquia posee la rueda de filtros *FW8-STT* de *SBIG* (Figura 50). Este equipo permite intercambiar entre 8 filtros para longitudes de onda específicas, los filtros instalados fueron: rojo, verde, azul, H alfa, SII, OIII, UV/IR-Cut/L y claro.

Característica	SBIG STT-8300M	ASI174MM-C	ASI120MM
Sensor	Kodak KAF-8300	IMX174LLJ	1/3 CMOS AR0130CS
Resolución	8.3Mpx 3326x2504	2.3Mpx 1936x1216	1.2Mpx 1280x960
Tamaño pixel	5.4 μm	5.86 μm	3.75 μm
Disparador	Mechanical	Global shutter	Rolling shutter
Rango exposición	0.12s a 3600s	32 μs a 1000s	64 μs a 2000s
Ruido de lectura	9e	3.5e	4.0e a 6.6e
Eficiencia cuántica	56 %	78 %	80 %
ADC	16 bits	12/10 bits	12 bits
Interfaz comunicación	USB2.0/Ethernet	USB3.0	USB2.0
Peso	3400g	140g	100g
Precio	3695 USD	599 USD	130 USD

Cuadro 6: Comparación de las características de las cámaras CCDs usadas.



Figura 50: Rueda de filtros SBIG FW8-STT.

4.4.1. Instalación de la Rueda de filtros

Ya se dijo que uno de los instrumentos más importantes del OARAB es la cámara CCD la cual es la que captura las imágenes. La cámara CCD de referencia SBIG STT-8300 es usada en conjunto con la rueda de filtros FW8G-STT. Esta rueda de filtros es controlada junto con la cámara CCD y presenta además la opción de guiado, ya que cuenta con un CCD pequeño colocado antes de los filtros. La instalación de esta rueda de filtros sobre la cámara se presenta en las Figuras 51, 53, 52 y 54.



Figura 51: Cámara sin cubierta frontal, se aprecia el disco obturador.

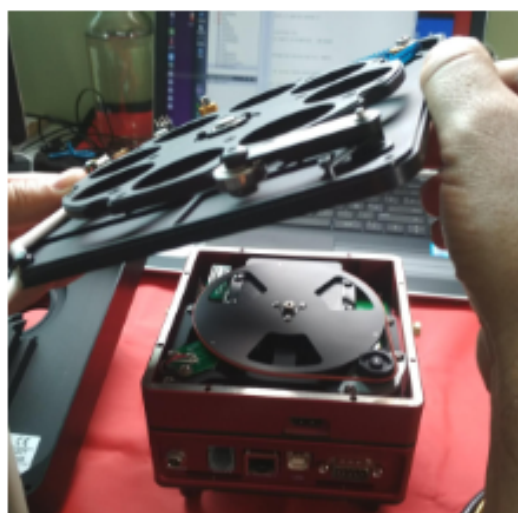


Figura 53: Acomodación de la rueda de filtros.

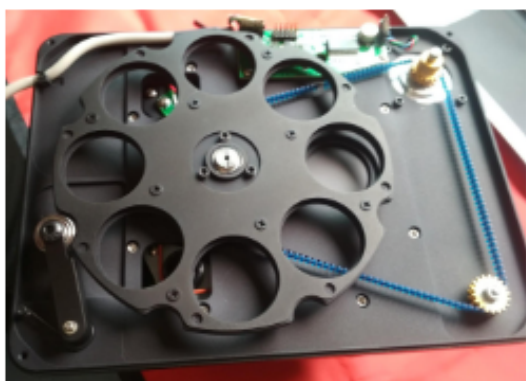


Figura 52: Rueda de filtros acoplada con tornillos.



Figura 54: Vista lateral del ajuste de la rueda de filtros.

La rueda tiene compartimientos para ocho filtros, en este montaje fueron usados los filtros que se ven en la Figura 55, los cuales fueron montados en sus respectivas cavidades como se ve en la Figura 56, y finalmente fueron protegidos con la cubierta, Figura 57.



Figura 55: Filtros disponibles: rojo, verde, azul, H alfa, SII, OIII, UV/IR-Cut/L y claro.



Figura 56: Instalación de los filtros.



Figura 57: Cubierta de la rueda de filtros con CCD guía.

El resultado de la instalación de la cámara CCD y la rueda de filtros en el telescopio se presenta en la Figura 58.



Figura 58: Montaje completo: micro-enfocador + rueda de filtros + cámara CCD en telescopio.

4.5. Cámara de Cielo




Este instrumento permite tener una visión amplia de las condiciones de nubosidad del cielo, de forma que con base en la información que este instrumento entrega, se puede determinar si hay nubes interfiriendo la observación y que movimiento presentan. La Universidad de Antioquia tiene una cámara de cielo *all sky cam* de *Moonglow Technologies* (Figura 59), con un ángulo de visión⁸ de 190° y diseñada para soportar la intemperie.



Figura 59: Cámara AllSky de Moonglow Technologies.

Con el objetivo de poner a funcionar la cámara AllSky fueron generadas varias soluciones, estas son expuestas en el cuadro 7, estas soluciones tiene en cuenta la interfaz de salida de la cámara, la cual es vídeo análogo formato NTSC.

⁸<http://www.moonglowtech.com/products/AllSkyCam/Specifications.shtml>

Propiedad	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Imagen			
Descripción	Capturador y software de la cámara AllSky + Ordenador Windows	Capturador EasyCap + Raspberry Pi + VLC	Capturador video Somaer + Ordenador linux + VLC
Análisis	Opción sugerida por el fabricante, requiere un ordenador Windows con licencia, implementación mas costosa	Solución elegida por ser mas compacta, usa la Raspberry Pi que consume menos energía y es mas económica que un computador	Esta solución no requiere licencias, se necesita un computador con Linux encendido todo el tiempo

Cuadro 7: Comparación de las posibles implementaciones de la cámara de cielo.

4.5.1. Configuración del hardware de la cámara

Definida la solución a desarrollar se integro el sistema conforme la Figura 61, donde se muestran las entradas del sistema desarrollado y las conexiones con la cámara de cielo. Este sistema fue integrado dentro de una caja para intemperie con el fin de proteger los dispositivos del ambiente. Para alimentar la Raspberry Pi se uso una fuente comercial de 5 voltios que ofrece hasta 3 amperios, para alimentar la cámara de cielo se uso una fuente de 12 voltios de hasta 3 amperios, estas fuentes garantizan la potencia requerida para la operación continua. La integración de todos los componentes del modulo desarrollado, fue realizada usando una placa de prototipado universal, a la cual fue soldada cada componente asegurando la comunicación de estos con la Raspberry Pi.

El capturador de vídeo usado fue el EasyCap. Este capturador transforma la señal de vídeo análogo de la cámara allSky en señales digitales que entrega por USB, desde donde el software VLC captura las imágenes. Este modulo mostró en pruebas la necesidad de poder reiniciarlo, desconectando la fuente de alimentación del mismo, para esto fue usado un MOSFET tipo P. Este dispositivo fue configurado para cortar el flujo de voltaje del capturador, usando un pin digital de la Raspberry Pi, como se ve en la Figura 60.

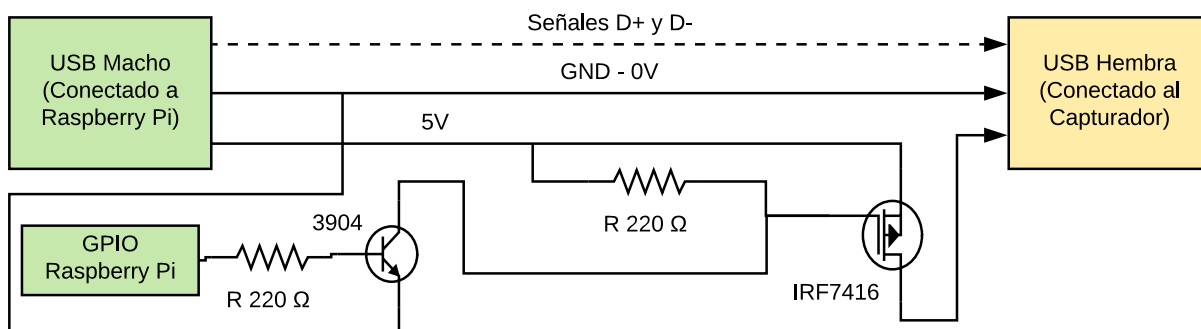


Figura 60: Diagrama de la electrónica para el control ON/OFF del captador de vídeo.

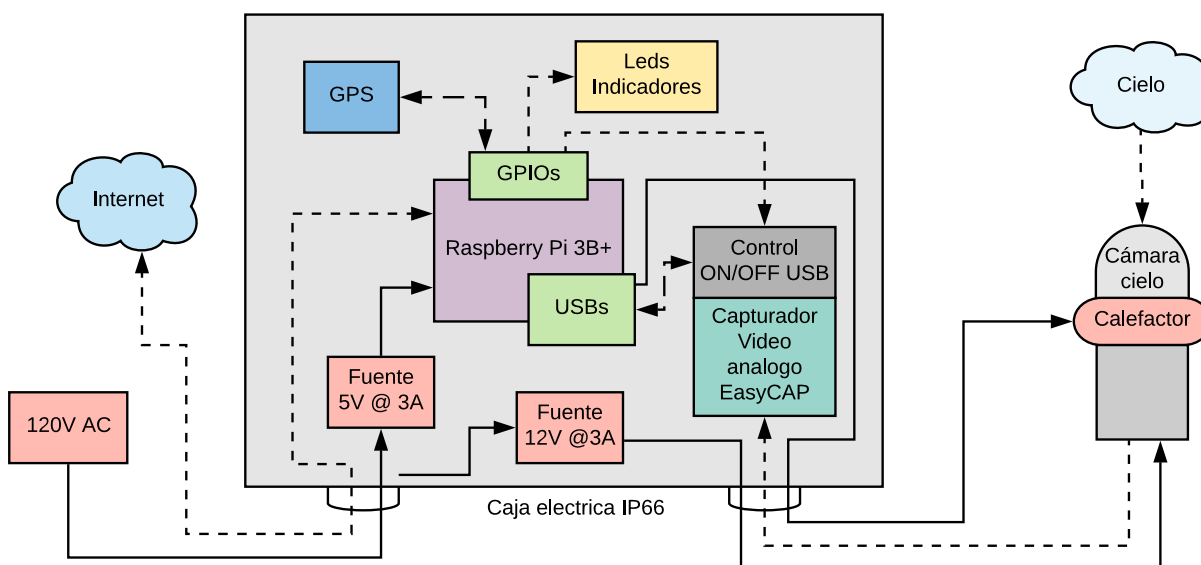


Figura 61: Diagrama de la distribución de componentes de la cámara de cielo.

Durante el desarrollo se identificó que cuando la conexión a internet de la universidad fluctuaba, la Raspberry Pi sufría retrasos en el tiempo del sistema, el cual es de vital importancia ya que es usado para ordenar y referenciar las imágenes temporalmente. Para tener un sistema de respaldo fue usado un módulo GPS, el cual a bajo costo permite tener una referencia de tiempo con precisión de milisegundos. La comunicación con este módulo fue realizada a través de los puertos GPIO, usando un protocolo serial. Este módulo es alimentado con 3.3 voltios provenientes de los puertos GPIO. El módulo GPS informa que tiene datos de tiempo y ubicación válidos usando un puerto digital, este es denominado PPS y fue conectado al puerto GPIO 18 de la Raspberry Pi.

Para proteger todos los dispositivos fue usada una caja eléctrica con certificación IP66, diseñada para funcionar en exteriores, protegiendo el módulo del ambiente. Fueron realizadas dos perforaciones con el objetivo de sacar los cables que alimentan y conectan a la red el sistema, además de las conexiones de la cámara de cielo. Este montaje se muestra en la Figura 62.

La cámara de cielo AllSky viene lista para ser montada sobre un soporte como los de las antenas de DirectTV™ como se ve en la Figura 63. Se resalta que esta cámara no se fabrica

mas (fue descontinuada en octubre de 2015⁹), lo que puede complicar el mantenimiento del equipo en el futuro.



Figura 62: Caja de control de la cámara de cielo con Raspberry Pi instalada en la sede de oriente de la UdeA.



Figura 63: Montaje general, solo se requiere potencia eléctrica y un cable de red.

4.5.2. Configuración del software de la cámara

Este desarrollo está conformado por diferentes piezas de software las cuales se exponen en la Figura 64. El código desarrollado en Python, integra todos los códigos del sistema y su objetivo es garantizar la captura de tres imágenes cada cinco minutos, estos parámetros pueden ser modificados a necesidad. En la Figura 65 se presenta el diagrama de flujo general del código de la cámara de cielo.

⁹<http://www.moonglowtech.com/products/AllSkyCam/>

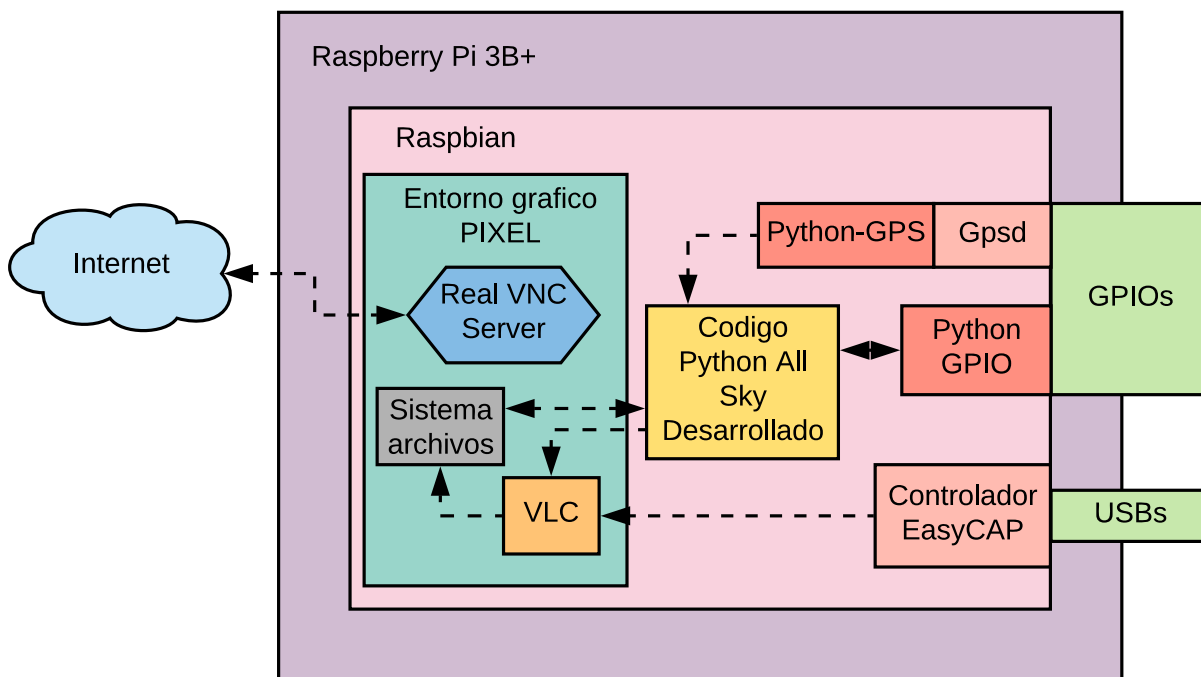


Figura 64: Diagrama general del software usado en la cámara de cielo.

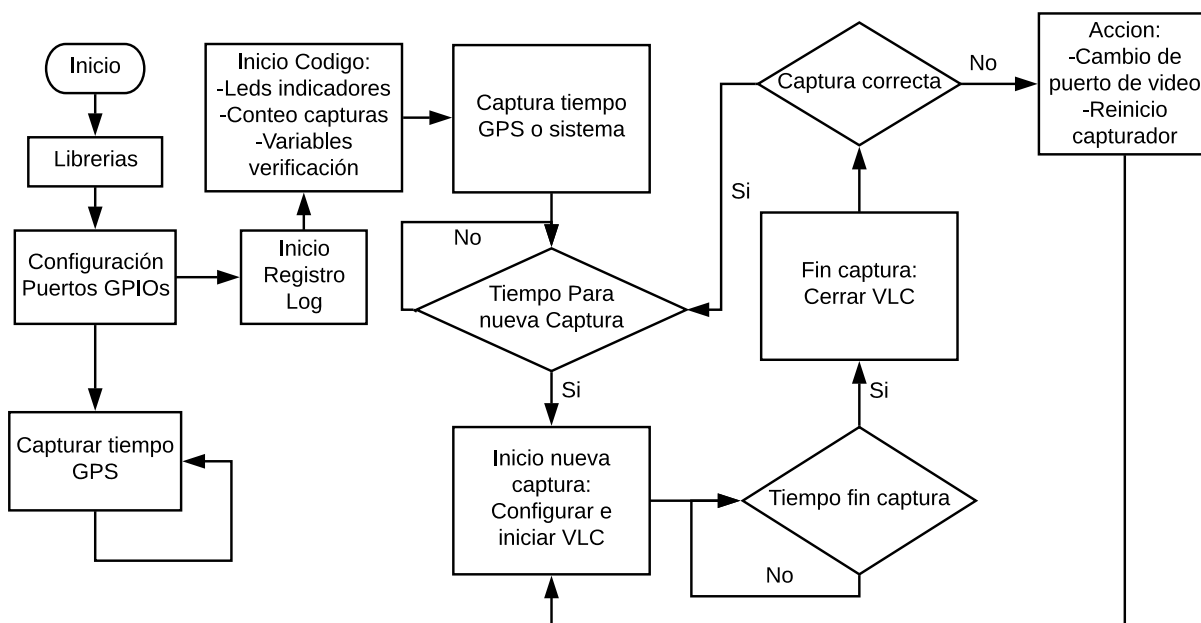


Figura 65: Diagrama general del código de la cámara.

Para ver y descargar las imágenes capturadas por la cámara de cielo, se usó el software de escritorio remoto RealVNC¹⁰ ya que es el recomendado por Raspberry Pi y viene por defecto en el sistema operativo Raspbian. El tener acceso remoto a la cámara de cielo permite revisar que el dispositivo se encuentre activo. También hace posible administrar los archivos, descargar imágenes y actualizar el código sin tener que ir hasta el dispositivo. Al acceder al dispositivo se ve la interfaz de la Figura 66. Para acceder a la cámara se

¹⁰Real VNC: <https://www.realvnc.com/en/>

deben tener: La IP de dispositivo, el usuario y contraseña del sistema y estar dentro de la red de la Universidad de Antioquia, Usando el software VNC Viewer¹¹ de RealVNC.

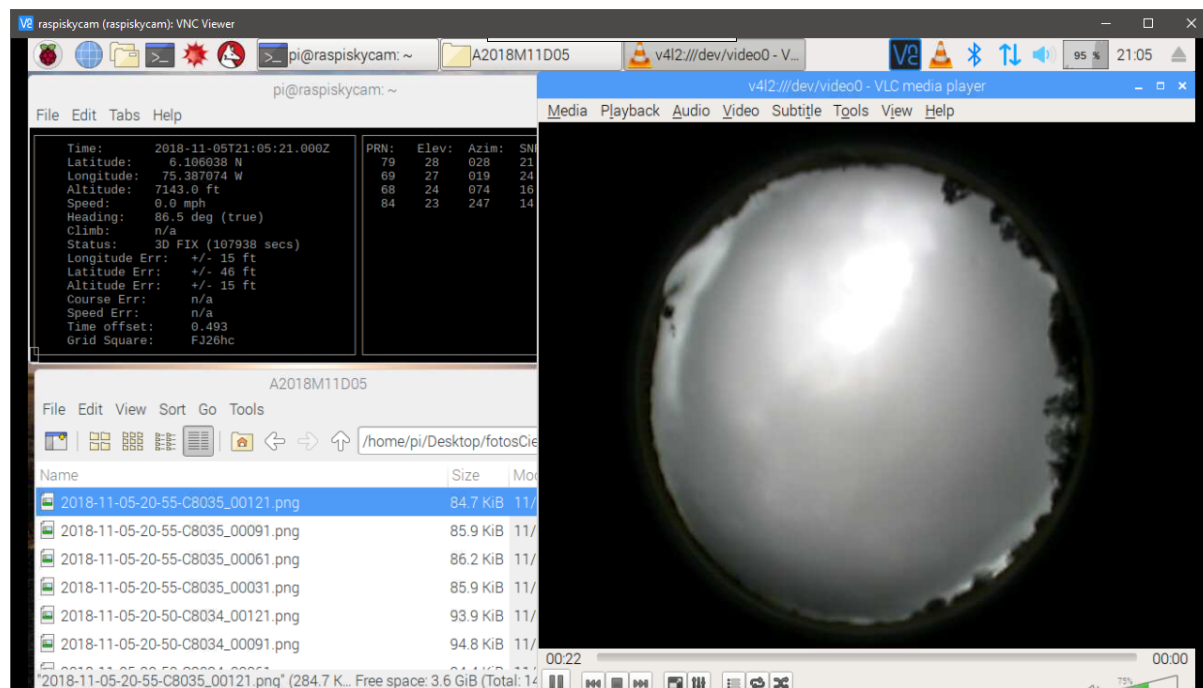


Figura 66: Interfaz VLC para el acceso a la cámara.

El software que soporta el funcionamiento de la cámara de cielo incluye: el driver del captador de vídeo, el driver del GPS, y el software VLC, adicionalmente esta la configuración realizada para iniciar el código principal luego que inicia el sistema operativo. Estos procedimientos de instalación y configuración de software propios de la cámara de cielo serán presentados a continuación. La instalación y configuración del sistema operativo de la Raspberry Pi se presentará en la sección 7.1, ya que es un proceso base para varios desarrollos realizados en este trabajo.

