



INAOE

Actualización y caracterización del espectrógrafo de alta resolución Ebert-Fastie del OAGH

por

Joannes Bosco Hernández Águila

Tesis sometida como requisito parcial para
obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ASTROFISICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

Diciembre 2007

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Raúl Mújica García, INAOE

Dr. Miguel Chávez Dagostino, INAOE

Dr. Octavio Cardona Núñez, INAOE

© INAOE 2007

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



Resumen

Se presenta el proceso de actualización y caracterización del espectrógrafo de alta resolución Ebert-Fastie del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH) de Cananea, Sonora, desde que se comenzó a recopilar información sobre sus antecedentes y su diseño, hasta que se obtuvieron los primeros espectros de prueba de objetos estelares con el telescopio de 2.1m del OAGH, con la finalidad de caracterizar el espectrógrafo.

Después de realizar un diagnóstico óptico y electromecánico de todo el instrumento, se determinaron los pasos a seguir para la entrada en operación del sistema y la realización de pruebas. Los resultados de los procedimientos anteriores fueron la primera observación, después de la última prueba realizada con el instrumento en 1990 en la Universidad de San Diego, de dos objetos estelares: *Arcturus* y *Vega*.

Los resultados obtenidos demuestran que el espectrógrafo Ebert-Fastie del OAGH es un instrumento que, cuando esté completamente actualizado y caracterizado, conjuntará una elevada eficiencia óptica con una alta estabilidad mecánica y térmica, siendo un instrumento de alta resolución muy deseable para el estudio de diferentes tipos de objetos astronómicos, con la única posible restricción de su brillo aparente.

Abstract

We present the upgrading process and characterization of the high resolution spectrograph Ebert-Fastie of the Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), at Cananea, Sonora, from the compilation of information of its antecedents and design, until the observation of the first test spectra of stellar objects with the 2.1m telescope of the OAGH. These spectra were used to characterized the spectrograph.

After making an optical and electromechanical diagnosis of all the spectrograph, we determined the steps to follow in order to put into operation the system and to carried out some tests. As the result of this procedure, the first observations (after the last test made with the instrument in 1990, at San Diego University) of two stellar objects were obtained: *Arcturus* and *Vega*.

The results obtained demonstrate the Ebert-Fastie spectrograph of the OAGH is an instrument that, when completely upgraded and characterized, will combine a high optical efficiency with a high mechanical and thermal stability, being a high-resolution instrument extremely useful for the study of different types of astronomical objects, with the only possible restriction of its apparent brightness.

Agradecimientos

La presente tesis se logró gracias a la colaboración de instituciones y personas que aportaron fondos económicos, disponibilidad para realizar trámites administrativos y generosidad para compartir conocimientos y experiencias personales.

A todos ellos mi agradecimiento:

Al CONACyT, por la beca económica con número de registro 191257

Al INAOE y a la Coordinación de Astrofísica, por todo lo que aportaron para realizar los estudios de maestría y esta tesis

A los Dres. Raúl Mújica, Miguel Chávez y Octavio Cardona, por creer siempre en la posibilidad de este proyecto, demostrándolo con la paciencia mostrada durante todo este trayecto y el tiempo y los consejos dados en cada momento que fueron necesarios.

A los Dres. José Ramón Valdés, Emanuele Bertone y Carlos Treviño, por el tiempo dedicado a leer esta tesis y los comentarios realizados para mejorarla.

A todo el personal del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro de Cananea, Sonora, con quien se tuvo oportunidad de convivir durante varios meses, por las facilidades otorgadas para realizar el presente trabajo. El agradecimiento es muy especial hacia el Ingeniero Javier Martínez Carranza y el Ingeniero y M.A. Luis Fernando Villalobos, por el tiempo y los conocimientos dedicados particularmente a este trabajo, pero principalmente por su amistad y por el tiempo y las experiencias personales compartidas.

De igual modo, mi más sincero agradecimiento al Dr. Daniel Sacramento Solano durante su estancia en el observatorio, quien aportó mucho de su tiempo y de sus

conocimientos para que el espectrógrafo Ebert-Fastie funcionara de nuevo, y en Puebla a la Dra. Perla Carolina García, quien compartió sus conocimientos con una paciencia y generosidad que admiro.

De manera singular, agradezco a los Sres. Fernando Hernández Landini y María del Carmen Águila, y a María José Hernández, quienes junto con Filiberto Hueyotl y Gloria Delgado han compartido conmigo momentos trascendentes de su vida, unos desde antes de comenzar este proyecto y otros a partir de entonces, pero junto a quienes, hasta ahora, he intentado ser mejor humano.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	¿Por qué espectroscopía de alta resolución?	1
1.2	Antecedentes	4
1.3	Características de un espectrómetro tipo Ebert-Fastie	4
1.4	El espectrógrafo de alta resolución Ebert-Fastie del OAGH	8
1.4.1	Diseño y funcionamiento	8
1.4.2	El haz de fibras ópticas	11
1.4.3	El detector CCD	12
1.4.4	Desempeño óptico	13
1.5	Diagnóstico	15
1.5.1	Elementos concernientes a la óptica del instrumento	17
1.5.2	Elementos no pertenecientes directamente a la óptica del instrumento	17
1.5.3	Elementos del instrumento relacionados a su acoplamiento con el telescopio	18
1.5.4	Diagnóstico óptico	19
1.5.5	Electromecánico	20

1.6	Justificación y objetivos	21
2	Proceso de actualización	25
2.1	Solución de la óptica del espectrógrafo	25
2.1.1	Prueba de las fibras	25
2.1.2	Alineado	26
2.1.3	Prueba final de alineado	33
2.2	Solución electromecánica	34
2.2.1	Establecimiento provisional	34
2.2.2	Características de los motores del espectrógrafo	35
2.2.3	Módulos de control	37
2.2.4	Software de control	38
2.3	Maquinado del soporte del haz de fibras	39
2.3.1	Apuntado de objetos estelares	41
3	Primeras observaciones	47
3.1	Primera prueba de observación	47
3.1.1	Prueba de centrado de objetos puntuales	47
3.1.2	Enfoque de las fibras ópticas	48
3.1.3	Primera imagen del espectrógrafo	50
3.2	Desarrollo posterior de las observaciones	53
3.2.1	Verificación del alineado y del plano focal del espectrógrafo . . .	54
3.2.2	Obtención de imágenes	54
4	Resultados	61

4.1	Primeros resultados	61
4.2	Comparación cualitativa con espectros	62
4.3	Comparación con otros espectrógrafos del OAGH	67
A	Principios básicos de la espectroscopía	75
A.1	Generalidades de los instrumentos espectrales	75
A.2	Dispersión y poder de resolución espectral	77
A.3	Rejillas de difracción	79
A.3.1	Órdenes de difracción	81
A.3.2	Intervalo espectral libre	82
A.3.3	Dispersión angular y poder de resolución	82
A.4	Espectrómetros de rendija	83
B	Motores de pasos	87
B.1	Principio de operación	88
C	Hoja de datos del módulo de control PANT HE-232-DE	91
D	Software de control	95

Capítulo 1

Introducción

1.1 ¿Por qué espectroscopía de alta resolución?

La espectroscopía es una técnica básica en el estudio de la física de todos los tipos de objetos celestes, basada en el resultado de la interacción de la radiación con la materia. La información que se obtiene con ella es mucho mayor que con la fotometría, aportando básicamente tres tipos de información:

- a) Identificación de los distintos elementos presentes en los astros, y por lo tanto su composición química
- b) Determinación de las condiciones físicas del objeto (principalmente su temperatura y su densidad)
- c) Por medio del efecto Doppler, identificación de importantes indicios acerca del movimiento del objeto bajo estudio y de sus componentes

Dentro de este orden de posibilidades, la espectroscopía de alta resolución permite obtener no sólo datos más precisos, sino que, con el advenimiento de los grandes telescopios (8–10m), incrementar el área de investigación, extendiéndose el estudio de la vecindad del sistema solar y del medio interestelar y ofreciendo la posibilidad de analizar las débiles fuentes extragalácticas.

Objetos estelares. La física estelar ofrece por si sola una larga lista de fenómenos en los que la alta resolución representa una herramienta única para extraer sus propiedades. Entre los fenómenos estelares que se podrían estudiar con gran detalle, al grado de tener observaciones comparables a los datos espectroscópicos actuales de la atmósfera solar (Strassmeier et al., 2004), se encuentran los siguientes: a) las propiedades convectivas sub-fotosféricas, donde los modelos hidrodinámicos en tres dimensiones, desarrollados para predecir la localización y la profundidad de perfiles de líneas, pueden promediar sus resultados sobre el disco estelar y sobre el tiempo, y comparar estos resultados con observaciones a alta resolución con el fin de inferir las propiedades convectivas sub-fotosféricas estelares, en vez de usar parámetros sustitutos no físicos como longitud de mezclado y micro y macro-turbulencia; b) el trazado de características estelares superficiales (manchas y playas), donde las observaciones a alta resolución y a alta señal a ruido permitirían analizar los cambios en los perfiles de línea conforme rota una estrella, obteniendo mapas en dos dimensiones de su superficie, con los que se pueden investigar las variaciones respecto al tiempo de la distribución espacial de las características superficiales, conforme transcurre un ciclo magnético estelar; c) la nucleosíntesis, dado que el conocimiento de los procesos estelares internos se infiere a través del estudio de las atmósferas, y que, particularmente, la nucleosíntesis estelar y los procesos de mezclado provienen de la medida de la abundancia de elementos y sus razones, que requieren alta resolución y alta señal a ruido, sobre todo cuando se necesita resolver líneas mezcladas en regiones muy saturadas del espectro (en estrellas metálicas), y especialmente en estrellas pobres en metales, donde las líneas son muy débiles y es difícil medir su ancho equivalente de forma adecuada; d) la búsqueda de planetas extrasolares, que ha sido uno de los más grandes descubrimientos realizados en épocas recientes (Mayor & Queloz, 1995), y donde una de las técnicas más empleadas para este fin es la medida exacta de las variaciones de velocidad radial inducidas en la luz de la estrella huésped debidas al movimiento del planeta a su alrededor, técnica con la que se han detectado planetas gigantes de masa similar o mayor a la de Júpiter, y en la que, conforme se buscan planetas de masa más pequeña, se requiere cada vez

de mayor resolución y de mejor señal a ruido.

Medio interestelar. Las observaciones a alta resolución del medio interestelar proporcionan detalles sobre la cinemática, la composición química y las propiedades físicas del medio, que presenta un elevado porcentaje de material molecular contenido en nubes frías y difusas de gas y de polvo. Entre las investigaciones del medio interestelar que únicamente son accesibles con alta resolución se encuentran, por ejemplo: a) el análisis sobre el origen y los portadores de la estructura fina e hiperfina de las bandas difusas interestelares (DIBs), detectables solamente a través de espectros moleculares de rotación; b) el estudio preciso de líneas muy débiles, del orden de $m\text{\AA}$, como es el caso de las líneas de Li I, donde los resultados observados de la razón de los isótopos ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ es aún inconsistente con los modelos de evolución química de la Galaxia; c) el estudio de las supernovas y sus remanentes, donde la espectroscopía de alta resolución permite conocer las formas y las velocidades del material expandiéndose, así como las variaciones en los centroides para diferentes iones presentes en el material cuando éstos se mueven a muy altas velocidades, presentando efectos de tiempo de viaje de la luz, como se espera en materiales gaseosos expandiéndose.

Cuasares y astronomía extragaláctica. Aunque limitada históricamente a objetos brillantes y dentro de la Galaxia, con la instrumentación necesaria la espectroscopía de alta resolución puede extender su estudio a las fuentes extragalácticas débiles. Uno de los campos de estudio más singulares es el de las líneas delgadas de absorción del H I y de elementos pesados, observados en los espectros de emisión de Núcleos Activos de Galaxias, y que no han sido observados hasta ahora a alta resolución (Strassmeier et al., 2004). Estos estudios proporcionarían datos más claros sobre las llamadas regiones *damped Ly α* —posibles progenitoras de galaxias como la nuestra, o si las líneas observadas del bosque de Lyman representan verdaderas poblaciones de nubes intergalácticas, ofreciendo información fundamental sobre la química del Universo a escalas cosmológicas.

1.2 Antecedentes

El espectrógrafo tipo Ebert-Fastie fuera del plano, del OAGH de Cananea, Sonora, fue concebido dentro de un programa de colaboración entre el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y el Centro de Astronomía de Alta Resolución Angular (CHARA, por sus siglas en inglés) de la Universidad Estatal de Georgia (GSU). No sólo se esperaba que este instrumento se hallara en funcionamiento en el verano de 1988, sino que además se desempeñara como el primer gran instrumento auxiliar asociado al telescopio de 2.1m (Furenlid & Cardona, 1988) del OAGH. Entre otros objetivos, uno de sus principales era la medición de velocidades radiales con alta precisión (Cardona et al., 1990).

Sin embargo, varios factores impidieron su utilización permanente. Entre estos destacan el daño sufrido por las fibras ópticas originales que alimentan su óptica, durante los primeros manejos del instrumento, la falta de circuitos y programas de control confiables para los motores que manejan el enfoque del haz de luz a la salida de las fibras y el ángulo de inclinación de la rejilla de difracción, y la falta de protocolos claros de manejo y mantenimiento.

Eventualmente, el diseño y la adquisición de nuevos instrumentos espectroscópicos contribuyeron a que los esfuerzos realizados para alcanzar los objetivos originales del espectrómetro Ebert-Fastie no fueran suficientes, provocando su abandono y deterioro parcial, y la falta de una caracterización formal del instrumento.

1.3 Características de un espectrómetro tipo Ebert-Fastie

Los espectrógrafos del tipo Ebert-Fastie están basados en el diseño original de Hermann Ebert (Ebert, 1889), del que H. Kayser hizo referencia tiempo después de su diseño (Kayser, 1900) (Figura 1.1).

El arreglo se forma por el espejo esférico H, la rejilla plana G, de cara al espejo

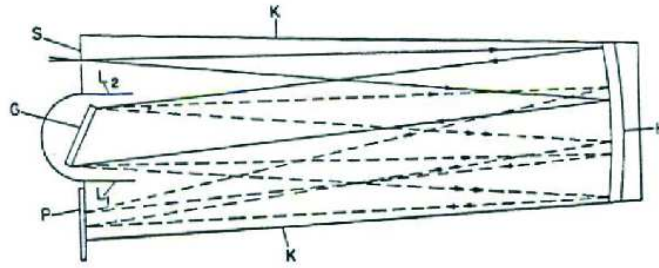


FIGURA 1.1: Reproducción del arreglo óptico de Ebert realizado por Fastie (Fastie, 1952).

y aproximadamente en su plano focal, la rendija de entrada S y el detector P aproximadamente en el plano de la rejilla, ambos dispuestos simétricamente con respecto al eje de rotación de la rejilla.

La propuesta más significativa del montaje fue la simplicidad, al requerir sólo un elemento de enfoque y ser simétrico (Fastie, 1952). La luz entra por la rendija S y se colima en la mitad superior del espejo hacia la rejilla, donde el orden correspondiente a su ángulo de inclinación es dirigido hacia la mitad inferior del espejo, que lo enfoca hacia el detector.

Sin embargo, el arreglo presenta algunos inconvenientes que no son mencionados por Ebert (Fastie, 1952). Debido al empleo de esferas fuera de eje, hay astigmatismo en las imágenes de salida, aunque esta aberración es despreciable en el centro de la rendija de salida (haciendo útil al instrumento como monocromador, tal como sugirió Ebert, aunque aparentemente no lo utilizó de esta forma (Fastie, 1952)), pero es grave en sus extremos, donde no sólo hay astigmatismo sino además pérdida de paralelismo, debido a que el espectro sufre de curvatura, sobre todo si las rendijas son largas. Por otro lado, por la disposición de las rendijas, alineadas con el eje de rotación de la rejilla, a pesar de las objeciones descritas por Kayser (Kayser, 1900), no existen rayos de luz que ingresen directamente en el detector sin haber sido dispersados en la rejilla. No obstante la simplicidad del montaje, y que el único problema grave del sistema es el astigmatismo, y además rectificable, el instrumento no fue utilizado (Fastie, 1952).

En 1952, William G. Fastie retomó el arreglo, hizo notar sus ventajas y corrigió el inconveniente rediseñándolo (Figura 1.2).



FIGURA 1.2: Arreglo óptico de Fastie (Fastie, 1952) mostrando sus componentes ópticos. M_1 es un espejo cóncavo esférico, G es una rejilla plana, B_1 y B_2 son reductores de circulación de luz, y S_1 y S_2 son las rendijas de entrada y salida en el plano focal del espejo cóncavo.

El nuevo montaje transforma el diseño en un monocromador, evita parte del astigmatismo reacomodando las rendijas al colocarlas paralelas al eje de rotación de la rejilla, de modo que al utilizar rendijas curvas a la entrada y a la salida del instrumento éstas queden *concéntricas* en relación al rayado de la rejilla (Figura 1.3), y coloca esta última delante del plano focal del espejo, permitiendo detectores de mayor tamaño (Sawyer, 1961). Instala además reductores de circulación de luz en las rendijas para evitar que luz no dispersada por la rejilla ingrese en la rendija de salida sin pasar previamente por ella, una consecuencia del reacomodo de las rendijas.

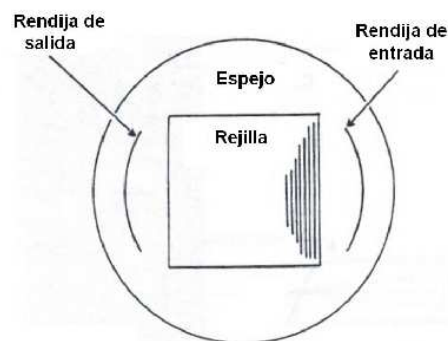


FIGURA 1.3: (Imagen modificada de Welford (1965)). Diseño de las rendijas por Fastie, para evitar el astigmatismo en la montura modificada de Ebert.

En 1963, basado en los trabajos de Ebert y de Fastie, W. T. Welford hizo notar

las dos posibilidades para la misma montura y sus distintas características (ambas utilizadas como monocromadores) (Welford, 1963): la de las dos rendijas alineadas con el eje de rotación de la rejilla (similar al arreglo original de Ebert) la describió como una montura *fuera del plano* (*off-plane*), y la de las rendijas paralelas al eje de rotación de la rejilla (que es el arreglo de Fastie), la describió como una montura *en el plano* (*in-plane*). Welford describió además las siguientes ventajas y deficiencias para ambos sistemas:

- a) En ambos sistemas, debido a la simetría, no hay coma
- b) Para ambos sistemas, aun utilizando una apertura angular lo suficientemente pequeña para no sufrir de aberración esférica, existe astigmatismo
- c) Aunque la montura en el plano puede solucionar el problema del astigmatismo utilizando un sistema de rendijas curvas concéntricas, en todos estos sistemas puede ocurrir que parte del espectro se traslape con la rejilla de difracción, dando lugar a luz esparcida
- e) Para la montura fuera del plano, que evita el problema del traslapamiento del espectro con la rejilla, no es posible obtener una imagen nítida a razones focales cortas, aun curvando la rendija de salida y la de entrada, puesto que ninguna de las dos queda concéntrica con relación al alineado de la rejilla

Para solucionar todas las desventajas anteriores, Welford propuso el empleo de un espejo parabólico en vez de esférico con un diafragma de apertura (la rejilla de difracción) en el foco y con un punto conjugado en el infinito, corrigiendo de ese modo el astigmatismo en las ecuaciones de aberraciones primarias (Welford, 1963, 1965), presentándose entonces, como única aberración, la curvatura del campo a razones focales cortas.

Sin embargo, cuando los arreglos anteriores se utilizan como espectrógrafo y no como monocromador, la curvatura del campo puede corregirse cambiando la posición

del diafragma de apertura (la rejilla) sobre el eje, alejándola del foco y colocándola a una distancia del espejo que cumpla la relación $m/r = 1/\sqrt{3}$, donde r es el radio de curvatura del espejo y m es la distancia desde el centro de curvatura a la red (Mielenz, 1964; Welford, 1965). Este último diseño es la base del espectrógrafo Ebert-Fastie del OAGH que es descrito a continuación. Aunque Welford llamó *montura Ebert-Fastie* al monocromador de rendijas de entrada y salida curvadas concéntricas (Welford, 1965), y la mayoría de las publicaciones han respetado esta denominación, al diseño realizado por Furenlid & Cardona (1988) se le denominó desde un inicio *espectrógrafo Ebert-Fastie*, por lo que de ahora en adelante se le llamará de este modo al diseño realizado por Furenlid & Cardona (1988).

1.4 El espectrógrafo de alta resolución Ebert-Fastie del OAGH

Al diseñar el espectrógrafo Ebert-Fastie del OAGH, el objetivo final fue generar un instrumento de elevada eficiencia óptica y muy alta estabilidad, operado dentro de un ambiente de temperatura controlada y con la mayoría de sus funciones ejecutadas a distancia, de acuerdo con el modo de operación del telescopio de 2.1m del OAGH (Furenlid & Cardona, 1988).

1.4.1 Diseño y funcionamiento

La elección del tipo de dispositivo la definieron los requerimientos de eficiencia y estabilidad, así como el uso de un haz de fibra óptica como entrada del instrumento y un CCD como detector (Furenlid & Cardona, 1988).

La especificación del uso de un CCD exige que la imagen generada a la salida del instrumento provenga de un campo de curvatura despreciable, debido a la superficie plana y rígida del CCD, y con aberraciones puntuales pequeñas comparadas con el tamaño de sus píxeles. El empleo de fibra óptica como medio de acoplamiento en-

tre el telescopio y el instrumento proporciona un alto grado de estabilidad mecánica y térmica, y permite que el espectrógrafo se construya como un instrumento de banco, instalado en un ambiente térmicamente estable. La eficiencia óptica se logra construyendo un instrumento con el menor número posible de elementos ópticos (Furenlid & Cardona, 1988).

Los requerimientos establecidos se cubren en su totalidad con un espectrógrafo tipo Ebert-Fastie fuera del plano, mostrado esquemáticamente en la Figura 1.4 (Furenlid & Cardona, 1988).

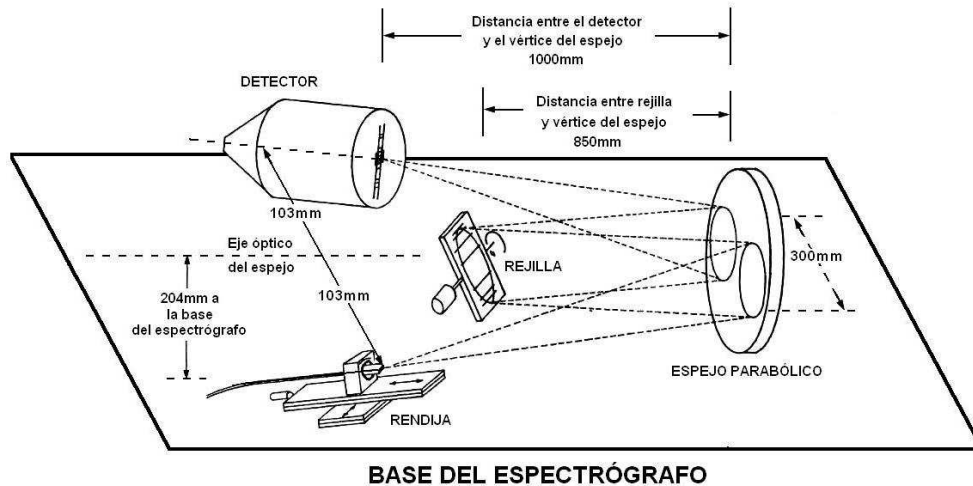


FIGURA 1.4: (Figura modificada de Furenlid & Cardona (1988)) Diseño del espectrógrafo Ebert-Fastie del OAGH (no a escala).

El diseño cuenta con sólo dos elementos ópticos: una rejilla de difracción plana, de reflexión, de 128×154 mm de área surcada y contenida en una celda metálica fabricada para este fin, y un espejo parabólico de 300 mm de diámetro, $f/3.3$ y longitud focal de 1000 mm, fabricado en vidrio Pyrex. El eje óptico del instrumento lo define el eje óptico del espejo, a 204 mm sobre la base del espectrógrafo y a 225.43 mm de las caras laterales del instrumento, definiendo un plano horizontal.

