

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



Diseño del sistema de acople del foco Nasmyth para el telescopio de 2,1 m del OAN-SPM

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero
en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Isaac Bernardo Porras Navarro

Cartago, 06 de Septiembre de 2018

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Isaac Bernardo Porras Navarro

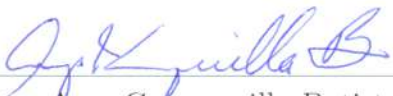
Cartago, 06 de Septiembre de 2018

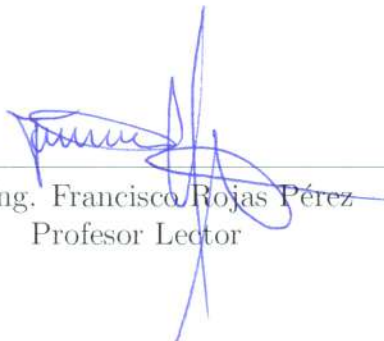
Cédula: 115180483

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal


Ing. Arys Carrasquilla Batista
Profesora Lectora


Lic. Ing. Francisco Rojas Pérez
Profesor Lector


Dr. Ing. Juan Luis Crespo Mariño
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 06 de Septiembre de 2018

...por mis amigos

...por mi familia

...por la ciencia

Agradecimientos

Realizar este trabajo ha requerido tiempo no solo del autor, sino también de personas desinteresadas que han sido parte de alguna u otra forma.

Agradezco primero que nada a mis padres que con mucho amor me han dado el cariño para motivarme y seguir adelante. A mis hermanos y sus hijos que son los primeros que estaban dándome apoyo para hacer las cosas que me gustan. A toda mi familia que siempre con su amor demuestran que los sacrificios valen la pena.

También quiero agradecer al personal del Observatorio Astronómico Nacional que me hicieron sentir como si fuera parte de su equipo de trabajo. A Joel Herrera que con paciencia me ayudó a entender la física detrás del problema. A Manuel Nuñez que siempre estuvo dispuesto a darme una mano. A Gerardo Sierra por sus consejos y su tiempo. A Mauricio Reyes que a pesar de su restringido tiempo siempre había espacio para ser atendido y que gracias a su proyecto IN107316 pude solventar gastos de mi estancia. A Carlos Guerrero por sus consejos, A Enrique Colorado y a Francisco Murillo por su disposición para ayudar. A Bosco Hernández y Serio Silva por su acompañamiento. Y muy en especial a Joel Castro por toda la paciencia que me tuvo, por confiar en mi y hacerme parte de su grupo de trabajo, gracias por compartir conmigo y por toda la enseñanza que me dio.

Quiero agradecer a mi tribunal porque cuando recibí clases o requerí algo siempre estuvieron dispuestos a ayudar y son personas nobles, que se alegran de los logros de sus estudiantes. Por último quiero agradecer a mis amigos de Costa Rica y a mis nuevos amigos de México, a Pineda por sus consejos y ánimo para este proyecto, a Adán, Ronald, y muy en especial a Karol que ha sido siempre esa persona que está ahí a pesar de las circunstancias.

Isaac Bernardo Porras Navarro

Cartago, 06 de Septiembre de 2018

Contenido

Declaración de autoría	i
Certificación del Tribunal Evaluador	ii
Dedicación	ii
Agradecimientos	iii
1 Resumen	1
2 Introducción	2
3 Objetivos del proyecto	5
3.1 Objetivo general	5
3.2 Objetivos específicos	5
4 Definición del problema	6
4.1 Generalidades	6

4.2	Síntesis del problema	7
4.3	Enfoque de la solución	8
5	Marco teórico	10
5.1	Introducción	10
5.2	Definiciones	11
5.2.1	Telescopio	11
5.2.2	Óptica del telescopio	14
5.2.3	Espejos	15
5.3	Telescopio de 2,1 m del OAN-SPM	17
5.4	Instrumentos del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM	21
6	Antecedentes	25
6.1	Introducción	25
6.2	W. M. Keck Telescope	26
6.3	Mercator Telescope	26
7	Metodología	30
7.1	Obtención de requerimientos de alto nivel	30
7.2	Reconocimiento de la estructura física	32
7.3	Propuesta de soluciones	34

7.4	Estudio de las variables y elementos implicados	35
7.5	Desarrollo del diseño mecánico	36
7.6	Diseño del sistema electromecánico	36
7.7	Diseño del sistema de control	36
7.8	Construcción del prototipo	37
7.9	Verificación del diseño	37
8	Requerimientos	38
8.1	Introducción	38
8.2	Requerimientos de alto nivel	38
9	Estudio previo y análisis óptico	41
9.1	Introducción	41
9.2	Análisis óptico	41
9.2.1	Tamaño de espejo para reflexión completa de rayos que inciden sobre CCDs del telescopio de 2,1 m	42
9.2.2	Funcionamiento del guiador con obstrucción de espejo terciario	47
9.2.3	Calidad de imagen del foco Nasmyth	54
9.3	Estudio de los elementos implicados	61
9.3.1	Máximo de magnitud aparente en estrellas a captar y campo de visión	61
9.3.2	Instrumentos a utilizar con el foco Nasmyth	62

9.3.3	Vibraciones y desalineaciones en las imágenes	63
10	Diseño	65
10.1	Introducción	65
10.2	Parámetros de diseño	65
10.3	Conceptos de diseño	66
10.3.1	Soporte del espejo, inclinación y guiñada	66
10.3.2	Actuador Tornillo sin fin - Husillo	69
10.3.3	Actuador Tornillo sin fin - Corona	73
10.3.4	Acople del sistema con el deflector	76
10.3.5	Acople Nasmyth del Telescopio Mercator	82
10.4	Diseño final	83
10.4.1	Diseño mecánico	84
10.4.2	Diseño electromecánico	90
10.4.3	Control	96
11	Validación del diseño	102
11.1	Introducción	102
11.2	Validación de las deformaciones de la estructura	102
11.3	Validación de la funcionalidad del control	107
11.4	Validación de la repetibilidad del sistema	108

12 Análisis económico	112
13 Análisis de los resultados	115
14 Conclusión	119
15 Recomendaciones	121
16 Trabajo futuro	122
Appendices	128
A Código realizado en Python para el control del acople	129
B Captura de pantalla de la interfaz de usuario del software de control	147

Lista de Tablas

10.1 Matriz de Pugh para configuraciones de sección 10.3.2	73
11.1 Valores de los desplazamientos y factor de seguridad mínimo (FS) para los elementos de interés a diferentes orientaciones	107
11.2 Valores de la posición para cada iteración de la prueba de repetibilidad al prototipo.	111

Lista de Figuras

2.1	Telescopio Cassegrain tipo Ritchey-Chretien [4]. (a: espejo primario; b: espejo secundario; c: foco Cassegrain y lugar de instrumentos)	3
2.2	Telescopio tipo Nasmyth [5]. (a: espejo primario; b: espejo secundario; c: espejo terciario; d: foco Nasmyth y lugar de instrumentos)	4
4.1	Diagrama Ishikawa del problema	7
4.2	Telescopio 2,1 m del OAN-SPM con su orientación cardinal terrestre coincidente a relativa al telescopio. Aclaración: puntos cardinales con primera letra mayúscula se refiere al relativo al telescopio, cuando está escrito en minúscula habla sobre los puntos cardinales terrestres.	9
5.1	Sistema óptico de 1 lente	11
5.2	Telescopio reflector Newtoniano [8]	12
5.3	Telescopio Cassegrain tipo Ritchey-Chretien [4]. (a: espejo primario; b: espejo secundario; c: foco Cassegrain y lugar de instrumentos)	13
5.4	Telescopio tipo Nasmyth [5]. (a: espejo primario; b: espejo secundario; c: espejo terciario; d: foco Nasmyth y lugar de instrumentos)	14

5.5	Espejo para telescopio [10]	16
5.6	Telescopio 2,1 m del OAN-SPM (A: Soporte espejo secundario, B: Telescopio, C: Espejo primario, D: Montura ecuatorial)	18
5.7	Representación del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM (A: Deflector, B: Espejo primario, C: Estructura correspondiente a figura 5.6-B, D: Montura ecuatorial correspondiente a figura 5.6-D)	19
5.8	Telescopio 2,1 m del OAN-SPM, vista hacia el sur (A: Espejo primario, B: Guiador Tijuano, C: Platina de separación, D: Cámara)	20
5.9	Despiece del guiador Tijuano [12]	22
5.10	Campo de operación del guiador Tijuano [12]	23
6.1	Izquierda: actuador lineal que activa el mecanismo de inclinación del espejo. Derecha: vista de mecanismo de inclinación y rotación del espejo terciario [23].	27
6.2	Espejo Nasmyth con mecanismos de inclinación y rotación, montados en el tubo desviador. Arriba a la derecha y abajo a la izquierda: mecanismo de inclinación en posición Cassegrain y Nasmyth, respectivamente [23].	28
7.1	Vista interior del telescopio (A: Estructura de soporte, B: Orificio del eje de declinación, C: Espejo primario de 2,1 m de diámetro, D: Deflector del espejo primario)	31
7.2	Vista del telescopio desde el Este (A: Deflector del espejo secundario, B: Tapa de madera del eje de declinación, C: Montura ecuatorial, D: Instrumento científico)	32
7.3	Vista interior del telescopio (A: Deflector del espejo primario, B: Apoyo del deflector del espejo primario, C: Orificio del eje de declinación, D:Estructura de soporte, E: Espejo primario de 2,1 m de diámetro)	33

9.1	Cono de luz, no a escala (Flecha verde: distancia focal $f/7,5 = 15824$ mm, Línea verde: diámetro efectivo del espejo primario = 2108 mm, Línea azul: plano imagen, Flecha negra: distancia plano imagen a espejo terciario = 1627 mm, Línea negra: tamaño del círculo proyectado para captura de rayos de luz del eje óptico, Línea amarilla punteada: eje óptico del telescopio)	43
9.2	Representación para cálculo de separación angular, no a escala (Triángulo naranja: cono de luz eje óptico, Triángulo celeste: cono para luz separada $3,25'$ del eje óptico, Línea verde: posición del espejo terciario, Línea punteada: eje óptico del telescopio, Corchete morado: separación a altura de espejo terciario entre cono de luz de eje óptico y de cono separado $3,25'$, Corchete negro: separación en el plano de imagen entre luz de eje óptico y luz separada $3,25'$)	44
9.3	Modelo del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM obtenido con el software Zemax (A: Espejo secundario, B: Obstrucción por espejo terciario, C: Espejo primario, D: Plano imagen de configuración Cassegrain, Rayos azules: luz en eje óptico, Rayos verdes: luz separada $3,25'$ de eje óptico, Rayos rojos: luz separada $6'$ de eje óptico)	46
9.4	Deflector con obstrucción	50
9.5	Comparación de imágenes capturadas con el guiador para 1 s de exposición	51
9.6	Comparación de imágenes capturadas con el guiador para 3 s de exposición	52
9.7	Imagen obtenida del guiador en eje óptico del telescopio con 3 s de exposición	53
9.8	Foco Nasmyth para calidad de imagen óptima	55
9.9	Energía normalizada encerrada radialmente en función de distancia al eje óptico para cierto desplazamiento del foco con respecto al foco óptimo por movimiento en espejo secundario para configuración Cassegrain.	56

9.10 Energía normalizada encerrada radialmente en función de distancia al eje óptico para cierto desplazamiento del foco con respecto al foco óptico por movimiento en espejo secundario para configuración Nasmyth	59
9.11 Razón de la calidad de imagen de configuración Nasmyth (figura 9.10) entre Cassegrain (figura 9.9) para cada desplazamiento del foco	60
10.1 Propuesta soporte espejo con movimiento de inclinación y guiñada	67
10.2 Tornillo sin fin y corona para la inclinación y guiñada del espejo terciario	68
10.3 Propuesta con tornillo sin fin y husillo	70
10.4 Vista ampliada de tornillo sin fin y husillo	71
10.5 Posición de descanso de propuesta tornillo sin fin y husillo	72
10.6 Propuesta con tornillo sin fin y corona	74
10.7 Ejemplo de soportes laterales para fijación de estructura	75
10.8 Vista superior de deflector con acople	76
10.9 Vista superior de deflector para verificación de obstrucción del acople	77
10.10 Vistas del deflector con implementación del acople	78
10.11 Corte del deflector con acople fuera de operación	79
10.12 Corte del deflector con acople en operación hacia el Oeste	80
10.13 Corte del deflector con acople en operación hacia el Este y con corrección de guiñada	81
10.14 Vista isométrica del acople guardado (no activo) en deflector	83
10.15 Vista isométrica del acople activo en deflector	84

10.16Acople activo	85
10.17Sistema de fijación para el espejo terciario	86
10.18Pivote que permite entrar y salir de operación al espejo terciario	87
10.19Vistas para verificación de obstrucción a la configuración Cassegrain	88
10.20Sistema de fijación para el acople cuando se encuentra activo	89
10.21Sistema de fijación para el acople cuando se encuentra guardado	90
10.22Pistones en el acople	92
10.23Estación de ajuste fijo	93
10.24Beaglebone Black [35]	94
10.25Diagrama de entradas y salidas de control	95
10.26Diagrama de flujo global (FC_guardado: Final de carrera del acople cuando se encuentra guardado, FC_activo: Final de carrera del acople cuando se encuentra activo)	97
10.27Diagrama de flujo para la activación del sistema	98
10.28Diagrama de flujo para guardar el sistema	99
10.29Diagrama de flujo para el ajuste fino	100
11.1 Deformación del soporte del espejo terciario debido al peso del mismo con dirección perpendicular al elemento	103
11.2 Deformación del soporte del espejo terciario debido al peso del mismo con dirección perpendicular al elemento	104

11.3 Deformación del soporte del espejo terciario debido al peso del mismo con dirección paralela vertical al elemento	105
11.4 Deformación del soporte del espejo terciario debido al peso del mismo con dirección paralela vertical inclinada al elemento	106
11.5 Prueba de operación y control	108
11.6 Prototipo impreso en 3D del acople del foco Nasmyth para pruebas de validación . .	109
11.7 Posición del láser reflejado en pantalla para evaluación de repetibilidad	110
B.1 Finales de carrera activo y guardado presionados.	148
B.2 Finales de carrera activo y guardado no presionados.	148
B.3 Foco Nasmyth activado luego de error en los sensores de final de carrera activado y guardado (ninguno estaba presionado).	149
B.4 Error mientras se activaba el acople, se le realizó un corte de energía al pistón 1. . .	149
B.5 Foco Nasmyth activado sin errores de operación (activación normal).	150
B.6 Foco Nasmyth Guardado luego de error en los sensores de final de carrera activado y guardado (ninguno estaba presionado).	150
B.7 Error mientras se guardaba el acople, se le realizó un corte de energía al pistón 1. .	151
B.8 Foco Nasmyth guardado sin errores de operación (puesto fuera de operación normal.)	151
B.9 Sistema de ajuste fino calibrado.	152
B.10 Posición para ajuste fino sobrepasa nivel de tensión máxima.	152
B.11 Posición para ajuste fino sobrepasa nivel de tensión mínima.	153

B.12 Posición de 750 alcanzada para motor 1, hacia adelante.	153
B.13 Posición de -750 alcanzada para motor 1, hacia atrás.	154

Capítulo 1

Resumen

Los telescopios son los instrumentos que le han permitido al ser humano descifrar las dudas más grandes que la humanidad ha tenido, como lo es su existencia misma. Estos instrumentos requieren de la constante actualización y mejora ya que son herramienta indispensable para los astrónomos, especialmente para los del Observatorio Astronómico Nacional de México. El presente trabajo detalla el diseño del acople que le permitiría al telescopio de 2,1 m del Observatorio Astronómico Nacional que se encuentra en la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, México, utilizar el foco Nasmyth, esto por medio de la puesta en operación de un espejo terciario. Se realizó el análisis óptico requerido que ayudó en la determinación del diseño que más se ajusta a las necesidades de los astrónomos. Por otro lado, se explica sobre las componentes mecánicas, electromecánicas y de control que posee el diseño. Por último, se muestra la validación que se le realizó al diseño propuesto.

Capítulo 2

Introducción

El presente proyecto tiene lugar en México, específicamente en el Observatorio Astronómico Nacional (OAN) que se encuentra en la Sierra de San Pedro Mártir (SPM), Baja California; y cuyo observatorio se encuentra administrado por el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), sede Ensenada (IAUNAM-E) [1].

El OAN-SPM cuenta actualmente con 3 telescopios de propósito general (2,1 m, 1,5 m y 0,84 m), un par de telescopios robóticos de menor tamaño (< 50 cm) y próximamente tendrá otros 3 del proyecto TAOS-II operando en el mismo sitio [2]. El telescopio más grande con que se cuenta es el de 2.1 m de diámetro en su espejo primario. Este dispositivo se utiliza para estudios dentro de la zona visible e infrarroja del espectro electromagnético, cuenta con una amplia gama de instrumentos que le permiten realizar estudios en diferentes ramas, como lo es la espectrometría, polarimetría e incluso capturar imágenes directas para realizar fotometría; siendo esta la razón por la que es el telescopio más solicitado, por lo tanto, es más complicado tener acceso a tiempo de telescopio para poder realizar observaciones astronómicas. Actualmente la configuración del telescopio es de tipo Cassegrain (Ritchey-Chrétien) [3], tal cual se muestra en la figura 2.1, por lo que solo permite tener un instrumento acoplado, ya sea un polarímetro, un espectrómetro o una cámara con filtros. Esto hace que cuando se requiera cambiar el instrumento por el tipo de observación que

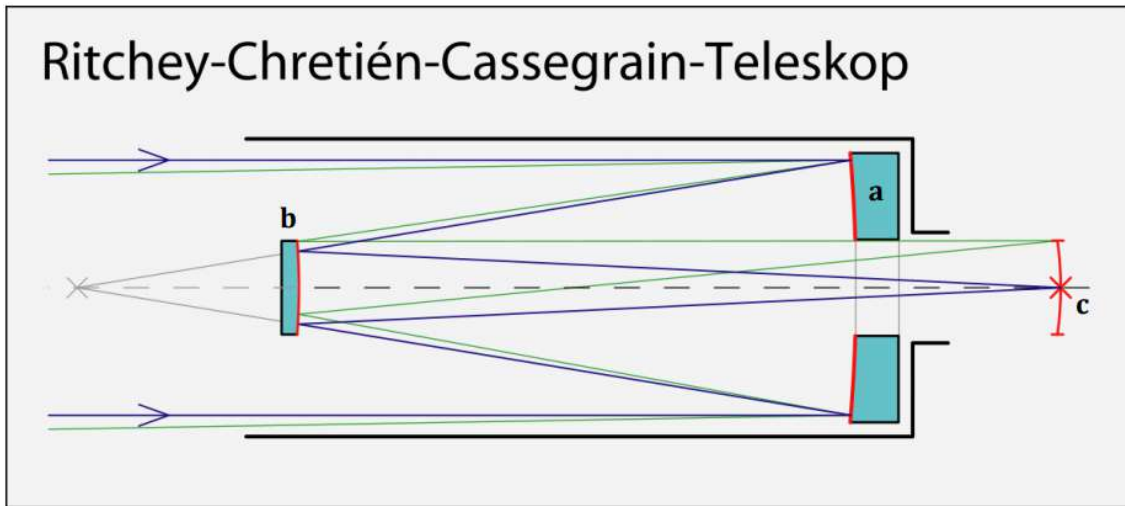


Fig. 2.1: Telescopio Cassegrain tipo Ritchey-Chretien [4]. (a: espejo primario; b: espejo secundario; c: foco Cassegrain y lugar de instrumentos)

se solicite, el telescopio debe detener su operación para que los instrumentistas del observatorio cambien el instrumento, lo cual conlleva un trabajo de logística grande, al que se le dedica más de 1 noche de trabajo (se le conoce como noche de ingeniería), ya que una vez instalado el instrumento se debe ajustar y balancear el telescopio por el cambio de peso que experimenta con el nuevo instrumento. Por esta razón, se desplaza tiempo de investigación científica a acondicionamiento del telescopio. Aunque el telescopio tiene capacidad para funcionar en una configuración con dos planos imagen (foco Cassegrain, figura 2.1 y foco Nasmyth, figura 2.2), actualmente no se ha realizado ningún esfuerzo en esta dirección, lo cual permitiría tener al menos dos instrumentos acoplados simultáneamente al telescopio, lo que puede representar una ventaja desde el punto de vista astronómico porque sería posible contar con una alternativa para realizar fotometría y espectroscopía durante una misma noche de observación.

El proyecto consiste específicamente en aprovechar la disposición del telescopio actual que tiene la posibilidad de que en un futuro pueda habilitarse el uso de un segundo foco (foco Nasmyth, figura 2.2) y con esto poder potenciar las capacidades del telescopio brindando ventajas en la observación astronómica y consecuentemente poder aprovechar el tiempo de telescopio de manera más eficiente. Desde el punto de vista astronómico, existen muchos casos en los que la ventaja de

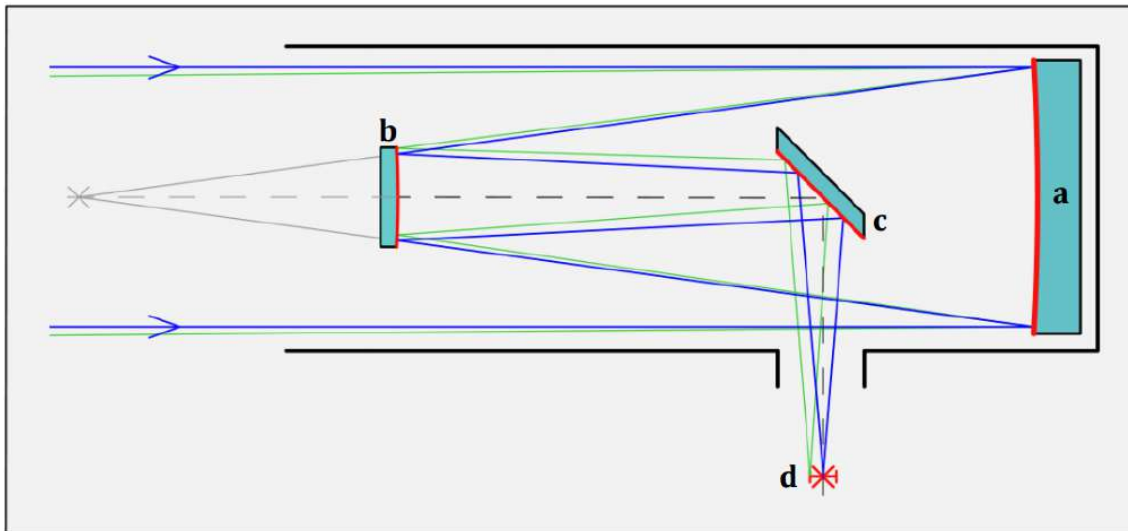


Fig. 2.2: Telescopio tipo Nasmyth [5]. (a: espejo primario; b: espejo secundario; c: espejo terciario; d: foco Nasmyth y lugar de instrumentos)

poder contar con información en una misma noche más completa tanto espectroscópica como de morfología o fotometría pueden ayudar a entender, de manera más provechosa, la composición o dinámica del objeto estelar de interés. El presente trabajo es la base para un estudio de factibilidad sobre la implementación del foco Nasmyth, y se ha propuesto un diseño de un sistema de acople electromecánico que habilite el foco Nasmyth del telescopio de 2,1 m. Este diseño toma en cuenta las especificaciones que permita que cuando se desee utilizar este foco se desplace un espejo hacia el sitio que se requiera, se diseña el sistema electromecánico y de control que le permita el movimiento y el control del mismo, donde cumpla con la precisión adecuada de los movimientos para que sea funcional la utilización de este foco y los instrumentos se puedan acoplar de forma satisfactoria (sin alterar la operación actual del foco Cassegrain).

Capítulo 3

Objetivos del proyecto

3.1 Objetivo general

Diseñar el sistema de acople electromecánico y de control del foco Nasmyth para el telescopio de 2.1 m del OAN situado en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California, México.

3.2 Objetivos específicos

- Diseñar el sistema mecánico del acople que le permita entrar y salir de operación al foco tipo Nasmyth del telescopio, mediante el movimiento de un espejo terciario.
- Diseñar el sistema electromecánico que le permita el movimiento al acople mecánico para entrar y salir de operación al foco tipo Nasmyth del telescopio.
- Diseñar el sistema de control del acople del foco Nasmyth que se adapte al sistema del control que posee el telescopio.
- Validar que los diseños propuestos cumplan con requerimientos establecidos por los instrumentistas del OAN (precisión mecánica y estabilidad del lazo de control).

Capítulo 4

Definición del problema

4.1 Generalidades

A causa de que el telescopio solo tiene en uso el foco Cassegrain, solo es posible disponer de un instrumento astronómico para ser utilizado durante la noche, limitando a que solo se puede realizar un tipo de estudio sobre el objeto celeste de interés. Para poder utilizar otro instrumento astronómico se requiere al menos de una noche para el cambio. Por lo que se utiliza tiempo para dicho cambio que podría ser utilizado para la investigación científica si se contara con más instrumentos acoplados a la vez, y que puedan operar sin requerir mayor tiempo para la puesta en marcha.

En la figura 4.1 se muestran los principales motivos por los que se produce la pérdida de tiempo de observación con el telescopio de 2,1 m del OAN-SPM. El grosor de las flechas muestran el aporte relativo que hace cada una de las causas a este problema. Es notable que uno de los principales motivos por los que se da este problema es que solo puede haber un instrumento acoplado al telescopio, como se menciona anteriormente; y a esto le contribuye de igual medida que no exista posibilidad de tener más instrumentos acoplados al mismo tiempo, y eso porque solo está operando bajo la configuración Cassegrain. Todo esto anterior hace que para cambiar de

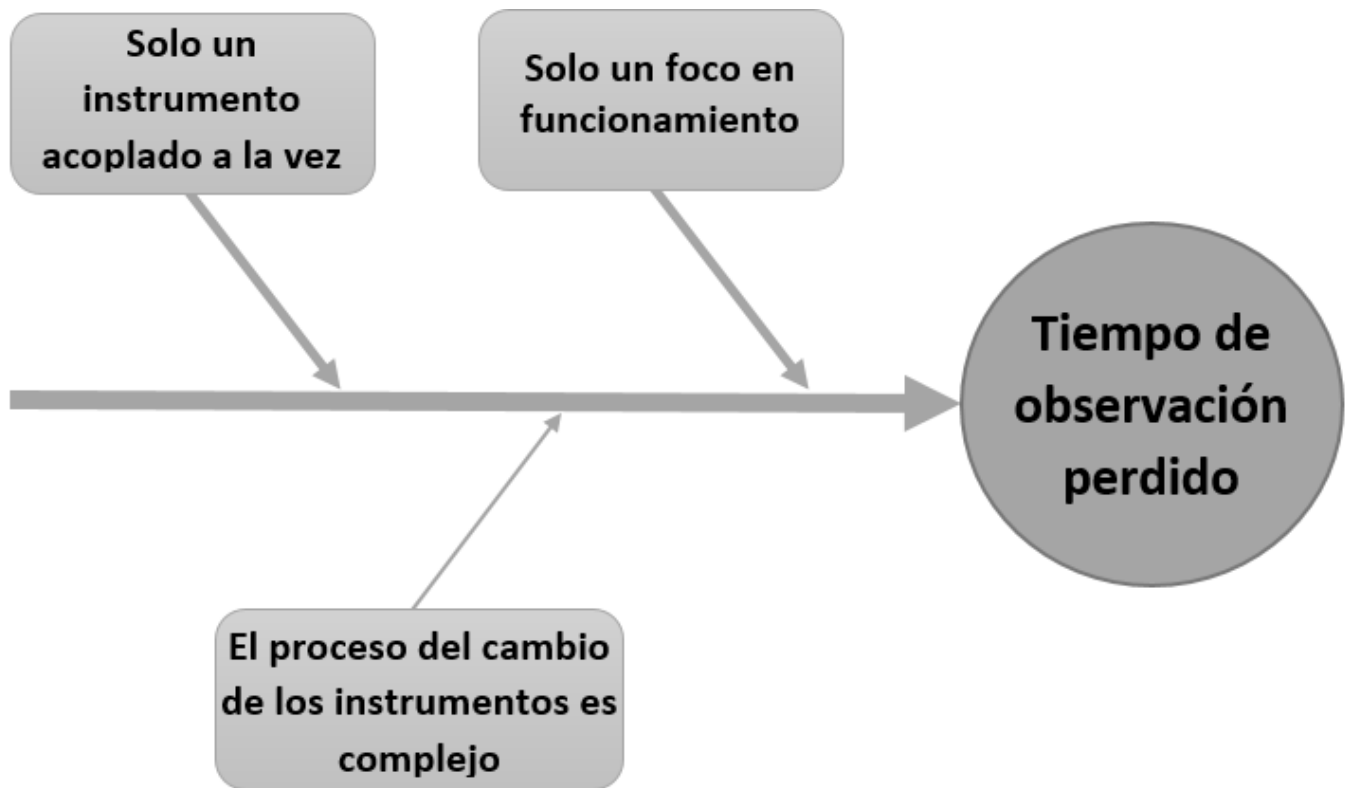


Fig. 4.1: Diagrama Ishikawa del problema

instrumentos se desplace tiempo de observación para hacer trabajo técnico, haciendo que noches adecuadas para observar no sean aprovechadas.

4.2 Síntesis del problema

El telescopio solo tiene habilitado el foco Cassegrain, por ende solo se dispone de un instrumento acoplado, provocando que se utilice tiempo de observación cuando se requiere utilizar un instrumento de medición diferente al que se encuentra instalado.

4.3 Enfoque de la solución

El telescopio de 2,1 m que se encuentra en el OAN, fue diseñado previendo la implementación de un segundo foco tipo Nasmyth, dicho foco es el que se observa en la figura 2.2. Si este foco se habilitara en el telescopio se podría acoplar un segundo instrumento de medición, por lo que se contarían con dos instrumentos acoplados simultáneamente al telescopio ya que se podría mantener la configuración Cassegrain (figura 2.1) y la configuración Nasmyth (figura 2.2), provocando que los tiempos de parada del telescopio por cambio de estos dispositivos se disminuya considerablemente.

Para hacer funcional el foco Nasmyth se vuelve necesario implementar un sistema que permita que el tercer espejo (figura 2.2 - c) se acople a la posición que se observa en la figura 2.2, pero también que se retire fuera del telescopio cuando se desea seguir utilizando la configuración Cassegrain (figura 2.1), por lo que el sistema debe permitir desplazar al espejo terciario (figura 2.2 - c) hasta cierta posición con cierto ángulo, buscando siempre la precisión en su posición y orientación, pues los sistemas ópticos se ven afectados en gran medida con pequeñas variaciones.

Se debe diseñar un sistema electromecánico que le permita al sistema mecánico operabilidad, y por medio de este se pueda controlar la puesta en operación del foco Nasmyth, esto bajo el sistema de control que se deberá acoplar con los sistemas del mando principal del telescopio.

Para la nueva configuración se redirigiría la luz hacia fuera de la estructura por los ejes Este y Oeste (figura 4.2), ya que es allí donde existen orificios en el armazón que permitirían acoplar instrumentos científicos.

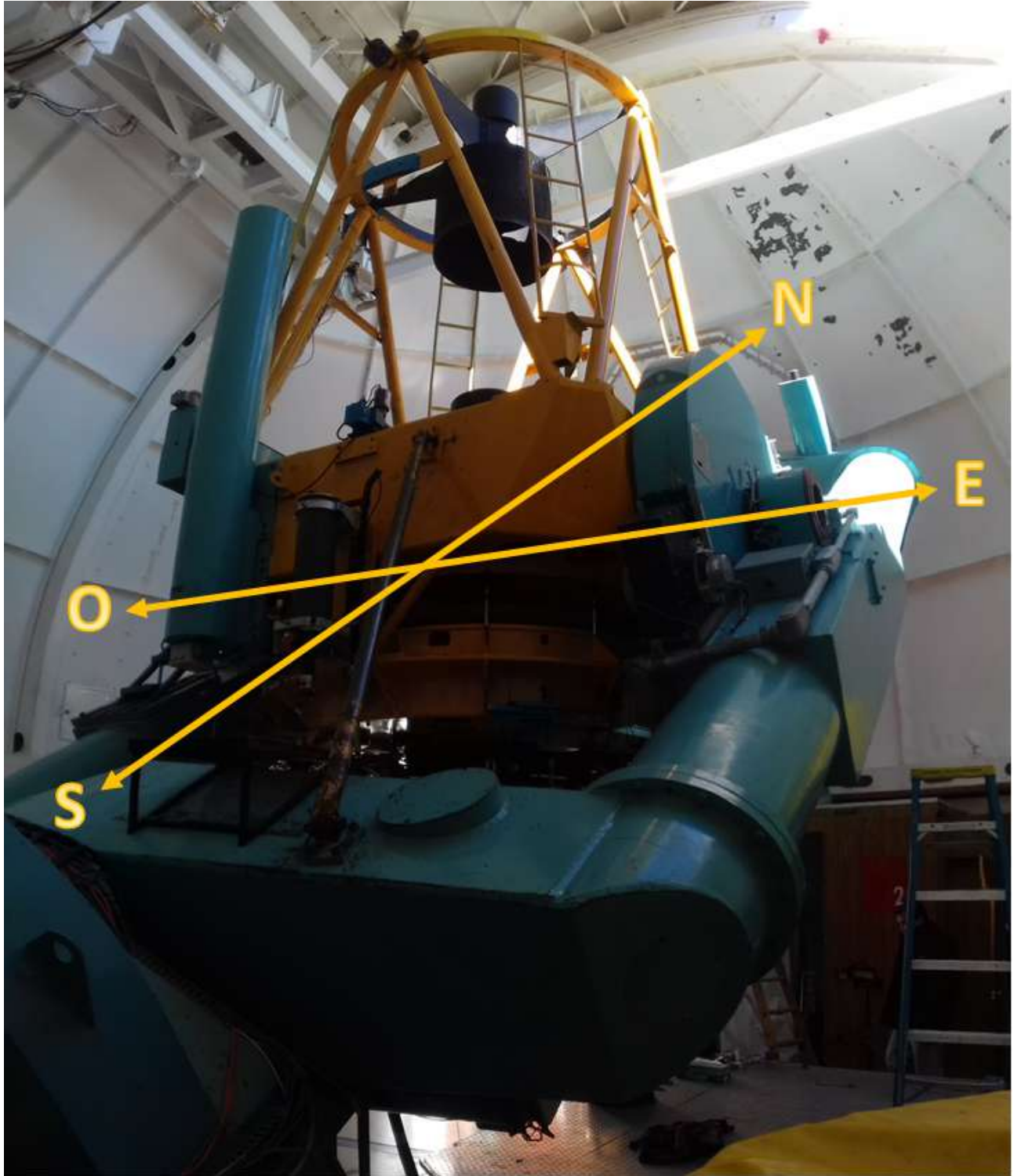


Fig. 4.2: Telescopio 2,1 m del OAN-SPM con su orientación cardinal terrestre coincidente a relativa al telescopio. Aclaración: puntos cardinales con primera letra mayúscula se refiere al relativo al telescopio, cuando está escrito en minúscula habla sobre los puntos cardinales terrestres.

Capítulo 5

Marco teórico

5.1 Introducción

Desde que en 1609 Galileo escuchó por primera vez que un holandés había utilizado una configuración de prismas para magnificar objetos que se encontraban a largas distancias [6] y su utilización para la observación de la esfera celeste, los telescopios han tenido un avance notorio a lo largo de los años, no solo en su precisión y tamaño de los espejos utilizados, sino también en el desarrollo del estudio de la óptica y de la tecnología que engloba para obtener el mejor desempeño del mismo.

A continuación, se enunciarán y se explicarán los conceptos que son requeridos tener en cuenta para poder dar seguimiento al trabajo que se desarrolló. Algunos conceptos se mencionarán tal cual se encuentra en la literatura pues no requieren mayor explicación, mientras que otros se explicarán a detalle pues son importantes de tener claros para poder comprender el contexto completo del proyecto. Por otro lado, se hablará de los antecedentes que están ligados al diseño, tanto del observatorio como de otros desarrollos que tienen similitud con el actual.

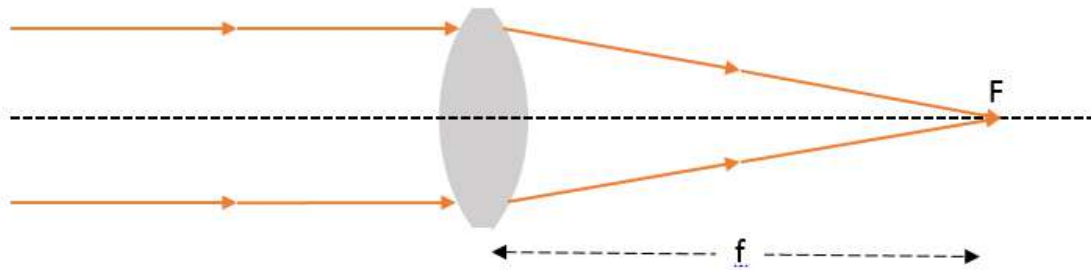


Fig. 5.1: Sistema óptico de 1 lente

5.2 Definiciones

5.2.1 Telescopio

Un telescopio es un instrumento que capta luz y la hace converger en un punto para su aprovechamiento. El telescopio tiene 2 funciones básicas, hacer que los objetos se vean en apariencia más grandes y también cumplen con la función de aumentar la cantidad de luz captada de ese objeto [7], por lo que se podría decir que los telescopios son como “cubetas” que el lugar de almacenar la mayor cantidad de agua posible lo que captan es la mayor cantidad de luz posible, con esto se obtiene que objetos que son de poco brillo se puedan observar sin problema.

Existe una división de los telescopios basada en el sistema óptico que utilizan para desviar los rayos de luz, que son los refractores y los reflectores.

Refractores

Estos telescopios son compuestos por lentes. La luz colimada del objeto en observación al atravesar una configuración de lentes convergentes se refracta hacia el foco, siendo en este último donde se forma la imagen del objeto originalmente visto. Este telescopio es el menos utilizado en astronomía actualmente, pues presenta ciertos problemas que lo hacen poco viable, como lo son la aberración cromática y que para largas distancias focales se requieren estructuras de gran tamaño también. En la figura 5.1 se muestra un sistema óptico que se asemeja a un telescopio refractor.

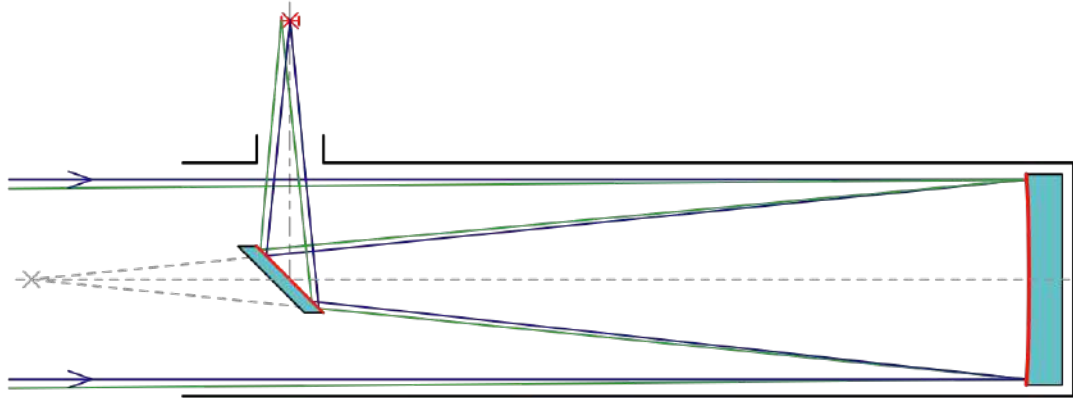


Fig. 5.2: Telescopio reflector Newtoniano [8]

Reflectores

Su funcionamiento se basa en la reflexión que se produce por el sistema de espejos con que cuentan. En términos generales, cuentan con un espejo primario que es el que capta la luz y la refleja de manera convergente hacia un espejo secundario, y nuevamente se dirige hacia un foco, siendo los telescopios más utilizados para el rango del espectro electromagnético en que son viables.

Tipos de telescopios reflectores

Los telescopios utilizan una configuración de espejos que permiten que la luz se focalice en cierto lugar deseado, dependiendo de las necesidades y recursos que se posean es que se construirá una u otra configuración, o híbrido de las anteriores. Las configuraciones típicas para telescopios reflectores se enumeran a continuación:

- Newtoniano:

Este tipo de telescopio (figura 5.2) fue el primer reflector que se construyó, fue realizado por Sir Isaac Newton, de ahí su nombre, y consta de un espejo primario que focaliza la luz a cierta distancia, y por medio de un espejo secundario plano se traslada el foco fuera del telescopio. Este tipo de telescopio cuenta con la desventaja que para grandes distancias

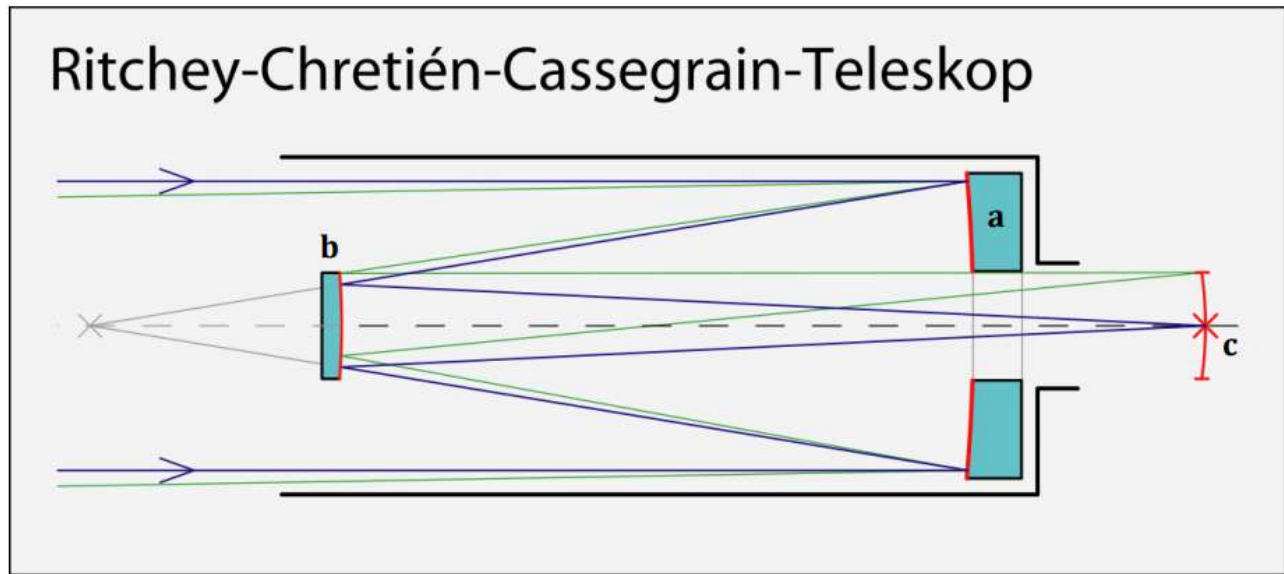


Fig. 5.3: Telescopio Cassegrain tipo Ritchey-Chretien [4]. (a: espejo primario; b: espejo secundario; c: foco Cassegrain y lugar de instrumentos)

focales la estructura del mismo también es relativamente grande comparado con otros tipos de telescopio con la misma distancia focal.