Instalación del captador de vídeo:

La librería para Linux del captador de vídeo EasyCap usado, fue la desarrollada por el usuario de GitHub stevelacy¹², la instalación consta de los siguientes pasos:

- Crear la carpeta de instalación y descargar la librería:

```
sudo mkdir EasyCap-master
cd EasyCap-master/
sudo git clone https://github.com/stevelacy/EasyCap
```

- Se copia el firmware:

```
sudo cp ./somagic_firmware.bin /lib/firmware/somagic_firmware.bin
```

¹¹VNC Viewer: <https://www.realvnc.com/en/connect/download/viewer/>

¹²Librería EasyCap: <https://github.com/stevelacy/EasyCap>

- Instalar las dependencias necesarias para compilar:

```
sudo apt-get install make gcc libusb-1.0-0-dev libgrypt11-dev
```

- Compilar desde el código fuente:

```
cd somagic-easycap_1.1
make
sudo make install
```

Instalación y configuración del software VLC:

La instalación del software VLC se realizo usando el siguiente comando:

```
sudo apt-get install vlc
```

Una ves instalado el VLC, se configuro para que realice capturas de la entrada de vídeo, esta configuración se realiza desde el entorno gráfico del software, por medio de los pasos a continuación:

- Abrir el menú de preferencias:

Dando clic derecho sobre la interfaz de VLC se abre un menú en el cual seleccionamos *Herramientas*, y luego a *Preferencias*, como se puede apreciar en la Figura 67.

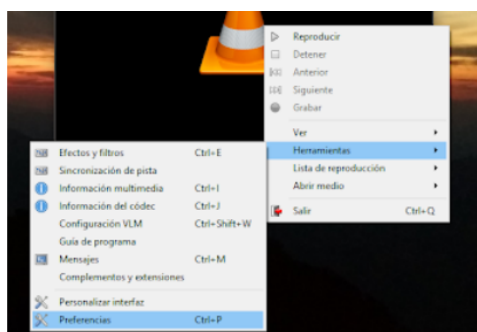


Figura 67: Apertura del menú de preferencias.

- Ver todas las configuraciones de vídeo y configurar el destino de las imágenes capturadas:

Estando en el menú preferencias se debe activar la casilla *mostrar ajustes, opción: Todos*, esta casilla se encuentra en la esquina inferior izquierda, como se ve en la Figura 68. Luego abrimos las opciones de *Vídeo* y configuramos la ruta donde serán guardadas las imágenes, esta debe coincidir con la ruta usada en el código principal desarrollado.

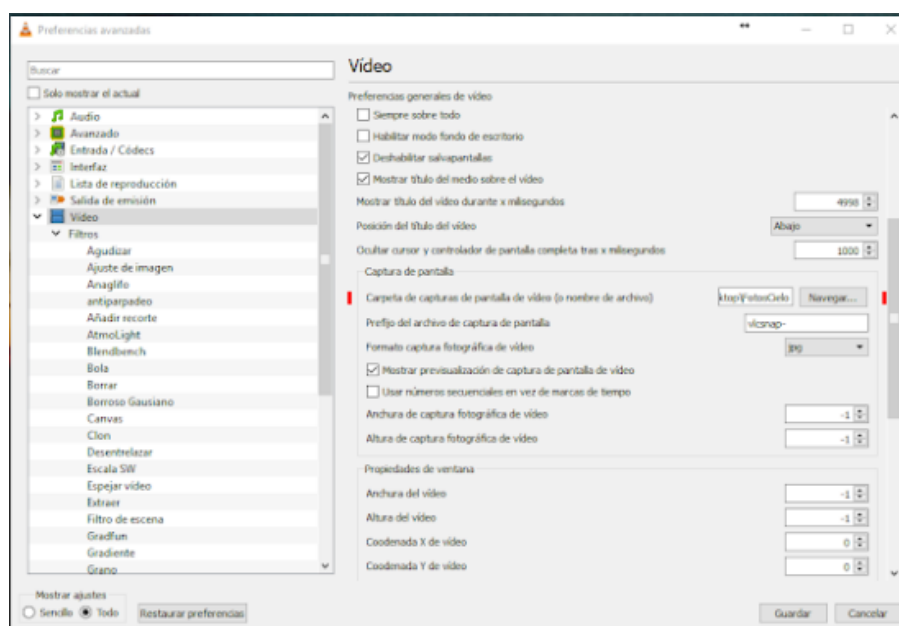


Figura 68: Configuraciones de vídeo completas y configuración de la ruta de guardado de las capturas.

- Configuración filtro de escena:

Dentro de las opciones de *Vídeo* buscamos la opción *Filtros* y luego *Filtros de escena*, como se muestra en la figura 69, configuramos el *Prefijo de ruta de carpeta* y ajustamos la *Tasa de grabación* la cual esta en cuadros por segundo e indica cada cuantos cuadros se toma y almacena una imagen del vídeo que está siendo reproducido. Para el caso de la Raspberry fue usado 30, para capturar una imagen cada 30 fotogramas del vídeo, lo que es equivalente a una imagen cada 20 segundos.

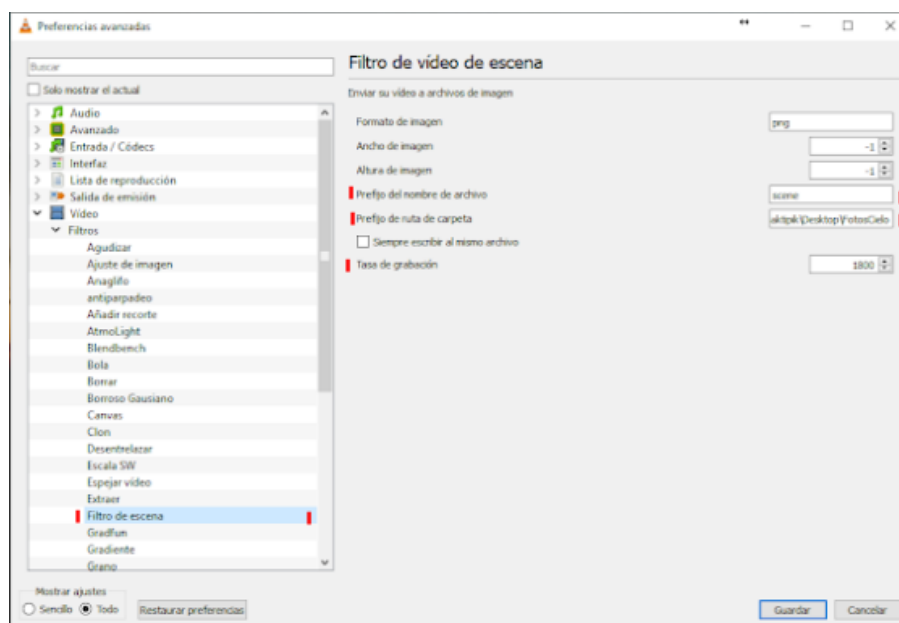


Figura 69: Configuración filtro de escena.

- Activación del filtro de escena:

Para activar el *filtro de escena*, damos clic en *Filtros* como se ve en la Figura 70, vamos a la entrada de texto en la parte inferior y escribimos *scene* en el cuadro, finalizamos dando clic en Guardar.

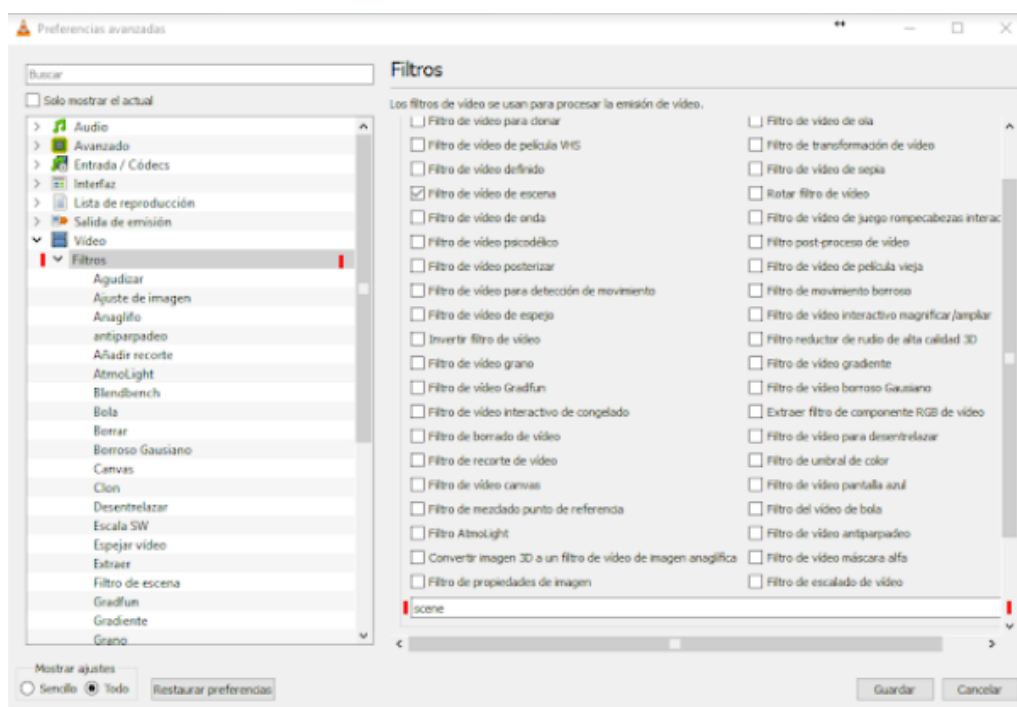


Figura 70: Activación filtro de escena.

Arranque del código principal al inicio del sistema operativo, luego de cargar la interfaz gráfica:

Para que el código desarrollado se ejecute al inicio del sistema es preciso alojar el comando que lo ejecuta en uno de los archivos que son cargados de ultimo por el sistema operativo. Así la cámara de cielo empieza su operación con el inicio del sistema operativo, funcionando hasta luego de ser reiniciado por fallas en el suministro eléctrico. La ejecución del código principal debe darse luego de cargar el ambiente gráfico, esta restricción es heredada del software VLC que requiere ambiente gráfico para su correcta operación, el procedimiento realizado fue el siguiente:

- Editar el archivo ejecutado al final del arranque de la interfaz gráfica del sistema operativo:

Se localiza la carpeta LXDE-pi, usando el siguiente comando:

```
cd ~/.config/lxsession/LXDE-pi
```

Se edita el archivo autostart usando el comando:

```
sudo nano autostart
```

- Agrega el comando que se desea ejecutar:
Se agrega el comando a ejecutar antes del comando `@lxterminal -e`, quedando el final del archivo LXDE-pi así:

```
@/usr/bin/python /home/pi/allSky/allSkyVLC.py
@lxterminal -e
```

En este caso el archivo `AllSkyVLC.py` es el código desarrollado que será ejecutado usando Python.

- Reiniciar.

```
sudo reboot
```

Instalación del software del modulo GPS:

Este modulo consta de los pasos a continuación ¹³:

- Actualizar OS (Operative System):

```
sudo apt-get update
sudo apt-get upgrade
```

- Instalar los siguientes paquetes para el control del GPS:

```
sudo apt-get install gpsd gpsd-clients python-gps pps-tools
```

- Configurar puertos y activar interfaz serial:

Se edita el archivo `config.txt` usando el comando:

```
sudo nano /boot/config.txt
```

y se agregan las líneas:

```
# Gps Time
dtoverlay=pps-gpio,gpiopin=18
enable_uart=1
core_freq=250
```

¹³Pasos instalación GPS: <https://autonomic.guru/gps-time-on-raspberry-pi/>

- Desactivar la consola por el puerto serial, para evitar la interferencia entre la consola del sistema operativo y el GPS:

Para esto se edita el archivo `/boot/cmdline.txt`, por medio de:

```
sudo nano /boot/cmdline.txt
```

y se remueven las configuraciones:

```
console=serial0,115200  
console=tty1
```

- Detener y desactivar el puerto serial:

Ejecutamos en consola los comandos:

```
sudo systemctl stop serial-getty@ttyS0.service  
sudo systemctl disable serial-getty@ttyS0.service
```

- Activar el modulo PPS para el control del GPS en el arranque del sistema operativo:

Editamos el archivo `/etc/modules`, usando el comando:

```
sudo nano /etc/modules
```

y agregamos al final:

```
pps-gpio
```

- Iniciar el GPSD y configurar el puerto serial al cual esta conectado el GPS:

Editamos el archivo `/etc/default/gpsd`, usando el comando:

```
sudo nano /etc/default/gpsd
```

y corregimos las líneas:

```
START_DAEMON="true"  
USBAUTO="true"  
DEVICES="/dev/ttyS0"  
GPSD_OPTIONS="-n"
```

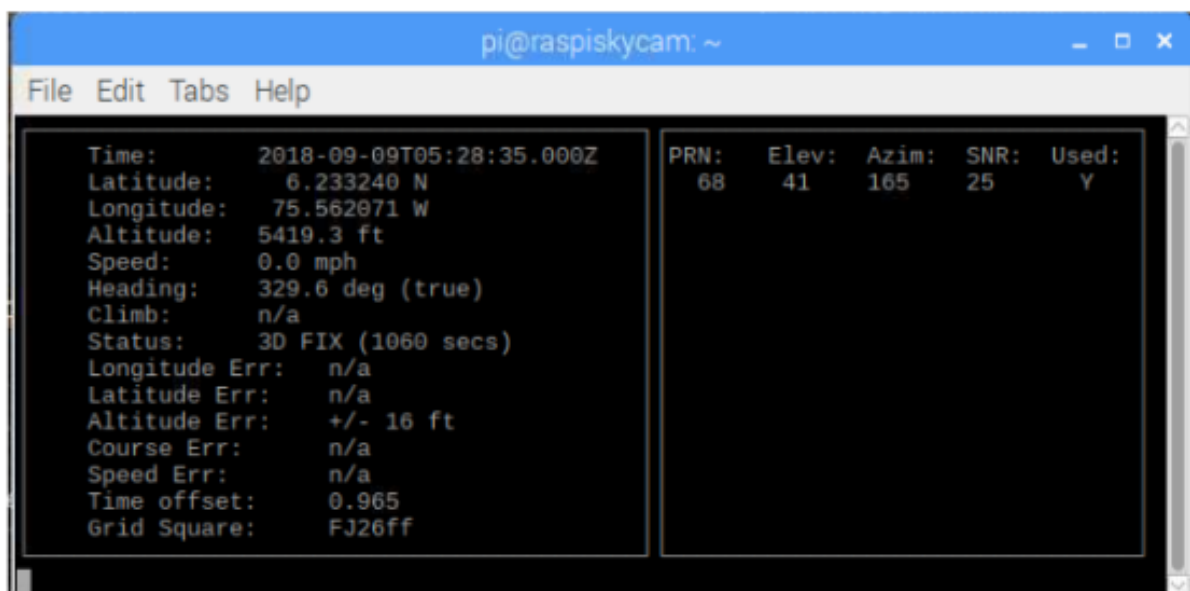
- Activamos el GPSD
Usamos el comando:

```
sudo systemctl enable gpsd
```

- Verificamos la instalación
Usamos la siguiente línea:

```
cgps -s
```

Luego de realizar los pasos anteriores correctamente, reiniciar el dispositivo y luego de esperar unos minutos a que el GPS empiece a triangular (5-10 minutos), debe de verse en consola los datos de la Figura 71, de no ser así, deben ser verificadas las conexiones del modulo.



```
pi@raspiskycam: ~
File Edit Tabs Help
Time:      2018-09-09T05:28:35.000Z
Latitude:  6.233240 N
Longitude: 75.562071 W
Altitude:  5419.3 ft
Speed:     0.0 mph
Heading:   329.6 deg (true)
Climb:     n/a
Status:    3D FIX (1060 secs)
Longitude Err: n/a
Latitude Err:  n/a
Altitude Err:  +/- 16 ft
Course Err:   n/a
Speed Err:    n/a
Time offset:  0.965
Grid Square: FJ26ff
PRN:  Elev:  Azim:  SNR:  Used:
68    41    165   25    Y
```

Figura 71: Ejemplo de los datos entregados por el GPS en la consola.

4.5.3. Problemas relacionados con el ambiente

Este módulo está diseñado de forma que puede estar a la intemperie. Presenta una junta tórica (O-Ring) que evita la entrada y salida de gases y líquidos, pero la humedad de la zona rebasa la capacidad del modulo para mantenerse seco como se aprecia en la Figura 72. La condensación de agua sobre la parte interior del domo perturba las imágenes del cielo.

Para solucionar este problema, basados en un accesorio comercial disponible¹⁴ que calienta el domo, se diseñó un calefactor el cual puede ser apreciado en la Figura 73, esta solución fue complementada con el uso de una pequeña bolsa de gel de sílice, que se ubico al interior del domo, ayudando a absorber la humedad interna. Además se sello el espacio entre el domo y la base con cinta adhesiva, evitando el ingreso del agua al domo.

¹⁴<http://www.moonglowtech.com/products/AllSkyCam/Accessories.shtml>



Figura 72: Problema de condensación de humedad sobre el domo de la cámara.



Figura 73: Solución al problema de condensación, en la cual se uso: una resistencia que se conecta por USB para calentar el domo, una bolsa de gel de sílice para absorber la humedad y cinta adhesiva para sellar el espacio entre el domo y el soporte.

La resistencia o calefactor diseñado, con el fin de mantener simple el desarrollo, se restringió a ser alimentado por uno de los puertos USBs disponibles de la Raspberry Pi. Así las restricciones del puerto USB fueron tenidas en cuenta: 0.5 amperios y 5 voltios. Con estos datos se calculo la potencia máxima que es posible extraer del puerto USB usando la Ecuación 5, se encontró que era de 2.5W (Vatios), también se calculo la resistencia mínima que podía ser conectada a este puerto, evitando superar la potencia máxima y terminar sobrecargando los puertos USB. Para el calculo de la resistencia de uso la clásica ecuación de OHM (6), despejando la resistencia conforme podemos ver en la Ecuación 7.

$$W = V * I \quad (5)$$

Donde: Potencia (W) = Voltaje (V) * Corriente (I)

$$V = I * R \quad (6)$$

Donde: Voltaje (V) = Corriente (I) * Resistencia (R)

$$R = V/I \quad (7)$$

De la Ecuación 7 se calculo el valor de la resistencia para el voltaje y corriente entregados por el USB, este valor fue de $5/0,5 = 10 \text{ ohmios}$. Así la resistencia fue recortada a una

distancia que garantizo una resistencia un poco mayor a 10 ohmios. Para evitar el contacto directo de la resistencia con el domo fue usado termo-encogible el cual además protege a la resistencia del ambiente, esta solución se presenta en la Figura 73.

4.6. Estación Meteorológica

La estación meteorológica permite conocer en todo momento las condiciones ambientales en el exterior del observatorio, por lo que es un instrumento de vital importancia, que además permite alimentar modelos para estimar las posibles condiciones futuras de observación. La Universidad posee una estación *VANTAGE PRO2* de *Davis*, (Figura 74).



Figura 74: Estación meteorológica DA-VIS VANTAGE PRO2.



Figura 75: Interfaz de comunicación serial de la estación meteorológica.

La interfaz de comunicación que permite la extracción de datos de la estación requiere un accesorio propio de la compañía Davis, este accesorio es acoplado a la consola de visualización de la estación y permite acceder a la información por medio de un puerto USB, este modulo se presenta en la Figura 75.

5. Identificación de los sistemas de control para observatorios astronómicos

Existen diversas plataformas para el control de los equipos que conforman el observatorio, muchos de estos software son genéricos de tal forma que soportan diversos dispositivos de diferentes fabricantes tal como los paquetes ASCOM¹⁵, o la librería INDI¹⁶. También existen desarrollos específicos de cada fabricante como el AutostarSuite¹⁷ de MEADE para el telescopio LX850. Y otros que se basan en los sistemas genéricos comerciales como MaxIm DL¹⁸ el cual usa ASCOM.

5.1. ASCOM

La iniciativa ASCOM (AS de Astronomy y COM de Component Object Model) busca desarrollar una plataforma independiente de los fabricantes y el lenguaje de programación que permita conectar software y equipos astronómicos en el sistema operativo Windows. Para su uso se descarga la plataforma, a la que luego se le instalan los controladores (drivers) y complementos (plug-ing) para los diferentes equipos y software que serán usados.

