



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

“MIRA RÉFLEX 2X25 CON RETÍCULA ILUMINADA POR FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO FLUORESCENTE”



Tesis que para obtener el grado de Maestro en Optomecatrónica

Presenta: David Rojas Durán

Director de Tesis: Dr. Gonzalo Páez Padilla

Co – Director de Tesis: Dr. Ismael Torres Gómez

León · Guanajuato · México

Febrero de 2023

“Si solo haces lo que ya sabes hacer, no vas a llegar a ser más de lo que eres hoy”

- Maestro Shifu

Agradecimientos

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a mis asesores, Dr. Gonzalo Páez Padilla y Dr. Ismael Torres Gómez, quienes me propusieron integrarme a este proyecto y darme la oportunidad de realizar la maestría en optomecatrónica. Así mismo quiero agradecerles por las asesorías, el acompañamiento, la confianza, la ayuda y apoyo proporcionados durante la elaboración de la tesis y estancia en el CIO (Centro de Investigaciones Óptica), pero sobre todo por la paciencia para que este proyecto culminara.

Agradezco a toda mi familia por el apoyo recibido, principalmente a mis padres Raquel Durán Fernández y David Saúl Rojas Salazar, que siempre han estado a mi lado apoyándome desde que empecé a estudiar esta bonita pero ardua carrera de licenciatura en ingeniería mecatrónica hasta terminar la maestría en optomecatrónica, y que siempre han estado en mis mejores, pero sobre todo en mis peores momentos y han sabido guiarme en el camino de la moral, me han dado los mejores consejos los cuales me han fortalecido y ayudado para no darme por vencido y tener un camino lleno de éxito.

A los papás de mi novia, que me han apoyado y orado por mí. También me gustaría mencionar a alguien muy especial Brenda Gabriela Saucedo Gómez que es la mejor novia del mundo, por lo menos para mí, y que siempre estuvo conmigo en las buenas y en las malas, apoyándome y sobre todo motivándome para que la maestría fuera más entretenida y amena.

A todos los investigadores, maestros y al taller óptico que he tenido durante mi vida académica. Entre los doctores, cabe mencionar, Dr. José Zacarías Malacara Hernández, Dra. Reyna Araceli Duarte Quiroga por el préstamo de material. También a los maestros, M.O Diego Torres Armenta (el gran maestro águila), M.O. Adrián W. Coronel Arredondo (el Prof.), M.I Ricardo Valdivia Hernández (CAT), que me estuvieron apoyando y orientando. Y a la Dra. Natiely Hernández Sebastián, por su apoyo en la fabricación en la primera prueba de la retícula.

No quería pasar por alto la oportunidad de agradecer a mis sinodales:

- Dr. José Zacarías Malacara Hernández por su asesoría, apoyo, tiempo y por sus valiosos comentarios, que definitivamente me ayudaron a mejorar la calidad de la presente tesis.
- Dr. Efraín Mejía Beltrán, por su asesoría, tiempo y por sus valiosos comentarios, que definitivamente me ayudaron a mejorar la calidad de la presente tesis.
- Dr. Gonzalo Páez Padilla, por su asesoría en el uso y manejo en el programa OSLO edu y por sus valiosos comentarios, que definitivamente me ayudaron a mejorar la calidad de la presente tesis.

Para finalizar, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por darme la oportunidad de realizar la maestría en optomecatrónica y por proporcionarme la beca de posgrado.

Nada de esto se hubiera logrado sin ustedes, gracias a todas las personas e instituciones que estuvieron desde el comienzo hasta la actualidad.

Por todo esto quiero dar las gracias.

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo tecnológico de una mira réflex con amplificación óptica y retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente. La mira réflex es un tipo de mira óptica terrestre que se destaca principalmente por su efectividad en objetivos a corta y mediana distancia, además de presentar un tamaño y peso reducido entre otras ventajas funcionales. Para realizar este proyecto se llevó a cabo un desarrollo conceptual, el análisis de diferentes alternativas en cuanto a su construcción y la definición de la propuesta. Posteriormente, se diseñó y fabricó un prototipo de mira réflex 2x25, con las siguientes características: una amplificación de 2x, un tamaño de lente objetivo de 25 mm, un alivio de ojo de 70 mm, diámetro de pupila de salida de 10 mm y una retícula de color rojo iluminada por una fibra óptica de plástico fluorescente, todo dentro de un dispositivo cuyo largo no excede 150 mm. El diseño del soporte optomecánico del instrumento permite integrar el sistema óptico Kepleriano, el sistema réflex y el mecanismo de ajuste de posición de la imagen de la retícula iluminada; garantizando así el acoplamiento y ajuste de los elementos móviles como la lente ocular y la retícula. Una vez armado el prototipo, de la mira réflex se analizó su funcionalidad mediante pruebas preliminares de amplificación, campo de visión y el tamaño de la retícula iluminada.