- Cassegrain:

Este tipo de telescopio tiene la salvedad que tiene el foco detrás del espejo primario, tal cual se ve en la figura 2.1. Luego de que la luz es colectada por el primario, se dirige hacia el secundario y éste redirige los rayos de luz hacia el espejo primario, sin embargo el primario cuenta con un orificio en el centro del espejo por lo que la luz lo atraviesa y se focaliza fuera del telescopio.

- Ritchey-Chretien o RCT (figura 5.3:

Fue inventado por George Willis Ritchey y por Henri Chrétien, es un telescopio de tipo Cassegrain pero con la salvedad que fue diseñado para eliminar la aberración comática, esto por medio de sus dos espejos (primario y secundario) hiperbólicos.

Esta es la configuración de espejos que posee el telescopio de 2,1 m del OAN-SPM.

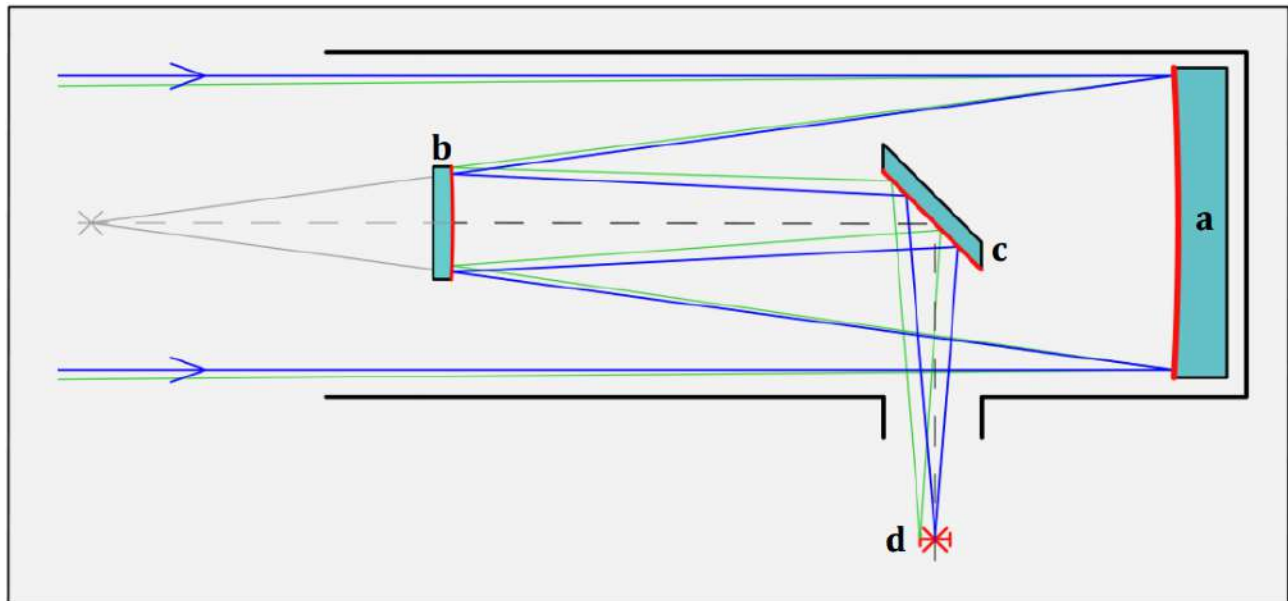


Fig. 5.4: Telescopio tipo Nasmyth [5]. (a: espejo primario; b: espejo secundario; c: espejo terciario; d: foco Nasmyth y lugar de instrumentos)

- Nasmyth (figura 5.4:

Esta configuración de telescopio reflector fue inventada por James Nasmyth, en la cual luego de que la luz sea reflejada por el espejo secundario es de nuevo reflejada por un espejo terciario plano, que se ubica en uno de los eje de rotación del telescopio, de este modo la luz se focaliza de igual modo fuera del telescopio pero saliendo por alguno de los ejes de la montura, si es una montura ecuatorial saldría por el eje de declinación, y si el telescopio se encuentra sobre una montura altazimutal, sería por el eje de altitud.

5.2.2 Óptica del telescopio

En la figura 5.1 se observa un sistema óptico de una sola lente, muy conveniente para visualizar el principio de un sistema óptico como lo es el telescopio, donde por la geometría de la lente (bicóncava) hace que los rayos que vienen colimados (paralelos entre sí) se redirijan hacia un punto donde convergerán todos, este punto es el foco (F). Por lo que el **foco** es el punto donde los rayos paralelos se intersecan, por lo que en este punto es donde se formará la imagen.

La distancia que hay desde el centro del lente hasta el punto focal se le conoce como **distancia focal**, y esta distancia es un factor importante en los parámetros de un telescopio. En el caso del presente proyecto es un parámetro con el cual se tendrá especial cuidado, ya que el lugar donde se pondrá el espejo terciario es un lugar fijo, y esto podría tener implicaciones con respecto a la posición donde ahora se sitúe el foco por la adaptación.

El **foco óptimo** es una configuración en la que los espejos están a la distancia adecuada para minimizar las aberraciones ópticas, esta distancia comúnmente se establece desde el diseño, por lo que para obtener los mejores resultados en cuanto a los estudios científicos es conveniente que los sensores científicos se ubiquen lo más cercano a donde estaría dicho foco, y se pueda mantener la distancia predicha entre espejos primario y secundario. Cabe mencionar que se deteriora la imagen al alejarse del foco óptimo porque los rayos de luz ahora se están reflejando en puntos específicos del secundario que modificarán el camino óptico de la luz y esto hará, por ejemplo que el foco de los rayos alejados angularmente del eje óptico se desplace con respecto al foco del eje óptico.

La **calidad de imagen** está dada por la resolución del telescopio y se define como capacidad de diferenciar 2 objetos que estén cercanos angularmente. Por ejemplo, si dos estrellas se encuentran distanciadas angularmente $1''$ y la calidad del telescopio es de $2''$ no será posible distinguir entre ambas, y se verán como una sola; por lo que para distinguir entre cada una al menos deberán tener la misma separación angular que el valor de calidad de imagen.

5.2.3 Espejos

Los espejos que se utilizan en astronomía, difieren a los que se utilizan en aplicaciones domésticas o de belleza en que la superficie reflejante (ejemplo: aluminio, plata, oro) se encuentra sobre el vidrio, y este funciona como soporte del material reflejante; la luz es reflejada en cuanto se encuentra con el espejo. En espejos de aplicaciones domésticas la superficie reflejante se encuentra debajo del vidrio. En la figura 5.5 se observa un espejo de un telescopio, en el cual el material reflejante (aluminio) se



Fig. 5.5: Espejo para telescopio [10]

encuentra sobre el vidrio y se logra observar que la luz se refleja en la primer superficie del espejo. Por este motivo los espejos de los telescopios deben tener ciertos cuidados como lo son: no se debe tocar la superficie reflejante con ningún material, en tanto sea posible se deben cubrir para que el polvo no se deposite sobre él ni los líquidos le caigan ya que esto genera manchas pues la superficie que refleja la luz se encuentra expuesta al medio, si se requiere limpiar no se puede utilizar ningún material abrasivo y se debe asegurar que el limpiador no desprenda el material reflejante.

Los espejos en los observatorios tienden a ser de gran tamaño para poder visualizar objetos que son muy tenues en el cielo, haciendo también que la estructura del espejo sea relativamente pesada, por lo que tienden a sufrir deformaciones por el mismo peso, ya que normalmente son de unas cuantas toneladas. Cuando estos se inclinan cambian la zona donde se encuentra soportado, aumentando el esfuerzo sobre zonas pequeñas y deformando el mismo, esto provoca que cambie la geometría y se den aberraciones sobre la imagen adquirida.

La forma que tienen estos espejos es muy particular y cada uno está diseñado según parámetros

de interés, como lo es el rango del espectro electromagnético que se desea observar de los objetos en la esfera celeste; esto define, por ejemplo el material que recubrirá la superficie del espejo. Otro parámetro será el campo del cielo que se desea observar, pues los objetos tiene un campo angular que cubren en el cielo, por ejemplo la luna cubre 0,5 (equivalente a 30 ' ó 1800 "), por lo que una vez que se defina el campo angular óptimo tendrá el espejo se debe definir la forma geométrica del mismo.

5.3 Telescopio de 2,1 m del OAN-SPM

El telescopio de 2,1 m que se encuentra en el OAN-SPM fue inaugurado el 17 de septiembre de 1979 [11], y desde entonces se ha utilizado para uso general gracias a su versatilidad para acoplarse instrumentos de múltiples tipos de estudio. El diseño de este telescopio es Cassegrain tipo Ritchey-Chretien, este diseño posee ambos espejos primario y secundario con forma hiperbólica. Tiene la capacidad de soportar 4000 kg extra de su estado actual.

En la figura 5.6-B se observa de amarillo la estructura que asegura al espejo primario y secundario, además siendo el lugar donde se colocan los instrumentos y la mayoría de los dispositivos necesarios para su operación (figura 5.8), como lo son los sensores, computadoras, dispositivos de control, entre otros. En la parte más alta de esta estructura se observa de color negro y sujeta por cuatro brazos la estructura que da soporte al espejo secundario (figura 5.6-A).

La montura (de color celeste en la figura 5.6)-D es la estructura que además de dar sostén y rigidez al telescopio, le permite el movimiento para el seguimiento de objetos durante la observación. En el caso del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM, la montura es de tipo ecuatorial; esto implica que para visualizar un objeto debe mover sus dos ejes: ascensión recta y declinación, pero una vez localizado el objeto de interés, solo se debería de mover el eje de ascensión recta para corregir el movimiento terrestre, por algunos errores asociados a ajuste de la posición de los ejes se vuelve necesario realizar correcciones en ambos ejes para un seguimiento preciso.

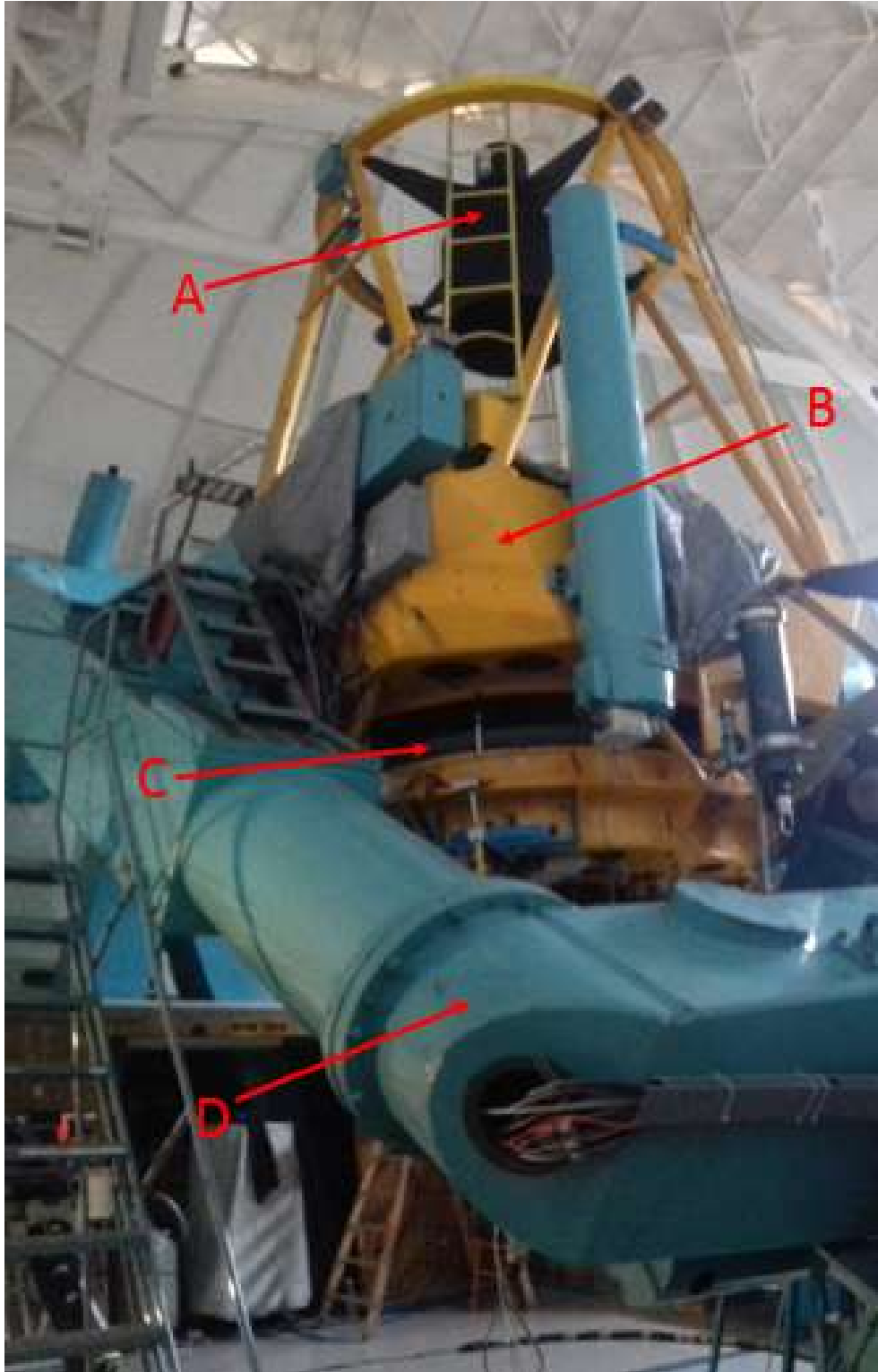


Fig. 5.6: Telescopio 2,1 m del OAN-SPM (A: Soporte espejo secundario, B: Telescopio, C: Espejo primario, D: Montura ecuatorial)

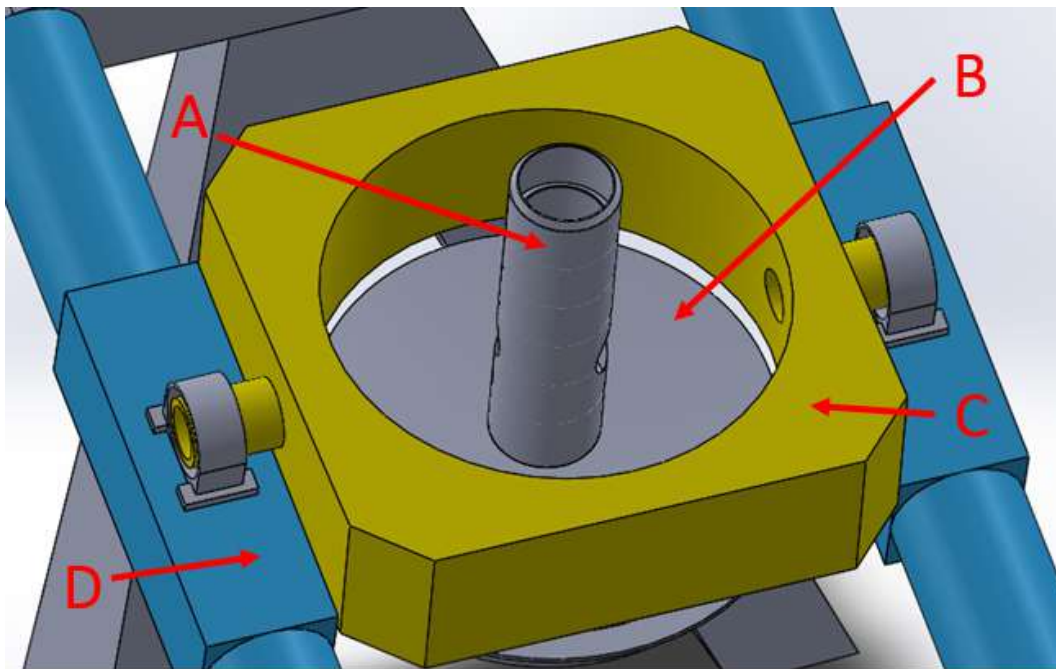


Fig. 5.7: Representación del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM (A: Deflector, B: Espejo primario, C: Estructura correspondiente a figura 5.6-B, D: Montura ecuatorial correspondiente a figura 5.6-D)

En la figura 5.7 se observa una representación del telescopio, donde existe una sección que se encuentra en el centro del espejo primario que se le conoce como deflector (figura 5.7-A). Esta parte tiene la funcionalidad de acotar el cono de luz por medio de los anillos internos que posee, por lo que funciona como protector para que no incidan rayos de luz que no son los de interés.

El deflector tiene un interés en particular ya que será dentro de este que se plantea la solución al problema que se trata en el presente trabajo. Además, se verá afectado por la implementación del acople para el foco Nasmyth. Por último, el deflector tiene implicaciones importantes sobre la solución planteada, pues habría contacto mecánico entre los componentes.

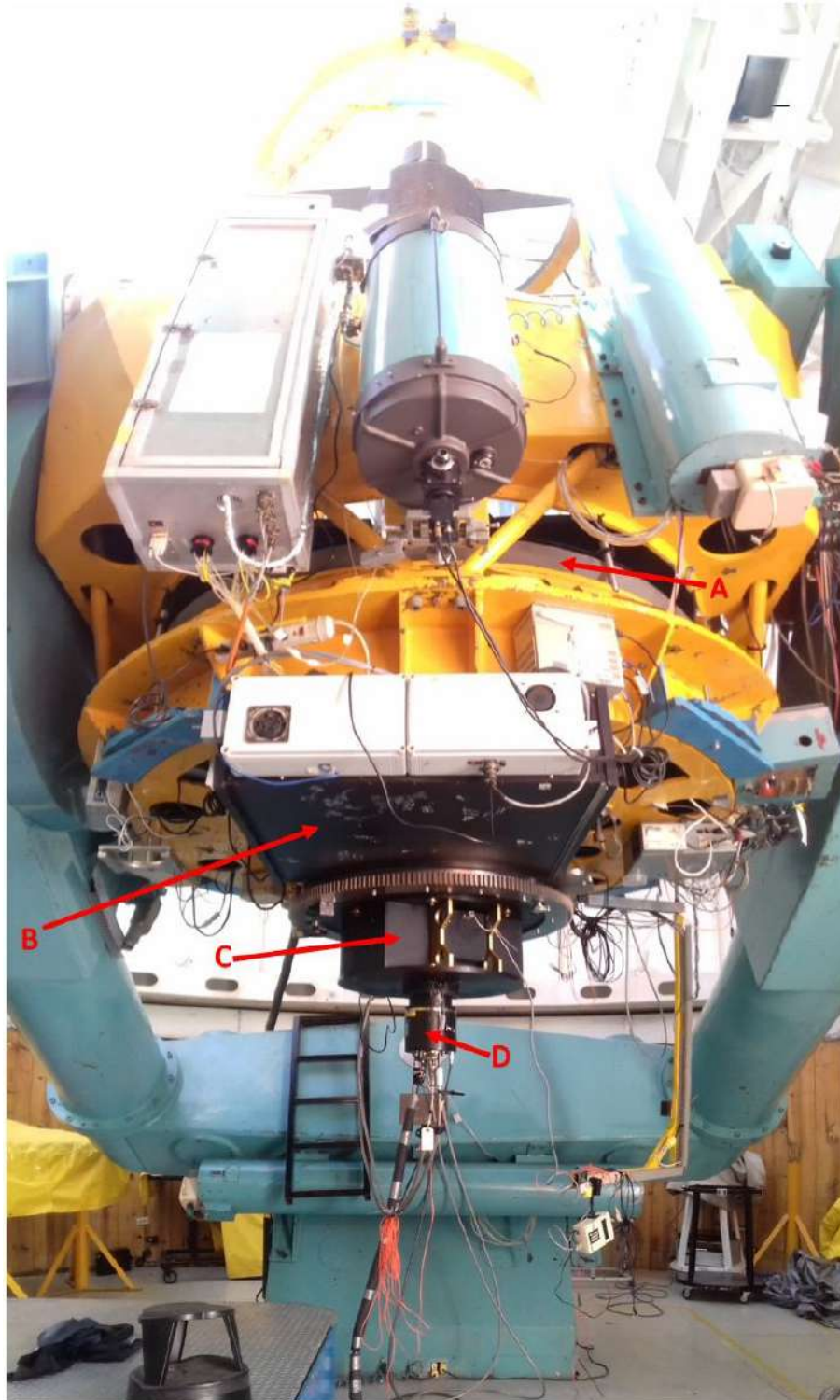


Fig. 5.8: Telescopio 2,1 m del OAN-SPM, vista hacia el sur (A: Espejo primario, B: Guiador Tijuano, C: Platina de separación, D: Cámara)

5.4 Instrumentos del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM

Guiador Tijuano

El guiador es un instrumento que fue diseñado y construido por parte de los instrumentistas del ONA, donde su objetivo es ayudar al control del movimiento del telescopio para realizar las correcciones de tal manera que no afecten significativamente a la observación del objeto astronómico en cuestión; pues por la naturaleza del sistema que le proporciona el movimiento al telescopio las correcciones no son al grado de precisión deseado, es por esto que se requiere del guiador para crear un control de lazo cerrado y mejorar el seguimiento del telescopio. Actualmente el guiador que se encuentra colocado en el telescopio de 2,1 m del OAN-SPM es el Tijuano (figura 5.8-B).

La operación del guiador se basa en desviar una porción de luz por medio del espejo a 45° de inclinación que se encuentra al extremo izquierdo de la sección llamada *Movimiento en Foco* de la figura 5.9, sin obstruir a la luz que va hacia el instrumento científico, posteriormente por medio de un sistema de lentes se logra el enfoque para poder obtener la imagen de la estrella que se utilizará para el guiado, dicha imagen se obtiene por medio de una cámara CCD que se encuentra en la sección *Electrónica*. El posicionar el espejo en una zona del campo de visión del telescopio se logra gracias a la interfaz de usuario y al sistema electromecánico que posee el guiador (secciones *Movimiento Este-Oeste* y *Movimiento Norte-Sur* de la figura 5.9). Una vez encontrada una estrella adecuada para guiar (que se encuentre en cierto rango de magnitud relativa), se le indica al guiador y el sistema de control se encarga de corregir los movimientos del telescopio para mantener la imagen de la estrella escogida siempre en el mismo lugar [12].

Importante es que el guiador, como se mencionó anteriormente, no puede interrumpir la operación normal del instrumento científico. En la figura 5.10 se puede observar una región más oscura que el resto de la imagen, siendo la zona prohibida donde el espejo del guiador no se puede situar porque obstruiría la luz del instrumento científico. Además, en la imagen se observa la zona de operación del espejo del guiador (la sección más amplia con rayas inclinadas llamada *Zona útil del campo*

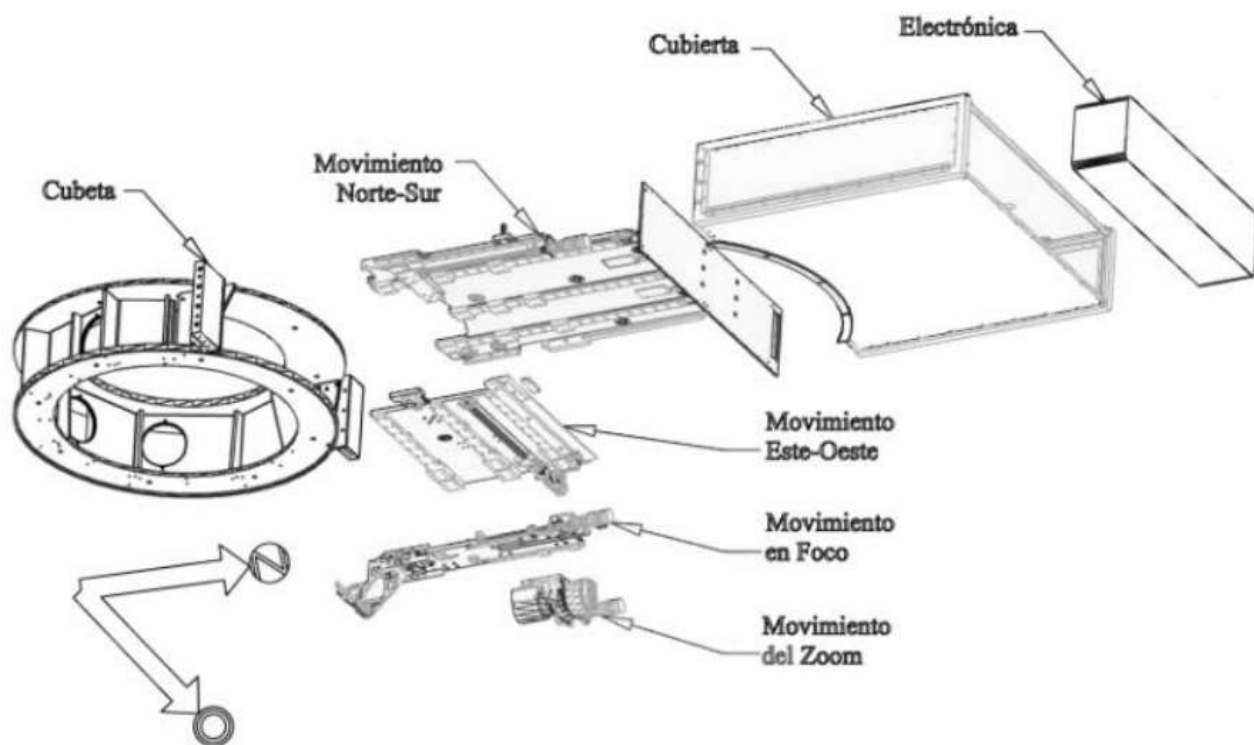


Fig. 5.9: Despiece del guiador Tijuano [12]

de visión), la cual comprende un campo amplio y así asegurar que hayan estrellas para guiado, aproximadamente $9,05'$ ($\approx 0,150833^\circ$) del eje óptico. Es importante mencionar que conforme se aleja del eje óptico se va perdiendo energía proveniente de los objetos observados, pues el deflector acota la luz hasta que para cierta separación angular del eje óptico no se tiene energía alguna.

Espectrógrafo Boller y Chivens

Este instrumento fue diseñado originalmente para el telescopio de 1,37 m del Observatorio Astronómico Di Brera, Italia, y actualmente se encuentra disponible solo para el telescopio de 2,1 m del OAN-SPM [13]. El estudio que permite hacer el Boller (como se le conoce por los expertos del OAN) es obtener el espectro de un objeto de interés, gracias a los filtros que posee se puede obtener espectros centrados en longitudes de onda desde los 300 nm hasta los 1030 nm [14], sin embargo es un dispositivo de baja resolución, permitiéndole observar en un campo visual del cielo de $1,4''$ aproximadamente [15].

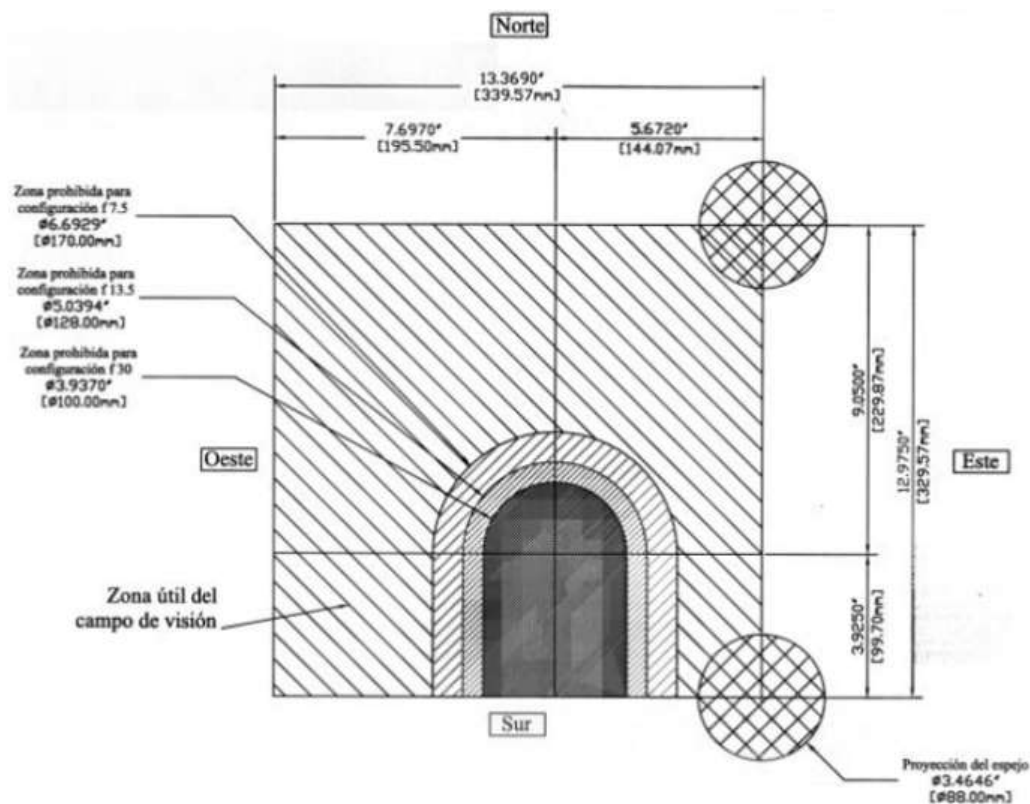


Fig. 5.10: Campo de operación del guiador Tijuano [12]

MES-SPM (Manchester Echelle Spectrometer - San Pedro Mártir) [MEZCAL]

En cuanto al Mezcal, es otro espectrógrafo con los que cuenta el telescopio y es utilizado para estudio de alta resolución, donde la relación señal/ruido debe ser alta [16]. Una ventaja que presenta este instrumento con respecto al Boller es que gracias a su distancia razón focal no se requiere de estar enfocando cada vez que se instala en el telescopio, pues pequeñas desalineaciones no afectan la posición del CCD de este instrumento [17]. Por otro lado, este instrumento originalmente era controlado por múltiples plataformas, pero gracias al esfuerzo de los expertos se centralizó el control del mismo [16].

Cámaras CCD

El telescopio cuenta con algunas cámaras dedicadas para la imagen directa y análisis fotométrico, también las cámaras son utilizadas para acoplarse a otros instrumentos como los espectrógrafos y polarímetros. Actualmente a disposición del telescopio de 2,1 m están las cámaras Marconi 2, Marconi 4, SI-2 y Andor iXon Ultra 888; las primeras tres tienen una resolución de 2048x2048 pixeles, y la última de 1024x1024 pixeles, todas con dimensiones de 13,5 μm /pixel [18].

Rueda de Filtros Italiana

El sistema ruedas de filtros italiano posee la capacidad de acoplar hasta dos filtros de manera simultanea [19] sobre el camino óptico de la luz que captura las cámaras, cuenta con 10 posiciones para los filtros en la rueda 1 y 9 en la rueda 2; con esto se logra obtener información específica de la morfología de ciertos objetos celestes debido a su composición. La rueda se utiliza cuando se desea realizar fotometría y para hacer caracterizaciones en objetos como nebulosas, galaxias, cúmulos estelares, entre otros.

Capítulo 6

Antecedentes

6.1 Introducción

Aunque el telescopio de 2,1 m fue diseñado previendo la implementación del foco Nasmyth, hasta la actualidad no se han realizado los estudios necesarios para su implementación. A pesar de que ha existido la posibilidad de la actualización al telescopio, hasta este trabajo no se había realizado un estudio formal enfocado a la implementación del Nasmyth, por lo que se hizo necesario verificar qué se ha desarrollado en otros telescopios similares para evaluar la viabilidad de poner en operación dicho foco. Al telescopio se le han hecho actualizaciones en ciertas áreas como los instrumentos que se le acoplan, la electrónica de control, los actuadores y sensores que posee; pero en cuanto a la mecánica no se han dado mejoras ya que la estructura no ha dado problemas, ni se ha requerido de una actualización de la misma.

Sin embargo, no solo el telescopio de 2,1 m del OAN-SPM se ha diseñado previendo la implementación del foco Nasmyth, existen otros telescopios que han sido diseñados para aprovechar tanto el foco Cassegrain como el Nasmyth, y de este modo tener un conjunto de instrumentos científicos acoplados al mismo tiempo, para así maximizar el uso del telescopio. La mayoría de los telescopios que poseen esta particularidad son de gran tamaño, pues con esto se reduce el tiempo

utilizado para el mantenimiento y la puesta en operación de cada dispositivo, además de asegurarle al astrónomo otra forma de aprovechamiento de su tiempo de observación en caso de que el instrumento de interés falle.

6.2 W. M. Keck Telescope

El W. M. Keck Telescope es un conjunto de dos telescopios que tiene la capacidad de operar paralelamente y se encuentran ubicados en Maunakea, Hawaii; sus espejos primarios son de 10 m de diámetro y operan tanto en el espectro visible como en el infrarrojo [20].

Estos telescopios poseen la característica de que pueden operar tanto en la configuración Cassegrain como la Nasmyth, pues su diseño original así lo contemplaba [21]. Desde el inicio del proyecto se previó que se iban a disponer de dos planos de imagen en el foco Nasmyth gracias a un espejo terciario que se ubica en el camino óptico de la luz, pero también gracias al mismo espejo terciario se disponen de 4 focos de Cassegrain doblados en las que se pueden disponer de 4 instrumentos más acoplados al telescopio de manera simultánea.

Para poder desviar la luz hacia los instrumentos que se encuentran en el foco Nasmyth o en el Cassegrain doblado, el espejo terciario es un espejo plano que puede rotar sobre el eje óptico, por lo que puede redirigir la luz hacia cualquiera de los instrumentos que se encuentren sobre el mismo plano en el que gira.

6.3 Mercator Telescope

Este telescopio se encuentra en el observatorio Roque de los Muchachos, Islas Canarias, España y fue desarrollado en colaboración con el Observatorio de Ginebra [22]. Dicho telescopio es de 1,2 m de diámetro en su espejo primario y posee una configuración tipo Ritchey-Chretien, con

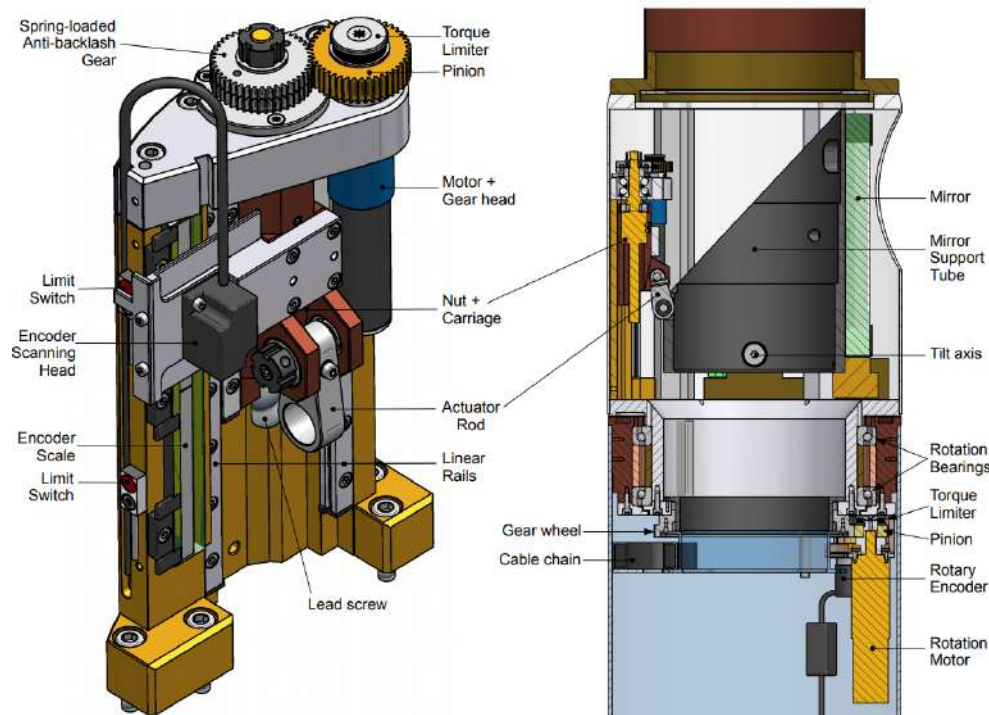


Fig. 6.1: Izquierda: actuador lineal que activa el mecanismo de inclinación del espejo. Derecha: vista de mecanismo de inclinación y rotación del espejo terciario [23].

una distancia focal de 14,4 m y una montura altazimutal [22]. Por las características que posee es similar al telescopio de 2,1 m del OAN-SPM. Actualmente, el telescopio opera en el foco Cassegrain y una estación del foco Nasmyth, pues tiene disposición para operar en ambos. En [23] se muestra el diseño de una actualización al actual telescopio, donde se da el aprovechamiento de ambos focos Nasmyth.

En la figura 6.1 se aprecia en la imagen de la izquierda el mecanismo que pone en operación al espejo terciario, donde por medio de su motor y reducción se alcanzan errores de $\pm 5,6 \mu\text{m}$, y una repetibilidad de $1 \mu\text{m}$ la cual se traduce a $0,35''$ en el cielo [23]. Como sistema de realimentación posee sensores de final de carrera (Limit Switches) y codificadores lineales (Encoders) que le permiten controlar la inclinación en la que se encuentra el espejo. Gracias a estos elementos se puede cambiar entre la configuración Cassegrain y Nasmyth para el telescopio Mercator, permitiéndole versatilidad en cuanto al uso de los instrumentos.

Por otro lado, en la figura 6.2 se observa el sistema completo del tubo desviador (Deviator tube),

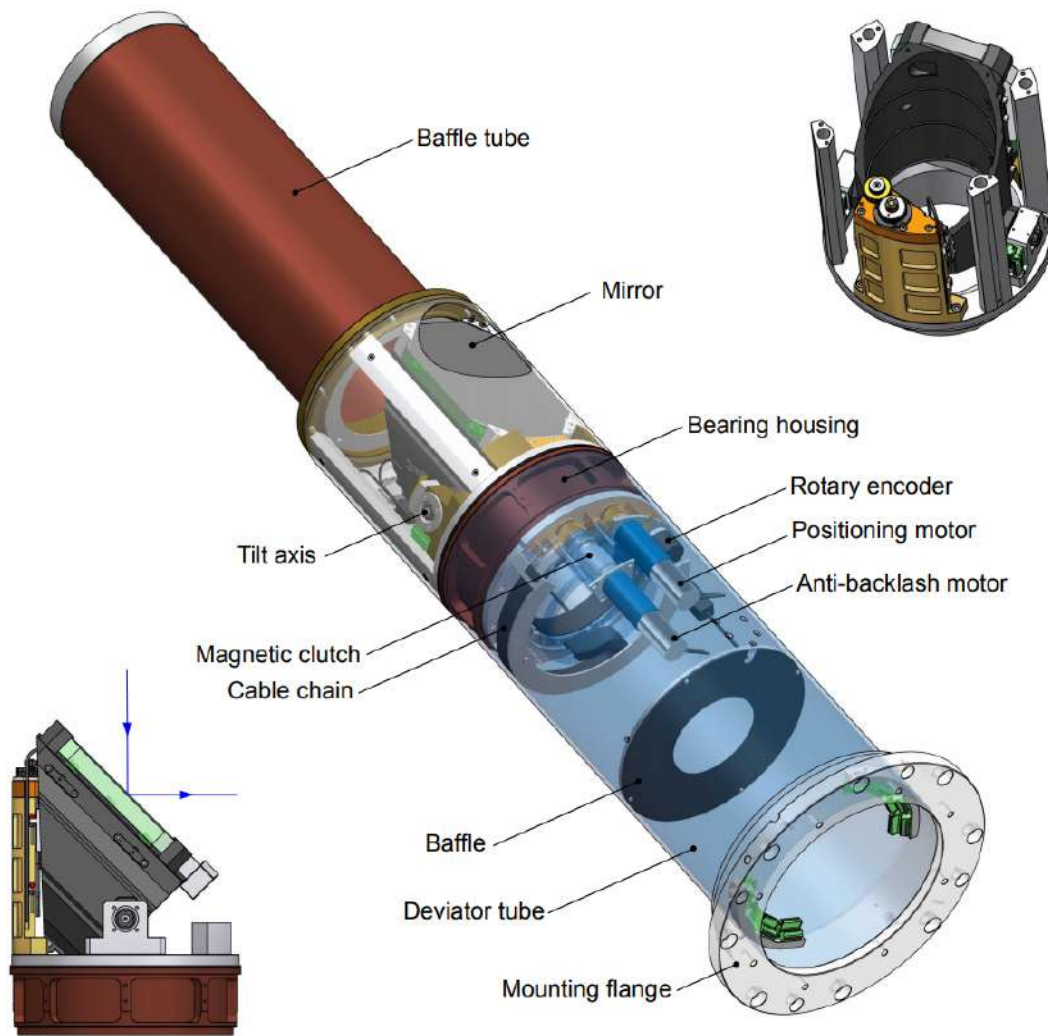


Fig. 6.2: Espejo Nasmyth con mecanismos de inclinación y rotación, montados en el tubo desviador. Arriba a la derecha y abajo a la izquierda: mecanismo de inclinación en posición Cassegrain y Nasmyth, respectivamente [23].

el sistema de soporte del espejo terciario y el deflector (baffle tube). Para el cambio de estación (análogo estación a eje Este-Oeste del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM) del foco Nasmyth en [23] se propone que la estructura que soporta e inclina el espejo terciario rote, por lo que girando 180° se podría desviar la luz hacia otro instrumento. Para el caso del movimiento rotacional, se propone la utilización de un embrague (clutch) que limitaría el torque a transferir hacia el soporte del terciario. Y al igual que para el sistema de inclinación, se propone la utilización de codificadores para tener realimentación al sistema de control.