El eje de rotación de la rejilla se establece a 850 mm del vértice del espejo, haciéndolo coincidir con el surco central de las rejillas, en el nivel del plano horizontal del eje

óptico. La celda que contiene las rejillas se monta en una estación rotatoria manejada de manera remota por un motor de pasos, con el fin de cambiar la región del espectro que se enfoca en el detector. La estación acepta cualquiera de las 3 rejillas disponibles (en sus celdas correspondientes), de 1200, 400 ó 150 líneas por milímetro. El espejo se monta sobre una celda de ajuste fino que define la posición del eje óptico con una resolución de ± 0.5 segundos de arco.

El haz de fibras de alimentación tiene configuración circular a la entrada —a la salida del telescopio—, y un arreglo lineal a la salida que actúa como la rendija de entrada del instrumento, a 103mm del eje óptico y aproximadamente a 1000mm del vértice del espejo. La luz que ingresa viaja aproximadamente como un haz $f/8$ hacia la mitad correspondiente del espejo, manteniendo el rayo principal sobre el plano horizontal en el nivel del eje óptico. La primera reflexión sobre el espejo colima el haz de luz hacia la rejilla de difracción, que a su vez lo refleja dispersado en la dirección vertical (a menos que la rejilla esté en el orden cero) hacia la mitad opuesta del espejo, que enfoca la luz hacia el detector.

El arreglo lineal de fibras está montado en una estación rotatoria vertical, montada sobre dos estaciones de traslación mutuamente perpendiculares. Una de ellas se encuentra a un ángulo de 1.54° con respecto al eje óptico y está automatizada por un motor de pasos, funcionando como un dispositivo de enfoque controlado remotamente. La otra estación coloca la región observada del espectro en la posición adecuada en el detector. La estación rotatoria vertical orienta el eje de dispersión del espectro perpendicular al plano horizontal del eje óptico.

La variedad de componentes del instrumento se aloja en un cajón de aluminio de aproximadamente $1500 \times 450 \times 450$ mm, teniendo la estructura final mostrada en la Figura 1.5.

Todo el instrumento queda contenido dentro de una caja aislada térmicamente para asegurar la máxima inercia térmica posible (Furenlid & Cardona, 1988). La colocación final del espectrógrafo, dentro de la caja aislante, es anclada a la base del telescopio.

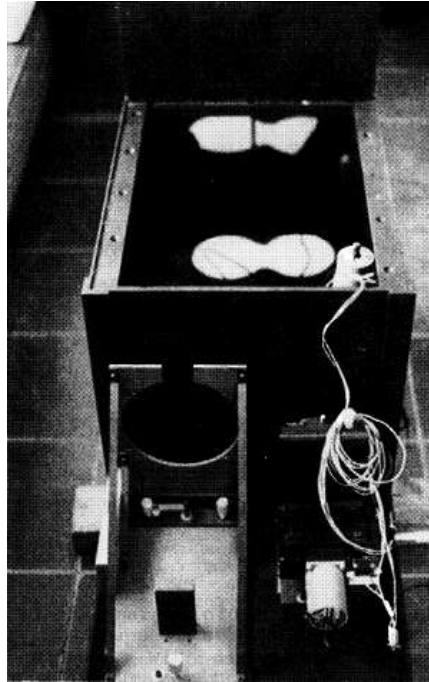


FIGURA 1.5: (Imagen tomada de Furenlid & Cardona (1988)) Vista general del espectrógrafo al término de su construcción .

El anclaje y la flexibilidad de la fibra óptica utilizada como medio de comunicación asegura la máxima estabilidad mecánica, no afectándole los movimientos propios del telescopio y del edificio del observatorio. El cambio en la posición focal del espejo debida a la expansión térmica de la caja de aluminio y del espejo es apenas de $30\mu\text{m}$ por grado Celsius, lo que provoca un aumento en el diámetro de la mancha focal de cerca de $4\mu\text{m}$, siendo tolerable un cambio de temperatura de hasta 5°C sin necesidad de enfocar nuevamente (Furenlid & Cardona, 1988), haciéndolo un instrumento térmicamente muy estable, mientras que la mínima cantidad de reflexiones de luz dentro del espectrógrafo (únicamente tres), proveen un instrumento óptico muy eficiente.

1.4.2 El haz de fibras ópticas

El haz de fibras ópticas actual fue adquirido en 1996 a la empresa Polymicro Technologies, posteriormente que se comprobó que el haz original, adquirido a Fiberguide Industries, se encontraba severamente dañado, al grado de ser inservible. El haz de

fibras es del tipo de alto índice de OH, por lo que se desempeña es mejor en la región del azul.

La longitud de la fibra es de 10m y se encuentra recubierta por una capa de acero inoxidable flexible (Fig. 1.6). En el extremo circular, el arreglo, que consiste de 30 fibras independientes de aproximadamente $50\mu\text{m}$ de diámetro cada una, alcanza un diámetro aproximado de $400\mu\text{m}$ (dando un área de $\sim 0.125\text{mm}^2$), contenidos en un conector de acero inoxidable tipo , mientras que en el extremo lineal el arreglo tiene menos de $2000\mu\text{m}$ de longitud y $\sim 50\mu\text{m}$ de ancho, empaquetado dentro de un cabezal de acero inoxidable.



FIGURA 1.6: Carrete de fibra óptica. Se observa el recubrimiento de acer inoxidable y, de frente, el cabezal de acero que contiene el arreglo lineal de fibras.

1.4.3 El detector CCD

El actual detector utilizado por el espectrógrafo es un CCD de Spectral Instruments SI-003A, de reciente adquisición por el OAGH. El sensor es del tipo back-illuminated de 1024×1024 pixeles, cada uno de $24\mu\text{m}$, lo que proporciona un área activa de adquisición de imágenes de 24.6mm .

A -45°C el ruido de lectura típico es de 7 electrones, la señal de pozo completo de 350 000 electrones, y la ganancia de salida de $1.5\mu\text{V}/\text{electrón}$.

El CCD opera a una temperatura aproximada de -100°C , que se alcanzan por medio de un sistema de circuito cerrado de líquido refrigerante Cryo-Tiger, auto contenido en el sistema, que evita el proceso de agregar nitrógeno líquido periódicamente.

La Figura 1.7 muestra la cámara de vacío del detector, que es el componente más voluminoso de la cámara completa.



FIGURA 1.7: Aspecto externo de la cámara de vacío del detector. Se observan los cables de alimentación y de transmisión de datos y las mangueras del sistema de autoenfriamiento.

1.4.4 Desempeño óptico

Hasta el momento se ha verificado analíticamente la resolución del espectrógrafo, quedando pendiente un nuevo análisis de las propiedades de la imagen producidas en la superficie focal, con base en los análisis realizados por Welford (1963) y Mielenz (1964), pero que han sido realizados y reportados ya por Furenlid & Cardona (1988). La importancia de realizar este nuevo análisis radica en que el tamaño del actual CCD es al menos 9mm más grande que el CCD para el que se realizó el análisis, aunque según lo reportado en Furenlid & Cardona (1988), el sistema acepta sin problema al-

guno un CCD de hasta 55mm de longitud, es decir, al menos 39mm más largo que el CCD original.

Para un espectrómetro de rendija de entrada como el de la Figura A.2, el límite de resolución viene dado por la Ecuación A.15. Utilizando el factor de placa de cada rejilla, reportados en Furenlid & Cardona (1988), y con una rendija fija de $50\mu\text{m}$, que es el ancho aproximado de la rendija formado por el arreglo lineal de fibras ópticas, equivalente a 10.31 segundos de arco en el plano focal del espectrógrafo, para el telescopio de 2.1m y $f/12$ del OAGH se tienen, por diseño, los siguientes límites de resolución espectral para cada rejilla:

1. Rejilla de 150 l/mm: $\delta\lambda = 2.83\text{\AA}$
2. Rejilla de 400 l/mm: $\delta\lambda = 0.50\text{\AA}$
3. Rejilla de 1200 l/mm: $\delta\lambda = 0.12\text{\AA}$

Sin embargo, a la longitud focal de 1000mm, el haz de salida de la fibra, que se comporta como un haz $f/8$, genera un cono de 125mm de diámetro que no llena en su totalidad la mitad del espejo principal del espectrógrafo (150mm), provocando un aumento en el límite de resolución y por lo tanto una caída en el poder de resolución del instrumento.

Tomando en cuenta el tamaño real del haz en el colimador, se logran entonces los siguientes valores finales para el límite de resolución con cada rejilla:

1. Rejilla de 150 l/mm: $\delta\lambda = 3.40\text{\AA}$
2. Rejilla de 400 l/mm: $\delta\lambda = 0.60\text{\AA}$
3. Rejilla de 1200 l/mm: $\delta\lambda = 0.15\text{\AA}$

Con lo que, para $\text{H}\alpha$ ($\lambda = 6563\text{\AA}$), por ejemplo, el máximo poder de resolución, que se consigue con la rejilla de 1200 l/mm, resulta de:

$$R = \frac{\lambda_c}{\delta\lambda} = \frac{6563\text{\AA}}{0.15\text{\AA}} \approx 45\,262, \quad (1.1)$$

lo que representa al menos un valor mínimo para hacer estudios de campos magnéticos o de efectos Doppler-Zeeman.

Para definir previamente una cobertura espectral a observar, se utiliza la fórmula mostrada en la Ecuación 1.2, que relaciona la longitud de onda central a observar, el número de líneas por milímetro de la rejilla que se va a utilizar y el ángulo de inclinación a la que se debe colocar ésta para observar en esa región (Cardona, O., comunicación privada):

$$\theta = \arcsen \frac{\lambda_c}{d} \quad (1.2)$$

donde θ es el ángulo de inclinación de la rejilla, λ_c es la longitud de onda central de la región a observarse y d es el número de líneas por milímetro de la rejilla.

1.5 Diagnóstico

De acuerdo al diseño y a la descripción anterior, el espectrógrafo Ebert-Fastie está conformado por una parte óptica, una parte mecánica y otra electrónica. En todos los casos, durante el proceso de actualización, fue necesario corregir, mejorar o actualizar alguna de ellas.

El espectrógrafo se encontraba en el segundo piso del OAGH, en una sala contigua al cuarto de herramientas y a la sala de electrónica. Se hallaba en estado de casi abandono, pero con sus elementos en buenas condiciones, dentro de su cajón de madera original y recubierto internamente por placas de unicelel (ambos en mal estado) y lana de fibra de vidrio, embolsada, cuyo propósito es aislarlo térmicamente (Figuras 1.8 y 1.9).

La caja de madera externa se encontraba cerrada pero sin alguna protección espe-



FIGURA 1.8: Localización inicial del espectrógrafo, al comienzo de su actualización.

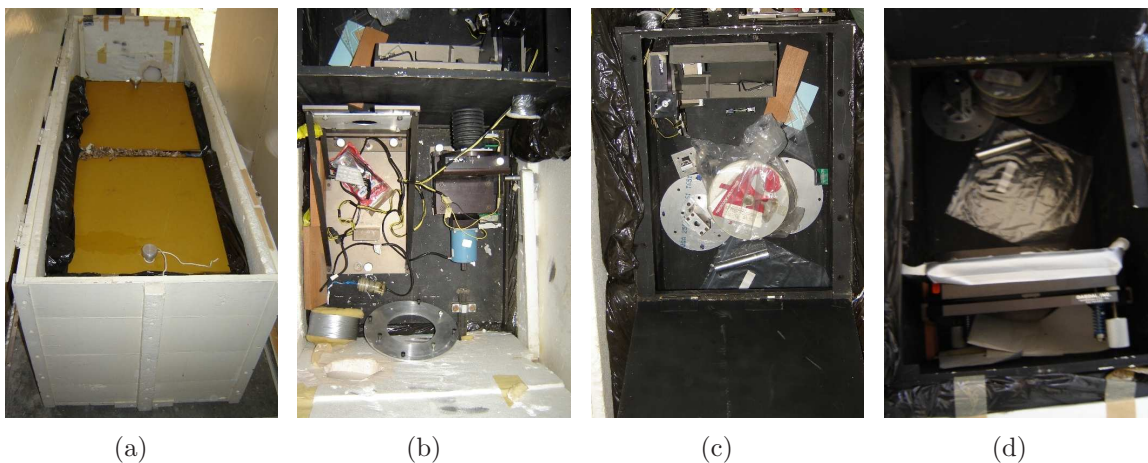


FIGURA 1.9: Estado inicial del espectrógrafo antes de comenzar la actualización. (a) Estado del cajón externo de madera y del cajón interno de aluminio. Se observan las placas de aislante térmico y las bolsas que contienen lana de fibra de vidrio; (b) Zona del detector y de la montura para la fibra. Se observa la montura para el CCD y para la fibra, y algunas herramientas mecánicas utilizadas en los intentos previos de alineado; (c) Parte de la montura para la rendija, dentro del cajón de aluminio. Además de la caja para la celda de la rendija, puede verse el carrete que contiene las fibras ópticas. El carrete corresponde al primer haz de fibras, ya inservible; (d) Montura del espejo parabólico, que se halla protegido por una cubierta. Hacia adentro del cajón se observa tanto el carrete de las fibras como una pieza original de aluminio para acoplar las fibras al telescopio.

cial, por lo que el instrumento estaba internamente cubierto por polvo y por restos de una plaga de insectos.

Dentro de los cajones externo (el de madera) e interno (el propio del instrumento), y en otras salas del observatorio, se hallaron los siguientes elementos:

1.5.1 Elementos concernientes a la óptica del instrumento

1. Espejo parabólico de 300mm de diámetro, 1000mm de longitud focal y $f/3.3$ en buen estado.
2. Poste para montura de rejilla de difracción, con posibilidades limitadas de movimiento horizontal en dirección al eje óptico del espejo y en dirección perpendicular sobre el plano óptico, rotación limitada respecto a su eje vertical e inclinación limitada.
3. Montura para la rejilla de difracción, acoplada al poste descrito en el punto anterior por medio de una montura circular giratoria respecto a su eje horizontal, perpendicular al eje óptico y sobre el plano óptico.
4. Montura para motor de pasos acoplado al poste, por tornillo, hacia la montura giratoria acoplada a la de la rejilla de difracción.
5. Motor de pasos unipolar de 200 pasos por revolución y 4.7A por fase. Este motor se encarga de cambiar el ángulo de la rejilla de difracción.
6. Tres rejillas de difracción de 150, 400 y 1200 líneas por mm, en su celda correspondiente. Según Furenlid & Cardona (1988), se construiría una rejilla más, de 50 líneas por mm, de la que se halló únicamente la celda.
7. Dos microinterruptores, ambos para detener el movimiento de rotación de la montura para la rejilla.

1.5.2 Elementos no pertenecientes directamente a la óptica del instrumento

1. Montura metálica para CCD, con posibilidades de movimiento limitado y fino horizontal en dirección al eje óptico del espejo, en dirección perpendicular sobre el plano del eje óptico, y rotación limitada respecto a su eje vertical.

2. Acoplamiento de aluminio entre CCD 1000 y montura metálica.
3. Montura para el haz de fibras ópticas, con posibilidad limitada y fina de movimiento horizontal en dirección al eje óptico del espejo, movimiento limitado y fino horizontal perpendicular al eje óptico, sobre el plano óptico, y rotación limitada respecto a su eje vertical, con movimiento rotacional independiente y no limitado con respecto al eje óptico, e inclinación limitada, fina, respecto a su eje vertical.
4. Dos acoplamientos de aluminio para el haz de fibras hacia la montura descrita en el inciso anterior, uno de ellos inútil.
5. Montura para motor de pasos acoplado a la montura para el haz de fibras. El acoplamiento, realizado por tornillos, se hallaba en mal estado en el lado de los barrenos roscados sobre la montura para el haz de fibras.
6. Motor de pasos de 200 pasos por revolución y 4.7A por fase. Este motor se encarga de realizar el enfoque del rayo de luz proveniente del haz de fibras.
7. Un microinterruptor para detener el movimiento horizontal paralelo al eje óptico del espejo, de la montura para la fibra.

1.5.3 Elementos del instrumento relacionados a su acoplamiento con el telescopio

1. Rollo de fibra óptica adquirido en 1996 a Polymicro Technologies, junto con la fibra anterior, adquirida a Fiberguide Industries.
2. Guiador, actualmente discontinuado.
3. Manguera de uso rudo para protección de la fibra, acoplada en un extremo directamente a la base metálica del instrumento, y en el otro extremo al guiador, también discontinuada.

4. Tres discos metálicos, uno con una barra central con elementos ópticos pertenecientes al guiador.
5. Una lente perteneciente al guiador.

1.5.4 Diagnóstico óptico

El diagnóstico óptico del espectrógrafo puede dividirse en dos partes, dependiendo de la función que realiza cada una dentro del sistema completo:

- a) La óptica concerniente al propio espectrógrafo;
- b) La óptica concerniente a la comunicación entre el espectrógrafo y el telescopio.

Con respecto a la óptica propia del espectrógrafo, todos los elementos del sistema óptico se hallaron en buenas condiciones al momento de comenzar su actualización. Sin embargo, algunos de ellos ya no eran útiles, por un lado debido al cambio de elementos fundamentales, y por otro, a que algunos de ellos podían ser mejorados sustancialmente. La mayoría de estos elementos estaban fuera de su lugar de trabajo o con mucho tiempo de haber sido probados por última vez, por lo que la óptica se encontraba completamente fuera de condiciones de trabajo. No sólo se hallaba desalineada, sino que el instrumento completo se encontraba en su totalidad desnivelado, provocando que el alineado fuera imposible de realizar. Las razones principales de este inconveniente se comentan a continuación:

- a) El cajón de aluminio que contiene al espectrógrafo se encuentra sobre placas de unicel (utilizadas como aislante térmico), que han perdido rigidez con el paso del tiempo, provocando que en el extremo más pesado, donde se halla el espejo, el cajón completo esté inclinado hacia abajo
- b) Todo el instrumento, de una longitud de 1651mm, es demasiado largo para mantener una rigidez mecánica si no está colocado sobre una base firme y nivelada

En relación a la óptica de comunicación del espectrógrafo con el telescopio, uno de los elementos más delicados es la fibra óptica, de la que el carrete original ya ha sufrido daños permanentes, y de la que se tiene actualmente un carrete nuevo de diseño similar al original y en excelentes condiciones. Por otro lado, el centrado de objetos puntuales en la fibra justo en el foco Cassegrain del telescopio de 2.1m es difícilmente repetible con el guiador y con la montura de acoplamiento para la fibra originales. Sin embargo, en la actualidad se cuenta con un guiador más eficiente, diseñado para el espectrógrafo Boller & Chivens, y completamente útil al espectrógrafo Ebert-Fastie. La actualización de este elemento deviene en una mejora sustancial para el acoplamiento del espectrógrafo, no sólo porque está mejor caracterizado, sino porque además existen más elementos mecánicos para colocar un nuevo sistema de verificación de centrado de objetos puntuales en la fibra más eficiente que el original.

1.5.5 Electromecánico

El diagnóstico electromecánico también se analiza en dos partes:

- a) Los elementos mecánicos del instrumento;
- b) Los elementos eléctricos y electrónicos.

Esencialmente, las partes mecánicas del espectrógrafo se hallaron en buenas condiciones, a excepción de la montura para el CCD, que se encontraba con muestras claras de fatiga de material. Sin embargo, esta pieza debería ser eventualmente reemplazada, debido a la entrada en operación de los nuevos CCDs adquiridos por el OAGH.

Conjunto al diagnóstico óptico de la comunicación del espectrógrafo con el telescopio, se halla el diagnóstico mecánico del antiguo guiador y el sistema de verificación de objetos puntuales, ambos obsoletos para los requerimientos actuales del espectrógrafo, puesto que el primero es sumamente pesado y difícil de manipular, y el segundo es poco eficiente.

En cuanto a los elementos eléctricos y electrónicos, los fundamentales son los dos motores de pasos que se encargan de ajustar el ángulo de la rejilla de difracción y el enfoque de las fibras ópticas, que se encontraban en excelentes condiciones, y los módulos de control para estos motores, definitivamente discontinuados al momento de iniciar la actualización, por lo que era necesario adquirirlos. No existía, por lo tanto, el software necesario para controlar tales módulos (y por lo tanto los motores), de modo que también era necesario elegir un lenguaje de programación adecuado para desarrollar en él el software de control.

Adicionalmente, aunque no es una pieza mecánica que existiera originalmente, es indispensable construir una base de nivelación para todo el instrumento, puesto que de esto depende posteriormente el correcto alineado de la óptica.

1.6 Justificación y objetivos

Actualmente, en México sólo hay en funcionamiento un instrumento con características de alta resolución, que es el espectrógrafo tipo Echelle del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir. Sin embargo, debido a que utilizan órdenes espectrales muy grandes, estos dispositivos generan un traslape muy severo de los diferentes espectros, por lo que se vuelve necesario introducir un elemento dispersor adicional que introduce deformaciones que sólo se corrigen mediante el procesamiento posterior de las imágenes. Este análisis (procesado), es en general muy laborioso.

El requerimiento de alta resolución efectiva puede lograrse, no obstante, con una elevada eficiencia óptica y una muy alta estabilidad, conseguida si todas las funciones importantes del espectrómetro se hallan bajo mando a distancia para que éste opere en una sala a temperatura constante, en concordancia con el modo de operación del telescopio.

Estas características pueden incorporarse completamente en un espectrómetro tipo Ebert-Fastie fuera de plano. El instrumento, de alta resolución, combina una ele-

vada eficiencia óptica con una elevada estabilidad mecánica y térmica, lograda gracias al acoplamiento por fibras ópticas desde el telescopio huésped hasta la zona de alojamiento del instrumento, donde puede mantenerse un ambiente sumamente apropiado para el dispositivo, y usando bajos órdenes espectrales. De este modo se evita tanto el uso de elementos dispersores adicionales como el procesado posterior de las imágenes adquiridas.

Las características expuestas de este instrumento lo convierten en una herramienta altamente deseable para el estudio de diferentes tipos de objetos celestes con la única posible restricción de su brillo aparente, razón por la que se decidió iniciar este proyecto.

Con base en el diagnóstico realizado en la sección 1.5, y la importancia que reviste la actualización del espectrógrafo Ebert-Fastie del OAGH, los objetivos de la presente tesis se enumeran a continuación:

1. Prueba y caracterización de la fibra óptica actual
2. Nivelación apropiada de todo el instrumento, y prueba, actualización y alineado de los elementos ópticos pertenecientes al propio espectrógrafo
3. Diseño y maquinado de un nuevo sistema de centrado de objetos puntuales para ser montado en el guidor actual del espectrógrafo Boller & Chivens, útil para el espectrógrafo Ebert-Fastie
4. Adquisición de nuevos módulos de control para los motores originales del espectrógrafo, y desarrollo del software de control para estos módulos
5. Recuperación de los parámetros por diseño del instrumento: resolución, eficiencia y estabilidad mecánica y térmica, para lograr finalmente la caracterización formal del espectrógrafo

El orden en que se expone el trabajo realizado en esta tesis es el siguiente: el Capítulo II expone todo el proceso de actualización del espectrógrafo, incluyendo el

desarrollo, modificación o mejora de los componentes pertinentes, y explica con detalle las propuestas realizadas para hacer observaciones puntuales, y los motivos por los que se prefiere aplicar en especial una de ellas, en vez de las otras.

El Capítulo III describe las acciones realizadas durante la temporada de observación utilizada para probar las modificaciones al espectrógrafo en el telescopio de 2.1m del OAGH, indicando la muestra de objetos estelares seleccionados, así como los problemas que se encontraron y las soluciones que se propusieron.

El Capítulo IV detalla los resultados obtenidos de la observación, centrandó el análisis en el desempeño óptico y electromecánico del espectrógrafo. Se realiza una comparación de los espectros obtenidos por el instrumento con espectros sintéticos y con las características de otros espectrógrafos del OAGH.

Fianalmente, en el Capítulo V se describen las conclusiones del proceso de actualización del instrumento, y se propone el trabajo a futuro inmediato para lograr la entrada en operación del espectrógrafo de alta resolución tipo Ebert-Fastie dentro del OAGH de Cananea, Sonora.

