



INAOE

Diseño y construcción de
un polarímetro para el cercano
infrarojo

por

Marco Antonio Vázquez Rodríguez

Tesis presentada en el Instituto Nacional
de Astrofísica, Óptica y Electrónica
para obtener el grado de Maestro en Ciencias
en el departamento de Astrofísica.

Asesores:

Dr. Luis Carrasco Bazúa
Dr. Abraham Luna Castellanos

Sta. Ma. Tonantzintla, Pue.
Febrero, 2012

©INAOE, 2012

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de
reproducir y distribuir copias en su totalidad
o parcial de esta tesis.



Diseño y Contrucción de un Polarímetro para el Cercano Infrarrojo

Marco Antonio Vázquez Rodríguez

A mis Padres,
A mis Hermanos,
A mis Amigos,
y Al lector...

Gracias...

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, pues al otorgarme la beca de posgrado, hizo posible mi estancia en el instituto y mi manutención durante el periodo que estudié la maestría. Al Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica por proporcionarme las herramientas, instalaciones y cursos que hicieron posible la elaboración de este proyecto de tesis. A mis asesores, Dr. Luis Carrasco y Dr. Abraham Luna, por aceptarme como su asesorado, por las sabias recomendaciones y atinadas observaciones durante todo el proceso de tesis. Al Ing. Álvaro Cuellar pues sin su valiosa asesoría no hubiese podido terminar el diseño mecánico del prototipo.

Gracias a mis padres, Elsa y José Miguel por su amor, su apoyo incondicional, por darme todo lo que tengo y fomentar en mí la búsqueda de nuevos horizontes. A mi abuelita, Layita, por sus incansables oraciones y buenos deseos...siempre tienes una bendición y te preocupas para todos los que te rodean sin esperar nada a cambio. A mis hermanos, Mirna, Omar, Xochitl y José Miguel, por estar siempre pendientes de mi bienestar y demostrar que pese a la distancia conservo mi lugar dentro de nuestra familia. A mis sobrinos, Ricardo, Giovanni, Leonardo, Sergio y Naila, pues su alegría y vitalidad me han sido de ayuda en momentos de tensión.

Gracias a César Chávez, Cesar "Chicharrín" Mata y Paola Espinosa por compartir su espacio conmigo y ser como mis hermanos durante estos años. . . Sé que no es fácil vivir conmigo y algún día se los compensare =s. A Karlita Arellano, tu dedicación y entrega me enseñaron la mayor lección en esta maestría. . . Gracias por apoyarme, creer en mí y ser mi amiga. . . =). A mis colegas y amigos, Eduardo Ibarra, Héctor Ibarra, Víctor Gómez y Mauricio Gómez que siempre tuvieron alguna palabra de apoyo, regaño o burla cuando lo necesitaba y/o lo merecía =p.

Gracias a Víctor Patiño por compartir sus amplios conocimientos y resolver muchas de mis dudas siempre que se lo solicitaba. A Anaely Pacheco...amor mío gracias por ser mi amiga y fiel compañera de nado mientras me escapaba de mi afán diario =p. A Hugo Ramírez...amiwo tu amistad y compañía son una experiencia única e invaluable. A Janet Torrealba por tus porras y buenas vibras...eres única!! ;). A Nayeli Espinosa...Corazón gracias por acompañarme, hacerme pasar buenos momentos y ofrecerme tu amistad sincera. Y a quien haya omitido... ¡Muchas Gracias!

Resumen

Astronómicamente, solo una fracción de la radiación que se detecta de los objetos astronómicos está polarizada y este grado de polarización es el interés fundamental de la polarimetría astronómica. La polarimetría en bandas en el cercano infrarrojo es utilizada para estudiar las propiedades de granos de polvo que causan dispersión y absorción en varios ambientes.

En el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) mediante la implementación de un polarímetro en el cercano infrarrojo se podrán extender las capacidades observacionales de la Cámara del Cercano Infrarrojo de Cananea (CANICA) del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), al obtener la información de polarización de objetos que son ya de interés y que están siendo estudiadas en diferentes proyectos.

En este trabajo de tesis se presentan los principios básicos para el diseño y operación de un instrumento que, junto a CANICA, permita determinar el grado de polarización de la luz de diferentes objetos astronómicos de interés en el infrarrojo cercano. Mediante el diseño asistido por computadora de las piezas mecánicas se obtienen los modelos de las piezas mecánicas involucradas en el prototipo y sus respectivos ensambles.

También se muestra la elaboración del control operativo del instrumento utilizando un motor de pasos controlado por la computadora mediante una interfaz gráfica, el proceso de obtención de imágenes polarimétricas de manera experimental y el respectivo procesamiento de imágenes para la obtención de mapas polarimétricos en fuentes puntuales y regiones extendidas. Así mismo se hace la descripción del software de reducción de imágenes polarimétricas con muestras de imágenes de algunos objetos astronómicos.

Índice general

1. Introducción	9
1.1. Astronomía infrarroja	9
1.2. Radiación polarizada	10
1.3. Polarimetría en el cercano infrarrojo	11
1.4. Objetivos	12
2. Principios Básicos de Polarimetría	15
2.1. Radiación polarizada y su naturaleza	15
2.2. La elipse de polarización	16
2.3. Parámetros de Stokes y grado de polarización	16
2.3.1. Parámetros de Stokes normalizados	19
2.4. Principios básicos de elementos polarimétricos	20
2.4.1. Polarizadores	20
2.4.1.1. Polarizador de red de alambres	23
2.4.2. Retardadores	23
2.4.2.1. Retardadores Birrefringentes Acromáticos	25
2.5. Principios básicos de instrumentos polarimétricos	28
2.5.1. Polarimetría mediante rotación de un polarizador o de una placa retardadora de onda	29
2.5.2. Registro de posiciones fijas	33
2.5.3. Calibración del instrumento	35
3. Diseño y Control del Polarímetro	37
3.1. Características y requerimientos	37
3.2. Elementos ópticos y sus características	41
3.2.1. Polarizador lineal de alta tasa de extinción (HER)	41

3.2.2. Placa Retardadora de Media Onda	43
3.3. Elementos mecánicos y sus características	44
3.3.1. Remoción (desplazamiento lineal) del polarímetro	45
3.3.2. Rotación del retardador	47
3.4. Diseño de partes mecánicas	50
3.4.1. Contenedor del Polarímetro	50
3.4.2. Remoción del polarímetro	53
3.4.3. Platina, polarizador y baleros lineales	55
3.4.4. Tubo de Seguridad del retardador	57
3.4.5. Mecanismo del retardador	59
3.4.6. Motor con base	61
3.4.7. Interior del Polarímetro	63
3.4.8. Seguro del Polarímetro	64
3.4.9. Polarímetro (Ensamble final)	65
3.5. Sistema de Control	67
3.5.1. Hardware	67
3.5.2. Software	70
4. Experimentación y procesado de imágenes	77
4.1. Registro de imágenes polarizadas	77
4.2. Procesamiento de imágenes de laboratorio	79
4.3. Procesamiento de imágenes de fuentes astronómicas	81
4.3.1. Procesamiento de fuentes en radio de ultra alta polariza- ción	81
4.3.2. Nebulosa del cangrejo	86
5. Conclusiones	89
5.1. Discusión y conclusiones	89
5.2. Trabajo futuro	91

Capítulo 1

Introducción

1.1. Astronomía infrarroja

La Astronomía infrarroja con detectores bidimensionales es una rama de la astrofísica relativamente reciente debido a la avanzada tecnología que utiliza. El intervalo en longitud de onda que cubre es aproximadamente de 0.7 a $300 \mu\text{m}$, se subdivide en infrarrojo cercano (0.7 a $3.8 \mu\text{m}$), infrarrojo medio (3.8 a $25 \mu\text{m}$) e infrarrojo lejano (40 a $350 \mu\text{m}$). Esta subdivisión se hace en base a los diferentes fenómenos físicos que son observables en cada uno de estos intervalos y las distintas técnicas de observación y tecnología de detectores empleada en cada uno de ellos (figura 1.1). La atmósfera de la tierra absorbe la radiación procedente de fuentes astronómicas en casi todo el espectro infrarrojo a excepción de algunas ventanas en las que transmite parcialmente. La atmósfera y el ambiente a 300 K , además, tienen emisión con un máximo a $10 \mu\text{m}$, por lo que la observación desde tierra requiere de técnicas que permitan eliminar la contribución de la atmósfera.

La mayoría de los objetos celestes emiten algo de radiación infrarroja. Sin embargo, hay longitudes de onda que son más adecuadas que otras para estudiar ciertos objetos. La radiación térmica infrarroja procede de objetos astronómicos relativamente fríos y muchos de estos se encuentran inmersos en regiones con polvo interestelar. La única manera de poder estudiar los núcleos de formación estelar en las nubes de polvo es mediante observaciones infrarrojas o a longitudes de onda mayores.

En la región infrarroja tienen lugar un número muy importante de transicio-

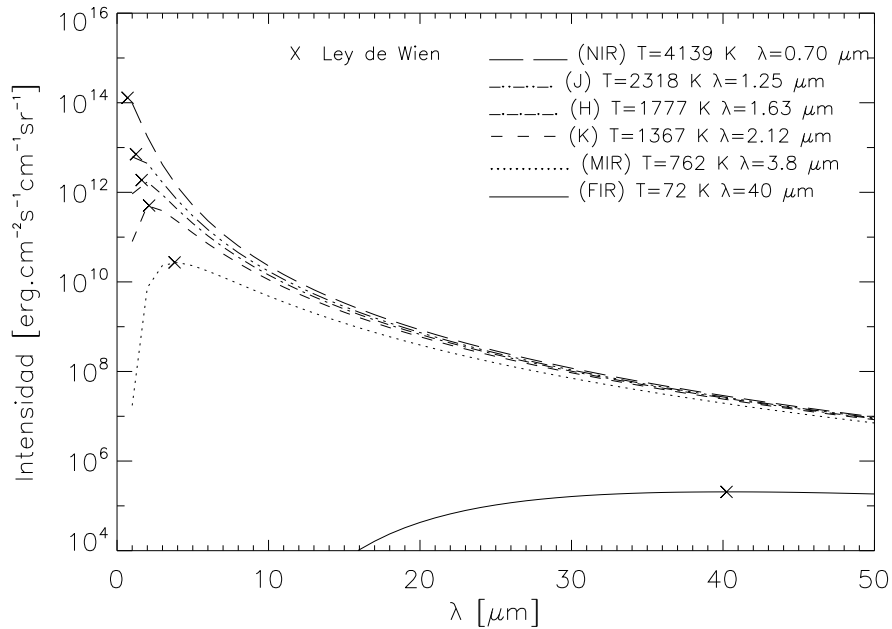


Figura 1.1: Curvas de Intensidad demostrando la ley de desplazamiento de Wien a diferentes temperaturas dentro del intervalo infrarrojo. Aquí se muestra el máximo de las bandas J, H y K del infrarrojo cercano.

nes atómicas y moleculares. Los espectros infrarrojos, por su parte, son unas herramientas muy útiles en el diagnóstico de las condiciones físicas y de los procesos que tienen lugar en atmósferas planetarias, nubes interestelares y en galaxias distantes. Muchos objetos son mejor estudiados en el infrarrojo, estos incluyen: estrellas frías, regiones de formación estelar, el centro galáctico, planetas, asteroides y el polvo interestelar.

1.2. Radiación polarizada

Generalmente todos los objetos astronómicos emiten radiación con mayor o menor intensidad a lo largo del espectro electromagnético, dependiendo de su naturaleza física y el medio en que se encuentran. Sin embargo, solo una fracción de la radiación que se detecta de estos objetos está polarizada y este grado de polarización es el interés fundamental de la información de la polarimetría astronómica.

Astronómicamente el grado de polarización es bajo, no mayor al 10 % generalmente, lo que requiere de instrumentación de bajo ruido para su determinación. Por lo tanto la polarimetría no debe ser utilizada de manera indiscriminada, solo debe usarse para obtener información adicional que otras técnicas observacionales no proporcionan (fotometría y espectroscopia).

En sentido general la polarimetría proporciona información acerca de anisotropías que se encuentran intrínsecamente en los objetos de estudio o en el medio en el que se propaga la luz. En el caso del estudio de fuentes puntuales, la polarización puede ser una buena manera de obtener información acerca de la estructura espacial de la fuente. Comúnmente las asimetrías inferidas son debidas a la presencia de campos magnéticos o a la distribución geométrica de radiación dispersada en la fuente.

El efecto de polarización es una propiedad de las ondas electromagnéticas transversales, y se observa en radiación que va en longitudes de onda desde los rayos gamma hasta las ondas de radio. La longitud de onda en la que se observa depende de las características de la fuente que se desea observar, por lo que se puede utilizar la polarimetría en diferentes longitudes de onda para estudiar diferentes aspectos de la misma fuente.

Las técnicas polarimétricas varían, desde ver a través de polaroides hasta el uso de placas retardadoras y detectores como CCD (Charged-Coupled Device) o diodos sensibles a estados de polarización específicos como se acostumbra en radioastronomía. Algunas categorías de instrumentación están definidas cómo: Polarimetría filtrando fuentes puntuales, polarimetría bidimensional de imágenes, espectro-polarimetría y polarimetría con resolución temporal (imágenes y espectros).

1.3. Polarimetría en el cercano infrarrojo

La polarimetría en bandas en el cercano infrarrojo es utilizada para estudiar las propiedades de granos de polvo que causan dispersión y absorción en varios ambientes, como los de las regiones de formación estelar, estrellas de tipo tardío, remanentes de supernova y galaxias. Basándose en el análisis de los vectores de polarización se puede determinar la localización de las fuentes infrarrojas asociadas con nebulosas de reflexión en regiones de formación

estelar. La información de la geometría de campos magnéticos interestelares puede ser estudiada mediante la polarización dicróica de estrellas de fondo la cual es producida por granos de polvo orientados, o mediciones de la polarización producida por la radiación sincrotrónica.

En la actualidad existen instrumentos con sistemas de polarimetría que se han dedicado a la tarea de reconocer fuentes y regiones polarimétricas en el plano galáctico. Estos tienen la misión de conocer más sobre el campo magnético galáctico y la importancia del mismo en la estructura de la galaxia, la formación de nebulosas y estrellas, además de la polarización interestelar de las estrellas de fondo. Entre estos instrumentos se encuentra el caso de Mimir (Clemens et al. 2007) un instrumento instalado en el telescopio de 1.8 m Perkins en Arizona y SIRPOL (Kandori et al. 2006) un polarímetro adaptado a la cámara SIRIUS en el telescopio de 1.4 m IRSF (Infrared Survey Facility) en Sudáfrica.

En México la implementación de un polarímetro en el cercano infrarrojo permitirá extender las capacidades observacionales de la Cámara del Cercano Infrarrojo de Cananea (CANICA) al obtener la información de polarización de objetos que son ya de interés y que están siendo estudiadas con CANICA en diferentes proyectos, como las fuentes FERMI, galaxias y medio interestelar.

1.4. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto de tesis es diseñar un instrumento que, junto a CANICA, permita determinar el grado de polarización de la luz de diferentes objetos astronómicos de interés en el infrarrojo cercano. De esta manera se busca que el polarímetro amplíe las capacidades observacionales de la cámara sin necesidad de desinstalarla.

Dentro del proyecto, uno de los objetivos particulares es el diseño asistido por computadora de las piezas mecánicas, esto para dejar un plano de construcción detallado de cada pieza. También, construir las partes mecánicas que integran el prototipo haciendo uso de las instalaciones con las que cuenta el instituto, como son un taller mecánico y un laboratorio de diseño mecánico.

Parte del diseño del instrumento tiene como objetivo particular elaborar el control operativo del mismo utilizando un motor de pasos controlado por la

computadora. Como una manera de calibrar el instrumento, el objetivo es obtener imágenes polarimétricas de manera experimental, donde se desarrolle el proceso de observación y registro de las imágenes. Así mismo el objetivo del trabajo experimental es, en consecuencia, realizar el procesamiento de imágenes para la obtención de mapas polarimétricos en fuentes puntuales y regiones extendidas.

En este trabajo de tesis se presentan los principios básicos para el diseño y operación del polarímetro, el diseño de las partes mecánicas, el control electromecánico mediante una interfaz gráfica y la descripción del software de reducción de imágenes polarimétricas con muestras de imágenes de algunos objetos astronómicos.

Capítulo 2

Principios Básicos de Polarimetría

2.1. Radiación polarizada y su naturaleza

La radiación electromagnética consiste de vibraciones transversales del campo electromagnético, las cuales pueden propagarse de manera indistinta a través de un medio, sin cambio y sin interferencia mutua. Cuando existe una estrecha relación entre la amplitud y la fase de ondas en dos planos de vibración transversal, se dice que la radiación está polarizada.

La relación que presentan estas señales se describe mediante un vector que representa el campo eléctrico de las ondas combinadas en un instante de tiempo. El caso más general de polarización es la elíptica donde las dos componentes de polarización lineal están desfasadas, el módulo de la amplitud no es constante y el campo eléctrico en su propagación dibuja una elipse. Si las dos componentes están desfasadas y el modulo de la amplitud es constante, el campo traza una circunferencia y se dice que la luz está circularmente polarizada. Cuando la oscilación de las dos componentes se encuentran en fase, con modulo y dirección constante, quedando confinada a un plano, se dice que la luz está linealmente polarizada.

La luz no polarizada puede descomponerse en dos ondas ortogonales polarizadas linealmente, de modo que el estado de la luz queda totalmente determinado mediante las amplitudes del campo en los dos ejes definidos y el desfase relativo entre ambas componentes. Una forma de describir el estado de polarización de la radiación son los parámetros de Stokes, los cuales se definen más adelante [2].

2.2. La elipse de polarización

Matemáticamente el fenómeno de polarización puede ser expresado a partir de la representación clásica del campo electromagnético que se propagan a través del eje z en un marco de referencia cartesiano. Tomando las funciones de onda unidimensional de las componentes transversales del campo eléctrico de la siguiente manera

$$E_x = E_{x_0} e^{i(2\pi[\nu t - z/\lambda] + \delta_x)}, \quad (2.2.1)$$

$$E_y = E_{y_0} e^{i(2\pi[\nu t - z/\lambda] + \delta_y)}, \quad (2.2.2)$$

donde E_{x_0} y E_{y_0} son las amplitudes de cada componente, ν la frecuencia de radiación, λ la longitud de onda y δ_x , δ_y son las fases de ambas componentes. A partir de (2.2.1) y (2.2.2) se considera solo la parte real y se toma un valor particular para z , haciendo $z = 0$, por lo que las ecuaciones quedan

$$E_x = E_{x_0} \cos(2\pi\nu t + \delta_x), \quad (2.2.3)$$

$$E_y = E_{y_0} \sin(2\pi\nu t + \delta_y). \quad (2.2.4)$$

A partir de (2.2.3) y (2.2.4) se puede calcular la ecuación que representa la elipse de polarización (figura 2.1) que queda de la forma [1]

$$\frac{E_x^2}{E_{x_0}^2} + \frac{E_y^2}{E_{y_0}^2} - \frac{2E_x E_y \cos(\delta_y - \delta_x)}{E_{x_0} E_{y_0}} = \sin^2(\delta_y - \delta_x). \quad (2.2.5)$$

2.3. Parámetros de Stokes y grado de polarización

Los parámetros de Stokes son cuatro cantidades que juntas describen la energía radiante por unidad de tiempo, unidad de intervalo de frecuencia, y unidad de área. Estos parámetros son representados como 4 vectores nombrados I , Q , U , V . Cada uno de estos parámetros tiene su definición en términos de la

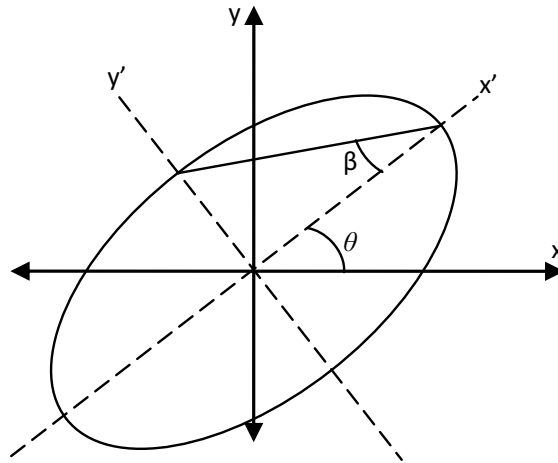


Figura 2.1: Elipse de polarización con su eje mayor desplazado un ángulo θ del marco de referencia. El valor de $\tan \beta$ corresponde a la relación entre el eje menor y mayor de la elipse [1].

elipse de polarización que pueden ser expresados como las intensidades que definen a la elipse de polarización representada de la forma [1][4]

$$I = E_{x_0}^2 + E_{y_0}^2, \quad (2.3.1)$$

$$Q = E_{x_0}^2 - E_{y_0}^2 \equiv I \cos 2\beta \cos 2\theta, \quad (2.3.2)$$

$$U = 2E_{x_0}E_{y_0} \cos(\delta_y - \delta_x) \equiv I \cos 2\beta \sin 2\theta, \quad (2.3.3)$$

$$V = 2E_{x_0}E_{y_0} \sin(\delta_y - \delta_x) \equiv I \sin 2\beta. \quad (2.3.4)$$

Se puede notar que $I \geq 0$, pero Q , U y V , pueden tomar valores positivos o negativos. Para una polarización lineal ambas componentes están en fase o contrafase por lo que $V = 0$, pero Q y U pueden tomar valores diferentes. La relación entre las amplitudes de ambas componentes determina la dirección de la polarización lineal.

Para una polarización circular las amplitudes son iguales y su desfase es de $\pi/2$ en adelante o retraso por lo que $Q = U = 0$, pero V puede tomar valores positivos y negativos, indicando el sentido (horario o anti horario) de la

Forma de Polarización	Angulo Acimutal θ (grados)	Fase $\delta_y - \delta_x$ (grados)	Vector de Stokes normalizado I, Q, U, V
Lineal	0	-	1, 1, 0, 0
	90	-	1, -1, 0, 0
	45	0	1, 0, 1, 0
	-45	± 180	1, 0, -1, 0
Circular	-	90	1, 0, 0, 1
	-	-90	1, 0, 0, -1
No polarizada	-	-	1, 0, 0, 0

Cuadro 2.1: Representaciones de los vectores de Stokes [2]

polarización. En el caso de una polarización elíptica todos los valores de Q , U y V son distintos de cero [2].

Los parámetros de Stokes pueden representarse en forma de un vector columna llamado vector de Stokes, para cada tipo de polarización existe una representación de los vectores de Stokes normalizados (Cuadro 2.1).

Se entiende entonces que I es la intensidad total de la onda, Q representa la polarización lineal si es vertical u horizontal (0° o 90°), U representa la polarización lineal y si es a 45° o 135° y V representa la polarización circular. Dependiendo del signo de V será en sentido horario o antihorario, según un observador situado de cara a la fuente emisora (Figura 2.2).

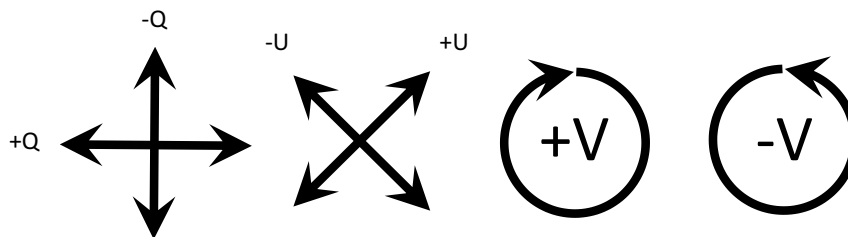


Figura 2.2: Representación esquemática de los parámetros de Stokes Q, U y V [1].