Para el sistema de control, se propone la utilización de un Controlador Lógico Programable (PLC por sus siglas en inglés).

En la imagen 6.2 se visualiza cuando el espejo está en operación y para cuando se encuentra en su posición de descanso. En la posición de operación el actuador se desplaza en dirección hacia el tubo desviador y el espejo terciario queda a 45° como se observa en la sección izquierda de la imagen 6.2, con esto se logra desviar la luz y al ser un espejo plano no sufren ninguna variación los rayos de luz. Al lado derecho de la misma imagen se observa el espejo terciario cuando se encuentra activa la configuración Cassegrain.

Capítulo 7

Metodología

En la siguiente sección se mostrará la metodología que se siguió para el desarrollo del proyecto. Cabe mencionar que cierta información se fue obteniendo conforme se desarrollaba el proyecto, también se fueron visualizando nuevos escenarios y especificaciones que no se tenían en cuenta al inicio, por lo que el desarrollo del proyecto no sigue una línea de diseño ingenieril típica. El presente trabajo es una mejoría al telescopio; sin embargo, al ser este antiguo y que se le han realizado otras mejorías, la obtención de la información y los parámetros para la realización del diseño va de la mano a la experiencia de los involucrados en el proyecto.

7.1 Obtención de requerimientos de alto nivel

La primera tarea realizada era obtener los requerimientos de alto nivel con los que se pudiera demarcar bien el contexto del proyecto, y comprender de manera global qué era lo que se requería hacer, bajo qué restricciones se tenía que diseñar, y de este modo ir visualizando las características de la estructura mecánica, electrónica y el control del nuevo sistema.

La forma de obtener los requerimientos fue dialogando con las partes interesadas en el proyecto,

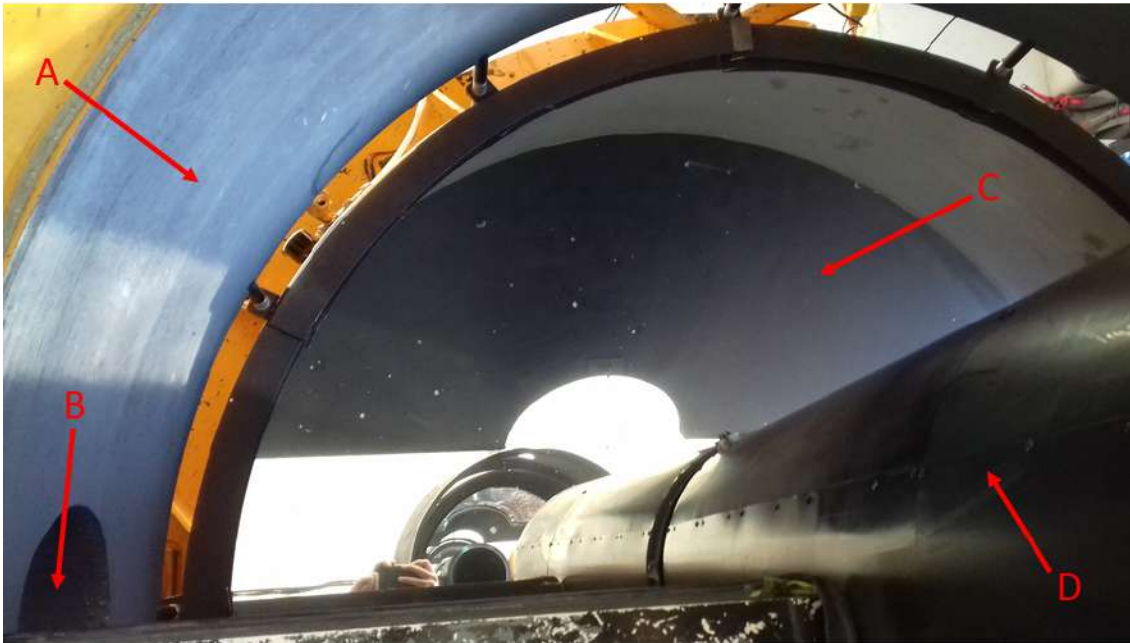


Fig. 7.1: Vista interior del telescopio (A: Estructura de soporte, B: Orificio del eje de declinación, C: Espejo primario de 2,1 m de diámetro, D: Deflector del espejo primario)

específicamente con el grupo de Ciencias Planetarias del OAN sede Ensenada. Este grupo es el principal interesado en la implementación del foco Nasmyth, pues les permitiría aprovechar observaciones de oportunidad (ocultaciones estelares, tránsitos de exoplanetas, entre otros) si al menos estuviera una cámara como instrumento científico en alguno de los focos del telescopio.

Los requerimientos que se presentan parten de la configuración y los parámetros que se tienen actualmente en el telescopio. Los valores fueron dados por los expertos basándose en las implicaciones que tendría el acoplar un espejo terciario al telescopio (repetibilidad, estabilidad del sistema, versatilidad, entre otros).

Los requerimientos se pueden observar en la sección 8. Cabe resaltar algunos por su importancia relativa en el diseño como lo es que el espejo terciario debe ser abatible de manera automática, el diseño no puede incurrir en grandes modificaciones al telescopio como alteraciones al espejo o a su soporte, y que debe operar sin importar la orientación del telescopio.

Una vez que se obtuvieron estos requerimientos, se requería conocer la estructura para poder visualizar mejor cómo debía de ser el acople para el foco Nasmyth, en la siguiente sección se

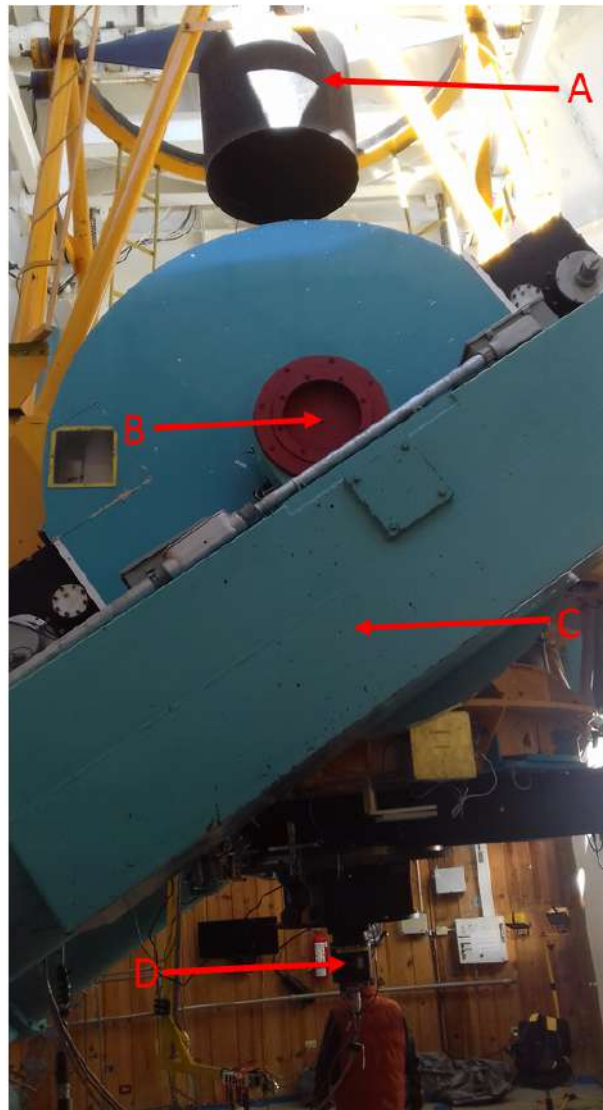


Fig. 7.2: Vista del telescopio desde el Este (A: Deflector del espejo secundario, B: Tapa de madera del eje de declinación, C: Montura ecuatorial, D: Instrumento científico)

comenta cómo se realizó el proceso.

7.2 Reconocimiento de la estructura física

El reconocimiento se hizo de manera personal por parte de los involucrados en el proyecto para verificar las opciones de instalación del acople y poder conocer las dimensiones de los elementos involucrados. Cuando se dio la autorización para la manipulación del telescopio, se le solicitó

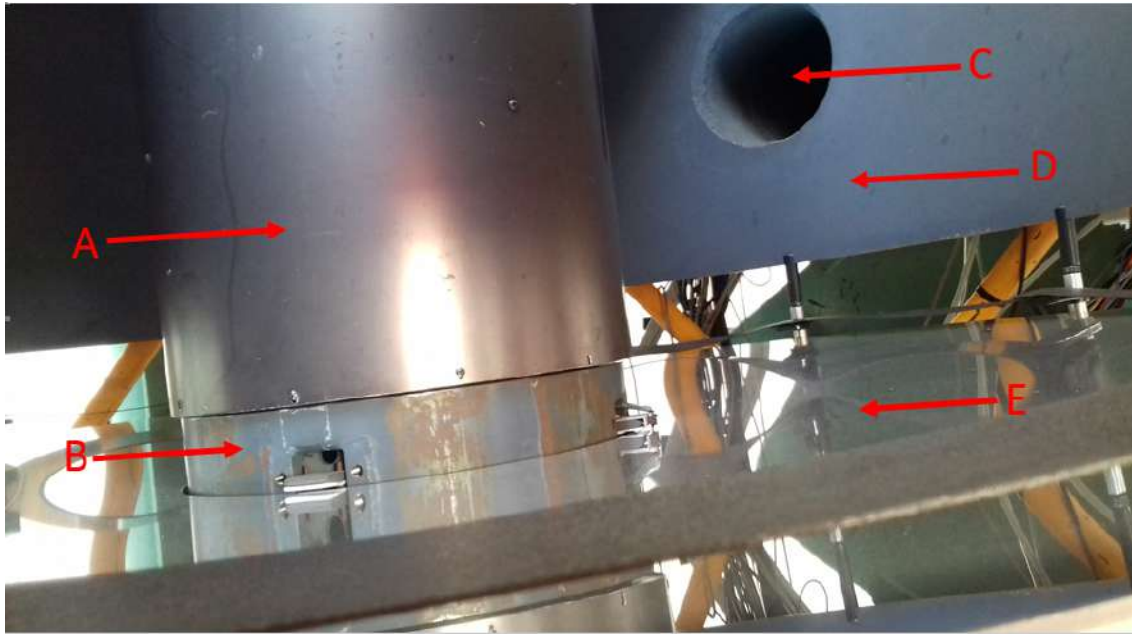


Fig. 7.3: Vista interior del telescopio (A: Deflector del espejo primario, B: Apoyo del deflector del espejo primario, C: Orificio del eje de declinación, D:Estructura de soporte, E: Espejo primario de 2,1 m de diámetro)

colaboración al personal del OAN para asegurar la estructura que soporta el telescopio de 2,1 m y así resguardar la integridad del equipo de trabajo.

Primeramente se comprobó que la sección sobre la que rota el eje de declinación y soporta el telescopio fuera una sección hueca que permitiera que la luz pase a través de él (figura 7.1-B). Posteriormente, por el orificio que presentaban las tapas de madera laterales (figura 7.2-B) se le hizo pasar una luz láser para verificar el sitio en el deflector donde aproximadamente se debe colocar el espejo terciario. Realizado esto para ambos extremos este y oeste, se procedió a realizar mediciones de tamaños y distancias de interés, como el diámetro del deflector, distancia entre espejo primario y ubicación del espejo terciario, entre otras.

Existió la necesidad de tomar medidas de los elementos en la estructura porque no existen planos actualizados ni documentos tipo CAD donde se pudiera obtener esa información. Luego de obtener los datos necesarios se construyó un dibujo CAD en 3D para la correcta visualización de las partes involucradas.

Mientras se realizaban las mediciones en el telescopio, se observó que el deflector tiene un movimiento significativo en la par de hasta 1 cm, por lo que se resaltó la importancia de tomar en cuenta la forma en que se soporta el deflector para el futuro sistema a adaptarse sobre dicho elemento. En la figura 7.3-B se puede observar del lugar donde se encuentra fijado el deflector al telescopio. Es importante destacar que solo se tiene ese punto de apoyo para el deflector, siendo indispensable tomar en cuenta las implicaciones que esto conlleva, por lo que se le dedicará un espacio para el análisis de este elemento.

7.3 Propuesta de soluciones

Luego de tener un panorama más claro de lo que el proyecto involucraba, se procedió a elaborar los conceptos de diseño con los que se partiría para determinar, por medio del conocimiento de los involucrados, cuál sería el que mejor se adaptaría a los requerimientos.

Los primeros conceptos de diseño se pueden observar en la sección 10.3.

Para la elaboración de estos conceptos se procedió a buscar elementos mecánicos que facilitarían los movimientos que se deseaban. Luego de encontrar conjuntos mecánicos que en concepto se adaptaban a los requerimientos, como permitir movimientos de rotación tal cual lo hacen el conjunto Gusano - Corona, y movimiento de traslación como el conjunto Tornillo sin fin - Husillo lo permite. Se sometieron a la evaluación por parte de los expertos, donde gracias a la experiencia que se posee en el campo se llegó a encontrar un concepto mecánico que se ajustaba a los parámetros solicitados. Esta asesoría fue crucial ya que se identificaron problemas de desalineaciones a causa de la temperatura en los sistemas que poseen engranes, siendo el concepto propuesto por ellos exento de desalineaciones; además de ser un sistema que ya había sido implementado por parte del grupo de instrumentación del OAN sede Ensenada.

7.4 Estudio de las variables y elementos implicados

Cuando se realizaron los conceptos de diseño, una conclusión importante a la que se llegó de ese proceso es que se requería saber el tamaño del espejo terciario y que de ahí derivaría el desarrollo del diseño del prototipo. Además del tamaño del espejo terciario, existen otros factores que se visualizaron durante las evaluaciones de la sección 7.3, como lo era si se podría utilizar el guiador a pesar de la obstrucción de luz que le iba a provocar el espejo terciario.

Con ayuda del software Zemax se obtiene el lugar donde se formará el plano imagen del foco Nasmyth, posteriormente se integra al dibujo CAD que se había realizado en la sección 7.2 y se observa que el foco queda dentro de la estructura, por lo que se requiere analizar las implicaciones que esto tiene.

Los principales factores que afectan y se deben verificar para el diseño del acople son los siguientes,

- Calidad de imagen del foco Nasmyth.
- El guiador.
- Máximo de magnitud aparente de estrellas a observar.
- Instrumentos a utilizar en el foco Nasmyth.
- Vibraciones y desalineaciones en las imágenes.

Para la verificación del uso del guiador, se realizó el estudio que se muestra en la sección 9.2.2, que ayudó a visualizar la afectación que sufre por obstruirse la luz que en la configuración Cassegrain logra capturar.

7.5 Desarrollo del diseño mecánico

Luego de haber analizado las variables y elementos que afectan al acople y su funcionamiento, se definieron los parámetros a seguir para el diseño del acople. Se procedió a dibujar en el software Solidworks el sistema mecánico y electromecánico para visualizar que se ajuste a los límites físicos con los que se cuenta.

El diseño de la estructura mecánica se realizó basado en la funcionalidad del sistema, por lo que solo se tomó en cuenta la forma que debía tener el acople para la realización del dibujo. Posteriormente, se verifica que cumplan con los requerimientos que no fueron tomados en cuenta, como lo fue el factor de seguridad, la repetibilidad del sistema, entre otros.

7.6 Diseño del sistema electromecánico

En cuanto a la parte electromecánica del acople, conforme se fue dibujando la sección estructural se tomó en consideración los actuadores que darían el movimiento al sistema. Dichos elementos se escogieron para que se acoplaran en el espacio limitado que se poseía, y posteriormente se comprueba que cumplan con los requerimientos de potencia.

7.7 Diseño del sistema de control

Para el sistema que controla el movimiento del espejo terciario, se eligieron dispositivos que no solo cumplieran con las necesidades de conectividad y capacidad de operación, sino que también fueran conocidos por los instrumentistas del observatorio, ya que de este modo su implementación y mantenimiento iba a simplificarse.

Se procedió a realizar la programación en el software Python aprovechando las bibliotecas que se encuentran disponibles para el control de los dispositivos periféricos al controlador.

7.8 Construcción del prototipo

Luego de concluir con la sección 7.5 y mientras se iba desarrollando las secciones 7.6 y 7.7, se inició con la construcción de un prototipo impreso en 3D para la verificación de algunos de los requerimientos solicitados para el acople.

Gracias al esfuerzo de uno de los colaboradores del proyecto se tuvo acceso a una impresora 3D ensamblada por él mismo, al no ser una impresora comercial se tuvieron problemas con las impresiones pues no su operación no se encontraba en el estado esperado. Además, las dimensiones máximas de las piezas que puede realizar la impresora estaban muy por debajo de las requeridas para construir el prototipo a escala real, por lo que se tuvo que seccionar los elementos y una vez impresos se requirió unirlos por medio de un epóxico.

7.9 Verificación del diseño

Conforme se construía el prototipo (sección 7.8) se realizaban simulaciones de las cargas a las que estarían sometidos los elementos mecánicos del acople. Las simulaciones se realizaron con el software Solidworks y se hicieron a cada elemento por separado, esto por dificultades al momento de configurar las sujeciones de los pernos y tornillos; por lo que se realizó de la manera más simplificada posible, realizando las consideraciones necesarias para obtener resultados aceptables.

Por otro lado, cuando se finalizó la construcción del prototipo impreso en 3D (sección 7.8) se dispone a moverlo con los componentes que se tenían a disposición, ya que no eran los mismos componentes escogidos para el control del acople. De esta manera se comprueba la funcionalidad del sistema de control y se obtiene la repetibilidad del sistema construido, que sirve de base para calcular la del acople diseñado.

Capítulo 8

Requerimientos

8.1 Introducción

A continuación se abordará el proceso de diseño como tal, donde se mostrarán los requerimientos y su interpretación así como los efectos que estos tendrán sobre el diseño a realizar. Por otro lado, se muestran los conceptos de diseño que se utilizaron de base para el diseño final, donde se analiza las implicaciones que cada uno cuenta, además de sus ventajas con respecto a los requerimientos y las limitaciones que presentan.

8.2 Requerimientos de alto nivel

Los requerimientos que se enuncian a continuación son los que se aportaron por parte del personal del OAN involucrado en el proyecto. El valor al final de cada uno que se encuentra entre paréntesis es la importancia relativa de cada uno, donde 1 = importancia relativa baja, 2 = importancia relativa media y 3 = importancia relativa alta.

1. Que el sistema completo se pueda sacar de operación de forma automática para dejar habil-

- itado la configuración actual (3).
2. Que el error en la repetibilidad del movimiento de entrada y salida de operación sea menor a una variación de 20 segundos de arco en la posición de un objeto observado por medio de una cámara con el foco de $f/7,5$ (2).
 3. El desplazamiento de un objeto observado por medio de una misma cámara y el foco de $f/7,5$ no sea mayor a 1 segundo de arco cuando el foco Nasmyth esté en operación (2).
 4. El sistema a implementar no puede interferir de manera significativa con el espejo primario, con esto se pretende que el área del acople proyectada sobre el espejo primario no interfiera más de un 10% del área de dicho espejo (2).
 5. Debe operar sin importar la inclinación del telescopio, pues una vez acoplado al mismo éste seguirá a los movimientos que el telescopio realice (3).
 6. Se debe de colocar en una posición de descanso mientras no esté operando el foco Nasmyth que no interfiera la operación de la configuración Cassegrain (2).
 7. El sistema debe ser lo más simple posible, y que requiera la menor manipulación y alteración posible del telescopio como se encuentra actualmente (3).
 8. Las piezas con las que se construiría la solución deben ser de fácil adquisición y no representar un costo de fabricación muy alto (1).
 9. Las estructura con sus componentes electrónicos deben poder ensamblarse en el Instituto de Astronomía, sede Ensenada (1).
 10. De requerir manufacturarse algo debe poderse hacer en el taller del Instituto de Astronomía, sede Ensenada (1).
 11. El sistema debe permitir la utilización de un espejo dicróico (2).

Los requerimientos 2 y 3 están determinados por valores que hacen que el sistema deba poseer cierta rigidez. Para el requerimiento 2, los 20 segundos de arco se deben a que como se menciona en el requerimiento 11 se debe permitir el uso de un espejo dicróico, por lo que con los 20 segundos de arco se asegura que el campo para ambos planos de imagen Nasmyth y Cassegrain se mantengan relativamente constantes cuando el sistema entre y salga de operación con el dicróico. Por último, el requerimiento 3 restringe el movimiento a 1 segundo de arco cuando se encuentre activo el espejo terciario, esto se debe a que actualmente la resolución del telescopio es de 1,5 segundos de arco[24], por lo que para no propagar en gran medida ese valor de error se delimita a 1".

Capítulo 9

Estudio previo y análisis óptico

9.1 Introducción

En este capítulo se presenta el estudio previo realizado para considerar los pormenores que engloban al foco Nasmyth y así, tener criterio fundamentado para poder tomar las decisiones de diseño que se ajusten a las necesidades del observatorio, específicamente del telescopio y usuarios. Por otro lado, se muestra el análisis óptico que se realiza para definir los parámetros ópticos con los que el diseño del acople será realizado, además de las otras consideraciones ópticas en que se incurre por la utilización del foco Nasmyth como tal. Como complemento al análisis y principal herramienta se utilizó el software ZEMAX-EE Optical Design Program.

9.2 Análisis óptico

El estudio óptico del foco Nasmyth se hace para la verificación y validación teórica de la solución a implementar. Con esto se encontrará la calidad de imagen de diseño del nuevo foco, el cambio de la calidad de imagen con respecto al movimiento del secundario, así como determinar el tamaño

del espejo a utilizar con respecto a los requerimientos.

9.2.1 Tamaño de espejo para reflexión completa de rayos que inciden sobre CCDs del telescopio de 2,1 m

Como se menciona en la sección 5.4, el telescopio de 2,1 m cuenta con algunas cámaras tipo CCD, y como se solicitan en los requerimientos de alto nivel (sección 8.2) la utilización de una cámara, se hace necesario tomar en cuenta los parámetros bajo los que opera la cámara para verificar factores en cuando a la óptica involucrada.

La escala de placa (EP) del telescopio de 2,1 m es de 13,03 "/mm, la cámara Marconi 2 y 4 tienen una resolución de 2048x2048 pixeles, por lo que poseen 2048 pixeles lineales (P) y el tamaño de cada pixel (TP) es de 13,5 μm . A continuación se calcula el tamaño angular (TA) respecto al telescopio de la cámara.

$$EP \left[\frac{''}{mm} \right] * \frac{1[mm]}{1000[\mu m]} * \frac{1[']}{60['']} = \text{escaladeplaca} \left[\frac{'}{\mu m} \right] \quad (9.1)$$

$$13,03 \left[\frac{''}{mm} \right] * \frac{1[mm]}{1000[\mu m]} * \frac{1[']}{60['']} = 217,1667x10^{-6} \left[\frac{'}{\mu m} \right] \quad (9.2)$$

$$EP \left[\frac{'}{\mu m} \right] * TP \left[\frac{\mu m}{pixel} \right] * P[pixel] = TA['] \quad (9.3)$$

$$217,1667x10^{-6} \left[\frac{'}{\mu m} \right] * 13,5 \left[\frac{\mu m}{pixel} \right] * 2048[pixel] = 6,0042['] \quad (9.4)$$

De los cálculos anteriores se obtiene que el tamaño angular de la cámara es de aproximadamente 6', siendo esta la distancia angular máxima que el CCD captura, por lo que utilizando la premisa de que el eje óptico se encuentra en el centro del sensor, la cámara estaría detectando 3' desde dicho eje (TAE). A partir de este valor, y dando una holgura de 0,5 ' se calculará el espejo para poder reflejar toda la luz proveniente de los rayos que posean esa separación angular.

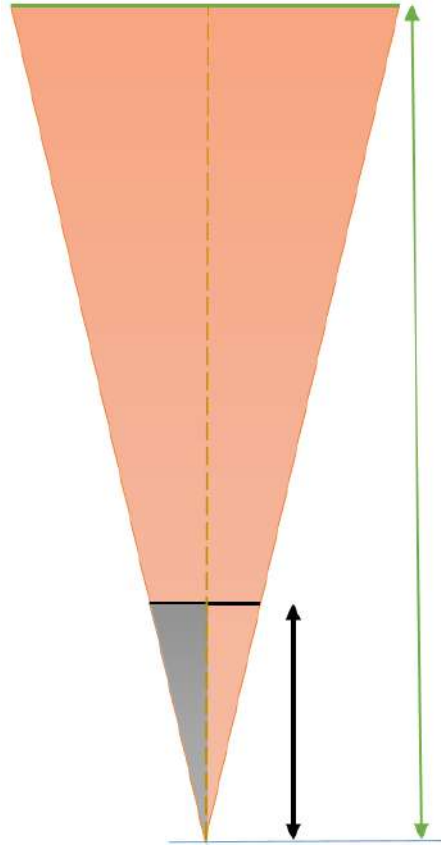


Fig. 9.1: Cono de luz, no a escala (Flecha verde: distancia focal $f/7,5 = 15824$ mm, Línea verde: diámetro efectivo del espejo primario = 2108 mm, Línea azul: plano imagen, Flecha negra: distancia plano imagen a espejo terciario = 1627 mm, Línea negra: tamaño del círculo proyectado para captura de rayos de luz del eje óptico, Línea amarilla punteada: eje óptico del telescopio)

Ahora se procede a calcular el tamaño en milímetros del sensor (TS) desde el eje óptico:

$$EP \left[\frac{''}{mm} \right] * \frac{1[']}{60['']} = EP \left[\frac{'}{mm} \right] \quad (9.5)$$

$$13,03 \left[\frac{''}{mm} \right] * \frac{1[']}{60['']} = 0,2102 \left[\frac{'}{mm} \right] \quad (9.6)$$

$$\frac{TAE[']}{EP \left[\frac{'}{mm} \right]} = TS[mm] \quad (9.7)$$

$$\frac{3,25[']}{0,2102 \left[\frac{'}{mm} \right]} = 15,4615[mm] \quad (9.8)$$

El tamaño del sensor desde el eje óptico a satisfacer será de 15 mm, se disminuye ligeramente

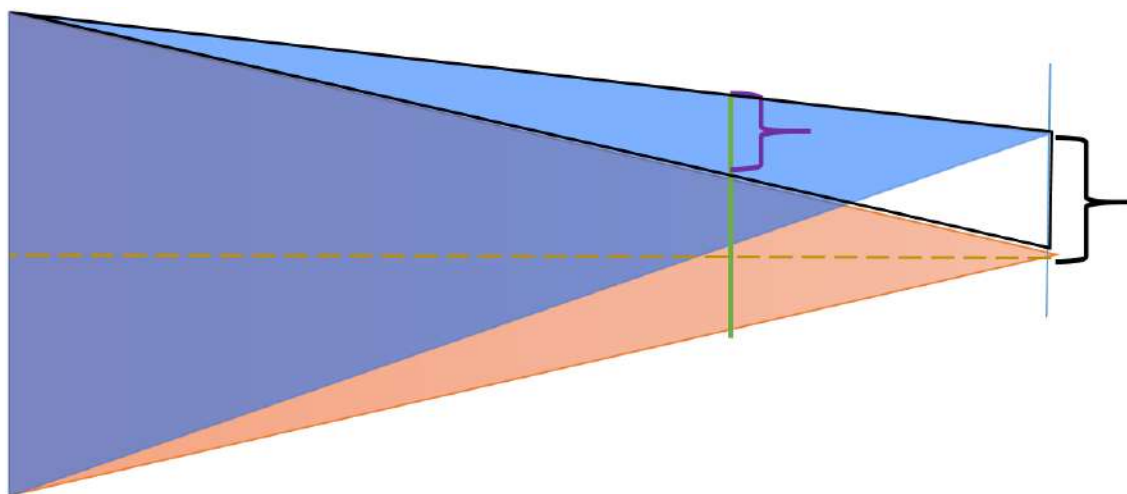


Fig. 9.2: Representación para cálculo de separación angular, no a escala (Triángulo naranja: cono de luz eje óptico, Triángulo celeste: cono para luz separada 3,25 ' del eje óptico, Línea verde: posición del espejo terciario, Línea punteada: eje óptico del telescopio, Corchete morado: separación a altura de espejo terciario entre cono de luz de eje óptico y de cono separado 3,25 ', Corchete negro: separación en el plano de imagen entre luz de eje óptico y luz separada 3,25 ')

al valor que dio en el cálculo anterior por sugerencia del personal del OAN. Ahora se procede a calcular el tamaño del diámetro del círculo proyectado para el espejo terciario, para esto se hará de la siguiente manera: el trayecto óptico de la luz es un cono, que si se proyecta sobre un plano se transforma en un triángulo (figura 9.1), en el cual la base es el diámetro del espejo primario (figura 9.1-Línea verde) y la altura es la distancia focal (figura 9.1-Flecha verde). El espejo terciario (figura 9.1-Línea negra) se encontrará a 1627 mm de distancia desde el foco (figura 9.1-Flecha negra), por lo que a esa distancia por medio de triángulos semejantes (triángulo naranja y gris de figura 9.1) se puede determinar el tamaño del espejo requerido para reflejar todos los rayos pertenecientes al eje óptico.

$$\frac{\emptyset_{terciario'}}{\emptyset_{primario}} = \frac{d_{foco-terciario}}{d_{focal}} \quad (9.9)$$

$$\frac{\emptyset_{terciario'}}{2108} = \frac{1627}{15824} \quad (9.10)$$

$$\emptyset_{terciario'} = \frac{2108 * 1627}{15824} = 216,74mm \quad (9.11)$$

Una vez que se ha obtenido el valor del diámetro para el cual se refleja toda la luz del eje óptico,

se debe encontrar el tamaño del nuevo diámetro para el cual se reflejaría también todos los rayos que están separados angularmente $3,25'$ del eje óptico. Para esto se utiliza el mismo método de triángulos semejantes, siendo el triángulo con bordes negros que se forma en la figura 9.2. Se analiza de esta manera pues los rayos de luz cuando son reflejados por el telescopio se encuentran tan cercanos entre ellos a la altura del espejo primario que se asume que provienen del mismo punto.

Lo que se obtendrá con el siguiente cálculo es la distancia que existe entre el extremo del cono de luz perteneciente al eje óptico y el extremo del cono de luz perteneciente al rayo de luz que está a $3,5'$ del eje óptico (figura 9.2-Corchete morado).

$$\frac{d_{3,25'}}{TS} = \frac{d_{\text{primario-terciario}}}{d_{\text{focal}}} \quad (9.12)$$

$$\frac{d_{3,25'}}{15} = \frac{15824 - 1627}{15824} \quad (9.13)$$

$$d_{3,25'} = \frac{15 * 14197}{15824} = 13,43mm \quad (9.14)$$

Ahora que se posee el valor de separación lo que prosigue es sumarle el doble de este valor al diámetro del espejo terciario obtenido en el cálculo 9.11 y con ello se tendrá el diámetro del círculo proyectado por el espejo terciario.

$$\emptyset_{\text{terciario}} = \emptyset_{\text{terciario}'} + 2 * d_{3,25'} \quad (9.15)$$

$$\emptyset_{\text{terciario}} = 216,74 + 2 * 13,43 = 243,60mm \quad (9.16)$$

En la figura 9.3 se observa la verificación que se realiza en el software Zemax, con los parámetros reales que posee el telescopio de 2,1 m del OAN-SPM. En sección B de dicha imagen se visualiza la porción de luz que se obstruiría respecto a la configuración Cassegrain, donde a la obstrucción se le asigna el tamaño encontrado en la ecuación 9.16, además de aplicar varios rayos de luz separados

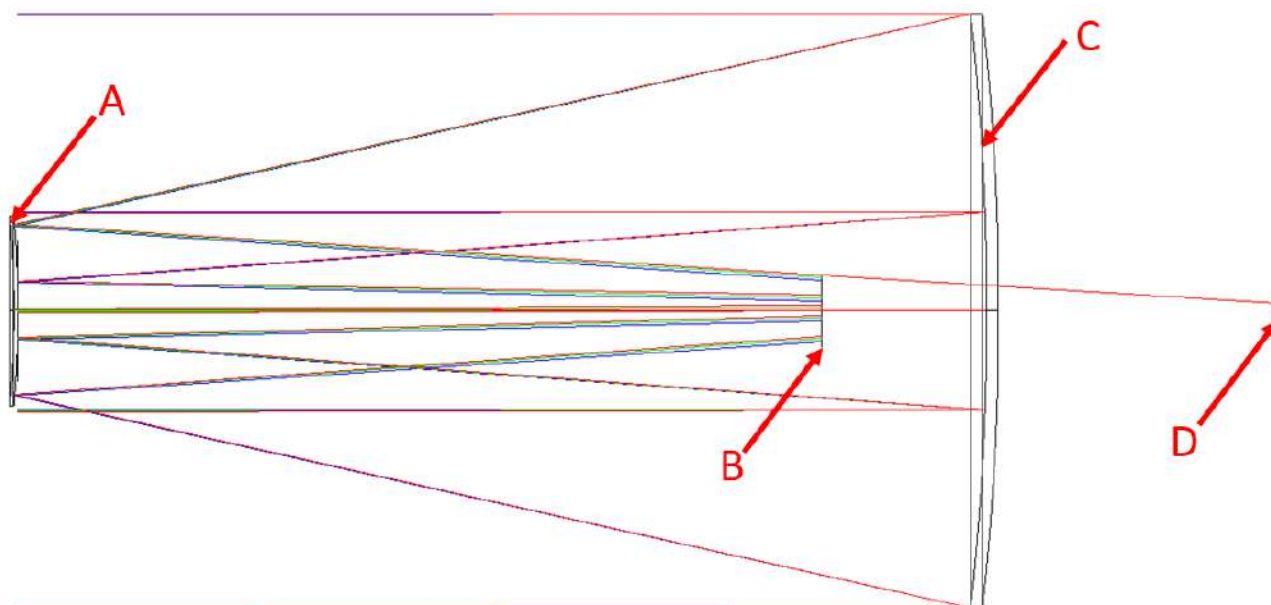


Fig. 9.3: Modelo del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM obtenido con el software Zemax (A: Espejo secundario, B: Obstrucción por espejo terciario, C: Espejo primario, D: Plano imagen de configuración Cassegrain, Rayos azules: luz en eje óptico, Rayos verdes: luz separada 3,25 ' de eje óptico, Rayos rojos: luz separada 6 ' de eje óptico)

angularmente del eje óptico (la descripción de cada rayo se observa en la figura 9.3. Se comprueba que para el tamaño del círculo de la ecuación 9.16 se obstruye todo el cono de luz desde el eje óptico hasta el cono de luz separada 3,25 ', y para aquellos rayos que se encuentren más separados de esa distancia no se captura todo el cono de luz, se deja pasar una parte de la misma; esto implica que se aunque en el plano imagen de la configuración Nasmyth se pueda visualizar más de 6,5 ' hay un decremento de la energía conforme se aleja del eje óptico, y en el plano imagen de la configuración Cassegrain se podrá observar la luz que tiene tal separación angular (mayor a 3,25 ' del eje óptico).

Seguidamente se calculará el eje mayor del espejo, ya que el espejo opera a 45° la figura geométrica que proyectará el círculo deseado para reflejar correctamente la luz será una elipse. El eje menor ya se obtuvo en el cálculo 9.16. El eje mayor se calculará como el valor del diámetro del círculo proyectado por la raíz cuadrada de 2, esto como si se observara el espejo lateralmente y dicho objeto sería la hipotenusa de un triángulo rectángulo.

$$\emptyset_{eje_{mayor}} = 243,60 * \sqrt{2} = 344,50mm \quad (9.17)$$

Con esto se concluye el análisis para determinar las dimensiones el espejo que haría que se refleje la luz que se encuentre a 3,5 ' del eje óptico. Esto considerando las cámaras CCD con que cuenta el telescopio de 2,1 m del OAN. A modo de resumen, el eje menor de la elipse mide 243,60 mm y el eje mayor 344,50 mm.

9.2.2 Funcionamiento del guiador con obstrucción de espejo terciario

Como se menciona en la sección 5.4, el guiador es de especial importancia para minimizar el error del movimiento mecánico producido por la corrección que hace el telescopio, por lo que si se desea un seguimiento preciso es de vital importancia. Sin embargo, como se le pondrá una obstrucción se le va a quitar luz y esto podría ser desde una cantidad poca hasta dejar por completo sin luz al guiador dependiendo de dónde se ubique su espejo. Si se le quita luz hará que las estrellas parezcan de una magnitud aparente mayor, y esto tiene consecuencia en el guiado.

Al quitarle energía de la estrella al guiador hará que el tiempo de exposición del CCD se deba incrementar, implicando que la cantidad de correcciones por periodo de tiempo disminuya.

Dependiendo del estudio que se utilice no es crucial el uso del guiador, pues para fotometría de alta cadencia ($> 0,2$ Hz) se podría utilizar la misma imagen para el guiado. Para polarimetría y espectroscopía sí es de vital importancia el guiador, ya que si no se corrige el movimiento del telescopio con precisión el estudio obtenido no tendrá ningún valor científico.

Como parte de los requerimientos de alto nivel se plantea el uso de un espejo dicróico, sin embargo la utilización de este dispositivo haría una afectación mínima, pues permite pasar luz en ciertas longitudes de onda hacia el guiador, lo cual haría que aumente la energía que el CCD del guiador captura de las estrellas.

La distribución de la energía de los rayos de luz que se encuentran cerca del eje óptico describe una función plana según los expertos del OAN, con base en esta afirmación se puede hacer una correlación entre la distribución de la energía y las áreas del círculo proyectado del deflector que permite el paso de la luz y el área del espejo terciario que obstruiría la luz.

Se procede a calcular el área del quinto anillo del deflector, ya que el sitio donde se ubicaría el espejo terciario es cercano a esta zona, el diámetro del quinto anillo es de 330,2 mm (radio = 165,1 mm) y el diámetro proyectado del espejo terciario es de 243,6 mm (radio = 121,8 mm), obtenido de sección 9.2.1.

$$Area_{5anillo} = \pi * r_{5anillo}^2 \quad (9.18)$$

$$Area_{5anillo} = \pi * 165,1^2 = 85633,56mm^2 \quad (9.19)$$

$$Area_{terciarioprojectada} = \pi * r_{terciario}^2 \quad (9.20)$$

$$Area_{terciarioprojectada} = \pi * 121,8^2 = 46604,32mm^2 \quad (9.21)$$

Ahora que se conocen el área de la obstrucción y el área total por donde la luz atraviesa, se vuelve conveniente conocer el valor relativo de la luz que será obstruida y de la que continúa su camino hacia el guiador.

$$Area_{obstruida} = \frac{Area_{terciarioprojectada}}{Area_{5anillo}} \quad (9.22)$$

$$Area_{obstruida} = \frac{46604,32}{85633,56} = 0,5442 \quad (9.23)$$

$$Area_{pasante} = 1 - Area_{obstruida} \quad (9.24)$$

$$Area_{pasante} = 1 - 0,5442 = 0,4558 \quad (9.25)$$

El valor relativo con respecto al total de área que se obstruye es de 0,5442 y el área que se deja

pasar es de 0,4558. Como se puede observar es poco más de la mitad el área que se interfiere por parte del espejo terciario para el tamaño obtenido en sección 9.11. Ahora, se obtendrá la disminución de la magnitud aparente de una estrella que se encuentra en el eje óptico; aunque por la forma en que se obtuvo el valor del espejo se estaría obstruyendo el eje óptico y hasta 3,25', lo que interesa es conocer la disminución equivalente ya que la real sería la ocultación total.

Se utilizará una estrella de magnitud 12 para determinar su cambio, ya que esta magnitud puede ser utilizada para el guiado. La magnitud aparente está dada por

$$m = -2,5 \log_{10}(I) \quad (9.26)$$

Por lo que

$$I = 10^{\left(\frac{-m}{2,5}\right)} \quad (9.27)$$

Para la estrella de magnitud aparente 12 el flujo luminoso sería

$$I = 10^{\left(\frac{-12}{2,5}\right)} = 15,8489 \times 10^{-12} lux \quad (9.28)$$

Ahora se reduce el flujo luminoso al valor relativo de la cantidad de luz que se deja pasar (obtenido en 9.25), y con esto se obtiene la nueva magnitud del siguiente modo

$$m_{obstruida} = -2,5 \log_{10}(Area_{pasante} * I) \quad (9.29)$$

$$m_{obstruida} = -2,5 \log_{10}(0,4558 * 15,8489 \times 10^{-12}) = 12,85 \quad (9.30)$$

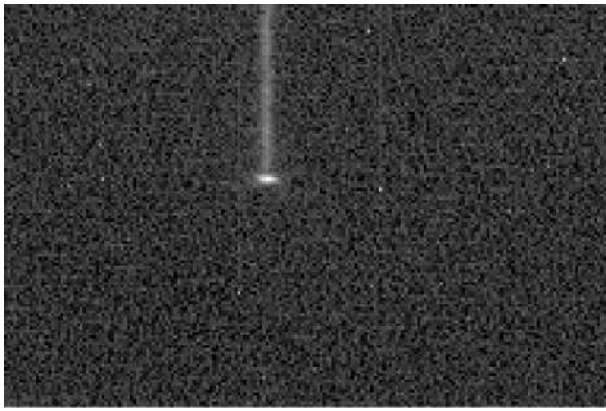
Con el resultado obtenido en el cálculo 9.30 se puede deducir que la afectación de la obstrucción del



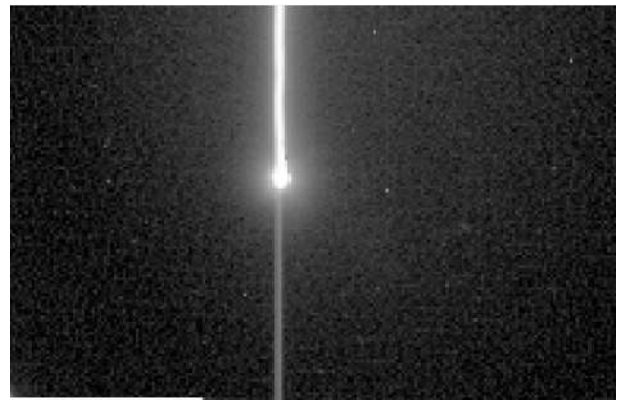
Fig. 9.4: Deflector con obstrucción

espejo terciario cuando se encuentre en operación es mínima, pues para una estrella de magnitud 12 se afectaría aparentando ser de magnitud 12,85, y aún este valor el guiador lo acepta como conveniente para utilizarse como estrella de referencia para el guiado. Es importante señalar el análisis anterior es para una estrella que se encuentre en el eje óptico y las estrellas que utiliza el Tijuano son estrellas que están alejadas del mismo, por lo que realmente se afectaría más en cuanto a la magnitud de la estrella, pero según los expertos ópticos es una aproximación aceptable.