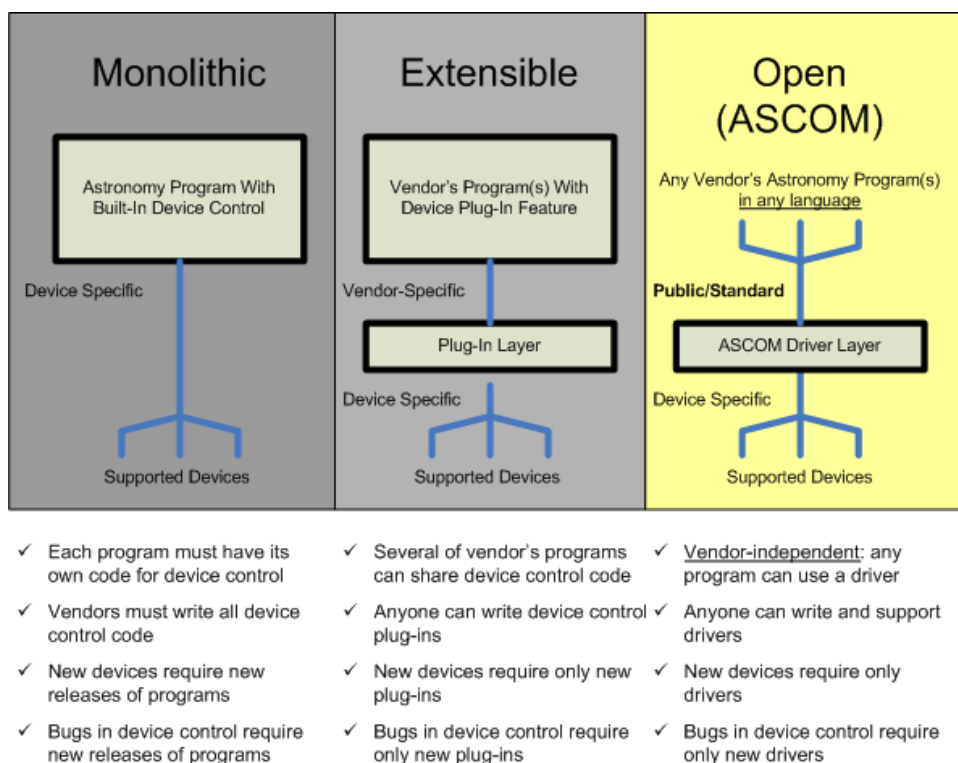


Figura 76: Comparación estructura controladores de hardware de tipo: monolítico, extensible y abierto (ASCOM). Imagen tomada de: <http://www.ascom-standards.org/>

En la Figura 76 se muestra como ASCOM crea una capa intermedia entre las aplicaciones astronómicas (AA) y los dispositivos de hardware. En el caso monolítico y extensible, las

¹⁵The ASCOM Initiative: <http://www.ascom-standards.org/>

¹⁶Instrument Neutral Distributed Interface: <http://indilib.org/>

¹⁷<https://www.meade.com/autostar-suite/>

¹⁸Cyanogen Imaging® MaxIm DLTM: <http://diffractionlimited.com/product/maxim-dl/>

AA presentan controladores y complementos específicos para el hardware, lo que limitaba la actualización de los controladores y el uso de nuevos equipos. ASCOM independizó la capa de controladores lo que permite intercambiar el hardware y actualizar los controladores sin requerir cambios en la AA, además publicó el código fuente de forma libre lo que permite a cualquiera realizar modificaciones y agregar nuevos equipos.

5.2. INDI

La librería INDI (del inglés Instrument Neutral Distributed Interface) ha emergido como una interesante propuesta para el control remoto e interactivo de diversos instrumentos. La librería INDI presenta una filosofía distribuida conformada por los siguientes elementos:

- **Dispositivos:** Los dispositivos presentan un software que controla y ofrece sus propiedades en una forma estándar al servidor.
- **Servidores:** Nodo que centraliza las comunicaciones entre dispositivos y clientes. Los servidores principalmente en Linux permiten controlar los diferentes dispositivos soportados, ofreciendo a los clientes y demás servidores las propiedades y características de los dispositivos que controla Downey (2007).
- **Clientes:** Aplicación final que permite al usuario interactuar con los dispositivos. Los clientes permiten controlar el sistema y pueden operar desde casi cualquier sistema operativo. Algunos ejemplos de clientes son: KStars¹⁹, wINDI²⁰, Xephem²¹.

INDI es multiplataforma, lo que significa que puede ser instalada en diversos sistemas operativos basados en UNIX como Linux y MacOS, además soporta la operación en máquinas virtuales de Linux en el sistema Windows. En la Figura 77 podemos ver que la librería INDI se sitúa entre el cliente y los dispositivos de hardware, sirviendo de interfaz.

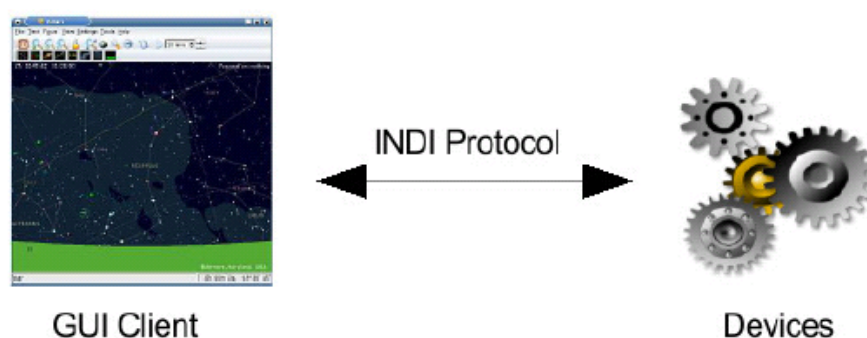


Figura 77: Diagrama de operación de INDI, puede verse su función como interfaz entre clientes y dispositivos. Tomado de: <http://indilib.org/about/discover-indi.html>

Una característica de gran interés respecto a la conexión de dispositivos a la interfaz INDI radica en el hecho de que los mismos están auto-contenidos en el servidor al cual están conectados, lo que significa que son independientes del cliente usado. El cliente pregunta

¹⁹KStars: <https://edu.kde.org/kstars/>

²⁰wINDI: <http://www.cloudmakers.eu/windi/>

²¹Xephem: <http://www.clearskyinstitute.com/xephem/>

al servidor por los dispositivos y este le entrega todas las propiedades y características del mismo. El cliente con esta información procede a desplegar los botones e indicadores usando una estructura genérica, lo que facilita la adición, actualización e intercambio de dispositivos.

5.3. RTS2

El RTS2 ²² (del inglés Remote Telescope System), en su segunda versión, es un paquete de código abierto integrado para el control de observatorios remotos bajo el sistema operativo Linux. Sus objetivos son ser un sistema, que se instala en la computadora del observatorio y este lo mantendrá en funcionamiento, protegiéndolo de los elementos, tomando imágenes, asegurándose que el apuntamiento sea bueno, haciendo un seguimiento de lo que se hizo, enviando datos, y ayudando a hacer ciencia.

RTS2 está diseñado para ejecutarse en el observatorio y hacerlo totalmente autónomo, seleccionando objetivos de una base de datos, almacenando metadatos de las imágenes en la base de datos, procesando imágenes, almacenando sus coordenadas y ofreciendo acceso remoto. Actualmente se está ejecutando en varias configuraciones de observatorios en todo el mundo. Para el control de dispositivos de diversos fabricantes, cuenta con una capa de dispositivos abstracta, que permite el control de la mayoría de las combinaciones posibles de monturas, CCDs, fotómetros, controladores de techo y cúpula. El RTS2 usa INDI para soportar las comunicaciones con diferentes dispositivos.

²²RTS2: <https://rts2.org/>

6. Diseño del sistema de control para el OARAB

El proceso de diseño inicia con la identificación de los componentes y características más importantes que debe incorporar y cumplir un sistema de control para un Observatorio Astronómico Robótico Autónomo Básico (OARAB). Los equipos fueron seleccionados con base en la disponibilidad y la literatura. Las características del diseño final fueron elegidas teniendo en cuenta los elementos comunes identificados en la literatura, las restricciones presupuestales y temporales del proyecto y los deseos de los usuarios finales, los profesores y estudiantes del Pregrado de Astronomía de la Universidad de Antioquia.

Los principales elementos de un OARA (Observatorio Astronómico Robótico Autónomo) son presentados en la Figura 78, donde podemos ver los sistemas para controlar la temperatura del domo con el fin de reducir las dilataciones térmicas, además de la instrumentación requerida para realizar capturas de imágenes mejoradas de los objetos celestes, gracias al uso de tecnologías como un guiador para la cámara CCD y el uso de óptica adaptativa. Muchos de los elementos requeridos para completar un OARA se consiguen en el mercado listos para ser implementados, pero debido a su costo, no fueron considerados en esta primera versión del proyecto, donde el objetivo fue diseñar un sistema de control que integrara los equipos de la UdeA.

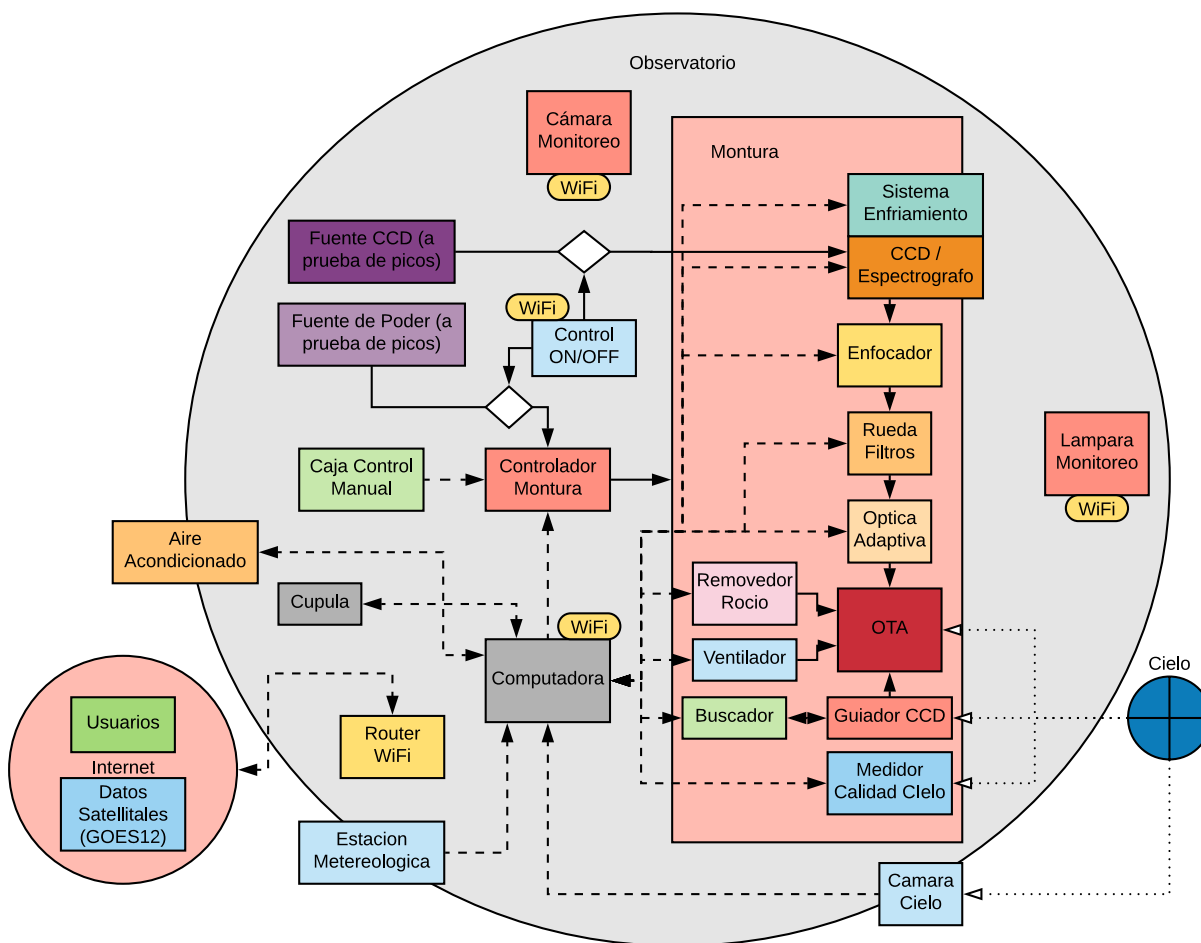


Figura 78: Diagrama elementos OARA.

Con base a los elementos de un OARA presentados en la Figura 78, fueron extraídos

aquellos que hacen parte de OARA Básico u OARAB, incluyendo los equipos previamente disponibles en la Universidad de Antioquia. Estos equipos son:

- **Telescopio:** El equipo usado fue el telescopio MEADE LX850 de 14 pulgadas, este equipo cuenta con una montura robotizada que puede ser controlada por medio de un puerto serial.
- **Cámara CCD:** Este instrumento vario durante el desarrollo del trabajo por motivos de disponibilidad, al inicio del proyecto se empezó a trabajar con la cámara SBIG STT-8300M, la cual se integra a la rueda de filtros FW8-STT. Luego finalizando el proyecto la cámara SBIG fue solicitada y en su remplazo fue usada la ZWO ASI120MM.
- **Cámara de cielo:** La Universidad de Antioquia cuenta con la cámara de cielo AllSky que se expuso y puso operativa en la sección sec:AllSky.
- **Estación Meteorológica:** La estación meteorológica usada fue la Davis Vantage Pro 2, la cual se conecta por medio de un puerto USB.
- **Software:** Este es el encargado de controlar la cámara, la montura del telescopio y los accesorios. Este software además debe poder ser operado remotamente, ya sea por capacidad propia o por medio del uso de software compatible que permita esta actividad.
- **Computadora principal:** Este dispositivo corre el software usado para controlar el observatorio. Tiene además suficientes puertos y periféricos para que puedan ser conectados a él todos los equipos.
- **Control potencia eléctrica:** Equipos como la cámara y el telescopio no cuentan con la opción de ser apagados de forma remota, para encenderlos y apagarlos es preciso contar con un sistema que permita cortar y conectar el suministro eléctrico.
- **Sistema de vigilancia:** Una forma de conocer el estado de los instrumentos es por medio de vídeo en vivo, esto permite vigilar la respuesta del equipo a las ordenes dadas remotamente.
- **Lámpara visibilidad:** El sistema de vigilancia presenta problemas cuando se requiere observar el estado del equipo en la noche, ya que la oscuridad requerida para la operación del observatorio, lo esconde de la cámara. Para poder ver el estado de los equipos se debe contar con una lámpara que pueda ser controlada a voluntad y que ilumine los equipos para que puedan ser captados por el sistema de vigilancia.

Las características identificadas como deseadas para el diseño presentan enormes dificultades al momento de usarse para evaluar las soluciones. Esta dificultad es debido a: Lo ideal del diseño que no considera detalles propios de la implementación, la naturaleza subjetiva de las calificaciones, el análisis realizado por el diseñador, lo general que resulto la literatura al hablar de los equipos y su integración, además de lo complejo del diseño. Para identificar la mejor solución fue evaluada cada característica de cada una de las tres soluciones o diseños conformados del sistema de control. Estas soluciones fueron generadas explorando los tres software de control de observatorios expuestos en la sección 5, garantizando una cobertura y análisis mas objetivo del espacio de diseño. A continuación son listados los criterios:

- **Disponibilidad local:** Este aspecto es de gran interés debido a las complicaciones en términos de tiempos de compra e importación de equipos por parte de la Universidad. Presentar disponibilidad local, facilita realizar reparaciones ya que se tendrá repuestos y personal con conocimiento para realizarlas.
- **Costo:** El costo de la solución final es de gran importancia a la hora de implementar y mantener en el tiempo el diseño final. Se prefiere un bajo costo, teniendo presente que las soluciones de mayor trayectoria y robustas, suelen ser las que presentan mayores costos.
- **Versatilidad:** Este criterio nos permite estimar la capacidad de la solución de ser modificada. La operación del equipo esta acompañada de sesiones de mantenimiento y actualización. Si la solución final es muy compleja y sofisticada, el costo de mantenerla operativa a media que pasa el tiempo puede terminar en el desuso del equipo.
- **Hardware Libre:** El hardware libre presenta una gran ventaja a la hora de realizar reparaciones futuras, en este pueden ser identificados componentes y módulos con mayor facilidad, a diferencia de equipos propietarios, en su mayoría extranjeros que devén ser enviados al exterior para su reparación, lo que eleva los costos operativos.
- **Software Libre:** Este elemento es uno de los mas deseados para la solución, ya que garantiza el control sobre el desarrolló del sistema y sus actualizaciones, además sirve de base para desarrollar a la medida futuros trabajos. También evita la adquisición de licencias, y suele estar acompañado de grandes comunidades que sirven de soporte a los problemas en el software, el cual es auditado por la comunidad.
- **Robustez:** Este aspecto se refiere a la trayectoria del equipo en el campo y su capacidad de soportar el trabajo continuo sin requerir intervenciones. Suele ser proporcional al precio, y es una característica muy deseada ya que garantiza la disponibilidad del equipo.

Una vez identificados los equipos que conforman un OARAB, se inicio la conformación de soluciones, este proceso se presenta en el cuadro 8, aquí se omiten los instrumentos con los que cuenta la Universidad, como el telescopio, la cámara CCD, la cámara de cielo y la estación meteorológica, ya que son comunes a todas las soluciones.

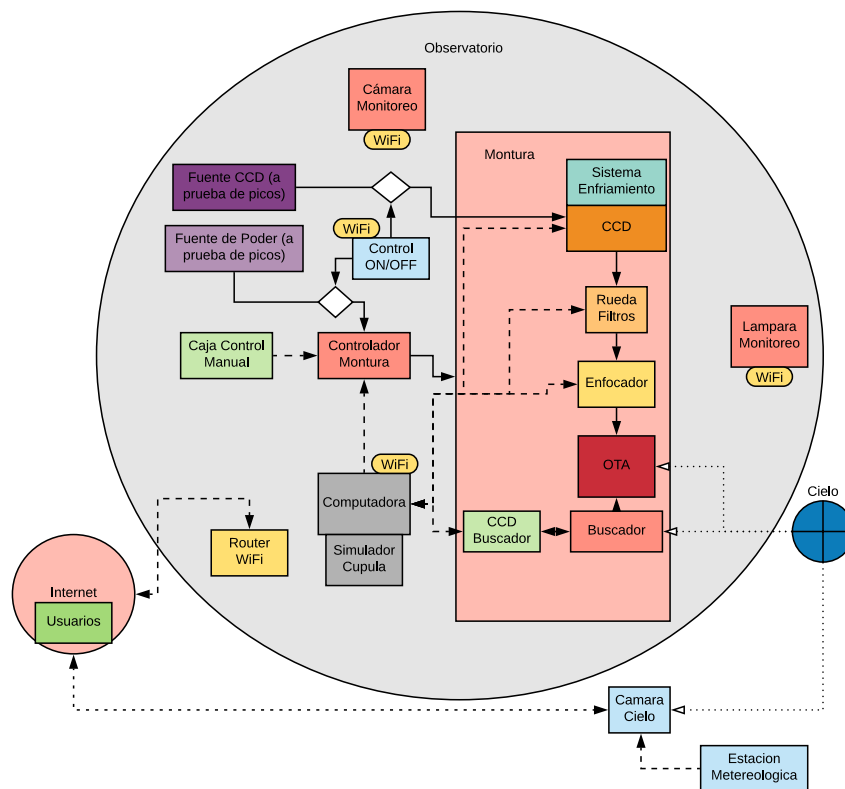


Figura 79: Diagrama del OARAB diseñado.

Equipo	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Software	Ascom + Windows	INDI + KStars + Linux	RTS2 + Linux
Computadora principal	Ordenador personal	Raspberry Pi	Ordenador personal
Control potencia eléctrica	Control Ultimate Powerbox de PegasusAstro	Relevo + ESP8266 (Lolin MCU v3)	Control Dragonfly de Lunático
Sistema de vigilancia	Cámara Ip Ez360 de Hikvision	Raspberry Pi Zero + Cam + Software libre de vigilancia	cámara IP Escam QF007
Lámpara visibilidad	Bombilla Wifi Cr60	Lámpara LED + Relevo + ESP8266	Lámpara LED + Control Dragonfly de Lunático

Cuadro 8: Conformación de las soluciones del sistema de control del OARAB.

Luego de identificar las soluciones posibles, se inicio el proceso de análisis de cada solución.

Característica	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Disponibilidad local	Presenta elementos que deben ser importados	Disponibilidad local de partes	Presenta elementos que deben ser importados
Costo	Costo de componentes a importar elevado	Costo bajo por disponibilidad y lo comercial	Costo de componentes a importar elevado
Versatilidad	Difícil de modificar y actualizar	Fácil de modificar y actualizar	Variedad de accesorios, difícil de modificar
Hardware Libre	Equipos propietarios, hardware cerrado	Abierto en planos, esquemáticos y gran comunidad	Equipos propietarios, hardware cerrado
Software Libre	Libre y propietario	Mayoría libre	Libre y propietario
Robustez	Producto comercial estable y confiable	Requiere pruebas, potencialmente estable y confiable	Producto comercial estable y confiable
Conclusión	Esta solución es mas costosa, robusta y rápida de implementar una vez se logren realizar las importaciones. La actualización y modificación es mas compleja	Requieres realizar mas desarrollos e integraciones, pero se tiene mas control de los equipos ya que usa software y hardware libre, mas fácil de actualizar, modificar y mantener en el tiempo, esta fue la mejor solución	Solución mas costosa, robusta y rápida de implementar una vez se logren realizar las importaciones. La actualización y modificación es mas compleja

Cuadro 9: Análisis y selección de la mejor solución según criterios definidos.

7. Desarrollos

Luego de tener las variables y equipos más importantes identificados, se determinaron qué equipos serán instalados, caso del enfocador, la cámara CCD principal, la rueda de filtros, la cámara del telescopio buscador, la estación meteorológica y el telescopio. También cuales serian emulados, como el domo, y que desarrollos adicionales fueron requeridos como el control de encendido y apagado web de la cámara, el telescopio y la lámpara auxiliar. Además de desarrollos como la cámara de monitorio remoto. Todos equipos requeridos para cumplir con el objetivo de transformar el telescopio MEADE LX850 de 14 pulgadas en un OARAB.

7.1. Configuración del modulo Raspberry pi

Este mini-computador de placa única (single board computer) fue usado como unidad de computo en varios de los desarrollos realizados. Dos de sus configuraciones comerciales usadas fueron la Raspberry Pi 3B+ y la Raspberry Pi Zero. Para poner en funcionamiento estas computadoras de pequeño formato es necesario empezar con la instalación del sistema operativo, para luego instalar accesorios que permiten la operación remota y la configuración de esta. Estos procedimientos son expuestos a continuación:

7.1.1. instalación sistema operativo

La instalación del sistema operativo de la Raspberry Pi consiste en cargar una de las distribuciones disponibles en una memoria micro SD. Las distribuciones compatibles se pueden encontrar en la sección de descargas de la web oficial de Raspberry Pi²³. Para este trabajo fue usado el sistema operativo oficial llamado Raspbian. Este viene en dos versiones una con entorno gráfico, escritorio y algunas aplicaciones y una versión básica (lite), la cual trae lo mínimo del sistema operativo. La Figura 80 se muestra como se ve la descarga del sistema operativo en la web oficial. De esta imagen es importante destacar el código SHA-256 el cual acompaña cada versión del sistema operativo, este código permite verificar que el archivo descargado este conforme al archivo original.