Descripción del trabajo

En el capítulo 1 se hace mención del sistema de avistamiento con puntería (mira), la historia, sus clasificaciones, la diferencia de una mira telescópica con una mira réflex. Finalmente, el planteamiento del proyecto.

En el capítulo 2 se discute la estructura básica y las ecuaciones fundamentales de un telescopio refractor terrestre, los sistemas ópticos erectores con lentes y prismas, tipos y tamaños en MOA (Minuto de Ángulo) de las retículas para telescopios refractores, estructura y principio de funcionamiento de la fibra óptica de plástico fluorescente, funciones, tipos y espectros de transmisión y reflexión de los espejos dicróicos, partes y funciones del ojo humano. Posteriormente se lleva a cabo un análisis de otras alternativas de diseño y la descripción de la propuesta final.

En el capítulo 3 se detalla el ensamble experimental de la mira réflex. Primero una simulación de un telescopio refractor terrestre, luego se explican los arreglos experimentales del telescopio refractor terrestre y un sistema de retícula iluminada, enseguida se desarrolla la integración experimental de la mira réflex, y se presentan los resultados caracterizados.

En el capítulo 4 se elabora la discusión del prototipo de mira réflex, su diseño optomecánico del soporte y por último un análisis de resultados.

Finalmente, en el apartado de Conclusiones y Trabajo a Futuro se debaten los resultados esperados vs los obtenidos, considerando las implicaciones teóricas y prácticas que dieron forma a este proyecto, así como el trabajo que aún queda por hacer para mejorar la funcionalidad y calidad del prototipo.

Índice de figuras del capítulo 1

Figura 1.1. Mira abierta. Los dos puntos verdes están en la parte trasera del arma y están cerca del ojo humano, el punto rojo se encuentra en la punta del arma para apuntar al objetivo.	4
Figura 1.2. Mira láser.	4
Figura 1.3. Mira de prisma.	5
Figura 1.4. Mira réflex expuesta.	5
Figura 1.5. Mira réflex tubular.	6
Figura 1.6. Mira holográfica.	6
Figura 1.7. Mira ACOG.	7
Figura 1.8. Mira telescópica.	7
Figura 1.9. Diagrama óptico esquemático de una mira telescópica.	8
Figura 1.10. Mira réflex.	9
Figura 1.11. Clasificación de las miras réflex. FOPF (Fibra Óptica de Plástico Fluorescente).	10

Índice de figuras del capítulo 2

Figura 2.1. Telescopio astronómico básico.	13
Figura 2.2. Telescopio terrestre con lente erectora.	16
Figura 2.3. Telescopio terrestre con un objetivo telescópico $f/10$ y un prisma Schmidt-Pechan.	16
Figura 2.4. Retículas: a) punto, b) punto y círculo, c) punto y cruz y d) diana.	17
Figura 2.5. Sistema de centrado para una mira réflex utilizando el MOA.	18
Figura 2.6. Estructura básica de una fibra óptica.	19
Figura 2.7. Estructura química del PMMA.	20
Figura 2.8. Estructura química del PTFE.	20
Figura 2.9. Diagrama de Jablonski (izquierda): la longitud vertical de las flechas es proporcional a la energía de la transición. Espectros de absorción (púrpura) y emisión (azul) correspondientes (derecha) con los picos vibracionales marcados.	21
Figura 2.10. Principio del funcionamiento básico de una fibra óptica de plástico fluorescente.	22
Figura 2.11. Espectro de absorción y emisión de la rodamina 6G en PMMA.	23
Figura 2.12. Espectro de absorción y emisión de la rodamina B en PMMA.	23
Figura 2.13. Guías de plástico fluorescentes con distintos colores.	24
Figura 2.14. Esquema del ojo humano.	26
Figura 2.15. Diferentes posiciones del ojo observador con respecto a la pupila de salida del sistema visual.	28