Capítulo 2

Proceso de actualización

2.1 Solución de la óptica del espectrógrafo

2.1.1 Prueba de las fibras

Debido a que el daño del haz original de fibras fue la causa fundamental de que el espectrógrafo Ebert-Fastie no se utilizara de manera permanente, la primera prueba que se realizó de la óptica fue la de comprobar el estado del actual haz de fibras.

La prueba que se realizó fue con el propósito de verificar la cantidad de fibras individuales que transmitían luz así como la calidad de la rendija formada por su arreglo lineal en uno de sus extremos. Para esto se tomó una imagen fotográfica de la rendija, iluminando la fibra por su extremo circular con una fuente de luz blanca, sin ningún medio de enfoque (Figura 2.1).

De la imagen obtenida se realizan las siguientes observaciones:

- a) Se observan 30 fibras individuales iluminadas en su totalidad, y espacios vacíos entre la primera y la segunda fibras, entre la segunda y la tercera, la décimo primera y décimo segunda fibras, y la vigésimo sexta y vigésimo séptima fibras, contándolas individualmente de izquierda a derecha. Aunque estas zonas sin iluminación pueden deberse también a fibras rotas que no transmiten luz, para asegurar cuál es el motivo real de estos espacios sin luz es necesario realizar un



FIGURA 2.1: Imagen del arreglo lineal de fibras ópticas. Se observan 30 fibras iluminadas, y espacios que podrían ser fibras rotas o espacios vacíos entre ellas. También se observa un desalineado producido durante la fabricación.

estudio detallado con equipo adecuado, con el que no se contaba al momento de tomar la imagen de la Figura 2.1, dado que cada fibra individual es del orden de $50\mu\text{m}$

- b) Se observa además una irregularidad importante en la linealidad del arreglo de fibras, producida durante el proceso de fabricación, puesto que una vez realizado el empaquetado no se puede modificar la disposición final de las fibras. Este defecto provoca el mismo patrón de irregularidades en el espectro obtenido, por lo que tendrá que ser corregido con el software de reducción de imágenes

2.1.2 Alineado

Una vez verificadas las fibras, la solución óptica del espectrógrafo es la correcta alineación de sus componentes ópticos y el correcto centrado de los objetos puntuales a la entrada de la fibra, en el foco Cassegrain del telescopio. Sin embargo, centrar correctamente los objetos es también parte de la solución mecánica del instrumento,

puesto que depende del maquinado de la montura de acoplamiento de la fibra con el telescopio y del sistema de verificación de centrado de objetos puntuales que se diseñe.

Para comenzar el alineado de la óptica del espectrógrafo, que fue la primera acción de solución que se realizó, fue indispensable nivelar todo el instrumento en un sitio adecuado. Esto se realizó inicialmente en la sala de electrónica del observatorio, por medio de una base metálica fabricada para este fin en el taller mecánico del observatorio, con un tornillo de nivelación en cada vértice (Figura 2.2).



FIGURA 2.2: Aspecto externo del espectrógrafo luego de ser colocado en el laboratorio de electrónica y sobre la base de nivelación. Se observa, en la esquina inferior izquierda, visto de lado, uno de los tornillos de nivelación de la base.

El proceso se realizó con cuatro niveles de gota colocados simultáneamente en cada arista inferior de la parte interna del cajón de aluminio. Es importante destacar la necesidad de este proceso, pues si no se realiza con precisión, posteriormente es imposible alinear la óptica del dispositivo.

Una vez nivelado el espectrógrafo, el siguiente paso fundamental fue el establecimiento de su eje óptico, que se define a partir del eje óptico del espejo parabólico. Para esto, como sistema de referencia, se consideró un plano cartesiano tridimensional con origen en el eje de la parábola del espejo. El eje x se definió como lo que sería eventualmente la posición final del eje óptico, el eje y paralelo a la dirección de dispersión (vertical), y el eje z paralelo a los surcos de la red (horizontal). El extremo

del espejo se tomó como la parte frontal del instrumento.

Según las especificaciones del diseño (Cardona, O., comunicación privada), el eje óptico debe colocarse a 204mm de la base del instrumento, y a 225.43mm de cada pared lateral, en el centro mecánico del espectrógrafo. Esto se logró fijando la base del espejo a 20.3mm de cada pared lateral, y la celda a 100.61mm de la parte interna frontal del cajón de aluminio (Figura 2.3).



FIGURA 2.3: Establecimiento del eje óptico del espectrógrafo, por medio del eje óptico del espejo.

El siguiente elemento óptico que se alineó fue la rejilla de difracción. La parte superior del contenedor metálico de la celda de la red debe colocarse paralela al plano xz , de modo que la superficie surcada de la red esté totalmente de frente al espejo parabólico, sobre el plano yz (Figura 2.4).

Esta posición del contenedor asegura que al colocar la rejilla, ésta se halle en el orden cero, la posición adecuada de la red de difracción para alinear el instrumento. El centro geométrico de la cara surcada se centra en el eje óptico, colocando la montura y control de la red a 24.5mm de la pared lateral derecha del cajón de aluminio, viendo de frente al espejo, y a 113.6mm de la parte interna posterior, medido desde el centro de la zona trasera del contenedor para la celda (Figura 2.5).

Lo anterior coloca el eje óptico cerca de su posición correcta, pero deben realizarse



FIGURA 2.4: Alineación del contenedor de la celda para la red de difracción.

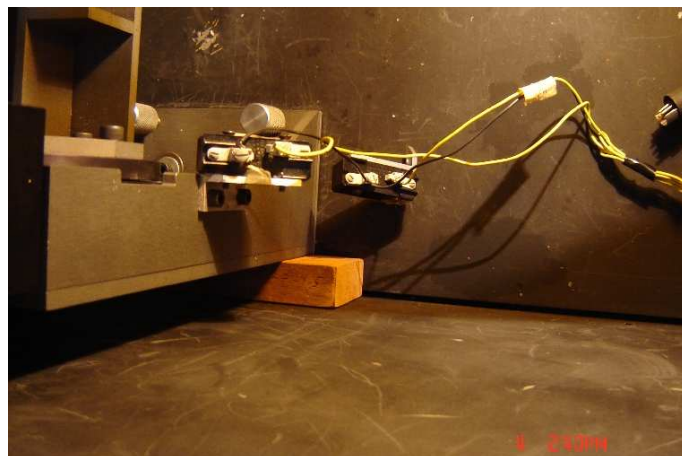


FIGURA 2.5: Alineación de la montura de la red de difracción.

ajustes finos. Al alinear la rendija del espectrógrafo, formada por el arreglo lineal de fibras ópticas, el eje óptico se coloca en su lugar definitivo con movimientos finos de todos los elementos ópticos¹.

El arreglo lineal de fibras se fija en una estación rotatoria vertical, montada a su vez en dos estaciones de traslación mutuamente perpendiculares, paralelas al eje x y al eje z (Figura 2.6). Para alinear la estación y probar el eje óptico, se utilizó un láser de He-Ne de 633nm, apropiado por sus dimensiones. La fuente del haz se fija sobre

¹A excepción del detector, que se coloca al final del ajuste.

las estaciones de traslación, a nivel con el eje x y con el haz a 204mm sobre la base. La montura debe estar nivelada con respecto a la base del espectrógrafo.

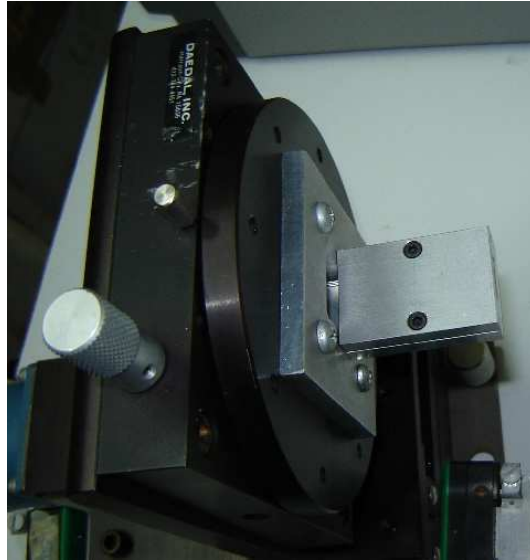


FIGURA 2.6: Estación móvil para el control de las haz de fibras utilizado como rendija del espectrógrafo.

Debido a las especificaciones de simetría respecto al plano xy , por diseño (Cardona, O., comunicación privada), el haz principal central de la rendija debe ser proyectado a 103mm del eje óptico, a una distancia de 1000mm, e incidir sobre el lado correspondiente del espejo a 80mm del eje. El haz, por lo tanto, tiene una inclinación de 1.54° con respecto al eje al incidir sobre el espejo. La estación rotatoria se colocó, por lo tanto, con el ángulo de inclinación necesario para cumplir con estas especificaciones. El centro del soporte frontal del arreglo lineal de la fibra se colocó a 38.3mm de la parte externa de la cara posterior del cajón de aluminio, de modo que la rendija se fijara a la distancia de 1000mm del espejo. La colocación final de la rendija se realiza a través de las estaciones de traslación perpendiculares, una vez fijada la estación completa con el ángulo de inclinación adecuado.

Con estas características, el haz debe reflejarse hacia el centro de la red de difracción. El ajuste fino para asegurar esta condición se realizó con movimientos del espejo.

Para conseguir que en el orden cero la red refleje el haz hacia la mitad correspondi-

ente del espejo, a 80mm del eje, se mantuvo la cara superior del contenedor metálico de la celda de la red paralela al plano xz , y se rotó la montura completa sobre el eje y , con movimientos finos, hasta que el haz se reflejó a los 80mm especificados del eje óptico, sobre la mitad correspondiente de la parábola.

Para que el haz reflejado apuntara exactamente a 103mm del eje óptico y a 204mm de la base del espectrógrafo, se realizaron nuevamente ajustes con movimientos finos del espejo, hasta conseguir las condiciones especificadas. Con lo anterior, se define un plano óptico (en el plano xz), a 204mm sobre la base del instrumento (Figura 2.7).

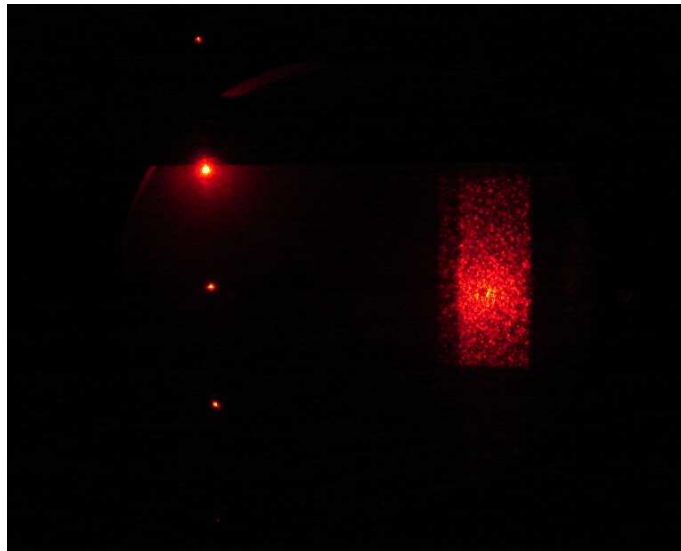


FIGURA 2.7: Plano óptico del espectrógrafo, a 204mm sobre la base del instrumento. En la imagen, a la derecha, se observa esparcimiento del haz láser provocado por los instrumentos de medición utilizados para medir la altura del haz. En esta zona ocurre la primera incidencia sobre el espejo, proveniente de la rendija. A la izquierda se observa el haz proveniente de la red, ya difractado en distintos órdenes. El central es el orden cero, a 80mm del eje óptico. El más brillante es el primer orden, producto del ángulo de brillo, que concentra la energía en el primer orden.

El último elemento óptico que se alineó fue el detector. Inicialmente, se utilizó un CCD Hitachi KP-D581 (Figura 2.8), para captar imágenes en tiempo real, sin necesidad de integración, y de fuentes extendidas que no requiriesen el acoplamiento de la fibra óptica con el telescopio, de naturaleza astronómica o no, tales como lámparas de luz blanca, lámparas de comparación o el Sol. El objetivo inicial era comprobar que

el espectrógrafo estaba alineado y que la fibra era capaz de transmitir la luz necesaria desde su entrada hasta la rendija.

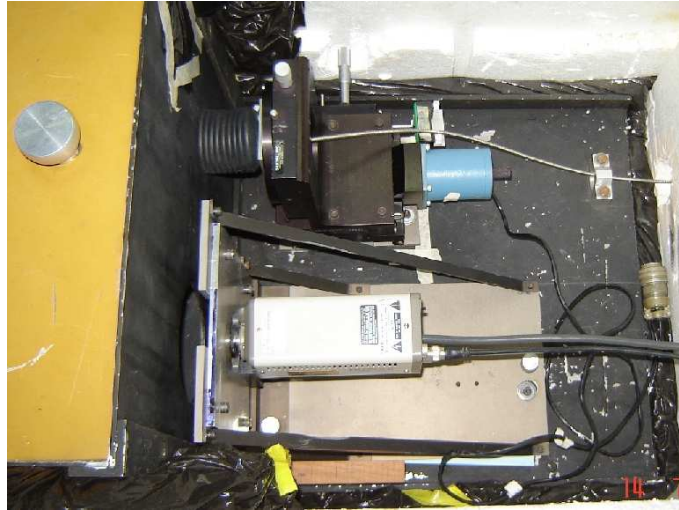


FIGURA 2.8: CCD Hitachi KP-D581 en la montura para CCDs.

Por simetría, el haz principal de salida tiene el mismo ángulo de inclinación de 1.54° que a la entrada. Por lo tanto, el CCD debe colocarse con la misma inclinación, y la montura a una distancia que fije el centro del mosaico del CCD a la distancia de 1000mm del espejo. Como prueba inicial, se maquinó en el taller mecánico del observatorio una montura de acoplamiento para el CCD Hitachi de modo que pudiera moverse manualmente, alejándolo y acercándolo del espejo, y cambiar el ángulo de incidencia en el mosaico, hasta encontrar la imagen enfocada de la rendija.

Con este fin, se tomaron imágenes de la rendija con el CCD Hitachi, tanto iluminada por luz solar como por una fuente de luz blanca. La Figura 2.9 muestra el correcto alineado del instrumento, con luz proveniente del Sol que ingresa y es transmitida por el haz de fibras ópticas. La entrada de la fibra fue expuesta directamente a la luz solar, sin ninguna lente que convirtiera a un cono de luz $f/12$, como se requiere para que la fibra, al comportarse como reductor focal, emita un cono $f/8$. La imagen de la Figura 2.10 muestra la rendija iluminada por una lámpara Fiber Lite Model 190-1 (Figura 2.11), a través de una lente que no estaba caracterizada.



FIGURA 2.9: Imagen de la rendija iluminada con luz del Sol, captada con el CCD Hitachi. En la imagen se observa que el camino óptico es el correcto, aunque aun la imagen está fuera de foco.

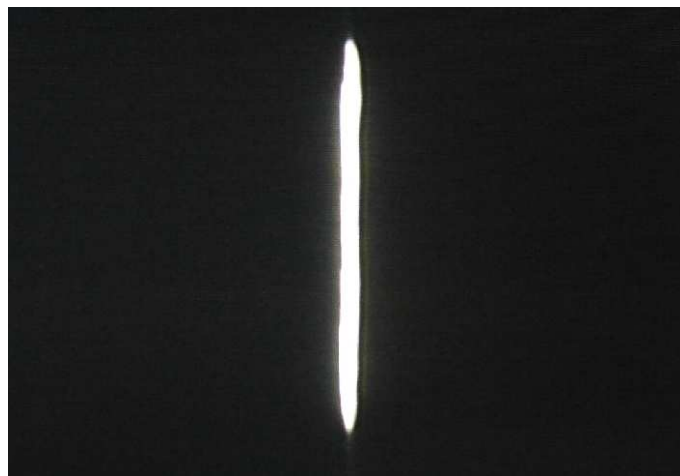


FIGURA 2.10: Imagen de la rendija iluminada con la lámpara Fiber Lite. En esta prueba la imagen de la rendija se enfocó casi en su totalidad.

2.1.3 Prueba final de alineado

Para corroborar el correcto alineado de todos los componentes ópticos del espectrógrafo, incluyendo el enfoque del detector y de la fibra (hasta este momento manual), se realizó una prueba con el Sol, que es un objeto extendido, apuntando a él directamente



FIGURA 2.11: Arreglo óptico utilizado para probar el haz de fibras con la lámpara Fiber-Lite.

las fibras, sin ninguna óptica adicional.

Los resultados, que fueron completamente satisfactorios para esta etapa de actualización, se muestran en la Figura 2.12. Es importante señalar que, si bien éstas son las primeras imágenes espectrales tomadas con el instrumento después del cambio de fibras y del alineado, se obtuvieron sin tomar en cuenta el acoplamiento de las fibras con el telescopio, y sin realizar un apuntado de objetos puntuales, por lo que únicamente comprueban el correcto alineado de la óptica dentro del instrumento.

2.2 Solución electromecánica

2.2.1 Establecimiento provisional

Si bien la primera solución electromecánica que se implementó en el espectrógrafo fue el control del motor de pasos que controla el foco de la rendija, antes fue necesario llevar al espectrógrafo al sitio donde debe quedar establecido finalmente.

El espectrógrafo fue colocado junto a la base del telescopio de 2.1m del OAGH, del lado Este, únicamente sobre su mesa de nivelación, sin ningún tipo de aislamiento mecánico ni anclaje a la columna del telescopio (Figura 2.13).

Aunque lo anterior no le da al instrumento la estabilidad mecánica necesaria para

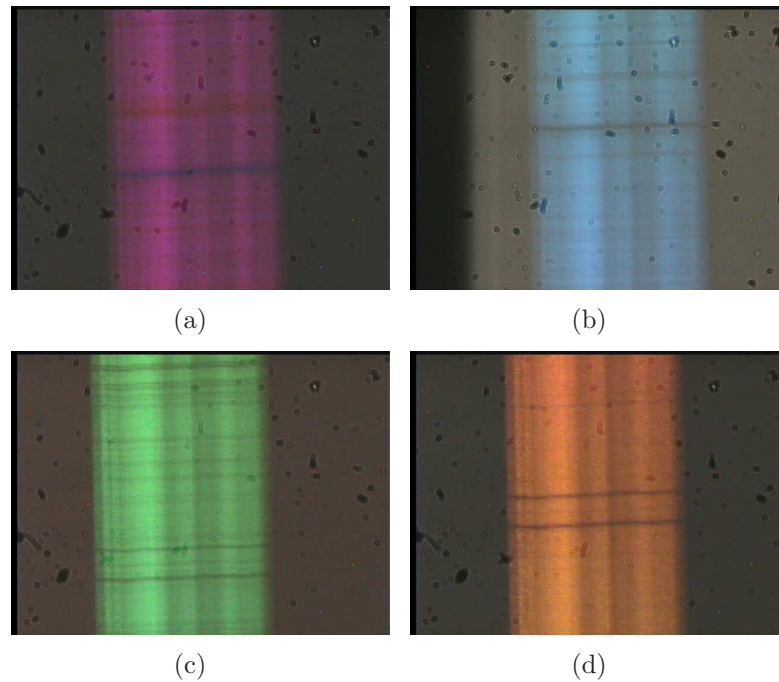


FIGURA 2.12: Imágenes espectrales del Sol obtenidas con el espectrógrafo Ebert-Fastie. (a) Imagen espectral en la región de $H\alpha$; (b) Imagen espectral en la región de $H\beta$; (c) Imagen del triplete del magnesio; (d) Imagen del doblete del sodio.

que el espectrógrafo funcione a su máxima capacidad, el objetivo era verificar que el instrumento era capaz de obtener espectros estelares, lo que se demostró eventualmente durante esta etapa de la actualización.

2.2.2 Características de los motores del espectrógrafo

Los motores de pasos que emplea el espectrógrafo Ebert-Fastie de Cananea son de la línea de producto Standard SLO-SYN, de Superior Electric, actualmente manejado por Danaher Motion, de standard NEMA 23.

El modelo del motor original, M062-FD-421, se ha actualizado al modelo M062-LS09. El standard NEMA 23 especifica un torque mínimo de 100 oz-in ó 71Ncm. Las demás características del motor son rotor de doble bloque, seis terminales y 200 pasos por revolución. En modo unipolar, cada arrollado necesita 1.7Vcd de alimentación y consume 4.7A, mientras que en modo bipolar necesita 2.3Vcd y consume 3.3A por

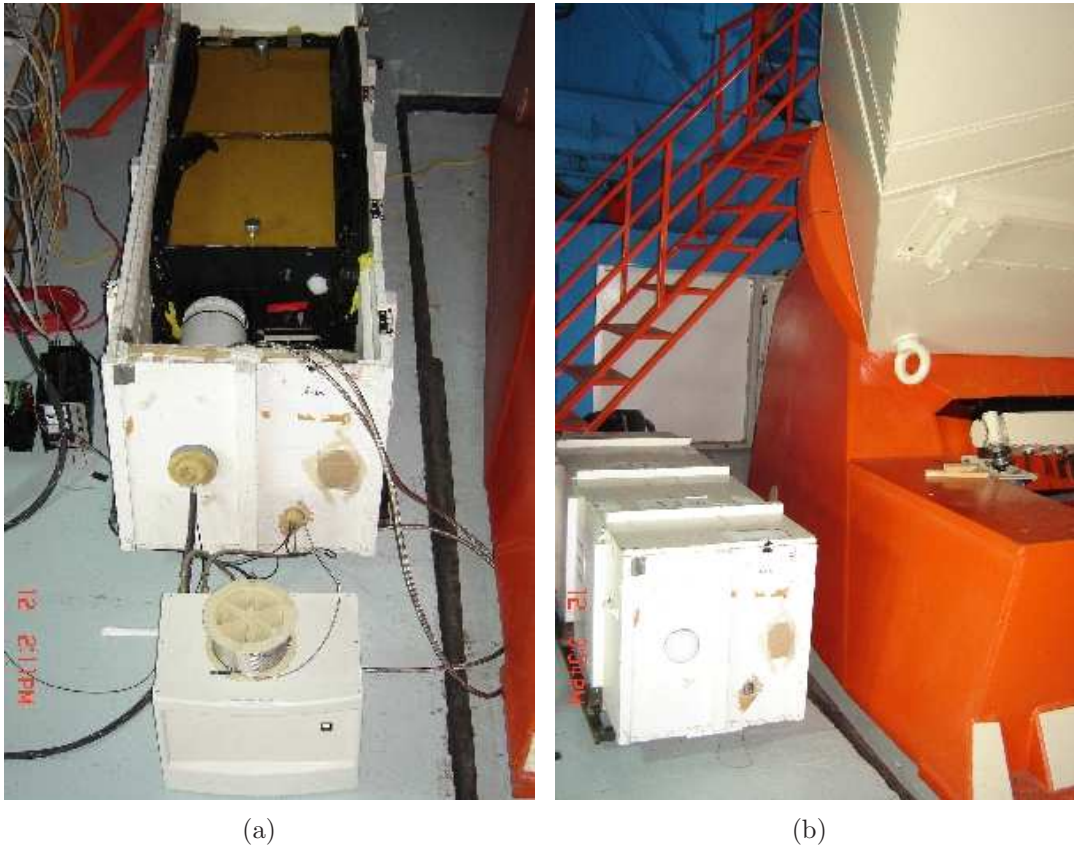


FIGURA 2.13: Establecimiento provisional del espectrógrafo para realizar las primeras pruebas de apuntado a objetos puntuales. (a) Espectrógrafo junto a la columna del telescopio durante las pruebas de apuntado. Se observan en la parte inferior de la imagen, el compresor para refrigeración del CCD y el carrete de fibras ópticas. Se observa también, junto al cajón exterior del instrumento, la fuente de voltaje y el módulo de control para el motor de enfoque de la rendija; (b) Vista externa del espectrógrafo junto a la base del telescopio, del lado Este. El siguiente paso en la actualización es el anclaje a la base del telescopio, en esa zona, del espectrógrafo.

arrollado.

En el Apéndice B se realiza un análisis breve y general de los motores de pasos, con el fin de presentar las ventajas de utilizar este tipo de motores para automatizar el movimiento de la rejilla de difracción y de enfoque de la rendija del espectrógrafo.