Con esta información se puede introducir otra forma de definir los parámetros de Stokes muy útil para la polarimetría, ya que solo hay que determinar las intensidades en un número discreto de ángulos, quedando expresados como:

$$I = I_0 + I_{90}, \quad (2.3.5)$$

$$Q = I_0 - I_{90}, \quad (2.3.6)$$

$$U = I_{45} - I_{-45}, \quad (2.3.7)$$

$$V = I_{rc} - I_{lc}. \quad (2.3.8)$$

Donde 0, ± 45 y 90 corresponden a los ángulos acimutales de polarización, rc corresponde a polarización circular derecha y lc a polarización circular izquierda [2]. Por definición $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ para luz completamente polarizada, por lo que con estos términos es posible calcular el grado de polarización por medio de la siguiente ecuación

$$d = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}. \quad (2.3.9)$$

Aunque es más común tomar esta definición en dos partes para el grado de polarización lineal p y circular v [1], por lo que queda

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (2.3.10)$$

$$v = \frac{V}{I}, \quad (2.3.11)$$

Y se puede obtener el ángulo de polarización lineal θ con respecto a la referencia acimutal quedando

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right). \quad (2.3.12)$$

2.3.1. Parámetros de Stokes normalizados

Los parámetros de Stokes normalizados son la llave para las mediciones en polarización astronómica. Estos valores de polarización descritos anteriormente tienen unidades de intensidad específica, o flujo, las cuales han sido normalizadas por I para volverlas adimensionales. De manera similar los parámetros de Stokes individuales pueden ser normalizados de tal manera que

$$q = \frac{Q}{I}, \quad u = \frac{U}{I} \quad \text{y} \quad v = \frac{V}{I} \quad (2.3.13)$$

Los parámetros q , u y v son llamado parámetros de Stokes normalizados. En lugar de medir los parámetros de Stokes absolutos es más común determinar los normalizados [1]. Cuando se trabaja con polarización lineal, los valores de q y u son los importantes. En comparación con la ecuación 2.3.10 se muestra que el grado de polarización p , esta dado por

$$p = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad (2.3.14)$$

y la posición del ángulo acimutal, θ , puede ser calculada a partir de

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{u}{q} \right) \quad (2.3.15)$$

2.4. Principios básicos de elementos polarimétricos

Los elementos ópticos que se utilizan para instrumentos de medición en polarimetría son generalmente polarizadores lineales y retardadores de fase. La mayoría de estos elementos funciona mediante el principio de birrefringencia, una propiedad de algunos materiales de presentar índices de refracción diferentes a la radiación incidente dependiendo de la orientación del campo eléctrico. Los materiales que comúnmente se utilizan son calcita, cuarzo y fluoruro de magnesio (MgF_2). Estos materiales son elegidos considerando diversos criterios de comparación como son la eficiencia para el propósito deseado, la transmitancia, la aceptación angular, el rango de longitud de onda que puede usarse y efectos de interferencia.

2.4.1. Polarizadores

Un polarizador o analizador es un dispositivo el cual subdivide la luz incidente en dos haces, uno de ellos linealmente polarizado en el plano paralelo al plano principal del polarizador, el otro perpendicular a este plano. En algunos polarizadores este haz es extinguido. Idealmente en estos dispositivos el

haz emergente es linealmente polarizado sin importar el grado de polarización del haz incidente. Puede operar ya sea por transmisión o por reflexión. La dirección del haz emergente linealmente polarizado es propia del polarizador y depende del eje principal del mismo. Este efecto no es posible en la práctica ya que el rechazo de la componente ortogonal nunca es completo, por lo que se obtiene un haz polarizado parcialmente [3]. El grado de polarización de este haz es una forma de medir la eficiencia del polarizador. Mediante el cálculo de Mueller, que consiste en utilizar la multiplicación por matrices de transformación a los vectores de Stokes originales, se puede obtener los vectores de Stokes que representan el estado de polarización que tiene la luz al emerger de un polarizador [1]. Por lo que el vector de Stokes final $\{ I' \ Q' \ U' \ V' \}$ está relacionado con el vector de entrada $\{ I \ Q \ U \ V \}$ por una matriz 4 x 4 de tal manera que

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (2.4.1)$$

Al realizar este cálculo, en alguna situación particular, se debe recordar que el vector de Stokes está representado en un determinado marco de referencia, por lo que es necesario establecer la dirección del marco de referencia correspondiente al eje principal del dispositivo. De esta manera la polarización puede ser representada por:

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = [R(-\phi)] [P] [R(\phi)] \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}. \quad (2.4.2)$$

Para:

$$[P] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[R(\phi)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\phi & \sin 2\phi & 0 \\ 0 & -\sin 2\phi & \cos 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[R(-\phi)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\phi & -\sin 2\phi & 0 \\ 0 & \sin 2\phi & \cos 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Donde la matriz $[P]$ es la matriz de transformación de Mueller para un polarizador lineal ideal, cuyo eje principal está alineado con el plano de referencia; $[R(\phi)]$ es la matriz de rotación y $[R(-\phi)]$ es una matriz de rotación que devuelve el vector de Stokes a su marco de referencia original [1]. De esta manera la ecuación 2.4.2 queda

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\phi & \sin 2\phi & 0 \\ \cos 2\phi & \cos^2 2\phi & \sin 2\phi \cos 2\phi & 0 \\ \sin 2\phi & \sin 2\phi \cos 2\phi & \sin^2 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (2.4.3)$$

El ángulo que el plano principal de un polarizador presenta, con respecto a la dirección de referencia, es denotado por ϕ [4]. La intensidad del haz emergente del polarizador, para luz incidente descrita por los parámetros de Stokes I, Q, U y V , es:

$$I'(\phi) = \frac{1}{2} [(K_1 + K_2)I + (K_1 - K_2)(Q \cos 2\phi + U \sin 2\phi)] \quad (2.4.4)$$

Donde K_1, K_2 son los coeficientes de transmisión de intensidad del analizador a la luz perfectamente polarizada en las direcciones 1 (dos analizadores con los ejes de transmisión alineados en paralelo) y 2 (dos analizadores con los ejes de transmisión alineados perpendiculares) respectivamente. La matriz de Mueller que representa a un polarizado parcial de esta naturaleza queda [1]:

$$[PP] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [K_1 + K_2] & [K_1 - K_2] & 0 & 0 \\ [K_1 - K_2] & [K_1 + K_2] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2[K_1 K_2]^{1/2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2[K_1 K_2]^{1/2} \end{bmatrix} \quad (2.4.5)$$

Para un polarizador perfecto $K_1 = 1$ y $K_2 = 0$, la ecuación 2.4.4 se reduce a:

$$\begin{aligned} I'(\phi) &= \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\phi + U \sin 2\phi) \\ &= \frac{1}{2}I [1 + P \cos 2(\theta - \phi)] \end{aligned} \quad (2.4.6)$$

2.4.1.1. Polarizador de red de alambres

Un polarizador que es eficiente en el infrarrojo es una red de alambres paralelos. Si el espacio d entre los alambres es cinco veces mayor que el diámetro de los alambres la red es un polarizador eficiente para longitudes de onda mayores a $5d$. Existen comercialmente polarizadores holográficos de red de alambre impreso fotolitográficamente, con alrededor de 4000 alambres por milímetro en una capa fotosensible sobre un sustrato de transmitancia infrarroja, tales como el fluoruro de calcio (CaF_2) y el fluoruro de bario (BaF_2) entre otros. Estos polarizadores son eficientes para longitudes de onda que van de 2-30 μm [3].

Los valores K_1 y K_2 de un polarizador con red de alambre, son definidos como las transmitancias del polarizador para la radiación cuyo campo eléctrico está perpendicular y paralelo a las líneas de la red respectivamente.

2.4.2. Retardadores

El propósito de un retardador es alterar la relación de fase entre las componentes ortogonales del haz de luz. Este cambio es generalmente necesario cuando la luz está siendo analizada para determinar su estado de polarización. Los retardadores pueden ser construidos para cualquier ángulo de fase, sin embargo, los más comunes son los de $\pi/2$ o π y son llamados retardadores de cuarto de onda y de media onda respectivamente.

El retardo en estos dispositivos se efectúa entre componentes ortogonales que pasan a través de dos direcciones ortogonales específicas fijas en el dispositivo. Para conocer la referencia sobre la cual es retardada cierta componente se les nombran ejes rápido y lento, y a la cantidad de retraso que se produce se le llama retardancia. La luz incidente, descrita en términos de los parámetros de Stokes $\{ I \ Q \ U \ V \}$ después de pasar a través de un retardador tiene parámetros $\{ I' \ Q' \ U' \ V' \}$, descritos por la matriz de transformación

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\psi + \sin^2 2\psi \cos \tau & (1 - \cos \tau) \cos 2\psi \sin 2\psi & -\sin 2\psi \sin \tau \\ 0 & (1 - \cos \tau) \cos 2\psi \sin 2\psi & \sin^2 2\psi + \cos^2 2\psi \cos \tau & \cos 2\psi \sin \tau \\ 0 & \sin 2\psi \sin \tau & -\cos 2\psi \sin \tau & \cos \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (2.4.7)$$

Donde τ es el retraso de fase o retardancia y ψ es el ángulo que tiene el eje óptico del retardador con respecto al plano de polarización.

El retraso de fase o retardancia, en radianes, se refiere a la diferencia en la longitud del camino óptico para las componentes eléctricas transmitidas paralelamente a estos ejes. Cualquier retraso de fase, τ , es logrado al cortar y pulir la placa a un espesor, d , de acuerdo con la longitud de onda que se quiera trabajar y el valor de los índices de refracción, n_o , n_e , a esa longitud de onda. El valor de la fase nominal de una placa de onda o retraso está dado por

$$\tau = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_e - n_o) \quad (2.4.8)$$

En la mayoría de los instrumentos polarimétricos, incluyendo las placas de onda, comúnmente se encuentran retrasos de $\pi/2 \equiv \lambda/4$, o $\pi \equiv \lambda/2$ basado en esta ecuación. La ecuación 2.4.7 es válida solamente si las caras externas del retardador tienen un revestimiento anti reflejante. Ya que de lo contrario las múltiples reflexiones de los haces de luz pueden cambiar notablemente la polarización del haz emergente.

Si la dirección de la luz incidente tiene un pequeño ángulo i con la normal a la superficie de la placa retardadora, y el plano de incidencia tiene un ángulo ω con el eje óptico del cristal, la retardancia será

$$\tau \approx \frac{2\pi d}{\lambda} (n_e - n_o) \left[1 - \frac{i^2}{2n_o} \left(\frac{\cos^2 \omega}{n_o} - \frac{\sin^2 \omega}{n_e} \right) \right]. \quad (2.4.9)$$

Un par de retardadores con una relación de espesor propiamente elegida crea un retardador de campo amplio para el cual la retardancia es casi independiente del ángulo de incidencia a menos que este ángulo sea muy grande.

Los retardadores con $\tau = \pi/2$ son llamados placas de cuarto de onda y son utilizados para producir luz polarizada circularmente a partir de la luz polarizada linealmente y viceversa (figura 2.3). Para el retardador de cuarto de onda la matriz de transformación de Mueller queda:

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\psi & \cos 2\psi \sin 2\psi & -\sin 2\psi \\ 0 & \cos 2\psi \sin 2\psi & \sin^2 2\psi & \cos 2\psi \\ 0 & \sin 2\psi & -\cos 2\psi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}. \quad (2.4.10)$$

Los retardadores con $\tau = \pi$ son llamados placas de media onda. Estos cambian la luz polarizada circularmente derecha en circularmente izquierda. También cambian la luz linealmente polarizada en un ángulo θ en luz linealmente polarizada con un ángulo $2\psi - \theta$, es decir, rota la dirección de la polarización (figura 2.4). Para este caso la matriz de transformación de Mueller queda

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\psi - \sin^2 2\psi & 2 \cos 2\psi \sin 2\psi & 0 \\ 0 & 2 \cos 2\psi \sin 2\psi & \sin^2 2\psi - \cos^2 2\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}; \quad (2.4.11)$$

2.4.2.1. Retardadores Birrefringentes Acromáticos

Los retardadores que utilizan el fenómeno de birrefringencia son comúnmente llamados placas de fase o placas de onda. Estos consisten en una placa plana paralela de material birrefringente cuyo eje óptico es paralelo a las caras de la placa. Para un frente de onda normalmente incidente, las componentes

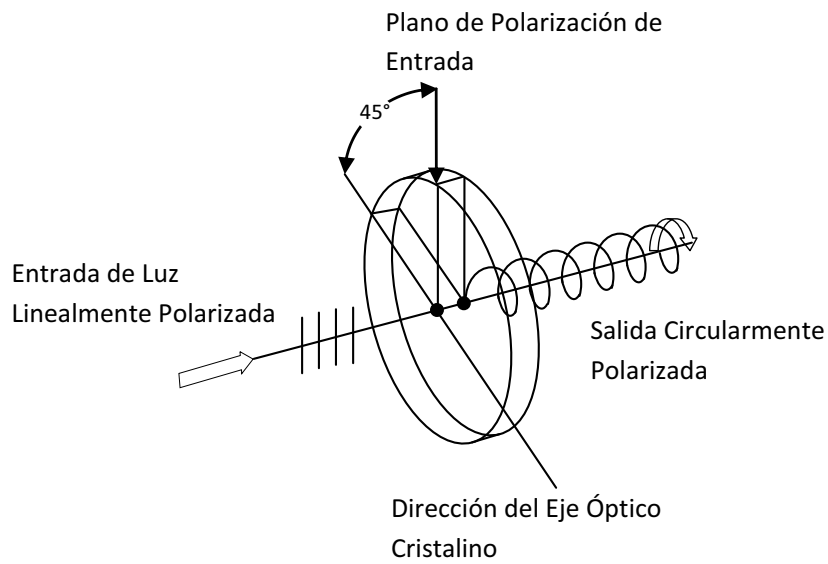


Figura 2.3: Efecto del retardador de cuarto de onda.

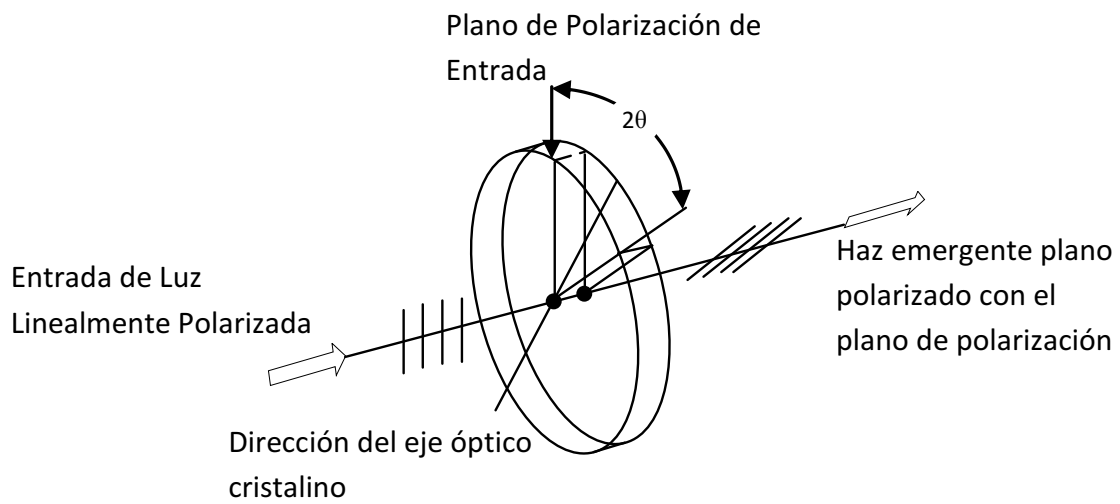


Figura 2.4: Efecto del retardador de media onda

resueltas progresan a diferentes velocidades de acuerdo con los índices de refracción asociados con la birrefringencia. Un retraso de fase diferencial es introducido entre el frente de onda de una dirección y el frente de onda de otra transversal sin que exista refracción alguna.

Los dispositivos retardadores como las placas de onda, alteran el estado de polarización de la luz transmitida a través de ellos. El efecto de una placa de onda es descrito en términos de los ejes principales, rápido y lento, en el plano de su apertura de entrada. Generalmente las placas de onda son fabricadas de cristales birrefringentes de un eje cortados de tal manera que el eje principal ofrece el índice de refracción asociado al material ordinario, n_o , y uno extraordinario, n_e .

Las placas retardadoras de media onda y de cuarto de onda se deben colocar en los polarímetros astronómicos enfrente de los componentes ópticos que separan la luz de diferentes regiones espectrales (filtros), porque estos últimos comúnmente polarizan la luz. Si un amplio espectro debe ser cubierto, el retraso del retardador debe variar lo menor posible en la totalidad del rango.

Mediante la construcción de una placa de onda compuesta de dos materiales birrefringentes diferentes, es posible producir un retraso de fase deseado en dos longitudes de onda diferentes y con una variación espectral más pequeña que la obtenida por un retardador hecho de un solo material. Esta combinación se conoce como acromática y las placas de media onda y cuarto de onda de este tipo son comúnmente utilizadas. Los materiales más comunes utilizados son los cristales positivos uniaxiales de cuarzo y fluoruro de magnesio (MgF_2), con sus ejes rápidos cruzados.

Las condiciones para que el retraso sea el mismo para las longitudes de onda λ_a y λ_b son obtenidas de la ecuación 2.4.8

$$\lambda_a = \frac{2\pi}{\tau} (b_{1a}d_1 \pm b_{2a}d_2), \quad (2.4.12)$$

$$\lambda_b = \frac{2\pi}{\tau} (b_{1b}d_1 \pm b_{2b}d_2), \quad (2.4.13)$$

Donde b_{1a} , b_{2a} , b_{1b} y b_{2b} son la diferencia de los índices de refracción $n_e - n_o$ para cada uno de los retardadores en λ_a y λ_b . Se utiliza el signo positivo si el signo de b es diferente para las dos placas de onda y sus ejes ópticos son paralelos, se utiliza el signo negativo si ambas b tienen el mismo signo y

los ejes ópticos son perpendiculares. La mejor opción en materiales para una placa retardadora acromática es utilizar un par de cristales positivo y negativo ya que su retardancia tiene poca dependencia del ángulo de incidencia.

2.5. Principios básicos de instrumentos polarimétricos

Un polarímetro es un instrumento que permite medir el grado y el ángulo de polarización de una fuente luminosa, este utiliza principalmente polarizadores lineales y elementos retardadores de onda. Su primer aplicación fue el encontrar concentraciones de azúcares en soluciones. En el cual se utilizaban dos polarizadores uno fijo y uno giratorio. Al medir, mediante la intensidad, el ángulo que tiene la luz en el recipiente sin solución y el ángulo que presenta con solución se puede determinar el poder rotatorio de la disolución y la concentración de azúcar.

En el contexto astronómico para poder hacer mediciones cuantitativas de la polarización que tiene la radiación, un sistema modulador y un detector tienen que ser acoplados en un solo instrumento para poder adjuntarse al telescopio. En algunos casos, uno de los elementos ópticos que componen el sistema debe tener la capacidad de ser rotado para poder interpretar la información polarimétrica.

No todos los instrumentos se diseñan para medir simultáneamente todos los parámetros de Stokes de la radiación detectada. Generalmente la polarimetría se centra en la determinación de los parámetros lineales. Muchos instrumentos son específicamente diseñados para medir estos parámetros mediante un modulador que altere el flujo que pasa a través de él dependiendo de la intensidad de los parámetros Q y U de la radiación. Los valores de los parámetros que describen la polarización lineal son calculados a partir de los valores de esta intensidad modulada medida por un detector. En el caso del parámetro V que representa la polarización circular se puede medir utilizando un instrumento diseñado para el estudio de polarización lineal pero utilizando una placa retardadora de un cuarto de onda antes del modulador.

El último elemento en cualquier sistema modulador es un polarizador y como consecuencia las siguientes etapas ópticas reciben la radiación completa-

mente polarizada. Cualquier polarización ocasionada después de este elemento es irrelevante como para considerarla una distorsión de la radiación captada originalmente. Sin embargo, el orden de los elementos ópticos involucrados si es importante para el nivel de flujo que llega hasta el detector, ya que cualquier elemento óptico puede producir polarización por lo que el modulador debe colocarse al inicio del sistema para minimizar la polarización instrumental.

La mayoría de los sistemas polarimétricos pueden operar con haces convergentes o divergentes que cruzan a través del modulador. Estos elementos permiten ángulos de incidencia considerablemente grandes sin perder eficiencia. Aunque siempre es preferible que el haz incidente sea previamente colimado. Las técnicas polarimétricas dependen de las señales obtenidas por el elemento modulador. Para algunas formas de detección, la información puede ser evidente en tiempo real, para otras puede ser necesario integrar la señal antes de presentar una lectura en el tiempo apropiado. La forma en que las señales son interpretadas depende principalmente del diseño del equipo polarimétrico.

2.5.1. Polarimetría mediante rotación de un polarizador o de una placa retardadora de onda

La técnica más evidente para polarimetría es mediante un modulador, el cual contiene elementos giratorios cuyas transmitancias son directamente sensibles a las direcciones de vibración de las perturbaciones eléctricas del haz incidente. El comportamiento de un instrumento basado en la rotación de un polarizador puede expresarse en términos de las matrices de Mueller operando sobre el vector de Stokes de la luz incidente. De acuerdo con la orientación del eje principal del polarizador con respecto a la estructura axial descrita por los parámetros de Stokes del haz de entrada la salida del vector se determina mediante la matriz de transformación descrita anteriormente en la ecuación 2.4.9. El parámetro de Stokes I capturado por el detector será función del ángulo θ como se expresa en la ecuación 2.4.6

Generalmente el eje de referencia del polarímetro se describe con respecto a coordenadas ecuatoriales, por ejemplo, se puede tomar como eje de referencia la posición angular a cero grados cuando el eje de transmisión del po-

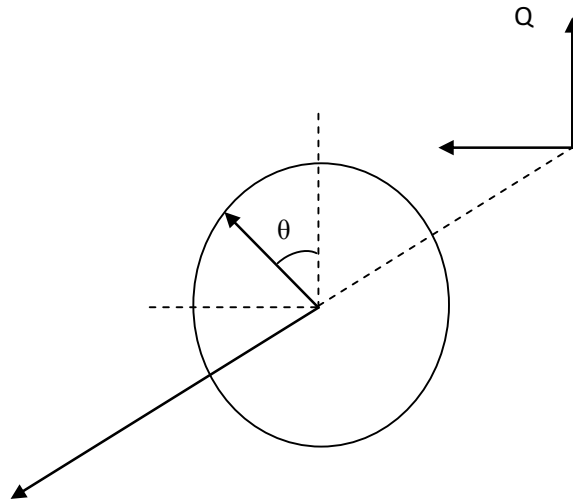


Figura 2.5: Rotación de un polarizador en un ángulo positivo θ respecto al marco de referencia Q

larizador corre de norte a sur y se alinea con la declinación. De esta manera se observa que, cuando un polarizador modulador es rotado, la variación en la intensidad de la luz consta de un nivel medio sobre el cual se superpone un tipo de modulación con una amplitud dependiente del grado de polarización y con una fase dependiente de la dirección de la vibración de la luz incidente.

Generalmente existen tres incógnitas que requieren cuantificación. La señal actual, en efecto, $S_{\parallel}(\phi)$ envuelve un nuevo parámetro para describirla y debe ser escrita como

$$S_{\parallel}(\phi) = \frac{1}{2}G_{\parallel}(\phi)T(t)[I + Q \cos 2\phi + U \sin 2\phi] \quad (2.5.1)$$

o bien,

$$S_{\parallel}(\phi) = \frac{1}{2}G_{\parallel}(\phi)T(t)I[1 + p \cos 2(\phi - \zeta)] \quad (2.5.2)$$

Donde $G(\phi)$ representa la respuesta del detector a la intensidad. También demuestra que puede verse afectado por la posición rotacional del polarizador como el resultado del haz giratorio, o a la sensibilidad del detector con respecto a la dirección de vibración de la luz polarizada que incide en él. El símbolo \parallel indica el hecho de que solo la intensidad con vibración paralela al polarizador está siendo medida. El coeficiente $T(t)$ describe la variación de la señal

con el tiempo causada por la atmósfera terrestre que puede presentarse como un centelleo de intensidad o por cambios lentos y seculares en la extinción atmosférica. Para prevenir que el ruido asociado con $T(t)$ afecte la determinación de los parámetros de Stokes (usando fotomultiplicadores), la forma de onda necesita ser registrada a una velocidad mayor que la variación asociada a los centelleos de intensidad, esto puede ser logrado con una velocidad de rotación del polarizador alta (15 Hz típicamente).

Sin embargo, si se toma la razón de las señales ortogonales, se puede eliminar el ruido del centelleo. Una manera de lograrlo es mediante la inserción ocasional de un despolarizador en el haz que sirva como una referencia para la polarización cero. Con la utilización de los detectores bidimensionales como los CCD las imágenes resueltas ortogonalmente pueden ser registradas simultáneamente y las relaciones de sus intensidades determinadas automáticamente en el procedimiento de reducción computarizada de datos. No obstante el uso de depolarizadores no es requerido con la estandarización de estrellas de calibración.

Es bien conocido que los retardadores de media onda cambian la dirección de la vibración de la luz incidente de un extremo de su eje principal al otro. Por lo tanto la posición del ángulo de cualquier luz linealmente polarizada incidente es rotada por dos veces el ángulo determinado entre la posición del ángulo original y el eje del retardador. Estos retardadores son componentes ópticos planos y delgados, y por lo tanto cuando están bien alineados ortogonalmente al eje óptico del telescopio ocasionan efectos mínimos en la dirección de propagación del haz. Este hecho minimiza los efectos de polarización espuria generados por fluctuaciones espaciales de la sensibilidad del detector. Así pues, este dispositivo proporciona una alternativa a la rotación de un polarizador obteniendo así un modulador estable que permita la investigación de la luz linealmente polarizada.