Índice de figuras del capítulo 3

Figura 3.1. Diagrama esquemático del sistema óptico afocal (no a escala)...	38
Figura 3.2. Diagrama esquemático del sistema óptico afocal con sistema erector.	39
Figura 3.3. Diagrama esquemático del sistema focal de la retícula iluminada.	40
Figura 3.4. Esquema del arreglo experimental del sistema afocal.	41
Figura 3.5. Arreglo óptico para la medida de la posición y el tamaño de la pupila de salida. a) 1) es la lámpara de luz blanca, 2) se colocó la hoja de papel vegetal, 3) se situó el lente objetivo con $f_{obj}= 100$ mm más la $f_{oc} = 50$ mm como la lente ocular 4) y en 5) se encuentra la pantalla de observación de $l= 70$ mm. Finalmente, en b) se observa el tamaño de la pupila de salida, $D_{ps}= 11$ mm.	41
Figura 3.6. Arreglo óptico con pupila de entrada, con diámetro de 10 mm. a) 1) es la lámpara de luz blanca, 2) se colocó el cartón (pupila de entrada) en el arreglo experimental, 3) es la hoja de papel vegetal, 4) es el lente objetivo de $f_{obj}= 100$ mm más la $f_{oc}= 50$ mm como la lente ocular 5) y el 6) se encuentra la pantalla de observación. Finalmente, en b) se observa el tamaño de la pupila de salida, $D_{ps}= 10$ mm.	42
Figura 3.7. Arreglo óptico para la medida de la posición y el tamaño de la pupila de salida con sistema erector utilizando un prisma Schmidt-Pechan. a) 1) es la lámpara de luz blanca, 2) es la hoja de papel vegetal, 3) es el lente objetivo de $f_{obj}= 100$ mm, 4) se colocó el prisma Schmidt-Pechan, 5) es una lente ocular de $f_{oc}= 50$ mm, y en 6) se encuentra la pantalla de observación de $l= 70$ mm. Finalmente, en b) se observa el tamaño de la pupila de salida, $D_{ps}= 10$ mm.	43
Figura 3.8. a) 1) se colocó el lente objetivo de $f_{obj}= 100$ mm, 2) se colocó la lente ocular de $f_{oc}= 50$ mm. En b) se observa la imagen invertida vista a través de la lente ocular.	44
Figura 3.9. Arreglo óptico con pupila de entrada, con diámetro de 10 mm. a) 1) se agregó el cartón (pupila de entrada) al arreglo experimental, 2) es el lente objetivo de $f_{obj}= 100$ mm y 3) es la lente ocular de $f_{oc}= 50$ mm. En b) se observa la imagen invertida vista a través de la lente ocular.....	45
Figura 3.10. a) 1) es el lente objetivo de $f_{obj}= 100$ mm, 2) se colocó el prisma Schmidt-Pechan y el 3) es la lente ocular de $f_{oc}= 50$ mm. En b) se observa la imagen vista a través de la lente ocular.....	46
Figura 3.11. Arreglo óptico con pupila de entrada, con diámetro de 10 mm. a) 1) se colocó el cartón (pupila de entrada) en el arreglo experimental, 2) es el lente objetivo de $f_{obj}= 100$ mm, 3) es el prisma Schmidt-Pechan, 4) es la lente ocular de $f_{oc}= 50$ mm. En b) se observa la imagen vista a través de la lente ocular.....	46
Figura 3.12. Espectro de absorción y emisión de la fibra óptica de plástico fluorescente.	48