2.2.3 Módulos de control

Para el control de los motores se decidió adquirir, para cada uno de ellos, un circuito microprogramado² que incluyera etapa de control y etapa de potencia (módulos de control), siendo necesario para su manejo únicamente el envío de los comandos correspondientes desde la computadora huésped del sistema.

Ambos módulos se adquirieron a la empresa CyberResearch. Inc., quien ofrece productos para adquisición de datos basados en computadora, software para este fin y productos para instrumentación y control industrial.

Particularmente, para el control del motor de enfoque de la fibra óptica se adquirió un módulo Panther PANT HE-232-DE, que es un controlador de micropaso con soporte de hasta 7A de corriente por fase del motor, con interfaz hacia la computadora basada en el estándar RS-232 y rango de voltaje de alimentación de 90VCA a 128VCA. El módulo está provisto de controlador de pasos, fuente de potencia y entradas para encoder diferencial (Figura 2.14)



FIGURA 2.14: Módulo Panther PANT HE-232-DE (Imagen tomada de la página web de CyberResearch, <http://www.cyberresearch.com/>).

El Apéndice C contiene las características particulares del controlador.

²Un circuito microprogramado es aquel cuyas palabras de control binario se almacenan en memoria, en este caso una EEPROM

2.2.4 Software de control

El software de control para enviar los comandos a los módulos de control se desarrolló bajo el lenguaje Tcl/TK, un lenguaje de programación de órdenes para la creación de aplicaciones. El lenguaje se utilizó para crear una interfase entre el usuario y el módulo que controla el motor de pasos del enfoque de la fibra, de modo que se tenga conocimiento de la posición de la rendija al enfocar en relación a una posición de referencia.

La interfase creada, provisional, permite establecer la posición inicial de la rendija (a 1000mm del vértice del espejo) como posición de referencia (es decir, inicializar el programa), y desde ese punto adelantarla o retrasarla con dos niveles de precisión, mientras lee cada 450ms los parámetros de posición que envía el controlador.

El primer nivel de precisión es de 250 pasos por comando, alejándose o acercándose del foco, que equivale aproximadamente a 2.5mm lineales de cambio de posición. El segundo nivel de precisión es para ajuste fino, dando un paso por comando, que equivale aproximadamente a 100 μ m de cambio de posición lineal.

La Figura 2.15 muestra la ventana de interfase creada con el lenguaje Tcl/TK, donde se aprecian los botones creados asociados a cada función: establecimiento de posición de inicio (botón inicializar); movimiento de acercamiento o alejamiento del foco en intervalos lineales de 2.5mm por comando (mover; adelante, atrás); movimiento de ajuste de enfoque en intervalos lineales de 100 μ m (ajuste; adelante, atrás); botón para detener los movimientos en cualquier caso (detener); y campo de lectura de los parámetros de posición que envía el controlador (posición).

En el Apéndice D se enlista el programa en lenguaje Tcl/TK para generar la ventana de interfase mostrada en la Figura 2.15.



FIGURA 2.15: Ventana de la interfase entre el usuario y el módulo de control para el enfoque de la fibra. Se observan los botones de comando para inicializar y para recorrer la rendija alejándola y acercándola del foco, tanto en movimientos largos como finos, y un botón de paro en caso de requerirse detener cualquier tipo de movimiento.

2.3 Maquinado del soporte del haz de fibras

La colocación del haz de fibras en el telescopio de 2.1m del OAGH se realizaba originalmente por medio de una montura de aluminio (Figura 2.16), construida como una caja para contener la fibra y un disco en un extremo que se fijaba al guiador original del espectrógrafo (Figura 2.17). Con el diseño y utilización del guiador actual, empleado para el espectrógrafo Boller & Chivens, fue posible discontinuar el guiador original, que era menos eficiente.

Tanto el cambio de guiador como el cambio del haz de fibras obligaron a modificar la montura de aluminio original. El diseño de la nueva montura, que en esta etapa es aun provisional, obedece directamente a la necesidad de introducir el haz proveniente del telescopio dentro de la fibra, de aproximadamente $400\mu\text{m}$ de diámetro.

Hasta el momento, se han realizado dos propuestas para verificar en tiempo real el ingreso del haz dentro de la fibra:

- a) Utilización de un divisor de haz entre el guiador actual y el foco Cassegrain del



FIGURA 2.16: Montura original para acoplar al fibra óptica al telescopio de 2.11m del OAGH, a través del guiador original.

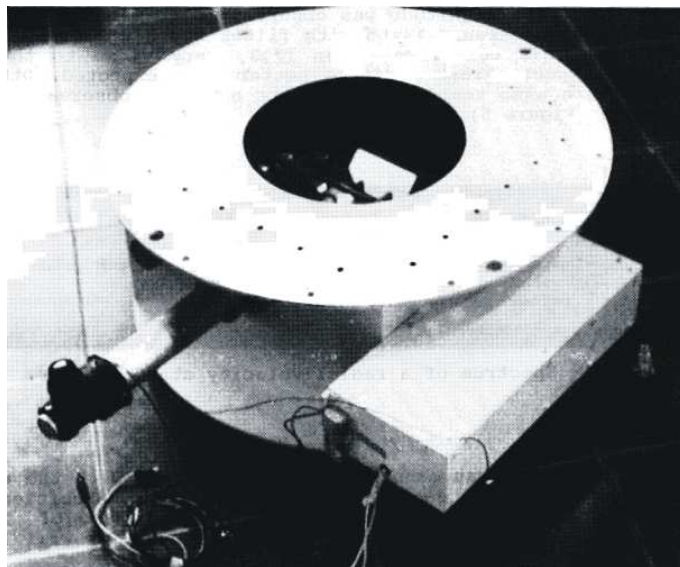


FIGURA 2.17: Guiador original del espectrógrafo Ebert-Fastie (Furenlid & Cardona, 1988).

telescopio, un espejo plano en el nivel de entrada del haz de fibras y un CCD de lectura en tiempo real

- b) Utilización de un espejo plano con una rendija centrada en la fibra, inclinado, en el nivel de entrada del haz de fibras, similar al sistema de guiado del espectrógrafo Boller & Chivens, con su correspondiente CCD de lectura en tiempo real
- c) Maquinado de un sistema tipo revólver, similar a una rueda de filtros, donde en una posición se centre en el foco del telescopio un CCD de lectura en tiempo real, haciendo que sus movimientos de centrado sean conjuntos a los de la fibra, para que una vez alineado correctamente el CCD, únicamente deba girarse la fibra a la posición de centrado en el foco del telescopio

De las propuestas anteriores, la primera se implementó y se puso a prueba, aunque con resultados negativos, puesto que no funcionó (sin embargo, esto no impidió que se tomaran imágenes espectroscópicas de objetos estelares, lo que se realizó posteriormente), mientras que la segunda y tercera están propuestas como trabajo a futuro.

La verificación de entrada del haz proveniente del telescopio es en realidad un proceso de centrado de un objeto puntual en una posición determinada, por lo que las propuestas anteriores se realizan dentro de este proceso.

2.3.1 Apuntado de objetos estelares

La montura se modificó aprovechando las características deseables que ya tenía la fabricación original, como la posibilidad de remover las caras laterales de mayor área para manipular la fibra óptica fácilmente.

La primera propuesta de verificación de entrada del haz dentro de la fibra fue utilizando un divisor de haz cúbico de $20 \times 20 \times 20$ mm y transmitancia-reflectancia de 50×50 , fabricado en el taller óptico del INAOE, una webcam como CCD de lectura en tiempo real (Figura 2.18), y un espejo de acero inoxidable pulido en el borde de la fibra. Este arreglo óptico se diseñó para fijarse por la parte interna de la caja de la rueda de filtros para fotometría, al tiempo que la montura para la fibra se acopla por la parte externa de la caja.



FIGURA 2.18: Guiador original del espectrógrafo Ebert-Fastie (Furenlid & Cardona, 1988).

La razón fundamental para utilizar la caja de filtros como contenedor del arreglo óptico fue que se conocía previamente el centro mecánico de la abertura circular de la caja, lo que era una ventaja inicial para colocar la fibra óptica. Además, no era necesario maquinar un acoplamiento adicional gracias a que la mayoría de las piezas manufacturadas para uso de los instrumentos del observatorio se realizaron bajo las mismas normas de medida.

Las modificaciones realizadas a la montura para la fibra se enumeran y explican a continuación:

1. Debido al actual guiador y la caja de filtros, que es donde se coloca finalmente la montura para la fibra, el foco Cassegrain del telescopio (de 25.32m de longitud focal) sobrepasa por 22.61mm la colocación original de la entrada de la fibra. Para solucionar este inconveniente se propuso recorrer el soporte para el cabezal de la fibra la longitud adecuada, dentro de la caja de aluminio de la montura

2. Ya que la nueva fibra tiene un acoplamiento mecánico roscado tipo SMA 905, macho, y que era necesario por lo tanto maquinarle el acoplamiento hembra correspondiente, el recorrido de la colocación de la entrada de la fibra debe incluir el espacio necesario para el acoplamiento hembra.
3. Para la verificación de la entrada del haz dentro de la fibra, la propuesta inicial era colocar un espejo de acero inoxidable al nivel de la entrada, con un orificio de 1mm. Sin embargo, el espejo no pudo colocarse de este modo porque el acoplamiento roscado para la fibra requería necesariamente de una parte donde acoplar en el soporte. Esto hacía que la entrada de la fibra no quedara al nivel del espejo sino más atrás, provocando que el tamaño del orificio bloqueara el paso del cono de luz. Ya que hacer un orificio de mayor diámetro sería inútil, pues se perdería precisión en el centrado, la opción fue pulir la cara superior del soporte, que enmarca el orificio de entrada hacia la fibra. Aunque el diámetro de este orificio, de cerca de 4mm, es demasiado grande para obtener alta precisión en el centrado, se aprovechó que el cabezal de la fibra está también pulido, de modo que pudo funcionar como espejo. La Figura 2.19 muestra todas estas modificaciones realizadas, realizadas

Sin embargo, la propuesta falló por las siguientes razones:

- a) La reflectancia-transmitancia de 50×50 del divisor de haz resultó inapropiada, debido a que se requieren al menos 2 reflexiones-transmisiones del haz a través del divisor, más una reflexión en el espejo al nivel de la entrada a la fibra, para que la luz llegue al CCD, por lo que la incidencia es menor al 25% de la que incide en el telescopio, aún sin considerar las pérdidas por absorción o esparcimiento provocadas por el mismo divisor.
- b) Por su calidad, el CCD no es lo suficientemente sensible para captar intensidades de luz muy bajas.

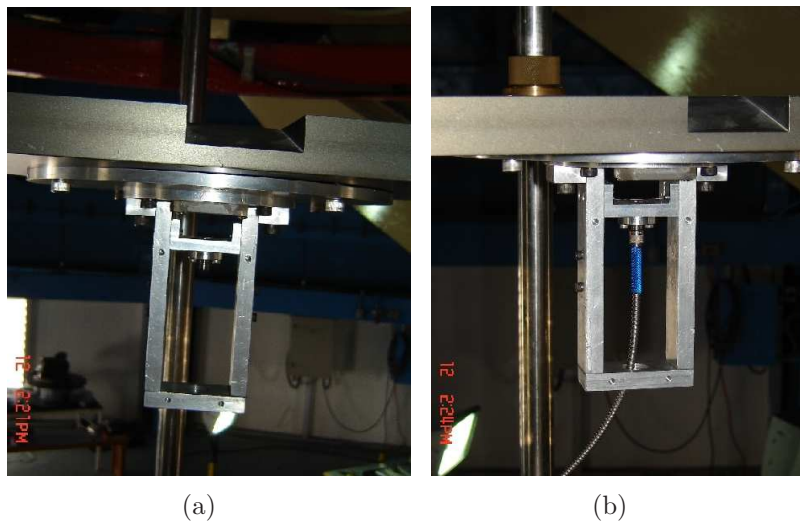


FIGURA 2.19: Nueva montura (provisional), para acoplar la fibra al telescopio. (a) Montura sin las tapas laterales, fijada a la montura de pruebas ópticas del telescopio. Se observa cerca del extremo del disco el soporte transversal donde atornilla el acoplamiento roscado para la entrada tipo SMA 905 de la fibra. Con respecto a la montura original, este soporte está recorrido hacia el extremo por donde entra la fibra a la montura; (b) Montura con la fibra enroscada en su acoplamiento correspondiente. Centrado en la fibra, se observa el orificio por donde pasa el haz proveniente del telescopio, enmarcado por lo que debiera ser una superficie pulida, con el objeto de reflejar el haz cuando no está ingresando en la fibra.

- c) El haz de luz proveniente del telescopio sufre refracción al atravesar el divisor, lo cual no sólo genera un número indeterminado de la misma imagen en el detector, sino que provoca además que el haz se descentre con respecto a la entrada de la fibra.

Debido a lo anterior, el centrado de los objetos se realizó de manera provisional, centrandó a mano la fibra en el foco Cassegrain del telescopio, utilizando su montura de pruebas (Figura 2.20), y por medio del control manual de enfoque del telescopio (que cambia la posición del espejo secundario del telescopio), evitando así el uso del divisor de haz y también de la caja de filtros.

Aunque con el uso de la montura de pruebas en lugar de la caja de filtros se pierde la precisión que proporciona el conocimiento exacto de sus dimensiones (de la caja de filtros), la montura de pruebas da también algunas ventajas importantes, como la



FIGURA 2.20: Montura de pruebas del telescopio con la montura para la fibra.

posibilidad de utilizar un CCD en tiempo real para localizar el foco Cassegrain del telescopio y la posición aproximada del centro del detector.

Sin embargo, debido a la falta del sistema de verificación de entrada del haz en la fibra, se hizo necesario el utilizar el método de ensayo-error hasta lograr que el haz ingrese en la fibra, utilizando la vista como método de retroalimentación. Este método, aunque totalmente manual, fue efectivo para tomar las primeras imágenes de prueba a una fuente puntual.

Capítulo 3

Primeras observaciones

Las pruebas iniciales realizadas al espectrógrafo Ebert-Fastie se llevaron a cabo en la temporada de mantenimiento de la noche del 7 al 12 de agosto de 2007. Los objetivos de la observación fueron los siguientes:

1. Probar la eficiencia del arreglo óptico propuesto para verificación del centrado de objetos puntuales en la fibra óptica
2. Probar el controlador electrónico y del programa de control para el motor de pasos de control de enfoque de la fibra óptica
3. Probar las fibras ópticas acopladas al telescopio y al espectrógrafo
4. Comprobar los parámetros de diseño del instrumento: resolución, eficiencia y estabilidad mecánica y térmica

3.1 Primera prueba de observación

3.1.1 Prueba de centrado de objetos puntuales

El inicio de las observaciones se llevó a cabo la noche del 7 de junio poniendo a prueba el arreglo óptico del divisor de haz dentro de la caja de filtros para verificar el centrado de objetos puntuales (Figura 2.18). Debido a que para esto sólo era importante comprobar

si la cámara web tenía suficiente sensibilidad para observar el apuntado del objeto (lo que se muestra en una pc), únicamente se buscó un objeto brillante y se examinó si la cámara era sensible a la cantidad de luz incidente, sin importar momentáneamente la fibra y el espectrógrafo.

El primer objeto apuntado fue *Arcturus*, que es una estrella de magnitud visual -0.06, del tipo espectral K2 III p y $T_{eff}=4290K$, un objeto adecuado para observaciones espectroscópicas a alta resolución. Sin embargo, ni siquiera un objeto de esta magnitud se pudo observar con la cámara web una vez que había sido reflejado y transmitido dos veces en el divisor, más la reflexión en el espejo plano de la entrada de la fibra.

Descartada entonces esta opción, se cambió el arreglo del divisor de haz por la montura de pruebas del telescopio (Figura 2.20). Aunque tal opción fue propuesta y tomada justo en el momento de realizar las pruebas, resultó ser adecuada para cumplir la mayoría de los objetivos propuestos de la observación. Junto con el uso de este arreglo se utilizó además el CCD en tiempo real Hitachi KP-D581, con el que se centró inicialmente a *Arcturus* y se enfocó provisionalmente. Una vez conseguido esto, se cambió el CCD por la montura para la fibra, tal como se muestra en la Figura 2.19. El proceso de apuntado se realizó mediante ensayo-error, y ya con imágenes en el CCD de Spectral Instruments del espectrógrafo.

3.1.2 Enfoque de las fibras ópticas

El siguiente paso para posibilitar la observación fue el enfoque de la fibra óptica por medio del controlador electrónico. Para esto se consideró apuntar la fibra, sin el telescopio, a cualquier fuente luminosa (no estelar) y con la rejilla de difracción en el orden cero.

Durante la primera noche de observación, en el proceso de enfoque, surgió un problema en la colocación de la montura para la fibra, que aparentemente había quedado demasiado adelantada con respecto al plano focal del espectrógrafo, haciendo imposible enfocar correctamente con sólo retroceder por medio del programa de control la

estación móvil de soporte de la fibra.

Este inconveniente se solucionó adelantando el CCD, con todo y montura, para que el mosaico quedara más cerca del plano focal del espectrógrafo, y se ajustara entonces con movimientos finos desde el programa de control, por medio de la tarjeta electrónica.

La Figura 3.1 muestra dos imágenes del foco alcanzado antes de la primera observación con el instrumento acoplado al telescopio.

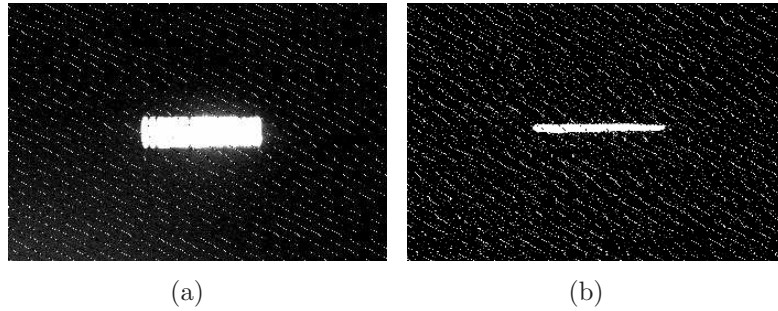


FIGURA 3.1: Imágenes de enfocado de la fibra óptica. (a) Imagen tomada durante la primera prueba de enfoque. Se observa un buen enfoque, aunque inicialmente se creyó que no era el adecuado debido a que la luz comenzaba a dispersarse, lo que aparentaba un ancho mucho mayor de la rendija; (b) Imagen tomada después de adelantar el mosaico del CCD. Aunque se observa un ancho de la rendija más cercano al real, y esta última prueba se consideró la definitiva, el enfoque no es el mejor.

De las imágenes anteriores se obtienen las siguientes conclusiones respecto al foco y al alineado:

- a) La imagen de la Figura 3.1(a) se obtuvo habiendo nivelado toda la óptica del espectrógrafo con respecto a la base del instrumento, lo cual era en realidad un dato erróneo, porque el eje óptico del espectrógrafo estaba inclinado con respecto a la base del instrumento. Esto provocó que, aunque la rejilla de difracción se hallara por ajuste en el orden cero, la luz incidiera en ella con un pequeño ángulo, haciendo que en la imagen la rendija apareciera con una cierta abertura (que realmente es el inicio de la dispersión de la luz), aparentando falta de enfoque, y provocando que este ajuste se considerara erróneo, aunque en realidad era

correcto

- b) La imagen de la Figura 3.1(b) fue obtenida después de desplazar el CCD con todo y montura hacia adelante, con el fin de que el mosaico quedara más cerca del plano focal del instrumento. Al realizar estos ajustes, el eje óptico se alineó con respecto al plano del espectrógrafo, por lo que las nuevas pruebas de enfoque ya no mostraron dispersión de la luz. Después de varias pruebas, el mejor enfoque alcanzado con esta configuración es el mostrado en la Figura 3.1(b). Sin embargo, no es el óptimo, debido a que tanto la fibra como el detector no se hallaban a la distancia focal adecuada

Las dos pruebas de enfoque, además, se realizaron apuntando directamente a una fuente luminosa sin colocar ningún arreglo óptico que generara un haz $f/12$. La consecuencia principal de lo anterior es que a la salida la fibra óptica genera un haz menor a un $f/8$, con lo que la luz que incide sobre el colimador no alcanza a llenar en su totalidad la zona del espejo que debería, lo cual tiene consecuencias en la resolución del espectrógrafo. Aunque este error en el procedimiento de enfoque se continuó realizando, desafortunadamente, en cada prueba posterior, se soluciona colocando una lente $f/12$ entre el camino óptico de la fuente y la entrada de la fibra, con el fin de que el cono de luz a la salida de la fibra sea efectivamente un $f/8$. Sin embargo, como se comprobó eventualmente en los resultados finales, las consecuencias de este error no fueron graves.

3.1.3 Primera imagen del espectrógrafo

Una vez establecido el foco óptimo, se obtuvo la primera imagen espectroscópica estelar durante el proceso de actualización. Ya que el objetivo en la primera noche era comprobar el funcionamiento general de todo el instrumento, se apuntó indistintamente a cualquier objeto brillante, escogiendo un objeto de magnitud 2. La Figura 3.2 muestra esta primera imagen, realizada con la rejilla de 400 l/mm durante un

periodo de exposición de aproximadamente minuto y medio, sin considerar una región particular del espectro.

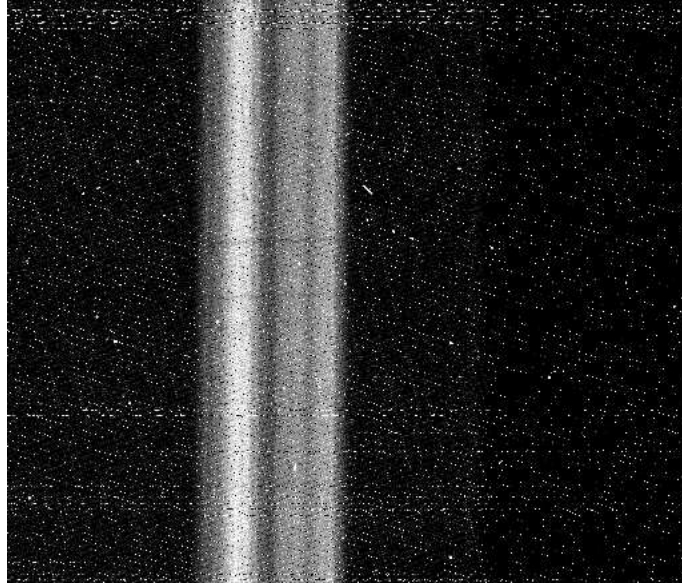


FIGURA 3.2: Primera imagen espectroscópica de un objeto estelar obtenida con el espectrógrafo Ebert-Fastie del OAGH, durante el proceso de actualización.