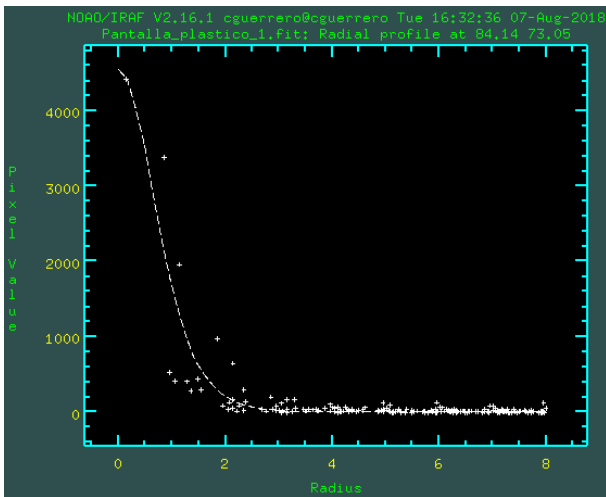
Posteriormente, gracias a la colaboración del personal del OAN-SPM se pudo verificar si realmente si el análisis realizado tenía validez. Se proyectó en el extremo del deflector el cono de luz que el espejo terciario estaría obstruyendo, posteriormente se le colocó una bolsa de plástico al deflector y se le hizo el orificio correspondiente. En la figura 9.4 se visualiza el resultado de lo que se comentó.



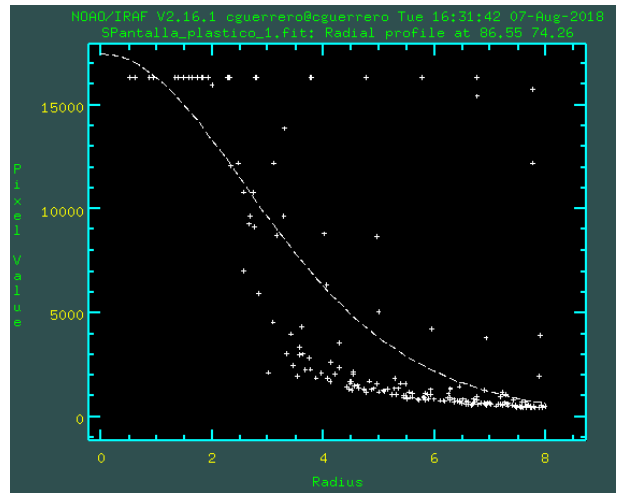
(a) Imagen del CCD con obstrucción



(b) Imagen del CCD sin obstrucción



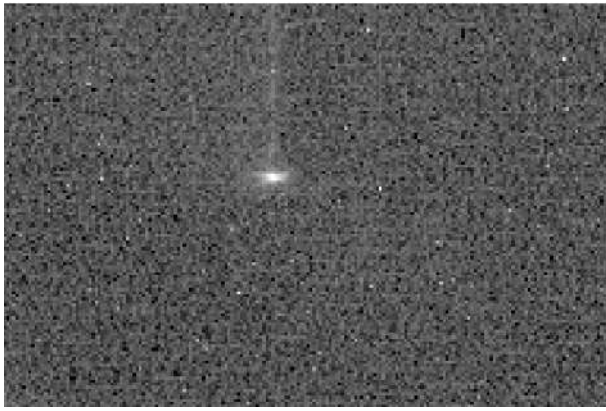
(c) Gráfica de cuentas de pixeles con obstrucción



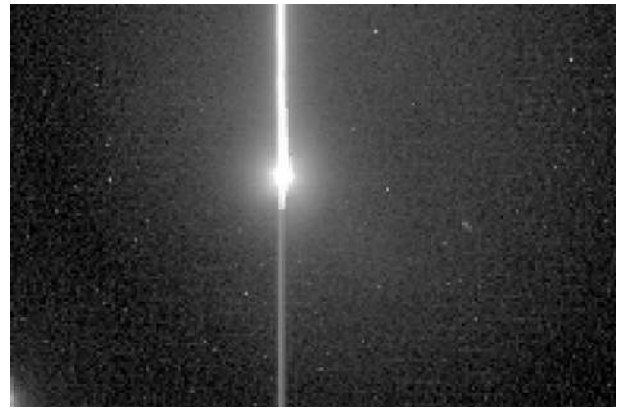
(d) Gráfica de cuentas de pixeles sin obstrucción

Fig. 9.5: Comparación de imágenes capturadas con el guiador para 1 s de exposición

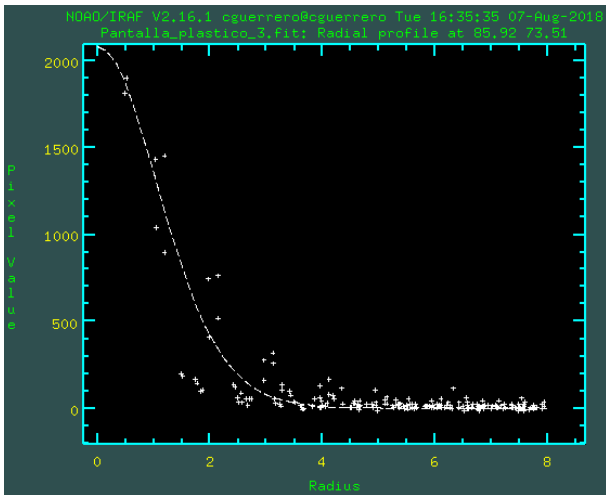
Cuando se dio la oportunidad de observar con el deflector tapado, se presentaron problemas para poder localizar una estrella para calcular cuál sería la disminución de la luz real, ya que no se observaba ninguna en el detector. Luego de un tiempo de búsqueda se localizó una estrella en los extremos de la zona de operación del guiador. Se le hizo la captura de 5 imágenes con la obstrucción a 1 s, 3 s, 5 s, 10 s y 20 s de exposición; y se capturaron otras 5 imágenes con los mismos tiempos de exposición pero sin la obstrucción para la misma estrella. El fin de dicha tarea era poder realizar la fotometría para verificar cuántas magnitudes relativas iba a aumentar la estrella por la obstrucción. Sin embargo, este estudio no se pudo realizar a causa de que todas las imágenes sin obstrucción se encontraban saturadas, inclusive la de 1 s de exposición.



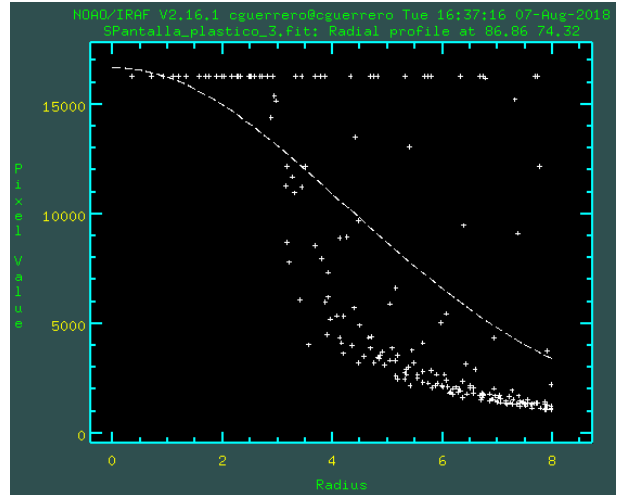
(a) Imagen del CCD con obstrucción



(b) Imagen del CCD sin obstrucción



(c) Gráfica de cuentas de pixeles con obstrucción



(d) Gráfica de cuentas de pixeles sin obstrucción

Fig. 9.6: Comparación de imágenes capturadas con el guiador para 3 s de exposición

La figura 9.5 corresponde a 1 s de exposición del CCD del guiador para cierta posición del campo de operación, donde la figura 9.5a es la imagen que se observó en la interfaz de usuario del guiador para cuando el deflector se encontraba con la obstrucción, y la figura 9.5b fue lo que se visualizó sin obstrucción. Se puede notar visualmente que existe una diferencia significativa en cuanto a la cantidad de luz que el guiador estaba recibiendo; sin embargo para verificar cuantitativamente el efecto se le solicitó la colaboración a personal del OAN, donde por medio del software IRAF se grafica el valor que posee cada pixel (cuentas) respecto al radio de la estrella. En la figura 9.5c se visualiza que la imagen no está saturada pues se llega a un máximo aproximado de 4600 cuentas cuando el máximo del detector es de 16384 cuentas, además de que la tendencia es similar a la

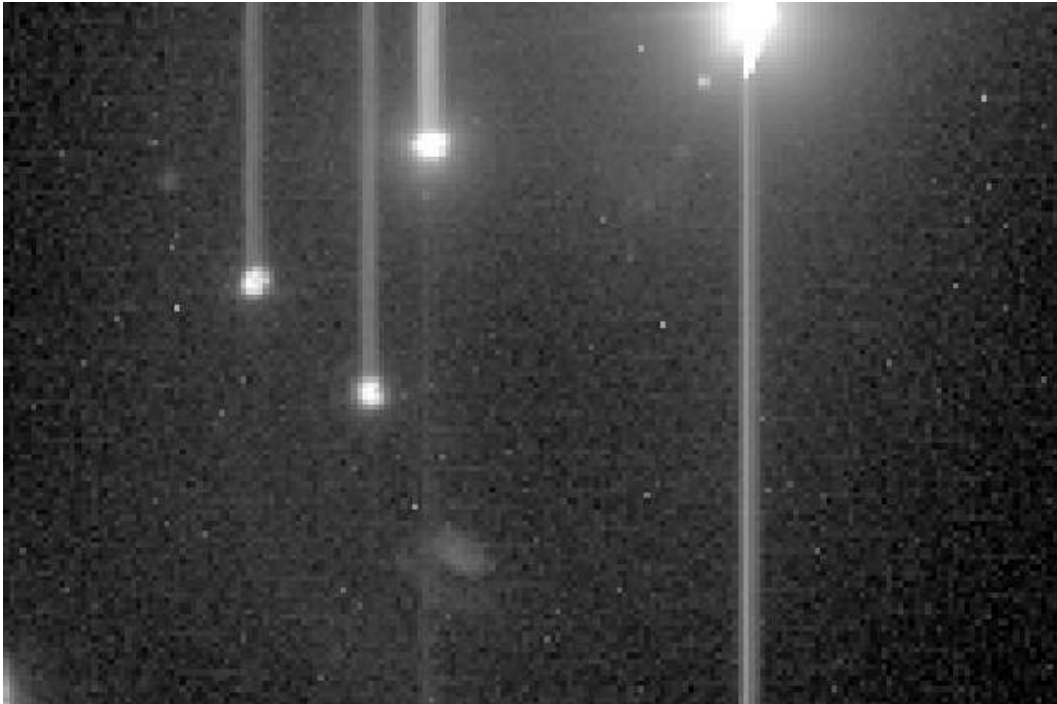


Fig. 9.7: Imagen obtenida del guiador en eje óptico del telescopio con 3 s de exposición

sugiere el software por medio de la línea punteada. Por otro lado, para la figura 9.5d se observa que no sigue ninguna tendencia, esto porque es significativa la cantidad de pixeles que se encuentran saturados (con valor de 16384).

Se realizó el mismo análisis para las imágenes tomadas con 3 s de exposición. En la figura 9.6 se visualiza tanto las imágenes que la interfaz de usuario ofrecía para cuando se tenía la obstrucción en el deflector (figura 9.6a, como para cuando no (figura 9.6b), además de las gráficas obtenidas con IRAF (figura 9.6c para obstrucción y figura 9.6d sin la obstrucción). Para este caso de 3 s de exposición se hace notorio como la saturación aumenta para cuando se le elimina la obstrucción al deflector, y mejora la tendencia que el software sugiere en la imagen cuando se tiene la oclusión.

Se posicionó el espejo del guiador en el eje óptico del telescopio con la tapa de plástico y así verificar lo que ocurría con la obstrucción de luz en esta zona, no se logró visualizar ninguna estrella. Posterior a esto, se le quitó la oclusión y se capturó una imagen con el CCD de 3 s de exposición, el resultado es el que se observa en la figura 9.7. En dicha imagen se visualizan 4 estrellas que se encontraban en ese campo visual que no pudieron ser capturadas cuando se tenía

la obstrucción.

Con lo anterior, se puede notar que aunque los cálculos arrojaban que la afectación no iba a ser significativa, la experimentación dio a conocer la verdadera influencia sobre el guiador de colocar un espejo terciario. No se pudo verificar la magnitud relativa que la estrella aumenta por la obstrucción ya que las imágenes sin la oclusión se encontraban saturadas, y utilizarlas bajo esta condición arrojaría un valor erróneo puesto que no se conoce el valor máximo real de energía que aporta la estrella al detector. La obstrucción sobre el guiador que generaría la implementación de un foco Nasmyth es de gran impacto sobre su operación, no lo inhabilita del todo pero sí dificulta su uso.

En vista de lo anterior, el uso del guiador quedará sujeto a varias situaciones, entre ellas se tienen las siguientes:

- Si el estudio científico requiere un guiado preciso, no sería conveniente acoplar el instrumento en el foco Nasmyth por la gran obstrucción de luz que provoca el espejo terciario.
- Si se desea utilizar el guiador Tijuano con el tamaño de espejo terciario planteado en la sección 9.2.1, se corre el riesgo de no encontrar estrellas en el campo visual disponible.
- Si se requiere un buen guiado y la captación de toda la luz posible, el instrumento instalado en el foco Nasmyth debería tener su guiador y de ese modo no dependería del Tijuano.

9.2.3 Calidad de imagen del foco Nasmyth

La resolución de imagen debida a la contribución de la geometría de los espejos primario y secundario se le conoce como calidad de imagen de diseño. Sin embargo, hay contribución por desalineaciones entre los componentes del telescopio debido al montaje y a los cambios de temperatura, por la rugosidad de cada espejo, por la turbulencia del aire (conocido como valor del seeing),

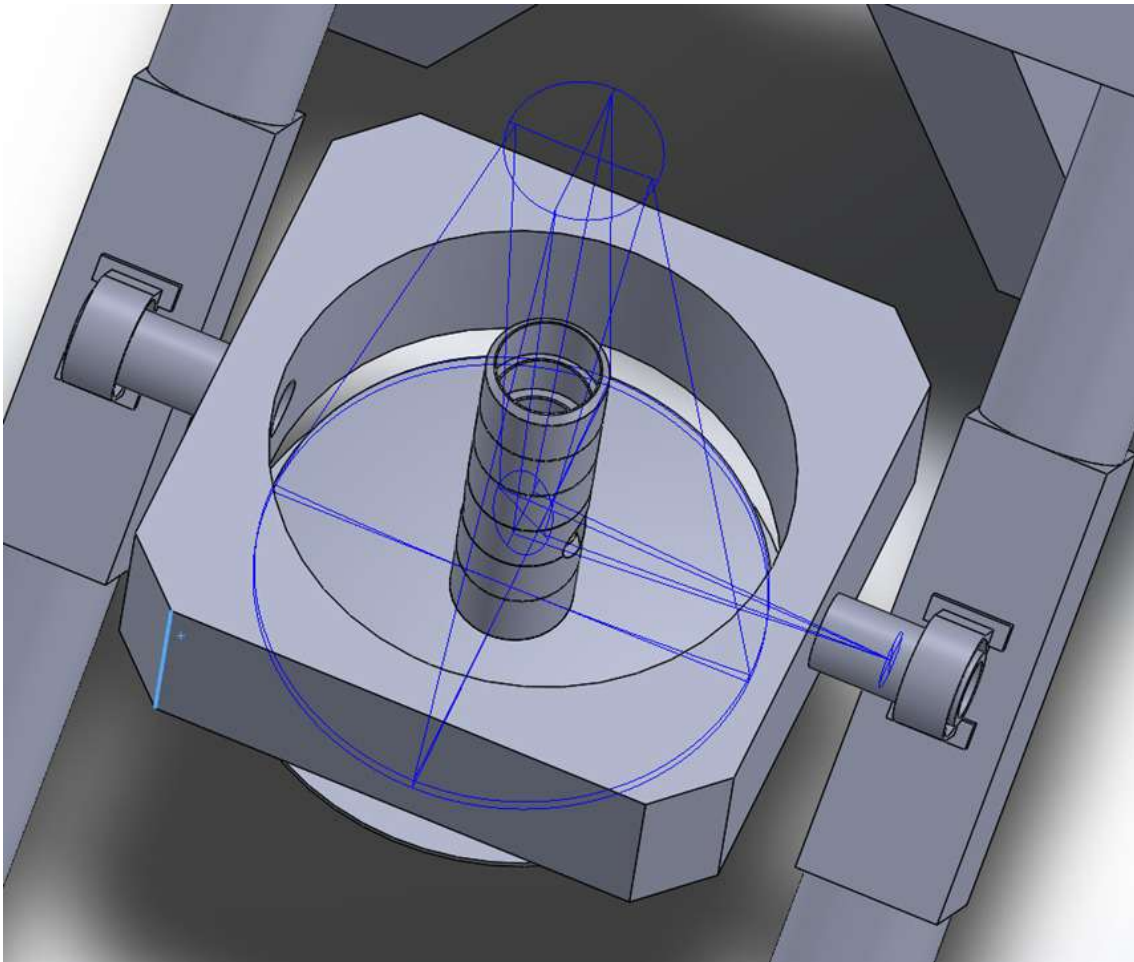


Fig. 9.8: Foco Nasmyth para calidad de imagen óptima

entre otros factores, y el valor actual para la calidad de imagen debido a todas las contribuciones es de $1,5''$ [24].

Luego de que se tomaron las medidas de los componentes de interés descrito en la sección 7.2, se procedió a realizar el diseño óptico en el software Zemax, y se extrajo el modelo de rayos para integrarse con el sólido que se había realizado; el resultado es lo que se observa en la figura 9.8. En dicha imagen se hace notorio que el foco está dentro de la estructura, lo anterior no se tenía contemplado previamente sobre el diseño del acople, y aunque no tenga una afectación directa sobre el sistema a diseñar, se hace necesario dar revisión sobre la situación encontrada.

Una solución propuesta al problema es mover el espejo secundario hasta que el foco quede fuera de la estructura, ya que la relación del cambio del foco contra movimiento del secundario es de

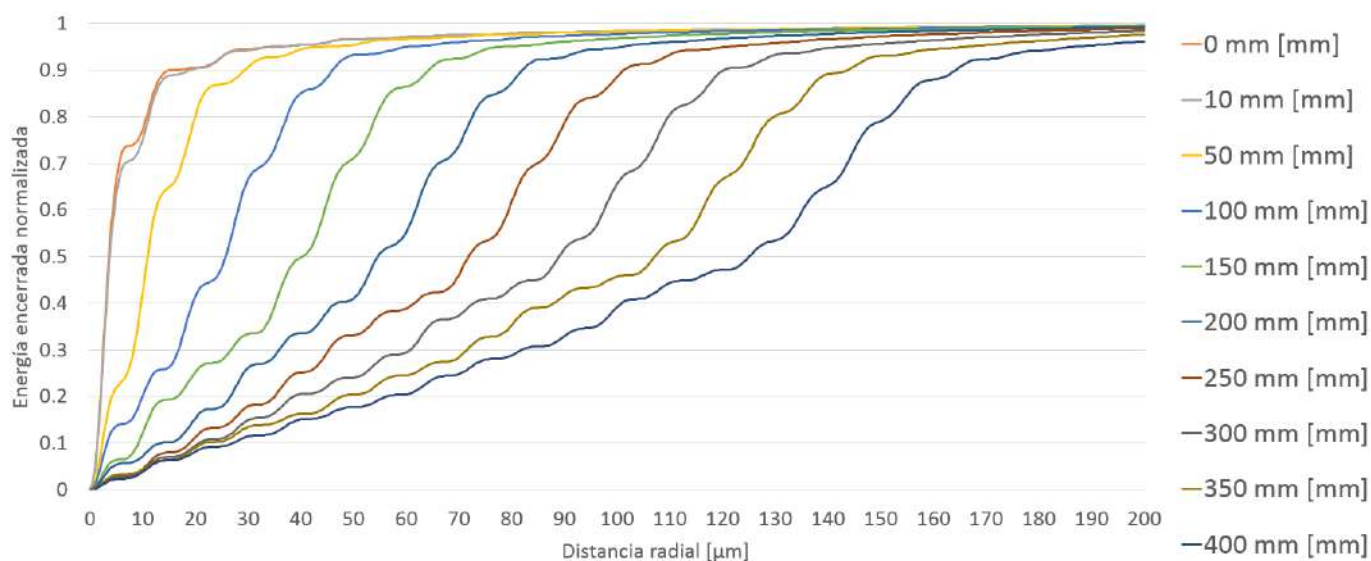


Fig. 9.9: Energía normalizada encerrada radialmente en función de distancia al eje óptico para cierto desplazamiento del foco con respecto al foco óptico por movimiento en espejo secundario para configuración Cassegrain.

12:1. Esto quiere decir que por cada unidad de distancia que se mueva el espejo secundario, el foco se desplazará 12 unidades. El sistema del movimiento del secundario actualmente le permite moverse hasta 15 mm, por lo que se procede a verificar la calidad óptica de la imagen si se moviera el secundario.

Con el software Zemax se obtuvieron los datos con los que se construyeron la figura 9.9. La gráfica describe la pérdida de la calidad de imagen conforme se aleja el plano imagen del foco óptico. En el eje vertical se tiene la energía encerrada de forma radial pero con su valor normalizado, sobre el eje horizontal se presenta el valor en micrómetros de la distancia al eje óptico, y cada una de las curvas de colores es el correspondiente desplazamiento del foco con respecto al foco óptico; por lo que la curva anaranjada es el foco óptico, la amarilla es para el foco a 50 mm del óptico, y así con las demás.

La distancia que existe desde el centro del deflector hasta el exterior de la estructura por los ejes Este u Oeste es de 198 cm aproximadamente, el foco óptico queda a aproximadamente 163 cm del centro del deflector, por lo que se requiere mover el foco al menos 35 cm para que llegue al exterior de la estructura.

A pesar de que los movimientos menores a los 40 cm del foco no son de particular interés, se realizan las curvas como estudio para su utilización en posibles estudios ópticos a futuro, o de información para análisis por parte de los expertos ópticos del OAN.

El dato que es de especial importancia es el ancho a media altura, ya que este es el valor con que trabajan los astrónomos para sus estudios [25]. El ancho a media altura es justamente es la mitad del total de la energía encerrada, o sea 0,5 del valor de la gráfica.

Para el foco óptimo este valor se encuentra 3,5 μm de distancia radial del eje óptimo; esto quiere decir que una estrella que es un objeto puntual, si se integra radialmente a la distancia mencionada se obtendrá el 50% de la energía proveniente de la estrella. Por otro lado, la curva para un desplazamiento del foco de 35 cm, el 50% del ancho a media altura se encuentra a una distancia aproximada de 107 μm (r).

De la escala de placa (EP) para el foco f/7,5 se obtiene que

$$13,03\left[\frac{''}{\text{mm}}\right] * \frac{1[\text{mm}]}{1000[\mu\text{m}]} = 0,01303\left[\frac{''}{\mu\text{m}}\right] \quad (9.31)$$

$$EP\left[\frac{''}{\mu\text{m}}\right] * 2 * r[\mu\text{m}] = FWHM['''] \quad (9.32)$$

$$0,01303\left[\frac{''}{\mu\text{m}}\right] * 2 * 107[\mu\text{m}] = 2,79['''] \quad (9.33)$$

El ancho a media altura (FWHM) de una estrella puntual sería de 2,79 '' por diseño óptico para el desplazamiento de 35 cm del foco con respecto al foco óptimo. Mientras que para el foco óptimo la apertura angular del ancho a media altura de una estrella puntual sería

$$0,01303\left[\frac{''}{\mu\text{m}}\right] * 2 * 3,5[\mu\text{m}] = 0,09['''] \quad (9.34)$$

Por lo que se estaría afectando en un factor de 31 la calidad de la imagen con respecto a la mejor que se puede obtener, esto solo por el diseño óptico y sin tomar en cuenta los errores de construcción,

montaje y demás.

Con la resolución de imagen que se conoce del telescopio por las pruebas que los instrumentistas le hacen luego del aluminizado del espejo primario, se puede obtener un aproximado del valor real que tendría la calidad de imagen luego de añadir el factor mecánico.

Para el siguiente cálculo se utilizará el error cuadrático medio ya que la calidad de imagen del telescopio es una medida del error en la imagen que se obtiene, dicho error describe una curva gaussiana, por lo que para obtener el error de múltiples perfiles gaussianos conviene utilizar este cálculo de errores [26].

El valor del ancho a media altura para el sistema completo es de $1,5''$, del diseño del telescopio es de $0,09''$, al ser este último valor pequeño en comparativa con el primero no se tomará en cuenta para el cálculo, por lo que se procede a encontrar el valor del ancho a media altura de la calidad de imagen que tendría el telescopio al mover el plano imagen a 35 cm del foco óptico, por lo que

$$\sqrt{FWHM_{sistema}^2 + FWHM_{35cm}^2} = FWHM_{sistema+35cm} ["] \quad (9.35)$$

$$\sqrt{1,5^2 - 0,09^2} = 1,5 ["] \quad (9.36)$$

El valor aproximado de la calidad del foco desplazado 35 cm es de $2,35''$. Según los expertos del OAN, dicha calidad de imagen no se puede decir si es buena o mala, sino que esta es la calidad que se tendría si se desea mover el foco fuera de la estructura del telescopio por medio del movimiento del espejo secundario. Quien desee utilizar el foco Nasmyth debe de trabajar sobre este valor de $2,35''$ para sus estudios científicos. Además, los instrumentos a colocar en dicho foco deben permitir operar o diseñarse con esta especificación de calidad de imagen. Por otro lado, se está evaluando la calidad de imagen a 35 cm de distancia del foco que sería el valor requerido para sacar el foco fuera de la estructura del telescopio, pero es un valor muy ajustado ya que los instrumentos científicos no poseen los detectores justo en sus límites estructurales, por lo que es probable que aún se requiera alejar unos cuantos centímetros del foco, dando como resultado una calidad de

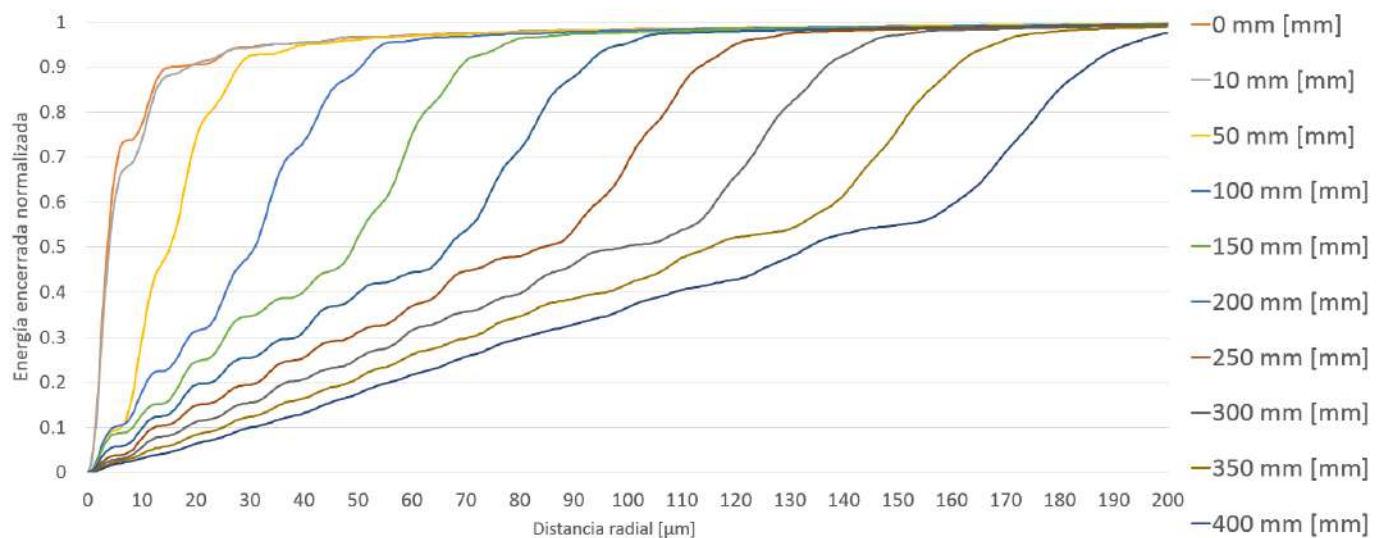


Fig. 9.10: Energía normalizada encerrada radialmente en función de distancia al eje óptico para cierto desplazamiento del foco con respecto al foco óptimo por movimiento en espejo secundario para configuración Nasmyth

imagen más degradada que la que ya se tiene.

Se realizó el mismo estudio de la calidad de imagen para el foco Nasmyth con el tamaño de espejo que se obtuvo en la sección 9.2.1, en la figura 9.10 se observa que con respecto a la figura 9.9 los valores equivalentes para el movimiento del foco son menores, por lo que se podría concluir que para el tamaño del espejo escogido a la distancia del foco que se requiere se va a perder calidad de imagen con respecto a su análoga en la configuración Cassegrain. Para evaluar esto se calcula la razón para cada uno de los puntos análogos para ambas configuraciones y para su correspondiente curva, dicha razón es la que se observa en la figura 9.11.

A pesar de que el resultado debería ser el mismo para la configuración Cassegrain o la Nasmyth, no se da porque se le añadió un factor importante que es el tamaño del espejo, y esto tiene inferencia en la cantidad de luz que se refleja. Sin bien en la sección 9.2.1 se calcula para su mayor aprovechamiento esto es para el foco óptimo, pero como se está variando ese valor se verá afectado el resultado final.

Es importante revisar la figura 9.11 a detalle, pues según lo que se menciona anteriormente se espera que la calidad de imagen del foco Nasmyth sea menor que la del Cassegrain porque se le ha

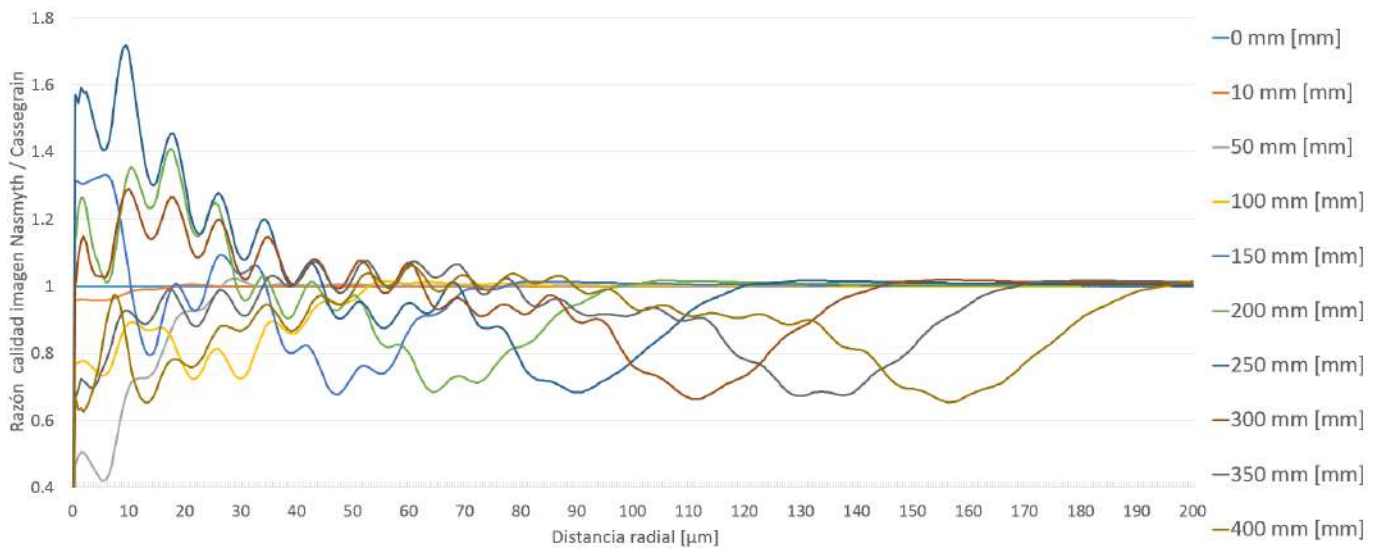


Fig. 9.11: Razón de la calidad de imagen de configuración Nasmyth (figura 9.10) entre Cassegrain (figura 9.9) para cada desplazamiento del foco

puesto un tamaño de espejo que produce que para grandes desplazamientos del foco la calidad de imagen se deteriore; sin embargo en la imagen 9.11 se observa que para ciertas distancia el valor de la energía encerrada es mayor para Nasmyth, presentando una inconsistencia hasta el momento.

Lo que ocurre con dicha figura y sus valores es que el tamaño del espejo afecta pero no solo para mal en ciertos casos, y esto se da porque para ciertas distancias existe lo que se conoce como viñeteo de la luz [27].

El viñeteo lo que hace es recortar o truncar ciertos rayos de luz que son los que aumentan el valor de las aberraciones. Por ejemplo, al estar más cerca el secundario del primario hace que el cono de luz reflejado por el secundario se ensanche a la altura de donde estaría el espejo terciario, por lo que existen rayos que quedan fuera del alcance del terciario y son justo esos rayos los que cooperan con el decremento de la calidad de la imagen.

El análisis anterior se hizo para verificar el cambio de la calidad de imagen a causa de una de las soluciones que se plantean al hecho de que el foco óptico de la configuración Nasmyth quedara dentro de la estructura. Pero por las limitaciones que posee el movimiento del secundario no se puede alcanzar la posición requerida en dicho espejo para mover el plano imagen 35 cm del foco

óptimo; por lo que esta solución queda descartada, ya que se requiere mover 29 mm el secundario y el sistema le permite como máximo 15 mm.

Por lo anterior, los expertos involucrados en el proyecto toman la decisión de mantener el foco óptimo para el diseño y se asume que el instrumento tiene la posibilidad de introducirse en el eje del telescopio hasta alcanzar dicho foco.

9.3 Estudio de los elementos implicados

A causa de la voluntad de habilitar el foco Nasmyth en el telescopio de 2,1 m del OAN-SPM surgen una serie de cuestionamientos, opciones y limitaciones que se hacen necesarias considerar para escoger una vía por la cual el diseño se centrará y así satisfacer los requerimientos de alto nivel.

9.3.1 Máximo de magnitud aparente en estrellas a captar y campo de visión

Con la configuración Nasmyth se deben obtener los mismos resultados en los estudios científicos que se obtienen con la configuración Cassegrain, por lo que la magnitud máxima detectable en cada una de las anteriores debe ser la misma, esto para los instrumentos se localizan en el foco óptimo; ya que al desplazarse del foco óptimo la calidad de imagen empeorará y hará que la energía de la estrella se disperse por más área.

El tamaño del espejo terciario a disponer también tendrá efecto importante tanto en la cantidad de energía a capturar de la estrella como en el campo de visión del sensor científico, ya que ambas cosas están interrelacionadas. Si bien aunque se utilice un espejo muy pequeño que no capture toda la energía proveniente de los rayos de luz que alcanzan los bordes del CCD, por ejemplo, se logrará ver estrellas a esa separación angular de su eje óptico con la salvedad de que se ha perdido energía

con respecto al eje óptico, pues la luz fue viñeteada. Dicho de otra manera, si el espejo terciario no alcanza a capturar el cono de luz para cierta distancia angular del eje óptico se disminuirá la luz a captar, y esto provocaría que la distribución de la energía sobre el sensor científico no sea igual, donde para ciertos estudios se requiere que sea así.

De lo anterior se puede concluir que si se desea mantener la magnitud de las estrellas que se observan en el foco Cassegrain para ser vistas en el Nasmyth el espejo terciario debe ser de un tamaño tal que capture todo el foco de luz proveniente de la estrella.

9.3.2 Instrumentos a utilizar con el foco Nasmyth

El foco Nasmyth se desea implementar para cualquier instrumento que se requiera utilizar, sin embargo todos los instrumentos que se utilizan en astronomía poseen requerimientos especiales y muchos de estos hacen que la misma solución no aplique para todos por igual.

Por las dimensiones de los instrumentos actuales, se hace de vital importancia verificar si estos se pueden ubicar dentro del eje de la estructura o se deben colocar fuera, pues todos requieren diferentes requerimientos en cuanto al espacio disponible para ser ubicados y también al peso que debe soportar el acople del instrumento con el telescopio, así como que el telescopio permita el balanceo para el nuevo peso del instrumento.

Si el foco óptico queda dentro de la estructura, se podrían implementar soluciones como utilizar cámaras pequeñas con su rueda de filtros incluida, ya que las cámaras CDD sin filtros si bien son útiles limitan los estudios que se pueden realizar. Otra solución es poner un arreglo de fibras ópticas, como las que se utilizan para transmisión de datos entre redes, y así se podría ubicar el instrumento en un lugar conveniente sin las restricciones de espacio propias del foco Nasmyth.

9.3.3 Vibraciones y desalineaciones en las imágenes

Es de vital importancia el tema de las desalineaciones de las imágenes causadas por el montaje, por la manufactura o por las vibraciones producidas por el viento o el movimiento del telescopio, así como por el mal acople del sistema.

Grandes vibraciones producirían que las imágenes que deberían de estar bien definidas se observen como manchas en las cámaras, o que los espectros que deberían de tener bien delimitados las líneas de absorción o emisión se combinen produciendo confusión, por lo que el estudio científico sería inutilizable.

Desalineaciones producirían que como se menciona en la sección 9.3.2, no se capture uniformemente la energía del campo angular que se está observando, y de requerirse que sea uniforme la captación tendría como consecuencia que se induzca a errores en el estudio científico. Además, si la desalineación es relativamente grande hará que encontrar el objeto de interés sea una tarea más compleja y se pierda tiempo de observación.

Las vibraciones y desalineaciones son producidas por algunos factores como el viento, que no es controlable por lo que se limitará a los parámetros de operación del telescopio con respecto al viento máximo aceptable. Otro factor importante es el movimiento del telescopio, sin embargo el movimiento cuando se está observando un objeto, que es cuando tienen relevancia las vibraciones en el espejo terciario, es muy despacio y progresivo, por lo que no tendrán mayor efecto en el mismo.

También se pueden producir desalineaciones por el montaje del acople, pues el espejo se inclina hacia todos los eje cardinales, provocando que el acople deba orientarse en cualquier dirección sin que se mueva de su referencia. Para este caso el peso del espejo terciario podría crear torque, esto provocaría flexiones que desalinearían el espejo y afectarían el estudio científico; si bien esto siempre va a ocurrir es importante que la desalineación se mantenga dentro de los límites establecidos en los requerimientos. Por último, una estructura con insuficientes puntos de apoyo y grandes brazos

de palanca intensificarían las desalineaciones.

Capítulo 10

Diseño

10.1 Introducción

A continuación se describe el proceso y los productos que se iban obteniendo conforme se avanzaba en el diseño del acople. Primeramente se realizaron conceptos de diseño, los que se fueron mejorando al punto de dar con el diseño final del acople.

10.2 Parámetros de diseño

A causa de los análisis y estudios que se realizaron existió la necesidad de agregar nuevos parámetros a los requerimientos con los que se comenzó el proyecto. A continuación se enlista los nuevos parámetros de diseño:

- Se debe mantener la posibilidad de utilizar el guiador a pesar de la obstrucción de luz que se dé a causa del espejo terciario.
- Utilizar el tamaño de espejo calculado en la sección 9.2.1.

- El estudio científico al que dará servicio el acople será a la fotometría de alta cadencia.
- El instrumento a colocar en el foco Nasmyth sería una cámara que cumpla con las medidas físicas para ser situada en dicho lugar, además de que poseerá su propia rueda de filtros.
- No tomar en cuenta las vibraciones pues las correcciones que realiza el telescopio son lentas durante el guiado.
- El deflector requiere de un estudio óptico y estructural para la implementación del acople, por lo que se debe de utilizar el deflector actual que posee el telescopio para el soporte del acople.

10.3 Conceptos de diseño

Luego de haber realizado el reconocimiento de la estructura y obtenido las medidas de los elementos de interés del telescopio, se procedió a elaborar soluciones conceptuales para ser evaluadas por parte de los expertos del OAN. Los primeros diseños para la estructura de soporte del espejo se muestran a continuación.

Es necesario dejar en claro que los diseños que se muestran a continuación fueron realizados como conceptos y no como soluciones definitivas. Lo que se pretendía era poder visualizar las ideas que se tenían, caracterizar cada una de las soluciones y con base en estas tomar decisiones sobre lo que lo que faltaba por hacer y también determinar cuál sería la vía a seguir. Los siguientes diseños no tienen medidas reales, ya que al inicio no ameritaba que fuera algo cuantitativo, sino cualitativo.

10.3.1 Soporte del espejo, inclinación y guiñada

El primer concepto que se desarrolló fue de las piezas que se encontraban cerca del espejo, y sus movimientos. El soporte del espejo fue lo primero a lo que se le prestó atención, ya que el manejo



Fig. 10.1: Propuesta soporte espejo con movimiento de inclinación y guiñada

del espejo es crucial para que este no sufra de deformaciones que haga que el frente de onda reflejado por el espejo terciario se vea alterado.

Se puede dar soporte por debajo del espejo por medio de epóxicos que una el vidrio con otra estructura y se dé la fijación del espejo al sistema. Sin embargo, este método no es útil si se desea utilizar un espejo dicróico, pues va a interferir con la luz que el dicóico deja pasar a través de él; por lo tanto, no se realizará un diseño donde se contemple esa manera de soportar el espejo.

En la figura 10.1 se observa como el vidrio está soportado por tres pestañas en la parte de abajo del mismo, realmente son 4 pestañas separadas 90° . El tamaño de la estructura, de los soportes y cualquier elemento no es algo definitivo, esto pues aún se desconocían variables como el tamaño del espejo, su grosor, peso, la forma que iba a tener, los materiales que se van a utilizar, entre otros; por lo que solo es una representación de la idea sobre el soporte del mismo.