El sistema modulador adaptado en este trabajo consiste en la colocación de una placa de media onda giratoria previa a un polarizador fijo. Este principio fue empleado por Lyot (1948a) en prototipos de instrumentos utilizando celdas fotoeléctricas desde 1922. La señal obtenida tiene la misma forma que un polarizador giratorio pero la frecuencia de modulación es duplicada, funcionando a cuatro veces la velocidad mecánica de rotación de la placa de onda. Este sistema tiene la ventaja de reducir las señales espurias que podrían ser ge-

neradas por la sensibilidad del detector a la dirección de polarización que lo ilumina, la cual queda sin cambio con el uso del polarizador fijo. Una desventaja de usar solo una placa de onda es que su retraso de fase sufre de una dispersión espectral y puede ser solamente considerada como elemento que provee un retraso de media onda en un rango espectral limitado. Esta limitación puede evitarse mediante el uso de elementos acromáticos. Los elementos que comprenden un sistema modulador tipo Lyot pueden ser resumidos en la matriz de propagación (ecuación 2.5.3)

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = [Pol] [R(-\phi)] [P. Ret.] [R(\phi)] \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (2.5.3)$$

donde $\{ I' \ Q' \ U' \ V' \}$ es el vector de Stokes que describe la luz que emerge hacia el detector. El ángulo ϕ representa la rotación del eje de la placa retardadora de onda con respecto al eje principal del polarizador, este último permanece fijo en el instrumento y se utiliza como eje de referencia para describir los vectores de Stokes, $\{ I \ Q \ U \ V \}$, de la luz que incide.

En la ecuación (2.5.3) que describe al instrumento, $[R(\phi)]$ es la matriz estándar que representa la rotación del vector de Stokes de marco de coordenadas de la placa de onda, y $[R(-\phi)]$, que es una matriz similar pero con signo opuesto, regresa el vector de Stokes al marco de coordenadas original del polarizador; $[Pol]$ es la matriz estándar que describe la operación del polarizador fijo.

La matriz escrita como $[P. Ret.]$ representa el efecto de una placa de onda que, para un dispositivo ideal, contiene términos que describen el retraso de fase. Esta se escribe como

$$[P. Ret.] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \tau & \sin \tau \\ 0 & 0 & -\sin \tau & \cos \tau \end{bmatrix} \text{ y con } \tau = \pi, \text{ la matriz queda}$$

$$[P. Ret.] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (2.5.4)$$

Al multiplicar las matrices de la ecuación (2.5.3) y siguiendo el mismo desarrollo del modulador polarizador giratorio la señal de la medición queda escrita como

$$S_{\parallel}(\phi) = \frac{1}{2} G_{\parallel}(\phi) T(t) [I + Q \cos 4\phi + U \sin 4\phi] \quad (2.5.5)$$

Cualquier modulación presente en el haz incidente tendrá una modulación sinusoidal producida por la rotación de la placa de media onda antes de pasar por el polarizador fijo.

2.5.2. Registro de posiciones fijas

En muchos de los polarímetros que involucran la rotación de un polarizador o una placa de onda, la señal de salida puede ser registrada con el elemento giratorio ubicado en algunas posiciones preferidas y angularmente fijas. La forma principal de la señal para este tipo de moduladores se compone de una variación sinusoidal, superpuesta a un nivel medio. Por lo tanto tres parámetros independientes describen esta señal: el nivel medio, la amplitud de la variación sinusoidal y su fase. Las características de la polarización puede ser obtenida mediante el registro de la señal en un mínimo de tres posiciones angulares específicas. Esto es la esencia del método de Fessenkov (1935) mediante el cual las señales son registradas para ángulos del polarizador de 0° , 60° y 120° relativos al eje de referencia. Otros métodos similares pueden generarse eligiendo tres valores alternativos de ϕ o mediante el uso de un modulador que involucra una placa de onda giratoria previo a un polarizador fijo, con ángulos seleccionados de 0° , 30° y 60° .

El esquema operativo de Fessenkov ha tenido un uso ocasional pero una técnica más común utiliza cuatro posiciones del polarizador en valores de 0° , 45° , 90° y 135° , siendo estos más directamente relacionados con la determinación de los parámetros de Stokes. Desde la forma de modulación expresada como

$$S_{\parallel}(\theta) \longrightarrow 1 + p \cos 2(\phi - \zeta), \quad (2.5.6)$$

los registros pueden ser escritos como:

$$\begin{aligned} \phi = 0^\circ &\longrightarrow S_{\parallel 1} = I + p \cos 2\zeta, \\ \phi = 90^\circ &\longrightarrow S_{\parallel 2} = I - p \cos 2\zeta, \\ \phi = 45^\circ &\longrightarrow S_{\parallel 3} = I + p \sin 2\zeta, \\ \phi = 135^\circ &\longrightarrow S_{\parallel 4} = I - p \sin 2\zeta, \end{aligned} \quad (2.5.7)$$

Las dos primeras mediciones llevan al valor de $p \cos 2\zeta = q = (S_{\parallel 1} - S_{\parallel 2})/2$ mientras que las últimas mediciones proporcionan el valor de $p \sin 2\zeta = u = (S_{\parallel 3} - S_{\parallel 4})/2$. Combinando estos dos valores, el grado de polarización está dado lineal por:

$$p = \frac{1}{2} \left\{ (S_{\parallel 1} - S_{\parallel 2})^2 + (S_{\parallel 3} - S_{\parallel 4})^2 \right\}^{1/2} = \sqrt{p^2 \cos^2 2\zeta + p^2 \sin^2 2\zeta}, \quad (2.5.8)$$

esta última forma es la dada por Pickering (1874). Este procedimiento de medición por lo tanto, puede ser nombrado como método de Pickering. Para los instrumentos que involucran la opción de placas de media onda giratorias, las posiciones angulares elegidas para las mediciones son 0° , 45° , 22.5° y 67.5° .

De esta manera, los parámetros de polarización lineales son determinados sin calibrar las sensibilidades relativas de los detectores ya que la compensación de los efectos atmosféricos se logra automáticamente. Para el caso de registrar la polarización de campos de estrellas, mediante una óptica apropiada, este sistema puede ser colocado en la posición imagen de la apertura del telescopio al dirigir cuatro imágenes de este campo en un CCD, correspondientes a las direcciones 0° , 45° , 90° y 135° . A partir de estas imágenes los parámetros q y u pueden ser determinados junto con el grado y ángulo de polarización del campo. Si se coloca este sistema en la pupila imagen dentro de un

espectrómetro se puede llevar a cabo espectro-polarimetría de imagen simple.

2.5.3. Calibración del instrumento

La mayoría de los instrumentos se diseñan de modo que, cuando están unidos al telescopio, sus marcos de referencia usados para describir las mediciones de los parámetros de Stokes son fijados de tal manera que el parámetro q positivo va paralelo a la declinación. Para comprobar o determinar los ejes coordenados de un instrumento existen diversas estrategias experimentales. Estas estrategias consisten principalmente en la medición de alguna fuente polarizada cuyo eje de polarización e intensidad es conocida. Las fuentes de referencia pueden ser artificiales como lámparas y polarizadores, fuentes naturales como la polarización provocada por reflexión de luz solar en la luna, planetas o asteroides. La mayoría de los nuevos estudios ya no llevan a cabo los procedimientos polarimétricos fundamentales, pero determinan el eje instrumental tomando como referencia mediciones concurrentes de estrellas conocidas por su alto grado de polarización interestelar, puesto que esta orientación es constante en un tiempo del orden de cientos de años.

En toda observación polarimétrica es importante tener estrellas estándar disponibles para la medición simultánea. Estas medidas deben componerse de estrellas con un alto grado de polarización (estándares polarizadas) con valores de p y posición angular conocido con alto nivel de precisión, para proporcionar un eje de referencia para el instrumento en el telescopio y para permitir la calibración de su eficiencia de modulación. Otro juego de estrellas conocidas por ser estables y tener un grado de polarización tan pequeño como para no ser detectable (estándares no polarizadas) que también deben estar disponibles para permitir la determinación de cualquier polarización instrumental sistemática. Para las estándares polarizadas también puede ser importante conocer el comportamiento en su dependencia con la longitud de onda, ya que las estrellas cambian su grado de polarización como función de λ , esto como resultado del tamaño del polvo interestelar a lo largo de la línea de visión.

Un problema importante es la estabilidad en las mediciones de estrellas con un grado de polarización relativamente alto, y es probable que la variabilidad en algunas algunas de estas estándares polarizadas sea intrínseca en cierto grado, ya que para que un gran grado de polarización interestelar se

acumule se requiere de una considerable línea de visión de columna de polvo. La absorción interestelar implícita, impone que las estrellas con un razonable brillo aparente permitan una fácil medición, pues tienden a ser intrínsecamente super gigantes brillantes de tipo tempranas. Varias estrellas cercanas de este tipo, con poca polarización interestelar, son conocidas por presentar polarización variable, fenómeno producido en las atmósferas de dichas estrellas, las cuales forman su propio polvo. Si las fuentes polarigénicas involucran una combinación de efectos estelares atmosféricos intrínsecos y del medio interestelar, pequeños niveles de variabilidad pueden ser registrados. También en algunos casos de estrellas estándares polarizadas con gran grado de polarización interestelar se ha encontrado una dispersión espectral de posición angular significativa causada por la combinación vectorial de los efectos intrínsecos e interestelares.

Muchos trabajos de investigación han cuestionado la estabilidad de algunas de las estrellas estándar de uso común. Ya sea que cualquier variabilidad aparente es intrínseca a la luz de la estrella en si misma o en relación a ruido mal determinado, son cuestiones que requieren de mayor investigación y pueden mejorar la precisión polarimétrica mediante la aplicación de telescopios más grandes y mejores detectores de estado sólido.

En lo que respecta a las estrellas estándares no polarizadas la experiencia muestra que las estrellas en la parte media de la secuencia principal son menos propensas a mostrar los efectos intrínsecos relativos a los objetos de tipo temprano o tardío. Como consecuencia, la mayoría de los catálogos que listan estrellas de baja polarización, normalmente contienen estrellas de tipo solar. Además para minimizar efectos de la polarización interestelar, los objetos son de la vecindad solar local y alejados del plano galáctico.

Capítulo 3

Diseño y Control del Polarímetro

3.1. Características y requerimientos

Para poder diseñar el polarímetro es necesario conocer las características del telescopio y el detector al cual será adaptado, ya que de ellas dependen las dimensiones, materiales, ubicación y características de los elementos ópticos, electrónicos y mecánicos que componen al instrumento. De esta manera se minimizan los efectos no deseados que el polarímetro pueda presentar a la calidad de la señal detectada.

El INAOE cuenta con el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro que está equipado con un telescopio reflector, de sistema óptico: Ritchey-Chretien, derivado del Cassegrain, formado por dos espejos. El espejo primario de 2.12 metros de diámetro y el secundario hiperbólico de 50 centímetros. La estructura de este telescopio es compacta para su distancia focal, que es de aproximadamente 25 metros. Entre los instrumentos con que cuenta este observatorio está la Cámara del Infrarrojo Cercano de Cananea (CANICA).

La Cámara del Infrarrojo Cercano de Cananea es un instrumento diseñado para obtener imágenes de los objetos celestes en el infrarrojo cercano, en las bandas J (1.25 micras), H (1.63 micras) y K (2.12 micras). La resolución espacial de esta cámara es de 0.32 segundos de arco por pixel y cuenta con un campo de visión de 5x5 minutos de arco. Las principales características de CANICA se describen en el cuadro 3.1.

Físicamente CANICA está contenida en un criostato de 8.5 litros construido por IR Labs. Las dimensiones del contenedor cilíndrico es aproximadamente

de $\varnothing 16.5 \times 16$ pulgadas. Tiene una ventana de entrada de 2.5 pulgadas o 63.5 mm ubicada a poco más de 4 pulgadas del centro de la tapa, por lo que para montarlo al telescopio se utiliza un adaptador que corrige esta excentricidad y posiciona la cámara a la distancia necesaria para su óptimo funcionamiento.

El adaptador de aluminio está compuesto de dos bridas, una de 21 pulgadas para la cámara y otra de 25.11 pulgadas de diámetro para la platina del telescopio, unidas ambas por un tubo de $\varnothing 12 \times 6.5$ pulgadas con un espesor de 0.65 pulgadas. El arreglo CANICA-Adaptador se atornilla a la platina del telescopio mediante las ranuras de la brida como se ilustra (Figura 3.1).

Formato del detector	1024 x 1024
Material del detector	HgCdTe
Rango espectral	0.85 - 2.40 μm
Escala de Placa	0.32 "/pixel
Tamaño del pixel	18.5 μm / pixel
Campo de visión total	5.5' x 5.5'
Temperatura de operación	77 K
Ruido de lectura	~ 15 e-/pixel
Ganancia	2.35e-/ADU
Corriente oscura	0.02 e-/sec
Full well capacity	45 000 ADU/110.000 e-
Linealidad (4 %)	20 000 ADU/50.000 e-
Eficiencia cuántica promedio (del detector)	76 % (para el 99.5 % de pixeles)
Mínimo tiempo de integración	0.1 seg (con obturador); 1 sec (en staring mode)
Tiempo de lectura (imagen completa)	1 segundo

Cuadro 3.1: Características principales de CANICA

De acuerdo con estas especificaciones es conveniente que el polarímetro este situado en el espacio que ocupa el adaptador antes mencionado. Cumpliendo con la función moduladora, propia del polarímetro, y de adaptación focal que el adaptador proporcionaba a la cámara. Además al ubicar los elementos ópticos en el foco del telescopio se reduce el diámetro de los mismos puesto que en este punto el tamaño del haz es menor.

Tomando en cuenta que el campo de visión total de CANICA es de $F.O.V. = 5.5' \times 5.5'$ y longitud focal es $f = 25440$ mm, se puede calcular la escala de placa en segundos de arco en el foco del telescopio mediante



Figura 3.1: Fotografía de CANICA con el adaptador sujeto al guiador del telescopio de 2.1 m en Cananea, Sonora.

$$E.P. = \frac{206265''}{f} = \frac{206265''}{25440 \text{ mm}} = 8.107''/\text{mm} \quad (3.1.1)$$

Entonces el tamaño será,

$$\Delta x = \frac{F.O.V.}{E.P.} = \frac{330''}{8.107''/\text{mm}} = 40.71 \text{ mm} \quad (3.1.2)$$

Donde Δx representa la dimensión de la imagen en el plano focal utilizando el campo de visión de CANICA como referencia. Este valor nos indica que el diámetro de apertura de los elementos ópticos tiene que ser de diámetro $d > 41 \text{ mm}$.

El diámetro máximo lo determina la ventana de entrada de CANICA puesto que está diseñada para no obstruir al paso de los rayos divergentes que inciden en ella por lo que el diámetro de apertura de los elementos puede ser $d \leq 63.5 \text{ mm}$. Aunque este diámetro puede ser mayor puesto que el límite superior solamente es crítico para la adquisición de los elementos, pues a mayor dimensión el proceso de fabricación es más complejo y el costo de los mismos se incrementa.

De manera complementaria se utilizó Zemax como una herramienta para determinar el tamaño y la posición de los elementos ópticos necesarios ya

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
1	Standard	Infinity	5710.500000		1062.064751	0.000000
STO*	Standard	-1.134000E+004	-4463.270000	MIRROR	1057.539416	-1.027370
3*	Standard	-3114.160000	5363.030501	MIRROR	242.950000	-2.774760
IMA	Standard	Infinity	-		20.146968	0.000000

Figura 3.2: Diseño del telescopio de 2.1 m en el editor de lentes de Zemax

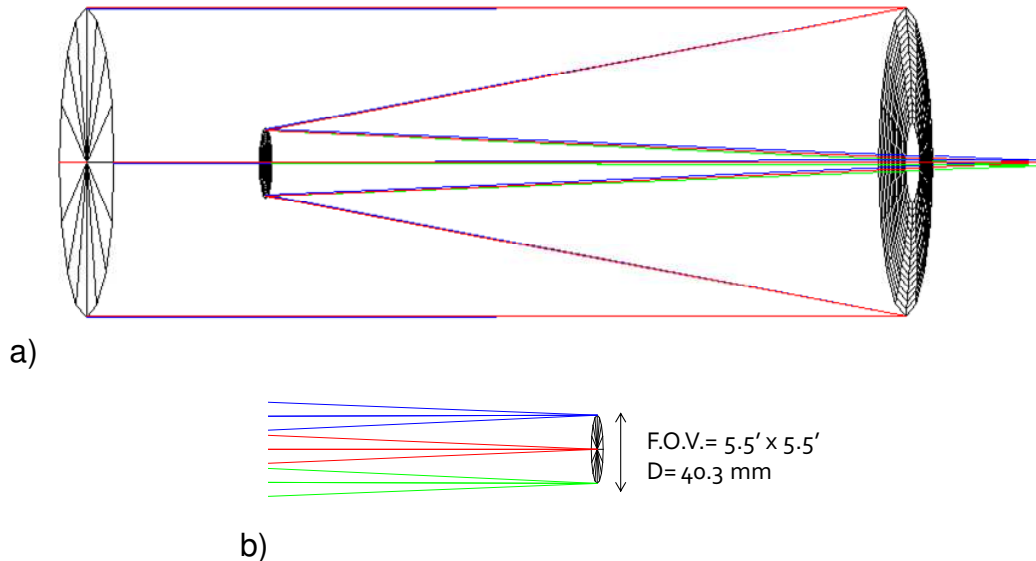


Figura 3.3: a) Trazado de rayos del telescopio de 2.1 m con Zemax b) Acercamiento de la pupila imagen.

que este permite ver el esquema óptico del trazado de rayos del telescopio. Además pueden calcularse la distancia focal y el tamaño de la pupila en la imagen dado un campo de visión y una longitud de onda determinada. Para el caso del telescopio de 2.1 m en Cananea la apertura de entrada del telescopio es de 2115 mm el radio de curvatura del espejo primario es de 11340 mm y el del secundario de 3114 mm. La longitud focal efectiva obtenida con este diseño es de 25200 mm y con un campo de visión de 5.5' el tamaño de la pupila imagen tiene un diámetro de 40.3 mm, lo cual corrobora el cálculo anterior.

Ya que el intervalo espectral de trabajo de CANICA está determinado por las características de sus elementos ópticos, para poder obtener las mediciones de polarización, el sistema modulador requiere de elementos ópticos diseñados para tener una respuesta acromática en el mismo intervalo espectral que posee la cámara.

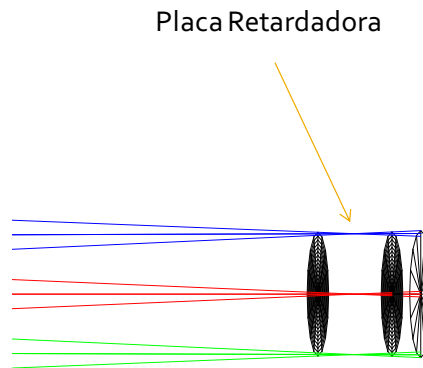


Figura 3.4: Posición de la placa de onda a partir del trazado de rayos.

También se debe considerar que, debido a la posición donde el instrumento es situado, el haz de luz incidente no estará colimado, por lo que los elementos ópticos deberán mantener su efecto modulador cuando el haz de luz tiene un ángulo de incidencia determinado. Además de que en vista del bajo grado de polarización que presentan los objetos astronómicos es deseable que los polarizadores tengan una alta tasa de extinción respecto a cada una de las componentes transversales del campo eléctrico.

3.2. Elementos ópticos y sus características

El diseño de este polarímetro toma como principio el uso de dos elementos que afectan el estado de polarización de la radiación: una placa retardadora de media onda, la cual cambiará el ángulo de polarización de la luz incidente, y un polarizador lineal, que servirá como analizador. El haz que emerge de este arreglo será directamente procesado por la cámara en conjunción con alguno de los filtros de acuerdo a la banda que se desee analizar (Figura 3.5).

3.2.1. Polarizador lineal de alta tasa de extinción (HER)

Como analizador se adquirió en Specac Inc. un polarizador lineal holográfico (Figura 3.6). Se le llama holográfico por que un sustrato adecuado para la transmisión en el infrarrojo se recubre con una foto-resistencia y después se expone a un patrón de franjas interferométricamente generados a partir de luz

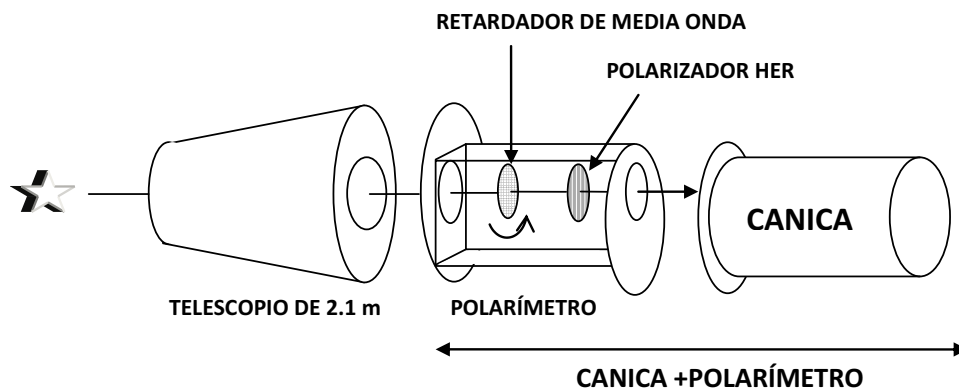


Figura 3.5: Diagrama esquemático del polarímetro acoplado a CANICA y al telescopio.

monocromática. La fotorresistencia desarrollada, que tiene un perfil sinusoidal regular, está cubierta en un ángulo oblicuo con un material conductor (aluminio u oro), para crear una serie de delgadas líneas metálicas paralelas con un período espacial determinado.

Estos polarizadores son mejores que los de rejilla de alambre ya que el periodo entre líneas es más corto y uniforme a lo largo del sustrato por lo que las desviaciones asociadas a las rejillas tradicionales son eliminadas.



Figura 3.6: Polarizador holográfico lineal SPECAC.

Las características de este polarizador son:

- Intervalo espectral de 1-10 micras
- Taza de extinción de 960:1 @ 10 micras
- Periodicidad de rejilla de 4000 líneas / mm

- Sustrato de fluoruro de calcio (CaF_2)
- Apertura de 71 mm.

Los valores K_1 y K_2 (Cuadro 3.2) de este polarizador fueron proporcionados por el fabricante y se obtuvieron a través de un espectrofotómetro que obtiene las curvas correspondientes a:

- La potencia óptica transmitida por el polarizador con las líneas de la rejilla verticales,
- La potencia óptica transmitida con las líneas horizontales y
- La potencia óptica transmitida por un par de polarizadores semejantes con sus rejillas cruzadas.

Propiedad	2.5 μm	5 μm	10 μm
Eficiencia de transmisión (K_1) %	84	86	48
Transmisión de radiación no deseada (K_1) %	0.25	0.13	0.05
Grado de polarización $(K_1 - K_2)/(K_1 + K_2)$ %	99.4	99.6	99.8
Tasa de extinción expresada como K_1/K_2	336:1	662:1	960:1

Cuadro 3.2: Propiedades del Polarizador holográfico lineal de CaF_2 .

3.2.2. Placa Retardadora de Media Onda

La placa retardadora de media onda (Figura 3.7) se adquirió con la empresa alemana Bernhard Halle Nachfl. GmbH y consiste en una placa retardadora superacromática con retardo $\tau = \lambda/2$ o de media onda, fabricada en un sustrato de cuarzo y fluoruro de magnesio (MgF_2).

Sus principales características son:

- Consta de tres pares de placas de cuarzo y MgF_2 cementados entre sí
- Opera en un intervalo espectral de 600 - 2700 nm
- Tiene una diferencia de camino óptico calculado de $\lambda/2 \pm 0.04\%$
- La orientación del eje óptico (Ψ) cambia dentro de un $\pm 0.2^\circ$ en todo el intervalo espectral



Figura 3.7: Placa retardadora superacromática de media onda. B. Halle

- La apertura es de 50 mm de diámetro
- Las placas están cementadas entre dos placas de Heraeus 302, con un espesor de 7 mm cada una.

Acorde con el fabricante esta placa retardadora tiene una desviación prismática de $< 2'$ y una distorsión de frente de onda $\leq 1\lambda$ a $\lambda = 550$ nm (figura 3.8). La superficies exteriores están recubiertas de una capa simple antirreflejante.