De esta prueba inicial se puede analizar lo siguiente:

- a) A lo largo del eje de dispersión, que corre verticalmente (el eje y), se muestran dos zonas verticales que no contienen información, resultado de los espacios vacíos entre fibras en la rendija, tal como se anticipó en la Figura 2.1 y la subsección 2.1.1
- b) Aproximadamente en la parte central se aprecian débilmente dos líneas horizontales de absorción, no identificadas en esta etapa de la actualización, ya que no era éste el objetivo principal de esta primera etapa
- c) Existe una gran cantidad de ruido electrónico sobre toda la superficie del detector, que se muestra como un número indeterminado de puntos blancos sobre todo el fondo oscuro de la imagen. La fuente de este efecto no se buscó en ese momento

Los defectos observados en la imagen, debidos a la etapa de actualización en que se halla el espectrógrafo, y a factores relacionados con la operación y los periodos de mantenimiento del OAGH, pueden corregirse resolviendo los siguientes puntos:

- a) El diseño y construcción de un sistema definitivo y confiable de verificación de centrado del objeto dentro de la fibra, para solucionar básicamente tres problemas: 1) que no toda la luz en el foco Cassegrain del telescopio cae centrada en la fibra, provocando que el ingreso directo de la luz no sea con el ángulo adecuado (el de un haz $f/12$), lo que hace que a la salida el haz no sea un $f/8$, sino un cono más pequeño; 2) que una cierta cantidad de luz que ingresa a la fibra lo hace después de reflejarse en las paredes de aluminio del orificio por donde pasa el haz antes de llegar a la entrada de la fibra (Fig. 2.19(b)), perdiendo mucha de la luz del objeto; y 3) que, por lo tanto, se requiera de tiempos de exposición más largos que con la fibra iluminada integralmente
- b) El empleo de un sistema de guiado retroalimentado para evitar que, después de cierto tiempo (de tres a seis minutos aproximadamente), dependiendo de la exactitud del centrado inicial, el objeto salga por completo o en su mayoría del campo de la fibra, haciendo algunas veces inútiles los últimos minutos de la exposición (que por lo explicado en el inciso anterior era necesario). Esto aun con el sistema de guiado automático sin retroalimentación, debido fundamentalmente al pequeño campo de $400\mu\text{m}$ de ancho de la fibra, que, que representa aproximadamente 20 segundos de arco en el cielo.
- c) La colocación provisional del instrumento sobre el piso de la planta del telescopio, únicamente con su base de nivelación durante este periodo de pruebas, que podría generar inestabilidades en la imagen durante la misma observación, o incluso desajustes en el alineado, que podrían presentarse no sólo durante la observación sino en cualquier otro periodo de tiempo
- d) El proceso de enfoque, que por la colocación provisional de los instrumentos utilizados para la observación (todos en el piso del telescopio), no es el óptimo para

el telescopio —además del de la fibra—, puesto que el enfoque se realiza desde el piso de control, por medio de ensayo y error y retroalimentación manual

- e) Los efectos del ruido electrónico del controlador sobre el CCD en la imagen final, pues inicialmente se observó sin tomar en cuenta esta posibilidad. El ruido observado en la Figura 3.2 no fue en este momento asociado al controlador

Además de la imagen anterior, en la primera noche se intentaron tomar más imágenes del mismo objeto. Sin embargo, no fue posible centrar correctamente de nuevo el objeto dentro de la fibra, debido a la falta del sistema de verificación de centrado. Después de varios intentos de obtener más imágenes, se pensó incluso que habría problemas con el alineado, lo que era muy grave puesto que no había ocurrido durante el periodo de observación ningún acontecimiento que lo provocara, como cambios drásticos de temperatura, o algún movimiento violento sobre el espectrógrafo. Lo anterior obligó a la verificación del alineado antes de realizar cualquier otra obtención de imágenes.

3.2 Desarrollo posterior de las observaciones

Las imágenes adquiridas en las noches siguientes tuvieron el objetivo de probar las características por diseño del instrumento, específicamente la resolución, ya que la estabilidad mecánica y la estabilidad térmica todavía se hallan en proceso de optimización, al igual que la eficiencia óptica del sistema.

En el caso de la estabilidad mecánica, como el instrumento aun no está anclado a la base del telescopio, no se caracteriza todavía su efecto sobre las observaciones, y en el de la estabilidad térmica, debe aun optimizarse tanto el forro interno original de lana de fibra de vidrio como el cajón externo de madera. No obstante lo anterior, de acuerdo con las pruebas iniciales reportadas en Furenlid & Cardona (1988), puede tolerarse hasta un cambio de 5°C sin necesidad de volver a enfocar.

Con respecto a la eficiencia óptica, las rejillas de difracción han sido verificadas y

limpiadas en el laboratorio de películas delgadas del INAOE, quedando por realizar la aluminización del espejo principal del espectrógrafo para alcanzar la máxima eficiencia, así como asegurar que el haz luminoso del telescopio ingrese completamente y al ángulo correcto en el campo de la fibra óptica. Esto se logrará cuando se implemente el sistema de verificación de centrado de objetos puntuales propuesto en la sección 2.3.

3.2.1 Verificación del alineado y del plano focal del espectrógrafo

El día siguiente a la primera noche de observación se corrigió el desajuste aparente en el plano focal del espectrógrafo, recorriendo hacia atrás la montura que sostiene la fibra óptica. El retroceso del CCD, innecesario porque el enfoque inicial era adecuado, como lo demuestra el análisis de la Figura 3.1, no introduce ningún error puesto que la medida establecida para el foco del instrumento no varía.

Mucho más importante fue la verificación del alineado de todo el instrumento utilizando el haz láser. Para realizar esto, antes de modificar la colocación de los elementos ópticos, se comprobó que su nivelación era correcta, mostrando que el defecto de la imagen de la Figura 3.1 fue provocado por el error de nivelación del eje óptico con el plano del instrumento, al incidir el haz principal del láser sobre el centro del mosaico del CCD, pero no paralelo a los 204mm correspondientes del eje óptico.

Lo anterior indica que podrían ocurrir desajustes en el espejo principal durante el transcurso de las observaciones en la misma temporada, lo que se corregirá en su mayor parte al anclar el espectrógrafo a la base del telescopio, a la par que se realizan pruebas más precisas, como el empleo de palpadores en los elementos ópticos durante el transcurso de la observación.

3.2.2 Obtención de imágenes

Con el objeto de realizar las siguientes pruebas, nuevamente el objeto escogido fue *Arcturus*. Para corroborar la alineación y el enfoque realizados previamente, antes de tomar imágenes de objetos puntuales, la noche del 8 de junio se probó directamente

el espectrógrafo apuntando la fibra a una fuente de luz blanca, sin utilizar ninguna óptica de acoplamiento, obteniéndose la imagen de la Figura 3.3.

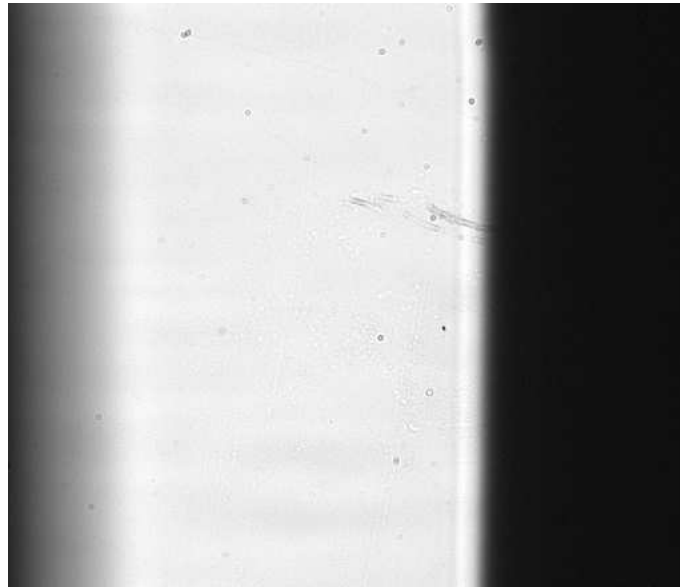


FIGURA 3.3: Prueba del alineado del espectrógrafo apuntando a una fuente de luz blanca. Las líneas verticales oscuras de los espacios sin fibras no se observan en esta imagen debido a la intensidad de la fuente luminosa y a que no se utilizó ningún arreglo óptico a la entrada de la fibra, por lo que la luz dispersada es en todas direcciones. Esta dispersión de la luz corrobora el correcto alineado de instrumento.

La prueba realizada con la imagen de la Figura 3.3 comprobó de manera experimental el correcto alineado del espectrógrafo.

El 9 de junio se realizó una prueba más de enfoque (Figura 3.4) y una más del alineado, ambas con el Sol (Figura 3.5) y con la rejilla de 400 l/mm.

Aunque esa noche no se tomaron imágenes que aportaran nuevos espectros, debido a que fue una noche nublada a partir de las 12:30 a.m., el análisis de las imágenes de las Figuras 3.4 y 3.5 proporcionaron datos muy significativos para determinar de manera específica lo siguiente: a) el espectrógrafo permanece alineado en términos generales, aún sin tener una colocación definitiva que garantice tanto estabilidad mecánica como estabilidad térmica, con las limitaciones debidas al desajuste del eje óptico, mencionado previamente; y b) el controlador electrónico introduce demasiado ruido en el detector, transmitido de manera directa a través de las conexiones eléctricas del motor

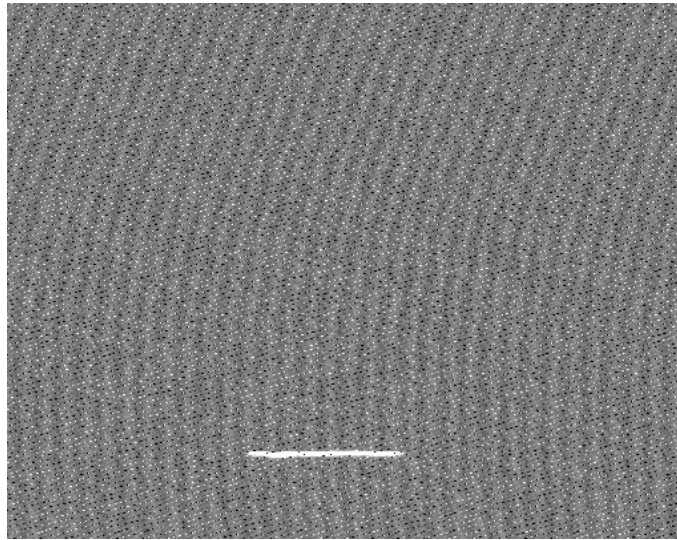


FIGURA 3.4: Imagen de la rendija obtenida apuntando con la fibra directamente al Sol.

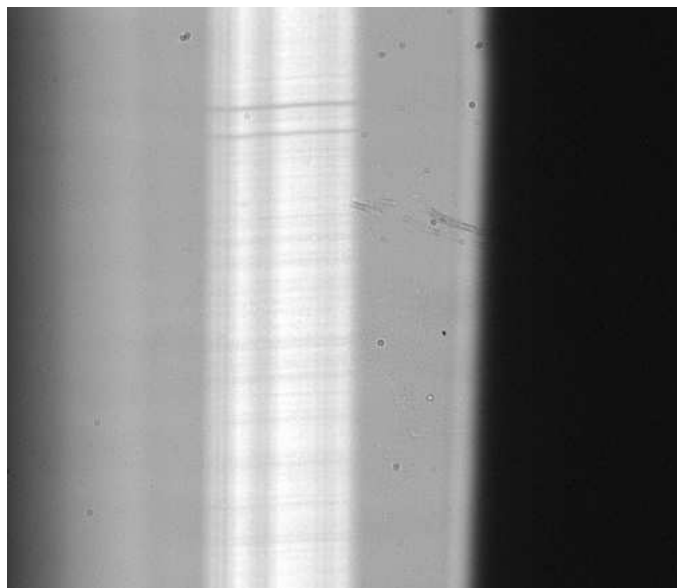


FIGURA 3.5: Espectro solar en la región del doblete del sodio. La prueba realizada demuestra una vez más la permanencia del alineado del espectrógrafo.

de pasos con el controlador, del motor a la montura para la fibra y de ésta a la base metálica del espectrógrafo, que lo introduce directamente en el CCD. Esto se corrige definitivamente maquinando una montura para el CCD con una base aislante.

Como se puede observar en la imagen de la Figura 3.5, no aparecen ya los efectos

indeseables del ruido, ya que una vez que se llegó al foco mostrado en la Figura 3.4 por medio del programa de control y el controlador electrónico, éste se desenergizó por completo, aprovechando provisionalmente que la pérdida de torque no provoca cambios en la estación móvil de la fibra. Esto asegura provisionalmente la eliminación de ruido en la imagen adquirida.

En la Figura 3.4 se observa un desajuste en la imagen de la rendija con respecto a la altura a la que el haz principal incide sobre el detector, que debería estar centrado horizontalmente sobre este último. Este desajuste debe corregirse cuando el espectrógrafo se fije en su base definitiva, y cuando se automatice el movimiento del ángulo de inclinación de la rejilla, para así asegurar que ésta siempre se mueve con la misma precisión y al ángulo de inclinación correcto para centrar en el detector una región previamente determinada del espectro. Se descarta que la óptica se halle desnivelada porque la imagen de la rendija no comienza a dispersarse como en la Figura 3.1, sino que el orden cero incide correctamente en el detector.

La noche del 10 de junio fue fundamental para mostrar que el ruido introducido por el controlador se incrementa conforme transcurre el tiempo, posiblemente por efectos de temperatura, tal como lo muestran las imágenes de la Figura 3.6, que fueron tomadas con diferencias de aproximadamente 20 minutos entre ellas.

A partir de esta noche, ya que estaba comprobado que el problema del ruido era introducido por el controlador, y con el conocimiento de que la alineación del espectrógrafo es confiable, se decidió ya no variar el enfoque para no energizar el controlador electrónico y por lo tanto no introducir ruido en la imagen del CCD.

De esta serie de pruebas, además, se obtuvo la práctica suficiente para colocar los objetos puntuales dentro del campo de la fibra, con la mayor exactitud posible, sin el sistema de verificación de centrado. Por lo tanto, la noche del 11 de junio se pudieron tomar imágenes espectroscópicas de *Arcturus* y de *Vega*, de tipo espectral AOV, de magnitud aparente 0.03 y T_{eff} de 9602K, escogida principalmente por su brillo ya con un enfoque adecuado y a distinta resolución, intercambiando al menos dos rejillas de

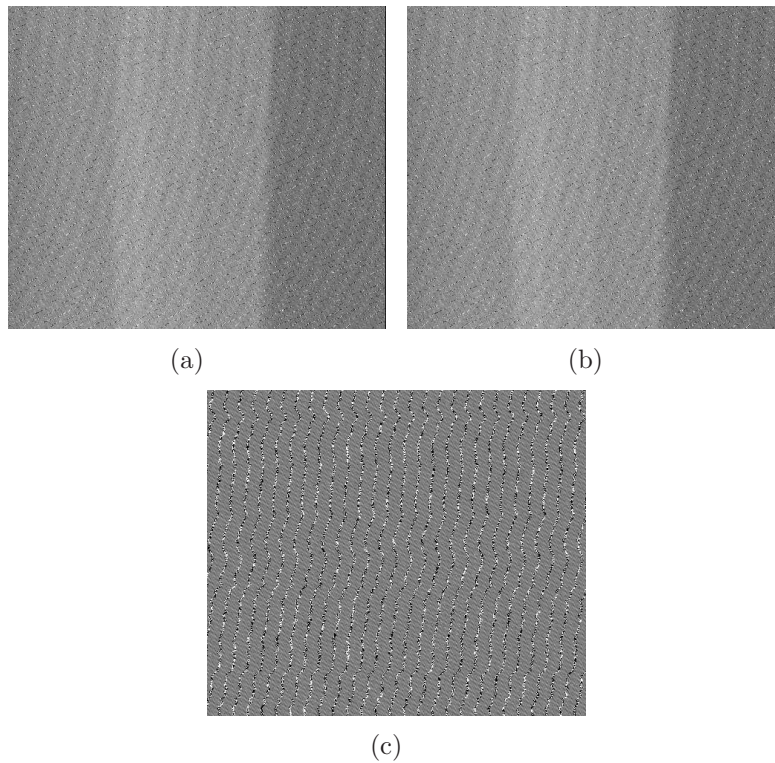


FIGURA 3.6: Imágenes que muestran el incremento del ruido provocado por el módulo de control. (a) Primera imagen en la que se trató de tomar un espectro. El ruido electrónico es notable; (b) Segunda imagen en que se intentó tomar un espectro, aproximadamente con 20 minutos de diferencia con la anterior. El ruido aparentemente es similar; y (c) Último intento por tomar un espectro la noche del 10 de junio. En esta última imagen el ruido electrónico provocado por el controlador es muy grave, y satura por completo la imagen.

difracción, y evitando el problema del ruido.

La imagen de la Figura 3.7 muestra uno de los espectros estelares tomados la noche del 11 de junio, a *Vega*, con la rejilla de 150 l/mm, en la región de $H\alpha$.

De la imagen se observa que, para la rejilla de 150 l/mm, el espectro se dispersa en el primer orden (tal como está indicado en Furenlid & Cardona (1988)), observándose además que hay otros órdenes que también inciden en el detector, mostrándose como luz dispersada a la izquierda del espectro. El espectro, centrado en $\lambda = 6564\text{\AA}$, aparece correctamente en el centro del detector, a diferencia de las imágenes mostradas en las Figuras 3.4 y 3.5.

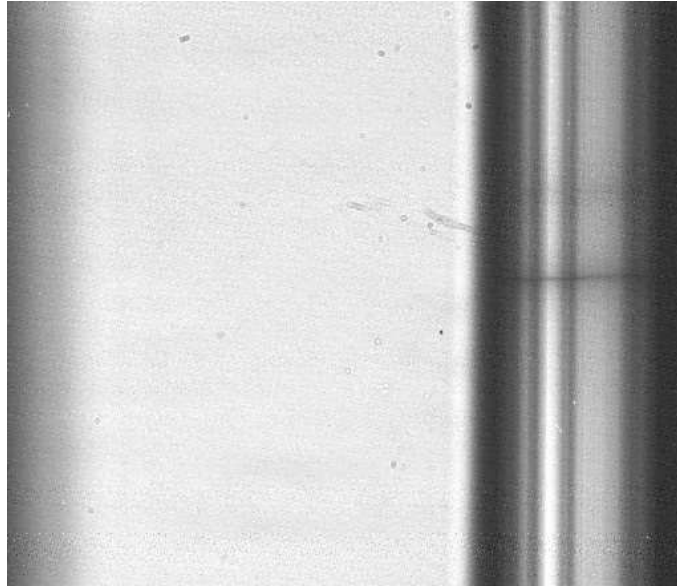


FIGURA 3.7: Espectro de *Vega* en la región de $H\alpha$ ($\lambda = 6564\text{\AA}$), tomado con la rejilla de 150 l/mm.

La Figura 3.8 muestra la imagen del espectro de *Arcturus* en la región del doblete del sodio, con la rejilla de 400 l/mm. En este caso, el espectro dispersa en el segundo orden, mostrándose en el extremo izquierdo del detector.

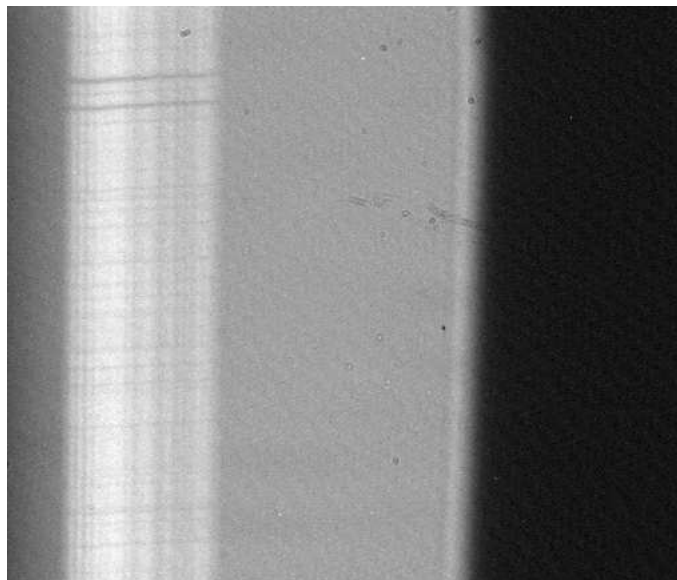


FIGURA 3.8: Espectro de *Arcturus* en la región del doblete del sodio ($\lambda = 5892.6\text{\AA}$), tomado con la rejilla de 400 l/mm.

A diferencia de la imagen de la figura 3.7, el espectro, que se calcula centrado en $\lambda = 5892.6\text{\AA}$, no lo está con relación al detector, aun tomándose las imágenes en la misma noche y dentro de periodos de tiempo cercanos.

El último espectro que se muestra de la observación de la noche del 11 de junio (Figura 3.9), es igualmente de *Vega*, y también en la región de $H\alpha$, pero con la rejilla de 400 l/mm .

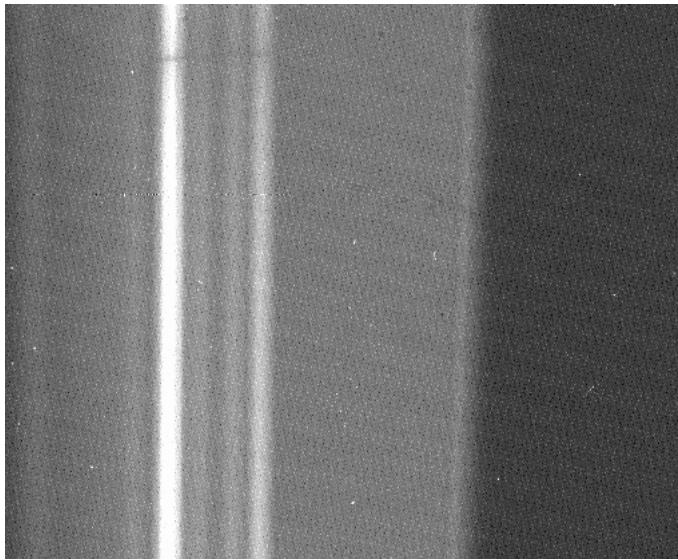


FIGURA 3.9: Espectro de *Vega* en la región de $H\alpha$ ($\lambda = 6564\text{\AA}$), tomado con la rejilla de 400 l/mm.

De esta imagen se observa también que el espectro se dispersa en el segundo orden, pero en este caso, al igual que en la imagen de la Figura 3.9, el espectro no aparece centrado horizontalmente en el detector, sino desfasado hacia la parte superior del detector.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Primeros resultados

Los primeros espectros obtenidos con el espectrógrafo Ebert-Fastie del OAGH que se analizaron (provenientes de las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9), produciendo por lo tanto los primeros resultados del instrumento, fueron de *Vega* en la región de $H\alpha$, con las rejillas de 150 l/mm y de 400 l/mm, y de *Arcturus*, en la región del doblete del sodio con la rejilla de 400 l/mm, que se muestran en la Figura 4.1.

La importancia de estos espectros es que fueron obtenidos en una región espectral específica mediante fórmulas de diseño del espectrógrafo y a un poder de resolución conocido previamente, también mediante fórmulas de diseño. Los espectros se muestran tal cual se obtuvieron la noche del 11 de junio de 2007, sin calibración.

El objetivo fundamental de estos primeros espectros fue recuperar las características especificadas por diseño del espectrógrafo, concretamente la de resolución, y generar un precedente de observación para posteriormente determinar la eficiencia y la estabilidad mecánica y térmica, una vez satisfechos los requerimientos de la colocación definitiva en la columna del telescopio, la optimización del método de aislamiento térmico, el alumbrado del espejo principal y la colocación de un sistema eficiente de centrado de objetos puntuales, así como las demás correcciones de los problemas surgidos durante este primer periodo de observación.

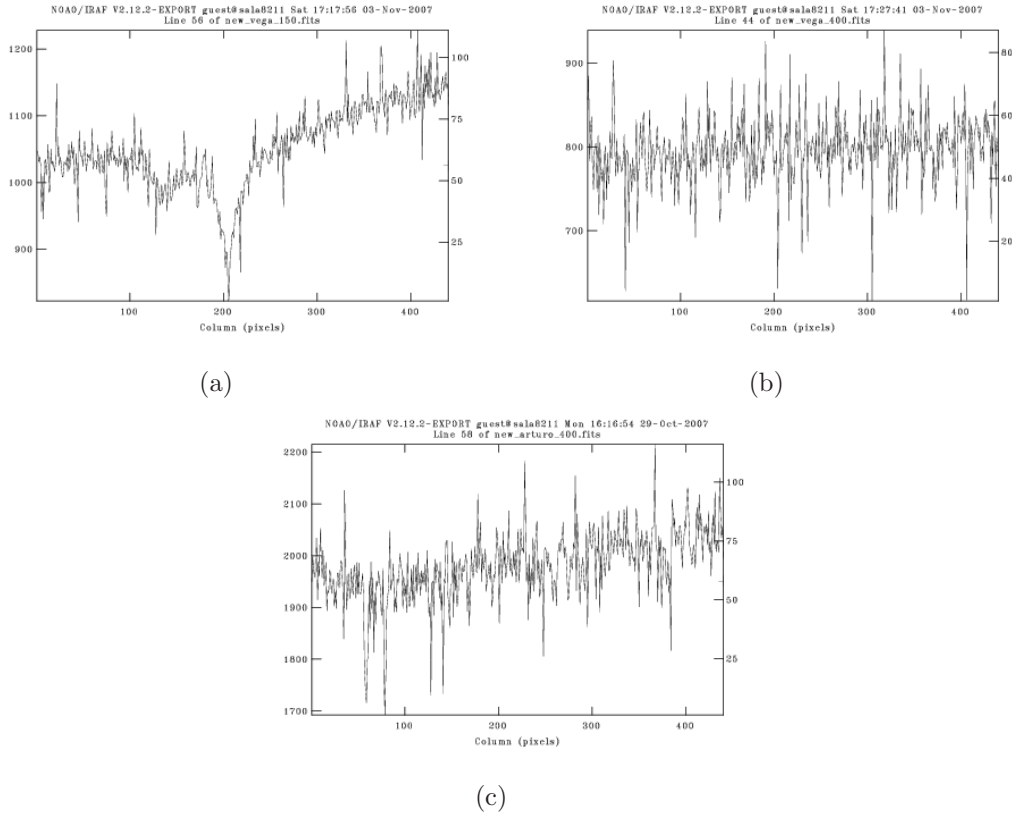


FIGURA 4.1: Primeros espectros estelares obtenidos con el espectrógrafo Ebert-Fastie. (a) Espectro de *Vega*, centrado en $H\alpha$ ($\lambda = 6563\text{\AA}$), y a una R de 1931 según los cálculos por diseño con la rejilla de 150 l/mm; (b) Espectro de *Vega* en la región de $H\alpha$ ($\lambda = 6563\text{\AA}$), con la rejilla de 400 l/mm a una R aproximada de 10938; (c) Espectro de *Arcturus* en la región del doblete del sodio ($\lambda = 5892.6\text{\AA}$) con la rejilla de 400 l/mm, a una R de 9821.