Con este concepto se hizo notorio que al estar desplazados los ejes de rotación del plano de reflexión



Fig. 10.2: Tornillo sin fin y corona para la inclinación y guiñada del espejo terciario

iba a existir una desviación cuando se giran, esto afectaría en la imagen pues el espejo no quedaría centrado con el instrumento científico, y si bien se podría realizar ajustes por medio de los grados de libertad que presenta el acople, no es la configuración óptima.

En cuanto a los ejes de rotación que se muestran, el de inclinación es el que permitiría utilizar dos instrumentos científicos acoplados al mismo tiempo en la configuración Nasmyth, pues este haría rotar el anillo exterior y así la imagen se podría dirigir al Este o al Oeste (figura 4.2, donde se encuentran los orificios para la implementación de la nueva configuración. Para realizar esta rotación se escoge un el sistema de tornillo sin fin con corona porque presenta algunas ventajas como lo es el auto bloqueo, la relación es $1/\text{número de dientes de la corona}$ por lo que se puede alcanzar relaciones adecuadas para lograr movimientos muy pequeños en cuanto a la inclinación, y con la manufactura adecuada se alcanza alta precisión para realizar los movimientos, pues se lograría que el acople entre ambas piezas tenga holgura mínima.

A pesar de que se plantea el hecho de que la manufactura y el montaje de las piezas serán las idóneas para alcanzar los requerimientos, existe la posibilidad de que pequeñas desviaciones se propaguen

y desalineen el espejo con respecto a la posición esperada, por lo que se plantea el movimiento de guiñada, y en conjunto con el movimiento de inclinación se pueda dar el ajuste requerido para contrarrestar los desperfectos en la fabricación y el montaje. Para este caso igual se plantea el hecho de utilizar un tornillo sin fin y corona.

Con respecto al soporte principal, como se requiere que sea robusto mecánicamente hablando para evitar deflexiones, se propone una estructura como la que se ve en la figura 10.1. Sin embargo, se observa que esta estructura es relativamente grande y podría interrumpir con el funcionamiento actual del telescopio, ya que se hace difícil guardarla en alguna parte del telescopio sin que obstruya al espejo primario o a la luz reflejada por el secundario.

Una vez revisado este diseño, se llegan a las siguientes conclusiones:

- Sujetar el borde del espejo, de tal manera que la presión que se ejerza sobre el espejo no sea tal que lo deforme. Además, deberá de transferir el esfuerzo a través del vidrio lo más uniforme posible, y el elemento que sujetará el vidrio no puede interferir significativamente obstruyendo la reflexión de la luz, pero debe ser lo suficientemente grande para asegurar la estabilidad del sistema.
- Los ejes de rotación deben estar a la misma altura del plano de reflexión del espejo.
- Se debe revisar la colocación de elementos como engranes, motores y cables, esto para no interferir con la reflexión de la luz.
- Se debe modificar la estructura para que sea más compacta pero sin comprometer la rigidez.

10.3.2 Actuador Tornillo sin fin - Husillo

Ahora se muestra el sistema que actúa sobre el anterior (sección 10.3.1). Este será el que hará que el acople para el espejo Nasmyth entre o salga de operación. Por medio de un motor eléctrico



Fig. 10.3: Propuesta con tornillo sin fin y husillo

se le permitiría al tornillo sin fin que se observa en la figura 10.4 girar, haciendo que el husillo se desplace, dependiendo del sentido de giro se le permitirá al husillo desplazarse hacia arriba o hacia abajo, por lo que al estar fijado este último al sistema que soporta al espejo permitirá desplazarlo para utilizarse el foco Nasmyth o el Cassegrain.

En la figura 10.3 se observa el sistema de acople en transición entre su posición de operación y de descanso.

En la imagen 10.4 se observa el sistema a aproximadamente 45° de ambas posiciones de descanso y de operación normal. Se hace notorio también que el tornillo se va a acercar al campo de visión del sensor científico, esto es por la posición en la que se ponen los soportes del tornillo sin fin y del husillo; depende de la distancia y la posición relativa entre ellos, de la posición con respecto al eje del giro de la estructura completa y de la ubicación del husillo en el soporte del espejo.

El sistema de soportes laterales se hace indispensable para mantener la rigidez mientras opera

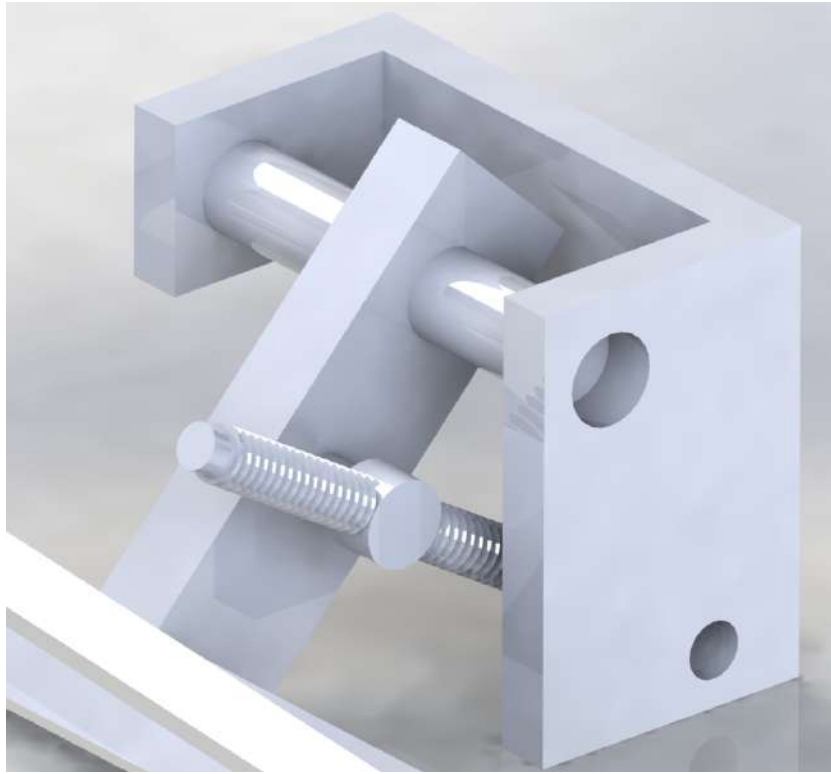


Fig. 10.4: Vista ampliada de tornillo sin fin y husillo

el acople, con respecto a estos se sugieren que la forma en que se acopla a la estructura que da soporte al espejo (sección 10.3.1) sea por medio de un sistema tipo prisionero pasante, que haría que el sistema se bloquee en esa ubicación y si es que está operando la configuración Nasmyth, se mantendrían los movimientos y vibraciones del sistema al mínimo para no afectar la imagen en el sensor científico; y es la configuración Cassegrain la que está operando entonces se resguarda la integridad del sistema, se asegura que no vaya a interferir el acople con el campo de visión del sensor y disminuir el esfuerzo sobre el tornillo sin fin, esto último también ocurriría mientras se utiliza el foco Nasmyth.

Entre otras cosas que se intuyen del diseño es el esfuerzo al que va a estar sometido el tornillo sin fin, el husillo y las uniones de ambos con el resto de la estructura, esto se debe a que el actuador se encuentra relativamente cerca al eje de giro, produciendo que para superar el torque producido por el peso de la estructura y el espejo se deba producir una fuerza mucho más grande en magnitud relativa al peso, por lo que producirá un esfuerzo relativamente alto.

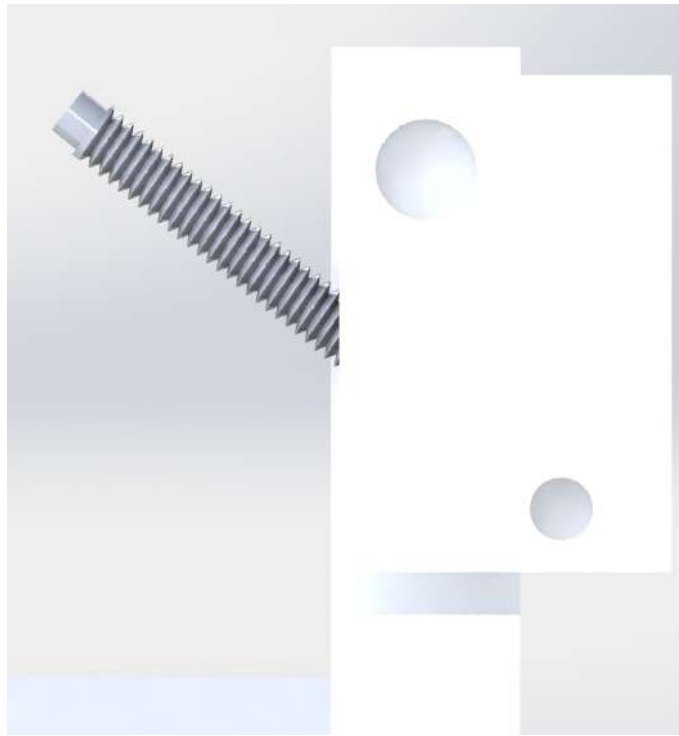


Fig. 10.5: Posición de descanso de propuesta tornillo sin fin y husillo

Existen otras implicaciones que se derivan del tamaño del tornillo sin fin, así como de la ubicación relativa del mismo y del husillo; estas implicaciones se evalúan de forma cualitativa en la tabla 10.1. La configuración A y la configuración B son posiciones relativas en la estructura a diseñar, donde se podría ubicar el tornillo sin fin junto con el husillo para dar movilidad al espejo. Se califican las implicaciones con -1 para evaluar como bajo o poco ese criterio, 0 hace referencia a un valor neutral y 1 equivale a valores altos o grandes.

Luego de verificar la tabla 10.1 se puede sugerir que a pesar de que ambas configuraciones son equivalentes en ventajas y desventajas, se recalca el hecho de que un requerimiento de alto nivel es que no puede obstruir con el funcionamiento actual del telescopio, y la configuración B es la que tiene un riesgo más alto de incumplir este requerimiento. Siguiendo la idea anterior, se observa en la figura 10.5 que un tornillo sin fin análogo al de la configuración A queda en una posición donde es posible que obstruya el campo de visión del foco Nasmyth, a pesar de su pequeño tamaño; uno de mayor tamaño sería más complejo de ubicar de tal forma que se mantenga dicho requerimiento.

Tabla 10.1: Matriz de Pugh para configuraciones de sección 10.3.2

Criterio a evaluar	Configuración A ¹	Configuración B ²
Esfuerzo	1	0
Distancia brazo de palanca	-1	1
Tamaño del tornillo sin fin	-1	1
Interferencia con la luz	-1	0
Tiempo requerido entre cambios de posición	1	-1
Potencia del motor requerido	1	0
Viabilidad de ser adquirido o fabricado	0	0

¹ Tornillo sin fin corto, husillo ubicado cerca del eje de rotación

² Tornillo sin fin largo, husillo ubicado lejos del eje de rotación

Una vez revisado este diseño, se llegan a las siguientes conclusiones:

- Se requiere un soporte para asegurar el espejo cuando el acople no se esté utilizando, o sea para su posición de descanso.
- Verificar las posibles posiciones del husillo y el tornillo sin fin para identificar la más idónea.
- El tornillo sin fin podría interferir en el campo de visión del instrumento científico por lo que se debe tener especial cuidado con la posición que va a tomar cuando se opere la configuración Cassegrain.

10.3.3 Actuador Tornillo sin fin - Corona

La siguiente propuesta para poner en funcionamiento el foco Nasmyth es la que contempla un tornillo sin fin y un engrane, llamado corona. La estructura para esta propuesta no cambia con respecto al de la sección 10.3.2, y el actuador sería similar al que se utiliza para la inclinación y guiñada del espejo (sección 10.3.1). En la figura 10.6 se muestra el ejemplo de cómo se acomplaría las estructura y el actuador.

Similar a la propuesta de la sección anterior, los elementos que le proporcionarían el movimiento a la estructura estaría bajo esfuerzos altos por el peso que tendría la estructura y el tamaño de

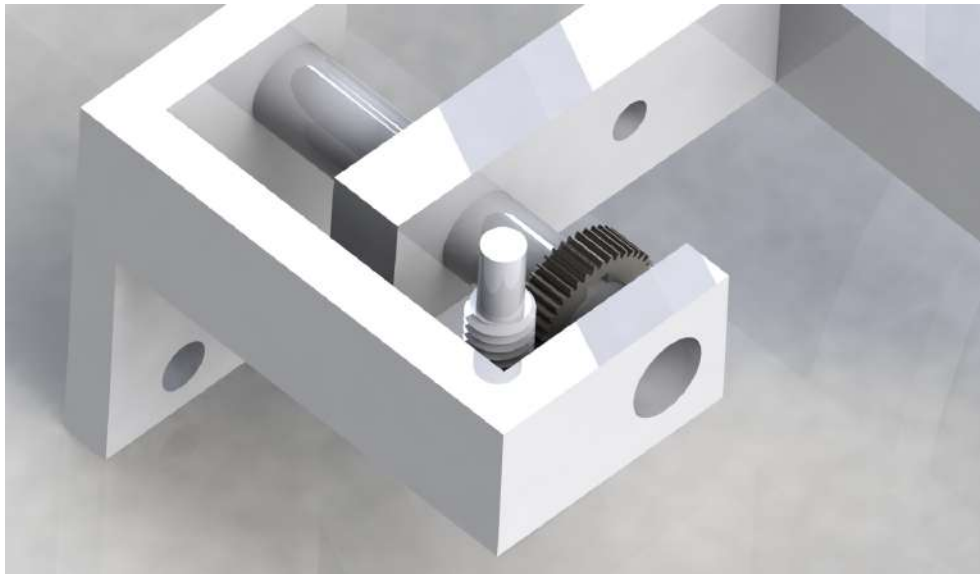


Fig. 10.6: Propuesta con tornillo sin fin y corona

dichos elementos. Esto haría que el material de las piezas debe ser lo suficientemente rígido para soportar el alto esfuerzo y de este modo no afectar con el tiempo la operación normal del sistema de acople.

Es importante destacar que un alto esfuerzo en los materiales haría que estos se desgasten más rápidamente, produciendo viruta y polvo por el roce entre los mismos. La viruta y el polvo podrían depositarse en el espejo terciario, en el guiador del telescopio o en el peor de los casos sobre los instrumentos científicos, lo que tendría un gran impacto sobre la operación del telescopio.

Se hace notorio que el espacio que requiere el tornillo sin fin y la corona varía dependiendo del tamaño de cada uno de estos, y el tamaño de cada uno de estos se ve ligado la relación de reducción de la velocidad del motor. De hecho, en todas las demás propuestas se utiliza reducciones con autobloqueo para obtener mayor precisión de los movimientos de cada eje con respecto al motor que lo produce, y el autobloqueo ya que con esto se evita tener que ponerse frenos o bloqueos extra, implicando peso y elementos extra. Por otro lado, no se sugiere la utilización del motor directo a ningún eje de rotación puesto que produciría una operación forzada, además de que el control del mismo se complejiza más.

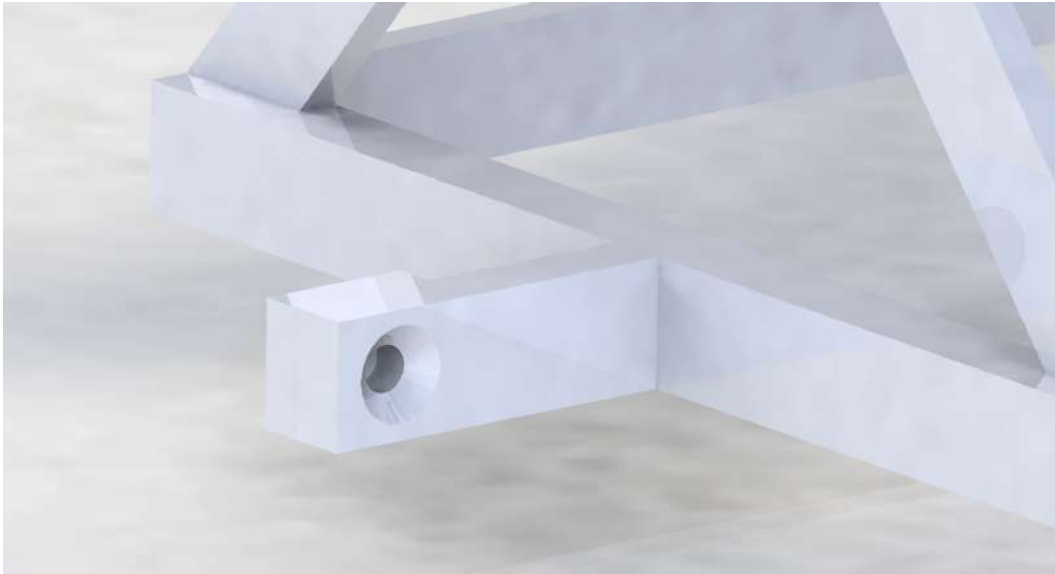


Fig. 10.7: Ejemplo de soportes laterales para fijación de estructura

Al igual que en la sección anterior el sistema se apoyaría sobre soportes que servirían para disminuir el esfuerzo en los actuadores, además de que produciría que el error en cuanto a la posición alcanzada con la puesta en operación del espejo y luego la desactivación del mismo sea mínimo entre cada repetición de estos movimientos.

En la imagen 10.7 se observa el soporte que fijaría la estructura. La estructura poseería un orificio con un avellanado para que el prisionero, que poseería la forma en contraparte, atravesara sin error la estructura y el soporte, que se encuentra detrás del saliente que posee el orificio de la estructura. El soporte que se menciona también poseería un avellanado y con esto se pretende que si la estructura quedara ligeramente desalineada se corrija, ya que el prisionero le forzaría un ligero movimiento al encajar en ambas piezas.

Una vez revisado este diseño, se llegan a las siguientes conclusiones:

- Si se desea precisión en los movimientos se requiere de una corona grande, pero va en detrimento del espacio disponible.
- Se requiere de un material que soporte altos esfuerzos pero que también sea mecanizable.



Fig. 10.8: Vista superior de deflector con acople

10.3.4 Acople del sistema con el deflector

Una vez analizadas las propuestas anteriores, se escogieron las características de cada una que daban solución a la mayoría de los requerimientos, se procedió a integrar el deflector dentro del prototipo de diseño con el fin de verificar tamaños aproximados y factores que tendrían que ser revisados para afectar de manera mínima a la configuración Cassegrain.

En la figura 10.8 se muestra la vista superior del deflector, la misma visión que se tiene desde el espejo secundario hacia el instrumento científico. Sobre esta misma figura, se encuentra la estructura que da soporte al espejo y se encuentra retraída para permitirle al telescopio operar en la configuración Cassegrain.

Como se menciona, las dimensiones no son las finales, y el tamaño del espejo se define por el caso de estudio en la sección 9.2.1. Partiendo del tamaño de espejo analizado ahí, se construye una estructura nueva para el soporte del espejo con la misma forma de este; ya que la forma que debe



Fig. 10.9: Vista superior de deflector para verificación de obstrucción del acople

tener el espejo es una elipse se le da esta misma forma a la estructura con el fin de no interferir en gran medida a la luz que llegaría al guiador, tal cual se menciona en la sección 9.2.2.

La forma de elipse requiere menos tamaño que la primer propuesta (sección 10.3.1), ya que se ajusta a la forma del deflector. Esto anterior se da porque el deflector es un cilindro, los círculos y elipses serán las geometrías que mejor se podrían ubicar en el cilindro porque sus proyecciones coinciden de manera más precisa que las geometrías con ángulos internos, como los triángulos o los círculos.

La propuesta actual sugiere que el acople se soporte del deflector y que sobre este mismo se ubique el espejo con toda su estructura cuando el telescopio está operando como Cassegrain. Mantener todo el sistema dentro del deflector supone complejidad para el diseño por el espacio reducido con el que se cuenta, pero la ventaja de que es más sencillo que si se sacara por completo toda la estructura fuera del telescopio cuando no se esté operando como Nasmyth.



Fig. 10.10: Vistas del deflector con implementación del acople

En la imagen 10.9 se muestra que sí es posible colocar la estructura sin que exista obstrucción de la luz. La forma y las medidas de la estructura no son realizadas con medidas específicas obtenidas por cálculos, sino que son las que se ajustan a la geometría del espejo, se mantiene una estética agradable y lo más importante, se le da el tamaño adecuado para que no se interfiera en gran medida con la luz que se requiere que llegue al guía (sección 9.2.2).

En la figura 10.10 se muestra las modificaciones que sufriría el deflector por la implementación del acople, así como la introducción de operación y partes que no estaban previstas en las primeras propuestas.

En este punto es importante aclarar que se podría invertir la orientación del deflector y que mecánicamente no tendría repercusión alguna; sin embargo para el control del dispositivo se mantendrá la orientación mostrada y así mantener la nomenclatura a lo largo del proyecto.

Con respecto a la figura 10.10a, se observa el sector que estaría orientado hacia el Oeste. Existen un par de elementos que se hacen notorios en el deflector, la tapa que cubre el orificio de salida de



Fig. 10.11: Corte del deflector con acople fuera de operación

la luz y las cubiertas blancas que cubren la estructura del acople cuando no se encuentra activo el foco Nasmyth. Estas cubiertas cumplen la función de mantener cerrado el deflector para que no existan resplandores que interfieran con la observación del instrumento científico, pues se hace necesario cortar una sección del deflector para ubicar el acople dentro del mismo sin que interfiera en foco Cassegrain.

Con respecto a la figura 10.10b, se observa la operación del acople con el foco Nasmyth activo hacia el Este pero fuera del deflector, ya que para que el foco se active es necesario dejar libre el orificio del sector correspondiente y mantener cerrado el opuesto, pues si se mantuvieran abiertos ambos podría existir interferencia proveniente del Oeste. Ambas imágenes en la figura 10.10 muestran la configuración de operación del foco Nasmyth para el sector Este.



Fig. 10.12: Corte del deflector con acople en operación hacia el Oeste

Para las tapas de los orificios de cada sector se sugiere que para entrar y salir de operación sea por medio del movimiento en vertical, puesto que de este modo se mantendrían acopladas al deflector, manteniendo su forma cilíndrica y no obstruyendo al espejo primario sin importar su posición. La tapa se podrá deslizar a través de rieles.

Cuando el acople no se encuentra activo, o sea que no se está utilizando el foco Nasmyth, se debe ubicar en un sitio donde no interfiera con el foco Cassegrain y que se encuentre protegiendo al espejo terciario.

En la figura 10.11 se muestra el acople fijado al deflector, se observan los soportes que detendrían al acople mientras se encuentre inactivo o activo la nueva configuración del telescopio. En dichos soportes es donde el prisionero o pasador mantendría fijado la estructura para darle rigidez.

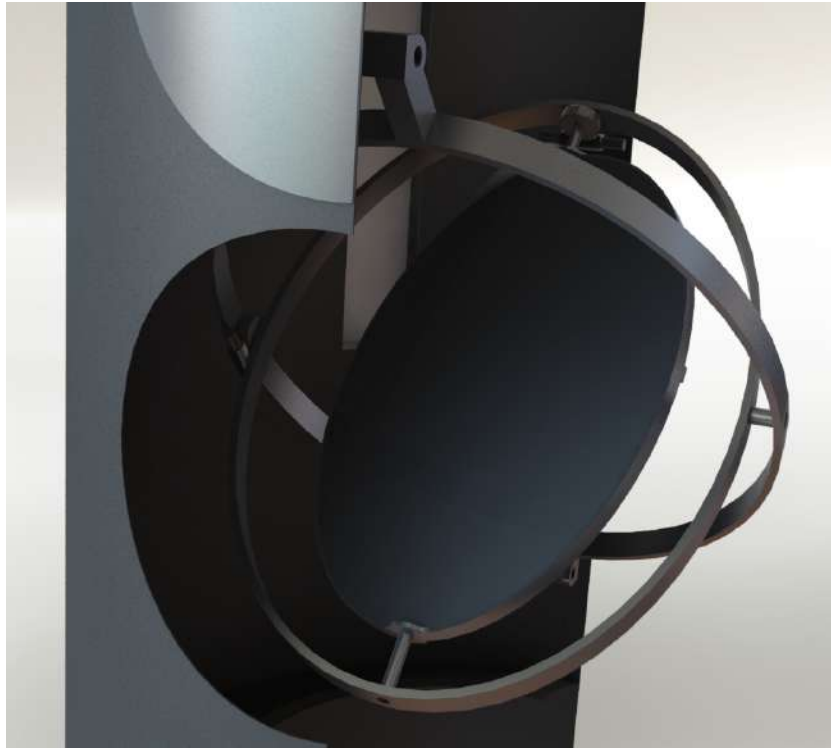


Fig. 10.13: Corte del deflector con acople en operación hacia el Este y con corrección de guiñada

Es importante destacar que se debe revisar a detalle la manera en que se van a unir los soportes antes mencionados al deflector, pues se requiere que la conjunción entre ambos sea lo suficientemente robusta mecánicamente, para así asegurar la rigidez del sistema.

Como se menciona en la sección 10.3.1, se debía modificar la estructura que le permitía la inclinación y la guiñada al espejo, es la figura 10.12 se muestra cómo se ha modificado el concepto, haciendo que su forma geométrica coincida con la del espejo terciario y además que se ajuste mejor al deflector, puesto que para cuando se encuentra desactivado es mínima la interferencia que produce (figura 10.11).

Por medio del eje de inclinación será que se le permitirá operar al espejo para el sentido Este y Oeste (figura 4.2), y por medio de la guiñada se le dará un ajuste para corregir la orientación del espejo por fallas en el montaje. En la figura 10.13 se observa el acople orientado hacia el Este y con cierta desviación hacia la izquierda de la imagen por parte del eje de guiñada.

Por otro lado, a pesar que se da la impresión que podría existir alguna obstrucción no es así, la estructura como tal produce la mínima obstrucción tanto a la luz incidente como la reflejada por el espejo, así como a la que se dejaría pasar hacia el guiador, siendo este el motivo de la separación del anillo que soporta el espejo y el siguiente anillo hacia afuera. Visto desde la posición del espejo secundario del telescopio (figura 10.8), como desde el eje Este u Oeste se puede observar el espejo con forma circular, esto pues la elipse proyectada desde ese punto de observación se ve como un círculo, deseable para capturar la luz de forma uniforme.

Luego de revisar el presente diseño, se realizan algunas observaciones, que si bien no se va a tratar más en cuanto al concepto de los diseños, serán las conclusiones que darán fundamento al diseño a realizar:

- Verificar la correcta sujeción de los soportes del acople con el deflector.
- De ser posible agregar más puntos de apoyo a los anillos para dar más rigidez a toda la estructura.
- Mejorar la ubicación del actuador que produce la puesta en operación del acople para evitar altos esfuerzos en el material.
- Analizar los esfuerzo mecánicos en el deflector para evitar deformaciones en el mismo.

10.3.5 Acople Nasmyth del Telescopio Mercator

Otro de los conceptos de diseño que se tuvieron en cuenta es el que se presenta en la sección 6.3, en el que el sistema se activaba por medio de un actuador y para alternar entre focos Nasmyth se rotaba el sistema.

Esta solución no fue en la que se basó el diseño final por la complejidad en cuanto a hacer rotar el sistema.



(a) Deflector no transparente



(b) Deflector transparente

Fig. 10.14: Vista isométrica del acople guardado (no activo) en deflector

10.4 Diseño final

Luego de analizar los conceptos de diseño con los expertos del OAN, se evaluó que todos los diseños representaban una complejidad alta en cuanto al sistema mecánico que le permitiría los movimientos, por lo que se dio la sugerencia de realizar el sistema lo más simple posible pero cumpliendo con los requerimientos y parámetros mencionados con anterioridad. Se decidió solo utilizar uno de los dos focos Nasmyth posibles, por lo que eso simplificaría en gran medida la solución.



(a) Deflector no transparente



(b) Deflector transparente

Fig. 10.15: Vista isométrica del acople activo en deflector

10.4.1 Diseño mecánico

En cuanto al diseño del sistema mecánico, se plantea una integración de los conceptos anteriormente analizados (sección 10.3) y las sugerencias de los expertos en el área mecánica del ONA.

En la figura 10.14 se observa el acople cuando se encuentra activa la configuración Cassegrain. Como se logra apreciar, el deflector requiere ser modificado para resguardar el nuevo espejo terciario, además de en el diseño se propone soportar y dar rigidez al acople por medio de la unión con el deflector.

El presente trabajo no responde ante los estudios para las modificaciones que se le requieren hacer al deflector, ya que se limita al diseño del acople para el espejo terciario. El deflector requiere un



(a) Vista desde foco Nasmyth

(b) Vista desde espejo secundario

Fig. 10.16: Acople activo

estudio óptico y mecánico más detallado. Las modificaciones que se requieren hacer para que el sistema del acople pueda operar de manera satisfactoria son las siguientes:

- Orificio lateral hacia el eje donde se formaría el plano imagen con el espejo terciario en operación.
- Corte para correcto posicionamiento del acople cuando se encuentre guardado y de este modo que no obstruya la luz de la configuración Cassegrain.
- Taladrar la estructura para la fijación de las piezas del acople.
- Eliminación de los anillos desde el 4 hasta el 6 de arriba hacia abajo para que no exista obstrucción del movimiento del acople. Esta modificación altera el funcionamiento del deflector, pues en su diseño se contempla que posean los anillos por requerimientos ópticos.

En la figura 10.14b se puede visualizar el interior del deflector con el sistema guardado (no activo). Se hace notorio los componentes electromecánicos que le permiten el movimiento, en la sección

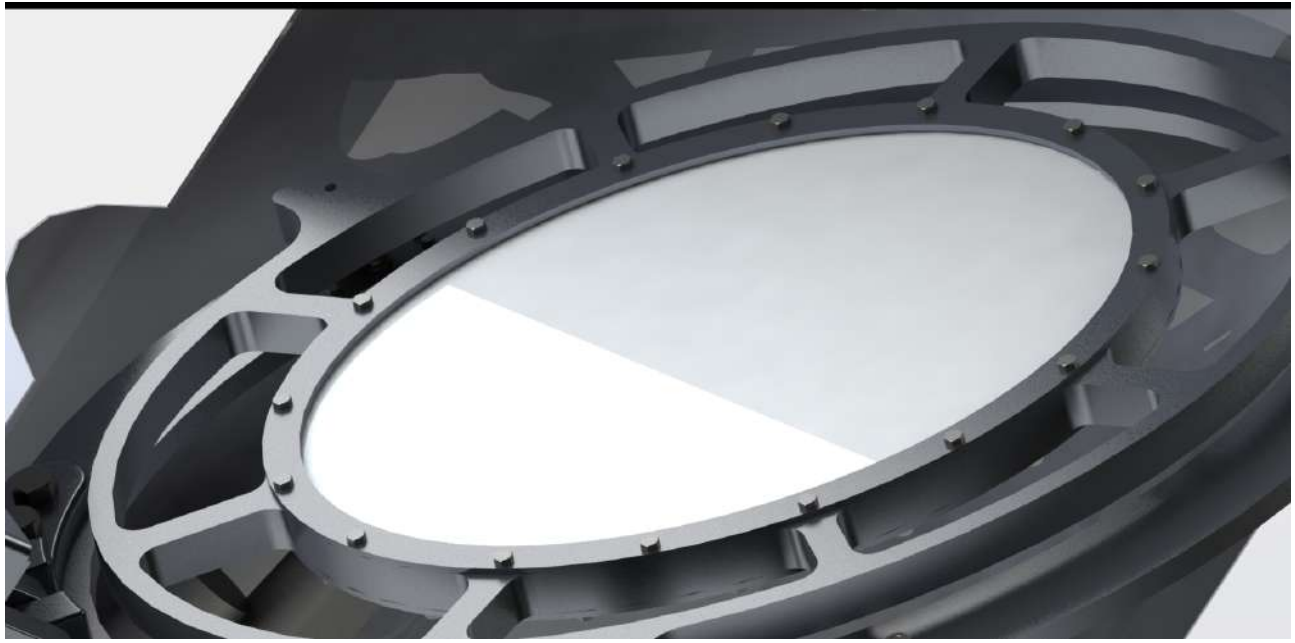


Fig. 10.17: Sistema de fijación para el espejo terciario

10.4.2 se comentará al respecto. También se hace notorio que el sistema diseñado queda fuera de los límites físicos del deflector, provocando que pueda existir obstrucción por parte del acople, por lo que se procedió a corroborar tal efecto.

Por medio del software Solidworks se obtiene el valor del radio del elemento que se encuentra más alejado del centro del deflector respecto a dicho centro, dando como resultado 309 mm de radio; como el deflector tiene un radio de 255 mm, el exceso es de 54 mm. El espejo secundario está cubierto por un deflector adaptado a su tamaño, el radio del deflector del secundario es de 336,5 mm, lo cual quiere decir que desde los límites del deflector del primario hasta alcanzar el tamaño del deflector del secundario existe una distancia de 81,5 mm. Con la información anterior se obtiene que a pesar de que el acople se extiende 54 mm fuera del deflector del primario no está obstruyendo con el espejo primario, ya que el deflector del espejo secundario es más grande. Es importante resaltar que se del debe cubrir el saliente del acople para protegerlo y evitar reflejos de luz en la configuración Cassegrain, por lo aún se cuenta con 27,5 mm de espacio para colocar los sistemas que se requieran.

En la figura 10.15 se observa el acople cuando se encuentra activo, esto quiere decir que el plano

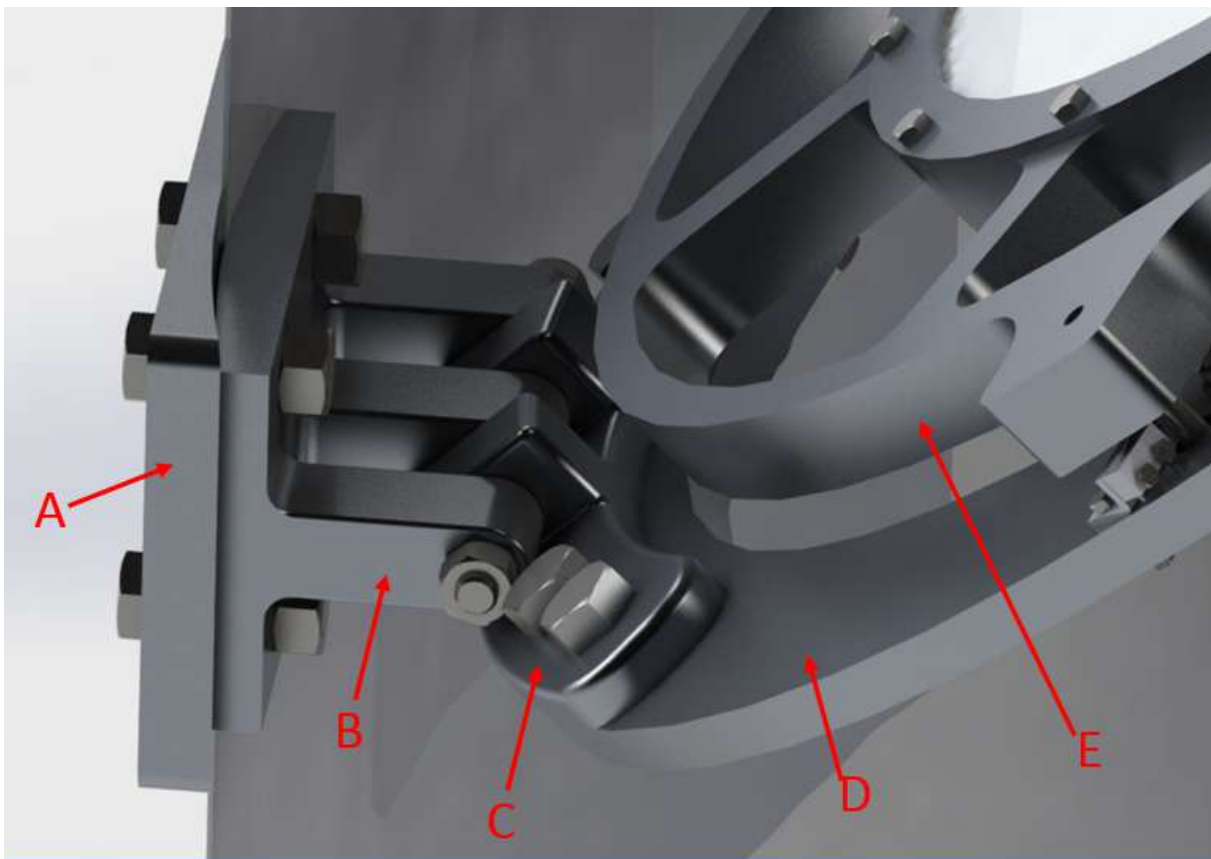


Fig. 10.18: Pivote que permite entrar y salir de operación al espejo terciario

imagen se forma en el foco Nasmyth. Para este caso el espejo se dispone a 45° respecto al plano que se encuentra en la base del deflector, por lo que desvía la luz a 90° , hacia el foco Nasmyth.

En la figura 10.16 se visualiza también cuando el acople se encuentra activo, en ambas se verifica lo que se planteó en la sección 9.2.1, donde se propuso que la forma debía ser elíptica para que la proyección del espejo fuera un círculo, y con esto capturar toda la luz para el campo visual de $6,5'$. Además, se observa las ranuras que posee el acople para que la luz lo atravesara y de este modo se pueda utilizar el guiador.

Es importante destacar que como se observa en la figura 10.19, no existe obstrucción para cuando el acople se encuentra inactivo o guardado. En la figura 10.19a se puede observar que no existe pieza alguna que quede fuera de los anillos que acotan el cono de luz. También se verifica lo mismo en la figura 10.19b para los pistones.

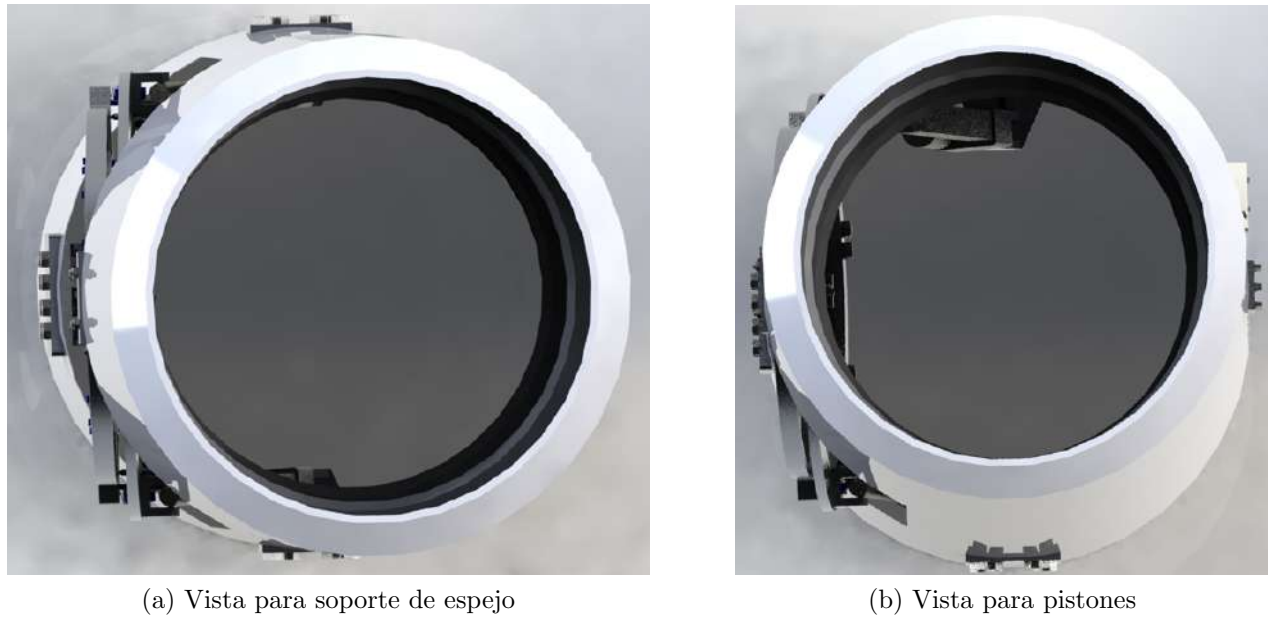


Fig. 10.19: Vistas para verificación de obstrucción a la configuración Cassegrain

El material que se utilizará en todos los componentes será el aluminio 1060, esto debido a su bajo costo, facilidad para el mecanizado y baja densidad, por lo que el peso será bajo en comparación con materiales como el hierro o acero. Esta aleación de aluminio posee un límite elástico de 27,57 MPa y su módulo elástico es de 69 GPa; estos datos fueron obtenidos del software Solidworks.

Fijación del espejo

Para dar soporte al espejo y poder cumplir con el requerimiento de que exista versatilidad para utilizar un espejo dicróico, se propone fijar dichos espejos tal cual se observa en la figura 10.17, ya que de este modo no se interrumpiría a la luz que el dicróico dejaría pasar para el foco Cassegrain. Los espejos estarían soportados por anillos que los fijarían por los extremos, así la interferencia es mínima. Por otro lado, para evitar que los espejos sufran daños, se dispone de un anillo entre el espejo y su anillo superior y otro uniendo el vidrio y el anillo inferior pero de corcho, esto le permitiría resguardar la integridad de los espejos y mantenerlos fijos.