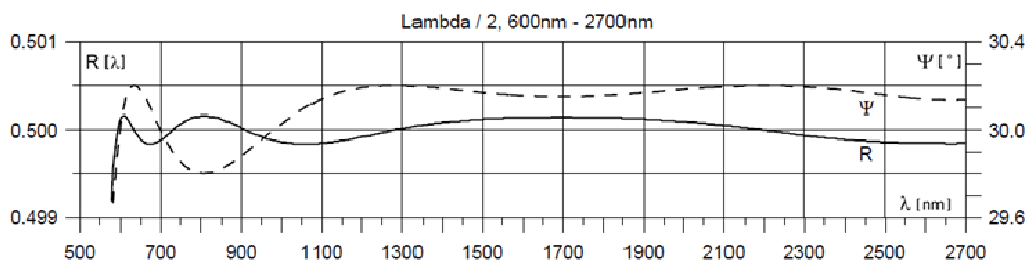


Figura 3.8: Desviación prismática y distorsión de frente de onda de la placa retardadora de media onda

3.3. Elementos mecánicos y sus características

En el diseño descrito al principio de este capítulo se puede observar la necesidad de que los elementos ópticos involucrados (polarizador y placa de onda) sean móviles de cierta forma. En primer lugar se desea que la placa

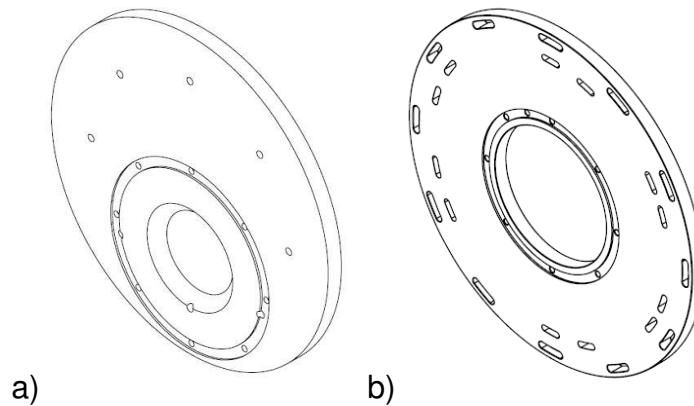


Figura 3.9: a) Dibujo de la brida de sujeción a CANICA b) Dibujo de la brida de sujeción a la platina del telescopio

retardadora tenga un movimiento giratorio con respecto al eje óptico del sistema. También es necesario que los elementos internos que componen el instrumento sean linealmente móviles, pues se desea que el uso del polarímetro sea opcional. De esta manera el observador podrá hacer uso de la cámara directa o del polarímetro sin necesidad de desmontar el instrumento del telescopio.

3.3.1. Remoción (desplazamiento lineal) del polarímetro

El desplazamiento lineal de los elementos que componen internamente el polarímetro, para evitar desmontarlo de la cámara, se diseñó de acuerdo al espacio disponible dentro de la caja contenedora del instrumento. En lo que respecta al espacio, se consideró que la posición del polarímetro está limitada a la distancia que tiene el adaptador focal entre el telescopio y la cámara. También se tomaron en cuenta las dimensiones de las bridas del adaptador y el tamaño de los elementos involucrados en el movimiento giratorio (figura 3.9).

Las dimensiones de referencia para el desplazamiento lineal se basan principalmente en el espacio libre que tiene la brida de sujeción de CANICA pues los elementos involucrados serán fijados a esta (figura 3.10). La brida original tiene un diámetro de 21 pulgadas y un orificio circular de ventana de 5 pulgadas ubicado a una distancia del centro de aproximadamente 4.19 pulgadas. Al rededor de este orificio se fija el tubo que compone el adaptador, dejando una superficie libre alrededor de la misma que puede ser aprovechada para

colocar un par de rieles que permiten un desplazamiento lineal, perpendicular al eje óptico, lo que permite la opción de retirar el polarímetro del eje óptico si se desea (figura 3.11).

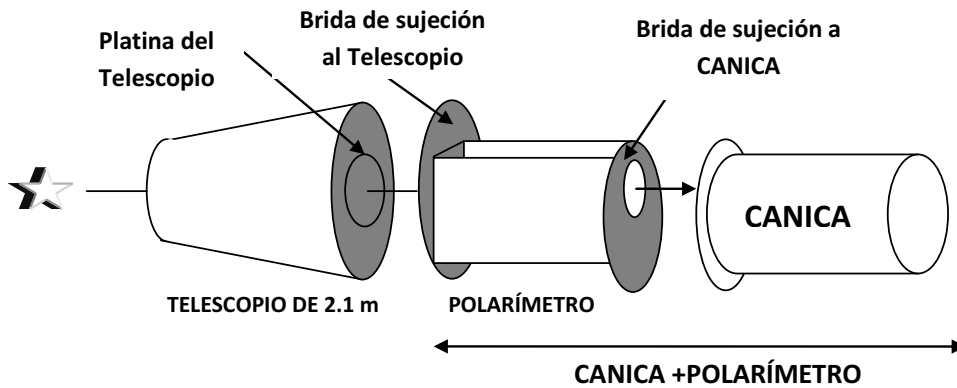


Figura 3.10: Esquema que indica la ubicación de las bridas de sujeción y la platina del telescopio.

El espacio queda reducido a 12 pulgadas libres considerando la interferencia que existe con las líneas de tornillos de la brida de sujeción al telescopio y el grosor de las paredes de contenedor. Como la intención del desplazamiento lineal es que este instrumento no sea abierto a menos de que sea realmente necesario, fue necesario adquirir un par de rieles de 9 pulgadas que en conjunto con sus baleros lineales no requieran lubricación constante, sean de fácil instalación y que ofrezcan un desplazamiento eficiente y libre.

Con las características anteriormente descritas se optó por comprar un par de ejes de aluminio de precisión con revestimiento cerámico y barras de apoyo distribuidos por McMaster-Carr®. Estos rieles de $\varnothing 1/2'' \times 9''$, son similares a los de aluminio duro pero ofrecen la ventaja de estar diseñados en una sola pieza lo que reduce el juego mecánico del sistema. Los rieles están hechos de aluminio 6061-T6 por lo que son ligeros, no magnéticos y tienen una alta resistencia a la corrosión. Su revestimiento cerámico protege los ejes de diversos contaminantes. El diseño de estos rieles no está destinado para usar baleros de bolas lineales en su lugar se deben utilizar un par de bloques de soporte con baleros lineales, lisos y sin lubricación. Los bloques de soporte tienen baleros que prácticamente no requieren mantenimiento ya que tienen un revestimiento auto lubricante. Además para tener una buena definición de la carrera y posicionamiento del instrumento, se usan un par de topes de pinza

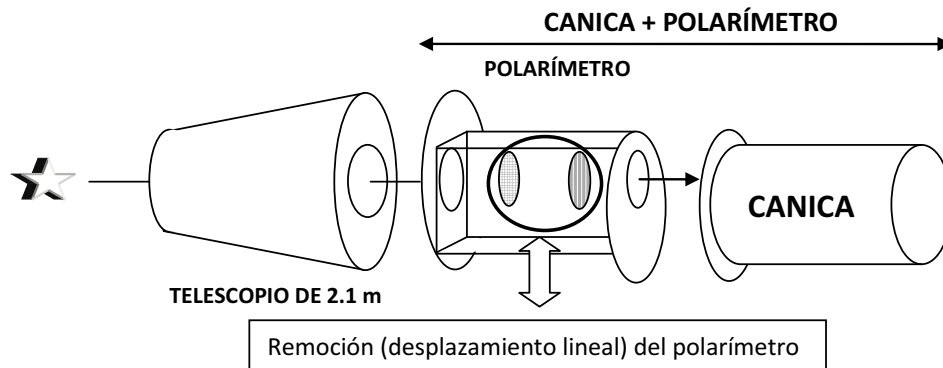


Figura 3.11: Diagrama esquemático de la remoción del polarímetro (perpendicular al eje óptico).

para los rieles (figura 3.12).

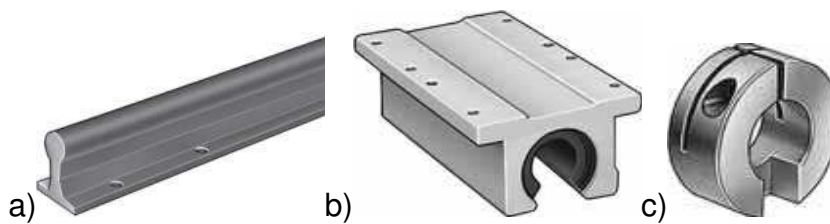


Figura 3.12: a) Modelo del raíl con soporte b) Modelo del bloque de soporte con balero lineal c) Modelo del tope para rieles.

3.3.2. Rotación del retardador

El sistema modulador requiere que la placa retardadora de onda pueda rotarse libremente a cuatro posiciones en el plano perpendicular al eje óptico, para este propósito se debe tener un mecanismo que permita el libre movimiento axial y que deje libre de obstrucción al eje óptico del instrumento. La opción inmediata fue utilizar un rodamiento cuyo diámetro interno sea mayor que el diámetro externo del retardador de media onda. El diámetro externo del retardador de media onda es de 75 mm por lo que se adquirió un juego de dos rodamientos de contacto angular y de alta precisión de la marca RHP® con un Diámetro interno de 80 mm, un diámetro externo de 110 mm y una altura de 16 mm cada uno. Las dimensiones y características de estos baleros permiten un giro adecuado y preciso (figura 3.13).

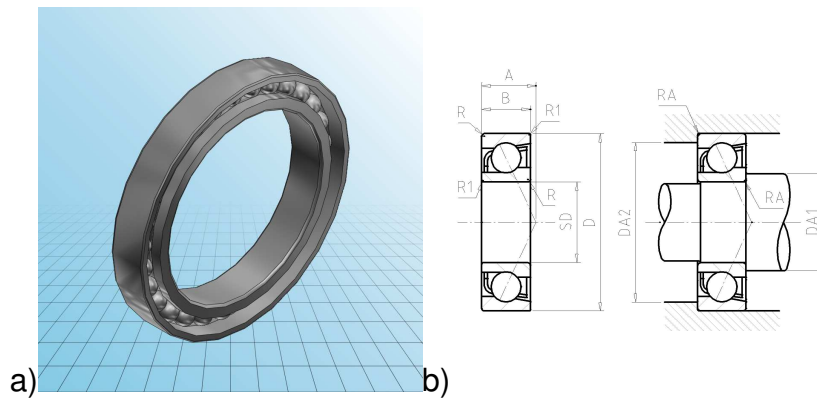


Figura 3.13: a) Modelo del rodamiento de contacto angular RHP b) Esquema del rodamiento.

Rodamiento No.	7916C
SD (Diámetro interior / mm)	80
D (Diámetro exterior / mm)	110
B (Ancho / mm)	16
LG (Velocidad límite con grasa / rpm)	8500
LO (Velocidad límite con aceite / rpm)	12000
A (Centro de carga efectivo / mm)	20.7
Masa / kg	0.376

Cuadro 3.3: Algunas características del rodamiento RHP 7916C

El movimiento rotatorio del tubo retardador es actuado por un motor de pasos mediante una polea que provee el torque necesario para que este mecanismo funcione. Para lograr esto se debió considerar el espacio dentro del instrumento y la precisión angular que se requiere. Para implementar este movimiento se usan una corona, un piñón y una polea de PIC-Design® (figura 3.14). La corona es de 60 dientes con un diámetro primitivo de 4.77" (121.3 mm) y una altura de 0.25" (6.35 mm). El diámetro interno se alteró para permitir el paso de la luz por en medio y ajustarlo al mecanismo de rotación, ya que el diámetro original era 0.25 pulgadas (6.35 mm) y el necesario debe ser de al menos 2.5 pulgadas (63.5 mm). El piñón de la misma marca tiene 10 dientes con diámetro primitivo de 0.79" (20 mm) este se conecta directamente al vástago del motor. La relación de transmisión mecánica que existe entre piñón y corona es de 1:6, lo que quiere decir que por cada vuelta de la corona el piñón tiene que dar 6 vueltas.

La polea (cadena) que une ambos elementos esta hecha de poliuretano con

núcleo de aramid, tiene 70 eslabones y un largo de 17.5 pulgadas (444.5 mm). Su longitud se calculó para que ambos ejes estén a una distancia mínima de 3.8 pulgadas (96.5 mm), por lo que la calculadora del fabricante (figura 3.15) determina que la longitud debe ser de 17.387 pulgadas, y su valor mas cercano comercial es de 17.5 por lo que se adquirieron cuatro poleas de ese tamaño para tener refacción de la cadena transmisora.

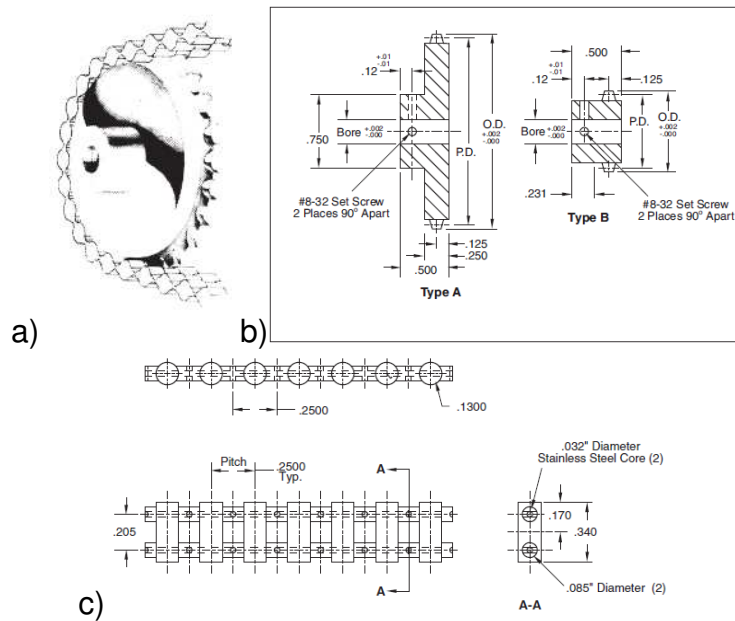


Figura 3.14: a) Modelo del piñón con la polea b) Plano del piñón y corona c) Plano de la polea

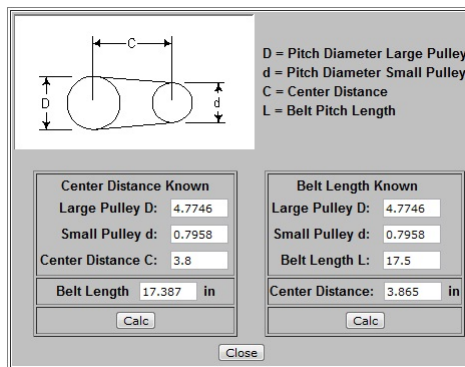


Figura 3.15: Calculadora de longitud para poleas

3.4. Diseño de partes mecánicas

3.4.1. Contenedor del Polarímetro

Para colocar la cámara infrarroja CANICA en el telescopio se requiere de un adaptador que corrige la excentricidad de la cámara, el cual sirve a su vez como un contenedor del polarímetro. Dentro de este se colocan los elementos ópticos en un mecanismo corredizo, que permite que el uso del polarímetro sea opcional y pueda ser controlado por el mismo software que maneja actualmente a la cámara, quedando de esta manera como una mejora a CANICA, la cual no tiene que ser desmontada en el futuro.

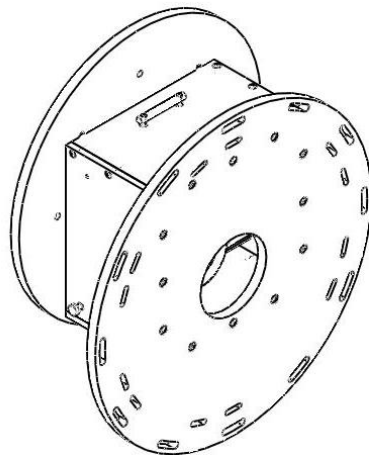


Figura 3.16: Diseño del contenedor del polarímetro

El adaptador consta de dos bridas circulares de aluminio (6061) con un espesor de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Una brida estará unida al telescopio (figura 3.17) y otra unida a la cámara (figura 3.18), con un diámetro de 25.18 pulgadas y 21 pulgadas respectivamente. Ambas bridas fueron maquinadas en el taller mecánico del INAOE.

Ambas bridas son unidas por una caja de sujeción que evita el paso de luz ambiental a los instrumentos del polarímetro. Esta caja cuadrada se compone de 4 placas de aluminio rectangulares cada una con un espesor de $\frac{3}{4}$ de

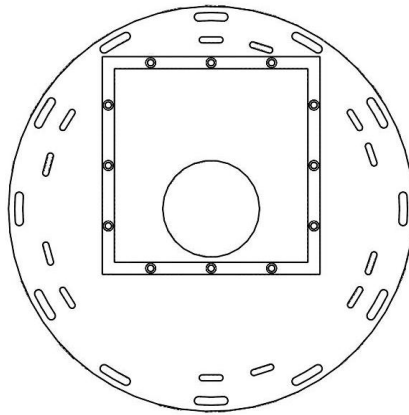


Figura 3.17: Diseño de la brida que va al telescopio

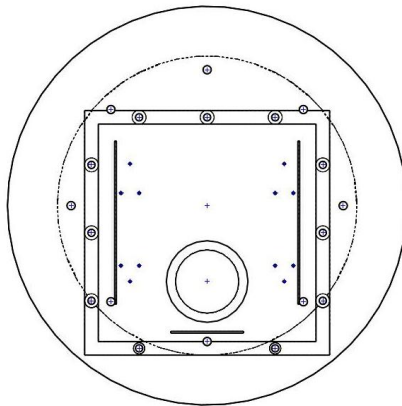


Figura 3.18: Diseño de la brida a CANICA

pulgada y de 8 x 13.5 pulgadas (figura 3.19). Las dimensiones y barrenos laterales para ensamble son iguales en cada uno de las placas, sin embargo cada una de ellas presenta barrenos para diferente propósito y por lo tanto deben ser colocadas con una orientación determinada para que el ensamble quede ajustado con la orientación mostrada (figura 3.20).

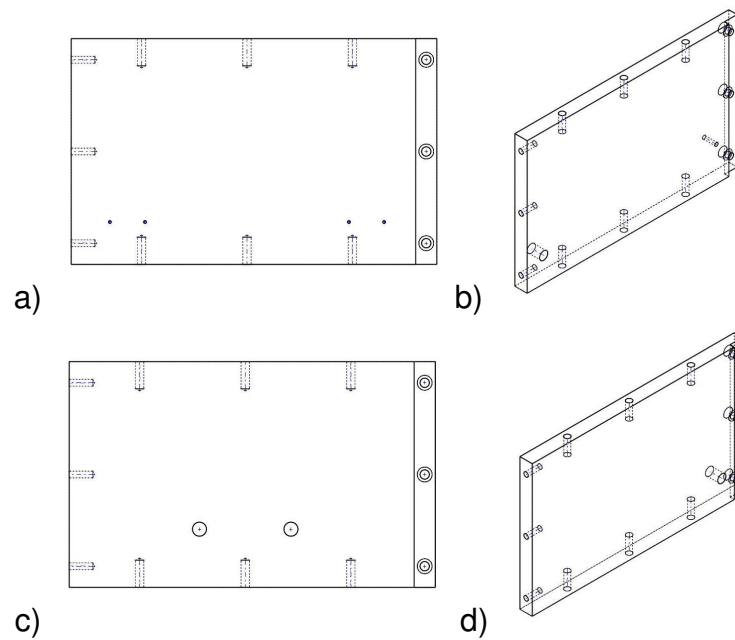


Figura 3.19: Diseño de las placas de sujeción. Las placas a con c y b con d son caras opuestas del contenedor.

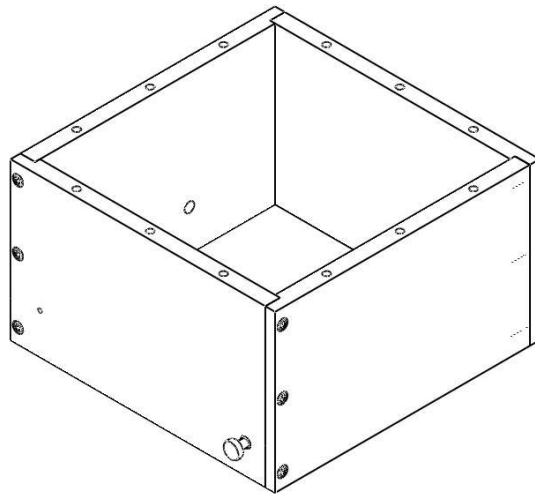


Figura 3.20: Ensamble de la caja de sujeción.

El contenedor del polarímetro queda finalmente ensamblado con 6 piezas como se describió anteriormente dentro de la cual se colocarán los elementos que adaptarán la óptica del instrumento (figura 3.21).

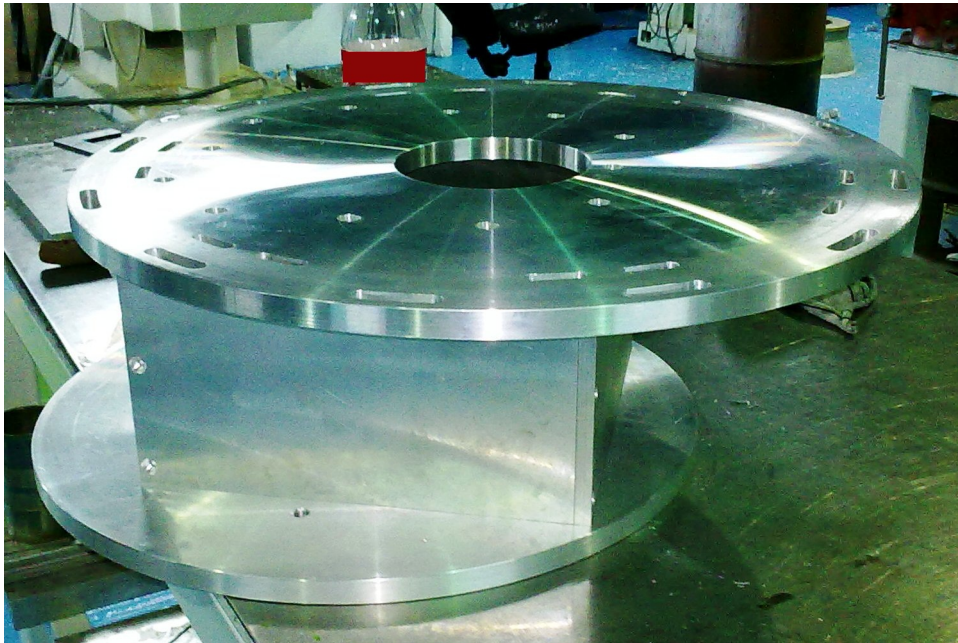


Figura 3.21: Fotografía del adaptador contenedor del polarímetro.

3.4.2. Remoción del polarímetro

Además de contener los elementos ópticos del polarímetro, este contenedor sirve como adaptador focal de CANICA con el telescopio, por lo que es deseable tener la opción de retirar el polarímetro sin necesidad de desmontarlo de la platina. Para este fin se atornillan un par de rieles utilizando como referencia las guías marcadas en la brida de sujeción a CANICA e instalando a su vez respectivos topes que servirán como límite físico de la posición deseada.

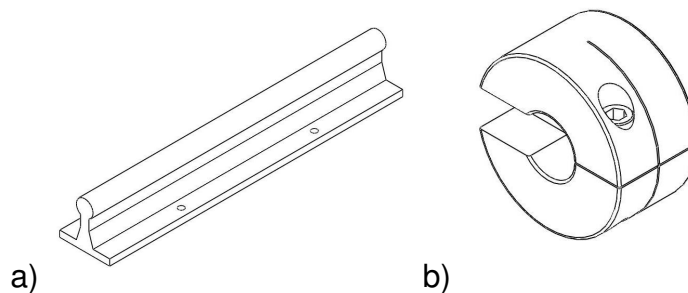
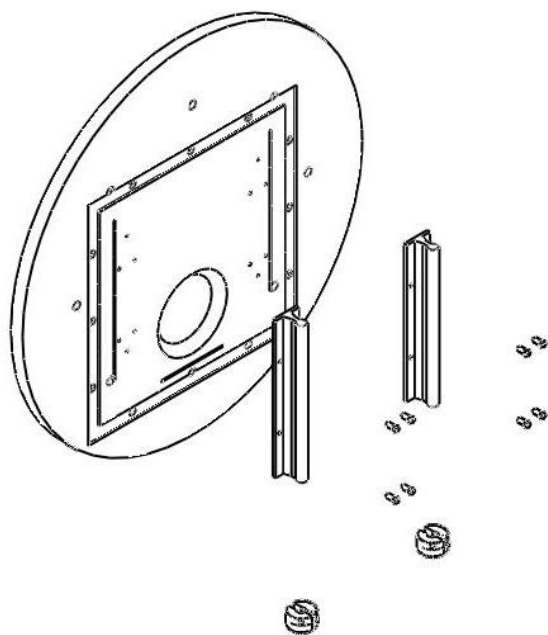
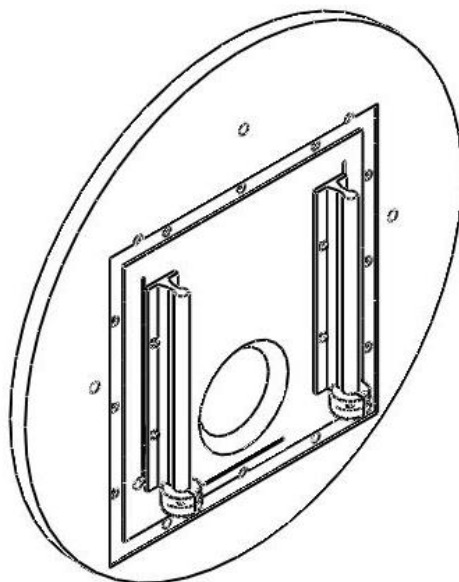


Figura 3.22: a) Modelo del raíl McMaster, b) Modelo del final de carrera,



c)



d)

Figura 3.23: a) Vista explosionada del subensamblado, b) Subensamblado completo de la brida con rieles.