Con el fin de determinar si la resolución del instrumento coincide con la resolución por diseño, y de determinar el intervalo espectral observado, se decidió comparar los espectros obtenidos con el espectrógrafo Ebert-Fastie con otros espectros observados de los mismos objetos a una mayor resolución.

4.2 Comparación cualitativa con espectros

Para establecer si la longitud de onda central observada y la resolución son las que se esperan, se utilizó un espectro observado de *Arcturus* a una R de 150 000 y una señal a ruido cercana a 1000 en el intervalo de 3727-9300 \AA (Bertone, E., comunicación

privada), y uno de *Vega* a una R cercana a 100 000, con una señal a ruido superior a 1000 y sobre un intervalo espectral desde ~ 3900 -8800 Å (Bertone, E., comunicación privada), degradados por medio de un programa idl a la resolución esperada por el espectrógrafo Ebert-Fastie, con el fin de realizar la comparación.

De acuerdo a la resolución calculada para cada rejilla con la Ecuación A.15 y tomando en cuenta las características ópticas del dispositivo, se tiene que el poder de resolución R (ec. A.6) esperado para cada región central de los espectros observados es:

λ central	Rejilla	R
H α ($\lambda = 6563\text{Å}$)	150 l/mm	1931
H α ($\lambda = 6563\text{Å}$)	400 l/mm	10938
Doblete del sodio ($\lambda = 5892.6\text{Å}$)	400 l/mm	9821

Con base en esta información, y a través de un programa en IDL, por medio de filtros gaussianos se degradó el espectro a alta resolución de *Vega*, centrándolo en H α , a una R de 1931 (Figura 4.2) y a una de 10938 (Figura 4.3). Se hizo lo mismo con el espectro a alta resolución de *Arcturus*, centrándolo en el doblete del sodio, a una R de 9821 (Figura 4.4).

Con la posibilidad de modificar por medio del programa el intervalo espectral de los espectros degradados, estos se ajustaron entonces en la posición observada del espectro bajo prueba (el obtenido con el espectrógrafo Ebert-Fastie), de modo que se comprobó mediante este procedimiento que la resolución esperada del espectrógrafo era correcta (dado que aun no se han colocado lámparas de comparación, que es la manera convencional de establecer los intervalos espectrales), y la dispersión en Å por pixel real del instrumento. El primer espectro con el que se realizó este proceso fue con el de *Arcturus*, logrando ajustarse sin ningún problema el intervalo espectral, tal como se muestra en la Figura 4.5.

Para hacer la comparación el archivo del espectro en formato fits se transforma a un archivo ASCII donde para cada pixel se tiene un punto, ya sea para el eje espacial o el

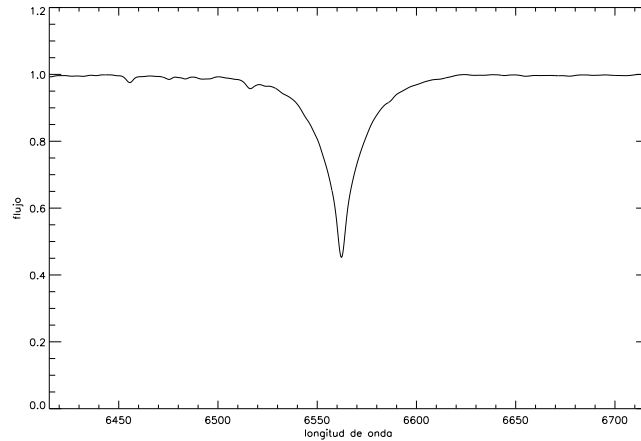


FIGURA 4.2: Espectro observado de *Vega*, con una R originalmente $\sim 100\,000$, degradado a una R de 1931, en la región central de $H\alpha$ y un intervalo entre $\lambda_1 = 6415\text{\AA}$ y $\lambda_2 = 6715\text{\AA}$.

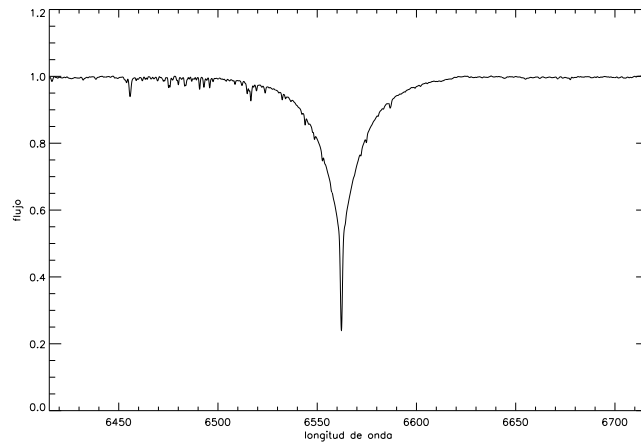


FIGURA 4.3: Mismo espectro original que el de la Figura 4.2, pero degradado a una R de 10938, en la región central de $H\alpha$ y un intervalo entre $\lambda_1 = 6415\text{\AA}$ y $\lambda_2 = 6715\text{\AA}$.

de flujo. Para hacer esta primera comparación el análisis se centra en el eje espectral, teniéndose un intervalo de 440 píxeles transformados en 440 puntos.

De las imágenes se observa que el espectro de la Figura 4.5(a) presenta una pendiente en donde debiera haber un continuo (tal como lo muestra la Figura 4.5(b)) debido a que el espectro observado no tiene otro procesamiento más que el promedio del flujo, haciendo que no todas las líneas de absorción del espectro observado con el

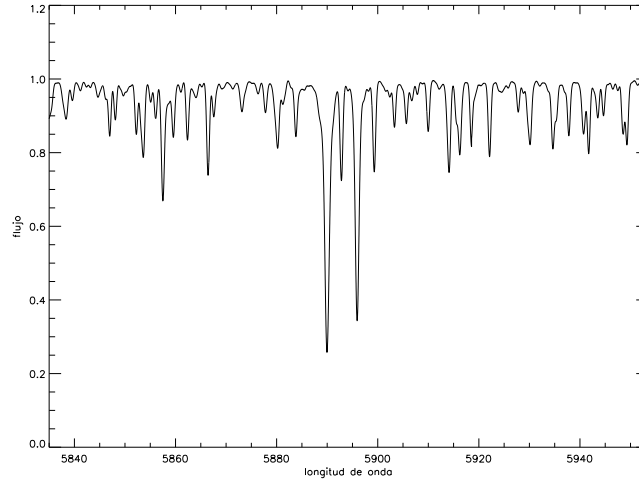


FIGURA 4.4: Espectro observado de *Arcturus*, originalmente a una R de 150 000, degradado a una R de 9821, en una región entre $\lambda_1 = 5835\text{\AA}$ y $\lambda_2 = 5955\text{\AA}$.

Ebert-Fastie correspondan proporcionalmente a la profundidad del espectro observado a una R de 150 000, y que las cuentas del espectro observado por el Ebert-Fastie se hallen en el rango de entre 1.8×10^5 y 2.3×10^5 .

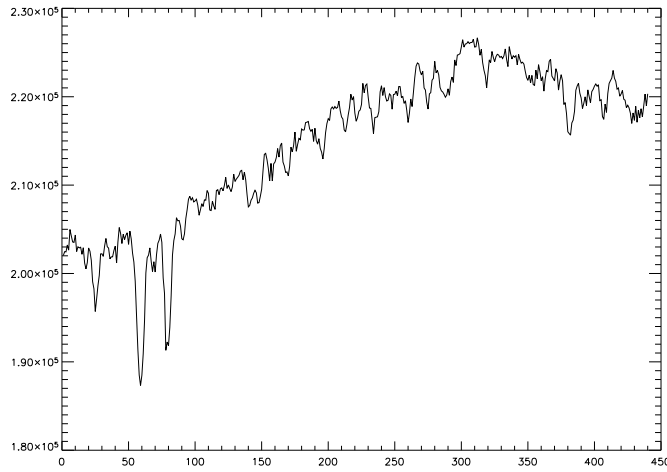
En comparación con el espectro de la Figura 3.8, el espectro de la Figura 4.5(a) es mejor porque, al transformarse de dos dimensiones a una dimensión, como estaba originalmente, mejora la señal a ruido, definiéndose más claramente su perfil.

La comparación permite también obtener las siguientes características para la rejilla de 400 l/mm en un intervalo central aproximado de 5892.6 Å:

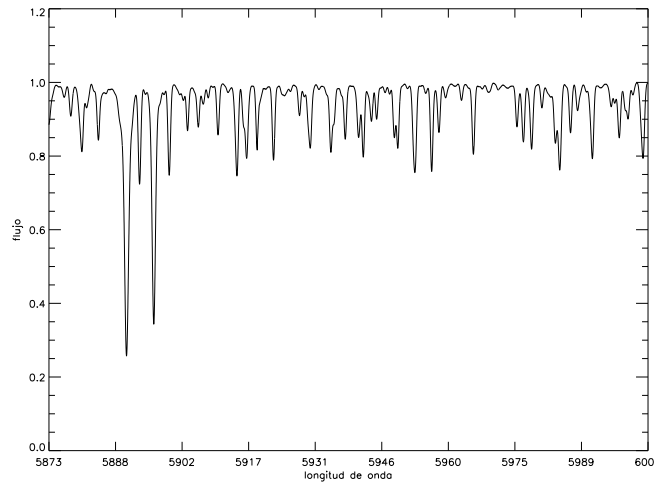
1. Del espectro degradado en R , el intervalo espectral preciso que el detector observa con la rejilla de 400 l/mm es (ec. 4.1):

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 6002\text{\AA} - 5873\text{\AA} = 129\text{\AA}, \quad (4.1)$$

que es prácticamente lo esperado, considerando que de Furenlid & Cardona (1988) la dispersión lineal recíproca es de $12\text{\AA}/\text{mm}$ para la rejilla de 400 l/mm (ec. A.5) y se tienen 440 pixeles iluminados en el CCD, cada uno de $24\mu\text{m}$



(a)



(b)

FIGURA 4.5: Primera comparación entre los espectros estelares observados por el espectrógrafo Ebert-Fastie y el observado a una R de 150 000, degradado a la R que se esperaba obtener con el Ebert-Fastie. (a) Espectro de *Arcturus* en la región del doblete del sodio a una R de 9821 según los cálculos por diseño y la región central del espectro; (b) Espectro observado de *Arcturus* en la misma región y degradado a la misma R , ajustando el intervalo espectral con el del espectro observado por el Ebert-Fastie.

2. Dado que se tienen 440 puntos sobre el eje espacial en el espectro observado, para un intervalo de 129\AA se tiene una dispersión de $0.29\text{\AA}/\text{pixel}$, que para un tamaño de pixel de $24\mu\text{m}$, arroja una dispersión lineal recíproca de $12.22\text{\AA}/\text{mm}$, prácticamente lo demostrado en Furenlid & Cardona (1988)

La segunda imagen con que se realizó este proceso fue con uno de los espectros de *Vega*, el obtenido con una R de 10938. La comparación se muestra en la Figura 4.6. Al igual que el espectro mostrado en la Figura 4.5(a), la imagen de la Figura 4.6(a) está bajo las mismas condiciones de falta de procesado. En este caso el rango del flujo está entre 820 y 920 cuentas.

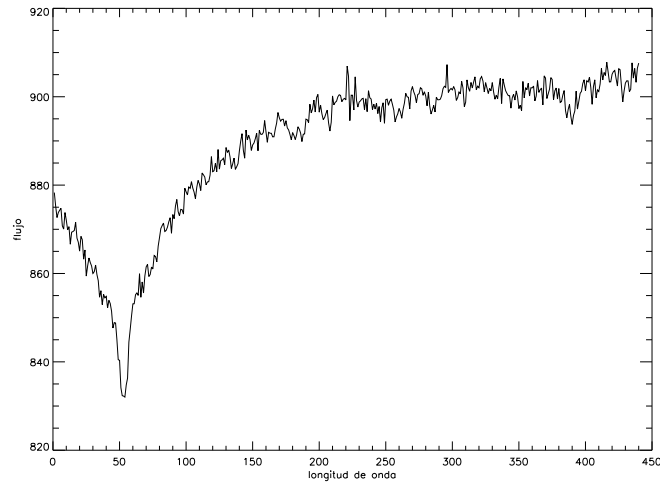
El espectro de la Figura 4.6(a), además, no está correctamente centrado en $H\alpha$, sino que está recorrido hacia la izquierda en el intervalo espectral, provocando que no sea sencillo identificarlo con exactitud, dado que en el espectro degradado en R no hay suficientes líneas más allá de $H\alpha$ conforme se incrementa la longitud de onda.

Aunque este proceso no arroja nuevos resultados para el intervalo espectral y la resolución, comprueba experimentalmente que existe repetibilidad en las características obtenidas para espectros observados con la misma rejilla de difracción, puesto que dada la dificultad para hallar por comparación el intervalo observado del espectro de *Vega* con el Ebert-Fastie, éste pudo ajustarse programando en el espectro degradado un intervalo de 129\AA , como se había encontrado inicialmente con el espectro de *Arcturus*, y observando que los espectros efectivamente corresponden el uno al otro.

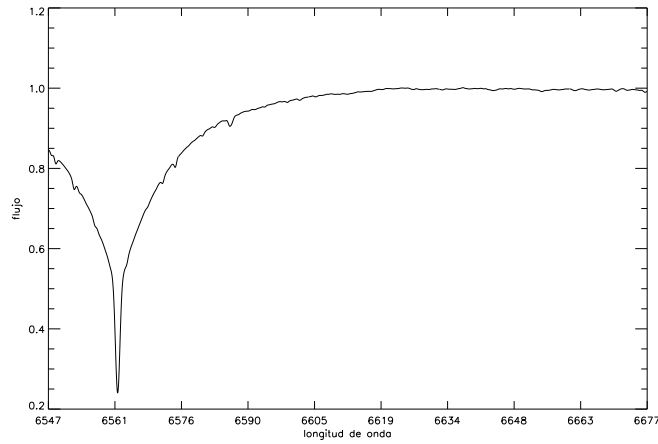
4.3 Comparación con otros espectrógrafos del OAGH

Dentro del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro se encuentran otros dos instrumentos capaces de realizar espectroscopía: el espectrógrafo Boller & Chivens y el espectrógrafo asociado al instrumento LFOSC.

Debido a que el espectrógrafo Ebert-Fastie posee un rendija de ancho efectivo de $400\mu\text{m}$ y una rendija de ancho de resolución de aproximadamente $50\mu\text{m}$ (sección 1.4.2), puede demostrarse que el límite de resolución (la resolución espectral teórica) obtenida con el espectrógrafo Ebert-Fastie es mejor que el obtenido con el espectrógrafo Boller & Chivens, para anchos de rendija similares, y aun con una rejilla de mayor densidad. Adicionalmente, en cualquier caso el espectrógrafo Ebert-Fastie no sólo



(a)



(b)

FIGURA 4.6: Comparación entre los espectros estelares observados por el espectrógrafo Ebert-Fastie y el observado a una $R \sim 100\,000$, degradado a la R que se esperaba obtener con el Ebert-Fastie. (a) Espectro de *Vega* en la región de $H\alpha$ a una R de 10938 según los cálculos por diseño y la región central aproximada del espectro; (b) Espectro observado de *Vega* a una R aproximada de 100 000, degradado a una R de 10938, en la misma región, ajustando el intervalo espectral con el del espectro observado por el Ebert-Fastie.

mejora la resolución espectral sino que también es más eficiente, debido al ancho efectivo de la rendija de entrada.

Para que el espectrógrafo Boller & Chivens obtenga la misma cantidad de luz que el Ebert-Fastie, su rendija debe ser de $400\mu\text{m}$, con lo que su límite de resolución se

ve drásticamente disminuido. Este límite puede calcularse de las ecuaciones de diseño para los espectrógrafos Boller & Chivens (Ecuaciones 4.2 y 4.3, que sirven para calcular el ángulo de inclinación de la rejilla de difracción en función de la longitud de onda central a observar, y el límite de resolución en función del ancho de la rendija, el ángulo de difracción, el orden de dispersión para el que está optimizada la rejilla, su número de líneas por mm y la longitud focal de su colimador), donde se observa además que depende del ángulo de dispersión θ de la rejilla —a diferencia del espectrógrafo Ebert-Fastie, donde es independiente—, haciendo por lo tanto que además del poder de resolución el límite de resolución sea función de la longitud de onda central del intervalo espectral observado.

Para una rendija de 600 l/mm (es decir, 200 l/mm más que la rejilla usada para el Ebert-Fastie), y la longitud de onda central del doblete del sodio ($\lambda = 5892.6\text{\AA}$), se tiene entonces que, para el espectrógrafo Boller & Chivens:

$$\theta = \arcsen(5.62 \times 10^{-8} \lambda_c mn); \quad (4.2a)$$

$$\theta = 11.46^\circ. \quad (4.2b)$$

Y

$$\delta\lambda = \frac{10^4 w \cos(\theta + (\phi/2))}{mn f_{colimador}}; \quad (4.3a)$$

$$\delta\lambda = 5.12\text{\AA}, \quad (4.3b)$$

donde λ_c es la longitud de onda central del intervalo observado, m es el orden de difracción de la rejilla utilizada, n es su número de líneas por milímetro, w es el ancho de la rendija en μm , ϕ es el ángulo entre el haz incidente del colimador y el difractado por la rejilla (45° para el espectrógrafo Boller & Chivens del OAGH) y $f_{colimador}$ es la longitud focal del colimador. Lo anterior demuestra la enorme pérdida de resolución para obtener la misma cantidad de luz por la rendija de entrada, aunque en este caso

sí existe pérdida porque para el espectrógrafo Boller & Chivens se utilizó una rejilla de mayor dispersión.

Del mismo modo, empleando la misma rejilla de 600 l/mm (200 l/mm más densa que la del Ebert-Fastie), si es que se utiliza en el Boller & Chivens una rendija del mismo ancho que en el Ebert-Fastie, de 50μ , la resolución alcanzada es apenas similar a la alcanzada con el Ebert-Fastie, con su correspondiente atenuación en la energía que incide en el detector (exp. 4.4):

$$\delta\lambda = 0.64\text{\AA}, \quad (4.4)$$

mientras que para una rejilla de 400 l/mm (que no hay disponible para el Boller & Chivens del OAGH), suponiendo que trabaja en el primer orden (Expresión 4.5):

$$\theta = 7.61^\circ; \quad (4.5a)$$

$$\delta\lambda = 1.00\text{\AA}, \quad (4.5b)$$

lo cual demuestra la ventaja del espectrógrafo Ebert-Fastie sobre el Boller & Chivens¹.

La Figura 4.7 muestra espectros equivalentes a las resoluciones de $\delta\lambda = 5.12\text{\AA}$ y 0.64\AA , mostrando gráficamente los resultados de variar el ancho de la rendija en el espectrógrafo Boller & Chivens, y cómo influye esto en la resolución final.

Por otro lado, debido a que la rendija del espectrógrafo Boller & Chivens es una rendija de ancho variable mecánicamente, se especifica primero un poder de resolución o un límite de resolución deseado, y dependiendo de la longitud de onda central que se quiera observar se determina el ancho de la rendija. Entonces, si se calcula el ancho de la rendija necesario en el Boller & Chivens para obtener los mismos límites de resolución que se obtienen con el Ebert-Fastie, se demuestra también la elevada eficiencia de este último en comparación con el primero. Para una longitud de onda

¹No obstante, esto depende sustancialmente del caso científico de estudio

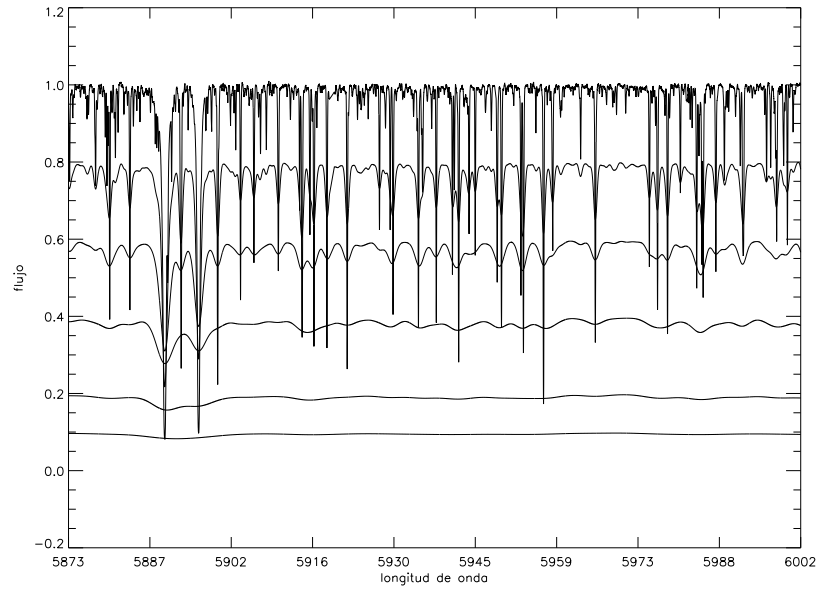


FIGURA 4.7: Comparación realizada utilizando el espectro observado de *Arcturus* a una R de 150 000 (el espectro de la parte superior), degradado a una R de 9207, 3955, 1984, 1150 y 661, que corresponden a un ancho de resolución de la rendija de 50, 116, 232, 400 y 696 μm , respectivamente, suponiendo el uso de una rejilla de 600 l/mm en el primer orden para el espectrógrafo Boller & Chivens.

central de $\lambda = 6563\text{\AA}$ ($\text{H}\alpha$), la Ecuación 4.6 muestra que, para el espectrógrafo Boller & Chivens, el ancho de la rendija necesario para obtener un límite de resolución de 3.40\AA , con la rejilla de 150 l/mm, es:

$$\theta = 3.17^\circ; \tag{4.6a}$$

$$w = \frac{\delta\lambda nm f_{\text{colimador}}}{10^4 \cos(\theta + \phi/2)}; \tag{4.6b}$$

$$w = 61.11\mu\text{m}, \tag{4.6c}$$

indicando que, para conseguir la misma resolución que con el espectrógrafo Ebert-Fastie, con la misma rejilla (150 l/mm), en el Boller & Chivens la rendija debe ser casi la octava parte del ancho efectivo de la rendija del Ebert-Fastie, haciéndolo útil entonces sólo para objetos puntuales brillantes (objetos estelares), contrariamente a lo que sucede con el espectrógrafo Ebert-Fastie.