Figura 80: Sistema operativo Raspbian en la pagina de descargas oficial.

Luego de descargar Raspbian se procede a verificar el archivo descargado, en Linux podemos usar el comando:

²³Descargas Web Raspberry Pi: <https://www.raspberrypi.org/downloads/>

```
sha256sum RutaArchivo/nombreArchivo
```

En Windows podemos encontrar diferentes aplicativos, como el QuickHash ²⁴, el cual tiene una interfaz gráfica donde se carga el archivo comprimido descargado de la web oficial. El software realiza la suma de comprobación SHA-256, y el código resultante debe de coincidir con el presente en la Web, si los códigos no son iguales es por un error en la descargar o el transporte del archivo, en este caso se recomienda realizar nuevamente la descarga.

Con el sistema operativo descargado y verificado, el siguiente paso es instalarlo en la memoria micro SD. Para realizar esta instalación usamos el software Etcher ²⁵. Este software además de ser de código fuente libre, esta disponible en casi todos los sistemas operativos. Con la memoria micro SD inserta y lista para ser formateada, abrimos el software Etcher, buscamos la imagen del sistema operativo que vamos a instalar, seleccionamos la memoria (si no esta ya seleccionada, para evitar confusiones es mejor solo tener una memoria conectada al tiempo) y damos clic en Flash, conforme la Figura 81. El botón cambiara de color y empezara a cargar el sistema. Una vez finalizada la instalación removemos la micro SD y la insertamos en la Raspberry Pi. Antes de conectar la Raspberry a la energía debemos conectarle un monitor HDMI, un teclado y un ratón usando los puertos disponibles.

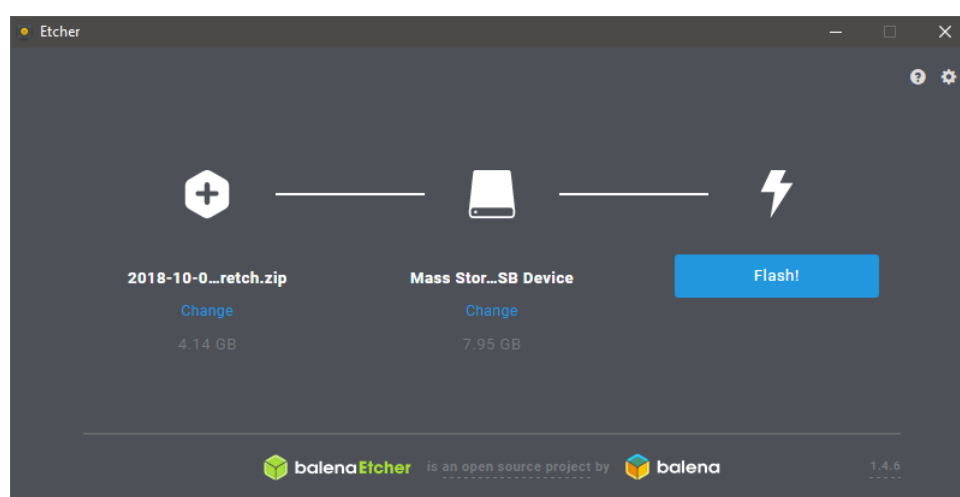


Figura 81: Etcher: software para cargar el sistema operativo de la Raspberry Pi.

Luego de tener conectados los periféricos a la Raspberry Pi (Pantalla, teclado y ratón), conectamos la potencia y esperamos que inicie el sistema. En la Figura 82 se ve el escritorio del sistema operativo además de una ventana de ayuda para realizar la configuración inicial. Esta configuración inicial tiene varios pasos, el primero es configurar el país, lenguaje y zona horaria, seguido de cambiar la contraseña del sistema operativo (que por defecto es *raspberrry*, como públicamente es conocida, por seguridad es mejor cambiarla). Luego el asistente nos solicitara conectarnos a una red WiFi, para continuar con la actualización del sistema y finalizar reiniciando el dispositivo.

²⁴QuickHash: <https://quickhash-gui.org/>

²⁵Etcher: <https://www.balena.io/etcher/>

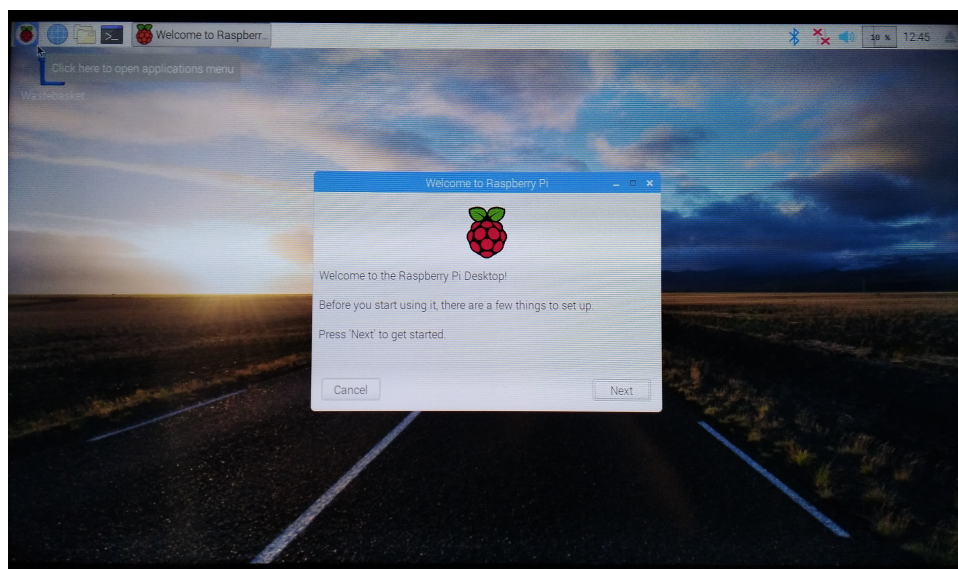


Figura 82: Escritorio del sistema operativo y asistente de configuraciones iniciales.

7.1.2. Configuración de Periféricos

Por defecto muchas de las interfaces de conexión y puertos de la Raspberry Pi vienen desactivados. Para los desarrollos realizados en este trabajo fueron usados la cámara, y los protocolos de acceso remoto SSH y VNC. Todos estos periféricos se pueden activar por medio del uso en la terminal de la Raspberry Pi del comando:

```
sudo raspi-config
```

Este comando despliega el menú de la Figura 83, en este menú nos dirigimos a la opción 5, *interfacing Options*, tecleamos *enter* para seleccionar, esto nos lleva a un menú donde podremos ver las interfaces disponibles de la Raspberry Pi, de nuestro interés *Camera*, *SSH*, *VNC*, correspondientes a las opciones P1, P2 y P3, seleccionamos y activamos cada una tecleando *enter*, y respondiendo con un *enter* Si cuando nos pregunte si deseamos activar el recurso. Al finalizar la activación de estos recursos y para que los cambios tengan efecto reiniciamos el sistema.

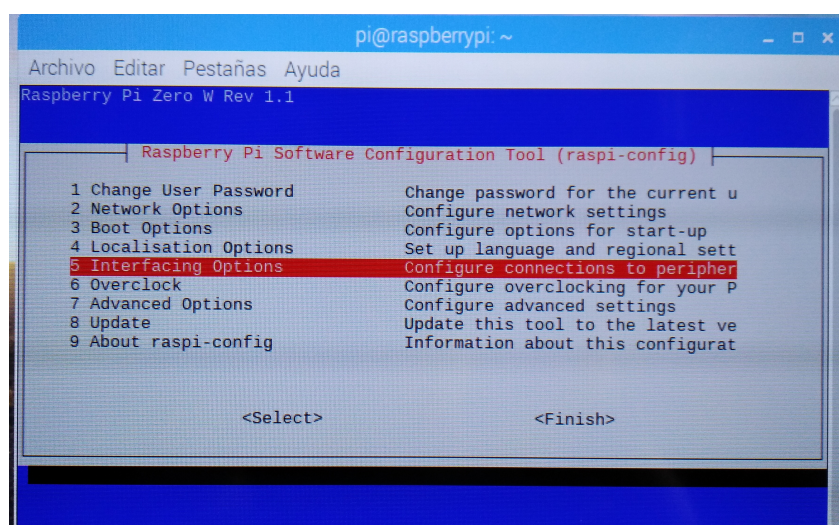


Figura 83: Comando *raspi-config* para la activación de periféricos.

7.1.3. Configuración de software para acceso remoto

Para acceder remotamente a la Raspberry Pi fue usado software VNC o (Virtual Network Computing). El VNCServidor de RealVNC²⁶ viene por defecto con el sistema operativo Raspbian de la Raspberry Pi, su interfaz se activa de forma automática una vez es activado el recurso VNC por medio del comando *raspi-config*. La interfaz puede verse en la Figura 84. Este software requiere un cliente que debe instalarse en el ordenador desde el cual se desea controlar la Raspberry Pi, la cual ejecuta un servidor VNC que atiende las conexiones de los clientes. Hay dos formas de conectarse a un dispositivo, una dentro de una red donde son conocidas las IP entre los dispositivos como es el caso de la red interna de la Universidad de Antioquia, la otra es por medio de una cuenta de RealVNC, esta cuenta permite conectar hasta 5 dispositivos de forma gratuita. Para ingresar al dispositivo remoto además de la ruta, (IP o usuario de RealVNC) se requiere el uso del usuario y la contraseña del sistema operativo. Por defecto el usuario es *pi* y la contraseña fue la elegida en la configuración inicial o la por defecto que es *raspberrypi*.

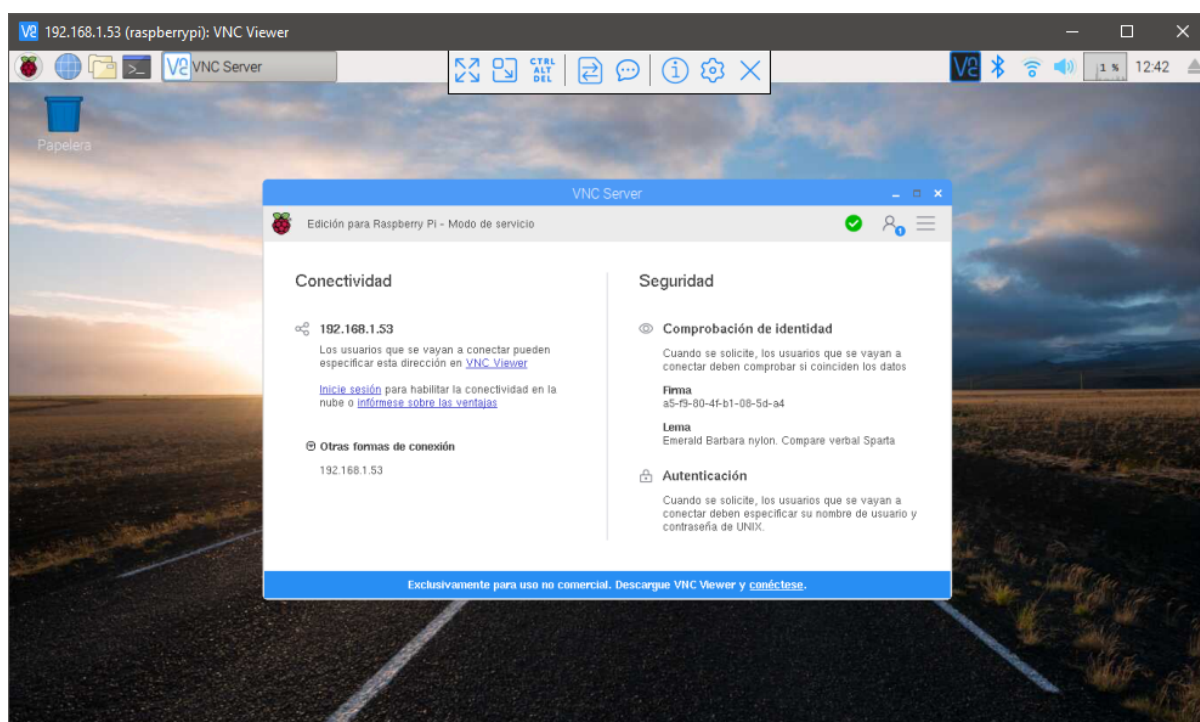


Figura 84: Interfaz acceso remoto RealVNC.

7.2. Cámara de Monitoreo

Para el monitoreo del interior del observatorio se desarrolló un módulo que realizar streaming de vídeo hacia una web, ser observado a través de una página web (Figura 85), la cual puede ser accedida desde la red local del equipo.

²⁶RealVNC: <https://www.realvnc.com/en/>

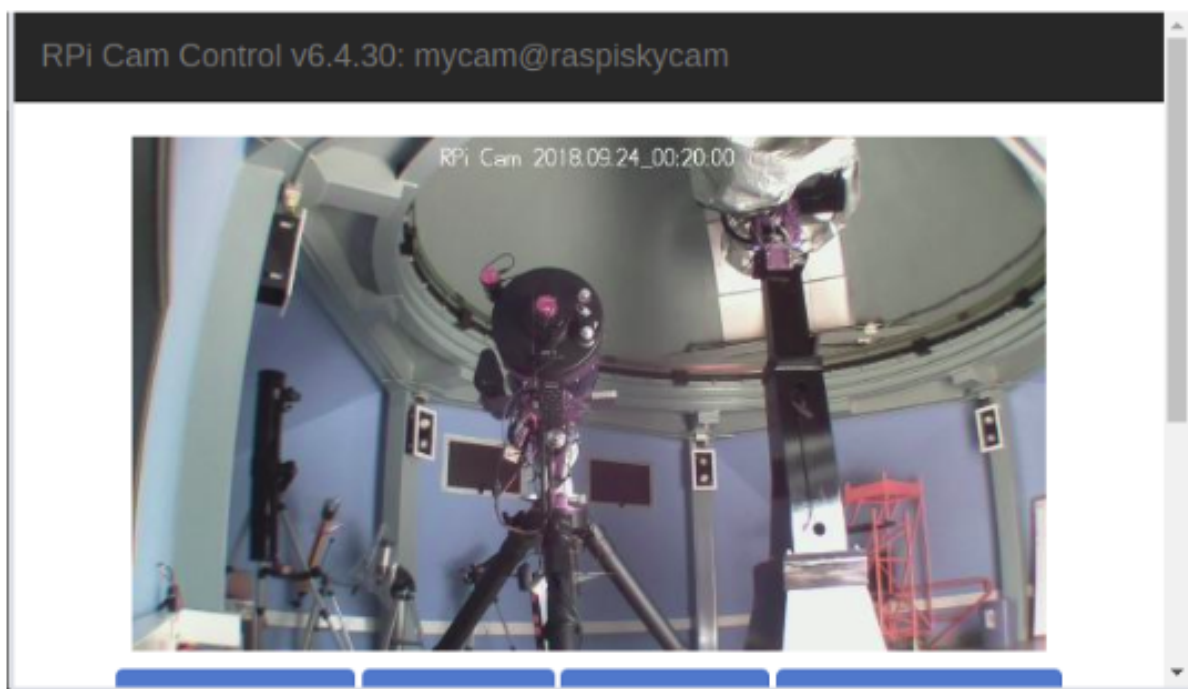


Figura 85: Imagen remota del sistema de monitoreo visual del estado del telescopio.

Este desarrollo funciona durante cierto tiempo en ausencia de energía eléctrica ya que presenta una batería de respaldo con su sistema de carga y elevación (Figura 86), el cual alimenta al sistema cuando el suministro eléctrico está ausente, y mantiene la batería cargada cuando esta presente. Este respaldo de energía usa una batería de iones de litio de 3500mA con la que logra una autonomía de 6 horas.

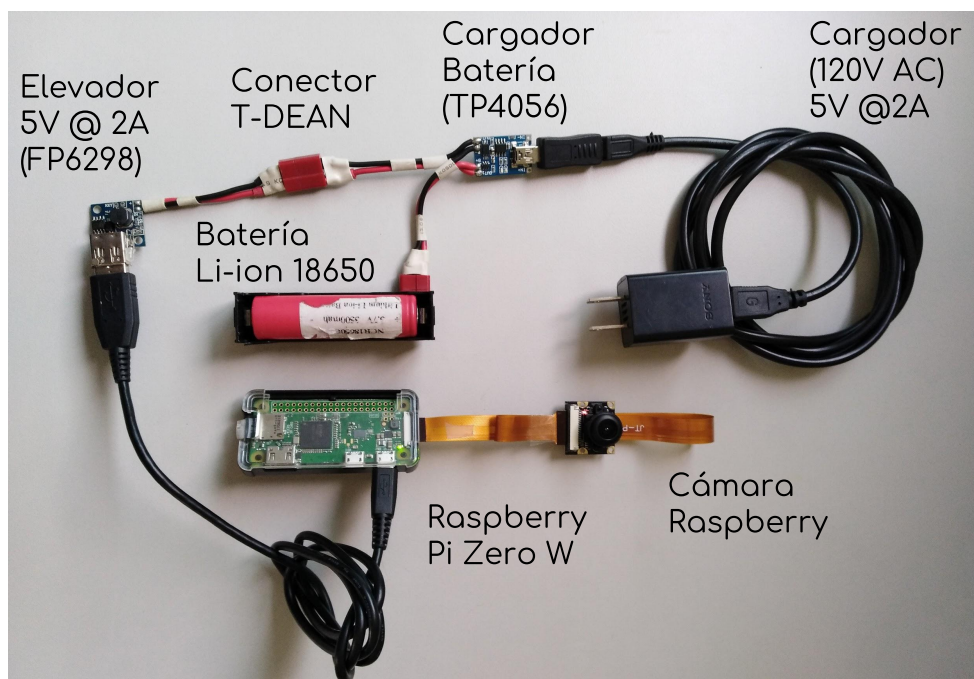


Figura 86: Componentes del sistema de monitoreo.

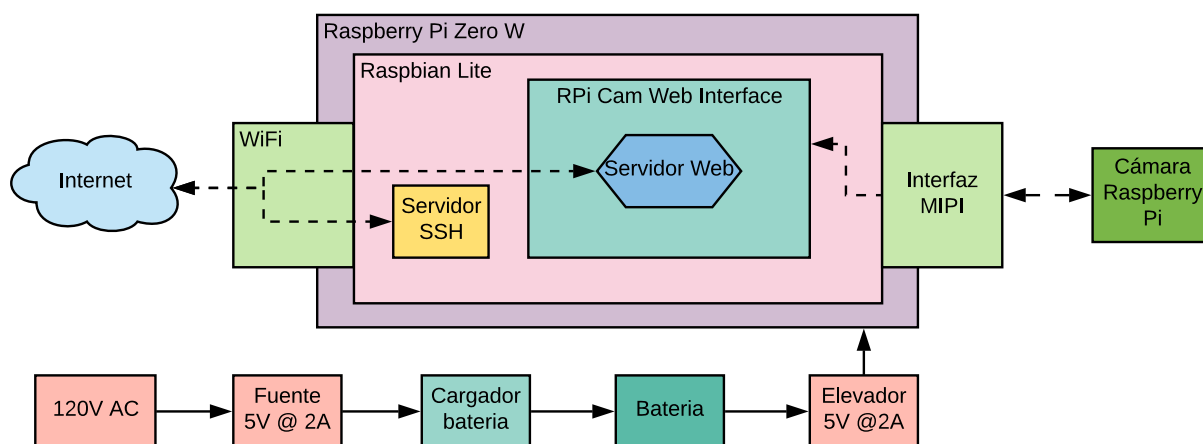


Figura 87: Diagrama de la solución final del sistema de monitoreo.

Instalación del código del sistema de monitoreo:

La librería para Linux del sistema de monitoreo, fue la desarrollada por el usuario de GitHub silvanmelchior²⁷. Este desarrollo cuenta con una Wiki donde se presenta la información de su uso²⁸, la instalación consta de los siguientes pasos:

- Actualizar el sistema:

```
sudo apt-get update
sudo apt-get dist-upgrade
```

- Se descarga la librería:

```
[width=\textwidth]
git clone https://github.com/silvanmelchior/RPi_Cam_Web_Interface.git
```

- Se busca el instalador y se ejecuta:

```
cd RPi_Cam_Web_Interface
./install.sh
```

Aceptamos los cambios solicitados por el instalador, que a mitad del proceso mostrara una interfaz como la de la Figura 88, donde encontramos las siguientes configuraciones: *Cam subfolder* la cual hace referencia al nombre de la ruta luego de la IP que hay que teclear para conectarse a al interfaz web de la cámara. *Autostart* que permite configurar el arranque automático del sistema de monitoreo. *Server* se selecciona el servidor web a usar. *Webport* esta configuración hace referencia al puerto, se deja en 80 que es la opción por defecto. *User* usuario que debe ser ingresado para acceder a la interfaz de la cámara, si se deja vacío el sistema permitirá acceso sin seguridad. *Password* contraseña para acceso a la interfaz. *jpglink* se dejo

²⁷Librería Web Cámara: https://github.com/silvanmelchior/RPi_Cam_Web_Interface.git

²⁸<https://elinux.org/RPi-Cam-Web-Interface>

en no como viene por defecto. *phpversion* aquí debe indicarse la opción de php a utilizar, de no funcionar la versión 7 se usa la versión 5.