3.4.3. Platina, polarizador y baleros lineales

Los rieles unidos a la brida de sujeción de CANICA permitirán el desplazamiento opcional de una platina de aluminio de 11 x 6.5 pulgadas con un espesor de $\frac{1}{4}$ de pulgada, la cual sostendrá el motor, el polarizador y el retardador de media onda con sus mecanismos. Estará atornillada a los baleros lineales (figura 3.24a). También se adapta una asidera para realizar el desplazamiento de la platina desde el exterior del polarímetro evitando desmontar o abrir el contenedor.

La platina está ranurada y barrenada para poder atornillar cada uno de los elementos mencionados, ya que es fundamental que la posición de cada uno de los elementos sea estable y precisa. El polarizador lineal de Specac tiene tres barrenos en su anillo sujetador. Para la operación del polarímetro estos permiten que se atornille a la platina en una posición fija y deseada.

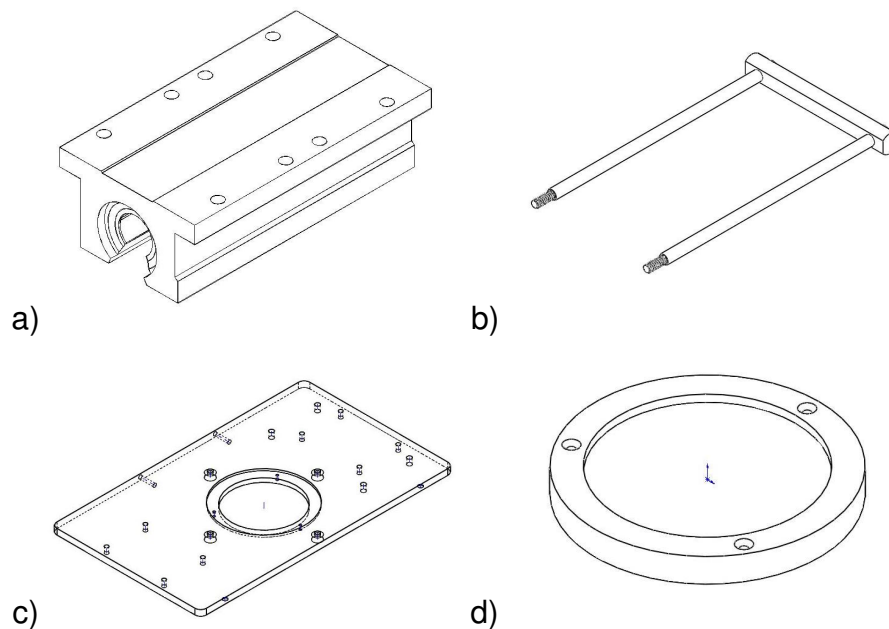


Figura 3.24: a) Balero lineal de McMaster, b) Asidera para la platina, c) Platina del polarímetro, d) Modelo del polarizador lineal Specac.

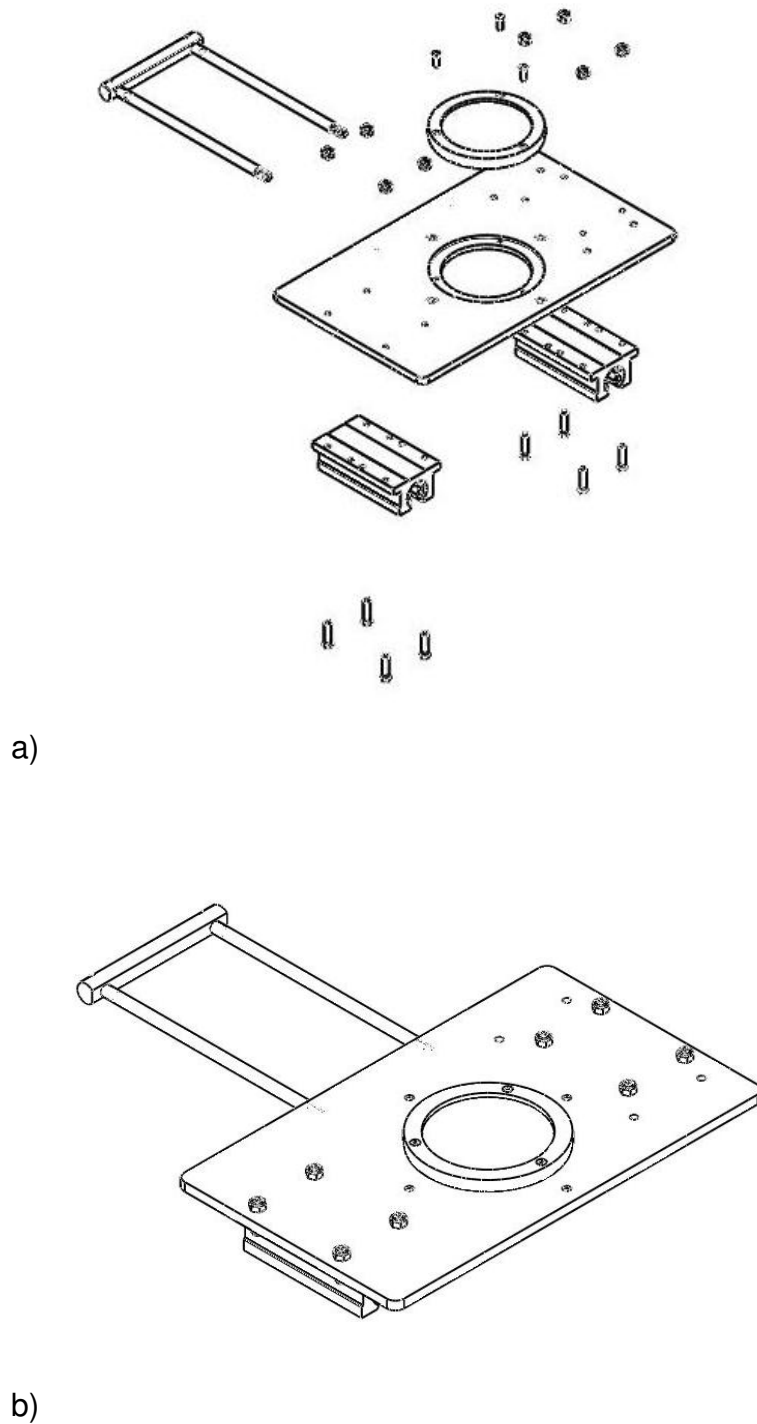


Figura 3.25: a) Vista explosionada del subensamble, b) Sub-ensamble completo de la Platina con el polarizador y baleros

3.4.4. Tubo de Seguridad del retardador

A diferencia del polarizador lineal el retardador de media onda de Bernhard Halle no tiene una posición fija ni tiene barrenos para fijarlo con tornillos. Este elemento debe ser giratorio y concéntrico al polarizador lineal pero sin perder la posición del eje de referencia, por lo que este tubo de seguridad consta de un tubo contenedor y un anillo de seguridad que por medio de un O-ring de silicón queda asegurado sin necesidad de hacer daño al retardador. El tubo del retardador está hecho de aluminio, con un diámetro de 88.9 mm, una altura de 63.5 mm y un espesor de 12.7 mm. Este a su vez lleva un anillo de sujeción del mismo material con un diámetro de 88.9 mm, una altura de 24.3 mm y un espesor de 12.7 mm (figura 3.26).

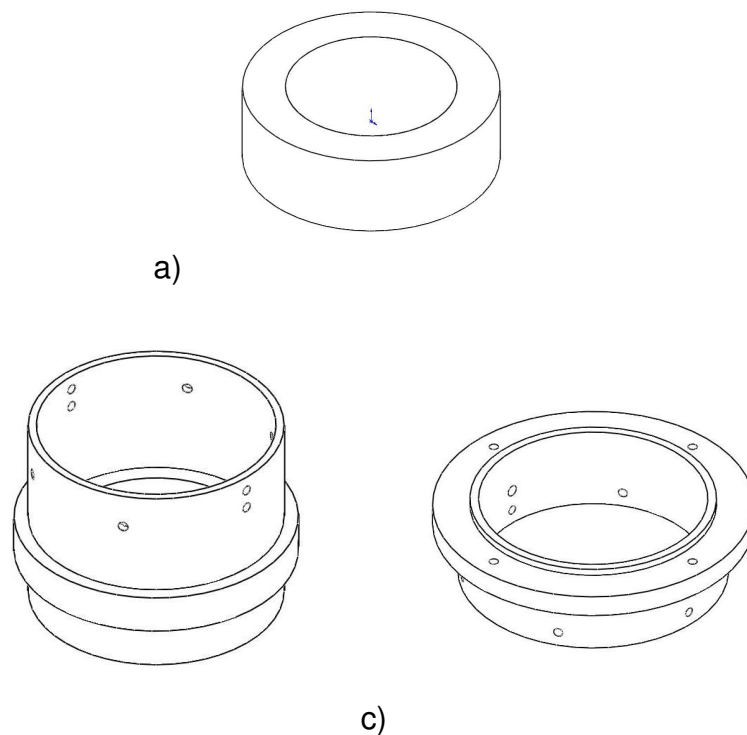


Figura 3.26: a) Modelo del Retardador de media onda Bernhard Halle, b) Tubo contenedor del retardador, c) Anillo de seguridad del retardador.

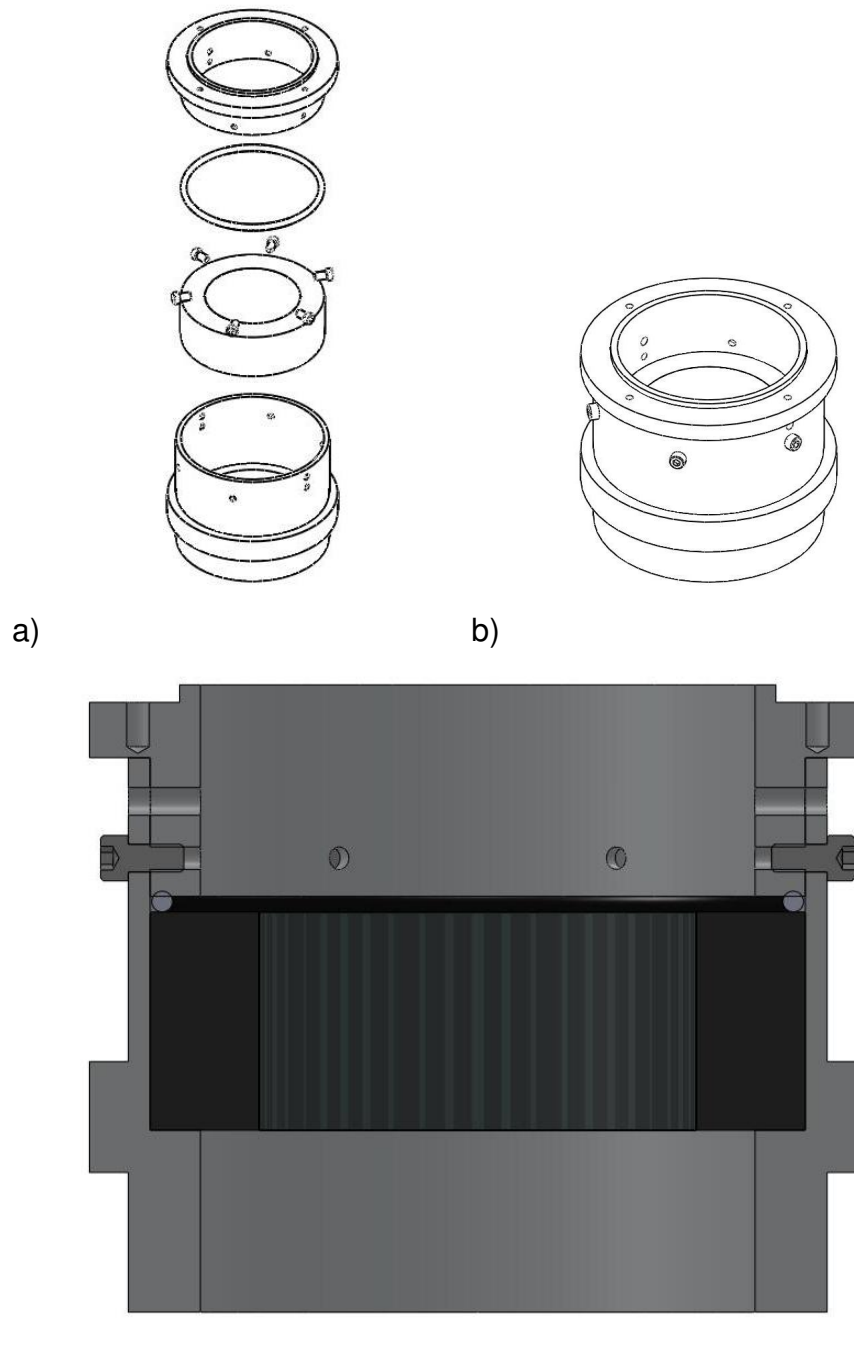


Figura 3.27: a) Vista explosionada del subensamble, b) Vista completa del subensamble, c) Corte transversal del subensamble del tubo contenedor del retardador.

3.4.5. Mecanismo del retardador

Para poder girar el retardador de media onda es necesario hacer girar el tubo de seguridad del retardador sin crear alguna obstrucción en el eje óptico del instrumento. Por lo tanto es necesario adaptar un juego de baleros para que en conjunto realicen movimiento giratorio del tubo sin oscilaciones angulares axiales y con un buen soporte para evitar desplazamientos fuera del eje. Cada balero cuenta con su respectiva caja de sujeción las cuales permiten girar solo la parte interna de los baleros a donde se transmite el movimiento giratorio al tubo de sujeción del polarizador. El control de la rotación del mecanismo se realiza a través de una corona adquirida en PIC-Design, de 60 dientes, con un diámetro primitivo de 4.77" (121.3 mm) y una altura de 0.25" (6.35 mm). El diámetro interno original de 0.25" fue maquinado hasta alcanzar un diámetro final de 2.7" (68 mm) y también fue barrenado para poder sujetarse al tubo del retardador como se muestra en la figura 3.28.

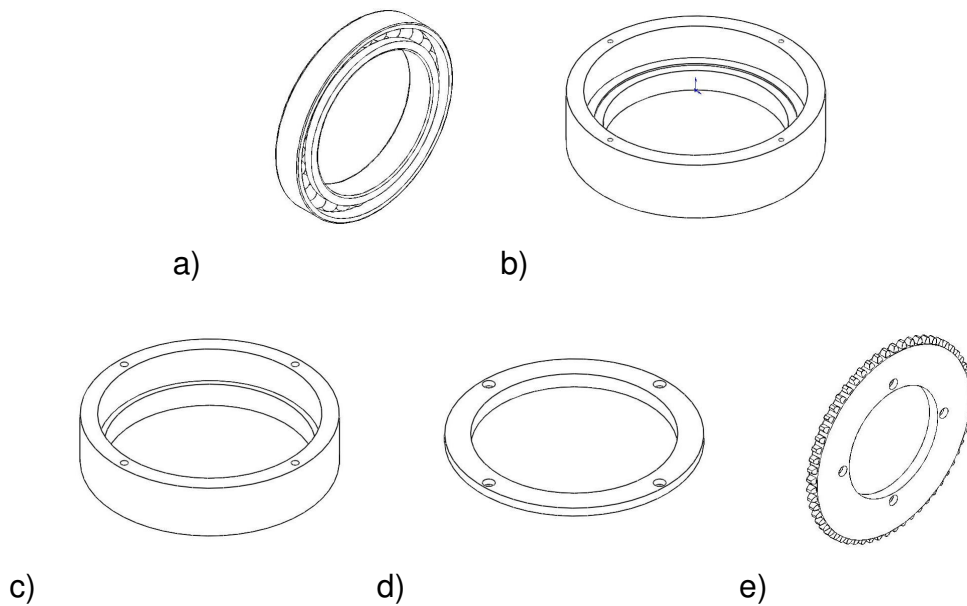


Figura 3.28: a) Balero RHP de contacto angular, b) Caja soporte del Balero 1, c) Caja soporte del Balero 2, d) Anillo sujetador de los baleros, e) Corona PIC-Design de 60 dientes.

En el ensamble, el primer balero se coloca sobre la primera caja de soporte y encima del balero se coloca el ensamble del tubo del retardador. La

caja de soporte del segundo balero se coloca encima el borde externo de la primera caja, acoplando los barrenos que unirán ambas cajas. Posteriormente se coloca el segundo balero sobre la segunda caja de soporte y a su vez se cubre con el anillo sujetador fijando todo el subensamblado con los tornillos correspondientes como se muestra en la figura. Finalmente la corona se asegura directamente en la tapa del ensamble del tubo del retardador, por lo que el movimiento se transmite directamente al retardador de media onda debido a que el anillo de seguridad del mismo se encuentra completamente fijo y asegurado. El control de la rotación del mecanismo se realiza a través de una corona adquirida en PIC-Design. El diámetro interno original de 0.25" (6.35 mm) fue maquinado hasta alcanzar un diámetro final de 2.7" (68 mm) y también fue barrenado para poder sujetarse al tubo del retardador como se muestra en la figura 3.29.

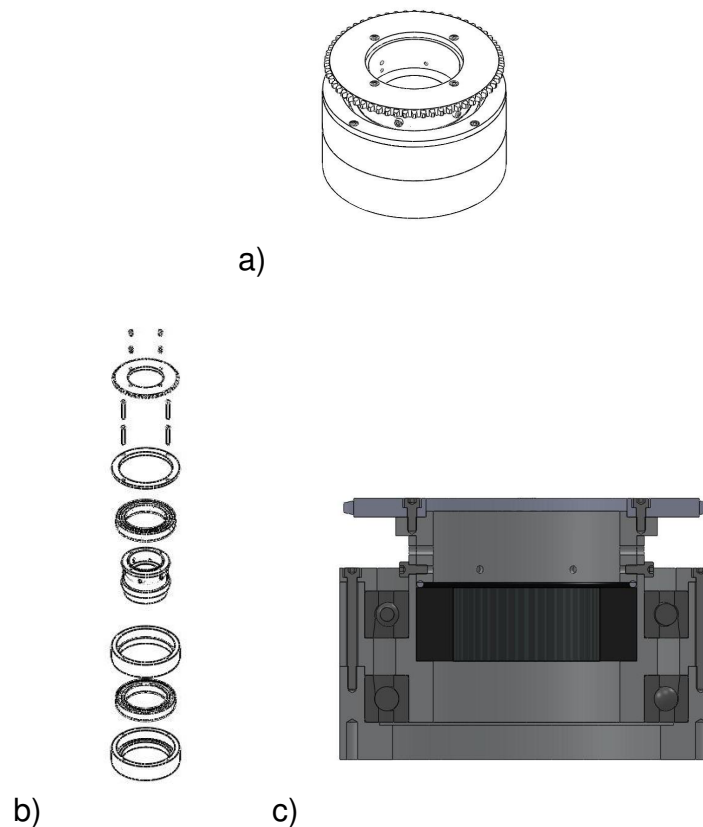


Figura 3.29: a) Subensamblado completo, b) Vista explosionada del subensamblado, c) Corte transversal del subensamblado del mecanismo del retardador.

3.4.6. Motor con base

El movimiento del mecanismo del retardador se realiza por medio de un motor a pasos de Parker Compumotors, sus dimensiones físicas son 2.25" x 2.25" x 1.60" (57.2 x 57.2 x 40.6 mm) y 0.5 kg de peso. Para poder efectuar un movimiento preciso en el mecanismo del retardador es necesario colocar el motor a una altura adecuada para que coincida con la corona. El ajuste de la altura se realiza por medio de un par de soportes de sujeción con ranuras que permiten su ajuste y con una abertura que permite la salida de los cables de control. Para ajustar la tensión de la banda del mecanismo la base de sujeción también está ranurada (figura 3.30). En el vástago del motor se coloca el piñón de PIC-Design (figura 3.31).

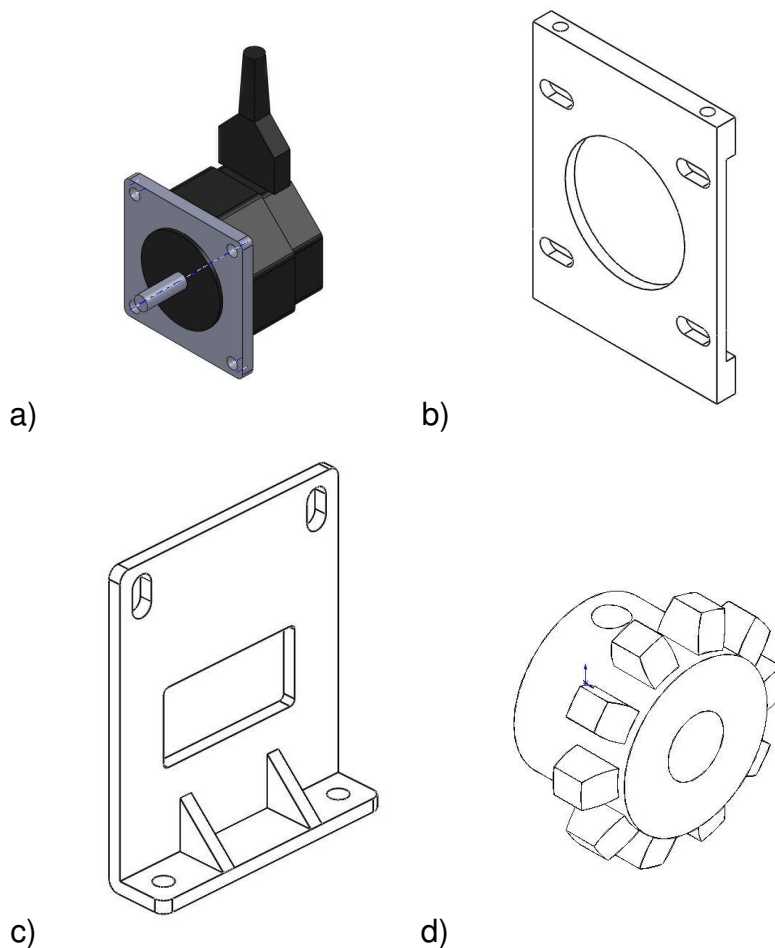
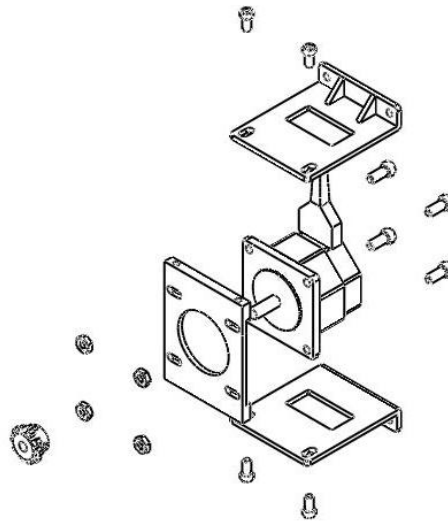
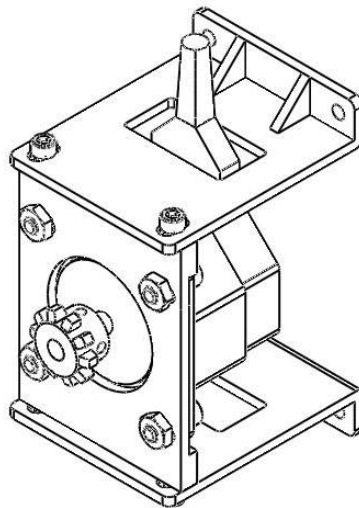


Figura 3.30: a) Motor a pasos Compumotors, b) Base de sujeción del motor, c) Soporte de sujeción del motor, d) Piñón PIC-Design de 10 dientes.



a)

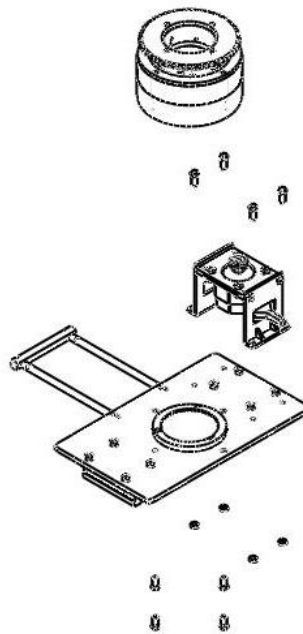


b)

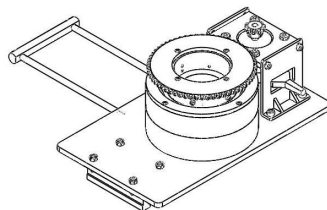
Figura 3.31: a) Vista explosionada del subensamble, b) Subensamble completo del motor con su base.