Aunque, a excepción de la rejilla de 150 l/mm, las rejillas del espectrógrafo Boller & Chivens no son similares a las del Ebert-Fastie, puede demostrarse también que aun con las rejillas de mayor densidad del Boller & Chivens, para obtener los mismos límites de resolución la eficiencia es menor. Por ejemplo, el ancho de la rendija para las rejillas de 300 l/mm del Boller & Chivens en la misma longitud de onda central de $\lambda = 6563\text{\AA}$, para obtener la misma resolución de 3.40\AA , es (exp. 4.7):

$$w = 125.77\mu\text{m}, \quad (4.7)$$

demostrándose que aun con una rejilla del doble de densidad que la de 150 l/mm, el ancho efectivo de la rendija en el Ebert-Fastie es más del doble del ancho efectivo de la rendija en el Boller & Chivens para obtener la misma resolución.

De igual modo, comparando entre la rejilla de 600 l/mm del Boller & Chivens y la rejilla de 400 l/mm del Ebert-Fastie, para una longitud de onda central de 5892.6\AA , y una resolución de 0.6\AA , se obtiene el siguiente ancho de rendija para el espectrógrafo Boller & Chivens (exp. 4.8):

$$w = 46.88\mu\text{m}, \quad (4.8)$$

lo cual indica un ancho de rendija muy angosto. El último caso se presenta con la rejilla de 800 l/mm del Boller & Chivens, que trabaja en el segundo orden. Para lograr con esta rejilla una resolución de 0.15\AA , la máxima prestación del espectrógrafo Ebert-Fastie, por ejemplo, en $\lambda = 6563\text{\AA}$, se requiere un ancho de rendija de (Expresión 4.9):

$$w = 54.20\mu\text{m}, \quad (4.9)$$

presentándose el mismo caso que con la rejilla anterior de 600 l/mm, donde el ancho efectivo de la rendija para alcanzar la resolución esperada es muy angosto.

Para todos los casos anteriores se demuestra que el espectrógrafo Ebert-Fastie es un instrumento mucho más eficiente que el Boller & Chivens, puesto que siempre puede obtenerse una mejor resolución con una ancho de rendija efectivo mucho mayor, aun con una rejilla de menor densidad que la utilizada por el Boller & Chivens.

Finalmente, con relación al espectrógrafo asociado al instrumento LFOSC, y específicamente en cuanto a resolución (puesto que el LFOSC tiene características muy distintas a las del Ebert-Fastie, como poder realizar espectroscopía multiobjeto y ser un espectrógrafo y cámara para objetos débiles), el espectrógrafo Ebert-Fastie muestra ventajas muy claras, puesto que con los dos grismas con que dispone el instrumento LFOSC éste puede alcanzar apenas un límite de resolución de 13\AA y de 18\AA .

Apéndice A

Principios básicos de la espectroscopía

A.1 Generalidades de los instrumentos espectrales

Un *instrumento espectral* es un arreglo óptico que *dispersa* la radiación electromagnética y/o *aisla* una banda espectral específica. Todos, a excepción de la espectroscopía por láser (Thorne et al., 1999), se componen de tres elementos fundamentales: a) la fuente de radiación; b) un elemento de dispersión y/o aislamiento; y c) un detector.

En un instrumento espectral dispersivo, separación y aislamiento se llevan a cabo con un *elemento dispersor*, ya sea por refracción, por difracción o por interferencia de haces múltiples¹. En un instrumento espectral *no dispersivo* únicamente se aísla una banda espectral mediante esparcimiento, fluorescencia, reflexión o absorción de radiación (Butler & Laqua, 1995).

En astrofísica, a la técnica de absorción de radiación, que se emplea como un método simple para obtener información espectral, se le llama *fotometría con filtro*. Se lleva a cabo colocando filtros de banda ancha o delgada antes de la superficie focal del telescopio, resultando en una sola pieza de información espectral por fuente. A diferencia de esta técnica, los instrumentos espectrales dispersivos obtienen infor-

¹Aunque esta última es considerada como una categoría distinta a la de dispersión por Thorne et al. (1999), en cualquier caso es una técnica que trabaja superponiendo un número de rayos con una modulación de fase, al igual que la difracción.

mación mucho más detallada, consiguiendo un espectro por cada fuente y un número de piezas de información por fuente determinado por el modo en que se utiliza el dispersor (Schroeder, 2000). De este tipo pueden realizarse dos formas de espectroscopía: a) la *espectroscopía sin rendija*, donde un elemento dispersor (generalmente no por interferencia), actúa como filtro dispersor dando un espectro para cada fuente del campo, y b) la *espectroscopía con rendija*, donde la radiación debe pasar a través de una rendija antes de ser dispersada.

Otros dos métodos ampliamente utilizados en astrofísica asociados a la espectroscopía con rendija (Schroeder, 2000) son la *espectroscopía multiobjeto* y la *espectroscopía de campo integral*, en los que se utiliza fibra óptica para transferir la radiación desde la superficie focal en dos dimensiones de un telescopio a la rendija de entrada del instrumento. La misma técnica empleada en la espectroscopía de campo integral, donde un haz de fibras recolecta información de una fuente extendida, puede utilizarse para recabar información de una fuente puntual.

Los detectores de los instrumentos espectrales, tanto los dispersivos como los no dispersivos, han sufrido modificaciones y mejoras a lo largo del tiempo para detectar, graficar y/o medir la intensidad del espectro. Aunque esto ha influido en su denominación y clasificación, la nomenclatura propia del instrumento depende del método de uso para el cual esté configurado. En general, en la actualidad se le llama *espectrómetro* a cualquier instrumento que realice un despliegue espectral por cualquier método dispersivo, incluidos los interferométricos (Thorne et al., 1999). El término *espectrógrafo*, utilizado anteriormente para los espectrómetros que empleaban una emulsión fotográfica como detector, se emplea ahora para denotar los instrumentos equipados con detectores compuestos por un arreglo de elevado número de elementos de resolución (Thorne et al., 1999; Schroeder, 2000).

Si se emplea una salida única (como una rendija), para aislar una única banda espectral o una región muy delgada, se le denomina *monocromador* (Thorne et al., 1999). Si esta selección se realiza ya sea por el corrimiento de la salida única y el

detector, o por rotar el dispersor, se tiene un *espectrómetro de barrido* o un *monocromador de barrido*, respectivamente (Thorne et al., 1999). Si se separan varias bandas espectrales de forma simultánea, se tiene un *policromador* (Butler & Laqua, 1995) .

Por último, si la imagen a la salida del instrumento es nítida en las dos dimensiones en el mismo plano focal, el instrumento es *no astigmático*, y si los planos focales son diferentes en alguna de las dos dimensiones, entonces es *astigmático*. Si se emplea el mismo componente óptico antes y después de que la radiación sea dispersada, se dice que el sistema espectral es *autocolimador* (Butler & Laqua, 1995).

A.2 Dispersión y poder de resolución espectral

Se llama *dispersión* (de un elemento dispersivo o de un instrumento) a la tasa a la cual la desviación de la radiación que emerge de él cambia con su longitud de onda (Tarasov, 1974).

Si se trata de un elemento dispersor, se caracteriza entonces por su *dispersión angular*, definida como la razón de las longitudes de onda λ y $\lambda + \Delta\lambda$ entre los ángulos θ y $\theta + \Delta\theta$ a los cuales, respectivamente, la radiación emerge. En el límite, conforme $\Delta\lambda$ se aproxima a cero, la dispersión angular puede expresarse en forma derivativa:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} \text{ rad nm}^{-1}, \quad (\text{A.1})$$

siendo un parámetro asociado exclusivamente al elemento dispersor, independientemente si forma parte o no de un instrumento (es decir, si es parte de un arreglo óptico).

En este último caso, las características del elemento dispersor y del arreglo se combinan, dando lugar a la *dispersión lineal*, definida como la separación lineal $l + \Delta l$ de dos longitudes de onda, $\lambda + \Delta\lambda$, en el plano focal de la óptica de enfoque del arreglo que es alcanzada por la radiación que emerge del elemento dispersor². Al igual que en

²Esta definición también es válida para las rejillas de difracción cóncavas, que no necesitan de

el caso anterior, de forma derivativa, la dispersión lineal se expresa como:

$$\frac{dl}{d\lambda} \text{ mm nm}^{-1}, \quad (\text{A.2})$$

aunque es claramente adimensional (frecuentemente se expresa en mm por Å). Para un sistema óptico donde la luz que incide en el elemento dispersor está colimada (Schroeder, 2000), la dispersión lineal está dada por (Tarasov, 1974):

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{f}{\cos\varphi} \frac{d\theta}{d\lambda}, \quad (\text{A.3})$$

donde φ es el ángulo entre la normal a la superficie focal y el rayo principal en el haz dispersado, y dl es la cuerda del ángulo de radio $f/\cos\varphi$ y apertura angular $d\theta$, y que es aproximadamente igual al arco. Dado que φ es normalmente muy pequeño, la dispersión lineal se expresa más comúnmente como:

$$\frac{dl}{d\lambda} = f \frac{d\theta}{d\lambda}. \quad (\text{A.4})$$

En la práctica es más útil la *dispersión lineal recíproca* o *factor de placa*:

$$\frac{d\lambda}{dl} = \frac{d\lambda}{fd\theta} \text{ nm mm}^{-1} \text{ ó } \text{Å mm}^{-1}, \quad (\text{A.5})$$

dado que es una figura de mayor mérito para la dispersión de un sistema óptico.

Sin embargo, la dispersión por sí sola no determina si dos líneas vecinas pueden ser resueltas o no, ya sea un elemento dispersor individual o un arreglo óptico.

Para un instrumento, una línea espectral producida por un espectrómetro ideal en la que incide radiación idealmente monocromática tendrá un ancho finito establecido por límites de difracción o de coherencia. La distribución de intensidad de esta línea es la *función instrumental* (Thorne et al., 1999) o el *perfil instrumental* del instrumento.

óptica de enfoque adicional.

La diferencia mensurable más pequeña de longitudes de onda a la salida del instrumento, $\delta\lambda$, se relaciona directamente con el ancho de esta función, de modo que si λ y $\lambda + \Delta\lambda$ son las longitudes de onda de dos líneas monocromáticas justo en el límite de ser resueltas por el instrumento, es decir, en el límite $\Delta\lambda \rightarrow \delta\lambda$, entonces $\delta\lambda$ es el *límite de resolución del espectrómetro*³ (Schroeder, 2000).

Con base en lo anterior, el *poder de resolución espectral* se define como *una medida adimensional del perfil instrumental en el límite de resolución*, es decir, la razón de la longitud de onda observada entre la función instrumental justo en ese límite:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}. \quad (\text{A.6})$$

Mientras para un arreglo óptico (instrumento) el poder de resolución espectral depende de todos los elementos ópticos que lo formen (incluido el elemento dispersor), para un elemento dispersor individual el poder de resolución espectral depende directamente de su dispersión angular y del *límite de difracción*.

A.3 Rejillas de difracción

Una red de difracción es un conjunto repetitivo de elementos de reflexión o transmisión separados por una distancia equiparable a la longitud de onda de la radiación bajo estudio. El efecto esperado es el de una colección de elementos difractores produciendo alteraciones periódicas predecibles en la fase, en la amplitud o en ambas, en el campo eléctrico de una onda electromagnética emergente. El patrón del conjunto puede ser el de una serie de rendijas transparentes o el de surcos reflejantes sobre un sustrato.

La radiación que se difracta por cada surco se combina para formar un frente de onda difractado (Fig. A.1). La utilidad de la red se basa en la existencia de un grupo de ángulos discretos a lo largo de los cuales, para un determinado espaciado d entre los

³Para un monocromador de ancho de rendija de salida a' , observando una fuente de radiación continua, el análogo al límite de resolución es la *pureza espectral* (Schroeder, 2000).

surcos, la radiación difractada por cada faceta esté en fase con la radiación difractada de cualquier otra, combinándose de forma constructiva.

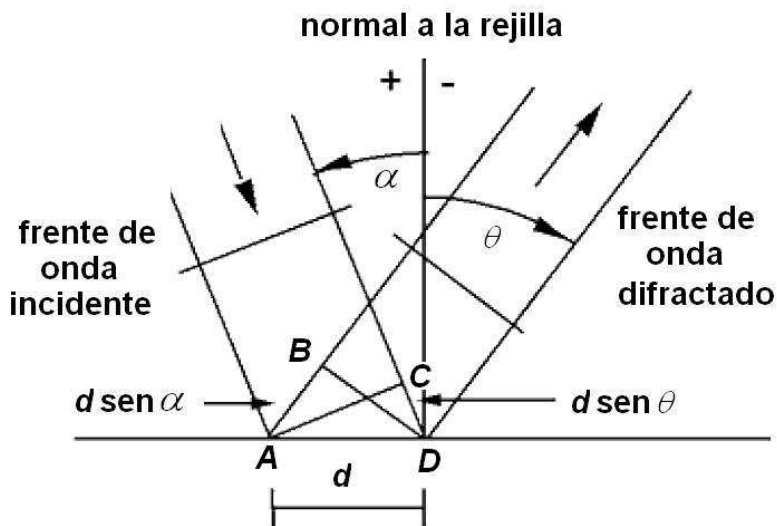


FIGURA A.1: (Figura modificada de Palmer (2000)) Frente de onda incidente y difractado en una rejilla de difracción de reflexión. El camino geométrico del frente de onda incidente, $d \sin \alpha$ es distinto al camino geométrico del frente de onda difractado, $d \sin \theta$.

Del análisis de la Figura A.1, la diferencia de camino geométrica entre la radiación de surcos adyacentes resulta ser (Ecuación A.7):

$$\overline{AB} - \overline{CD} = d \sin \alpha + d \sin \theta. \tag{A.7}$$

Sólo cuando esta diferencia de camino es igual a la longitud de onda λ de la radiación, o algún múltiplo entero, la radiación de surcos adyacentes estará en fase, conduciendo a interferencia constructiva (Ecuación A.8):

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \theta), \tag{A.8}$$

donde m es el *orden de difracción*, que siempre es un entero. Para una longitud de onda y un distanciamiento entre surcos dados, la Ecuación A.8 restringe los órdenes de difracción físicamente posibles a (Ecuación A.9):

$$\left| \frac{m\lambda}{d} \right| < 2. \quad (\text{A.9})$$

A.3.1 Órdenes de difracción

Para un grupo particular de distancias entre surcos d y ángulos α y θ , la Ecuación A.8 se satisface para más de una longitud de onda.

El significado físico es que el reforzamiento constructivo de las distintas longitudes de onda difractadas por surcos sucesivos requiere específicamente que cada rayo sea desfasado una distancia real —una diferencia de camino óptico—, igual a un múltiplo entero de la longitud de onda incidente.

Si la diferencia de camino es de una longitud de onda, se tiene por lo tanto *el primer orden de difracción* $m = 1$. Similarmente, *el segundo orden* $m = 2$ corresponde a una diferencia de camino óptico de dos longitudes de onda de la radiación. Dependiendo si el desfasamiento de las ondas es positivo o negativo (adelantada o atrasada), los órdenes de difracción serán positivos o negativos.

De la Ecuación A.9, para $1/d \ll 1$, el número posible de órdenes de difracción es muy grande.

Esta posibilidad de órdenes múltiples genera, sin embargo, el problema del *traslapamiento de órdenes*, consecuencia directa de la Ecuación A.8. Para cualquier configuración del instrumento espectroscópico, la radiación de longitud de onda λ difractada en el primer orden, $m = 1$, coincidirá con la radiación de longitud de onda $\lambda/2$ difractada en el segundo orden, $m = 2$.

Esta superposición de órdenes puede conducir a datos espectroscópicos ambiguos, debido a que los detectores por lo general no distinguen entre la radiación de diferentes longitudes de onda incidentes dentro de su rango de sensibilidad, por lo que se hace necesario realizar un filtrado, llamado comúnmente *clasificación de órdenes*, o utilizar un *dispersor cruzado* para dispersar los órdenes traslapados perpendicularmente a la

dirección de dispersión de las longitudes de onda.

A.3.2 Intervalo espectral libre

El intervalo de longitudes de onda en un orden espectral específico para el cual la superposición de radiación desde órdenes adyacentes no ocurre, se llama *intervalo espectral libre* ($F\lambda$).

Si dos líneas de longitudes de onda λ y $\lambda + \Delta\lambda$, en órdenes sucesivos $m+1$ coinciden, entonces $d(\text{sen}\alpha + \text{sen}\beta) = (m+1)\lambda = m(\lambda + \Delta\lambda)$, que se simplifica a

$$F\lambda = (\Delta\lambda)_{\text{rel}} = \frac{\lambda}{m}. \quad (\text{A.10})$$

A.3.3 Dispersión angular y poder de resolución

Para una rejilla de difracción, la *dispersión angular* de un espectro de orden m entre las longitudes de onda λ y $\lambda + \Delta\lambda$, se obtiene diferenciando la ecuación de la rejilla (ec. A.8), asumiendo que el ángulo α es constante:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\lambda} = \frac{m}{d \cos\theta} = \frac{\text{sen}\alpha + \text{sen}\theta}{\lambda \cos\theta}. \quad (\text{A.11})$$

Tanto la *dispersión lineal* como la *dispersión lineal recíproca* son dependientes del sistema óptico del que forma parte la rejilla de difracción, como lo indican las Ecuaciones A.4 y A.5.

El *poder de resolución* de una red se basa en la Ecuación A.6. Particularmente, para una rejilla:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{d(\text{sen}\alpha + \text{sen}\theta)}{m\delta\lambda} \quad (\text{A.12})$$

A.4 Espectrómetros de rendija

De manera más específica, los espectrómetros de rendija se forman generalmente de una rendija como entrada de radiación, un colimador, un elemento de enfoque y un elemento dispersivo, más el detector (Figura A.2).

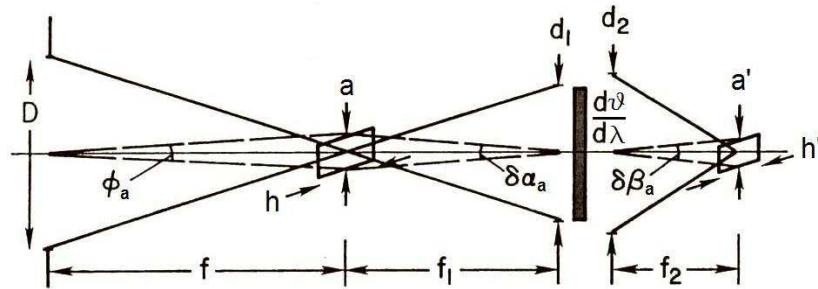


FIGURA A.2: (Figura modificada de Schroeder (2000)) Esquema de un espectrómetro de rendija de entrada. D es el tamaño del objeto observado; a y h son el ancho y la longitud de la rendija de entrada, respectivamente, y a' y h' el ancho y la longitud de la rendija proyectada; d_1 y d_2 son el diámetro del colimador y el elemento de enfoque; ϕ_a es el ángulo que la rendija subtende en el cielo a lo ancho; $\delta\alpha_a$ es el ángulo de incidencia en el colimador y $\delta\beta_a$ es el ángulo de proyección del elemento de enfoque; f , f_1 y f_2 son las longitudes focales del telescopio, del colimador y del elemento de enfoque, respectivamente, y $d\theta/d\lambda$ es la dispersión angular del elemento dispersor.

Las líneas espectrales producidas son imágenes de la rendija a diferentes longitudes de onda. Las dimensiones de estas proyecciones, individuales, dependen de la longitud focal f_1 y f_2 del colimador y del elemento de enfoque, respectivamente, y de la dispersión angular del dispersor.

En la dirección perpendicular a la dispersión los ángulos de incidencia y proyectado del colimador y del elemento de enfoque no cambian, manteniéndose las dimensiones para el objeto observado y el proyectado. Sin embargo, en la dirección a lo largo de la dispersión, es posible la existencia de una amplificación debida al dispersor, llamada *amplificación anamórfica*, definida para el espectrómetro de la Figura A.2 como $r = \delta\beta_a/\delta\alpha_a$, y más generalmente como $r = d_2/d_1$, la razón del ancho de los rayos del elemento de enfoque entre el ancho de los rayos en el colimador.

Por lo tanto, para una rendija de entrada de ancho a y longitud h , la imagen proyectada a la salida tendrá un ancho y una longitud de:

$$a' = ra \frac{f_2}{f_1} = r\phi_a f_2 \frac{D}{d_1}; \quad (\text{A.13a})$$

$$h' = h \frac{f_2}{f_1} = \phi_1 f_2 \frac{D}{d_1}, \quad (\text{A.13b})$$

respectivamente, donde ϕ_a y ϕ_1 son los ángulos que la rendija subtiende en el cielo a lo ancho y a lo largo, respectivamente, y D es el tamaño del objeto observado (acoplado a un telescopio reflector es el diámetro del espejo primario, si la rendija está en el foco primario).

Para un espectrómetro de rendija de entrada de ancho a similar al de la Figura A.2, en la que incide radiación de dos longitudes de onda monocromáticas, λ y $\lambda + \Delta\lambda$, las imágenes generadas de la rendija para cada longitud de onda tendrán un ancho a' , y estarán separadas, *desde sus centros* (ec. A.4), en $\Delta l = f_2 \Delta\theta / \Delta\lambda$.

Entonces el *límite de resolución* $\delta\lambda$ viene dado como la diferencia en longitudes de onda para las cuales $\Delta l = a'$, de modo que las imágenes espectrales se hallen en el punto de ser resueltas con un detector que satisfaga el criterio de Nyquist. Por medio de la Ecuación A.13, para un espectrómetro de rendija como el de la figura A.2, el modelo matemático del límite de resolución se expresa como función del ángulo que la rendija subtiende a lo ancho en el cielo, el recíproco de la dispersión angular del elemento dispersor y la razón de la distancia focal del telescopio entre la del colimador del espectrómetro (Ec. A.14):

$$\delta\lambda = r\phi_a \frac{d\lambda}{d\theta} \frac{f}{f_1}, \quad (\text{A.14})$$

donde

$$\frac{f}{f_1} \equiv \frac{D \frac{f}{\#}}{d_1 \frac{f_1}{\#}},$$

de modo que el límite de resolución puede expresarse también como una función del $\#/f$ tanto del telescopio como del espectrómetro (Ec. A.15):

$$\delta\lambda = r\phi_a \frac{d\lambda}{d\theta} \frac{D}{d_1} \frac{f/\#}{f_1/\#}. \quad (\text{A.15})$$

A la razón $(f/\#)/(f_1/\#)$ se le conoce como *razón de degradación focal*, y normalmente su valor es unitario puesto que los diseños se realizan para acoplar los $f/\#$ tanto del telescopio como del espectrómetro. Sin embargo, en los espectrómetros acoplados por fibra óptica, dado que existe un decremento en la razón focal conforme aumenta la longitud en la fibra, esto puede no ser así, debiéndose considerar cambios en el diseño interno del espectrógrafo (Ramsey, 1988).

Apéndice B

Motores de pasos

A diferencia de la mayoría de los actuadores empleados en aplicaciones de control, que son dispositivos que manejan señales de salida continuas, los motores de pasos son actuadores que manejan señales de salida en incrementos, al ser esta salida pasos angulares fijos. Cada paso angular de su rotación es la respuesta del rotor a un pulso de entrada (o a un comando digital), de manera que cada paso puede sincronizarse con un pulso de una cadena de comandos.

Aunque hay un amplio rango de diseños de motores de pasos, la mayoría puede identificarse como variaciones de dos tipos básicos, dependientes de la naturaleza de su rotor: a) motores *de imán permanente*, que tienen el rotor magnetizado; y b) motores *de reluctancia variable*, que tienen el rotor de hierro dulce.

Una característica común de cualquiera de ellos es que el estator contiene varios pares de embobinados de campo que pueden ser encendidos para producir pares de polos electromagnéticos. Los embobinados de campo adyacentes están enrollados en sentidos opuestos, de modo que los polos adyacentes producidos están en direcciones opuestas. Cada par de polos se construye como un par de dientes, colocados el uno frente al otro.

De igual modo, el rotor se halla dentado, ya sea magnetizado o de hierro dulce, y puede estar dividido en bloques, agrupando los dientes presentes. Además, tanto el estator como el rotor son laminados para que los campos magnéticos producidos

puedan cambiar rápidamente sin causar excesivas pérdidas por corrientes de Eddy.