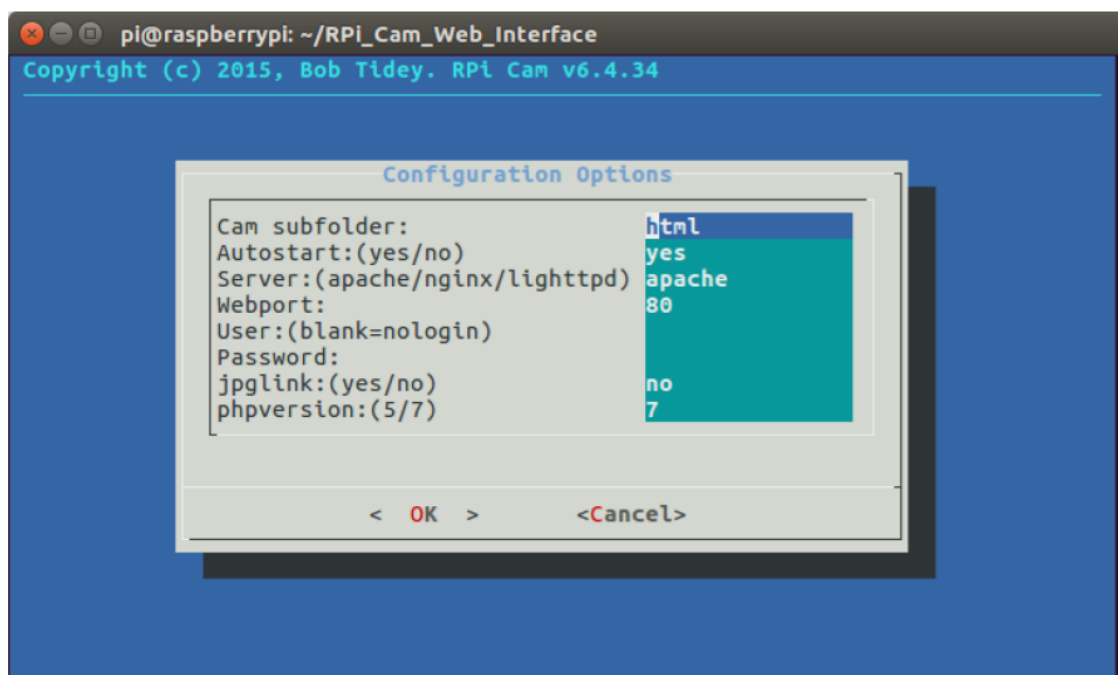


Figura 88: Opciones de configuración del sistema de monitoreo.

Una vez se finaliza la configuración se va a la opción *OK* y se espera hasta concluir la instalación, aparecerá un mensaje preguntando si desea iniciar el sistema de monitoreo, se elige la opción si *Yes*. Finalmente se reinicia el dispositivo para verificar que el sistema de monitoreo arranque al inicio del sistema operativo.

7.3. Control On/Off Web

El encendido y apagado del telescopio, tal y como viene este de fabrica, se realiza usando un interruptor físico sobre el panel de control principal del telescopio. La cámara CCD SBIG requiere ser desconectada de la red eléctrica para conseguir apagarla ya que a través de software no hay rutinas conocidas que permitan esta función. Otro elemento que requirió el desarrollo de este sistema fue que la rutina de apagado del telescopio finaliza con el parqueo del equipo con el fin de conservar las configuraciones de orientación y tiempos del controlador principal del telescopio, al enviar la instrucción de parqueo la montura va al punto definido como punto “home” o de reposo (este punto fue elegido con el tubo óptico mirando al norte). Al llegar a este punto el sistema solicita apagar la montura, actividad que antes de desarrollar este modulo solo era posible de realizar estando físicamente cerca del interruptor en la caja de control principal del telescopio.

El desarrollo consiste en un modulo ESP8266 (Lolin MCU V3) que se conecta a la red WiFi y empieza a ofrecer de forma local una web (Figura 90) que permite abrir y cerrar dos relevos electromecánicos los cuales cortan o dejan fluir corriente (Figura 89), en nuestro caso para el telescopio y la cámara, este equipo se alimenta de la conexión de 12V del telescopio. En la Figura 91 podemos ver el diagrama general de la conexión de ese modulo. El código que permite esta conexión es expuesto en la Figura 92.

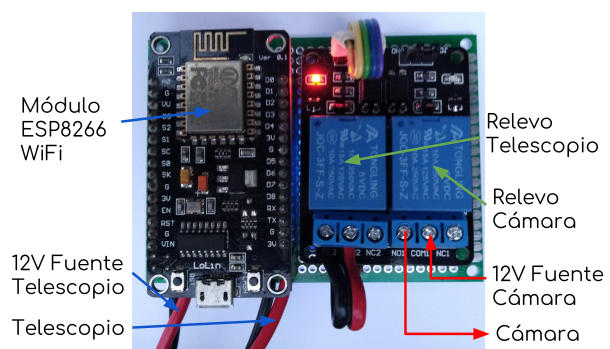


Figura 89: Detalle del modulo de control ON/OFF.

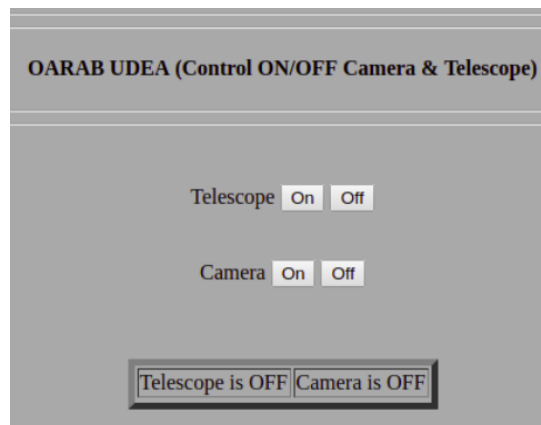


Figura 90: Detalle de la web que permite controlar desde la red local el encendido y apagado de los equipos.

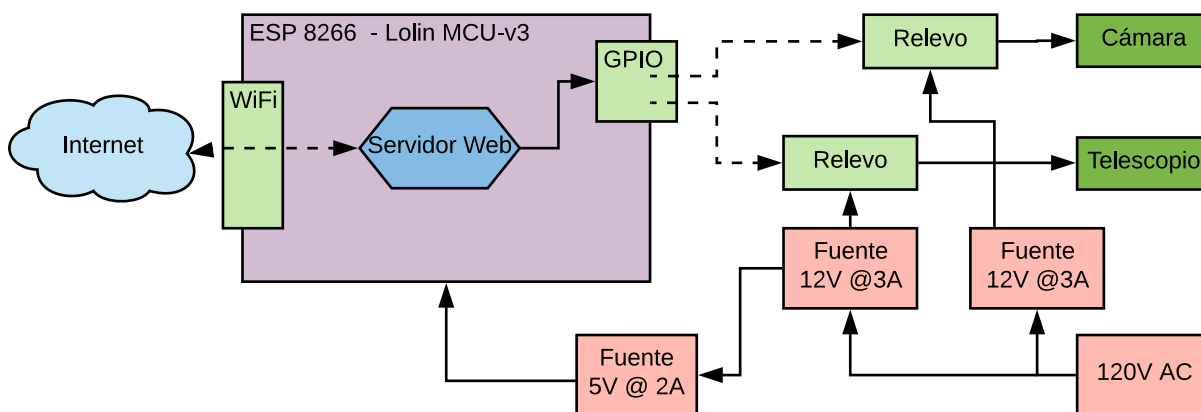


Figura 91: Diagrama final del modulo para encendido y apagado del telescopio y la cámara CCD.

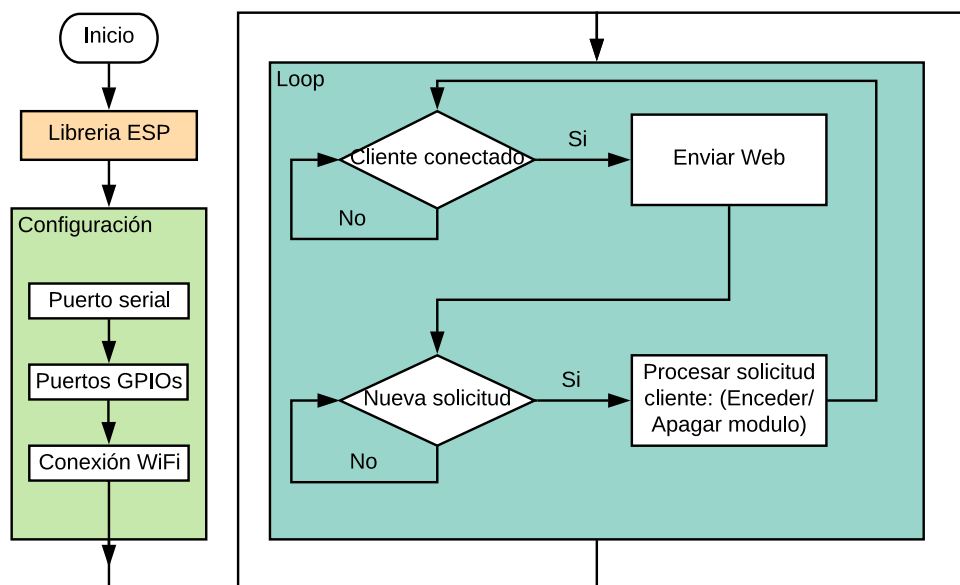


Figura 92: Código modulo para encendido y apagado del telescopio y la cámara CCD.

7.4. Lámpara web para el monitoreo

El sistema de monitoreo desarrollado en la sección 7.2, que permite verificar de forma visual el estado del telescopio, no presenta sensibilidad suficiente como para distinguir algo en la noche, por eso fue preciso integrar una lámpara que pudiera ser controlada de forma remota y que permitiera tener suficiente luz para ver el estado del equipo, esta lámpara esta compuesta por un modulo WiFi (ESP8266) y un relevo (Figura 93). Esta lámpara debe permanecer apagada durante las observaciones ya que aportaría ruido (luz) a la cámara CCD. Este desarrolló es una versión simplificada del realizado en la sección 7.3, ya que solo requiere controlar un solo dispositivo, la lámpara. La Figura 94 muestra el diagrama de conexiones de este modulo, el cual utiliza el mismo código que el modulo para control del telescopio y la cámara.

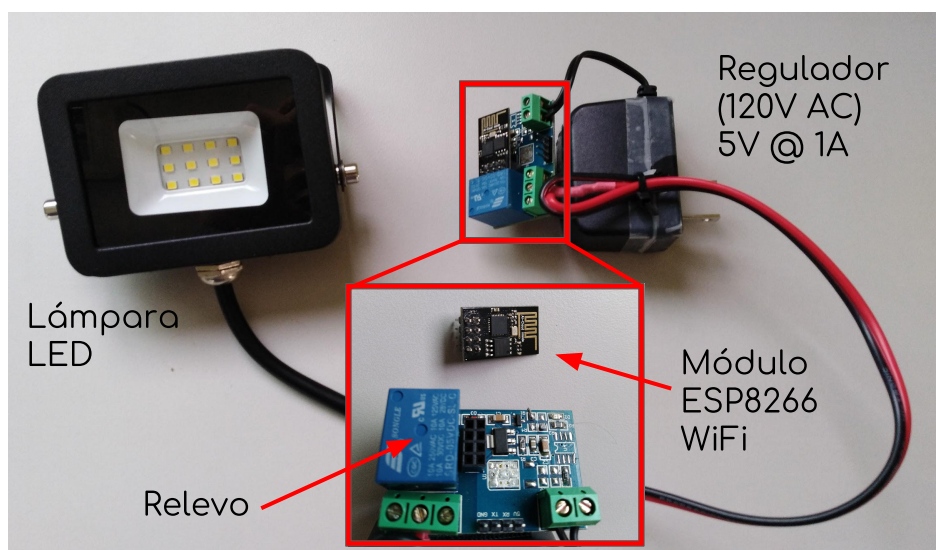


Figura 93: Lámpara controlada por WiFi.

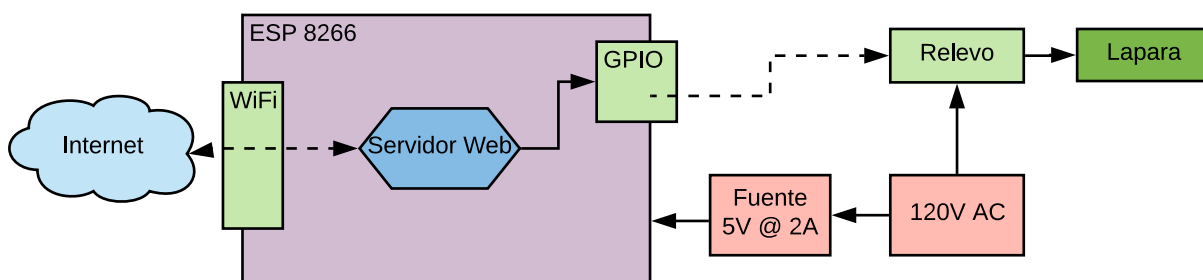


Figura 94: Diagrama final de la lámpara de monitoreo.

7.5. Simulador cúpula y telescopio

Este simulador modela el comportamiento de la montura del telescopio además de la cúpula, la cual por motivos de tiempo y recursos no es posible diseñar ni instalar. Este desarrollo sirve para validar los cálculos necesarios para poner en funcionamiento el observatorio, como son el convertir las coordenadas de ascensión recta y declinación en un dato de azimut que será enviado al domo de forma que las compuertas tomen una posición

que no interfiera con el haz de fotones en dirección al tubo óptico. Esta simulación fue realizada usando software abierto Processing ²⁹.

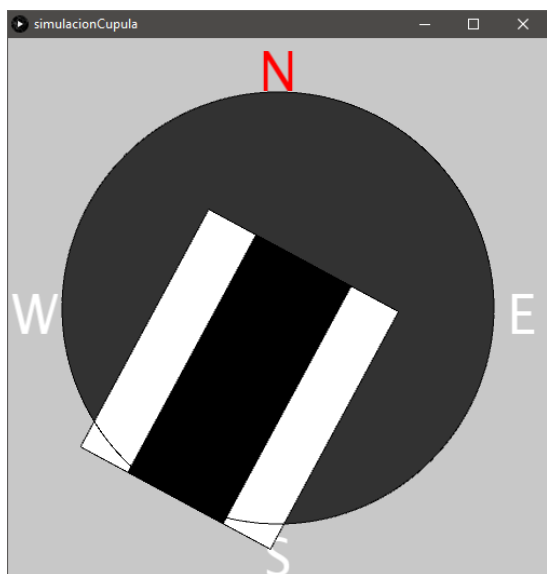


Figura 95: Simulador del domo.

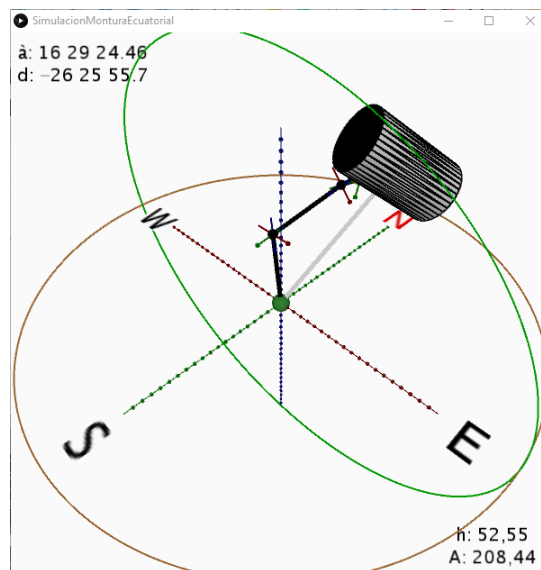


Figura 96: Simulador de la montura ecuatorial.

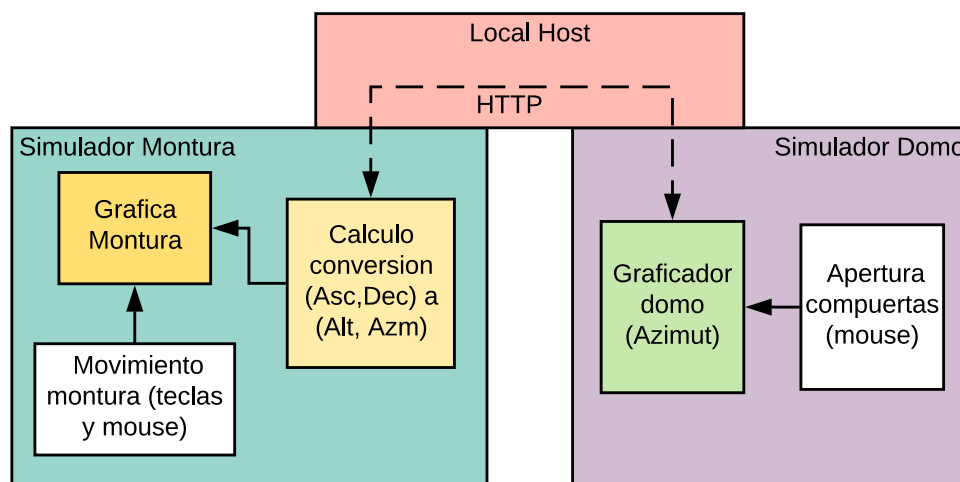


Figura 97: Diagrama del código del simulador del domo y la montura.

7.6. Sistema de supervisión y diagnóstico automático

Durante este trabajo se identificó la necesidad de desarrollar un sistema de supervisión automático para el telescopio MEADE LX850, para avanzar en este proceso se montó una IMU (Figura 98) en el tubo óptico del telescopio y un sensor de corriente (Figura 99) que mide el consumo general del equipo, esto con el fin de obtener datos que permitieran identificar las diferentes posiciones del equipo, también saber si el mismo se encontraba balanceado o no. Este sistema permitiría, por ejemplo, identificar fallas o estados de funcionamiento anormales, que ayuden con el mantenimiento preventivo del sistema. Estos

²⁹<https://processing.org/>

sensores fueron conectados conforme al diagrama de la Figura 100, Y fue usado el código conforme a lo que se describe en la figura 101.

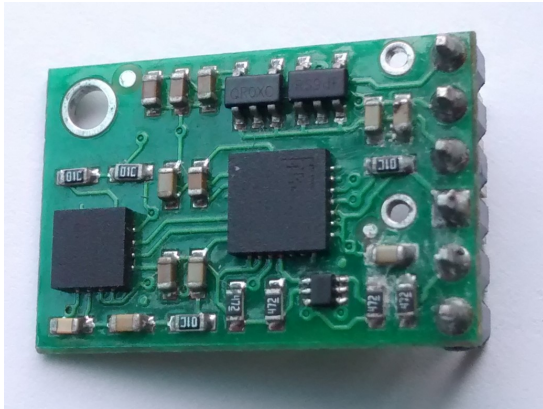


Figura 98: IMU (Inercial Measurement Unit).

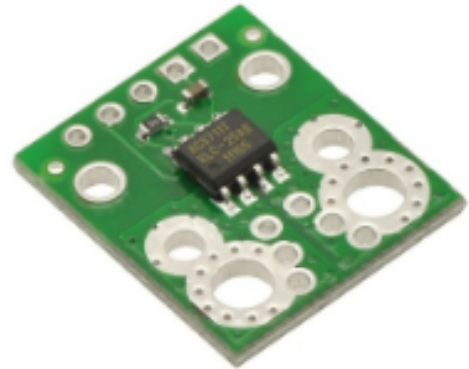


Figura 99: Sensor de Corriente.

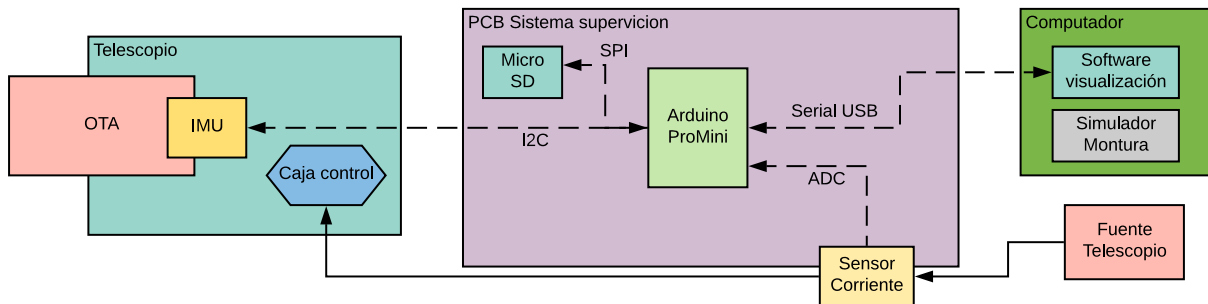


Figura 100: Diagrama del montaje del sistema de supervisión y diagnostico.

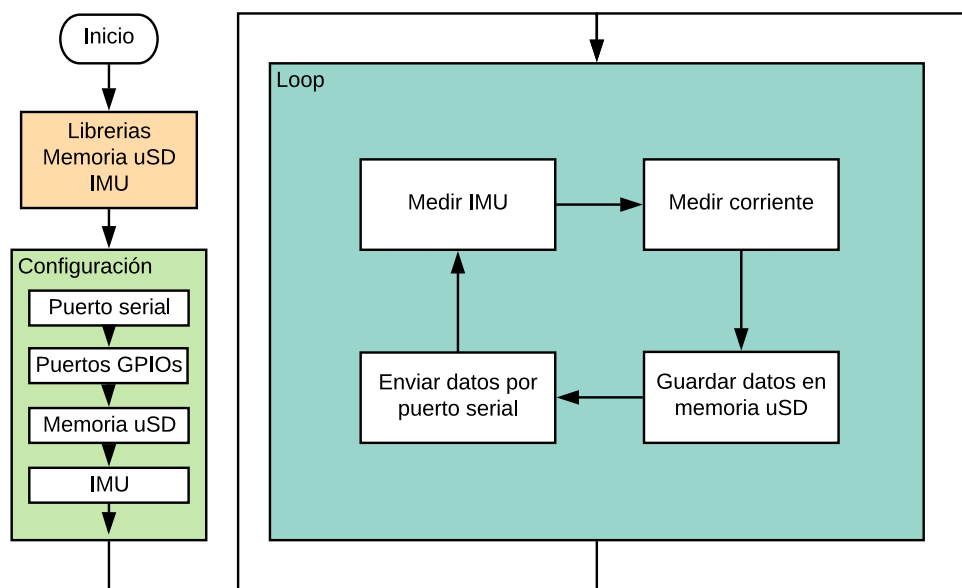


Figura 101: Diagrama del código del sistema de supervisión y diagnostico.