3.4.7. Interior del Polarímetro

Los subensambles correspondientes al mecanismo del retardador, el motor con base y la platina, con baleros y polarizador se unen de acuerdo con la figura 3.32 correspondiente. El mecanismo del retardador y el motor con base son unidos mediante una banda o “cadena” de PIC-Design y ajustable mediante los tornillos de la base del motor.



a)



b)

Figura 3.32: a) Vista explosionada del subensamble, b) Subensamble completo de: Mecanismo del retardador, Motor con base y Platina, baleros y polarizador.

3.4.8. Seguro del Polarímetro

Considerando que se desea el desplazamiento del polarímetro sin la necesidad de desmontarlo del telescopio se debe tomar en cuenta que durante el uso del instrumento no debe moverse en relación al eje óptico del telescopio. Por lo tanto la posición de los elementos que integran el interior del polarímetro (principalmente polarizador y el retardador) debe ser asegurada con precisión y al mismo tiempo permitir liberarlo de esta misma posición de una manera sencilla y desde el exterior. El seguro se compone de una chumacera de aluminio 6061 con una interior de bronce y un balín de acero. El balín se sitúa en un orificio esférico de menor diámetro que permite salir parte del mismo, siempre que sea presionado hacia la parte exterior de la chumacera. Esta presión se logra utilizando un eje de acero 1018 con cortes ubicados en las posiciones correspondientes a las chumaceras. Este eje móvil adjunto a un resorte y dos pernos de acero componen un seguro normalmente cerrado activo cuando el resorte es presionado desde el exterior del instrumento (figuras 3.33 y 3.34).

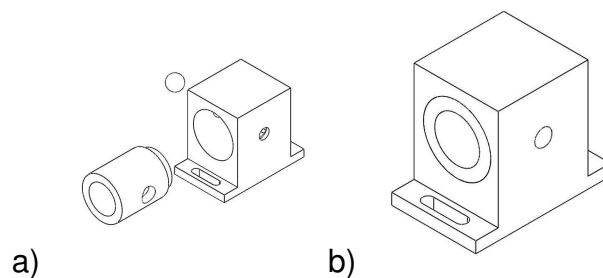


Figura 3.33: a) Vista explosionada del subensamble, b) Subensamble completo de la Chumacera para el seguro.

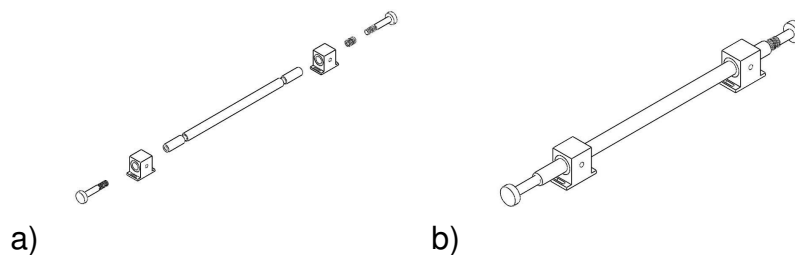


Figura 3.34: a) Vista explosionada del subensamble, b) Subensamble completo del seguro para la platina.

El seguro se coloca en una de las paredes de la caja de sujeción del polarímetro, donde se ajusta al nivel de la platina y que a su vez tiene barrenos esféricos donde el balín debe coincidir para así asegurar la concentricidad de los elementos ópticos que están sobre de ella (figura 3.35).

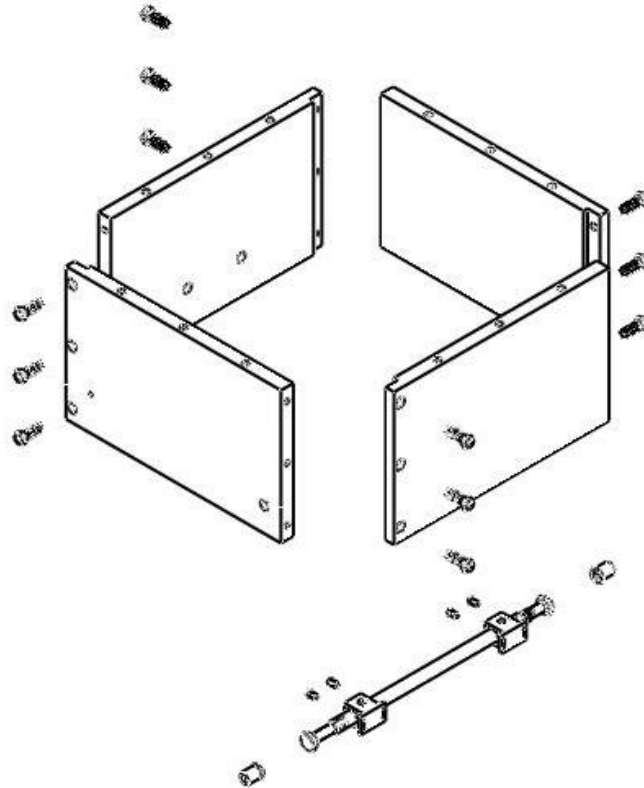
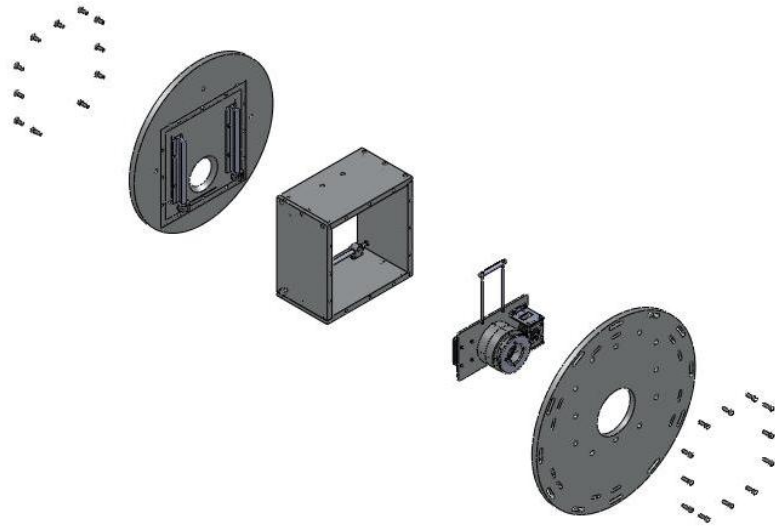


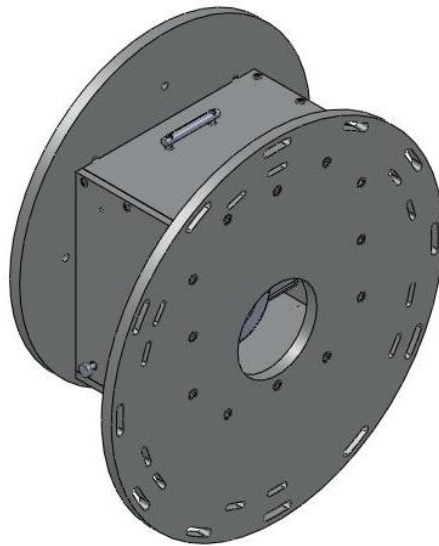
Figura 3.35: Vista explosionada de la caja de sujeción con el seguro para la platina.

3.4.9. Polarímetro (Ensamble final)

Una vez que se tienen todos los subensambles armados las partes en conjunto son colocados dentro del contenedor y se prueba la funcionalidad de todos los elementos.



a)



b)

Figura 3.36: a) Vista explosionada del ensamble, b) Ensamble final del Polarímetro

3.5. Sistema de Control

El sistema que controla el polarímetro se basa principalmente en el movimiento giratorio del retardador de media onda, el cual debe poder moverse libremente para alcanzar las posiciones de registro deseadas. Como se explicó en el capítulo anterior se requiere de cuatro posiciones angulares fijas para registrar las imágenes y obtener los parámetros de Stokes del objeto observado. Estas posiciones corresponden a los ángulos de 0° , 45° , 90° y 135° originalmente, pero el uso de una placa retardadora de media onda conlleva a utilizar posiciones angulares divididas entre dos, por lo que las posiciones angulares serán 0° , 22.5° , 45° y 67.5° . A fin de controlar con precisión estas mediciones es necesario saber las capacidades mecánicas, electrónicas y computacionales que se poseen.

3.5.1. Hardware

Mecánicamente, refiriéndose al dispositivo giratorio, el piñón y corona tienen una relación de transmisión mecánica de 6:1, lo que quiere decir que por cada vuelta de la corona el piñón tiene que dar 6 vueltas. Así se puede establecer que para poder llegar a una posición de 22.5° , 45° o 67.5° en la corona, el piñón tienen que girar hasta una posición de 135° , 270° o 405° respectivamente. El movimiento del mecanismo del retardador se realiza a través de un motor a pasos bipolar OS Series de Parker Compumotors (cuadro 3.4) con una resolución angular de 1.8° por paso. Con esta resolución y tomando en cuenta la relación de transmisión mecánica del engranaje se sabe que se pueden obtener movimientos precisos de 0.3° por paso del motor, por lo que las posiciones angulares deseadas (interpretadas en pasos del motor) quedarían en 75, 150, y 225 pasos respectivamente.

El motor se controla mediante un Driver/Controller OMZL6104 de Parker Compumotors (figura 3.37). Este controlador funciona con motores a pasos híbridos estándares de 1.8° . Tiene un canal de encoder incremental/decremental configurable, entradas para "Home" y finales de carrera, dos entradas (de disparo) rápidas para la captura de posición o registro, 16 entradas y 8 salidas programables y una salida auxiliar. Las conexiones se encuentran en terminales de tornillo desmontables y una cabecera estándar de 25 pines que permite

Parámetros Eléctricos	Motor OS2HB
Torque estático \ Oz-in (Nm)	43 (0.30)
Corriente de operación \ A pico (A rms)	Serie: 1.5 (1.0) Paralelo: 3.0 (2.1)
Voltaje de operación del bus \ (VDC)	170
Torque de retención \ Oz-in (Nm)	2.5 (0.02)

Parámetros Mecánicos	Motor OS2HB
Carga de empuje \ lb (kg)	13 (5.9)
Carga radial \ lb (kg)	20 (9.1)
Peso del motor \ lb (kg)	1 (0.5)

Cuadro 3.4: Algunas características eléctricas y mecánicas del motor OS2HB



Figura 3.37: Controlador y motor a pasos de Parker Compumotors

una instalación sencilla y tendido de cables sin tener que cortar y volver a unir un conector (figura 3.38).

La conexión del motor al controlador debe hacerse de acuerdo a las especificaciones del fabricante ya que cuenta de varios hilos, los cuales conectados en distinto orden ofrecen una configuración de operación determinada. Para nuestra aplicación en particular y en base a las características eléctricas del motor se optó por la conexión en serie ya que, además de ser la configuración predeterminada, es la que consume menor corriente y ofrece un desempeño estable para las revoluciones que se manejan (figura 3.39). El cableado de conexión debe realizarse como se muestra (figura 3.40) cuidando de asegurar los cables ya que la desconexión de los mismos puede causar fallas en alguna de las bobinas que lo componen.

El sistema se comunica directamente a la computadora por el puerto serial o RS-232C. Aunque muchos equipos de fabricación reciente no cuentan con

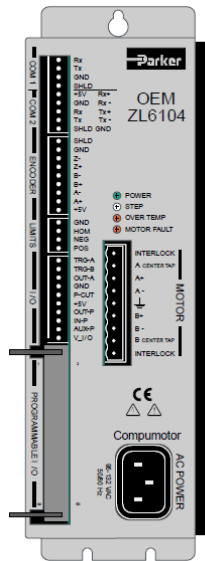


Figura 3.38: Dibujo del controlador OEMZL6104 driver/controller

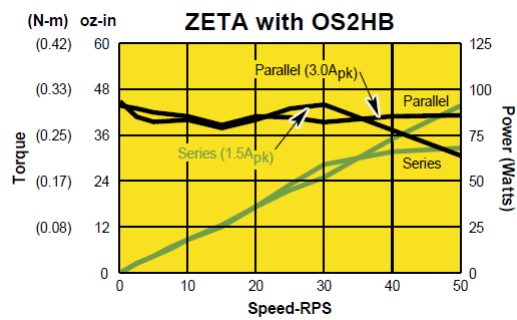


Figura 3.39: Curvas de velocidad y torque del motor

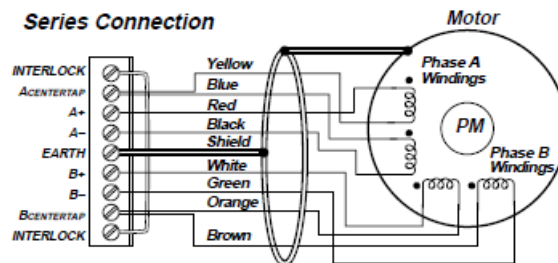


Figura 3.40: Diagrama de conexiones del motor al controlador

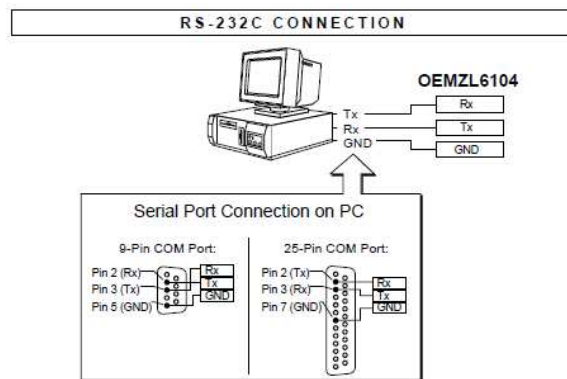


Figura 3.41: Diagrama de conexiones del puerto RS-232C del controlador a la computadora

este puerto de comunicación, se puede utilizar un adaptador de protocolo RS-232C a USB. De esta manera se puede realizar la interfaz de comunicación con la computadora haciendo uso del diagrama de conexiones que se muestra (figura 3.41).

3.5.2. Software

La configuración de inicio del motor, encoder, finales de carrera, entradas y salidas programables se realiza por medio del puerto de comunicación serial utilizando el software del distribuidor Motion ArchitectTM (figura 3.42), que trabaja en plataforma de Microsoft WindowsTM. Esta aplicación permite cambiar la configuración de fábrica del motor, donde las características de operación pueden ser modificadas a placer, como: el número de ejes participantes, el escalamiento de resolución, la velocidad y aceleración. También es posible crear y editar programas con rutinas de movimiento que incluyan entradas, salidas, finales de carrera y el encoder de posición, que pueden ser ejecutados de manera inmediata por una terminal de comunicación que tiene el mismo software. Las rutinas programadas pueden ser ejecutadas mediante una pantalla que proporciona paneles especiales de monitoreo y control tanto del motor como de las señales de entrada y salida. De esta manera el sistema tiene la opción de funcionar mediante comandos directos o con rutinas previamente programadas.

La aplicación proporcionada por el fabricante es una herramienta útil para

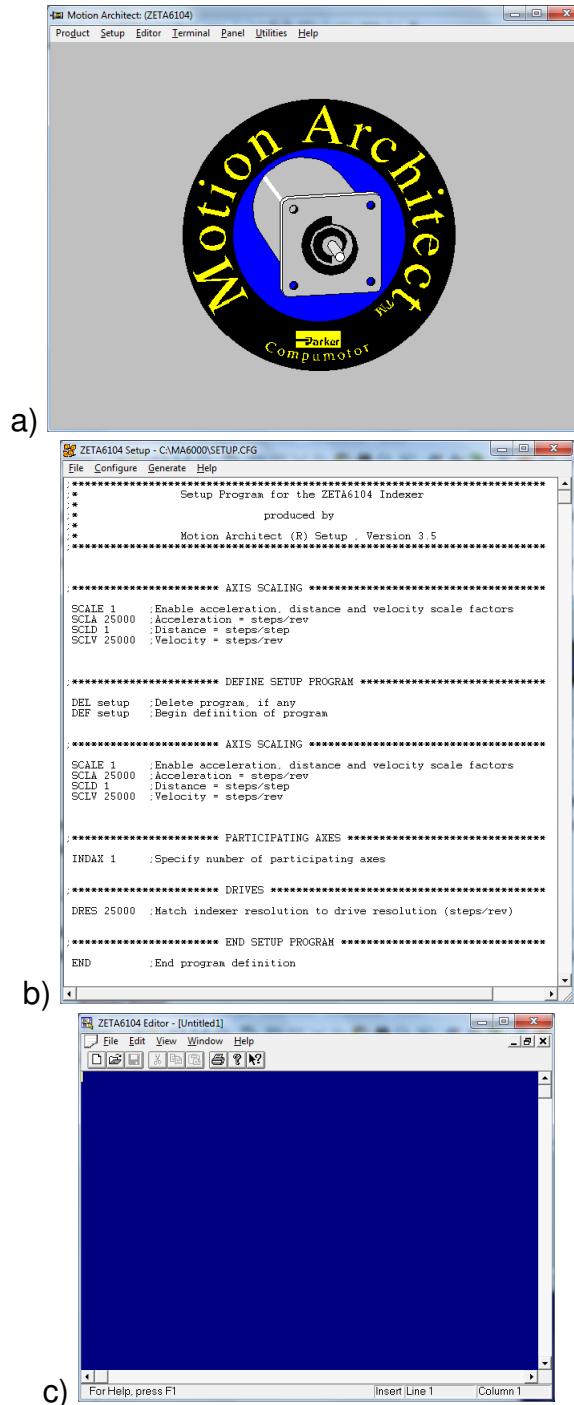


Figura 3.42: a) Pantalla de inicio del software. b) Ventana de configuración del motor. c) Editor de programas.

comprender el comportamiento y programación del motor y su controlador. Sin embargo tiene la limitante de estar diseñada para trabajar en un sistema operativo obsoleto y solo se puede utilizar en modo de comunicación serial cuando se tienen disponibles los puertos de comunicación serial de COM1 a COM4 sin opción a otros. En las computadoras actuales los puertos de comunicación inmediatos generalmente se encuentran ocupados para bus de comunicación, tarjetas de red local, inalámbrica y módem, lo cual dificulta tener libre acceso de estos puertos. También es importante considerar que mientras se utiliza esta aplicación no es posible controlar desde otra terminal el motor, por lo que es necesario crear una interfaz propia que haga independiente el control del mismo si necesidad de utilizar la aplicación proporcionada y que tenga exclusivamente las funciones necesarias.

Una manera rápida y eficaz de realizar una interfaz gráfica en la cual se puedan dar los comandos directos y ejecutar la rutinas preestablecidas por el usuario es por medio del lenguaje Visual Basic, cuya estructura dirigida por eventos, permite la creación de rutinas ejecutables mediante botones de acción y además tiene una rutina de eventos especial que permite la comunicación con el puerto serial. activando cualquiera de los puertos COM disponibles. Al generarse una aplicación ejecutable independiente en el sistema operativo, el programa permite un rápido acceso en cualquier computadora sin necesidad de tener el software del fabricante instalado.

El primer paso para el control del motor es establecer el puerto de comunicación que se usará, de acuerdo con los que se tienen disponibles en el equipo. Para este propósito la interfaz tiene un menú desplegable con la opción de seleccionar los puertos desde COM1 a COM10, el cual una vez que se encuentre establecido se abrirá automáticamente para el envío y recepción de datos desde el controlador (figura 3.43). La configuración para el puerto de comunicación es especificada por el fabricante (cuadro 3.5) y cargada de manera automática al iniciar la aplicación.

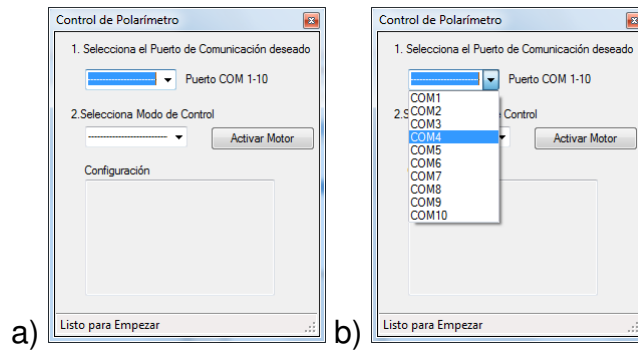


Figura 3.43: a) Configuración de inicio de la interfaz gráfica del programa de control del polarímetro b) Selección del puerto de comunicación

Configuración del Puerto	
Bits por segundo (Baud rate)	9600
Bits de datos	8
Paridad	Ninguno
Bits de parada	1
Control de flujo	Ninguno

Cuadro 3.5: Configuración del puerto de RS-232C para comunicación con el controlador de Compumotors.

Una vez abierto el puerto de comunicación deseado, se puede elegir entre hacer el control del motor de manera automática mediante rutinas de movimiento preestablecidas, o, utilizando un cuadro de texto para escribir los comandos y enviarlos como una terminal de control. Además se puede activar/desactivar el motor a voluntad para así evitar consumo de energía, calentamiento innecesario y ruido eléctrico a la cámara (figura 3.44).

En modo terminal, mediante los comandos indicados, se puede conocer el estado del sistema (motor y controlador), terminar programas en ejecución, borrar, redefinir programas, o simplemente tener un control directo del desplazamiento rotatorio del motor (figura 3.45).

El modo automático permite hacer varios ajustes, en principio de la velocidad del motor expresada en unidades o posiciones por segundo. La velocidad se escala en la configuración inicial del motor para ofrecer una resolución mayor en el movimiento, por lo que cualquier cambio angular se expresa en términos de este escalamiento. La resolución predeterminada que el controlador asigna al motor es de 25,000 unidades por revolución, lo que indica que

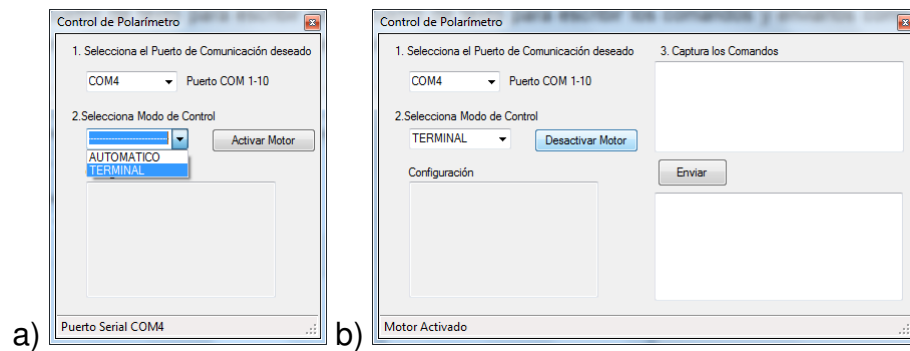


Figura 3.44: a) Selección de modo Terminal o Automático. b) Interfaz gráfica en modo terminal con motor activado.

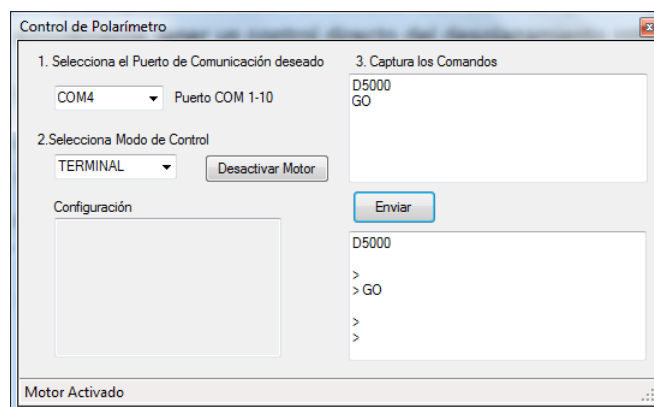


Figura 3.45: Respuesta de la interfaz gráfica en modo terminal.

para lograr un desplazamiento angular deseado se debe expresar en términos de este escalamiento. La velocidad en el software está debidamente escalada para describirse en términos de pasos por segundo (figura 3.46).