Figura 3.13. Microscopio digital nacional DC3-163.....	49
Figura 3.14. Corte de la fibra óptica de plástico fluorescente vista a través del microscopio.	49
Figura 3.15. Diagrama esquemático del sistema óptico con el sistema réflex.	51
Figura 3.16. Arreglo experimental para enfocar a un objeto próximo. 1) Es el lente objetivo de $f_{obj}= 100$ mm, 2) es el prisma Schmidt-Pechan, 3) es el filtro dicróico, 4) la retícula con soporte de aluminio, 5) la fibra óptica de plástico fluorescente y 6) es la lente ocular $f_{oc}= 50$ mm.....	52
Figura 3.17. Máscara de transmisión de acrílico.	53
Figura 3.18. a) se enfocó un objeto a una distancia de 940 mm. b) se observa el punto y un círculo (retícula iluminada) bien iluminado vista a través de la lente ocular. En c) se observa la retícula iluminada bien definida.	53
Figura 3.19. Análisis de rayos del sistema óptico afocal.	54
Figura 3.20. Análisis de rayos del sistema óptico afocal con sistema erector.	54
Figura 3.21. Análisis de rayos del sistema óptico focal con sistema erector.	55
Figura 3.22. Análisis de rayos del sistema focal de la retícula iluminada.	55
Figura 3.23. Diagrama de manchas del sistema óptico afocal.....	56
Figura 3.24. Diagrama de manchas del sistema óptico afocal con sistema erector.	57
Figura 3.25. Diagrama de manchas del sistema óptico focal con sistema erector.	57
Figura 3.26. Diagrama de manchas del sistema focal de la retícula iluminada.	58
Figura 3.27. Función de dispersión de puntos del sistema óptico afocal.	58
Figura 3.28. Función de dispersión de puntos del sistema óptico afocal con sistema erector.	59
Figura 3.29. Función de dispersión de puntos del sistema óptico focal con sistema erector.	59
Figura 3.30. Función de dispersión de puntos del sistema focal de la retícula iluminada.	60
Figura 3.31. Función de transferencia de modulación del sistema óptico afocal.	60
Figura 3.32. Función de transferencia de modulación del sistema óptico afocal con sistema erector.....	61
Figura 3.33. Función de transferencia de modulación del sistema óptico focal con sistema erector.	61
Figura 3.34. Función de transferencia de modulación del sistema focal de la retícula iluminada.....	62
Figura 3.35. a) sistema óptico afocal. b) sistema óptico afocal con sistema erector. c) sistema óptico focal con sistema erector. d) sistema focal de la retícula iluminada.....	63

Índice de figuras del capítulo 4

Figura 4.1. Monturas para el sistema óptico y el sistema réflex. a) vista lateral. b) vista de sección.	67
Figura 4.2. Montura para el prototipo de mira réflex. a) vista isométrica. b) vista de sección.	68
Figura 4.3. Diseño final de la optomecánica. a) vista isométrica. b) vista superior.	69
Figura 4.4. Monturas impresas desde la impresora 3D. a) montura para el lente objetivo. b) Separador uno. c) montura para el prisma Schmidt-Pechan. d) separador dos. e) mitad de la montura para el filtro dicroico. f) otra mitad para la montura del filtro dicroico. g) montura para la lente ocular.	70
Figura 4.5. Montura del tubo para poder insertar el sistema óptico y el sistema réflex.	70
Figura 4.6. Materiales dentro de las monturas.	70
Figura 4.7. Vista trasera de la montura del tubo.	71
Figura 4.8. Ensamblando el prototipo. a) insertando la montura de la lente ocular. b) enroscando la montura de la lente ocular.	72
Figura 4.9. Montura de la lente ocular en la vista alzada.	72
Figura 4.10. Herramienta para la montura de la lente ocular.	73
Figura 4.11. Montura de la lente ocular enroscada completamente.	73
Figura 4.12. Enroscando monturas. a) enroscando la montura del lente objetivo. b) enroscando completamente hasta llegar un tope del lente objetivo.	74
Figura 4.13. Monturas para el acoplamiento para la torreta. a) monturas para insertar la fibra óptica de plástico fluorescente y la retícula con montura metálica. b) insertando la fibra óptica de plástico fluorescente. c) insertando la retícula con montura metálica y la cremallera.	75
Figura 4.14. Acoplamiento en la torreta. a) vista planta. b) vista alzada.	76
Figura 4.15. Acoplamiento final en la torreta.	76
Figura 4.16. Prototipo de mira réflex 2x25 con retícula iluminada enrollada completamente a la fibra óptica de plástico fluorescente. a) vista alzada. b) el otro lado de vista alzada.	77
Figura 4.17. Primer prototipo de mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente. a) vista alzada. b) el otro lado de vista alzada. c) vista planta.	78
Figura 4.18. Prototipo de mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente con un alivio de ojo de 70 mm.	79
Figura 4.19. Se observa la amplificación lateral de la imagen con la retícula iluminada vista a través de la lente ocular.	79
Figura 4.20. La retícula iluminada vista a través de la lente ocular. a) retícula iluminada hacia abajo. b) retícula iluminada hacia arriba.	80
Figura 4.21. Triángulo con puntos de referencias. El punto 1) mira réflex 2x25, punto 2) lona blanca de calibración para retícula iluminada 3) y 4) una varilla.	81