Las pruebas realizadas con este sistema de supervisión y diagnostico consistieron en mover el equipo entre las posiciones extremas del mismo como se ve en la Figura 102, esto movía

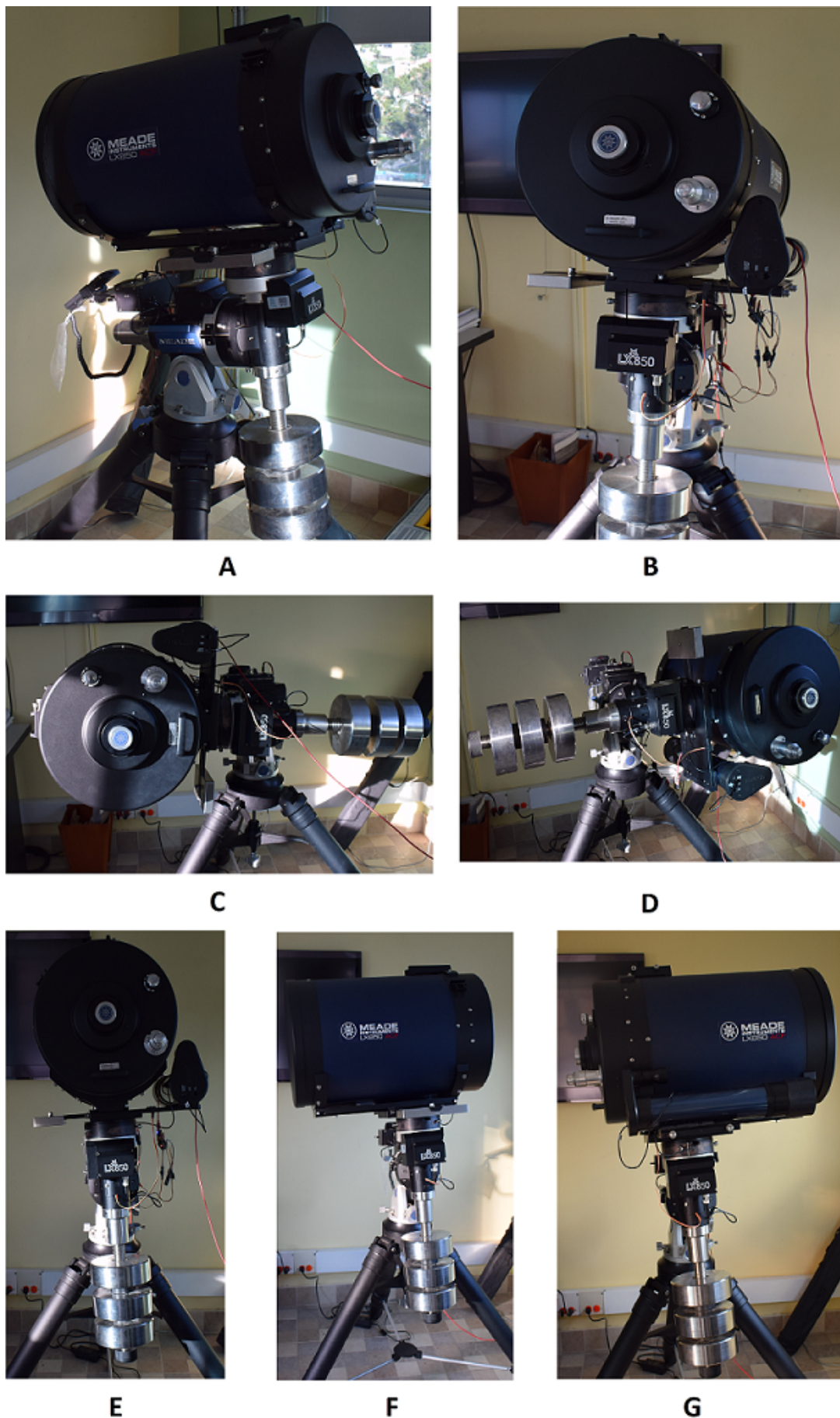


Figura 102: Posiciones validas del telescopio.

la IMU que estaba sujeta al tubo óptico y la cual en conjunto con el sensor de corriente registró datos de aceleración lineal 3D, velocidades angulares 3D y campo magnético 3D. Estos datos se pueden apreciar en las Figuras 103, 104, 105 y 106. En estas imágenes se ven unas líneas azules verticales las cuales dividen las pruebas realizadas como se ven en la Figura 102, donde los movimientos se dividen en los siguientes A: encendido, B: alineación, C,D,E,F,G: movimientos en ejes, así las líneas azules verticales dividen los datos en 7 bloques correspondientes a las 7 pruebas realizadas (de la A hasta la G).

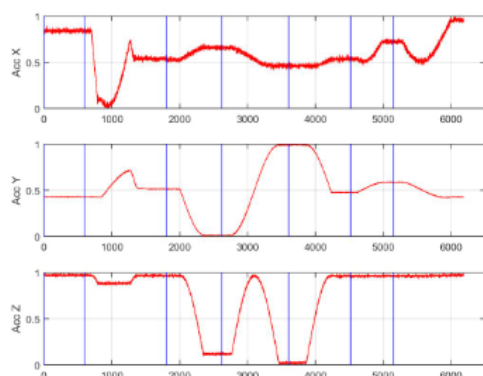


Figura 103: Aceleraciones medidas.

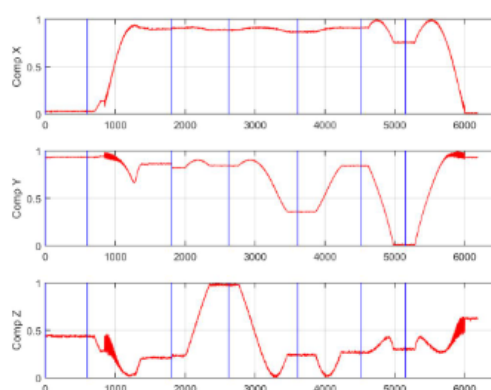


Figura 105: Campo magnético medido.

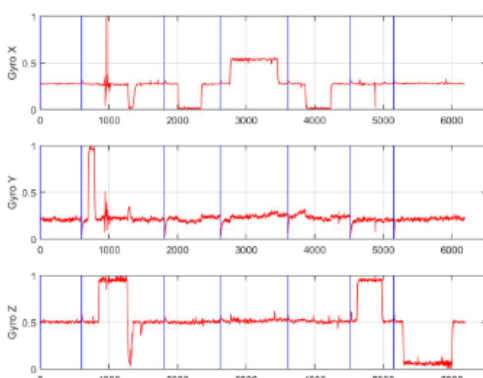


Figura 104: Velocidades angulares medidas.

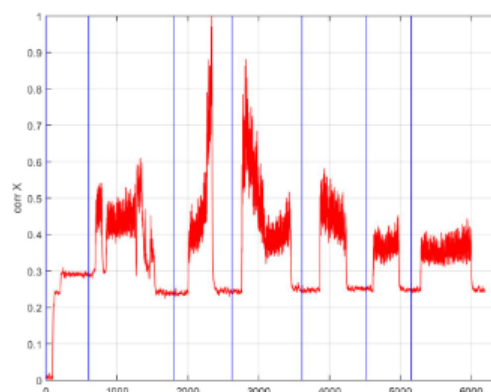


Figura 106: Corriente medida.

De estos datos iniciales se puede ver que efectivamente hay diferencias para cada una de las posiciones del telescopio en términos de aceleraciones, velocidades angulares, campo magnético y corriente, lo cual puede usarse para verificar el funcionamiento del equipo (velocidades y posiciones correctas). La gráfica de corriente presenta datos que indican un leve desbalanceo, lo que deriva en una diferencia en la corriente consumida por el motor cuando el tubo óptico está al oriente respecto a cuando está en el occidente del meridiano del observador esto se aprecia en el bloque central o bloque 4 de la Figura 106, correspondiente al movimiento de la posición C a D, o cuando el tubo va de un lado del meridiano al otro.

8. Integración y pruebas del OARAB

Con el fin de validar e identificar el desempeño final del sistema de control diseñado, se realizaron integraciones y pruebas de los equipos. Los resultados de estas son presentadas a continuación.

8.1. Integración del hardware del Sistema de Control

El sistema de control en principio está pensado para que este alojado en un computador embebido como lo es la Raspberry Pi, de forma que pueda controlar todos los instrumentos y a la vez reduzca costos. Además consume menos energía y permiten un mejor control del hardware del equipo por lo que es más fácil dar soporte y realizar actualizaciones.

Una vez definido el diseño del sistema de control se inició el montaje de los subsistemas del telescopio, se procedió con la conexión y pruebas del telescopio LX850 por medio de las interfaces de comunicación que este equipo tiene disponibles, evitando intervenir la electrónica propia del equipo. Se optó por montajes con sensores o instrumentos externos, que permitan la operación e identificación de las variables funcionales del equipo. El software seleccionado fue StellarMate³⁰ (Ubuntu Mate + KStars + INDI), por ser de código fuente libre, funciona en Linux y en sistemas embebidos como la Raspberry Pi.

El software StellarMate se conecta con el telescopio, cámara y accesorios, usa como plataforma de hardware la Raspberry Pi 3B, la cual se conecta a la red WiFi y por medio de esta permite el control de telescopio y cámaras.



Figura 107: Sistema de control basado en StellarMate (Ubuntu Mate + KStars + INDI) para el control de telescopio, cámaras y accesorios.

El diseño del controlador integrado presenta dos formas posibles de ser operado, conforme a lo que se muestra en las Figuras 108 y 109. Donde un modo es con la Raspberry Pi como computador principal, mientras que en la otra configuración se usa como servidor INDI, estas dos opciones pueden ser intercambiadas a necesidad sin tener que realizar cambios físicos.

³⁰<https://www.stellarmate.com/>

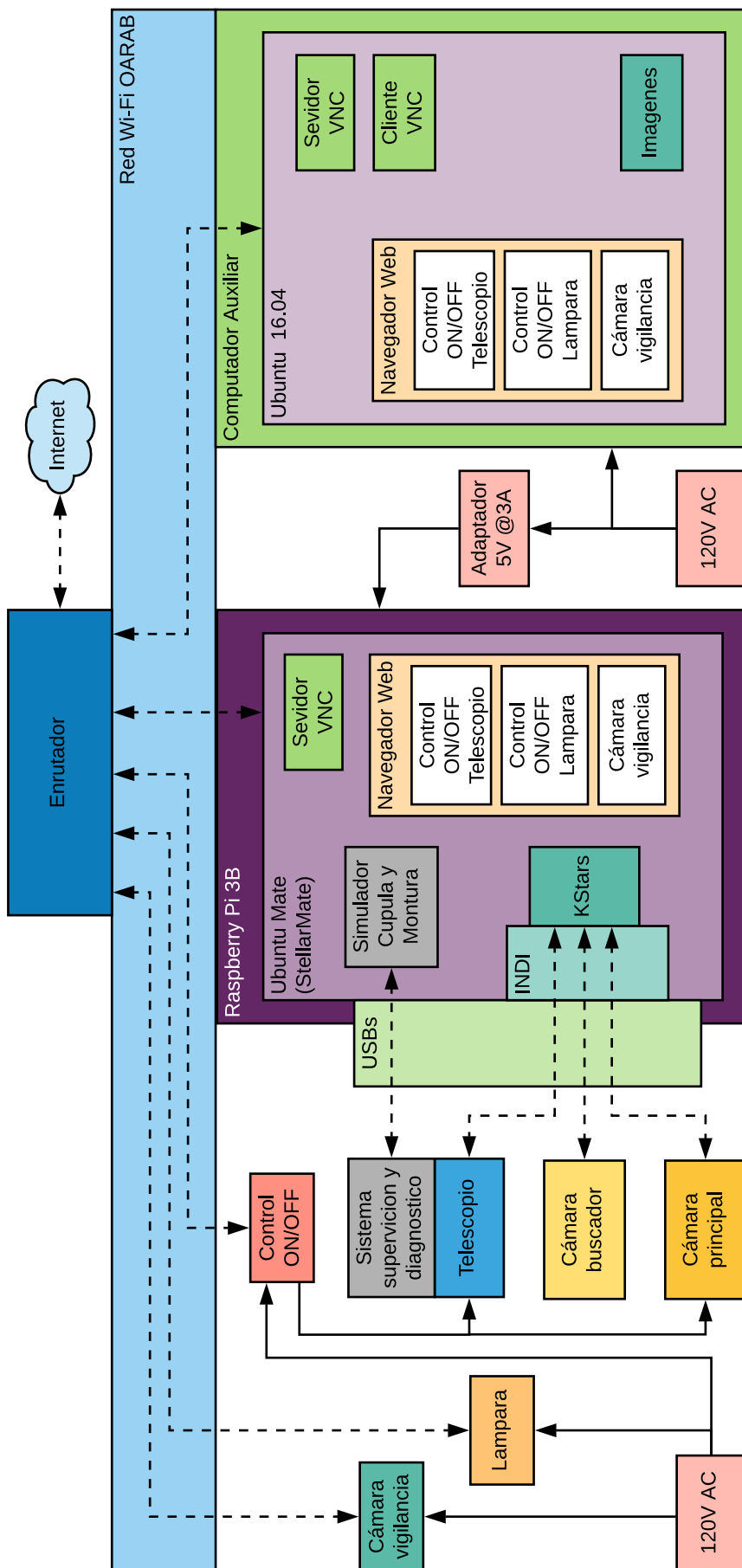


Figura 108: Diagrama de la integración del sistema de control.

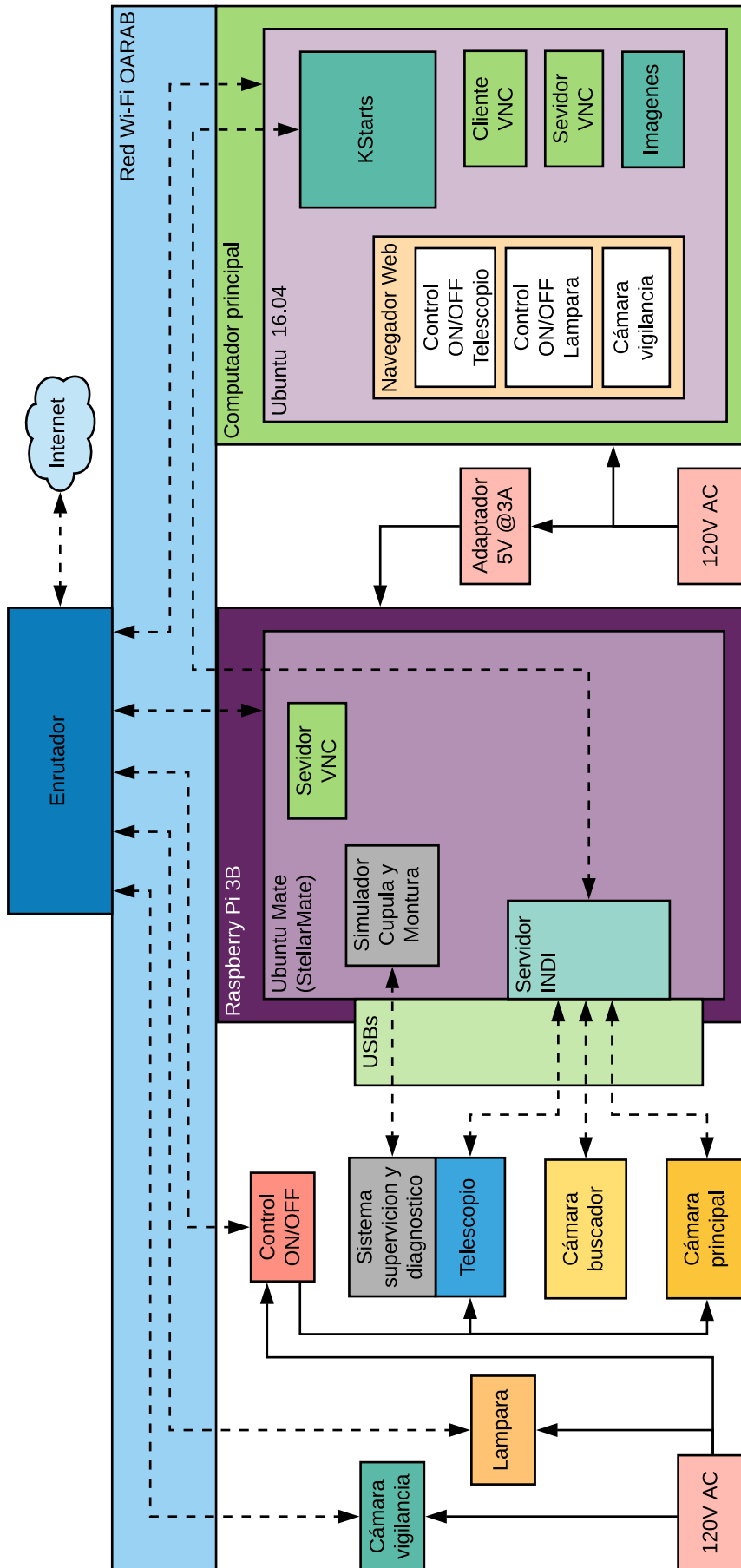


Figura 109: Diagrama de la integración del sistema de control con la Raspberry en modo servidor INDI.

8.2. Integración y pruebas de la rueda de filtros

Los filtros fueron agregados en la rueda de filtros conforme al orden presentado por defecto en INDI, a diferencia de los últimos dos los cuales difieren de los filtros por defecto del software, así estos últimos filtros fueron modificados en el software para coincidir con los filtros disponibles. La distribución final se presenta en la Figura 110.

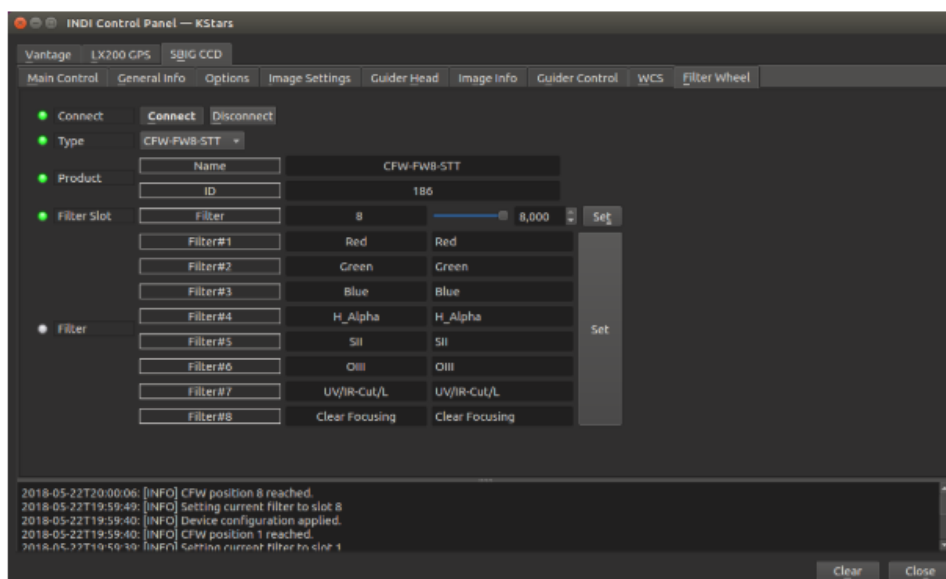


Figura 110: Configuración de los filtros en INDI-KStars.

Para verificar el funcionamiento del telescopio, el Micro-enfocador, la rueda de filtros y la CCD se procedió a captura una imagen, la cual es presentada en la Figura 111. Es bien importante recordar la importancia del enfoque grueso del telescopio ya que en principio el enfoque para captura de imágenes en tierra como la de esta prueba es bastante diferente al enfoque requerido para capturar objetos en cielo, y es posible confundir este problema de enfoque con problemas en la configuración de disparo de la cámara, como tiempo de exposición o filtro usado.

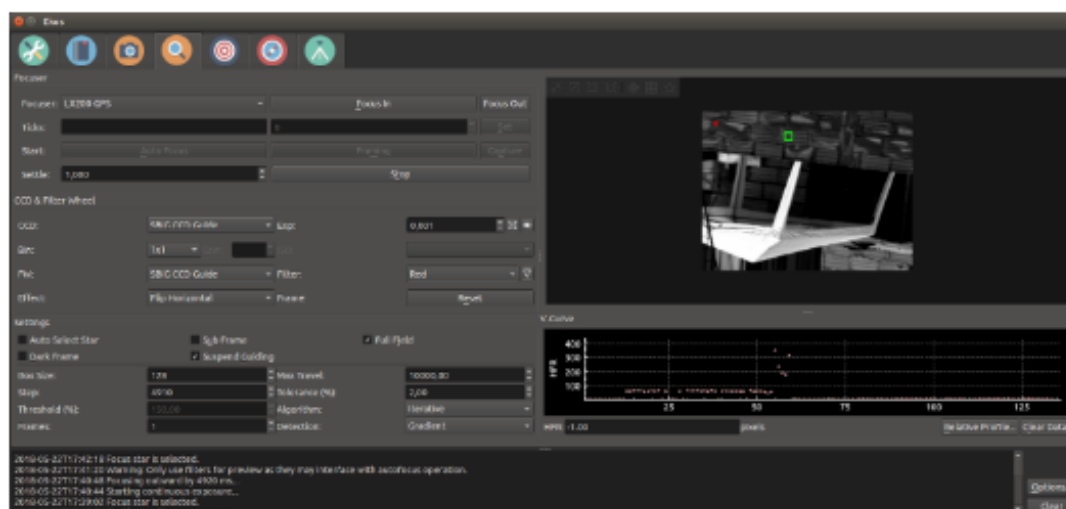


Figura 111: Prueba de captura de imagen con los filtros usando INDI-KStars.