Para poder ajustar una referencia física absoluta se necesita hacer uso de la entrada de Home, en la cual el motor buscará esta posición como referencia para ubicar el resto de las posiciones angulares. La entrada se conecta a un sensor de posición normalmente abierto en espera de que la entrada se active cuando llegue a la posición de referencia. Una vez fija esta posición, se tiene la opción de marcar la posición angular a partir de la cual comenzarán a registrarse las imágenes I_0° y posteriormente las posiciones restantes con solo presionar un botón. Para regresar a un punto anterior solo es necesario presionar el botón correspondiente a la posición que se indica. Si es necesario realizar un ajuste y comenzar de nuevo con el proceso, el botón de reinicio (Reset) permite borrar las posiciones y parámetros establecidos, además de

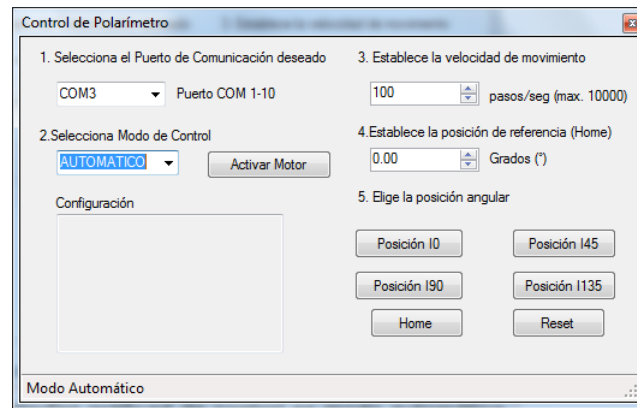


Figura 3.46: Interfaz gráfica de control en modo automático.

desactivar el motor (figura 3.47).

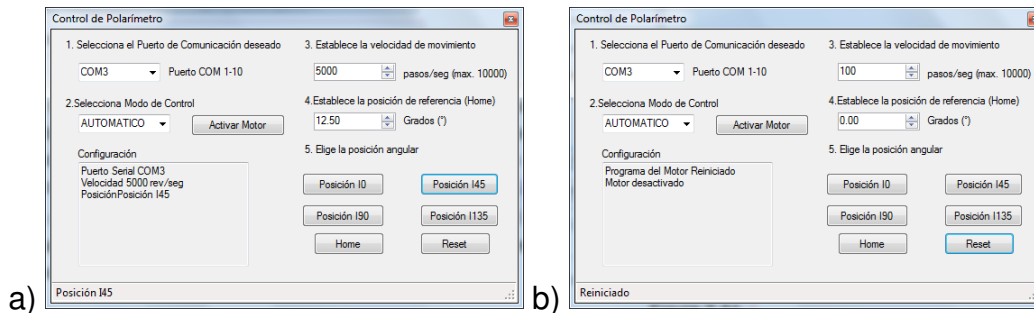


Figura 3.47: a) Interfaz de control después de seleccionar una posición. b) Interfaz de control una vez presionado el botón de Reset.

Con la implementación de esta interfaz gráfica de control es posible tener un dominio de las funciones de movimiento elementales, las cuales resultan ser suficientes para realizar pruebas experimentales en laboratorio utilizando fuentes polarizadas controladas y utilizando un CCD externo para el registro de las posiciones necesarias.

Capítulo 4

Experimentación y procesado de imágenes

El procedimiento de registro de imágenes, que se ha descrito en los capítulos previos, requiere ser de manera experimental, ya que existen factores externos que pueden interferir al momento de realizar el registro de cada posición fija. La calibración básica del instrumento depende de varios factores como lo son: el detector que se utilizará para el registro (principalmente), la naturaleza de las fuentes que se van a medir y la posición angular de referencia. Idealmente pruebas de calibración y movimiento deben realizarse con el instrumento acoplado y funcionando, sin embargo, es de imperiosa necesidad realizar un proceso experimental previo para descartar errores sistemáticos, como la calibración del grado de polarización que pudiera introducir el instrumento, debidos al control del mismo y evitar tener que desmontarlo para corregirlos.

4.1. Registro de imágenes polarizadas

Con el objetivo de conocer a fondo el sistema e implementar un proceso de registro aceptable de imágenes, sin la necesidad de contar con un telescopio, se decidió simular el proceso que seguiría el polarímetro una vez montado. En principio y como ya se explicó, en la sección 3.2, el polarímetro está diseñado para operar en un rango espectral de 1 a 10 μm limitado por el polarizador, lo cual provoca que el proceso de registro una vez montado al telescopio, sea

diferente al que seguiría un polarímetro en el interalo visual, pues es necesario obtener imágenes ligeramente desplazadas entre toma y toma (dithering) para reducir la radiación infrarroja espuria. Sin embargo, este efecto se corrige mediante la reducción astronómica estándar que involucra la combinación de las imágenes con “dithering” espacial para finalmente obtener una imagen definitiva y lista para el análisis polarimétrico.

El número de imágenes registradas será una función del tiempo de exposición, el número de desplazamientos por “dithering”, los filtros que se desean utilizar y las cuatro posiciones angulares necesarias para obtener los parámetros de Stokes. La eficiencia en el tiempo de captura de esta etapa solo puede ser optimizada una vez que el polarímetro sea probado en laboratorio y montado al telescopio con CANICA. Una vez que las imágenes en formato de origen se integran y reducen, corrigiendo el cielo y campos planos, se procede a realizar el análisis polarimétrico, donde se procede a obtener los datos de intensidad y orientación angular de las estrellas estándares de calibración que se hayan elegido, registrando únicamente un juego de cuatro imágenes correspondientes a la intensidad normalizada en 0.0° , 22.5° , 45.0° y 67.5° (figura 4.1).

Con este juego de imágenes se procede a obtener los parámetros de Stokes, donde Q y U , serán determinados utilizando la diferencia entre las intensidades de dos pares de imágenes como se describe en las ecuaciones 2.3.6 y 2.3.7 pero recordando que el uso del retardador involucra un ángulo medio (ecuaciones 4.1.2 y 4.1.3). A diferencia de Q y U , para obtener un valor más preciso del parámetro I en lugar de utilizar los valores de dos imágenes, como comúnmente se haría, se calcula utilizando las intensidades obtenidas en las cuatro imágenes (ecuación 4.1.1).

$$I = \frac{(I_{0^\circ} + I_{45^\circ} + I_{22.5^\circ} + I_{67.5^\circ})}{2} \quad (4.1.1)$$

$$Q = I_{0^\circ} - I_{45^\circ} \quad (4.1.2)$$

$$U = I_{22.5^\circ} - I_{67.5^\circ} \quad (4.1.3)$$

Las imágenes resultantes dan una perspectiva del tipo de polarización lineal

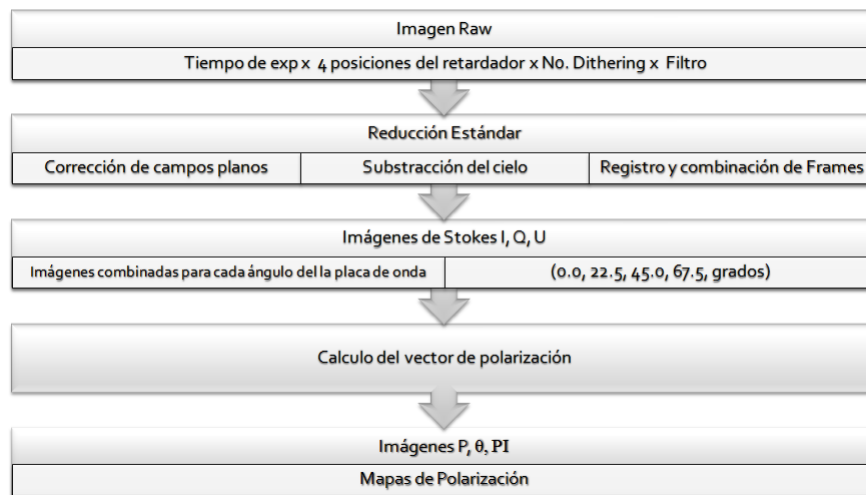


Figura 4.1: Diagrama de flujo del proceso de obtención y procesamiento de imágenes polarimétricas.

que se tiene en determinadas regiones de la imagen pero no se puede inferir algo hasta que se realiza el cálculo del vector de polarización teniendo cuidado de corregir los ángulos obtenidos por el co-dominio de la función arcotangente.

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (4.1.4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right) \quad (4.1.5)$$

Las imágenes resultantes proporcionan datos sobre el grado de polarización y la orientación angular a partir de la referencia. A partir de estas se puede obtener una imagen PI donde se observa con mayor intensidad las zonas con mayor grado de polarización y un mapa de vectores polarimétrico para apreciar la dirección y magnitud del mismo.

4.2. Procesamiento de imágenes de laboratorio

A pesar de que existen diferencias en el método observacional en el intervalo infrarrojo y el visual, el proceso esencial de registro de las posiciones deseadas es invariante de la longitud de onda y el procesamiento posterior a la reducción estándar de imágenes astronómicas tampoco cambia. Por lo tan-

to, si se tienen en laboratorio los elementos ópticos básicos como una fuente de luz polarizada caracterizada (en intensidad y longitud de onda), un detector apropiado (CCD de preferencia) y polarizadores o placas retardadoras, se puede realizar el experimento y obtener imágenes polarizadas en el laboratorio para realizar un procesamiento similar al que requieren las imágenes previamente reducidas.

Aunque el método de registro de imágenes utilizado por el polarímetro utiliza un polarizador lineal en conjunto con una placa de onda, se pueden obtener resultados semejantes utilizando un polarizador lineal giratorio. La finalidad principal es la de poner a prueba la obtención de los parámetros de Stokes, vectores de polarización y mapas polarimétricos a partir de los registros obtenidos en posiciones fijas.

Utilizando un láser de He-Ne a 660 nm linealmente polarizado, un polarizador lineal y una cámara con CCD se obtuvieron varios juegos de imágenes en las cuatro posiciones a un tiempo de exposición determinado. La intensidad de referencia para cada juego de imágenes se obtiene mediante un fotodetector de estado sólido (con un intervalo espectral de 400 a 1100 nm) y el láser con la orientación de su eje de polarización conocido. Los juegos de imágenes obtenidos corresponden a las posiciones de I_{0° , I_{45° , I_{90° e I_{135° con las cuales se obtienen los parámetros I , Q y U mediante operaciones similares a las indicadas por las ecuaciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3, pero cambiando a los ángulos originales por el uso del polarizador lineal y no la placa retardadora.

Para poder realizar el procesamiento de estas imágenes se creó un programa en MatLab e IDL para obtener los parámetros de Stokes correspondientes. Las imágenes de Q y U resultantes muestran en rojo las zonas donde el parámetro es mayor positivamente y en azul si es menor (figura 4.3). Una vez que se obtienen los parámetros de Stokes, se realiza el cálculo del vector y ángulo de polarización, el vector se multiplica por el parámetro I para reconocer las regiones de la fuente donde el grado de polarización es significativo. Posteriormente el algoritmo calcula el mapa polarimétrico de una región cuadrada de píxeles en cuyo centro se traza el vector de grado de polarización promedio que lo representa (figura 4.4). La región donde se traza el vector y el tamaño del mismo puede ser seleccionada a consideración para tener una mejor apreciación del campo polarimétrico (figura 4.5).

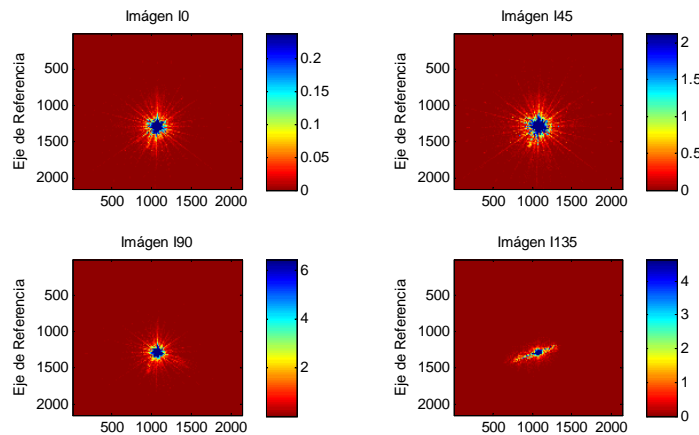


Figura 4.2: Imágenes de las cuatro posiciones angulares obtenidas en laboratorio.

4.3. Procesamiento de imágenes de fuentes astronómicas

El procedimiento antes descrito no puede ser valorado como efectivo sin antes realizar una prueba de calibración utilizando fuentes polarizadas conocidas en diversas longitudes de onda. Por lo tanto se han buscado fuentes bien conocidas y estudiadas para realizar la calibración del mapa de vectores de las imágenes que se procesan con el algoritmo desarrollado.

4.3.1. Procesamiento de fuentes en radio de ultra alta polarización

La emisión radio polarizada es un importante diagnóstico astrofísico de las condiciones físicas de las fuentes en radio. La radiación sincrotrónica es el mecanismo responsable de la emisión en radio de fuentes extragalácticas. En un campo magnético uniforme, la polarización lineal fraccionaria de radiación sincrotrónica está dada por [12]

$$\Pi = \frac{P}{I} = \frac{3 - 3\alpha}{5 - 3\alpha}, \quad (4.3.1)$$

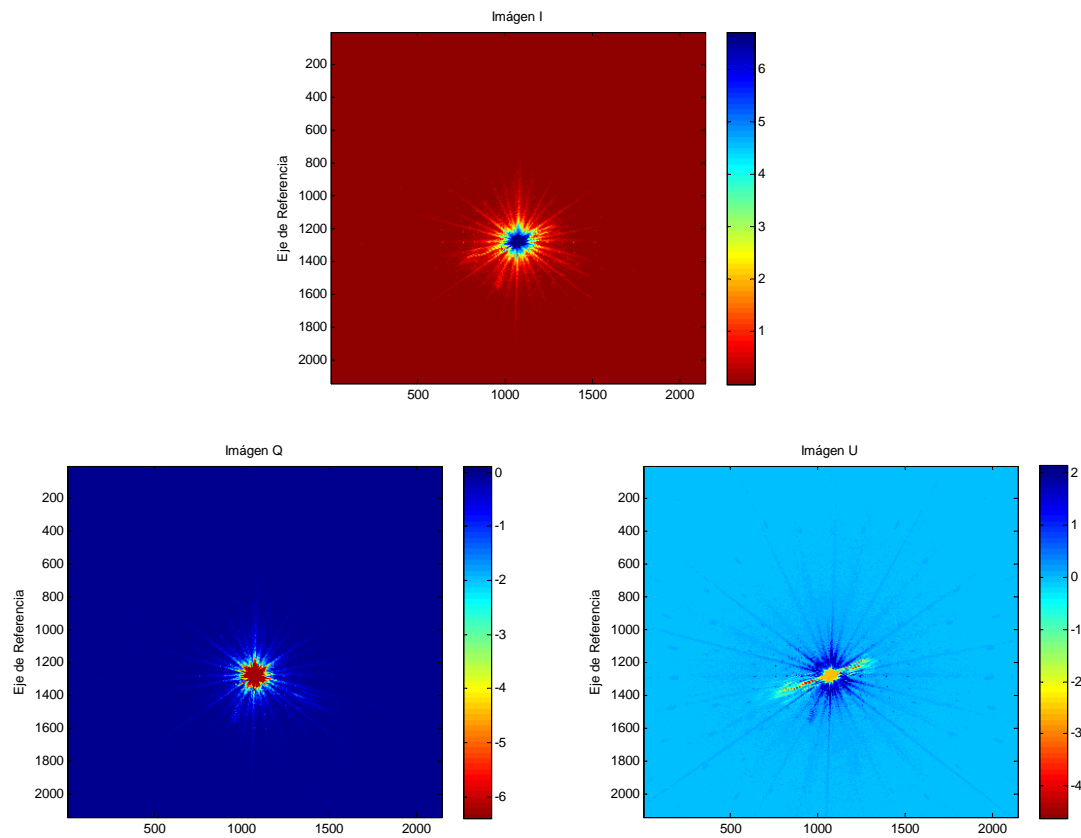


Figura 4.3: Imágenes de parámetros de Stokes I, Q y U obtenidas del procedimiento experimental con el láser He-Ne linealmente polarizado.

donde $P = \sqrt{Q^2 + U^2}$ es la polarización lineal de la densidad de flujo, Q y U son las densidades de flujo de Stokes de las dos componentes ortogonales de polarización lineal, I es la densidad de flujo integrado de Stokes y α es el índice espectral definido por $S \propto \nu^\alpha$. Por lo tanto, la radiación sincrotrónica está linealmente polarizada intrínsecamente en $\sim 60\%$ a 80% para índices espectrales α en el intervalo de 0 a -1.5 . Sin embargo, debido a efectos de depolarización, se ha observado que la mayoría de las fuentes extragalácticas en radio tienen solo un pequeño porcentaje de polarización lineal neta a través de toda la fuente y rara vez tienen un porcentaje $> 25\%$. Los efectos de depolarización independientes de la frecuencia se deben principalmente al entramado del campo magnético y los dependientes de la frecuencia son principalmente causados por la rotación de Faraday. La medida de la rotación de Faraday observada como función de λ se define como la pendiente del ángulo

4.3. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE FUENTES ASTRONÓMICAS 83

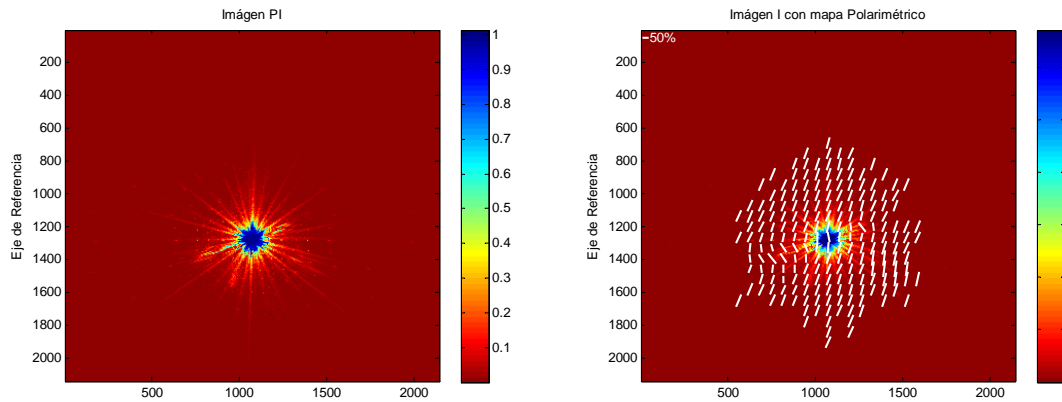


Figura 4.4: Imágenes PI y mapa polarimétrico del láser de He-Ne tomando una región de 64x64 píxeles por vector.

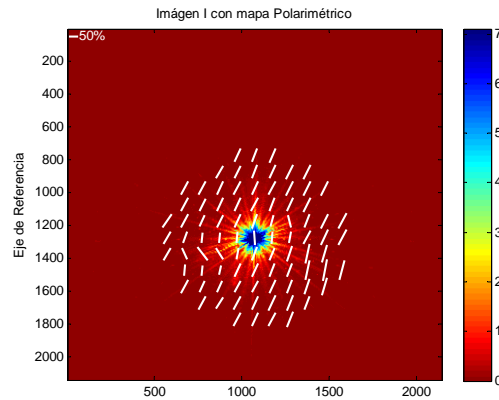


Figura 4.5: Mapa polarimétrico con vectores en regiones de 100x100 píxeles

de polarización θ contra λ^2 .

$$\theta(\lambda^2) = \theta_0 + \phi\lambda^2, \quad (4.3.2)$$

donde $\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right)$, θ_0 es la polarización intrínseca de la posición angular y ϕ es la profundidad de Faraday (Burns 1966). La rotación de Faraday interna se produce cuando el plasma radio-emisor es mezclado con el plasma térmico y siempre produce depolarización. En ausencia de rotación de Faraday interna y un haz de depolarización, la profundidad de Faraday para una fuente es igual a su medida de rotación.

La depolarización, en general, incrementa a baja resolución, a mayor an-

cho de banda de observación y a mayor longitud de onda. Se sabe muy poco sobre el origen y crecimiento de campos magnéticos en galaxias y cúmulos de galaxias, aunque recientemente se han detectado por primera vez campos magnéticos en galaxias con $z > 0.5$ (Bernet et al. 2008; Wolfe et al. 2008).

Liang et al. (2001) encontraron, por casualidad, una fuente peculiar en radio J0658.7–5559, extendida ($15 \times 4.5 \text{ arcsec}^2$) y espectralmente ultra pronunciada ($\alpha \sim -1.5$). Esta fuente se encontró con un porcentaje promedio de polarización $\sim 55\%$ a 8.8 GHz, lo cual es muy inusual para fuentes en radio y aunque aún se cuestiona su naturaleza, es casi seguro de que sea extragaláctica. Los pulsares son fuentes puntuales, a diferencia de J0658.7–5559 que es extendida. La polarización lineal promedio de las fuentes de radio extragalácticas rara vez supera el 25%, mientras que alrededor del 50% de los pulsares tiene polarización lineal $> 25\%$ (Han & Tian 1999).

Una muestra de las fuentes en radio sin resolver fue seleccionada originalmente del NVSS con un porcentaje de polarización lineal mayor del 30% para buscar nuevos pulsares y posteriormente se encontró que la mayoría de estas fuentes eran extendidas y extragalácticas [12]. Con ayuda del software de análisis desarrollado se obtuvieron imágenes de parámetros de Stokes del NVSS postage stamp service para J030212+153752, una de las fuentes ejemplo incluida en la lista final de fuente de ultra alta polarización (figura 4.6). A partir de estas imágenes se realizó el cálculo del vector de polarización y el mapa de polarización correspondiente (figura 4.7), en donde se puede observar la alta polarización que posee.

Observaciones de seguimiento de alta resolución han mostrado que los valores de polarización lineal del NVSS, para la muestra de fuentes con ultra alta polarización, son fiables en los niveles establecidos. Las fuentes ópticamente luminosas con ultra alta polarización son identificadas como AGN's radio-fuertes y sus propiedades en radio son normales y típicamente de baja potencia.

Las fuentes de alta polarización y sus contrapartes de baja polarización con características similares parecen estar en entornos locales y de línea de visión similares, por lo que la ultra alta polarización tiene que deberse a las propiedades intrínsecas de las fuentes, lo que favorece la existencia de campos magnéticos ordenados y de plasma térmico de baja densidad o baja intensidad de campo magnético en la línea de visión en la región de radio emisión.

4.3. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE FUENTES ASTRONÓMICAS 85

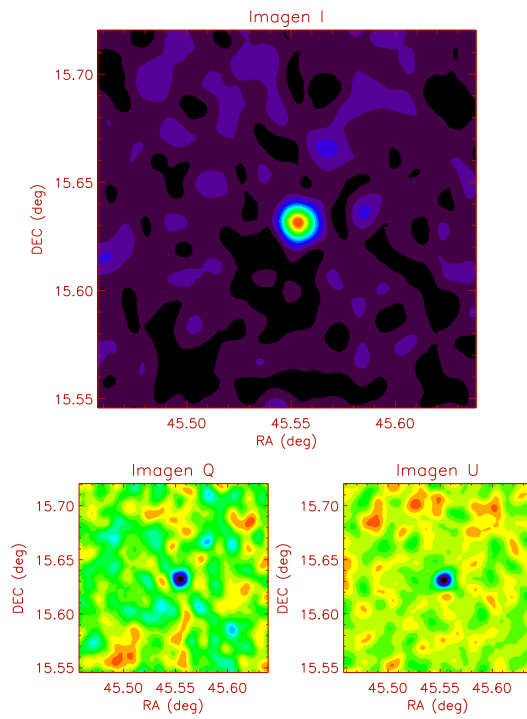


Figura 4.6: Imágenes en parámetros de Stokes de J030212+153752. Una fuente ejemplo incluida en la lista final de fuentes de ultra alta polarización, procesada por nuestro software de análisis.

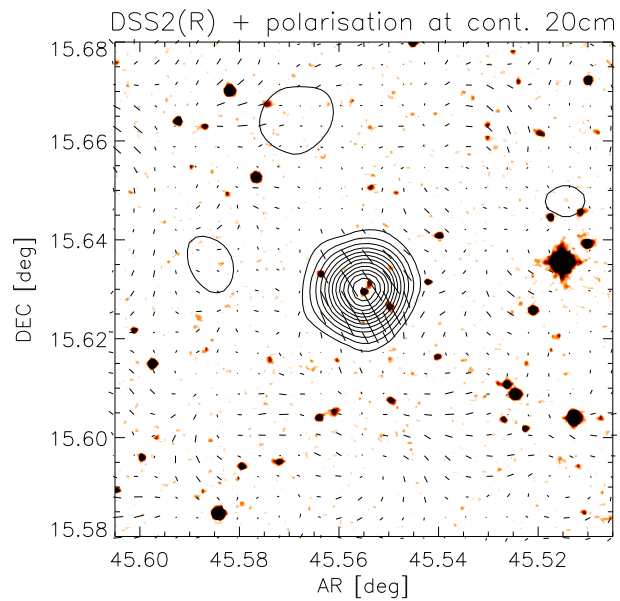


Figura 4.7: Imagen del mapa de polarización de J030212+153752

Observaciones en dos frecuencias muestran que la depolarización de Faraday interna es baja y confirma este hecho, esto podría deberse a que el campo magnético de estas fuentes se alinea preferentemente en el plano del cielo dando una baja intensidad de campo magnético en la línea de visión.