Figura 4.22. Mitad del triángulo con puntos de referencias. El punto 1) mira réflex 2x25, punto 2) lona blanca de calibración para retícula iluminada y el punto 3) una varilla.	81
Figura 4.23. Arreglo experimental para campo de visión y tamaño de la retícula iluminada a 25 m. a) 1) se colocó Mileseeey-P7AK, 2) es la lona blanca de calibración para retícula iluminada de 60 cm x 60 cm. En b) 1) se colocó la mira réflex 2x25, 2) es la lona blanca de calibración para retícula iluminada de 60 cm x 60 cm.	82
Figura 4.24. Arreglo experimental para el campo de visión y tamaño de la retícula iluminada a 50 m. a) 1) Se colocó Mileseeey-P7AK, 2) es la lona blanca de calibración para retícula iluminada de 60 cm x 60 cm. En b) 1) se colocó la mira réflex 2x25, 2) es la lona blanca de calibración para retícula iluminada de 60 cm x 60 cm.	83
Figura 4.25. Campo de visión vista a través de la lente ocular. En el punto 2) es la lona blanca de calibración para retícula iluminada, el punto 3) y 4) son varillas a los extremos. a) longitud de 25 m. b) longitud de 50 m.	84
Figura 4.26. Tamaño de la retícula iluminada. a) longitud de 25 m. b) longitud de 50 m.	84

Índice de gráficas del capítulo 2

Gráfica 2.1. Filtro de pasa bajas de 500 nm.	25
Gráfica 2.2. Filtro de pasa largas de 450 nm.	25

Índice de gráficas del capítulo 3

Gráfica 3.1. Espectro de transmisión.	50
Gráfica 3.2. Espectro de reflexión.	50
Gráfica 3.3. Espectro de transmisión.	65
Gráfica 3.4. Espectro de reflexión.	65

Índice de gráficas del capítulo 4

Gráfica 4.1. Campo de visión (FOV).	86
Gráfica 4.2. Tamaño de la retícula iluminada en MOA.	87

Índice de tablas del capítulo 2

Tabla 2.1. Constantes ópticas medias del ojo humano (modelo de Gullstrand).	26
Tabla 2.2. Miras réflex comerciales.	30
Tabla 2.3. Datos de la lente ocular y objetivo.	31
Tabla 2.4. Datos del prisma Schmidt-Pechan.	32
Tabla 2.5. Datos del Filtro dicroico de pasa bajas.	33

Índice de tablas del capítulo 3

Tabla 3.1. Sistema óptico afocal.....	37
Tabla 3.2. Sistema óptico afocal con sistema erector.....	38
Tabla 3.3. Sistema óptico focal con sistema erector.....	38
Tabla 3.4. Sistema focal de la retícula iluminada.....	39
Tabla 3.5. Lista de materiales.....	40
Tabla 3.6. Estructura de la fibra óptica de plástico fluorescente.....	47
Tabla 3.7. Lista de materiales.....	51

Índice de tablas del capítulo 4

Tabla 4.1. Lista de materiales.....	80
Tabla 4.2. Longitudes de 25 m y 50 m.....	85
Tabla 4.3. El campo de visión del ángulo α de longitudes de 25 m y 50 m.....	86
Tabla 4.4. Longitudes de 25 m y 50 m.....	86
Tabla 4.5. Tamaño de la retícula iluminada en MOA de longitudes de 25 m y 50 m.....	87

Índice

Agradecimientos	III
Resumen	V
Descripción del trabajo	VI
Índice de figuras del capítulo 1	VII
Índice de figuras del capítulo 2	VII
Índice de figuras del capítulo 3	VIII
Índice de figuras del capítulo 4	X
Índice de gráficas del capítulo 2	XI
Índice de gráficas del capítulo 3	XI
Índice de gráficas del capítulo 4	XI
Índice de tablas del capítulo 2	XI
Índice de tablas del capítulo 3	XII
Índice de tablas del capítulo 4	XII
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Sistemas de avistamiento con puntería (miras ópticas)	2
1.2 Antecedentes	11
1.3 Planteamiento del proyecto	11
Capítulo 2: Marco teórico	12
2.1 Sistemas afocales	13
2.2 Programa OSLO edu	15
2.3 Sistemas ópticos erectores	15
2.4 Retículas para telescopios refractores.....	17
2.5 Fibra óptica fluorescente	18
2.6 Filtros ópticos.....	24
2.7 El ojo humano.....	25
2.8 Análisis de alternativas y definición de la propuesta.....	29
Capítulo 3: Diseño y ensamble experimental de mira réflex	35