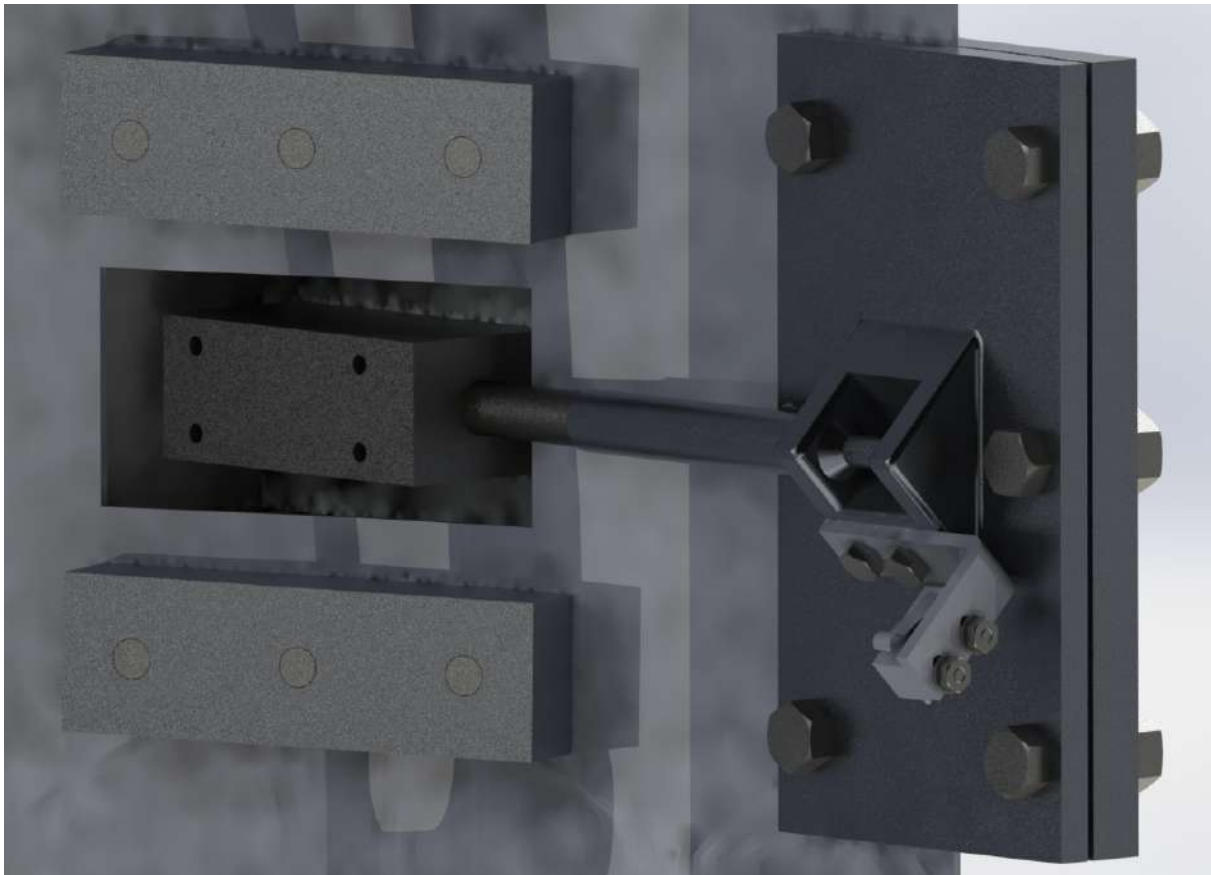


Fig. 10.20: Sistema de fijación para el acople cuando se encuentra activo

Pivote

Para permitir que el sistema entre (activar) y salga (guardar) de operación, se dispone de un pivote que le permita llegar a la inclinación necesaria para cada caso. En la figura 10.18 se observa cómo se logra la fijación del acople con el deflector. Para tal necesidad el elemento A y el B están unidos por medio de tornillos y tuercas, y ambos elementos oprimen el deflector pero en una área mayor que si solo se diera la unión directa del deflector con el elemento B, por lo que no solo se produce que se dé la sugestión del acople sino que minimiza la deformación que el deflector tendría en esa zona también. Tanto el elemento A como el B poseen una geometría que le permite el acople con el deflector de manera precisa, pues poseen la curvatura con el radio indicado para permitir lo mencionado.

El elemento que permite el giro es el pasador que une el elemento B con el C de la figura 10.18.

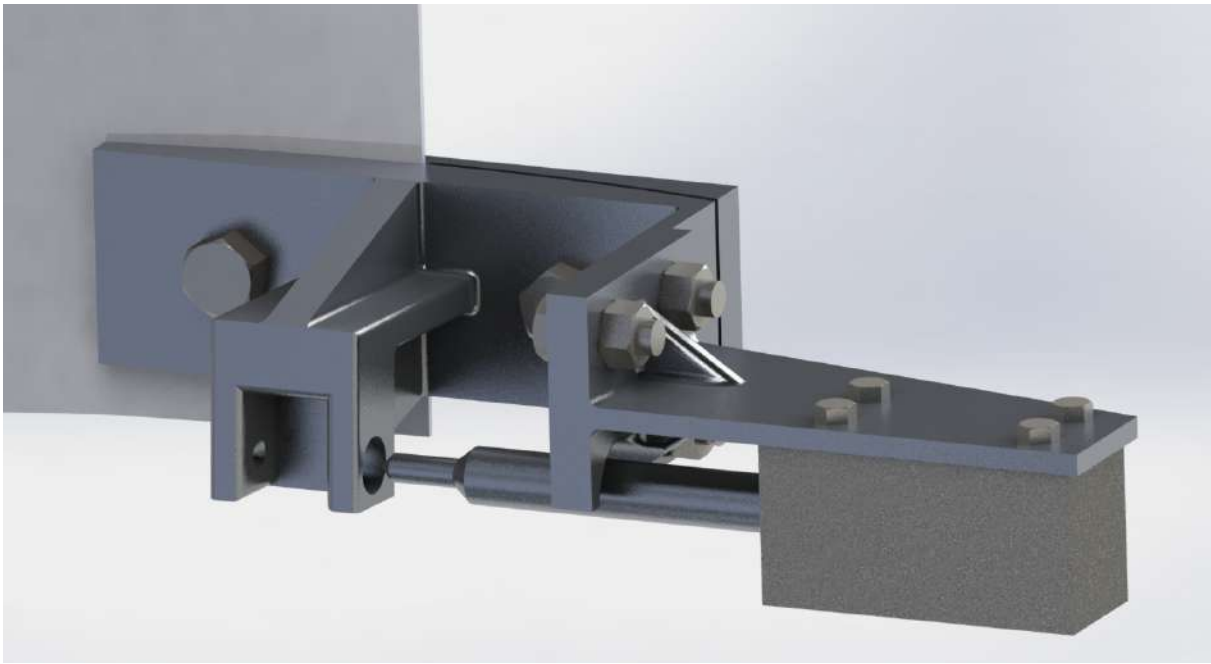


Fig. 10.21: Sistema de fijación para el acople cuando se encuentra guardado

Ambos elementos poseen una geometría que solo permite el giro en el eje en el cual el pasador se encuentra, por lo que se restringe el sistema a que tenga inclinaciones no deseadas que producirían errores en los estudios científicos. El elemento C se une con el D por medio de tornillos y tuercas, y se dispuso de esta manera por facilidad de construcción de los elementos, pues la fabricación del elemento D sería compleja y costosa si se le añadiera la geometría del elemento C.

10.4.2 Diseño electromecánico

En cuanto al diseño del sistema electromecánico, se evaluaron cuáles eran las necesidades que se requerían solventar respecto a los movimientos, para luego escoger los componentes electromecánicos que le permitiría satisfacer los requerimientos. Se encontró que los movimientos que se requerían hacer era el de puesta en operación de todo el sistema (activar y guardar el terciario), el ajuste fino para realizar correcciones a la orientación del espejo y el poder fijar por medio de algún elemento el acople abatible.

Fijación del acople activo

Se hace vital para mantener el sistema estable durante su operación que posea la mayor cantidad de puntos de fijación posibles, siempre y cuando no interfieran con la configuración Cassegrain. Además, es indispensable que el sistema se fije a una posición cuando se desee, pero que también se pueda separarse. En la figura 10.20 se observa el sistema que le permite al acople mantenerse fijo mientras se encuentra en operación. Un pasador será quien restrinja el movimiento de la estructura que soporta el espejo terciario, dicho pasador puede retraerse gracias al solenoide [28] que posee.

El pasador tiene una geometría tal que le permite una colocación y fijación precisa de la estructura que soporta el terciario a la estructura de la imagen 10.20, con esto se consigue que gracias a los chaflanes de los componentes el sistema se mantenga rígido mientras se encuentra activo.

Fijación del acople guardado

Por motivos de seguridad del acople y del telescopio, se requiere de mantener fijo el acople mientras no se está utilizando, por lo que se requiere de un sistema similar al que se menciona en la sección anterior. En la figura 10.21 se muestra el sistema que le permite mantenerse seguro al espejo terciario mientras no se encuentra en operación, dicho comparte el concepto del pasador acoplado al solenoide [28], donde el pasador también tiene una geometría tal que fija de manera precisa al soporte del espejo terciario.

Por otro lado, al igual que el sistema anterior y el de pivote poseen una estructura que les permite acoplarse al deflector siguiendo la forma que posee este, y por medio de los tornillos y tuercas se fija al telescopio.



(a) Pistones con acople activo

(b) Pistones con acople guardado

Fig. 10.22: Pistones en el acople

Movimiento guardar-activar

Uno de los requerimientos para la implementación del foco Nasmyth es que debe permitir la utilización de la configuración Cassegrain actual, por lo que el acople debe poder entrar y salir de operación de manera automática, sin que un técnico requiera subir al telescopio para activar el sistema de manera manual, sin que por medio del control del telescopio se active. Por este motivo se requiere un actuador que le permita al acople ser abatible.

Para tal requerimiento se sugiere utilizar pistones eléctricos [29] ya que permiten al acople pivotar para ser puesto en operación o ser guardado. Además, en telescopio cuenta con acceso a electricidad y al ser pistones eléctricos no se corre riesgo de derrames de líquidos. Por otro lado, es simple controlar tanto la posición como la velocidad de operación de estos dispositivos.

Los pistones[29] a utilizar tiene la capacidad de mover el sistema. Funcionan a 12 V en corriente directa, y tienen una velocidad de operación aproximada de 12 mm/s. Para poder suplir la energía para mover estos actuadores se propone utilizar los controladores de motor que de [30], ya que

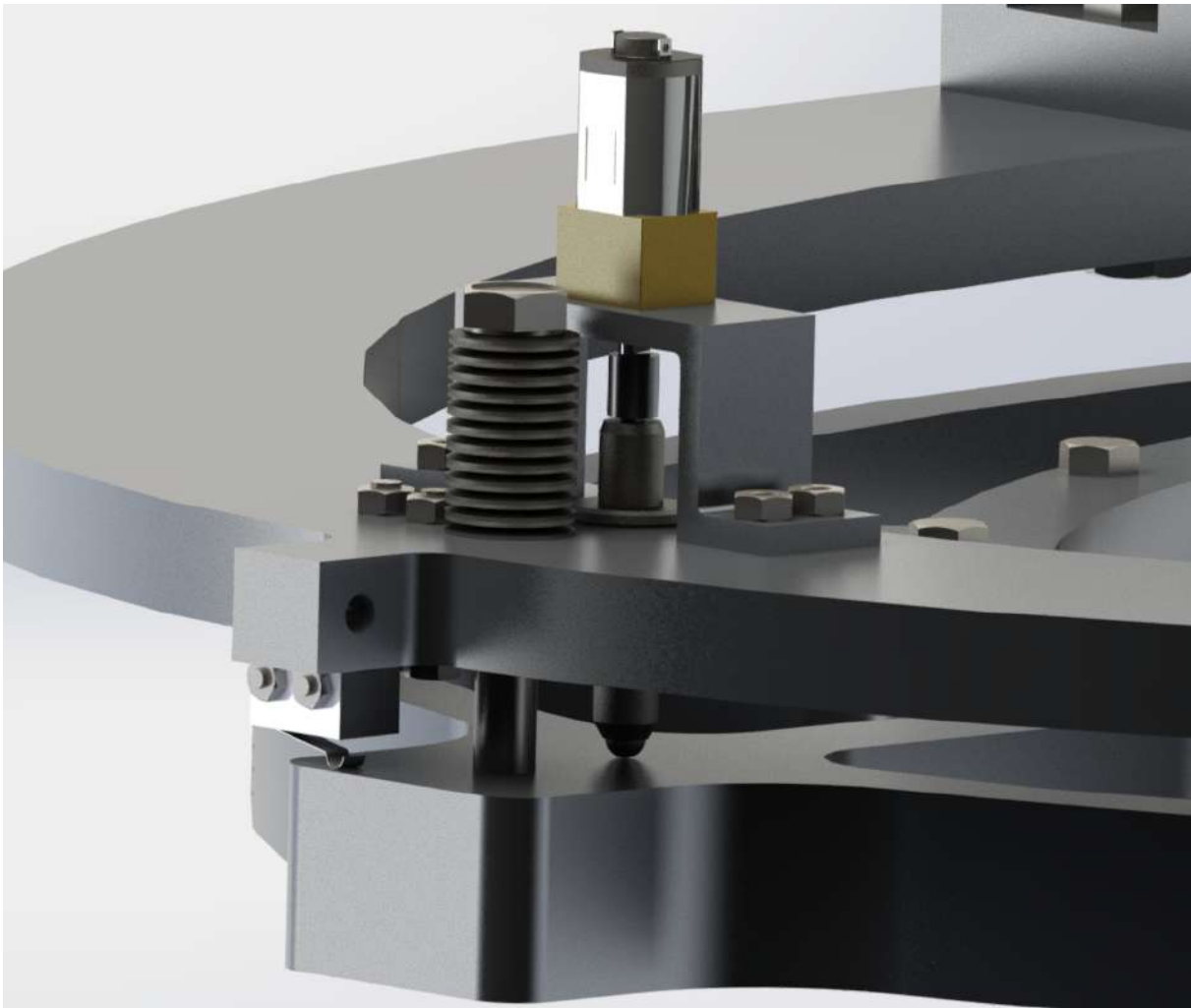


Fig. 10.23: Estación de ajuste fijo

cumplen con las especificaciones necesarias para el control de los pistones.

En la figura 10.22 se observa el estado en que se encuentran ambos pistones para cuando el espejo terciario está en operación o fuera de ella. En la figura 10.22a se visualizan los pistones retraídos, permitiéndole al sistema poner al espejo en la posición que desvía la luz hacia el foco Nasmyth. Por otro lado, en la figura 10.22b se muestran los pistones cuando están extendidos, haciendo que el acople se dirija hacia la posición de guardado.

Al igual que en las secciones anteriores que poseen elementos que se unen con el deflector, los soportes de los pistones tienen una geometría tal que les permite una unión precisa y rígida con el deflector.

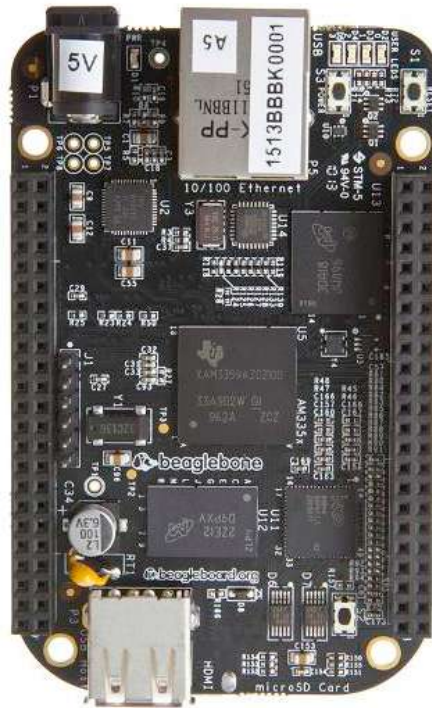


Fig. 10.24: Beaglebone Black [35]

Por la geometría entre los elementos B y C de la figura 10.18 se debe resguardar la integridad del sistema en caso de que uno de los dos pistones se detenga durante la puesta en marcha del sistema, ya sea para guardarse o activarse. Los pistones escogidos [29] poseen una retroalimentación proveniente de un potenciómetro lineal, el cual cambia el valor de la resistencia para cierta posición del pistón, con esto se solventa la necesidad de resguardar la integridad del espejo, ya que si se está midiendo la posición de los pistones y se detecta que esta no cambia cuando debería de hacerlo, se puede detener la operación.

Ajuste fino

Aunque se utilizaran pistones y elementos estructurales construidos con alta precisión, existen variaciones y errores que haría que el sistema deba ser calibrado cada cierto tiempo. Para evitar este inconveniente, se dispone de un ajuste fino con el cual se puede orientar el espejo según se requiera. En la figura 10.23 se muestra una de las tres estaciones para el ajuste fino.

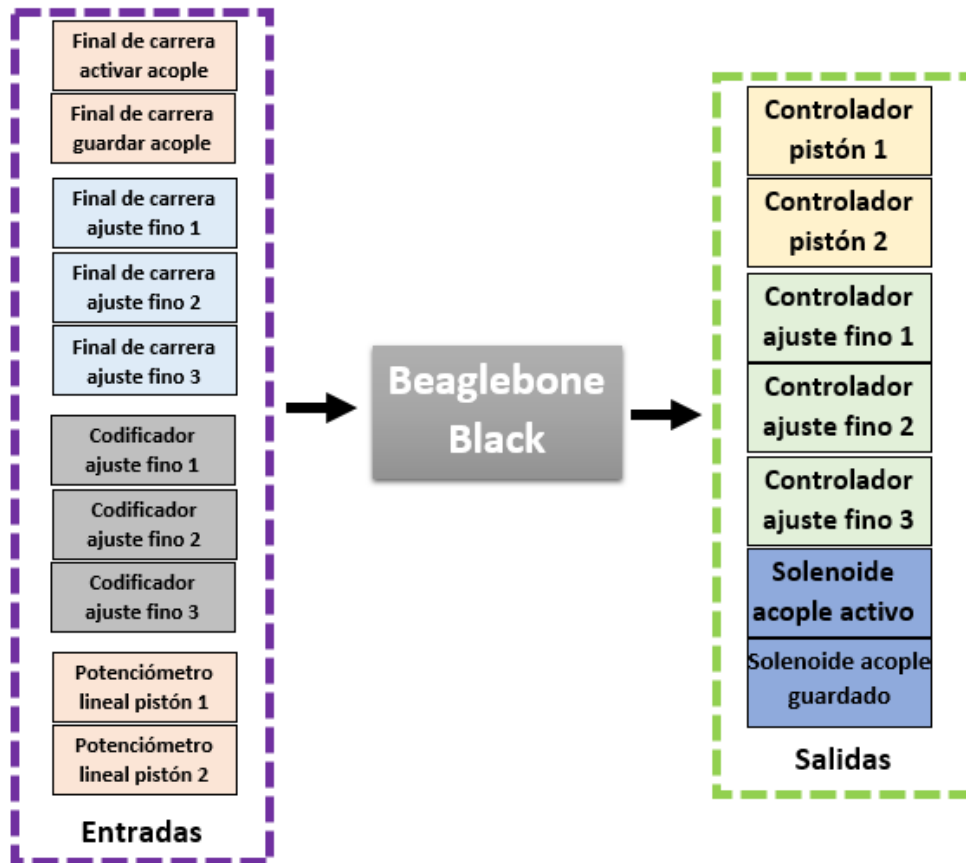


Fig. 10.25: Diagrama de entradas y salidas de control

Para alcanzar los movimientos el tornillo en conjunto con las arandelas se comportan como un resorte, en el cual las arandelas se deforman permitiendo un ligero desplazamiento del espejo, ya que el tornillo se encuentra soportado por las arandelas cónicas [31] en un extremo, y en el otro está fijado con el elemento que soporta el espejo terciario. Para dichos movimientos se utiliza un tornillo de ajuste [32] el cual permite desplazamientos mínimos de 670 nm aproximadamente. El tornillo se desplaza $254 \mu\text{m}$ por vuelta y tiene un desplazamiento máximo de 12,7 mm; sin embargo, soporta 90 N, por lo que se debe tener en cuenta este valor pues no se debe exceder para no producir un daño en el tornillo.

En dicha estación se puede observar que posee un servomotor de corriente directa [33] para controlar el movimiento, unido a los codificadores de cuadratura [34] se puede alcanzar una resolución de salida del motor de $0,03^\circ$. Por lo que se requiere de 31 cambios en el valor del codificador

(equivalente a 2,6 vueltas del motor que está dentro del servomotor) para alcanzar el mínimo cambio posible en el sistema. Se podría alcanzar una corrección aún más pequeña para el espejo, sin embargo esto está limitado por el tornillo de ajuste, ya que el motor lo permite.

Como parte de la protección que se requiere para el ajuste del terciario, cada estación posee un sensor de final de carrera (Limit Switch) que permite obtener el valor de referencia (calibración). Esto es indispensable ya que el sistema debe operar en un rango determinado para resguardar la correcta operación. Las arandelas no pueden perder la tensión puesto que el sistema quedaría holgado y esto podría producir daños en el espejo. Pero tampoco se debe aplicar más tensión de la que el tornillo de ajuste soporta ya que se dañaría. El control de la posición se realiza por medio de software.

10.4.3 Control

Para poder obtener los movimientos deseados, además de los actuadores y los sensores se requiere del control y la integración de estos sistemas, a continuación se muestra cómo se alcanzó por medio de software computacional y un microcomputador los movimientos requeridos.

El control de todos los elementos es de lazo cerrado, donde siempre el valor de comparación fue el sensor de final de carrera para el caso de de parada de pistones y de la calibración del ajuste fino, el potenciómetro lineal en el caso de los pistones para la verificación del movimiento y los codificadores para alcanzar la posición de los motores. No se utilizó un método para el control de tipo PID o PD, porque el sistema no es inestable, por lo que con un un valor de salida para la planta y que el de parada sea dado por el sensor correspondiente es suficiente.

El controlador que se utilizó es el Beaglebone Black (figura 10.24), esto porque es controlada por un sistema operativo (Debian, Andorid, Ubuntu, entre otros), posee 65 pines para propósito general, 7 entradas analógicas, 4 puertos optimizados para el uso de codificadores de cuadratura y conexión por Ethernet [35]. Estas características lo convierten en el dispositivo óptimo para el control, ya

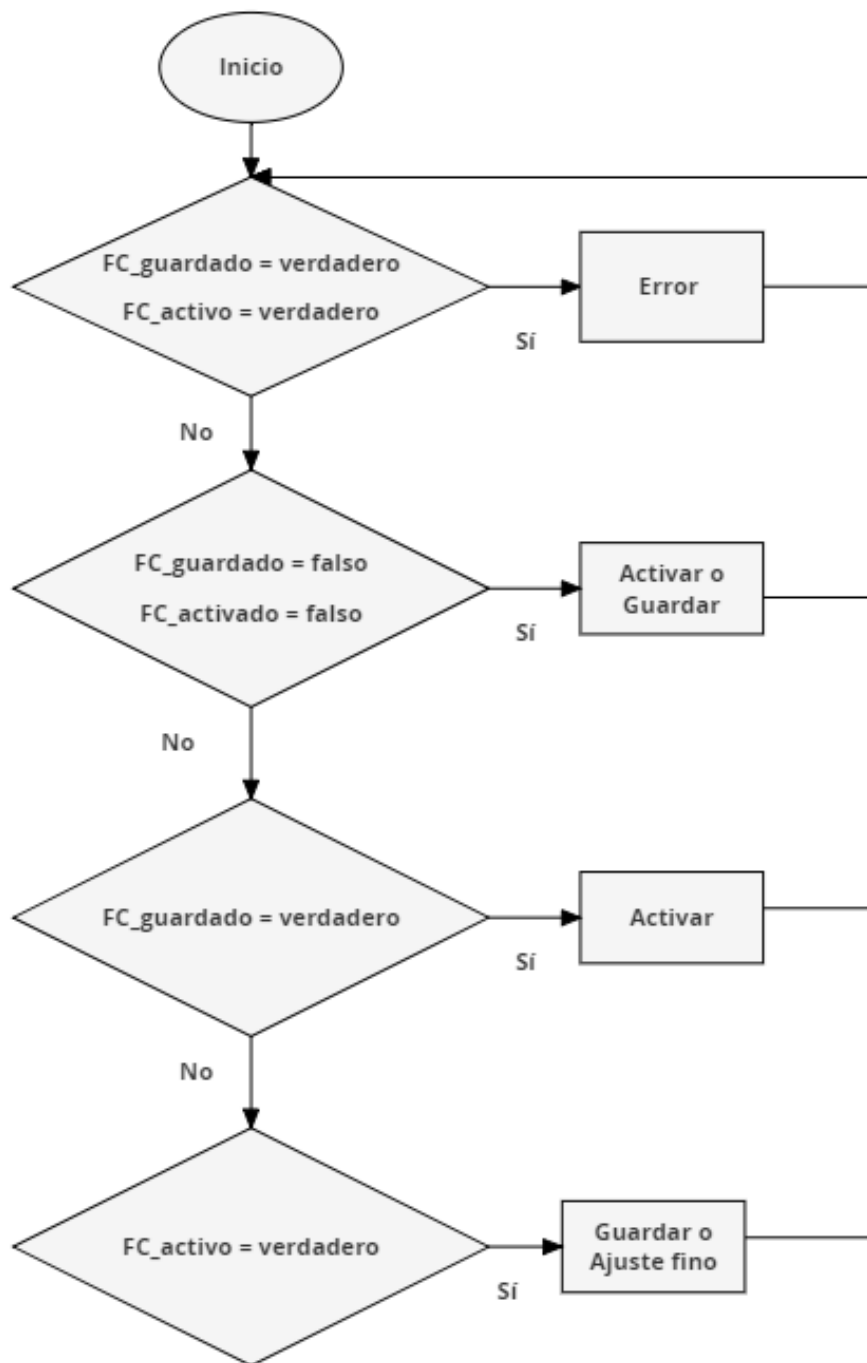


Fig. 10.26: Diagrama de flujo global (FC_guardado: Final de carrera del acople cuando se encuentra guardado, FC_activo: Final de carrera del acople cuando se encuentra activo)

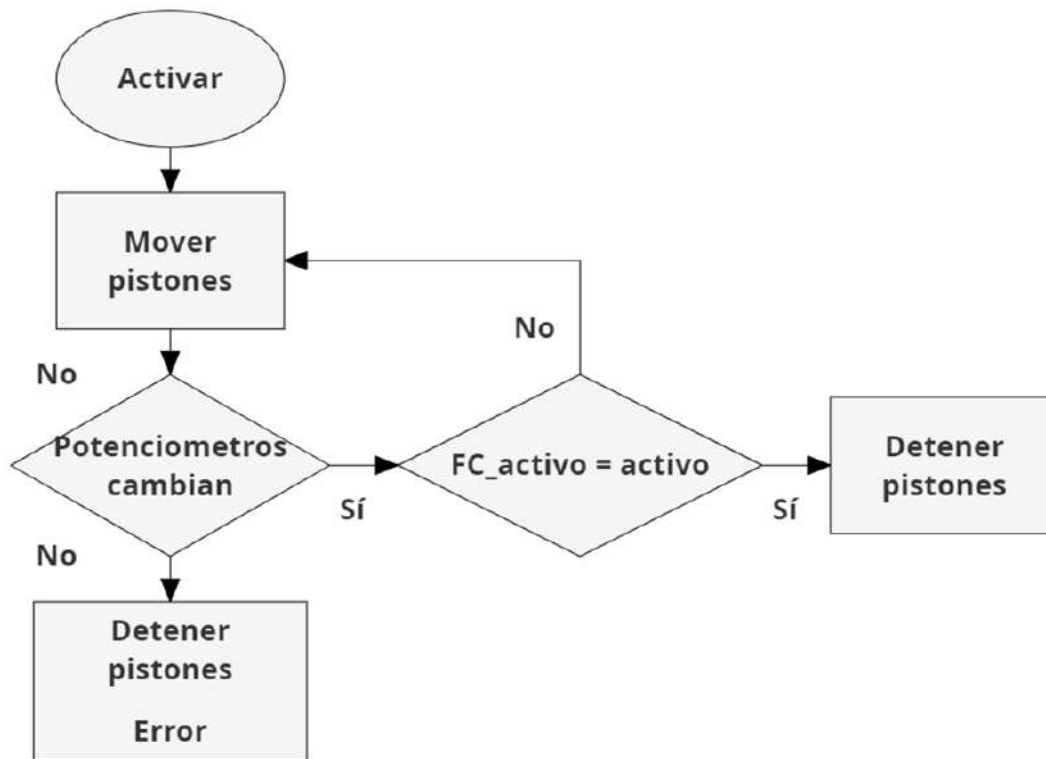


Fig. 10.27: Diagrama de flujo para la activación del sistema

que en el OAN-SPM lo utilizan para el control de otros dispositivos y se comunican con ellos a través de una red tipo LAN.

En la figura 10.25 se visualiza el diagrama que representa las entradas y las salidas para el controlador. Como se observa, existen múltiples entradas para tener un control preciso del estado de los componentes. Además, en cuanto a las salidas son menos que las entradas, esto porque se requieren más entradas para realizar un control apropiado (caso específico del presente proyecto), y los actuadores a controlar son los solenoides para la fijación del acople, los pistones y los motores del ajuste fino.

Software

Se utilizó el software Python con las bibliotecas optimizadas para el Beaglebone Black y de este modo agilizar el tiempo utilizado para la programación del código. La lógica utilizada para la

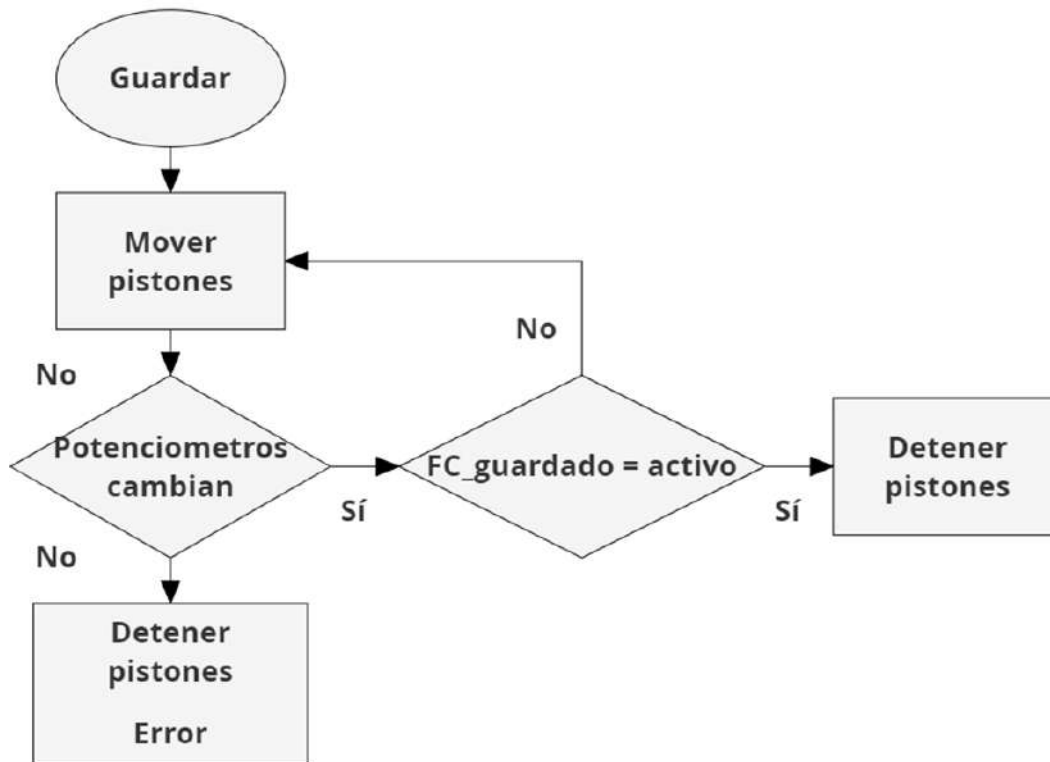


Fig. 10.28: Diagrama de flujo para guardar el sistema

programación del acople se explicará a continuación.

En la figura 10.26 se presenta el diagrama de flujo requerido para el control general de las acciones del acople. En primer instancia, al inicio del programa se disponen a todos los controladores de motores que se mantenga frenados para así no accionar ningún actuador y evitar algún daño sobre el sistema. Posteriormente, se verifica los estados de todos los sensores de final de carrera, con esto se evalúa la situación en la que se encuentra y se determina la acción a tomar. Si ambos sensores están activos es una condición no esperada ni normal, por lo que se envía el mensaje de error y no se permite realizar ninguna acción. Si ambos sensores se encuentran desactivados, es porque existió un error durante la activación o desactivación del acople, por lo que se muestra el informe del error pero se le permite activarlo o guardarlo para que se coloque en un estado seguro el sistema. En caso de que solo el sensor final de carrera para la posición de guardado se encuentre activo entonces se permite activar el sistema; por el contrario si es el sensor de final de carrera del sistema activo el que se encuentra presionado, se permite guardar el sistema pero también se

que se activan los pistones, pues estos ahora se deben de extender, y de los sensores que dan la parada al movimiento de los pistones, pues en este caso es el sensor de final de carrera guardado el que determina el momento en que el sistema ha llegado al final.

En la figura 10.29 se muestra el diagrama de flujo utilizado para la programación del ajuste fino del espejo terciario. Se observa que lo primero que se comprueba es si se encuentra calibrado el sistema, la calibración es la determinación del punto mínimo al que puede llegar el tornillo de ajuste fino por medio del final de carrera de ajuste fino para cada estación. Si no se ha realizado la calibración se procede a calibrar el sistema, la forma de hacerlo es activando los tres servomotores en retroceso hasta que cada sensor final de carrera correspondiente se active, por lo que se detiene el servomotor que le corresponde y se espera hasta que las tres estaciones estén calibradas.

Cuando el sistema se ha calibrado, se puede disponer de la acción de ajuste fino. Como se muestra en la figura 10.29, se consulta al usuario el motor que desea mover y la cantidad de pasos (cada paso equivale a 670 nm), posteriormente se verifica si se sobrepasan en cuanto a la tensión máxima y mínima que se le puede aplicar a cada estación de ajuste fino, en caso de sobrepasarse no se permite el movimiento y se indica el error, si no se sobrepasa se mueven los motores la cantidad de pasos indicados. Durante el movimiento del ajuste fino se verifica constantemente si se llegó al valor requerido, si no se ha llegado se continúa con el movimiento, si se ha alcanzado se detiene el motor.

En el apéndice A se puede observar el código que se realizó para el control en el lenguaje Python.

En el apéndice B se pueden observar las capturas de pantalla que se le realizó a la interfaz de usuario del software de control del acople del foco Nasmyth para el telescopio de 2,1 m del OAN-SPM.

Capítulo 11

Validación del diseño

11.1 Introducción

A continuación se muestra cómo se validó el diseño del acople para el foco Nasmyth del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM. Se describe cuáles fueron los procedimientos y tareas realizadas para determinar si cada sistema diseñado (mecánico, electromecánico y de control) son funcionales y cumplen con los requerimientos solicitados.

11.2 Validación de las deformaciones de la estructura

Para la validación de la estructura (sección 10.4.1), se realizaron simulaciones con el software Solidworks a cada elemento de interés. Se inicia identificando cuáles son las cargas a las que los elementos estarán sometidos, se identifica que la carga principal es el peso del espejo terciario, el cual se obtiene con la información que brinda el mismo software. La masa del espejo es aproximadamente de 1,735 kg, por lo que su peso se aproxima en 17 N.

Con ese valor conocido se realizan las simulaciones al soporte del espejo terciario para verificar las

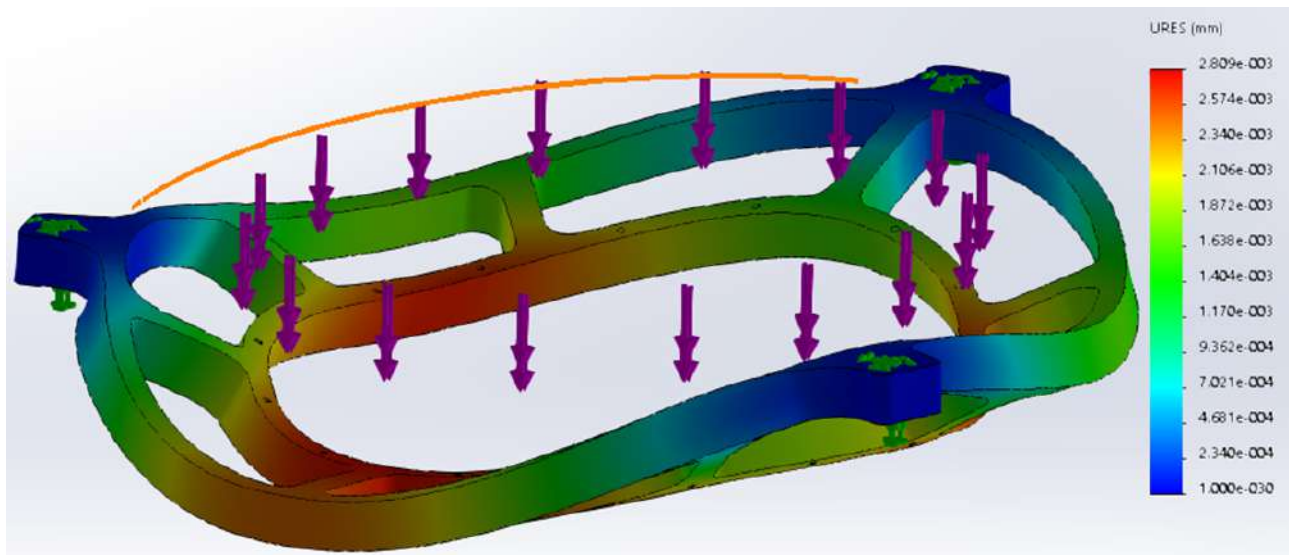


Fig. 11.1: Deformación del soporte del espejo terciario debido al peso del mismo con dirección perpendicular al elemento

deformaciones que tendría el elemento y verificar si se encontraban dentro de los requerimientos, además de obtener el factor de seguridad, ya que aunque no se encuentre en los requerimientos, el material no debe sobrepasar su límite elástico. El estudio se realizó por medio de elementos finitos; mallado para todas las simulaciones utilizaba la menor distancia entre elementos de 0,1 mm y la máxima de 1 mm.

En la figura 11.1 se observa la deformación que sufre el soporte del espejo al estar sometido al peso del espejo terciario, aplicado en sentido perpendicular al elemento (sentido de las flechas púrpura), para efectos prácticos se le llamará horizontal. El material es aleación de aluminio 1060 y las restricciones de movimiento son en las secciones con flecha de color verde, en la que se restringe por completo cualquier movimiento.

La deformación de la figura 11.1 se encuentra aumentada aproximadamente en 19500 veces, esto para que sea notorio el desplazamiento del material, ya que si fuera el desplazamiento real no sería visible para quien realiza el análisis. A la derecha de la figura se ve la escala URES en colores de la deformación en unidades de mm, la escala URES es el desplazamiento unitario con respecto a la posición original. Se identifica que la deformación máxima para esta orientación de la fuerza es

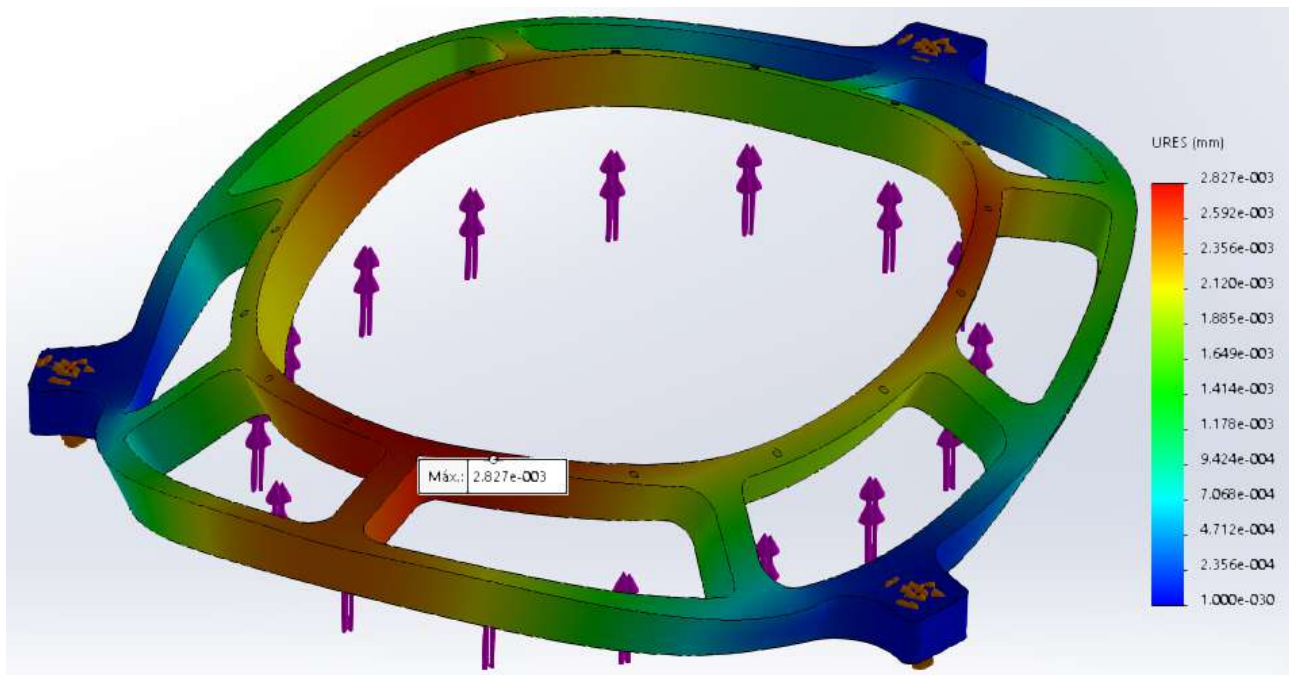


Fig. 11.2: Deformación del soporte del espejo terciario debido al peso del mismo con dirección perpendicular al elemento

de $2,809 \mu\text{m}$, pero no se utiliza el valor máximo sino un promedio del valor mínimo y máximo de la deformación de la zona que está en contacto con el vidrio, con esto no se busca tener un valor que dé como resultado una deformación pequeña pues se estaría dando un sesgo en el análisis, por el contrario se busca un valor acercado a la realidad, pues el mismo vidrio le posee una rigidez que restringiría al elemento simulado a deformarse de tal manera como la mostrada en la figura 11.1. El valor promedio de la deformación es de $2,0025 \mu\text{m}$.

Se realizó el mismo procedimiento para el mismo elemento pero con la dirección de la fuerza en sentido opuesto al anterior, para efectos prácticos se le llamará horizontal invertido. Se observa en la figura 11.2 que los resultados son muy similares, sin embargo no iguales, esto se puede deber al hecho de que la posición en la que están los agujeros para los tornillos de los anillos que comprime el espejo terciario no es igual en ambas caras, por lo que esto puede ser el motivo por el cual no se obtenga el mismo valor que en la simulación de la figura 11.1. Aplicando el mismo procedimiento que en la simulación anterior, se obtiene el promedio de la deformación, siendo para este caso de $1,9895 \mu\text{m}$.