4.3.2. Nebulosa del cangrejo

Como la fuente más intensa de radiación sincrotrón en nuestra galaxia, la Nebulosa del Cangrejo (Taurus A), es un objeto astrofísico muy estudiado, es por esto que es usado con frecuencia para propósitos de calibración. El espectro de emisión del remanente de supernova A.D. 1054 ha sido muy observado durante varias décadas. El espectro en radio es conocido por presentar la ley de distribución de energía sincrotrón con un índice espectral $\beta \simeq -0.299 \pm 0.009$. Este continuo de emisión por sincrotrón parece estar decayendo a una tasa $\alpha = (-.167 \pm 0.015) \% \text{ yr}^{-1}$. A alta frecuencia, mayor de 10^4 GHz, la observación es también coherente con la emisión sincrotrónica con una ley de distribución de energía de índice espectral -0.73 .

Trabajos recientes muestran que la emisión milimétrica de la nebulosa del cangrejo tiene el mismo origen físico que la emisión sincrotrón en radio y por lo tanto se espera que esté polarizado con el mismo grado de polarización y orientación angular (Macias-Pérez, et al 2010).

En esta sección se muestra la evaluación que se hizo de la nebulosa del cangrejo utilizando nuestro software de análisis con imágenes de parámetros de Stokes obtenidas del NRAO VLA Sky Survey (NVSS) postage stamp service (figura 4.8). A partir de este conjunto de imágenes se calculó el vector de polarización y el respectivo mapa de polarización como se muestra en la figura 4.9. Aquí se realiza una comparación de las imágenes en parámetros de Stokes de la región de la Nebulosa del Cangrejo, contra la polarización resultante a 90 GHz por Aumont, et al. 2010 (figura 4.10).

4.3. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE FUENTES ASTRONÓMICAS 87

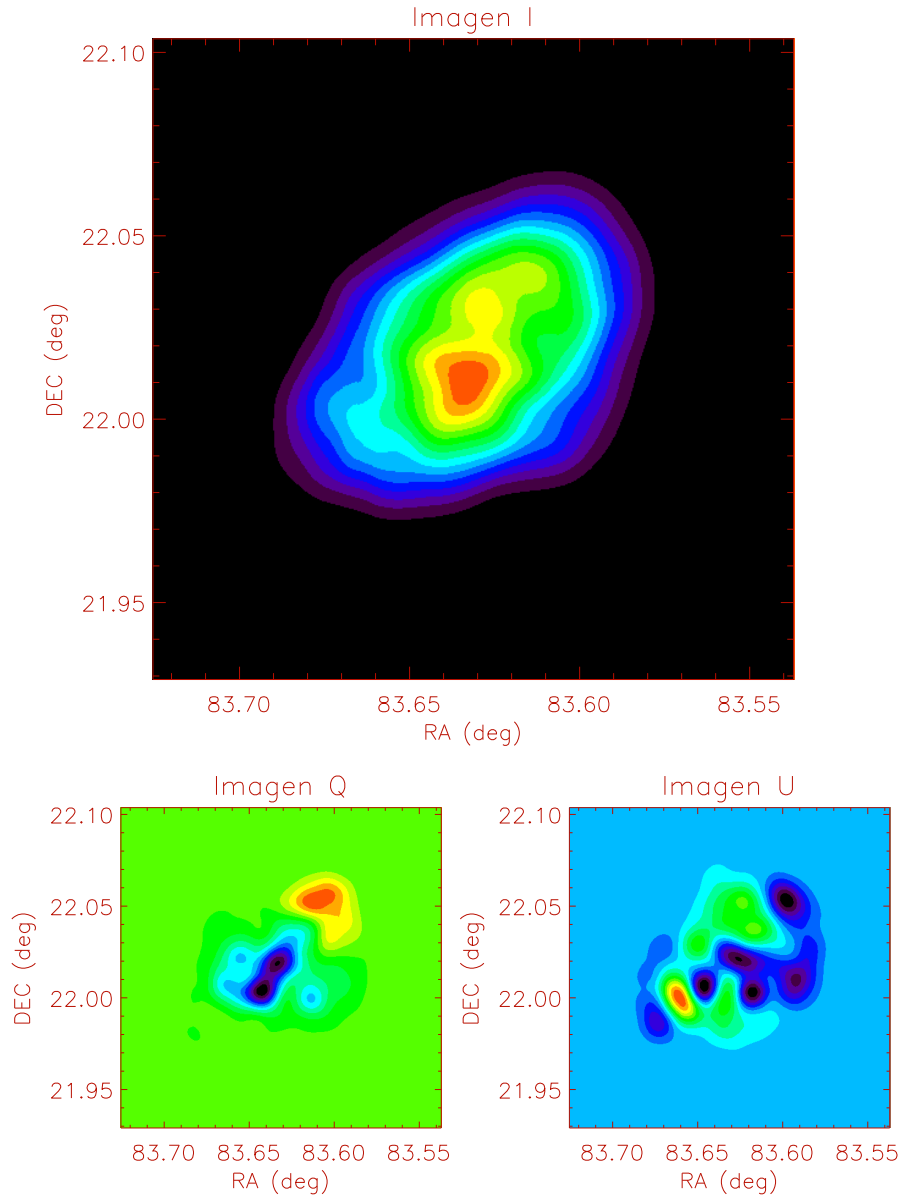


Figura 4.8: Imágenes en parámetros de Stokes I, Q y U de M1 a 1.4 GHz obtenidas por el NVSS postage stamp service y procesadas mediante nuestro software de análisis.

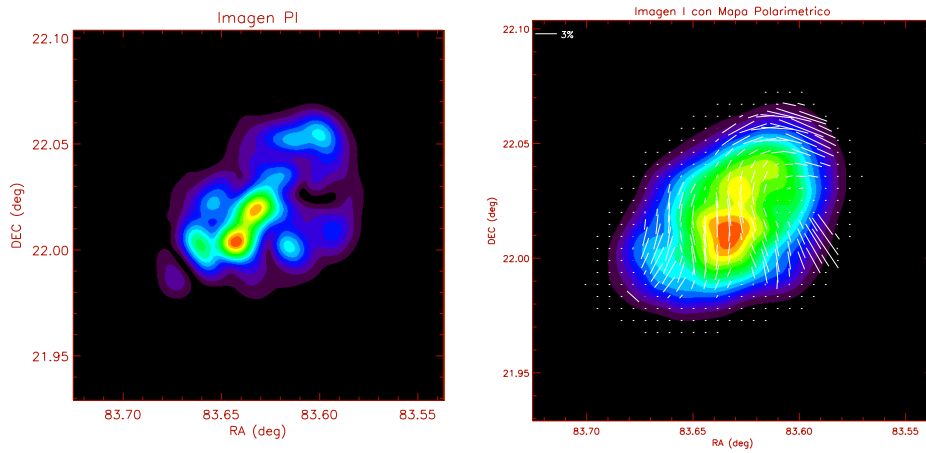


Figura 4.9: Imágenes PI y mapa de polarización de Nebulosa del cangrejo procesadas mediante nuestro software de análisis.

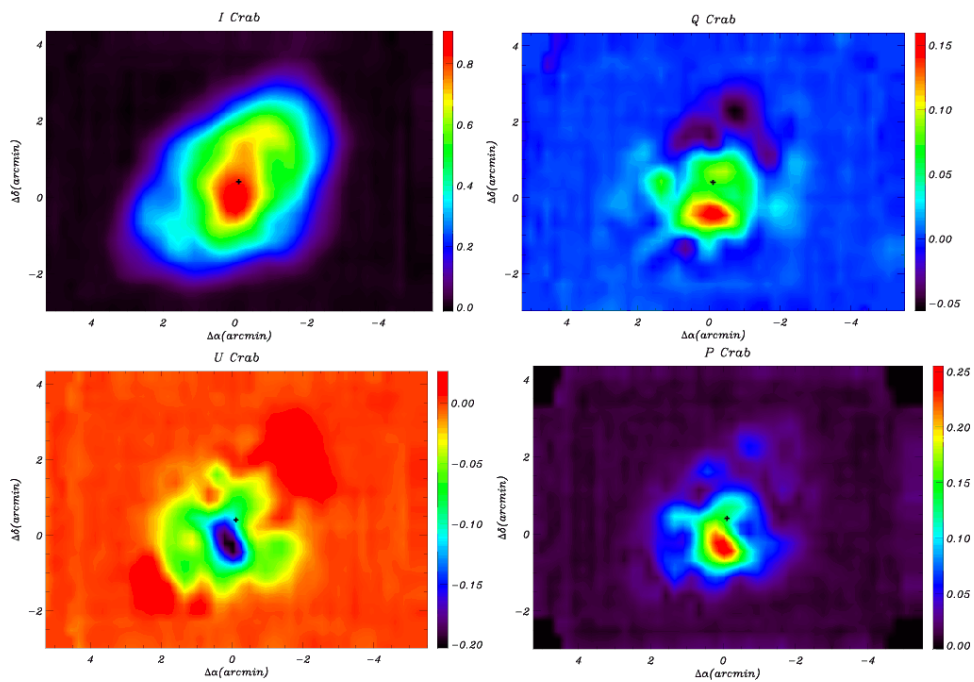


Figura 4.10: Imagen de los parámetros de Stokes a 90 GHz tomadas de Aumont, et al. 2010

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Discusión y conclusiones

Basandose en las características del telescopio Gulliermo Haro de Cananea (2.1 m) y de su instrumento CANICA, se logró diseñar un sistema polarimétrico modulador acorde al campo de visión y rango espectral de operación de la cámara. Para este modulador se tomó como modelo el método de Pickering, lo cual implica utilizar como elementos: un polarizador lineal y una placa de media onda giratoria para el registro de imágenes en cuatro posiciones.

Eligiendo cuidadosamente, se adquirió un polarizador lineal de red de alambres de tal manera que proporcionará el mejor desempeño en el rango espectral deseado, al ofrecer una alta tasa de extinción y una apertura amplia. En el caso de la placa de onda, la elección fué mas difícil, pues las placas retardadoras superacromáticas de amplia apertura no son muy accesibles y fue mandada a hacer con las dimensiones necesarias, lo cual incremento su costo y tiempo de fabricación considerablemente. Utilizando el trazado de rayos del telescopio se determinó la posición ideal para acoplar el sistema óptico modulador al telescopio y la cámara, aprovechando el espacio en el que actualmente se instala un adaptador focal.

La necesidad de tener un dispositivo que no requiera desinstalarse para usar la cámara directa, implicó la implementación de un bloque de desplazamiento lineal. Para este fin se adquirieron rieles y baleros lineales de alta precisión, anticorrosivos y sin lubricación para prolongar su tiempo de operación y evitar mantenimientos frecuentes que puedan afectar los elementos ópticos.

Como parte del diseño del sistema modulador se estableció el modulo de desplazamiento angular al adquirir un juego de rodamientos de alta precisión y el conjunto de poleas y engranes que facilitan la transmisión del movimiento a partir del motor.

Con ayuda del software de diseño mecánico se adaptó el diseño del adaptador focal para usarlo como contenedor y se realizaron los planos de construcción detallados de más de 20 partes mecánicas y los ensambles correspondientes a cada modulo del instrumento. Estos diseños permitieron la fabricación del contenedor en el taller mecánico y la elaboración de las piezas de los mecanismos de precisión en el laboratorio de diseño mecánico.

Como parte del diseño del instrumento, y con ayuda del software proporcionado por el fabricante del motor a pasos, se realizó la programación de su resolución, velocidad, aceleración y entradas externas en el controlador. Esto facilitó el control de las funciones y configuraciones programadas con una interfaz gráfica. Así la programación quedo como una aplicación independiente del software del distribuidor y tienen la opción de manejarse de manera automática o como una terminal de control directo.

El desarrollo experimental del proceso de registro de imágenes provenientes de una fuente polarizada conocida permitió aprender más sobre las rutinas de observación posibles y los factores de calibración que pueden presentarse en telescopio. Mediante el algoritmo de procesamiento, fue posible obtener imágenes en parámetros de Stokes a partir de las imágenes registradas en las posiciones asignadas de un montaje de laboratorio. Posteriormente al obtener el despliegue de los vectores polarimétricos se pudo hacer una calibración de los mismos para que queden en proporción a la imagen y su interpretación sea más fácil.

El uso de fuentes astronómicas conocidas permitió la calibración del despliegue de mapas polarimétricos en cualquier longitud de onda, ya que al utilizar las imágenes en parámetros de Stokes de la nebulosa del cangrejo y de las fuentes con ultra alta polarización se puede hacer una comparación del resultado y descartar errores de interpretación por el programa.

5.2. Trabajo futuro

Actualmente las partes mecánicas que integran los módulos internos del polarímetro se encuentran en las etapas finales del proceso de manufactura en el laboratorio de diseño mecánico. Una vez terminadas las piezas, se procederá al ensamble de las partes, instalando todos los elementos ópticos y electrónicos que componen el prototipo. Se determinarán los límites de movimiento de la parte giratoria y las pruebas electrónicas del motor controlado por la interfaz que se diseñó.

Una vez realizadas estas pruebas se implementará en laboratorio el proceso de obtención de imágenes, con varias fuentes polarizadas para demostrar el funcionamiento del instrumento en fuentes puntuales y en regiones extendidas. Las imágenes serán procesadas con el algoritmo descrito anteriormente, de esta manera será posible optimizar las operaciones que realiza y hará más fácil su uso para investigaciones futuras.

Después de haber calibrado el instrumento en laboratorio y en cuanto se tenga disposición del telescopio, se dispondrá a montarlo haciendo el ajuste focal que el nuevo contenedor tiene respecto a la cámara y se ajustará la posición de orientación absoluta para establecer la posición de referencia para las imágenes obtenidas. También es necesario la implementación de un nuevo software de operación semejante al que actualmente controla a CANICA, con la opción de utilizar el modo polarimétrico o cámara directa. Este algoritmo debe ser optimizado a fin de encontrar una rutina de observación eficiente considerando que para el modo polarimétrico se requiere de una captura de 4 posiciones angulares en cada ciclo de "dithering". El objetivo será experimentar con diferentes rutinas hasta encontrar la que en general ahorre tiempo y tenga menos problemas de ruido debido al movimiento del telescopio. Para este objetivo las estrellas estándares de calibración serán las ideales para lograr optimizar el instrumento.

Con un telescopio operativo y el instrumento calibrado, las capacidades observacionales con CANICA serán definitivamente más extensas, pues permitirá obtener la información de polarización de objetos de interés, como las fuentes FERMI, las propiedades de granos de polvo que causan dispersión y absorción en varios ambientes como los de las regiones de formación estelar, estrellas de tipo tardío y remanentes de supernova.

Índice de figuras

1.1. Curvas de Intensidad demostrando la ley de desplazamiento de Wien a diferentes temperaturas dentro del intervalo infrarrojo. Aquí se muestra el máximo de las bandas J, H y K del infrarrojo cercano.	10
2.1. Elipse de polarización con su eje mayor desplazado un ángulo θ del marco de referencia. El valor de $\tan \beta$ corresponde a la relación entre el eje menor y mayor de la elipse [1].	17
2.2. Representación esquemática de los parámetros de Stokes Q, U y V [1].	18
2.3. Efecto del retardador de cuarto de onda.	26
2.4. Efecto del retardador de media onda	26
2.5. Rotación de un polarizador en un ángulo positivo θ respecto al marco de referencia Q	30
3.1. Fotografía de CANICA con el adaptador sujeto al guiador del telescopio de 2.1 m en Cananea, Sonora.	39
3.2. Diseño del telescopio de 2.1 m en el editor de lentes de Zemax .	40
3.3. a) Trazado de rayos del telescopio de 2.1 m con Zemax b) Acercamiento de la pupila imagen.	40
3.4. Posición de la placa de onda a partir del trazado de rayos.	41
3.5. Diagrama esquemático del polarímetro acoplado a CANICA y al telescopio.	42
3.6. Polarizador holográfico lineal SPECAC.	42
3.7. Placa retardadora superacromática de media onda. B. Halle . . .	44
3.8. Desviación prismática y distorsión de frente de onda de la placa retardadora de media onda	44

3.9. a) Dibujo de la brida de sujeción a CANICA b) Dibujo de la brida de sujeción a la platina del telescopio	45
3.10. Esquema que indica la ubicación de las bridas de sujeción y la platina del telescopio.	46
3.11. Diagrama esquemático de la remoción del polarímetro (perpendicular al eje óptico).	47
3.12. a) Modelo del raíl con soporte b) Modelo del bloque de soporte con balero lineal c) Modelo del tope para rieles.	47
3.13. a) Modelo del rodamiento de contacto angular RHP b) Esquema del rodamiento.	48
3.14. a) Modelo del piñón con la polea b) Plano del piñón y corona c) Plano de la polea	49
3.15. Calculadora de longitud para poleas	49
3.16. Diseño del contenedor del polarímetro	50
3.17. Diseño de la brida que va al telescopio	51
3.18. Diseño de la brida a CANICA	51
3.19. Diseño de las placas de sujeción. Las placas a con c y b con d son caras opuestas del contenedor.	52
3.20. Ensamble de la caja de sujeción.	52
3.21. Fotografía del adaptador contenedor del polarímetro.	53
3.22. a) Modelo del raíl McMaster, b) Modelo del final de carrera, . . .	53
3.23. a) Vista explosionada del subensamble, b) Subensamble completo de la brida con rieles.	54
3.24. a) Balero lineal de McMaster, b) Asidera para la platina, c) Platina del polarímetro, d) Modelo del polarizador lineal Specac. . . .	55
3.25. a) Vista explosionada del subensamble, b) Sub-ensamble completo de la Platina con el polarizador y baleros	56
3.26. a) Modelo del Retardador de media onda Bernhard Halle, b) Tubo contenedor del retardador, c) Anillo de seguridad del retardador.	57
3.27. a) Vista explosionada del subensamble, b) Vista completa del subensamble, c) Corte transversal del subensamble del tubo contenedor del retardador.	58
3.28. a) Balero RHP de contacto angular, b) Caja soporte del Balero 1, c) Caja soporte del Balero 2, d) Anillo sujetador de los baleros, e) Corona PIC-Design de 60 dientes.	59

3.29. a) Subensamble completo, b) Vista explosionada del subensamble, c) Corte transversal del subensamble del mecanismo del retardador.	60
3.30. a) Motor a pasos Compumotors, b) Base de sujeción del motor, c) Soporte de sujeción del motor, d) Piñón PIC-Design de 10 dientes.	61
3.31. a) Vista explosionada del subensamble, b) Subensamble completo del motor con su base.	62
3.32. a) Vista explosionada del subensamble, b) Subensamble completo de: Mecanismo del retardador, Motor con base y Platina, baleros y polarizador.	63
3.33. a) Vista explosionada del subensamble, b) Subensamble completo de la Chumacera para el seguro.	64
3.34. a) Vista explosionada del subensamble, b) Subensamble completo del seguro para la platina.	64
3.35. Vista explosionada de la caja de sujeción con el seguro para la platina.	65
3.36. a) Vista explosionada del ensamble, b) Ensamble final del Polarímetro	66
3.37. Controlador y motor a pasos de Parker Compumotors	68
3.38. Dibujo del controlador OEMZL6104 driver/controller	69
3.39. Curvas de velocidad y torque del motor	69
3.40. Diagrama de conexiones del motor al controlador	69
3.41. Diagrama de conexiones del puerto RS-232C del controlador a la computadora	70
3.42. a) Pantalla de inicio del software. b) Ventana de configuración del motor. c) Editor de programas.	71
3.43. a) Configuración de inicio de la interfaz gráfica del programa de control del polarímetro b) Selección del puerto de comunicación	73
3.44. a) Selección de modo Terminal o Automático. b) Interfaz gráfica en modo terminal con motor activado.	74
3.45. Respuesta de la interfaz gráfica en modo terminal.	74
3.46. Interfaz gráfica de control en modo automático.	75
3.47. a) Interfaz de control después de seleccionar una posición. b) Interfaz de control una vez presionado el botón de Reset.	75

4.1. Diagrama de flujo del proceso de obtención y procesamiento de imágenes polarimétricas.	79
4.2. Imágenes de las cuatro posiciones angulares obtenidas en laboratorio.	81
4.3. Imágenes de parámetros de Stokes I, Q y U obtenidas del procedimiento experimental con el láser He-Ne linealmente polarizado.	82
4.4. Imágenes PI y mapa polarimétrico del láser de He-Ne tomando una región de 64x64 pixeles por vector.	83
4.5. Mapa polarimétrico con vectores en regiones de 100x100 pixeles	83
4.6. Imágenes en parámetros de Stokes de J030212+153752. Una fuente ejemplo incluida en la lista final de fuentes de ultra alta polarización, procesada por nuestro software de análisis.	85
4.7. Imagen del mapa de polarización de J030212+153752	85
4.8. Imágenes en parámetros de Stokes I, Q y U de M1 a 1.4 GHz obtenidas por el NVSS postage stamp service y procesadas mediante nuestro software de análisis.	87
4.9. Imágenes PI y mapa de polarización de Nebulosa del cangrejo procesadas mediante nuestro software de análisis.	88
4.10. Imagen de los parámetros de Stokes a 90 GHz tomadas deumont, et al. 2010	88

Índice de cuadros

2.1. Representaciones de los vectores de Stokes [2]	18
3.1. Características principales de CANICA	38
3.2. Propiedades del Polarizador holográfico lineal de CaF_2	43
3.3. Algunas características del rodamiento RHP 7916C	48
3.4. Algunas características eléctricas y mecánicas del motor OS2HB	68
3.5. Configuración del puerto de RS-232C para comunicación con el controlador de Compumotors.	73

Bibliografía

- [1] D. Clarke, "Stellar Polarimetry", Wiley-VCH, 2010.
- [2] J. Tinbergen, "Astronomical Polarimetry", Cambridge University Press, 1996.
- [3] K. Serkowski, "Methods of Experimental Physics Vol. 12: Astrophysics", Part A, N. Carleton, Ed., Academic Press, 1974, p. 361.
- [4] K. Serkowski, "Advance in Astronomy and Astrophysics Vol. 1", Polarization of Starlight, Z. Kopal, Ed., Academic Press, 1962, p. 289
- [5] J. Frecker, K. Serkowski, "Linear Polarimeter with rapid modulation, achromatic in the 0.3–1.1- μm range," Appl. Opt. 15, 605-606 (1976)
- [6] E. Hecht, "Optics 4th Edition", Addison-Wesley, 2002.
- [7] R. Kandori, N. Kusakabe, M. Tamura, Y. Nakajima, T. Nagayama, C. Nagashima, J. Hashimoto, J. Hough, S. Sato, T. Nagata, A. Ishihara, P. Lucas, M. Fukagawa, "SIRPOL: a JHKs-simultaneous imaging polarimeter for the IRSF 1.4-m telescope", SPIE, Volume 6269, pp. 626951, 2006.
- [8] T. Nagayama, C. Nagashima, Y. Nakajima, T. Nagata, S. Sato, H. Nakaya, T. Yamamuro, K. Sugitani, M. Tamura, "SIRIUS: A near infrared simultaneous three-band camera", Proceedings of the SPIE, 4841-51, 2002
- [9] D. P. Clemens, D. Sarcia, A. Grabau, E. V. Tollestrup, "Mimir: A Near-Infrared Wide-Field Imager, Spectrometer, and Polarimeter", PASP, 119, 1385–1402, 2007

- [10] J.F Macías-Pérez, F. Mayet, J. Aumont, and F.-X Désert, “Global Spectral Energy Distribution of the Crab nebula in the Prospect of the Planck Satellite Polarization Calibration”, *ApJ*, 711,2010,417.
- [11] J. Aumont, L. Conversi, C. Thum, H. Wiesemeyer, E. Falgarone, J. F. Macías-Pérez, F. Piacentini, E. Pointecouteau, N. Ponthieul, J. L. Puget, C. Rosset, J. A. Tauber and M. Tristram, “Measurements of the Crab nebula polarization at 90 GHz as a calibrator for CMB experiments”, *A&A*, Volume 514, 2010.
- [12] H. Shi, H. Liang, J. L. Han and R. W. Hunstead, “Radio sources with ultra-high polarization”, *MNRAS*, 409, 821–838, 2010.
- [13] E. Recillas, L. Carrasco, and G. A. Escobedo, “NIR Studies of HII Galaxies with CANICA”, *RevMexAA (Serie de Conferencias)*, 24, 45-47, 2005.
- [14] A. Chevalier, “Dibujo Industrial”, Editorial Limusa, 2005.
- [15] Parker Hannifin Corporation, Compumotor Division, “6000 Series Programmer’s Guide”, 1997, <http://www.parkermotion.com/manuals>
- [16] Parker Hannifin Corporation, Compumotor Division, “ZETA6104 Installation Guide”, 1997, <http://www.parkermotion.com/manuals>
- [17] Specac, “Holographic Polarizer Datasheet”, <http://www.specac.com>
- [18] Bernhard Halle Nachfl, “Superachromatic Quartz and MgF2 Retarders Datasheet”, http://www.b-halle.de/EN/Downloads/Superachromatic_Quartz_and_MgF2_Retarders.pdf