B.1 Principio de operación

La propiedad esencial del motor de pasos es su habilidad para convertir cambios en la excitación de entrada del dispositivo en incrementos definidos en la posición angular del rotor. El posicionamiento adecuado se ejecuta por el alineamiento magnético de sus dientes con los del estator, y es la respuesta a un pulso de entrada transformado en campo magnético por los embobinados de campo del estator. El circuito magnético completo entre dos polos requiere de una elevada sincronización entre la rotación paso a paso y la cadena de comandos de entrada, haciendo necesario que la respuesta del motor a la señal de entrada sea confiable en lazo abierto para que no existan pasos perdidos.

Aunque todos los motores de pasos funcionan con base en el principio de operación mencionado, sus características y sus ventajas y desventajas al controlarlos cambian de acuerdo a su tipo de construcción.

En los motores de reluctancia variable, dado que el rotor no está magnetizado, el torque aplicado se vuelve cero cuando el estator no está energizado, por lo que no tiene capacidad de mantener su carga en una posición dada bajo la condición de apagado, a menos que se empleen frenos mecánicos.

Sin importar si el motor es de rotor de reluctancia variable o de rotor de imán permanente, en el caso de las polaridades de los embobinados de campo, y por lo tanto de la dirección de giro del rotor y del motor, éstas pueden revertirse de dos modos: a) invirtiendo la dirección de la corriente en las bobinas de campo (en el caso de un motor de *bobinas unifilares*); y b) usando dos bobinas enrolladas la una sobre la otra para cada par de polos (*bobinas bifilares*), una de ellas produciendo un par de polos cuando se energiza, y la otra generando el par opuesto de polaridades, también al energizarse. El torque efectivo a altas velocidades usualmente es mayor en los motores

bifilares que el de los motores unifilares de características similares. Sin embargo, a tasas de velocidad muy bajas, los efectos de disipación dominan sobre los efectos de inducción de voltaje, por lo que en este caso los motores unifilares desarrollan mayor torque.

Con respecto a los bloques en que se encuentra dividido el rotor, en un motor de pasos *de rotor de bloque único*, el ángulo de inclinación de los dientes del rotor y el de los dientes del estator son distintos, de modo que no todos los dientes del estator estén siempre alineados con los dientes del rotor en cualquier instante. Esta desalineación de los dientes ejecuta un empuje magnético, creando un torque. En cada movimiento incremental, el rotor gira hacia la posición de reluctancia mínima (equilibrio estable) correspondiente a la distribución de polaridad particular del estator. En los motores de pasos *de rotor de bloques múltiples* la operación es similar, sin embargo, basta con que un solo bloque esté rotacionalmente desalineado con los dientes del estator para lograr el empuje magnético necesario para lograr el torque. Los motores de pasos multibloque, cada uno de ellos con distinto ángulo de inclinación, aventajan a los de bloque único en la resolución de los pasos.

Apéndice C

Hoja de datos del módulo de control PANT HE-232-DE

Product Information		
Product Type	Motion controller Motor driver	
System Bus	RS-422/485 serial	
More Info	<ul style="list-style-type: none"> Isolated Logic Inputs: Limit A, Limit B, Home, Parity Serial I/O Baud Rate: 9600 baud, RS-232 Step Frequency: 10MHz max. Motor Speed: 0 to 6000 rpm Step Resolutions (1.8°/step): Auto-variable, 200, 400, 800, 1000, 1600, 2000, 3000, 5000, 6400, 10000, 12800, 25000, 25600, 50000, 51200 per revolution Digital I/O Lines (user-defined): 3 inputs (0 to +5VDC) and 3 outputs (0 to +5VDC) Digital I/O Lines (dedicated): Go, Jog+, Jog-, Jog Speed, and Soft Stop (0 to +15VDC) Position Counter: Å±8.388.607.99 Nonvolatile Memory: 2kBytes Protection: thermal thermal, 0 to 0, 0 to ground, and 0 to +V_{BUS} short circuit LED Indicators: Power and fault status +5VDC output to drive the encoder feedback device (not a general-purpose power supply) Encoder Resolution: 50 to 2000 lines (in 50-line increments) Encoder feedback adds complex functions such as position verification, maintenance, & stall detection. Circuitry for differential encoder input. 	
Microcontroller	Built-in indexer (stepping controller) allows you, via a serial link, to program parameters such as acceleration/deceleration ramps, velocity, position, resolution, drive current, etc., to form simple or complex motions. Programs can be executed by sending single commands, or can be stored in the on-board nonvolatile memory, which can then be executed on power-up or by discrete user inputs. The Panther indexer has a variety of built-in functions, including a homing algorithm and limit switch handling, as well as general-purpose inputs and outputs that can be used to detect switch closures or to activate solenoids and other external devices.	
Mounting Configuration	Desktop / benchtop Rack-mount (with optional kit)	
Color	Beige Black	
Chopping Rate	20KHz	
Power		
Input Voltage Range(s)	90...128VAC	
Input Frequency	50/60Hz	
Input Current	2 to 7A (rms), 10A (peak)	
Power Input Details	180 to 264VAC on optional "-240" models	
Connectors		
Connector #1	Number of Connectors	2
	Type	DB-9 (9-pin)
	Gender	Female (socket)
	Location	On module
	Connector Details	TD, RD, GND, +5VDC
Connector #2	Number of Connectors	6
	Type	Screw terminals
	Location	On module
Connector #3	Connector Details	<ul style="list-style-type: none"> 16-pin connector 13-pin connector
Environmental Specifications		
Operating Temperature	32Å°F...140Å°F (0Å°C...60Å°C)	
Storage Temperature	-40Å°F...257Å°F (-40Å°C...125Å°C)	
Dimensions		
Width	4" (101.6mm)	
Height	5.4" (137.16mm)	
Depth	7.3" (185.42mm)	
Dimension Details	<ul style="list-style-type: none"> Depth includes flanges PANT LE-R Faceplate: 5.06" H x 4.18" L 	

FIGURA C.1: Hoja de datos del módulo de control PANT HE-232-DE (Datos e imagen tomados de la pagina web de CyberResearch, <http://www.cyberresearch.com/store/motion-control/stepping-motor/>) .

Apéndice D

Software de control

```
# CONTROL DE ENFOQUE DE LA FIBRA OPTICA
# VERSION 2.0
# JUNIO 2007
# JOANNES BOSCO HERNANDEZ

package require BWidget

proc every {ms body} {
eval $body
after $ms [list every $ms $body]
}

. config -bg black
wm geometry . 510x365

set serial [open com1: r+]
fconfigure $serial -mode "9600,n,8,1"
fconfigure $serial -blocking 0 -buffering none

frame .f1 -bd 10 -relief raised
pack .f1 -side top -pady 10
label .f1.tit -text "ENFOQUE DE LA FIBRA"
grid .f1.tit -row 0 -column 0
Button .f1.inic -text INICIALIZAR -width 15 -armcommand Inicio
#-disarmcommand Stop
grid .f1.inic -row 1 -column 0

frame .f2 -bd 6 -relief raised -relief raised
pack .f2 -side bottom -pady 10
```

```
label .f2.tit -text "ESTADO"
grid .f2.tit -row 0 -column 0
label .f2.est -textvar estado -height 12 -width 80
grid .f2.est -row 1 -column 0

frame .f3 -bd 4 -relief raised
pack .f3 -side left -padx 6
frame .f3.rel
pack .f3.rel
label .f3.rel.tit -text "MOVER"
grid .f3.rel.tit -row 0 -column 0
Button .f3.rel.ad -text ADELANTE -width 16 -armcommand Adelante
#-disarmcommand Stop
grid .f3.rel.ad -row 1 -column 0
Button .f3.rel.at -text ATRS -width 16 -armcommand Atras
#-disarmcommand Stop
grid .f3.rel.at -row 2 -column 0

frame .f4 -bd 4 -relief raised
pack .f4 -side right -padx 6
label .f4.tit -text "AJUSTE"
grid .f4.tit -row 0 -column 0
Button .f4.adf -text ADELANTE -width 16 -armcommand Adelante_fino
#-disarmcommand Stop
grid .f4.adf -row 1 -column 0
Button .f4.atf -text ATRS -width 16 -armcommand Atras_fino
#-disarmcommand Stop
grid .f4.atf -row 2 -column 0

#frame .f5 -bd 10 -relief raised
#pack .f5 -side bottom -pady 10
#Button .f5.inic -text DETENER -width 15 -armcommand Detener
#grid .f5.inic -row 1 -column 0

#every 10 {
#    global serial estado est2
#    set estado [read $serial]
#    set est2 [concat $est2 $estado]
#}
```

```
proc Inicio {} {
    global serial estado
    puts -nonewline $serial " "
    after 100
    puts -nonewline $serial "\r"
    after 100
    puts -nonewline $serial "0\r"
    after 100
    puts -nonewline $serial "Z1\r"
    after 100
    global serial estado est2
    after 450
    set estado [read $serial]
#set est2 [concat $est2 $estado]
}

proc Adelante {} {
    global serial estado
    puts -nonewline $serial "-250\r"
    global serial estado est2
    after 450
    set estado [read $serial]
#set est2 [concat $est2 $estado]
}

proc Atras {} {
    global serial estado
    puts -nonewline $serial "+250\r"
    global serial estado est2
    after 450
    set estado [read $serial]
#set est2 [concat $est2 $estado]
}

proc Adelante_fino {} {
    global serial estado
    puts -nonewline $serial "-1\r"
    global serial estado est2
    after 200
    set estado [read $serial]
#set est2 [concat $est2 $estado]
}

proc Atras_fino {} {
```

```
        global serial estado
        puts -nonewline $serial "+1\r"
        global serial estado est2
        after 200
            set estado [read $serial]
#set est2 [concat $est2 $estado]
}

proc Detener {} {
    global serial estado
    puts -nonewline $serial G2222
}
```

Lista de Figuras

1.1	Reproducción del arreglo óptico de Ebert realizado por Fastie (Fastie, 1952).	5
1.2	Arreglo óptico de Fastie (Fastie, 1952) mostrando sus componentes ópticos. M_1 es un espejo cóncavo esférico, G es una rejilla plana, B_1 y B_2 son reductores de circulación de luz, y S_1 y S_2 son las rendijas de entrada y salida en el plano focal del espejo cóncavo.	6
1.3	(Imagen modificada de Welford (1965)). Diseño de las rendijas por Fastie, para evitar el astigmatismo en la montura modificada de Ebert.	6
1.4	(Figura modificada de Furenlid & Cardona (1988)) Diseño del espectrógrafo Ebert-Fastie del OAGH (no a escala).	9
1.5	(Imagen tomada de Furenlid & Cardona (1988)) Vista general del espectrógrafo al término de su construcción	11
1.6	Carrete de fibra óptica. Se observa el recubrimiento de acer inoxidable y, de frente, el cabezal de acero que contiene el arreglo lineal de fibras.	12
1.7	Aspecto externo de la cámara de vacío del detector. Se observan los cables de alimentación y de transmisión de datos y las mangueras del sistema de autoenfriamiento.	13
1.8	Localización inicial del espectrógrafo, al comienzo de su actualización.	16

1.9 Estado inicial del espectrógrafo antes de comenzar la actualización. (a) Estado del cajón externo de madera y del cajón interno de aluminio. Se observan las placas de aislante térmico y las bolsas que contienen lana de fibra de vidrio; (b) Zona del detector y de la montura para la fibra. Se observa la montura para el CCD y para la fibra, y algunas herramientas mecánicas utilizadas en los intentos previos de alineado; (c) Parte de la montura para la rendija, dentro del cajón de aluminio. Además de la caja para la celda de la rendija, puede verse el carrete que contiene las fibras ópticas. El carrete corresponde al primer haz de fibras, ya inservible; (d) Montura del espejo parabólico, que se halla protegido por una cubierta. Hacia adentro del cajón se observa tanto el carrete de las fibras como una pieza original de aluminio para acoplar las fibras al telescopio. 16

2.1 Imagen del arreglo lineal de fibras ópticas. Se observan 30 fibras iluminadas, y espacios que podrían ser fibras rotas o espacios vacíos entre ellas. También se observa un desalineado producido durante la fabricación. 26

2.2 Aspecto externo del espectrógrafo luego de ser colocado en el laboratorio de electrónica y sobre la base de nivelación. Se observa, en la esquina inferior izquierda, visto de lado, uno de los tornillos de nivelación de la base. 27

2.3 Establecimiento del eje óptico del espectrógrafo, por medio del eje óptico del espejo. 28

2.4 Alineación del contenedor de la celda para la red de difracción. 29

2.5 Alineación de la montura de la red de difracción. 29

2.6 Estación móvil para el control de las haz de fibras utilizado como rendija del espectrógrafo. 30

2.7	Plano óptico del espectrógrafo, a 204mm sobre la base del instrumento. En la imagen, a la derecha, se observa esparcimiento del haz láser provocado por los instrumentos de medición utilizados para medir la altura del haz. En esta zona ocurre la primera incidencia sobre el espejo, proveniente de la rendija. A la izquierda se observa el haz proveniente de la red, ya difractado en distintos órdenes. El central es el orden cero, a 80mm del eje óptico. El más brillante es el primer orden, producto del ángulo de brillo, que concentra la energía en el primer orden.	31
2.8	CCD Hitachi KP-D581 en la montura para CCDs.	32
2.9	Imagen de la rendija iluminada con luz del Sol, captada con el CCD Hitachi. En la imagen se observa que el camino óptico es el correcto, aunque aun la imagen está fuera de foco.	33
2.10	Imagen de la rendija iluminada con la lámpara Fiber Lite. En esta prueba la imagen de la rendija se enfocó casi en su totalidad.	33
2.11	Arreglo óptico utilizado para probar el haz de fibras con la lámpara Fiber-Lite.	34
2.12	Imágenes espectrales del Sol obtenidas con el espectrógrafo Ebert-Fastie. (a) Imagen espectral en la región de $H\alpha$; (b) Imagen espectral en la región de $H\beta$; (c) Imagen del triplete del magnesio; (d) Imagen del doblete del sodio. .	35
2.13	Establecimiento provisional del espectrógrafo para realizar las primeras pruebas de apuntado a objetos puntuales. (a) Espectrógrafo junto a la columna del telescopio durante las pruebas de apuntado. Se observan en la parte inferior de la imagen, el compresor para refrigeración del CCD y el carrete de fibras ópticas. Se observa también, junto al cajón exterior del instrumento, la fuente de voltaje y el módulo de control para el motor de enfoque de la rendija; (b) Vista externa del espectrógrafo junto a la base del telescopio, del lado Este. El siguiente paso en la actualización es el anclaje a la base del telescopio, en esa zona, del espectrógrafo.	36

2.14	Módulo Panther PANT HE-232-DE (Imagen tomada de la página web de CyberResearch, http://www.cyberresearch.com/).	37
2.15	Ventana de la interfase entre el usuario y el módulo de control para el enfoque de la fibra. Se observan los botones de comando para inicializar y para recorrer la rendija alejándola y acercándola del foco, tanto en movimientos largos como finos, y un botón de paro en caso de requerirse detener cualquier tipo de movimiento.	39
2.16	Montura original para acoplar al fibra óptica al telescopio de 2.11m del OAGH, a través del guiador original.	40
2.17	Guiador original del espectrógrafo Ebert-Fastie (Furenlid & Cardona, 1988).	40
2.18	Guiador original del espectrógrafo Ebert-Fastie (Furenlid & Cardona, 1988).	42
2.19	Nueva montura (provisional), para acoplar la fibra al telescopio. (a) Montura sin las tapas laterales, fijada a la montura de pruebas ópticas del telescopio. Se observa cerca del extremo del disco el soporte transversal donde atornilla el acoplamiento roscado para la entrada tipo SMA 905 de la fibra. Con respecto a la montura original, este soporte está recorrido hacia el extremo por donde entra la fibra a la montura; (b) Montura con la fibra enroscada en su acoplamiento correspondiente. Centrado en la fibra, se observa el orificio por donde pasa el haz proveniente del telescopio, enmarcado por lo que debiera ser una superficie pulida, con el objeto de reflejar el haz cuando no está ingresando en la fibra.	44
2.20	Montura de pruebas del telescopio con la montura para la fibra.	45

- 3.1 Imágenes de enfocado de la fibra óptica. (a) Imagen tomada durante la primera prueba de enfoque. Se observa un buen enfoque, aunque inicialmente se creyó que no era el adecuado debido a que la luz comenzaba a dispersarse, lo que aparentaba un ancho mucho mayor de la rendija; (b) Imagen tomada después de adelantar el mosaico del CCD. Aunque se observa un ancho de la rendija más cercano al real, y esta última prueba se consideró la definitiva, el enfoque no es el mejor. 49
- 3.2 Primera imagen espectroscópica de un objeto estelar obtenida con el espectrógrafo Ebert-Fastie del OAGH, durante el proceso de actualización. . . 51
- 3.3 Prueba del alineado del espectrógrafo apuntando a una fuente de luz blanca. Las líneas verticales oscuras de los espacios sin fibras no se observan en esta imagen debido a la intensidad de la fuente luminosa y a que no se utilizó ningún arreglo óptico a la entrada de la fibra, por lo que la luz dispersada es en todas direcciones. Esta dispersión de la luz corrobora el correcto alineado de instrumento. 55
- 3.4 Imagen de la rendija obtenida apuntando con la fibra directamente al Sol. . . 56
- 3.5 Espectro solar en la región del doblete del sodio. La prueba realizada demuestra una vez más la permanencia del alineado del espectrógrafo. 56
- 3.6 Imágenes que muestran el incremento del ruido provocado por el módulo de control. (a) Primera imagen en la que se trató de tomar un espectro. El ruido electrónico es notable; (b) Segunda imagen en que se intentó tomar un espectro, aproximadamente con 20 minutos de diferencia con la anterior. El ruido aparentemente es similar; y (c) Último intento por tomar un espectro la noche del 10 de junio. En esta última imagen el ruido electrónico provocado por el controlador es muy grave, y satura por completo la imagen. 58
- 3.7 Espectro de *Vega* en la región de $H\alpha$ ($\lambda = 6564\text{\AA}$), tomado con la rejilla de 150 l/mm. 59

3.8	Espectro de <i>Arcturus</i> en la región del doblete del sodio ($\lambda = 5892.6\text{\AA}$), tomado con la rejilla de 400 l/mm.	59
3.9	Espectro de <i>Vega</i> en la región de $H\alpha$ ($\lambda = 6564\text{\AA}$), tomado con la rejilla de 400 l/mm.	60
4.1	Primeros espectros estelares obtenidos con el espectrógrafo Ebert-Fastie. (a) Espectro de <i>Vega</i> , centrado en $H\alpha$ ($\lambda = 6563\text{\AA}$), y a una R de 1931 según los cálculos por diseño con la rejilla de 150 l/mm; (b) Espectro de <i>Vega</i> en la región de $H\alpha$ ($\lambda = 6563\text{\AA}$), con la rejilla de 400 l/mm a una R aproximada de 10938; (c) Espectro de <i>Arcturus</i> en la región del doblete del sodio ($\lambda = 5892.6\text{\AA}$) con la rejilla de 400 l/mm, a una R de 9821.	62
4.2	Espectro observado de <i>Vega</i> , con una R originalmente $\sim 100\,000$, degradado a una R de 1931, en la región central de $H\alpha$ y un intervalo entre $\lambda_1 = 6415\text{\AA}$ y $\lambda_2 = 6715\text{\AA}$	64
4.3	Mismo espectro original que el de la Figura 4.2, pero degradado a una R de 10938, en la región central de $H\alpha$ y un intervalo entre $\lambda_1 = 6415\text{\AA}$ y $\lambda_2 = 6715\text{\AA}$	64
4.4	Espectro observado de <i>Arcturus</i> , originalmente a una R de 150 000, degradado a una R de 9821, en una región entre $\lambda_1 = 5835\text{\AA}$ y $\lambda_2 = 5955\text{\AA}$	65
4.5	Primera comparación entre los espectros estelares observados por el espectrógrafo Ebert-Fastie y el observado a una R de 150 000, degradado a la R que se esperaba obtener con el Ebert-Fastie. (a) Espectro de <i>Arcturus</i> en la región del doblete del sodio a una R de 9821 según los cálculos por diseño y la región central del espectro; (b) Espectro observado de <i>Arcturus</i> en la misma región y degradado a la misma R , ajustando el intervalo espectral con el del espectro observado por el Ebert-Fastie.	66

4.6 Comparación entre los espectros estelares observados por el espectrógrafo Ebert-Fastie y el observado a una $R \sim 100\,000$, degradado a la R que se esperaba obtener con el Ebert-Fastie. (a) Espectro de *Vega* en la región de $H\alpha$ a una R de 10938 según los cálculos por diseño y la región central aproximada del espectro; (b) Espectro observado de *Vega* a una R aproximada de 100 000, degradado a una R de 10938, en la misma región, ajustando el intervalo espectral con el del espectro observado por el Ebert-Fastie. 68

4.7 Comparación realizada utilizando el espectro observado de *Arcturus* a una R de 150 000 (el espectro de la parte superior), degradado a una R de 9207, 3955, 1984, 1150 y 661, que corresponden a un ancho de resolución de la rendija de 50, 116, 232, 400 y 696 μm , respectivamente, suponiendo el uso de una rejilla de 600 l/mm en el primer orden para el espectrógrafo Boller & Chivens. 71

A.1 (Figura modificada de Palmer (2000)) Frente de onda incidente y difractado en una rejilla de difracción de reflexión. El camino geométrico del frente de onda incidente, $d \text{ sen}\alpha$ es distinto al camino geométrico del frente de onda difractado, $d \text{ sen}\theta$ 80

A.2 (Figura modificada de Schroeder (2000)) Esquema de un espectrómetro de rendija de entrada. D es el tamaño del objeto observado; a y h son el ancho y la longitud de la rendija de entrada, respectivamente, y a' y h' el ancho y la longitud de la rendija proyectada; d_1 y d_s son el diámetro del colimador y el elemento de confoque; ϕ_a es el ángulo que la rendija subtende en el cielo a lo ancho; $\delta\alpha_a$ es el ángulo de incidencia en el colimador y $\delta\beta_a$ es el ángulo de proyección del elemento de enfoque; f , f_1 y f_2 son las longitudes focales del telescopio, del colimador y del elemento de enfoque, respectivamente, y $d\theta/d\lambda$ es la dispersión angular del elemento dispersor. 83

C.1	Hoja de datos del módulo de control PANT HE-232-DE (Datos e imagen tomados de la pagina web de CyberResearch, http://www.cyberresearch.com/store/motion-control/stepping-motor/)	93
-----	---	----

Referencias

- Butler, L. & Laqua, K. 1995, PART IX. Instrumentation for the spectral dispersion and isolation of optical radiation (IUPAC Recommendations 1995)
- Cardona, O., Furenlid, L., & Cornejo, A. 1990, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, 21, 638
- Ebert, H. 1889, *Wiedemann's Annalen*, 38, 489
- Fastie, W. G. 1952, *J. Opt. Soc. Am.*, 42, 641
- Furenlid, I. & Cardona, O. 1988, *PASP*, 100, 1001
- Kayser, H. 1900, *Handbuch der Spectroscopie*, 1, 626
- Mayor, M. & Queloz, D. 1995, *Nature*, 378, 355
- Mielenz, K. D. 1964, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 68C, 205
- Palmer, C. 2000, *Diffraction Grating Handbook* (Erwin Loewen, 2000)
- Ramsey, L. W. 1988, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 3, *Fiber Optics in Astronomy*, ed. S. C. Barden, 26–39
- Sawyer, R. A. 1961, *Experimental Spectroscopy* (New York: Dover, 1961)
- Schroeder, D. 2000, *Astronomical Optics* (Academic Press, 2000)
- Strassmeier, K. G., Pallavicini, R., Rice, J. B., & Andersen, M. I. 2004, *Astronomische Nachrichten*, 325, 278

Tarasov, K. I. 1974, *The Spectroscope* (Bristol: Adam Hilger, 1974)

Thorne, A., Litzén, U., & Johansson, S. 1999, *Spectrophysics. Principles and applications* (Springer, 1999)

Welford, W. T. 1963, *J. Opt. Soc. Am.*, 53, 766

Welford, W. T. 1965, in *Progress in Optics*, Vol. 4 (Wolf, E. (Amsterdam: North-Holland Publishing Co.)), 241 – 280