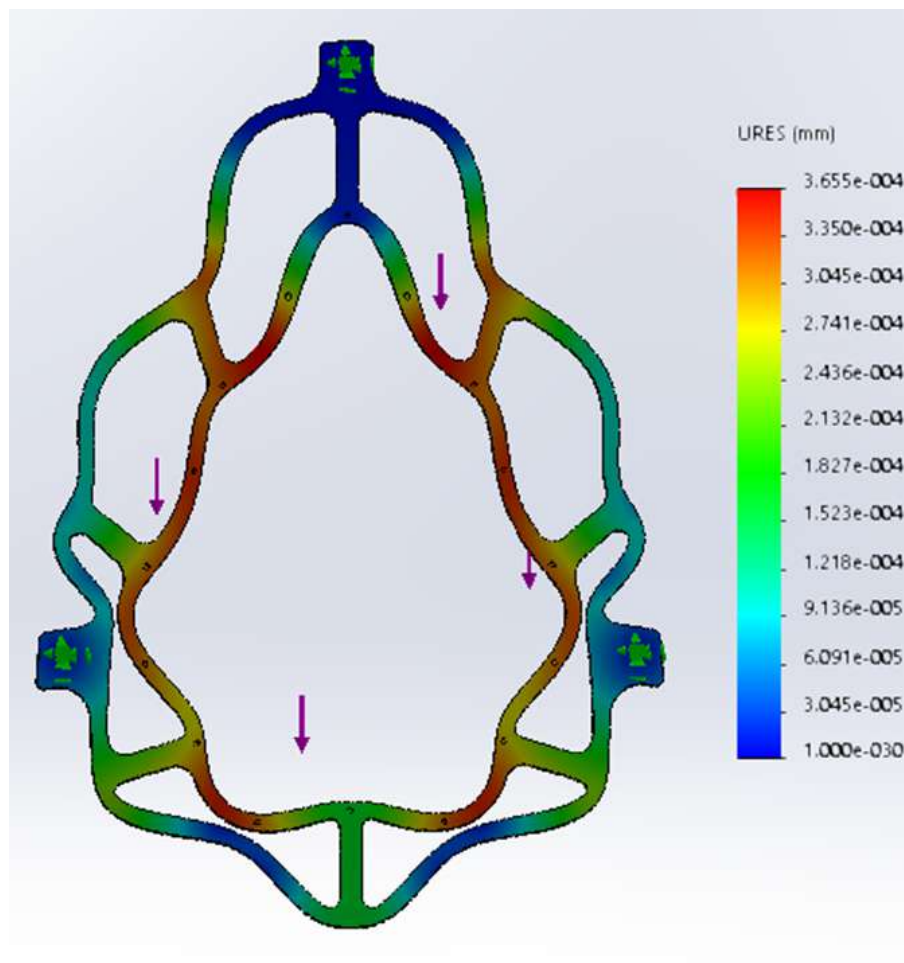


Fig. 11.3: Deformación del soporte del espejo terciario debido al peso del mismo con dirección paralela vertical al elemento

Posteriormente se realizó la simulación para otra orientación de la fuerza, dicha orientación es la que se muestra en la figura 11.3, para efectos prácticos se le llamará vertical. La deformación que se le produce al elemento que soporta el espejo terciario posee una forma distinta a las anteriores, esto por la geometría de la pieza. La máxima deformación que se obtiene es de $0,3655 \mu\text{m}$, muy baja en comparación con las otras obtenidas. La deformación media es $0,24365 \mu\text{m}$.

Se continúa con el estudio para este elemento y se realiza una última simulación para poseer información de cuatro inclinaciones posibles, de este modo se puede obtener un dato más preciso con respecto a las deformaciones del soporte para el espejo terciario. La orientación para la cual se hizo esta última simulación es la que se observa en la figura 11.4, a la cual se le llamará vertical

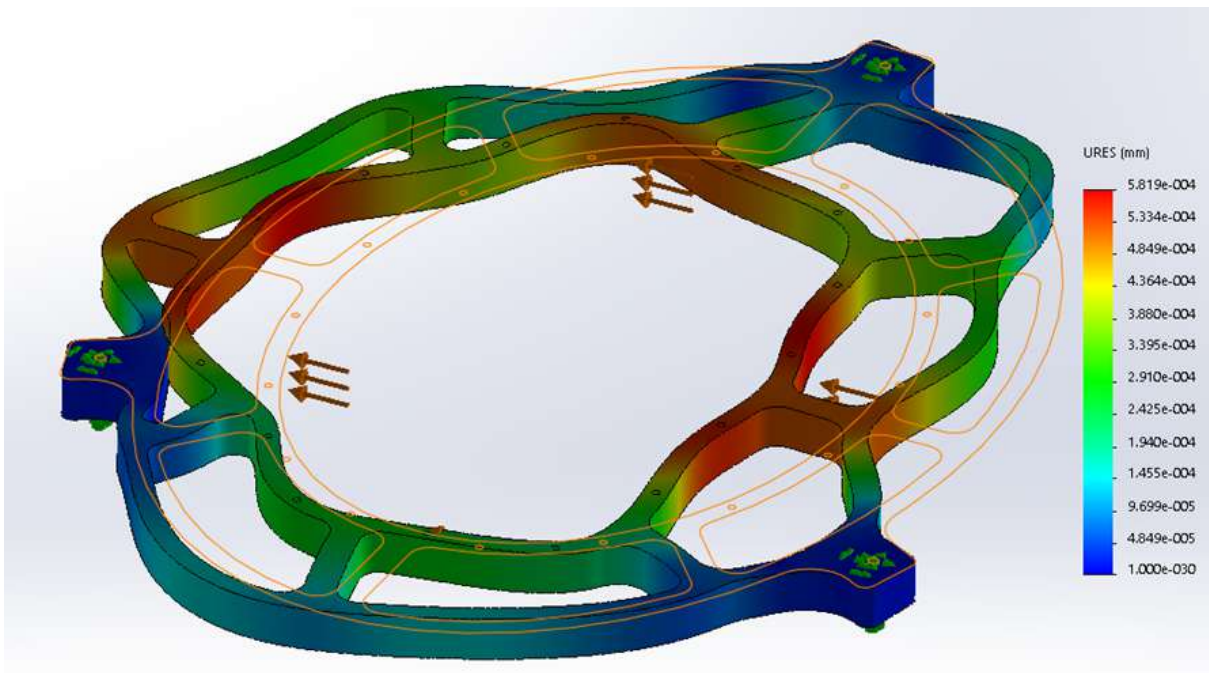


Fig. 11.4: Deformación del soporte del espejo terciario debido al peso del mismo con dirección paralela vertical inclinada al elemento

inclinada para efectos prácticos. Para esta última simulación, se obtuvo un valor medio de $0,4122 \mu\text{m}$. En la figura se aprecia formada por una línea anaranjada la forma original del elemento, sin embargo se aumenta la percepción de la deformación para que se pueda identificar fácilmente.

Se realizan las mismas simulaciones para todos los elementos que afectan la posición del espejo terciario, en la tabla 11.1 se muestran los valores y además se incluye el factor de seguridad mínimo obtenido gracias al software Solidworks.

En la tabla 11.1 se observa que el valor máximo del desplazamiento que repercute en el espejo es de $51,3025 \mu\text{m}$, lo implica que la imagen se desplace $0,67''$. Según los requerimientos el sistema no se puede mover más de $1''$ durante su operación, por lo que se están dentro del rango aceptable para la operación del foco Nasmyth.

Por otro lado, se verifica que el factor de seguridad total del sistema es de 4,3.

Tabla 11.1: Valores de los desplazamientos y factor de seguridad mínimo (FS) para los elementos de interés a diferentes orientaciones

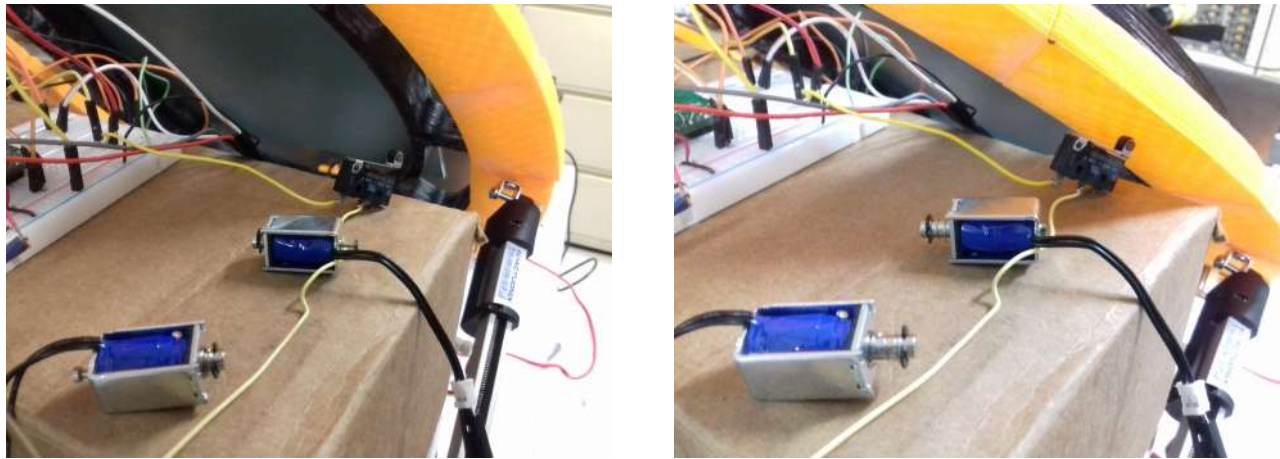
Elemento	Desplazamiento [μm]				FS
	Horizontal	Horizontal invertido	Vertical	Vertical inclinada	
Vidrio	-5,17	-	-	-	-
Anillo superior soporte espejo	-	0,1695	-	-	45
Anillo inferior soporte espejo	0,1344	-	-	-	41
Soporte radial espejo	2,0025	1,9895	0,2437	0,4122	25
Soporte inferior rigido principal	5,1300	5,1300	5,1300	5,1300	7,9
Soporte cierre extremo superior	0,1245	0,4180	0,4180	0,3775	6,8
Acople pivote anillo	5,5525	5,5525	0,7924	0,3483	4,3
Perno ajuste fino	0,9689	0,9689	44,1500	44,1500	8,2
Soporte pivote deflector	0,4607	0,4607	0,4607	0,8845	33
Total para la orientación	19,5435	14,5890	51,1946	51,3025	-

11.3 Validación de la funcionalidad del control

Para la verificación de que el control realizado responde antes las entradas del sistema de forma correcta, se realizó un circuito electrónico que permitía al Beaglebone Black enviar y recibir las señales para el control de los actuadores.

En la imagen 11.5 se observa una de la serie de pruebas que se le realizaron al sistema de control. La prueba consistió en poner en operación el prototipo del acople construido, por lo que se activaron los pistones para poner al acople en estado activo. Como se observa en la figura 11.5a, mientras el sistema se está movilizand los solenoides se encuentran retraídos para permitir el libre movimiento del terciario. Posteriormente, cuando se da el contacto con el final de carrera, el controlador detiene los pistones y libera los solenoides, tal cual se observa en la figura 11.5b. Este comportamiento del sistema es justo el que se había diseñado en la sección 10.4.3.

Se comprobó que todo el control funcionaba como se esperaba, ya que se le realizaron las pruebas correspondientes a todo el sistema: ajuste fino, activación del acople y su correspondiente puesta salida de operación. En el apéndice B se puede verificar la reacción del sistema ante el fallo de un



(a) Acople activándose

(b) Acople activo

Fig. 11.5: Prueba de operación y control

pistón para cuando se está activando o guardando el acople.

11.4 Validación de la repetibilidad del sistema

Como parte de las pruebas para validar el cumplimiento de los requerimientos se construyó un prototipo gracias al apoyo del personal del Instituto de Astronomía, quien puso a disposición una impresora 3D y el material necesario para las impresiones. Como las piezas del acople no se podían construir de manera completa porque su tamaño es mayor a las dimensiones máximas de impresión permitidas por la impresora, se requirió seccionar los elementos en partes más pequeñas. El material utilizado es ABS.

En la figura 11.6 se muestra el prototipo utilizado para las pruebas de validación realizadas en el Laboratorio de Electrónica del Instituto de Astronomía, sede Ensenada. Lo primero que se realizó con el prototipo fue verificar el funcionamiento del control (sección 11.3) y luego se realizaron las pruebas necesarias para obtener la repetibilidad de la entrada y salida de operación.

La prueba consistió en colocar un láser apuntando hacia el espejo plano que se encontraba sobre el acople, para luego ser visualizado el reflejo del rayo en una pantalla (hoja de papel milimétrico).

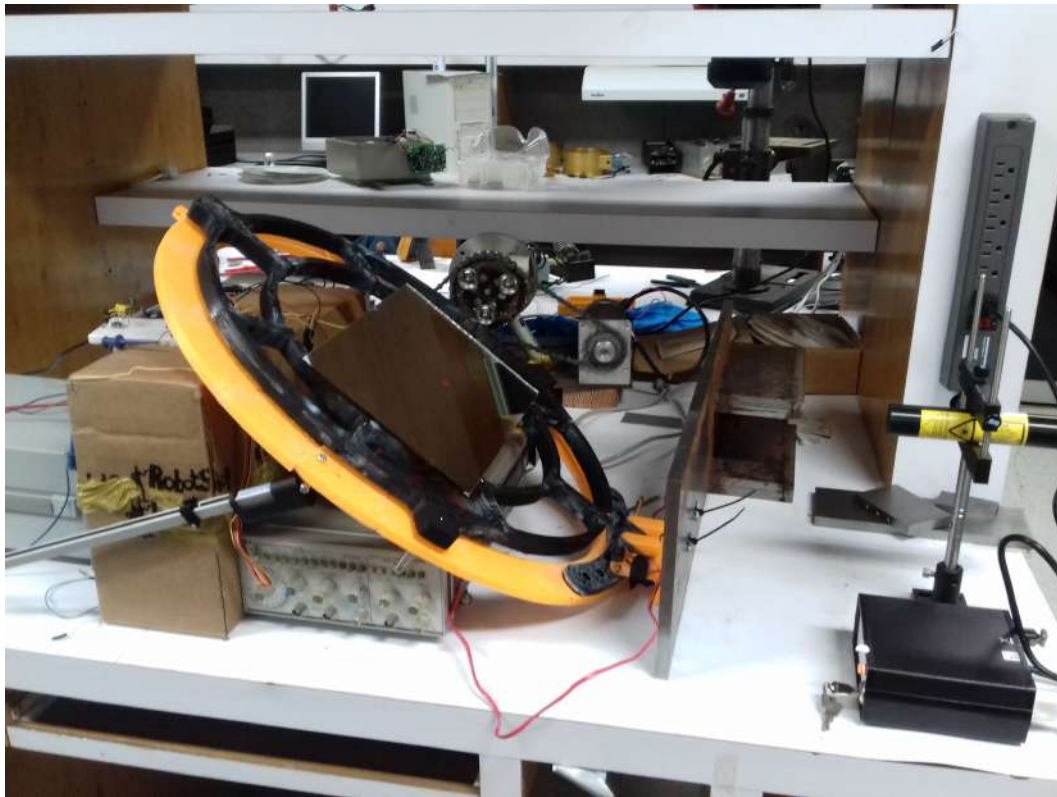


Fig. 11.6: Prototipo impreso en 3D del acople del foco Nasmyth para pruebas de validación

Esto se realizó para 12 entradas y salidas de operación, por lo que se estimó la desviación estándar de la posición del prototipo.

En la figura 11.7 se visualiza la luz del láser sobre el papel milimétrico que fue reflejado por el espejo del prototipo. En la misma figura existe un origen de coordenadas que fueron utilizadas en la misma posición para todas las figuras y así localizar dónde se encontraba la intensidad máxima de la luz. Para tal cometido, se utilizó el software ImageJ, ya que cuenta con herramientas de fácil uso para la tarea que se requería. El procedimiento para todas las imágenes fue el mismo, se obtuvo el valor aproximado del pixel que poseía el máximo de intensidad de luz para cada eje, y se obtuvieron la cantidad de pixeles para 2 cm de distancia desde el origen para cada eje, por lo que se obtuvo el valor en milímetros desde el origen para cada iteración.

En la tabla 11.2 se muestran los valores obtenidos de la posición para cada eje y cada iteración. Por medio del valor de la escala de placa del telescopio se puede pasar de valores de distancia

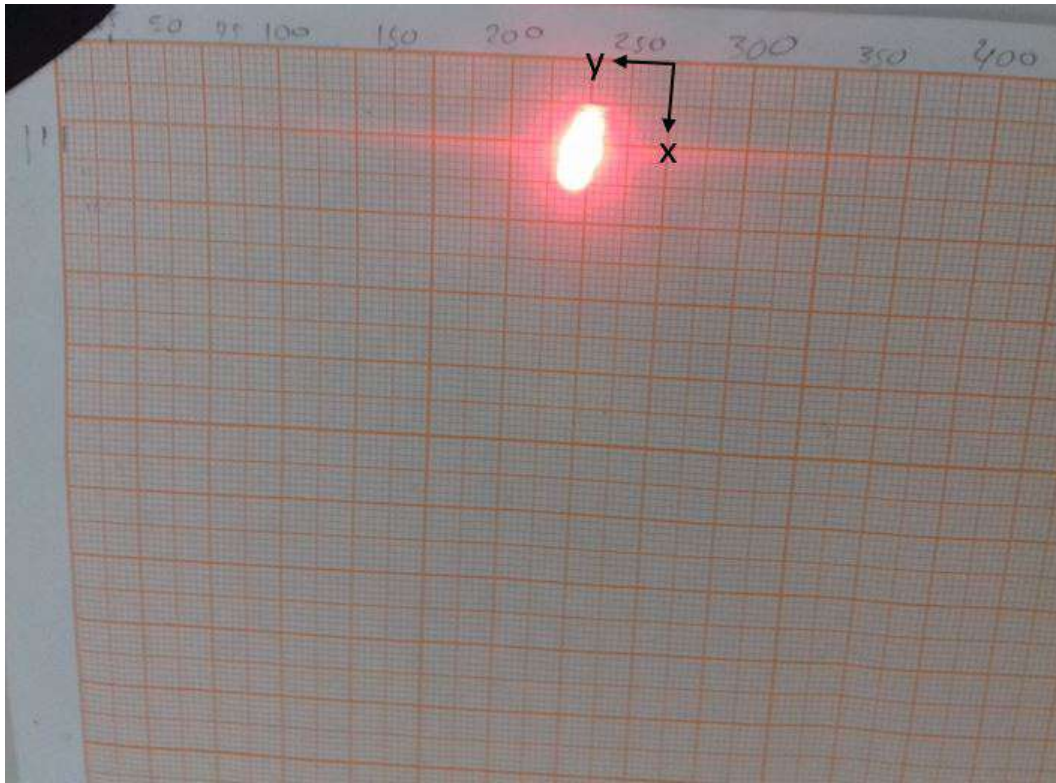


Fig. 11.7: Posición del láser reflejado en pantalla para evaluación de repetibilidad

lineal a distancia angular. Aplicando dicha transformación a los valores obtenidos en la tabla 11.2 y calculando el valor de la desviación estándar, se obtiene para el eje x el valor de 26,78" y para el eje y 42,05", para una desviación estándar radial de 49,85". Si bien el valor se encuentra por encima de los requerimientos, es necesario tener en cuenta que esta repetibilidad es para el prototipo y no para el diseño propuesto, ya que el montaje y los materiales difieren. Por lo que se procedió a obtener un valor aproximado de la repetibilidad para el diseño propuesto por medio del módulo de Young de cada material. Para el aluminio 1060 es de 63 GPa y para el ABS es de 2,2 GPa, ambos datos obtenidos del software Solidworks. El aluminio posee el módulo de Young 28,6 veces mayor que el plástico ABS, por lo que una aproximación del valor de la desviación estándar para el diseño del acople es 28,6 veces menor que el del prototipo impreso en 3D, esto daría como resultado 1,74" radiales para la desviación estándar en la repetibilidad del diseño propuesto.

Verificando con el valor del requerimiento, el sistema se encuentra dentro del valor aceptado ya que se indica que la repetibilidad debe ser menor a 20" y del diseño propuesto se aproxima a

Tabla 11.2: Valores de la posición para cada iteración de la prueba de repetibilidad al prototipo.

Iteración	x [mm]	y [mm]
1	8,9571	13,4429
2	10,9620	11,1416
3	12,0229	8,1204
4	11,3440	9,4156
5	10,9112	10,6610
6	10,3505	11,6078
7	10,9278	10,8465
8	10,1531	11,3636
9	8,5832	14,5525
10	7,8982	15,9244
11	7,0534	16,8737
12	5,7245	17,4664

1,74". Como se comentó en la sección de requerimientos, es importante que el sistema mantenga una repetibilidad alta para poder visualizar un campo constante para cuando se utilice el espejo dicróico, y para los estudios que requieran de la utilización del foco Nasmyth como del Cassegrain de forma simultánea, se pueda visualizar el objeto de interés en ambos detectores.

Capítulo 12

Análisis económico

Para tener un panorama más amplio del beneficio de la implementación del acople para el foco Nasmyth, se realiza un análisis que toma en cuenta el factor económico en cuanto al costo de los componentes, de los materiales para construcción, del tiempo dedicado por parte de los técnicos para la puesta en operación y del ingeniero de diseño (considerado como técnico académico por parte de la UNAM); esto comparado con el tiempo que se le dedica a la puesta y calibración de las cámaras y los filtros dedicados a la fotometría.

Para este año se disponen de 344 días de observación, de los cuales 120 estarán dedicados al uso de imagen directa [36], esto equivaldría a más de 1/3 del tiempo que el telescopio opera al año. Además, para el cambio de instrumento se utilizan 14 días al año [36], esto quiere decir que se acople 14 veces instrumentos para hacer fotometría al año.

Para la realización del cambio mencionado, se requieren de 3 técnicos: un mecánico, un óptico y un electrónico. Se dedican aproximadamente 15 horas para todas las tareas que requiere el montaje y la verificación del instrumento adaptado, por lo que en total serían 45 horas de tiempo de técnico por cada cambio de instrumento, lo cual se traduce en 630 horas de técnico al año utilizadas para los cambios.

El salario mínimo mensual de un técnico académico de la UNAM es de \$20 534,84 (MXN) [37], que equivaldría a \$1082,8 (USD) [38]. Técnico académico es aquella persona contratada para realizar alguna tarea de diseño o técnica, sin importar si el grado académico o la profesión que posea. Si un técnico académico requiere laborar 40 horas semanales, al mes se aproximan 184 horas, por lo que el costo por hora de un técnico que trabaja en el OAN es de aproximadamente \$5,88 (USD). Esto quiere decir que los cambios de las cámaras tienen un costo de \$3704,4 (USD) anuales.

El costo total del acople diseñado se aproxima en \$8821,8 (USD), de los cuales \$1800 (USD) son del costo de los componentes electrónicos y electromecánicos del acople, \$1700 del aluminio y componentes requeridos como tornillos, tuercas, corcho, entre otros; se aproxima que se requieren una semana laboral de técnico mecánico y una semana de técnico electrónico para la construcción del acople, a esto requiere agregarse una semana de trabajo del mecánico, del óptico y del electrónico; lo cual lleva a un total de 5 semanas laborales para la construcción y puesta en operación del acople. 5 semanas de trabajo equivalen a 25 días y a 200 horas laborales, por lo que el costo de la mano de obra en cuanto a la manufactura y la puesta en funcionamiento del acople es aproximadamente de \$1176 (USD). Por otro lado, hay que tomar en consideración el tiempo de diseño que se tomó para el acople del espejo terciario, el cual tuvo una duración de 2 meses, lo que conlleva a que este gasto sea de \$2161,6 (USD), dos salarios mínimos mensuales de un técnico académico. Y ya que se requirió la utilización de software especializado tanto para el dibujo 3D en CAD y de la simulación de los elementos estructurales, se considera \$2014,2 (USD) del alquiler de la licencia de Solidworks [39] con las licencias para simulación [40].

El tiempo de recuperación (sin tomar en cuenta la depreciación de los equipos ni la devaluación de la moneda) es de 2,38 años, que equivalen a dos años y cinco meses. Este valor es una aproximación que se realiza con los datos que se tienen a disposición, y si bien es poco tiempo en el que se recuperaría la inversión para mantener el foco siempre activo con una cámara para la fotometría, lo realmente favorable sería que los estudios científicos serían más versátiles.

Por otro lado, con el foco Nasmyth habilitado se podría dividir el tiempo de observación durante

la noche, por lo que los astrónomos podrían tener acceso al telescopio en menor tiempo que el que tienen que esperar actualmente. Esto haría también que el tiempo efectivo de los investigadores mejore, pues los datos para sus investigaciones los tendrían en menor tiempo.

Capítulo 13

Análisis de los resultados

Con base en las secciones anteriores se realizó un análisis general del proyecto, donde se discute sobre los principales resultados y sus implicaciones.

Existen varios motivos por los que se pierde tiempo de observación con el telescopio de 2,1 m del OAN-SPM, entre ellos es que solo se puede tener un instrumento acoplado a la vez y que solo existe un foco (Cassegrain) en funcionamiento; por lo que observando esta situación se planteó la solución de habilitar el foco Nasmyth que el telescopio tiene disponible por medio del diseño de un acople para un espejo terciario.

Cuando se hizo el reconocimiento de la estructura, además de obtener las mediciones y verificar visualmente que existía la posibilidad de la implementación del foco Nasmyth, se identificaron problemas que afectan directamente al diseño, como lo es la holgura que tiene el deflector. Ya que se propone que el espejo terciario se fije a dicho elemento y se requiere que el espejo terciario no tenga variación de más de 1" cuando esté en operación, no es posible cumplir con tal requerimiento en la condición que se encuentra el deflector. Sin embargo, ya que no estaba dentro de los objetivos la evaluación o rediseño del deflector se prosigue con el proyecto, se asumió que el elemento de sujeción se encontraba fijo para poder satisfacer el objetivo del proyecto.

Previo al diseño se requirió realizar un estudio óptico para verificar los pormenores implicados a la física del foco Nasmyth. Para el cálculo del espejo, del cual partía el resto del análisis, se utilizó un campo más amplio del que las cámaras pueden detectar, con esto se mantienen los cálculos dentro de un margen de seguridad. Para el campo de $6,5'$ se obtiene un tamaño de espejo de 243,60 mm en el eje menor y 344,5 mm en el eje mayor de la elipse; comparativamente contra el tamaño del deflector el tamaño es aceptable según los expertos del OAN. Se buscaron los proveedores para un tamaño de espejo similar y se obtuvo que el grosor de este es de aproximadamente 10 mm, valor necesario para el diseño mecánico.

Continuando con el estudio óptico, se identifica el conflicto con el guiador y el espejo terciario, pues este último obstruye la luz que se requiere para el guiado. Cuando se realizaron los cálculos del decaimiento de luz en el guiador se obtuvo que el brillo de una estrella disminuiría en una magnitud, sin embargo con la prueba realizada se logró identificar que es mucho mayor a ese valor; aunque no se logra determinar exactamente cuánto porque no es posible realizar un análisis fotométrico ya que las imágenes tomadas sin la obstrucción estaban saturadas mientras que las que tenían la obstrucción no, se observa que disminuye en gran medida la luz. Esto se comprueba con que en el eje óptico del telescopio con la obstrucción no se observaba ninguna estrella y sin obstrucción en la interfaz de usuario del guiador se visualizaban cuatro estrellas. Las discrepancias de las observaciones con los cálculos pueden deberse a que los criterios utilizados apliquen solo cerca del eje óptico y para distancias angulares a las que se opera el guiador poseen un error significativo.

Ya que el foco Nasmyth queda dentro de la estructura, se procedió a verificar si con el movimiento del espejo secundario sería conveniente mover dicho foco fuera de la estructura. En primer instancia por las limitaciones de movimiento que tiene el espejo secundario no se logra mover lo suficiente el foco. Segundo, se comprobó la degradación de la calidad de imagen por no encontrarse en el foco óptico y se obtuvo el valor de $2,35''$ el ancho a media altura, este valor comparado con el de $1,5''$ que actualmente posee la configuración Cassegrain es significativo, esto no implica que no se puedan realizar estudios científicos bajo esta resolución, sino que los instrumentos que se

acoplarían al foco deben de tener la disponibilidad de operar con esta calidad de imagen. En vista de lo anterior se tomó la decisión de que el instrumento que va a acoplarse en el foco Nasmyth debe tener el tamaño que le permita instalarse dentro del eje del telescopio.

Con respecto a las vibraciones, cuando el telescopio se encuentra observando un objeto lo hace de manera lenta y sus correcciones son ligeras, por lo que no se toman en cuenta las vibraciones. Sin embargo, en el diseño se le colan 4 puntos de apoyo donde uno de ellos solo permite el movimiento sobre un eje, con esto se restringe el movimiento y las vibraciones del espejo terciario.

Luego de haber concluido con el análisis óptico, se procedió a elaborar los diseños de concepto, en los que se iban perfeccionando y tomando en cuenta las ventajas y desventajas que cada concepto posee. Luego de hacer una evaluación exhaustiva se identifican problemas importantes, tal cual lo posee el sistema Gusano-Corona con las desalineaciones, ya que si esto ocurre el sistema pierde precisión y se produce desgaste acelerado entre los componentes.

Con ayuda de los expertos del OAN, se decidió optar por un diseño que solo permitía aprovechar uno de los dos focos Nasmyth que posee el telescopio, pero que era más simple y ya había sido utilizado en otros proyectos, por lo que eso simplifica su construcción e implementación.

El sistema diseñado permite salir y entrar en operación de manera automática. Además, cuando no se encuentra activo no interfiere con el foco Cassegrain. A pesar de que cuando el dispositivo esté guardado partes del mismo queden fuera de la estructura del deflector del espejo primario, no interfiere en el mismo ya que el deflector del espejo secundario es más grande, por lo que el acople queda dentro de la sombra del deflector del secundario.

Gracias a los actuadores y al diseño electromecánico, el espejo terciario tiene no solo la capacidad de ponerse en operación, sino también puede realizar las correcciones necesarias para mantenerse orientado de la mejor manera al instrumento científico. Con el ajuste fino se obtienen correcciones menores al tamaño de un pixel en las cámaras, lo cual ayuda a realizar correcciones precisas y alcanzar la misma calidad de imagen que posee la configuración Cassegrain.

Con respecto al control realizado, no solo se obtuvo que actuara como se esperaba, sino que gracias a la integración de los elementos se logra resguardar la integridad de todos los elementos; en el caso de los pistones si uno falla el otro se detiene y en cuanto al ajuste fino se requiere de una calibración para tener control sobre la tensión en el tornillo para dicho ajuste.

Por otro lado, se comprueba por medio de simulaciones en el software Solidworks que el prototipo cumple con los requerimientos establecidos.

En cuanto a la repetibilidad, por medio de las pruebas realizadas al prototipo construido se obtiene el valor de la desviación estándar, que luego es extrapolado gracias a las características mecánicas, y se verifica que el acople propuesto se encuentra dentro del rango de aceptación de los requerimientos.

El acople del espejo terciario fue diseñado para ser construido en los talleres mecánicos del ONA, y todos los elementos se puede construir ya que las dimensiones máximas que pueden ser trabajadas por la fresadora automatizada son de 40x76 cm sobre su base.

Para prever que no existan grandes holguras que provoquen desalineaciones, el ajuste entre piezas en contacto deben ser H6, con esto se consigue un ajuste con una holgura aceptable. Otro parámetro que podría desalinearse el espejo terciario son los cambios de temperatura, sin embargo el ajuste fino está diseñado para que sea capaz de corregir estos errores.

Capítulo 14

Conclusión

A continuación se presentan las conclusiones que se obtienen con el trabajo que se ha realizado.

- Se diseñó el sistema mecánico del acople que le permite entrar y salir de operación al foco tipo Nasmyth del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM, mediante el movimiento de un espejo terciario con un error durante la operación de $0,67''$.
- Se diseñó el sistema electromecánico que le permite el movimiento al acople mecánico para entrar y salir de operación al espejo terciario del foco tipo Nasmyth del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM con un error de repetibilidad de $1,74''$.
- Se diseñó el sistema de control del acople del foco Nasmyth adaptable al sistema de control del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM, con elementos que son conocidos por los instrumentistas del OAN-SPM y resguardando la integridad del espejo terciario por medio de algoritmos que verifican el correcto funcionamiento del acople.
- Se validó el diseño propuesto que cumple con los requerimientos establecidos por los instrumentistas del OAN por medio de simulaciones para los elementos mecánicos, y por medio de la construcción de un prototipo impreso en 3D se verificó la repetibilidad y el control.

- Se realizó un estudio óptico para la comprobación de la calidad de imagen y se determinó que no existe ninguna afectación a la misma.
- No se inhabilita la utilización del guiador pero se limita su uso por la obstrucción del espejo terciario.
- La implementación del acople diseñado es económicamente viable ya que se recupera la inversión en dos años y cinco meses.
- La implementación del foco Nasmyth colabora en la minimización del problema planteado ya que el tiempo para el cambio de instrumento para imagen directa se aprovecharía en observación.

Capítulo 15

Recomendaciones

Durante la elaboración del proyecto se observaron problemas y situaciones en los que existe oportunidad de mejora, por lo que se enlistan a continuación.

- Realizar un estudio para verificar si el diseño propuesto puede ser utilizado para otros casos científicos.
- Caracterizar el acople con respecto a los cambios de temperatura, para evaluar posibilidad de correcciones con el ajuste fino.
- Caracterizar el funcionamiento de cada pistón para suplir la potencia idónea a cada uno y asegurar la integridad del acople.
- Dibujar por medio de un software CAD el telescopio de 2,1 m del ONA-SPM para facilitar el diseño de actualizaciones al telescopio.
- Capturar toda la luz del telescopio con el espejo terciario para ser utilizada en el foco Nasmyth, de requerirse un guiado preciso el instrumento que se coloque en dicho foco podría contar con su propio guiador.

Capítulo 16

Trabajo futuro

A continuación se muestra el trabajo que se recomienda desarrollar a futuro para la correcta implementación del acople diseñado.

- Rediseñar el deflector del espejo primario, donde por medio de un estudio óptico y un estudio mecánico se verifique la correcta operación de dicho elemento.
- Rediseño del acople propuesto para el aprovechamiento de los dos focos Nasmyth del telescopio de 2,1 m del OAN-SPM.

Referencias

- [1] "INICIO", Astrossp.unam.mx, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.astrossp.unam.mx/oanspm/index.php>. [Accedido: 08-Dic-2017].
- [2] B. Pichardo, "Inicio", Astroscu.unam.mx, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.astroscu.unam.mx/taos/index.php/en/>. [Accedido: 8-dic-2017].
- [3] J. De la Herrán, "The Mexican 2.12-m telescope for the National Astronomical Observatory at San Pedro Martir, Baja California, Mexico", *Recent Advances in Observational Astronomy*, pp. 133-139, 1981.
- [4] "1200px-Ritchey-Chretien-Cassegrain-Teleskop", [wikimedia.org](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/36/Ritchey-Chretien-Cassegrain-Teleskop.svg/1200px-Ritchey-Chretien-Cassegrain-Teleskop.svg.png), 2018. [En línea]. Disponible en: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/36/Ritchey-Chretien-Cassegrain-Teleskop.svg/1200px-Ritchey-Chretien-Cassegrain-Teleskop.svg.png>. [Accedido: 14-may-2018].
- [5] "1200px-Nasmyth-Telescope", [wikimedia.org](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cd/Nasmyth-Telescope.svg/1200px-Nasmyth-Telescope.svg.png), 2017. [En línea]. Disponible en: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cd/Nasmyth-Telescope.svg/1200px-Nasmyth-Telescope.svg.png>. [Accedido: 8-dic-2017].
- [6] Forbes, G. (1909). *History of astronomy*. 1st ed.
- [7] Rutten, H., Berry, R., Lucas, D. and Venrooij, M. (1989). *Telescope optics*. Richmond, Virginia, United States of America: Willman-Bell.

- [8] "1200px-Newtonian-telescope", wikimedia.org, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a6/Newtonian-telescope.svg/1200px-Newtonian-telescope.svg.png> [Accedido: 15-may-2018].
- [9] E. Hecht, V. Latorre, D. Malacara, F. Veas and A. Zajac, *Optica*. Wilmington(Delaware): Addison-Wesley Iberoamericana, 1986.
- [10] "espejos-para-telescopios-D_NQ_NP_727355-MCO27485770628_062018-F", mlstatic.com, 2018. [En línea]. Disponible en: https://http2.mlstatic.com/eespejos-para-telescopios-D_NQ_NP_727355-MCO27485770628_062018-F.webp. [Accedido: 23-ago-2018].
- [11] "Telescopio de 2.1metros", astrossp.unam.mx, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.astrossp.unam.mx/sectec/web/telescopios/2mt.html>. [Accedido: 24-ago-2018].
- [12] G. Sierra, S. Zazueta, E. Luna, J. Valdes, B. García, B. Martínez, L. Gutiérrez, J. Murillo and F. Quiros, *El Nuevo Guiador Excéntrico del 2.1 m del OAN en SPM*. Ensenada, BC, México, 2004.
- [13] "Espectrógrafo Boller y Chivens", astrossp.unam.mx, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.astrossp.unam.mx/oanspm/index.php?option=com_content&view=article&id=24&Itemid=32. [Accedido: 11-ago-2018].
- [14] "Las curvas de transmisión para los filtros BG39, GG455 y RG630", astrossp.unam.mx, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.astrossp.unam.mx/sectec/web/instrumentos/bchivens/filtros/filtros_nuevo.htm [Accedido: 11-ago-2018].
- [15] "Espectrógrafo B&Ch: OAN-SPM", astrossp.unam.mx, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.astrossp.unam.mx/sectec/web/instrumentos/bchivens/otrosbc.html>. [Accedido: 11-ago-2018].