8.3. Pruebas y análisis del desempeño del controlador

Las pruebas y análisis del desempeño del controlador comenzó inmediatamente se tenía una primera versión del mismo, esto con el fin de poder validar las posibles opciones del controlador, Para realizar el análisis se probó el equipo bajo condiciones lo mas reales posibles, limitadas por el clima. Se lograron realizaron pruebas del apuntamiento del equipo. Lamentablemente no fue posible realizar y documentar pruebas del desempeño en seguimiento de objetos en el cielo.

Para hablar de desempeño del controlador es necesario conocer el error de apuntamiento de la montura y el campo visual, ya que este último condicionado por el arreglo óptico del telescopio y la cámara, nos permite determinar cuál es el error admisible, ya que el desempeño depende de que tan estable es el equipo y que tan detectable es el error de apuntamiento por este arreglo.

8.3.1. Determinación del campo visual del telescopio o FOV (Field Of View)

El FOV o campo visual nos indica que porción del cielo es posible observar con el telescopio. Esto depende de la óptica y la cámara usada. Su valor puede obtenerse de forma teórica usando los datos ópticos del telescopio y el tamaño del sensor, la Ecuación 8 puede ser usada³¹.

$$FOV = \frac{\text{Arctan}D * 10^{-3}}{f} \quad (8)$$

Donde:

- *FOV*: Campo visual (minutos de arco)
- *D*: Tamaño diagonal del CCD (mm)
- *f*: Distancia focal del telescopio (mm)

También podemos encontrar calculadores online³², pero es mas practico realizar el calculo por medio de la captura de imágenes. Existen diferentes métodos a continuación listamos algunos:

- **Tiempo de transito por el campo (Menor precisión):** Este método es uno de los mas simples de calcular. Consiste en medir cuanto tiempo tarda un objeto en cruzar el campo, este tiempo es transformado a distancias en el cielo, usando la velocidad de rotación de la Tierra de $0,25^\circ/\text{minuto}$.
- **Tamaño de objeto conocido:** Para calcular el campo visual pueden usarse objetos con tamaños conocidos como el Sol, la Luna o los planetas. Basta con tomar una foto de al menos una sección de los mismos donde sea evidente su curvatura, para luego encontrar el diámetro de esta sección de circunferencia usando software de edición de imágenes. Con el diámetro podremos encontrar la relación entre el tamaño conocido del objeto (el caso de la Luna es 31 minutos en promedio, equivalente a 0.5°) y el tamaño de la imagen.

³¹<http://www.astrosurf.com/luxorion/report-formulae.htm>

³²<http://www.skyatnightmagazine.com/astronomy-field-view-calculator>

- **Imagen de campo de estrellas conocido (Mayor precisión):** Este proceso requiere tener una imagen de un campo de estrellas conocido, estas pueden obtenerse en la red³³. Al campo conocido se le extrae la distancia entre dos estrellas en grados, minutos o segundos de arco, esta información será usada para referencia estas mismas estrellas en la imagen capturada por nuestro equipo. Por lo tanto estas estrellas deben ser visibles en la imagen capturada. Así tendremos una referencia de medida conocida, (la distancia de estas dos estrellas extraída del campo conocido), la cual podemos usar para ver el tamaño del campo que ve nuestra cámara CCD, usando la proporción de esta distancia respecto al tamaño total de la imagen.

8.3.2. Pruebas de apuntamiento

Otras posibles fuentes de errores son: la óptica, el enfoque y el seeing. También pueden darse problemas de rotación del campo, o errores derivados de una mala alineación al polo, engranajes de baja calidad con un gran error, o movimientos súbitos al cruzar los puntos de equilibrio del telescopio cuando pasa sobre el meridiano, donde la carga pasa de una cara a la otra del arreglo de engranajes, o cuando el espejo se mueve y redistribuye su peso sobre los soportes, además de otros eventos como vientos, temblores o movimientos de masa en las cercanías del equipo, que perturban en diferentes grados de magnitud la observación.

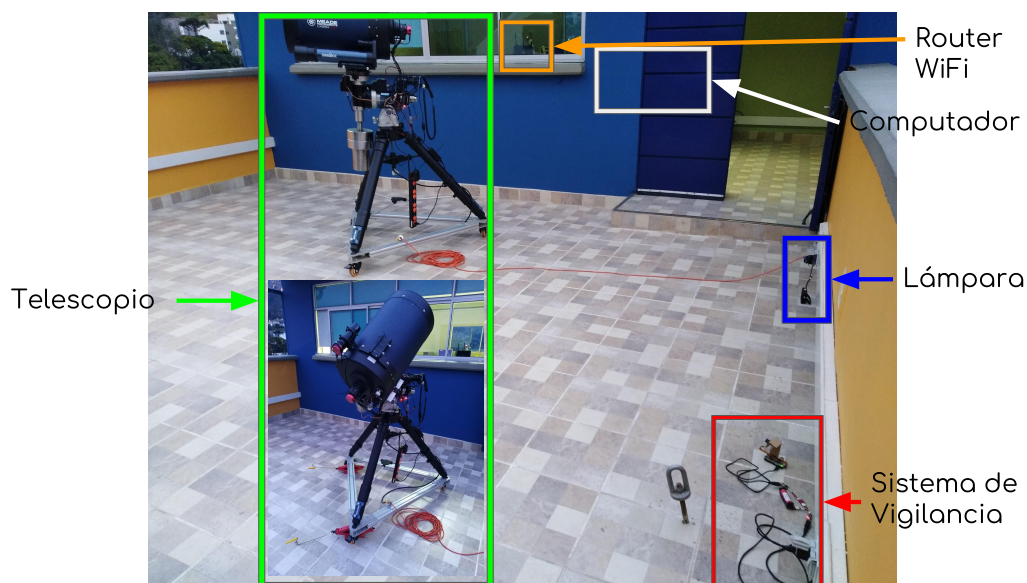


Figura 112: Configuración de las pruebas de apuntamiento.

Para identificar el desempeño del sistema de control diseñado en términos del error de apuntamiento se monto el telescopio conforme a Figura 112 y se apuntó a diferentes objetos, La Luna (Figura 113), Marte (Figura 114) y la estrella Altair (Figura 115). El error obtenido fue de un grado. Este proceso consistió en ordenar al telescopio apuntar al objeto (Luna, Marte y Altair) en el cielo por medio del software KStars usando INDI. Una vez la montura llegaba al punto, se procedía a centrar el objeto en la cámara, así, la retícula roja en las imágenes corresponde a la posición real del objeto, en este punto fueron capturadas las Figuras 113, 114 y 115. En este punto puede usarse la función

³³Strasbourg astronomical Data Center: <http://cds.u-strasbg.fr/>

SYNC (La función SYNC permite configurar en el telescopio las coordenadas actuales indicadas por el software KStars) para corregir el error. Así se le indica a la montura que corrija sus coordenadas ya que esta en las coordenadas del objeto, que fue previamente centrado en la cámara. Este proceso puede repetirse con el fin de mejorar el error.

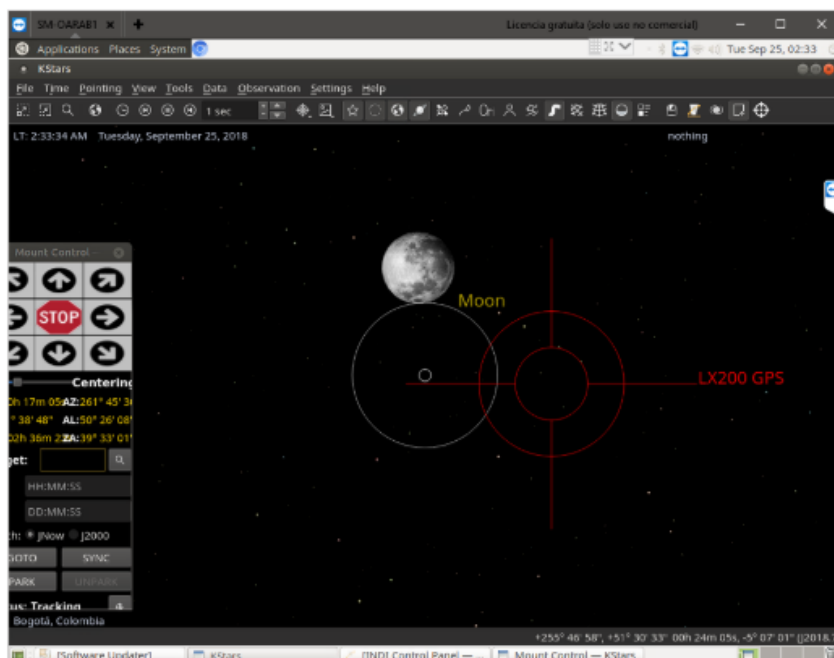


Figura 113: Error apuntamiento de la Luna. El círculo blanco tiene diámetro de 1 grado y esta cerca del error actual de la montura.

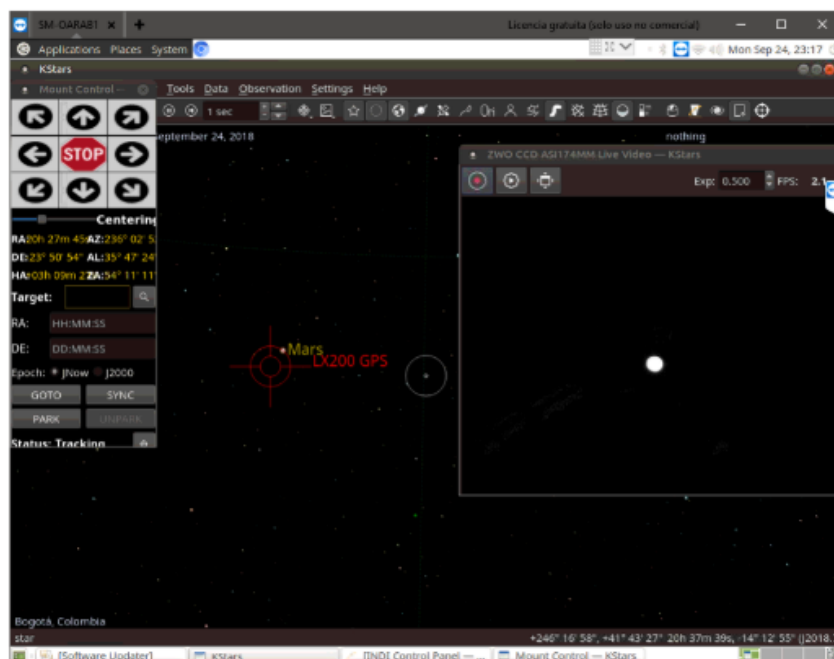


Figura 114: Error de apuntamiento a Marte antes de realizar el proceso de sync, donde el error era mayor, se resalta el recuadro con la imagen entregada por la cámara principal con Marte centrado.

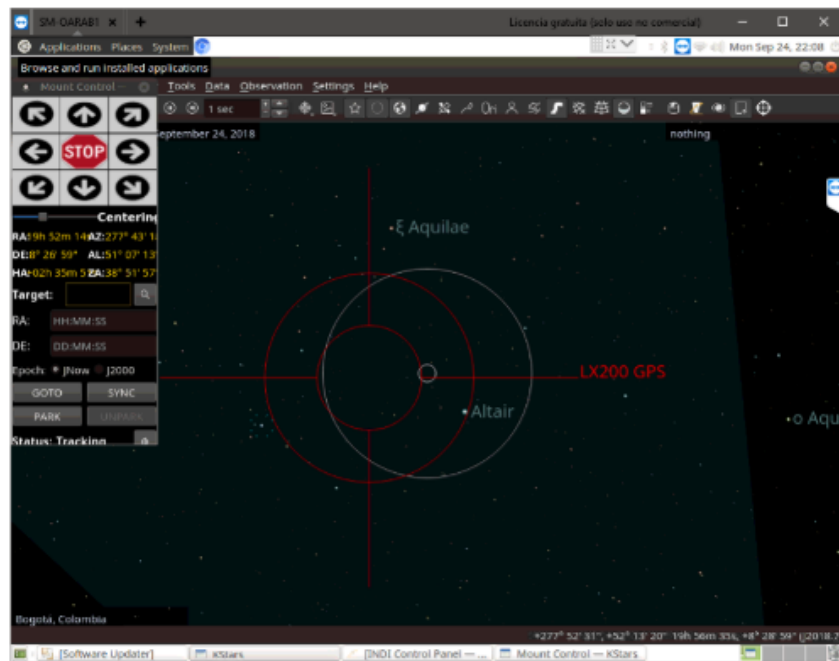


Figura 115: Error de apuntamiento a la estrella Altair luego de 3 puntos sincronizados.

9. Trabajo futuro

Durante el desarrollo de este trabajo fue posible identificar el estado actual de la observación astronómica en Colombia. Se logró diseñar un sistema de control enmarcado dentro de las limitaciones físicas, presupuestales, administrativas y técnicas, que logra el objetivo de controlar el telescopio, teniendo ciertas premisas logradas como garantizar la orientación previa del equipo, lo cual puede limitar en ciertos casos la capacidad de operar el equipo de forma remota. Con el fin de completar el desarrollo de un OARAB se plantean varios trabajos futuros que si bien fueron iniciados y validados durante este trabajo, no fue posible llevarlos a término a la fecha de entrega de este documento. Estos desarrollos buscan garantizar el poder controlar el telescopio y sus accesorios de forma completamente remota.

9.1. Guiado automático

Este proceso es de vital importancia una vez se tiene dominado el apuntamiento de los objetos en el cielo, ya que permite garantizar que los mismos permanecen centrados y estáticos, de lo contrario la imagen podrá verse movida. Esto empeora cuando el campo es reducido, hay problemas de alineamiento o el tiempo de exposición es grande. Para resolver estos problemas de forma efectiva, es preciso usar la guía, que consiste en usar una cámara con un FOV similar o más reducido al de la cámara principal que sigue la estrella de referencia por medio de análisis de imágenes, detectando pequeños cambios en la posición y ordenando a la montura corregirlos. Si el FOV de la guía es más pequeño, el seguimiento será más preciso, pero esto complica la búsqueda de estrellas que puedan estar cerca al objeto de interés. La colimación de los equipos es de gran importancia para que las correcciones de la guía tengan validez.

Uno de los software de guía automática más aptos para ser implementados en el OARAB es PHD2³⁴ que corre bajo Linux, es de código libre y está soportado por INDI. Como trabajo futuro se plantea el integrar este software de seguimiento en conjunto con un buscador para mejorar el seguimiento de objetos en el cielo.

9.2. Sistema de supervisión y diagnóstico automático

Este sistema adquiere datos del telescopio y los visualiza, pero queda como trabajo futuro la interpretación de estos datos, con el objetivo de desarrollar un sistema de supervisión y diagnóstico automático (que usa las relaciones entre variables, como por ejemplo corriente y velocidades angulares, para detectar fallas).

Para identificar funcionamientos anormales, se debe conocer el comportamiento normal del equipo, un método es realizar clusterización con las variables capturadas para cada movimiento válido. Teniendo los clústers asociados al funcionamiento normal, se verifica que las variables estén dentro de estos clústers durante el funcionamiento del equipo, si estas variables empiezan a salirse, puede interpretarse que se está frente a una falla del mismo. Un ejemplo de este comportamiento puede darse cuando un cable se enreda, lo que se opondría al movimiento ocasionando un aumento anormal de la corriente, detectar este fenómeno permitirá detener el movimiento para evitar daños.

³⁴<https://openphdguiding.org/>

9.3. Simulador cúpula y telescopio

El simulador de cúpula y telescopio desarrollado, no está conectado al software de control principal del observatorio. Para integrarlo se probó la conexión por medio de web sockets, los cuales permiten conectarse a un puerto de red desde el simulador e intercambiar información, como el azimut del domo, o las coordenadas de ascensión recta y declinación del simulador de la montura. Como trabajo futuro se plantea la integración de estos equipos con el software de control elegido INDI.

9.4. Protección de la cámara de vigilancia

La imagen del modelamiento realizado con el fin de poder diseñar las partes faltantes para dar soporte a los elementos que componen el sistema de cámara de vigilancia son presentados en la Figura 116. El estado real del módulo se presenta en la Figura 117, para finalizar este proceso es preciso concluir la modelación para fabricar las partes diseñadas por métodos como impresión 3D o corte láser.

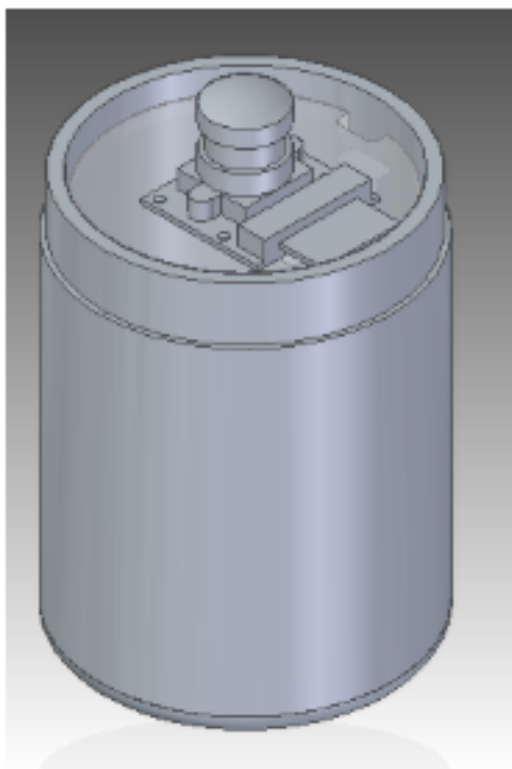


Figura 116: Modelación de la protección de la cámara de vigilancia basada en Raspberry Pi.



Figura 117: Montaje físico de la cámara de vigilancia basada en Raspberry Pi.

9.5. Automatización de la Cámara de cielo

La observación del cielo tiene como gran enemigo la nubosidad, la cual obstruye la luz proveniente de los objetos celestes, además estas nubes pueden traer lluvia la cual potencialmente puede destruir el equipo, por esto es fundamental el contar con una cámara de cielo que permita identificar la nubosidad. Para esto fueron desarrollados algoritmos

que procesan las imágenes obtenidas de la cámara de cielo mostrada en la sección 4.5, el resultado de estos procesamientos se muestran en las Figuras 118, 119, 120, 121, 122 y 123, donde se observan diferencias en el área cubierta del cielo.

Estos algoritmos para la detección de nubes se encuentran en etapa de ajustes y mejoras, ya que deben ser probados y validados con un gran número de imágenes y casos, con lluvia y sin lluvia, de forma que el sistema final sea confiable a la hora de tomar la decisión de abrir el domo para exponer el telescopio al cielo y observar.

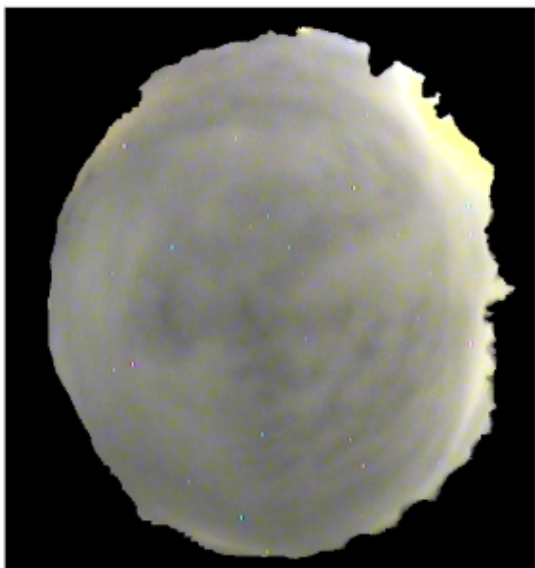


Figura 118: Cielo completamente cubierto de nubes.

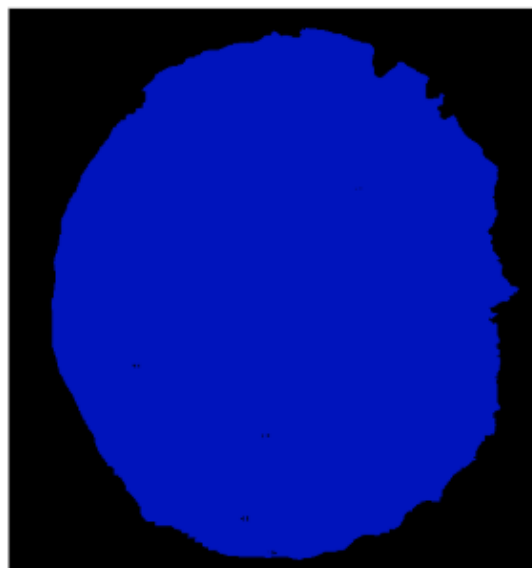


Figura 119: Resultado procesamiento, nubes detectadas en Azul.

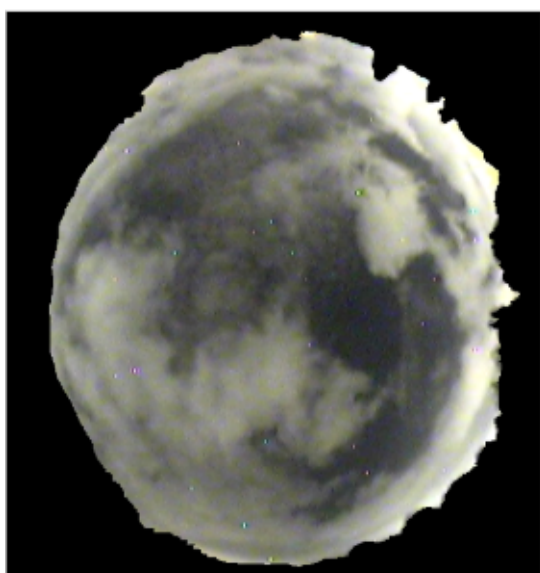


Figura 120: Cielo parcialmente cubierto.

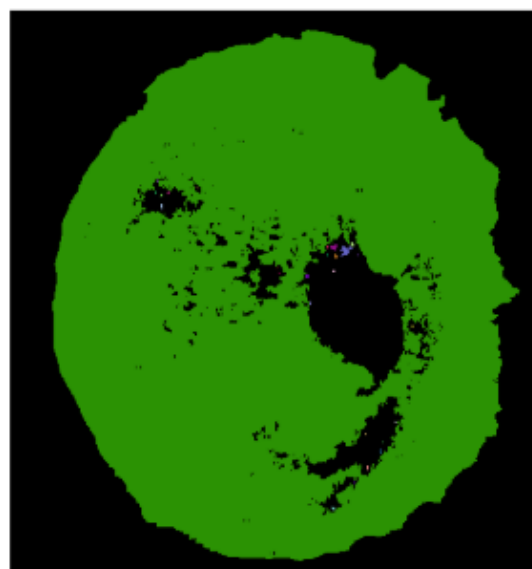


Figura 121: Resultado procesamiento, nubes detectadas en azul.

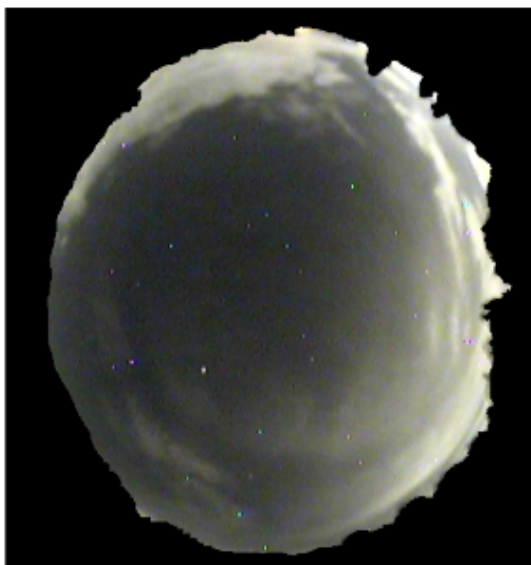


Figura 122: Cielo levemente cubierto.

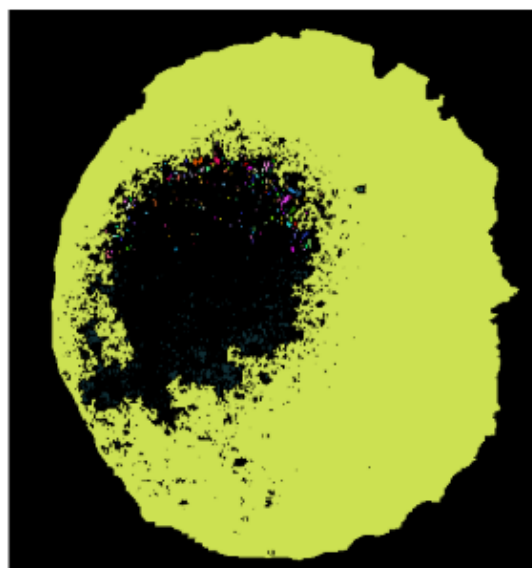


Figura 123: Resultado procesamiento, nubes detectadas en amarillo.

Como trabajo futuro se presenta la integración de este código con el montaje realizado en la sede de oriente de la Universidad de Antioquia, para que de forma automática el observatorio decida si justifica abrir el domo basándose en la cobertura de nubes.

9.6. Controlador de mano en Linux

Algunas de las grandes complicaciones a la hora de realizar la robotización completa del telescopio es lo cerrado de la información disponible ya que es un producto comercial protegido por la empresa fabricante, esto complica los desarrollos adicionales y condiciona el uso a los accesorios ofrecidos por la empresa en el sistema operativo Windows.

Para el control completo del equipo se requiere que el mismo este alineado correctamente, ya que solo cuando el telescopio esta orientado correctamente recibe comandos del software KStars + INDI, esta orientación se conserva parqueando el equipo al finalizar la observación, pero fluctuaciones en la potencia eléctrica o bloqueos del equipo lo desorientan. El problema identificado es que el proceso de orientación solo es posible realizarlo desde el controlador de mano, lo que obligaría a desplazarse de nuevo a la ubicación remota del equipo. En Windows el software propietario de MEADE es el *Auto Star Suite* el cual permite simular el controlador de mano, pero en Linux no fueron encontrados simuladores similares, por esto, se requiere como trabajo futuro desarrollar una interfaz que emule por completo el control de mano en Linux como se ve en la Figura 124 para poder controlar completamente el equipo de forma remota.

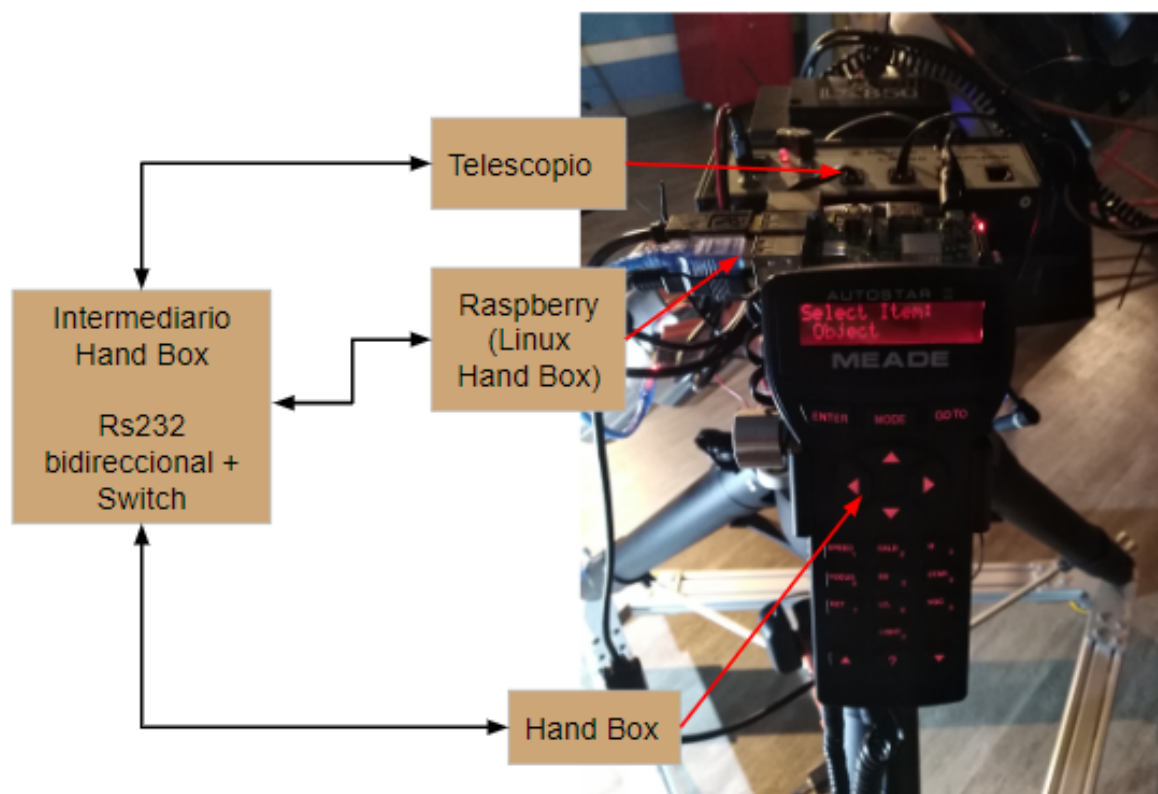


Figura 124: Diagrama del simulador HandBox intermedio para Linux.

9.7. Integración y desarrollos con KStars + INDI

INDI es una librería conformada por un conjunto de programas que permiten controlar un gran número de dispositivos astronómicos, como cámaras, telescopios y accesorios, como los usados en este desarrollo. Esta librería está escrita en C++, lo que ayuda a que sea óptima en términos de memoria y uso de hardware, pero complica el desarrollo de nuevas funcionalidades. La integración de desarrollos como el sistema de supervisión, los simuladores y la cámara de cielo a esta librería contribuiría al crecimiento de esta, favoreciendo a gran número de usuarios, esta integración requiere tiempos y actividades por fuera del marco de este trabajo, pero queda propuesto como un trabajo futuro de gran valor para la comunidad.

9.8. Propuesta alternativa de control de motores

Luego del proceso realizado en la sección 4.1, quedó claro la obsolescencia y antigüedad de la electrónica del equipo, generando la necesidad de explorar otras propuestas para el control de los ejes de ascensión recta y declinación. Uno de los grandes desafíos es la gran velocidad del sistema de codificadores de posición de los motores que operan a unos 50Khz, superando la velocidad máxima de muchos de los microcontroladores de la plataforma Arduino, como son el Uno, el Mega y el Due. Recientemente fue lanzada al mercado la primera placa basada en FPGA (Field-Programmable Gate Array) de la plataforma Arduino, la Vidor 4000³⁵, la cual fue co-creada con Intel, este nuevo dispositivo permite abordar problemas de gran velocidad como es el procesamiento de las señales de

³⁵<https://store.arduino.cc/usa/arduino-vidor-4000>

los codificadores de los motores. La idea como trabajo futuro es explorar el uso de esta tarjeta para desarrollar los cálculos y correcciones necesarios para mejorar las capacidades de seguimiento del equipo, a la vez que se actualiza la electrónica y se mejora la sustentabilidad del equipo en el tiempo.

10. Conclusiones

Usar INDI en conjunto con Linux como software para el control del equipo presenta diversos desafíos, como la compatibilidad con los equipos y la competencia con otras herramientas de software usadas tradicionalmente, disponibles solo en sistemas operativos Windows. Los puntos a favor de la solución son el precio, la comunidad creciente de esta plataforma y la facilidad para realizar modificaciones y mejoras en el futuro, ya que el código fuente está disponible. La plataforma INDI (2007) surgió más reciente que otras de mayor trayectoria como ASCOM (1998), por lo cual usa herramientas de software más modernas. Además su código es libre como el sistema operativo Linux, lo que reduce costos de mantenimiento y facilita divulgar y replicar el desarrollo.

Las pruebas realizadas durante este trabajo fueron limitadas por diferentes factores logísticos en su mayoría, como fue la movilidad y el sitio para operar el telescopio, las adecuaciones que tuvieron lugar en el lugar donde está el equipo y la naturaleza de los permisos requeridos para hacer uso de las instalaciones del ITM en la noche, estos problemas fueron los primeros en ser abordados. Una vez se tenían controlados, desafortunadamente coincidieron con los peores meses del año para observar, lo que limitó las pruebas realizadas para validar y ajustar el desarrollo final. Como trabajo futuro en los meses venideros de mejor pronóstico, el objetivo es llevar a cabo las respectivas pruebas de búsqueda y seguimiento.

El uso de módulos como el ESP8266 permite garantizar que el desarrollo sea mejor acogido por futuros colaboradores, este módulo permite controlar dispositivos por medio de internet a un bajo costo, por esto está siendo usado extensamente en temas de IOT (Internet Of Things).

Diseñar un equipo basado solo en el conocimiento y la literatura, no garantiza obtener una solución funcional completa, es importante realizar un proceso iterativo que permita aproximarse a la solución, para eso las pruebas son fundamentales por lo que indican que funciona y que no, permitiendo manejar la complejidad de la solución final a medida que van siendo integradas con éxito cada una de las soluciones que conforman el diseño. Así el proceso de integrar equipos debe ser realizado procurando avanzar con rapidez en el objetivo de establecer el estado general del mismo y lo requerido para su operación, como son: fuentes, cables, etc. Seguido de caracterizar y desarrollar las facilidades necesarias para empezar a realizar pruebas con el equipo. Las pruebas son finalmente las que indican el estado del equipo y los elementos que son requeridos para completar el diseño realizado.

Para el Pregrado de Astronomía y el programa de posgrado de la Facultad de Ingeniería, este tipo de proyectos representó un reto tecnológico nunca antes asumido por la Universidad. En el caso del pregrado de Astronomía, este proyecto aportó a resolver la necesidad de tener un observatorio al servicio de los estudiantes del pregrado ([Gomez and Fitzgerald, 2017](#)), así como para los investigadores del Instituto de Física, de la Facultad de Ciencias y de la región en general. En el caso del programa de Maestría en Ingeniería, este tipo de proyectos específicos en instrumentación astronómica no tenían precedentes.

El sistema de control para un observatorio universitario es una necesidad para el pregrado de astronomía, una oportunidad para el desarrollo de la Ingeniería en áreas como

la instrumentación y control, el trabajo es una respetable inversión que apunta hacia el cumplimiento de los objetivos misionales de la Universidad, como son la investigación y la docencia. Este proyecto avanza en la formación en áreas de la Astronomía y la Ingeniería que nunca antes se habían abordado en ninguna de las dos Facultades de la UdeA.

La Ingeniería ligada a la observación astronómica se encuentra a la vanguardia de los conocimientos y las aplicaciones en óptica, electrónica, mecatrónica y en sistemas de control. Este proyecto permitió formar a un estudiante de posgrado en estas áreas, lo que resulta un pilar de apoyo para futuros proyectos en el área. El nuevo conocimiento adquirido a través de este proyecto tiene un potencial de aplicación en el país. Futuros proyectos astronómicos se podrán ver beneficiados por las experiencias adquiridas por las Facultades de Ciencias Exactas y de Ingeniería durante el desarrollo de este proyecto.

Aunque países como Brasil, Argentina y Chile (Muriel, 2013) poseen una larga trayectoria en el tema astronómico, la instalación y puesta en funcionamiento de telescopios robóticos no se ha extendido por Suramérica. Y luego con este proyecto se vislumbra una posibilidad de extender la experiencia adquirida a estos países, ya que lo logrado permite mejorar muchos de los equipos existentes, y estar basado en electrónica de bajo costo y gran disponibilidad, fomenta el acceso a estas tecnologías y su continuidad; logrando así un impacto grande a nivel nacional y un aporte valioso a la investigación en la región del norte de suramérica.

El diseño del sistema de control para un observatorio astronómico desarrollado permite acercarse al objetivo de que un telescopio pueda ser instalado en un lugar más apto para observar el cielo. Por otro lado, hay un efecto positivo directo en la comunidad en la cual se instala un instrumento científico de estas características, llevando tecnología y turismo a la región.

Los observatorios astronómicos, además de ser espacios para la investigación, son espacios que se convierten en referente para los pobladores y vecinos de un centro de ciencia. En el caso de que fuera posible instalar el telescopio en el Recinto Quirama, se vería favorecida la población de los municipios cercanos tales como el Carmén de Viboral, La Ceja, Rionegro y otros municipios del oriente antioqueño, que no cuentan con espacios como este para la apropiación social de las ciencias.

Las actividades de extensión ligadas a un observatorio astronómico van desde las jornadas de observación del cielo, pasando por talleres, cursos, conferencias entre otros. Un observatorio es el espacio ideal para que niños, jóvenes y público de todas las edades tengan un encuentro cercano con una ciencia de punta como la astrofísica y a la vez esta se convierte en una herramienta para la enseñanza y la apropiación de las demás ciencias.

Se conocen ampliamente las experiencias de mejora en la calidad de vida de una comunidad que se acerca y se apropia del conocimiento científico. Planetarios y observatorios están llamados a ser museos de ciencia, centros de divulgación y promotores del conocimiento para todos. Los habitantes de los municipios cercanos, especialmente los estudiantes y maestros, tendrán en el observatorio astronómico de la Universidad de Antioquia, un espacio de encuentro y aprendizaje.

Referencias

- Akerlof, C. W., Ashley, M. C. B., Casperson, D. E., Epps, H. W., Kehoe, R. L., Marshall, S. L., McGowan, K. E., McKay, T. A., Phillips, M. A., Rykoff, E. S., Schier, J. A., Smith, D. A., Vestrand, W. T., Wozniak, P. R., and Wren, J. A. (2002). The ROTSE-III Robotic Telescope System. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*.
- Bakos, G. A., Csubry, Z., Penev, K., Bayliss, D., Jordán, A., Afonso, C., Hartman, J. D., Henning, T., Kovács, G., Noyes, R. W., Béky, B., Suc, V., Csák, B., Rabus, M., Lázár, J., Papp, I., Sári, P., Conroy, P., Zhou, G., Sackett, P. D., Schmidt, B., Mancini, L., Sasselov, D. D., and Ueltzhoeffer, K. (2012). HATSOUTH: A GLOBAL NETWORK OF FULLY AUTOMATED IDENTICAL WIDE-FIELD TELESCOPES.
- Castro-Tirado, A. J. (2010). Robotic autonomous observatories: A historical perspective.
- Castro-Tirado, A. J., Sánchez Moreno, F. M., Pérez Del Pulgar, C., Azócar, D., Beskin, G., Cabello, J., Cedazo, R., Cuesta, L., Cunniffe, R., González, E., González-Rodríguez, A., Gorosabel, J., Hanlon, L., Hudec, R., Jakubek, M., Janeek, P., Jelínek, M., Lara-Gil, O., Linttot, C., López-Casado, M. C., Malaspina, M., Mankiewicz, L., Maureira, E., Maza, J., Muñoz-Martínez, V. F., Nicastro, L., Oboyle, E., Palazzi, E., and Zarnecki, A. F. (2014). The GLOBal Robotic telescopes Intelligent Array for e-science (GLORIA). *Proceedings of the XI Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society*.
- Comunicaciones Planetario (2014). Foro Urbano Mundial: Apagar es prender la noche // Planetario Medellin.
- De Val-Borro, M., Bakos, G. Á., Brahm, R., Hartman, J. D., Espinoza, N., Penev, K., Ciceri, S., Jordán, A., Bhatti, W., Csubry, Z., Bayliss, D., Bento, J., Zhou, G., Rabus, M., Mancini, L., Henning, T., Schmidt, B., Tan, T. G., Tinney, C. G., Suc, V., Durkan, S., Lázár, J., Papp, I., and Sári, P. (2016). HATS-31B THROUGH HATS-35B: FIVE TRANSITING HOT JUPITERS DISCOVERED BY THE HATSOUTH SURVEY. *The Astronomical Journal*, 152.
- Downey, E. C. (2007). INDI : Instrument-Neutral Distributed Interface Protocol Version 1 . 7 Document Version 1 . 3.
- Gomez, E. L. and Fitzgerald, M. T. (2017). Robotic Telescopes in Education. pages 1–42.
- Gorbovskoy, E. S., Lipunov, V. M., Kornilov, V. G., Belinski, A. A., Kuvshinov, D. A., Tyurina, N. V., Sankovich, A. V., Krylov, A. V., Shatskiy, N. I., Balanutsa, P. V., Chazov, V. V., Kuznetsov, A. S., Zimmukhov, A. S., Shumkov, V. P., Shurpakov, S. E., Senik, V. A., Gareeva, D. V., Pruzhinskaya, M. V., Tlatov, A. G., Parkhomenko, A. V., Dormidontov, D. V., Krushinsky, V. V., Punanova, A. F., Zalozhnyh, I. S., Popov, A. A., Burdanov, A. Y., Yazev, S. A., Budnev, N. M., Ivanov, K. I., Konstantinov, E. N., Gress, O. A., Chuvalaev, O. V., Yurkov, V. V., Sergienko, Y. P., Kudelina, I. V., Sinyakov, E. V., Karachentsev, I. D., Moiseev, A. V., and Fatkhullin, T. A. (2013). The MASTER-II network of robotic optical telescopes. First results. *Astronomy Reports*, 57(4):233–286.

- Hallberg, K. A. (2013). *Reducción de datos astronómicos basada en procesamiento de imágenes para la robotización de telescopios*. PhD thesis, UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, Buenos Aires.
- ITM (2016). Observatorio Astronómico ITM – ITM.
- MEADE (2016). LX850-ACF 14" f/8 - LX850 Series - Telescopes -.
- Muriel, H. A. (2013). ASTRONOMY IN ARGENTINA. *People and Strategies in Astronomy*, 2:73–98.
- Pepper, J., Pogge, R. W., Depoy, D. L., Marshall, J. L., Stanek, K. Z., Stutz, A. M., Poindexter, S., Siverd, R., O'Brien, T. P., Trueblood, M., and Trueblood, P. (2007). The Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT): A Small Robotic Telescope for Large-Area Synoptic Surveys. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119:923–935.
- Portilla Barbosa, J. G. (2009). *Elementos de astronomía de posición*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, universida edition.
- Pérez Rave, J. I. (2011). *Revisión sistemática de literatura en ingeniería*. Ed. Univ. de Antioquia, Medellín.
- Schmitt, J. H. M. M., Schröder, K.-P., Rauw, G., Hempelmann, A., Mittag, M., González-Pérez, J. N., Czesla, S., Wolter, U., Jack, D., Eenens, P., and Trinidad, M. A. (2014). TIGRE: A new robotic spectroscopy telescope at Guanajuato, Mexico. 335(8):787–796.
- Smith, A. B., Caton, D. B., and Hawkins, R. L. (2016). Implementation and Operation of a Robotic Telescope on Skynet. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128:055002.
- Strassmeier, K. G., Bo, L. J., And, Y., Epand, D. H., and Granzer, T. (1997). Wolfgang-Amadeus: The University of Vienna Twin Automatic Photoelectric Telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 109:697–706.
- Vestrand, W. T., Theiler, J., and Wozniak, P. R. (2004). Unsolved problems in observational astronomy. II. Focus on rapid response - Mining the sky with "thinking" telescopes. *Astronomische Nachrichten*, 325(6-8):477–482.