- [16] "MezcalMan", [astrossp.unam.mx](http://www.astrossp.unam.mx), 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.astrossp.unam.mx/sectec/web/instrumentos/mezcal/jal/MezcalMan.pdf>. [Accedido: 11-ago-2018].
- [17] "MES-SPM focus and focussing", [astrossp.unam.mx](http://www.astrossp.unam.mx), 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.astrossp.unam.mx/sectec/web/instrumentos/mezcal/focus/mes_focus.espanol.htm. [Accedido: 11-ago-2018].
- [18] "Página del Observatorio Astronómico Nacional", [astrossp.unam.mx](http://www.astrossp.unam.mx), 2018. [En línea]. Disponible en: <http://132.248.4.250/sectec/web/instrumentos/ccds/ccds.html>. [Accedido: 20-ago-2018].
- [19] "Microsoft Word - italiana.doc", [astrossp.unam.mx](http://www.astrossp.unam.mx), 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.astrossp.unam.mx/sectec/web/instrumentos/italiana/man_italiana2006.pdf. [Accedido: 12-ago-2018].
- [20] "W. M. Keck Observatory - W. M. Keck Observatory", [keckobservatory.org](http://www.keckobservatory.org), 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.keckobservatory.org/about/keck-observatory/>. [Accedido: 03-ago-2018].
- [21] J. Nelson, T. Mast, Construction of the Keck Observatory. Garching, Alemania. 1988.
- [22] "Mercator Telescope", [mercator.iac.es](http://www.mercator.iac.es), 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.mercator.iac.es/instruments/telescope/>. [Accedido: 28-jul-2018]
- [23] G. Raskin, R. Dubosson, B. Michaud, W. Pessemier, H. V. Winckel, A new Nasmyth mirror mechanism increases the number of focal stations of the Mercator Telescope. Amsterdam, Netherlands, 2012.
- [24] M. Nuñez Alfonso, "Consulta sobre Proyecto de Graduación y petición", 2018.
- [25] "Full Width Half Maximum (FWHM) - National Schools' Observatory", [schoolsobservatory.org](http://www.schoolsobservatory.org), 2018. [En línea]. Disponible en:

- <https://www.schoolsobservatory.org/discover/projects/clusters/fwhm>. [Accedido: 23-jun-2018]
- [26] "Error cuadrático medio", ub.edu, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.ub.edu/stat/GrupsInnovacio/Statmedia/demo/Temas/Capitulo7/B0C7m1t7.htm>. [Accedido: 23-jun-2018]
- [27] D.L Fried, Statistics of a Geometric Representation of Wavefront Distortion. Washington, USA, 1965.
- [28] "Uxcell a14052300ux1099 DC 24V 0.3A 20 mm 3.5 lb. Push Pull Type Tubular Solenoid, Electromagnet: Amazon.com.mx: Amazon EE.UU", amazon.com.mx, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.com.mx/Uxcell-a14052300ux1099-Tubular-Solenoid-Electromagnet/dp/B00PZNY7OC>. [Accedido: 28-jun-2018]
- [29] "Pololu - Glideforce LACT12P-12V-20 Light-Duty Linear Actuator with Feedback: 50kgf, 12" Stroke, 0.57"/s, 12V" ", pololu.com, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.pololu.com/product/2313>. [Accedido: 28-jun-2018]
- [30] "Pololu - VNH5019 Motor Driver Carrier", pololu.com, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.pololu.com/product/1451>. [Accedido: 28-jun-2018]
- [31] "Belleville Washers", bellevillesprings.com, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.bellevillesprings.com/belleville-washers.html>. [Accedido: 29-jun-2018]
- [32] "AJS100-0.5H-NL", newport.com, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.newport.com/p/AJS100-0.5H-NL>. [Accedido: 30-jun-2018]
- [33] "Pololu - 1000:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 12V with Extended Motor Shaft", pololu.com, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.pololu.com/product/3057>. [Accedido: 30-jun-2018]

- [34] "Pololu - Magnetic Encoder Pair Kit for Micro Metal Gearmotors, 12 CPR, 2.7-18V (HPCB compatible)", pololu.com, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.pololu.com/product/3081>. [Accedido: 30-jun-2018]
- [35] "BeagleBoard.org - Black", beagleboard.org, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://beagleboard.org/black>. [Accedido: 16-jul-2018]
- [36] "Calendario 2018 - Depto. de Astronomía Observacional IA-UNAM", astro.unam.mx, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://catt.astro.unam.mx/calendario-2018a>. [Accedido: 28-ago-2018]
- [37] "TabAcadFeb2017_Ent(1).xls", astro.unam.mx, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.plataformatransparencia.unam.mx/archivos/repositorio/UNAM/2017/percepciones/peraca.ppt>. [Accedido: 28-ago-2018]
- [38] "XE: Convert MXN/USD. Mexico Peso to United States Dollar", xe.com, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.xe.com/currencyconverter/convert/?Amount=20534.84&From=MXN&To=USD>. [Accedido: 28-ago-2018]
- [39] "SOLIDWORKS Standard (Alquiler 3 meses) — CIMWORKS", cimworks.es, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.cimworks.es/producto/solidworks-standard/>. [Accedido: 28-ago-2018]
- [40] "SOLIDWORKS Simulation Standard (Alquiler 3 meses) — CIMWORKS", cimworks.es, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.cimworks.es/producto/solidworks-simulation-standard-alquiler-3-meses/>. [Accedido: 28-ago-2018]

Appendices

Apéndice A

Código realizado en Python para el control del acople

```
import sys
import os
from time import sleep, time
from bbio import *
from bbio.libraries.RotaryEncoder import RotaryEncoder

encoder1 = RotaryEncoder(RotaryEncoder.EQEP0)
encoder2 = RotaryEncoder(RotaryEncoder.EQEP1)
encoder3 = RotaryEncoder(RotaryEncoder.EQEP2)

#Pines de salida de los motores

motor1_A = GPIO0_26
motor1_B = GPIO1_14
```

motor1_PWM = GPIO2_1

motor2_A = GPIO2_24

motor2_B = GPIO2_25

motor2_PWM = GPIO0_11

motor3_A = GPIO2_17

motor3_B = GPIO2_16

motor3_PWM = GPIO2_15

#Pines de salida de los pistones

piston1_A = GPIO1_28

piston1_B = GPIO1_18

piston1_PWM = PWM1B

piston2_A = GPIO1_15

piston2_B = GPIO0_27

piston2_PWM = PWM2A

#Pines entrada de los finales de carrera

fc_motor1 = GPIO0_30

fc_motor2 = GPIO0_31

fc_motor3 = GPIO0_5

fc_guardado = GPIO2_22

```
fc_operacion = GPIO2_23

#Pines salida de los selenoides
sele_guardado = GPIO2_8
sele_acoplado = GPIO2_6

#Pines entrada analogica de los pistones
pot_piston1 = AIN1
pot_piston2 = AIN2

#Variable para calibracion de motores
global motores_calibrados

#PWM para pistones
PWM_pistones = 255

def setup():

    #Se configura encoders como absolutos
    encoder1.setAbsolute()
    encoder2.setAbsolute()
    encoder3.setAbsolute()

    #Se ponen en 0 los valores de
    encoder1.zero()
    encoder2.zero()
    encoder3.zero()
```

#Entradas de finales de carrera para el ajuste fino

pinMode(fc_motor1 , INPUT) *#Motor 1*

pinMode(fc_motor2 , INPUT) *#Motor 2*

pinMode(fc_motor3 , INPUT) *#Motor 3*

#Salida drivers para control fino(direccion A, direccion B,Potencia)

#Motor 1

pinMode(motor1_A , OUTPUT)

pinMode(motor1_B , OUTPUT)

pinMode(motor1_PWM, OUTPUT)

#Motor 2

pinMode(motor2_A , OUTPUT)

pinMode(motor2_B , OUTPUT)

pinMode(motor2_PWM, OUTPUT)

#Motor 3

pinMode(motor3_A , OUTPUT)

pinMode(motor3_B , OUTPUT)

pinMode(motor3_PWM, OUTPUT)

#Entradas de finales de carrera para puesta en operacion

pinMode(fc_guardado , INPUT) *#Guardado*

pinMode(fc_operacion , INPUT) *#Operacion*

#Salida drivers para puesta en operacion(direccion A,direccionB)

#Piston 1

pinMode(piston1_A , OUTPUT)

```
pinMode(piston1_B , OUTPUT)
#Piston 2
pinMode(piston2_A , OUTPUT)
pinMode(piston2_B , OUTPUT)

#Salida hacia solenoides
pinMode(sele_guardado , OUTPUT)
pinMode(sele_acoplado , OUTPUT)

#Se frenan los motores
frenar_motor1 ()
frenar_motor2 ()
frenar_motor3 ()

#Se frenan los pistones
frenar_pistones ()

#Mantener solenoides desactivados
digitalWrite(sele_guardado , LOW)
digitalWrite(sele_acoplado , LOW)

#Se define que los motores de ajuste fino no estan calibrados
global motores_calibrados
motores_calibrados = False          ###ES FALSE

def loop ():
```

```
global motores_calibrados
```

```
while True:
```

```
    os.system('clear')
```

```
    if ((digitalRead(fc_guardado)==LOW)and(digitalRead(fc_operacion)==LOW)):
```

```
        print("Los limit switches ( finales de carrera ) no estan activos ,  

        .....podria deberse a que el sistema no se activara o guardara  

        .....correctamente.\n")
```

```
        print("De aviso al personal del telescopio.\n")
```

```
        print("Se recomienda que se guarde el acople del foco Nasmyth.\n")
```

```
        print(" Si desea guardarlo digite : guardar\n")
```

```
        print(" Si desea activar digite : activar\n")
```

```
        print(" Si desea refrescar el menu digite : refrescar\n")
```

```
        opcion = raw_input("Que desea hacer? ")
```

```
        if (opcion == 'guardar'):
```

```
            guardar_acople()
```

```
        elif (opcion == 'activar'):
```

```
            activar_acople()
```

```
    elif((digitalRead(fc_guardado)==HIGH)and(digitalRead(fc_operacion)==HIGH)):
```

```
        print("Los limit switches ( finales de carrera ) estan activos , esta  

        .....condicion requiere de revision inmediata.\n")
```

```
        print("De aviso al personal del telescopio.\n")
```

```
        print("No se permite realizar ninguna accion hasta que el acople
```

```
        salga_de_esta_condicion.\n")
    sleep(5)

elif ((digitalRead(fc_guardado) == HIGH)):
    print("El acople se encuentra guardado.\n")
    print("Para activar el acople digite: activar\n")
    print("Si desea refrescar el menu digite: refrescar\n")
    opcion = raw_input("Que desea hacer? ")
    if (opcion == 'activar'):
        activar_acople()

else:
    print("El acople se encuentra activado.\n")
    print("Para guardar el acople digite: guardar\n")
    print("Para mover los motores de ajuste fijo digite: motores\n")
    print("Si desea refrescar el menu digite: refrescar\n")
    opcion = raw_input("Que desea hacer? ")
    if (opcion == 'guardar'):
        guardar_acople()
    elif (opcion == 'motores'):
        ajuste_fino()

def frenar_motor1 ():
    #motor1
    digitalWrite(motor1_A, HIGH)
    digitalWrite(motor1_B, HIGH)
    digitalWrite(motor1_PWM, LOW)
```

```
def frenar_motor2 ():
    #motor2
    digitalWrite(motor2_A, HIGH)
    digitalWrite(motor2_B, HIGH)
    digitalWrite(motor2_PWM, LOW)

def frenar_motor3 ():
    #motor3
    digitalWrite(motor3_A, HIGH)
    digitalWrite(motor3_B, HIGH)
    digitalWrite(motor3_PWM, LOW)

def frenar_pistones ():
    #piston1
    digitalWrite(piston1_A, HIGH)
    digitalWrite(piston1_B, HIGH)
    analogWrite(piston1_PWM, 0)
    #piston2
    digitalWrite(piston2_A, HIGH)
    digitalWrite(piston2_B, HIGH)
    analogWrite(piston2_PWM, 0)

def mover_motor1 (direccion):
    digitalWrite(motor1_PWM, HIGH)
    if (direccion):
        digitalWrite(motor1_A, HIGH)
```

```
    digitalWrite(motor1_B, LOW)
else:
    digitalWrite(motor1_A, LOW)
    digitalWrite(motor1_B, HIGH)

def mover_motor2 (direccion):
    digitalWrite(motor2_PWM, HIGH)
    if (direccion):
        digitalWrite(motor2_A, HIGH)
        digitalWrite(motor2_B, LOW)
    else:
        digitalWrite(motor2_A, LOW)
        digitalWrite(motor2_B, HIGH)

def mover_motor3 (direccion):
    digitalWrite(motor3_PWM, HIGH)
    if (direccion):
        digitalWrite(motor3_A, HIGH)
        digitalWrite(motor3_B, LOW)
    else:
        digitalWrite(motor3_A, LOW)
        digitalWrite(motor3_B, HIGH)

def guardar_acople ():
    print ("Se procede a guardar el acople\n" )
    print ("Guardando...\n\n" )
    digitalWrite(sele_guardado, HIGH)
```

```
digitalWrite(sele_acoplado , HIGH)
error = False
piston_error = 0
sleep(2)
potenciometro1 = analogRead(pot_piston1)
potenciometro2 = analogRead(pot_piston2)
tiempo1 = time()
tiempo2 = time()
digitalWrite(piston1_A , HIGH)
digitalWrite(piston2_A , HIGH)
digitalWrite(piston1_B , LOW)
digitalWrite(piston2_B , LOW)
analogWrite(piston1_PWM , PWM_pistones)
analogWrite(piston2_PWM , PWM_pistones)

while (digitalRead(fc_guardado) == LOW):
    if (abs(analogRead(pot_piston1) - potenciometro1) > 5):
        tiempo1 = time()
        potenciometro1 = analogRead(pot_piston1)
    if (abs(analogRead(pot_piston2) - potenciometro2) > 5):
        tiempo2 = time()
        potenciometro2 = analogRead(pot_piston2)

if((time() - tiempo1) > 0.8):
    error = True
    piston_error = 1
break
```

```
if((time() - tiempo2) > 0.8):
    error = True
    piston_error = 2
    break

frenar_pistones()

if (not error):
    print ("Acople guardado\n")
else:
    print ("ERROR DURANTE OPERACION\n")
    print ("El piston "+str(piston_error)+" no se movia
    .....para guardar el sistema\n")
    print ("El sistema se detuvo para resguardar la
    .....integridad del mismo\n")
    print ("Avisar al personal tecnico, no se puede
    .....utilizar hasta ser reparado\n")
    raw_input("Pulse enter para continuar")
sleep(2)
digitalWrite(sele_guardado, LOW)
digitalWrite(sele_acoplado, LOW)
sleep(6)

def activar_acople():
    print ("Se procede a activar el acople\n")
    print ("Activando...\n\n")
    digitalWrite(sele_guardado, HIGH)
    digitalWrite(sele_acoplado, HIGH)
```

```
error = False
piston_error = 0
sleep(2)
potenciometro1 = analogRead(pot_piston1)
potenciometro2 = analogRead(pot_piston2)
tiempo1 = time()
tiempo2 = time()
digitalWrite(piston1_B , HIGH)
digitalWrite(piston2_B , HIGH)
digitalWrite(piston1_A , LOW)
digitalWrite(piston2_A , LOW)
analogWrite(piston1_PWM , PWM_pistones)
analogWrite(piston2_PWM , PWM_pistones)

while (digitalRead(fc_operacion) == LOW):
    if (abs(analogRead(pot_piston1) - potenciometro1) > 5):
        tiempo1 = time()
        potenciometro1 = analogRead(pot_piston1)
    if (abs(analogRead(pot_piston2) - potenciometro2) > 5):
        tiempo2 = time()
        potenciometro2 = analogRead(pot_piston2)

if((time() - tiempo1) > 0.8):
    error = True
    piston_error = 1
    break
if((time() - tiempo2) > 0.8):
```

```
    error = True
    piston_error = 2
    break

frenar_pistones()
if (not error):
    print ("Acople_activado\n")
else:
    print ("ERROR_DURANTE_OPERACION\n")
    print ("El_piston_"+str(piston_error)+"_no_se_movia
    .....para_activar_el_sistema\n")
    print ("El_sistema_se_detuvo_para_resguardar_la
    .....integridad_del_mismo\n")
    print ("Avisel_al_personal_tecnico ,_no_se_puede
    .....utilizar_hasta_ser_reparado\n")
    raw_input("Pulse_enter_para_continuar")
    sleep(2)
    digitalWrite(sele_guardado , LOW)
    digitalWrite(sele_acoplado , LOW)
    sleep(6)

def ajuste_fino ():
    global motores_calibrados
    opcion = "entrar"
    while (opcion != "volver" and opcion != 0):
        os.system ('clear')
        print ("Se_encuentra_en_el_menu_de_ajuste_fino.\n\n")
```

```
mover_motor1(True)
while (nueva_posicion > int(encoder1.getPosition())):
    pass
frenar_motor1()
print("Se ha llegado a la posicion deseada.")
sleep(4)

elif (opcion ==2):
nueva_posicion = int(encoder2.getPosition()) + (pasos * 33)
if (nueva_posicion < 0):
    print(" Posicion no permitida , sobrepasa el minimo.\n")
elif (nueva_posicion > 559225):
    print(" Posicion no permitida , sobrepasa el maximo.\n")
else:
    print("Se movera el motor 2" +str(pasos)+ " pasos.\n")
    print("Moviendo...\n")
    if (pasos < 0):
mover_motor2(False)
while (nueva_posicion < int(encoder2.getPosition())):
    pass
else:
    mover_motor2(True)
    while (nueva_posicion > int(encoder2.getPosition())):
        pass
    frenar_motor2()
    print("Se ha llegado a la posicion deseada.")
sleep(4)
```

```

else:
    nueva_posicion = int(encoder3.getPosition()) + (pasos * 33)
    if (nueva_posicion < 0):
        print(" Posicion no permitida , sobrepasa el minimo.\n")
    elif (nueva_posicion > 559225):
        print(" Posicion no permitida , sobrepasa el maximo.\n")
    else:
        print(" Se movera el motor 3 " +str(pasos)+ " pasos.\n")
        print(" Moviendo...\n")
        if (pasos < 0):
            mover_motor3(False)
            while (nueva_posicion < int(encoder3.getPosition())):
                pass
        else:
            mover_motor3(True)
            while (nueva_posicion > int(encoder3.getPosition())):
                pass
        frenar_motor3()
        print(" Se ha llegado a la posicion deseada.")
        sleep(4)

```

```

else:
    print("No se ha hecho la calibracion de los motores para
    el ajuste fino.\n")
    print(" Para poder utilizar el ajuste fino se requiere la

```

```
        calibracion\n")
    print("Si desea calibrar digite: calibrar\n")
    print("Si desea volver al menu anterior digite: volver\n")
    opcion = raw_input("Que desea hacer?\n")
    if (opcion == 'calibrar'):
        print("Se procede a la calibracion del ajuste fino\n")
        sleep(2)
        print("Calibrando...\n")
        motor1_calibrado = False
        motor2_calibrado = False
        motor3_calibrado = False
        mover_motor1 (False)
        mover_motor2 (False)
        mover_motor3 (False)
        while(not motor1_calibrado or
              not motor2_calibrado or not motor3_calibrado):
            if (digitalRead(fc_motor1) == HIGH):
                frenar_motor1()
                motor1_calibrado = True
            if (digitalRead(fc_motor2) == HIGH):
                frenar_motor2()
                motor2_calibrado = True
            if (digitalRead(fc_motor3) == HIGH):
                frenar_motor3()
                motor3_calibrado = True
        encoder1.zero()
        encoder2.zero()
```



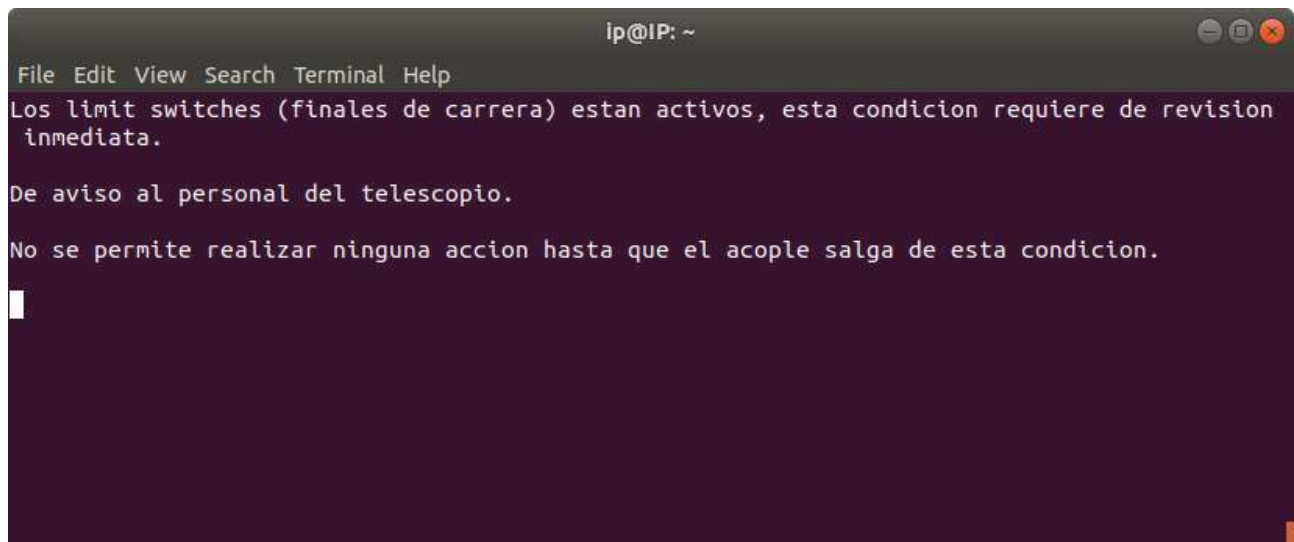
```
encoder3.zero()  
motores_calibrados = True  
print("Calibracion realizada")  
sleep(4)
```

```
setup()
```

```
loop()
```

Apéndice B

Captura de pantalla de la interfaz de usuario del software de control

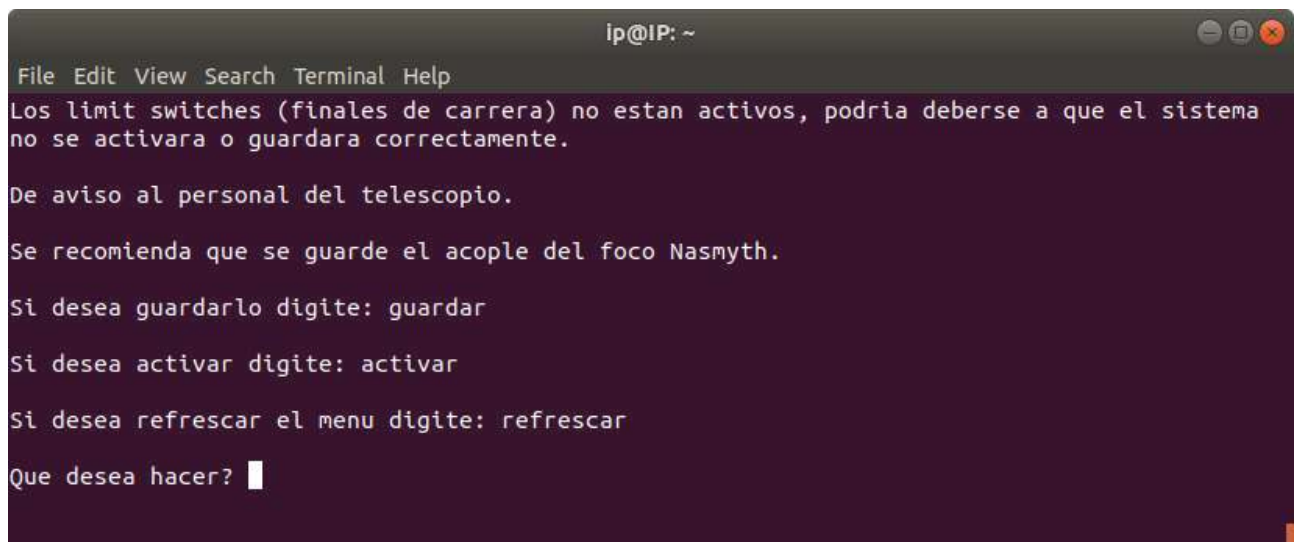


```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
Los limit switches (finales de carrera) estan activos, esta condicion requiere de revision
inmediata.

De aviso al personal del telescopio.

No se permite realizar ninguna accion hasta que el acople salga de esta condicion.
█
```

Fig. B.1: Finales de carrera activo y guardado presionados.



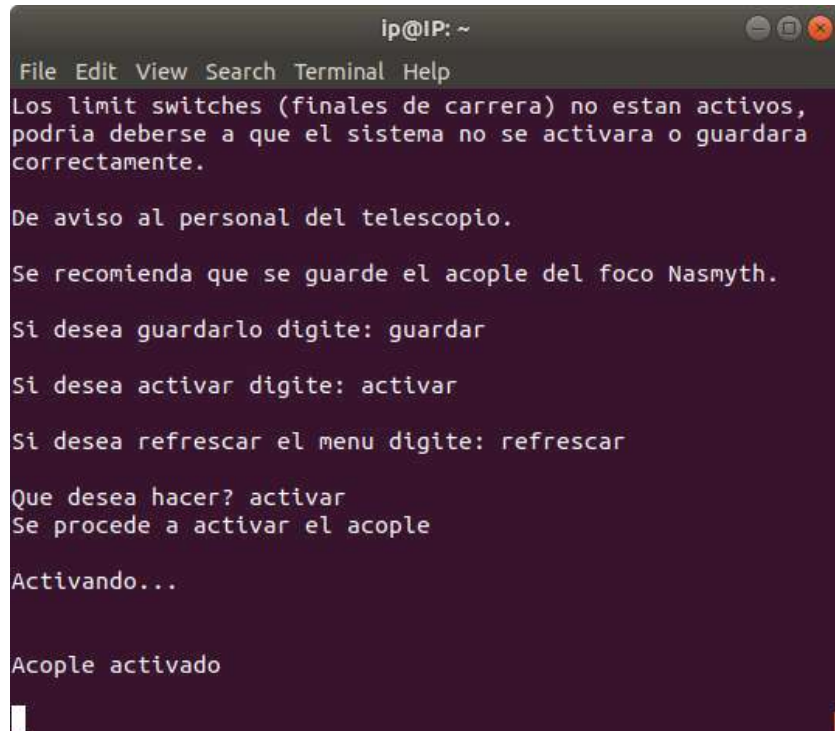
```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
Los limit switches (finales de carrera) no estan activos, podria deberse a que el sistema
no se activara o guardara correctamente.

De aviso al personal del telescopio.

Se recomienda que se guarde el acople del foco Nasmyth.

Si desea guardarlo digite: guardar
Si desea activar digite: activar
Si desea refrescar el menu digite: refrescar
Que desea hacer? █
```

Fig. B.2: Finales de carrera activo y guardado no presionados.



```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
Los limit switches (finales de carrera) no estan activos,
podria deberse a que el sistema no se activara o guardara
correctamente.

De aviso al personal del telescopio.

Se recomienda que se guarde el acople del foco Nasmyth.

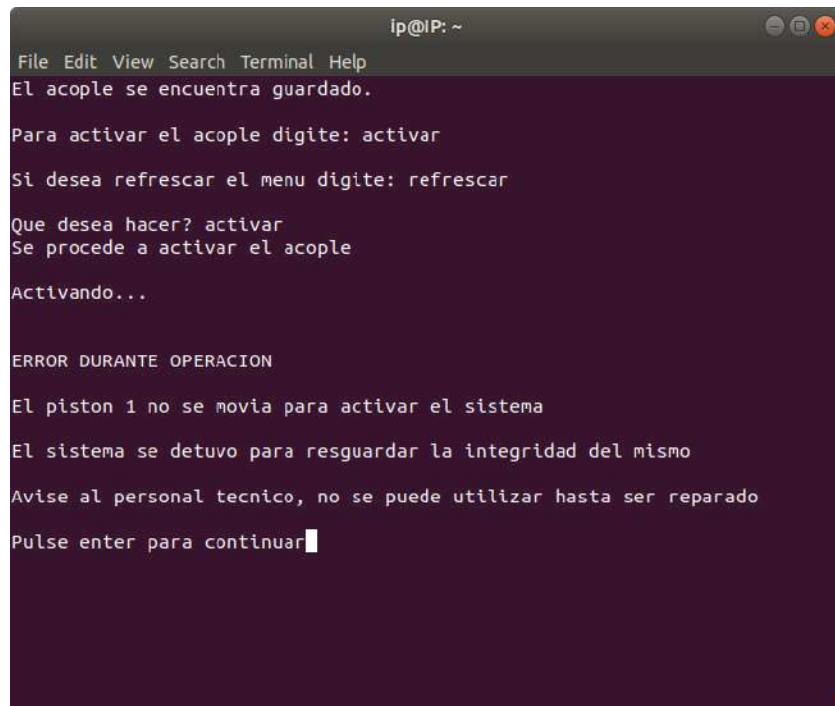
Si desea guardarlo digite: guardar
Si desea activar digite: activar
Si desea refrescar el menu digite: refrescar

Que desea hacer? activar
Se procede a activar el acople

Activando...

Acople activado
```

Fig. B.3: Foco Nasmyth activado luego de error en los sensores de final de carrera activado y guardado (ninguno estaba presionado).



```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
El acople se encuentra guardado.

Para activar el acople digite: activar
Si desea refrescar el menu digite: refrescar

Que desea hacer? activar
Se procede a activar el acople

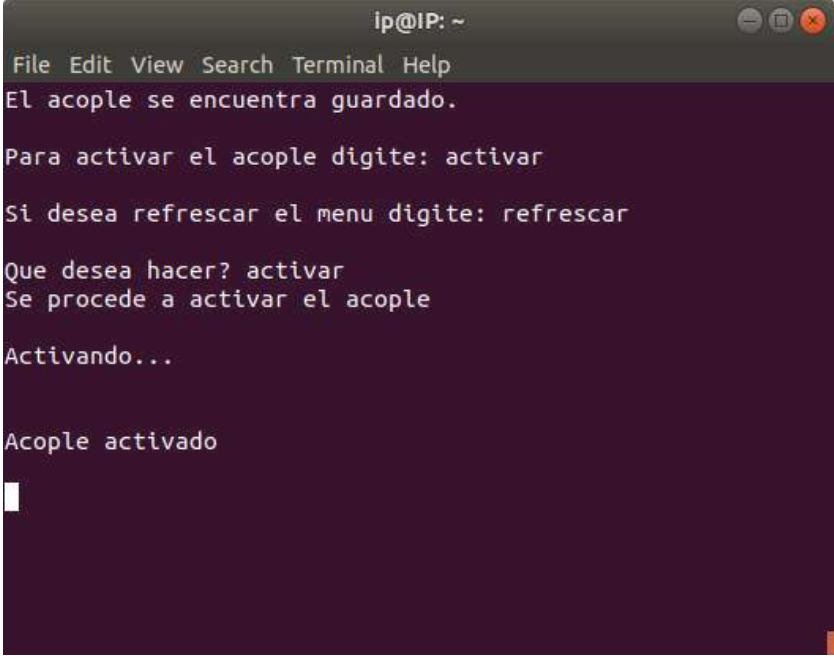
Activando...

ERROR DURANTE OPERACION

El piston 1 no se movia para activar el sistema
El sistema se detuvo para resguardar la integridad del mismo
Aviso al personal tecnico, no se puede utilizar hasta ser reparado

Pulse enter para continuar
```

Fig. B.4: Error mientras se activaba el acople, se le realizó un corte de energía al pistón 1.



```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
El acople se encuentra guardado.

Para activar el acople digite: activar

Si desea refrescar el menu digite: refrescar

Que desea hacer? activar
Se procede a activar el acople

Activando...

Acople activado
```

Fig. B.5: Foco Nasmyth activado sin errores de operación (activación normal).



```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
Los limit switches (finales de carrera) no estan activos, podria deberse a que el sistema
no se activara o guardara correctamente.

De aviso al personal del telescopio.

Se recomienda que se guarde el acople del foco Nasmyth.

Si desea guardarlo digite: guardar

Si desea activar digite: activar

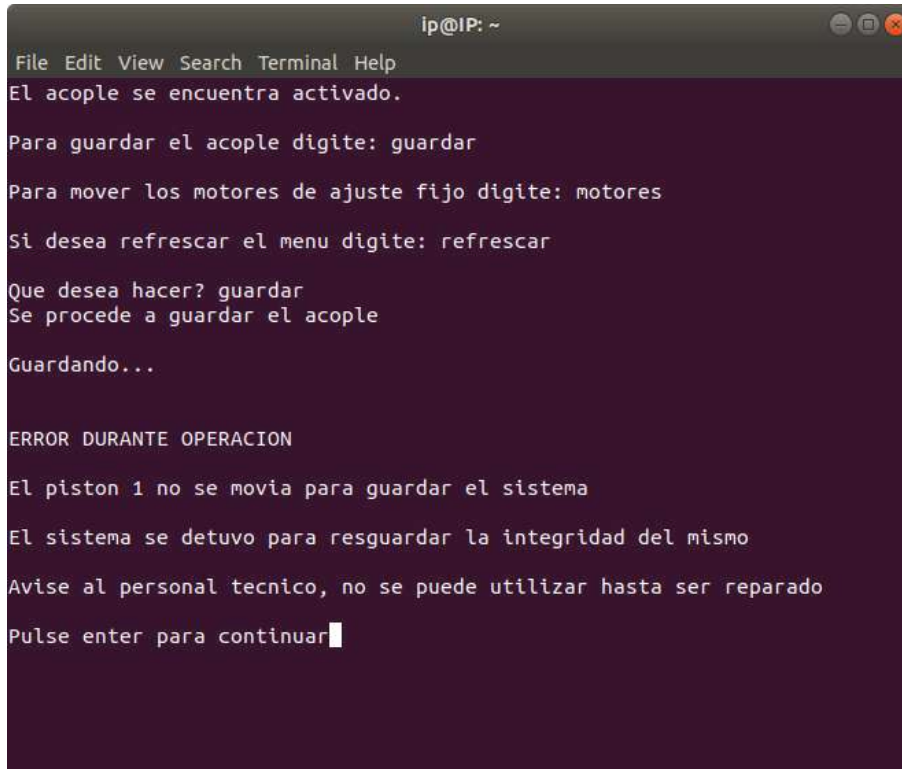
Si desea refrescar el menu digite: refrescar

Que desea hacer? guardar
Se procede a guardar el acople

Guardando...

Acople guardado
```

Fig. B.6: Foco Nasmyth Guardado luego de error en los sensores de final de carrera activado y guardado (ninguno estaba presionado).



```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
El acople se encuentra activado.

Para guardar el acople digite: guardar

Para mover los motores de ajuste fijo digite: motores

Si desea refrescar el menu digite: refrescar

Que desea hacer? guardar
Se procede a guardar el acople

Guardando...

ERROR DURANTE OPERACION

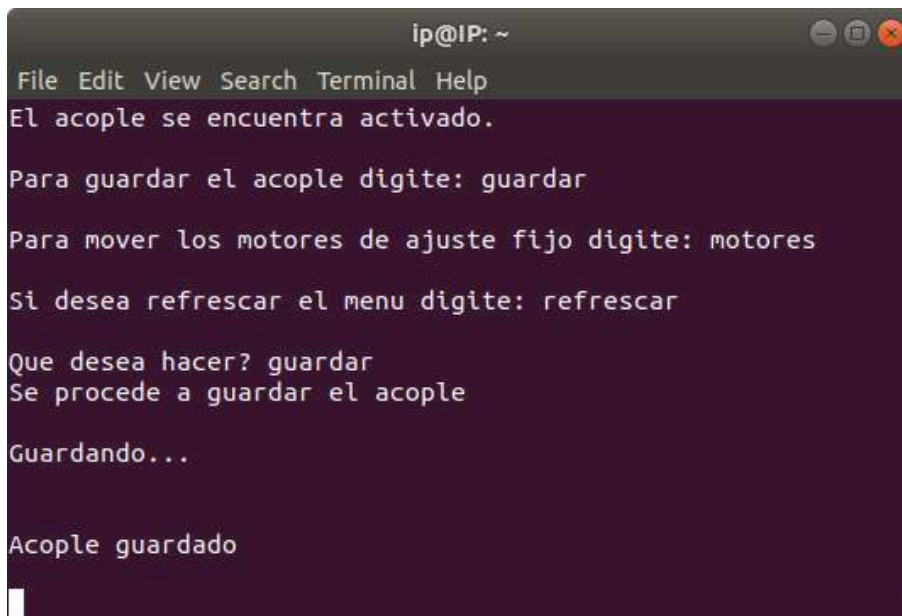
El piston 1 no se movia para guardar el sistema

El sistema se detuvo para resguardar la integridad del mismo

Aviso al personal tecnico, no se puede utilizar hasta ser reparado

Pulse enter para continuar
```

Fig. B.7: Error mientras se guardaba el acople, se le realizó un corte de energía al pistón 1.



```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
El acople se encuentra activado.

Para guardar el acople digite: guardar

Para mover los motores de ajuste fijo digite: motores

Si desea refrescar el menu digite: refrescar

Que desea hacer? guardar
Se procede a guardar el acople

Guardando...

Acople guardado
```

Fig. B.8: Foco Nasmyth guardado sin errores de operación (puesto fuera de operación normal.)

```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
Se encuentra en el menu de ajuste fino.

No se ha hecho la calibracion de los motores para el ajuste fino.
Para poder utilizar el ajuste fino se requiere la calibracion
Si desea calibrar digite: calibrar
Si desea volver al menu anterior digite: volver

Que desea hacer? calibrar
Se procede a la calibracion del ajuste fino

Calibrando...

Calibracion realizada
```

Fig. B.9: Sistema de ajuste fino calibrado.

```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
Se encuentra en el menu de ajuste fino.

La posicion (en pasos) actual de cada motor es la siguiente.

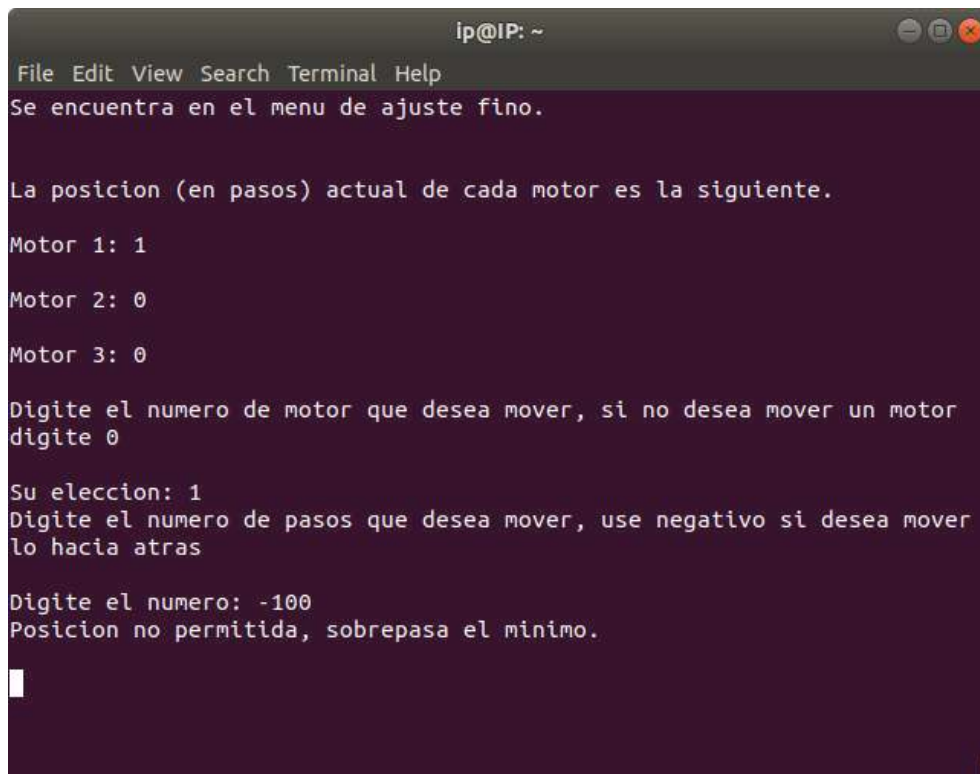
Motor 1: 1
Motor 2: 0
Motor 3: 0

Digite el numero de motor que desea mover, si no desea mover un motor
digite 0

Su eleccion: 1
Digite el numero de pasos que desea mover, use negativo si desea mover
lo hacia atras

Digite el numero: 10000000000000
Posicion no permitida, sobrepasa el maximo.
```

Fig. B.10: Posición para ajuste fino sobrepasa nivel de tensión máxima.



```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
Se encuentra en el menu de ajuste fino.

La posicion (en pasos) actual de cada motor es la siguiente.

Motor 1: 1
Motor 2: 0
Motor 3: 0

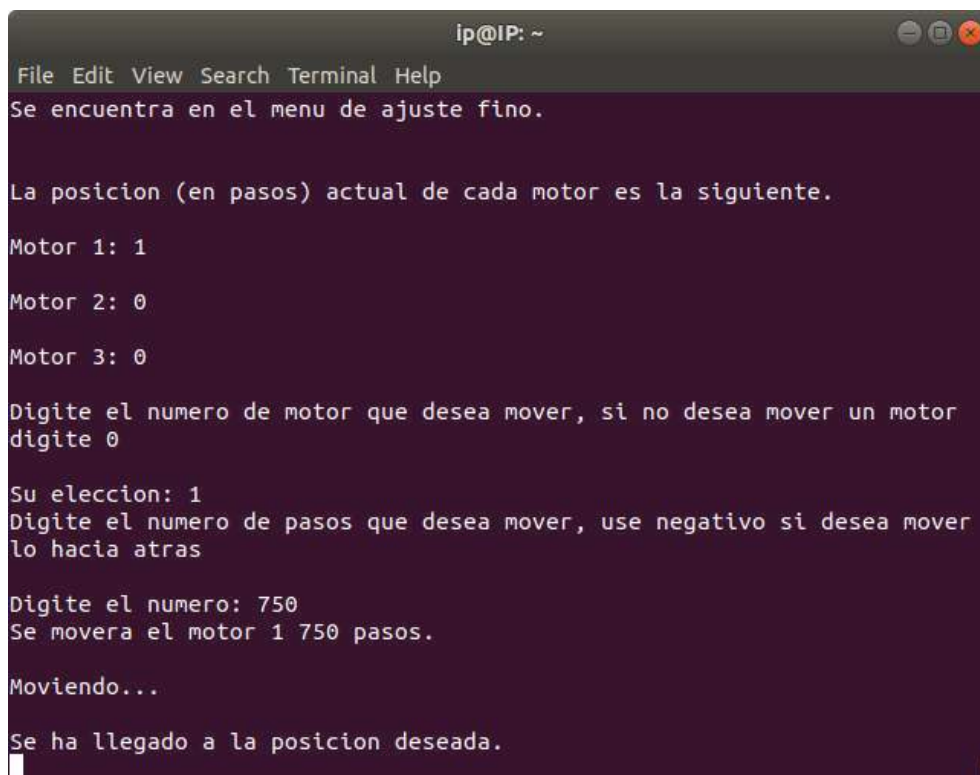
Digite el numero de motor que desea mover, si no desea mover un motor
digite 0

Su eleccion: 1
Digite el numero de pasos que desea mover, use negativo si desea mover
lo hacia atras

Digite el numero: -100
Posicion no permitida, sobrepasa el minimo.

█
```

Fig. B.11: Posición para ajuste fino sobrepasa nivel de tensión mínima.



```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
Se encuentra en el menu de ajuste fino.

La posicion (en pasos) actual de cada motor es la siguiente.

Motor 1: 1
Motor 2: 0
Motor 3: 0

Digite el numero de motor que desea mover, si no desea mover un motor
digite 0

Su eleccion: 1
Digite el numero de pasos que desea mover, use negativo si desea mover
lo hacia atras

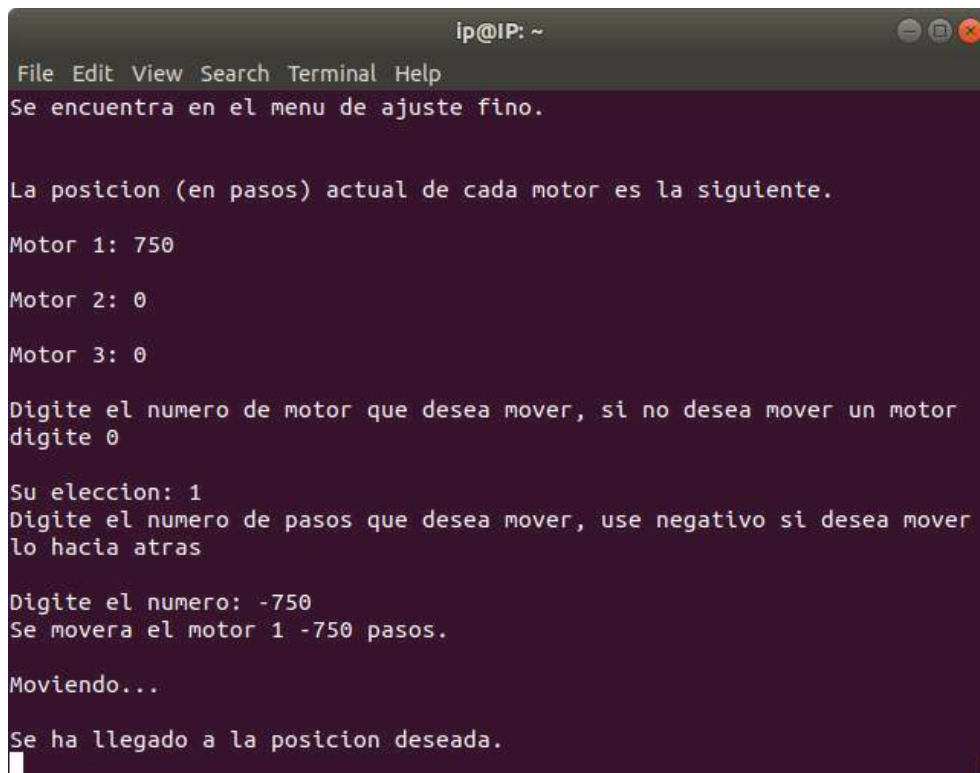
Digite el numero: 750
Se movera el motor 1 750 pasos.

Moviendo...

Se ha llegado a la posicion deseada.

█
```

Fig. B.12: Posición de 750 alcanzada para motor 1, hacia adelante.



```
ip@IP: ~
File Edit View Search Terminal Help
Se encuentra en el menu de ajuste fino.

La posicion (en pasos) actual de cada motor es la siguiente.
Motor 1: 750
Motor 2: 0
Motor 3: 0

Digite el numero de motor que desea mover, si no desea mover un motor
digite 0

Su eleccion: 1
Digite el numero de pasos que desea mover, use negativo si desea mover
lo hacia atras

Digite el numero: -750
Se movera el motor 1 -750 pasos.

Moviendo...

Se ha llegado a la posicion deseada.
```

Fig. B.13: Posición de -750 alcanzada para motor 1, hacia atrás.