3.1 Arreglo experimental de telescopio refractor terrestre	36
3.2 Arreglo experimental de sistema de retícula iluminada.....	47
3.3 Integración experimental de la mira réflex.....	51
3.4 Caracterización y análisis de resultados	53
Capítulo 4: Prototipo de la mira réflex	66
4.1 Diseño optomecánico de soporte de mira réflex	67
4.2 Fabricación de componentes	69
4.3 Integración de mira réflex	70
4.4 Caracterización de la mira réflex.....	78
4.5 Análisis de resultados	85
Conclusiones y trabajo a futuro.....	89
Bibliografía.....	92

Capítulo 1: Introducción

Las miras ópticas son una clase especial de instrumento óptico que incluye una retícula que facilita al apuntar a un objetivo.

Dentro de la categoría de miras más comunes se encuentran instrumentos tales como: monoculares, binoculares, miras para armas, visión nocturna, entre otros.

Las miras para armas se montan directamente sobre estas como: miras abiertas, miras telescópicas, miras réflex, miras láser, entre otras. Cada uno está equipado con una retícula adecuada. La erección de la imagen se logra mediante lentes o prismas o, en algunos casos, mediante una combinación de ambos. Se manejan a distancias cortas, medianas y largas, además pueden tener o no amplificación, para comprender el funcionamiento de estos instrumentos ópticos es fundamental remontarse años atrás y conocer un poco de la historia de las miras, tema que se menciona en el siguiente apartado.

1.1 Sistemas de avistamiento con puntería (miras ópticas)

1.1.1 Historia

Durante siglos se han creado diferentes instrumentos ópticos que han facilitado al apuntar a un objetivo, sin embargo, estos tenían varias limitaciones prácticas y de rendimiento.

En 1776, Charles Wilson Peale montó un telescopio en un rifle como ayuda para apuntar. Según registros documentados de la época, en el año 1835 Morgan James y el ingeniero John Chapman diseñaron las primeras miras telescópicas, produciéndolas en Utica, Nueva York.

En 1855, William Malcom comienza la fabricación de su propia mira telescópica, con modelos que poseían entre tres y 20 aumentos y que fueron profusamente utilizadas durante la Guerra Civil de los Estados Unidos. Malcom utilizó lentes acromáticos y perfeccionó los ajustes de altura y deriva de la retícula. En el mismo período aparecieron en el mercado las miras telescópicas fabricadas por Davidson y Parker Hale.

Mientras tanto, en Europa, más precisamente en Austria, August Fiedler, comisionado por el Príncipe Reuss, construyó una primera mira telescópica práctica basada en un telescopio refractor en 1880. Paralelamente, se fue perfeccionando el conjunto óptico para lograr un alivio de ojo mejorado [1].

En 1900, nació la idea de una mira réflex, cuando Howard Grubb, un fabricante de telescopios, patentó su invento (No. 12108) (no se encontró el número de patente) y se usó por primera vez en el ejército (Fuerza Aérea) en 1918. En 1970, la empresa sueca Aimpoint® hizo un avance decisivo, en desarrollar un haz de luz de un LED como fuente de luz para la mira réflex. También hizo posible construir miras (visores)

mucho más pequeños y, por lo tanto, también permitió usarlos en armas a distancias cortas [2].

1.1.2 Mira óptica

El diseño óptico de un telescopio comienza con la creación de un sistema óptico que cumplirá con todos los requisitos, tras la ejecución de la fase de diseño del objetivo, termina con la finalización de los planos de producción y las especificaciones necesarias para cada uno de los componentes ópticos del sistema. No vamos a tratar aquí de profundizar en el diseño de los sistemas ópticos ni en los procedimientos de diseño de los objetivos. Sin embargo, basta con decir que el diseño debe ser lo más simple posible, capaz de producirse en masa, y utilizar sólo tipos estándar de vidrio óptico [3].

1.1.3 Clasificaciones de las miras para armas

Hoy en día, hay varios tipos de miras ópticas disponibles:

- Miras abiertas
- Miras láser
- Miras de prisma
- Miras réflex expuestas
- Miras réflex tubulares
- Miras holográficas
- Miras ACOG (Advanced Combat Optical Gunsight)
- Miras telescópicas

Las miras abiertas se refieren a miras que no involucran elementos ópticos en el mecanismo de puntería, no tienen aumento y simplemente ayudan al ojo humano a apuntar el objetivo a través del visor. Un ejemplo se muestra en la figura 1.1 [4].

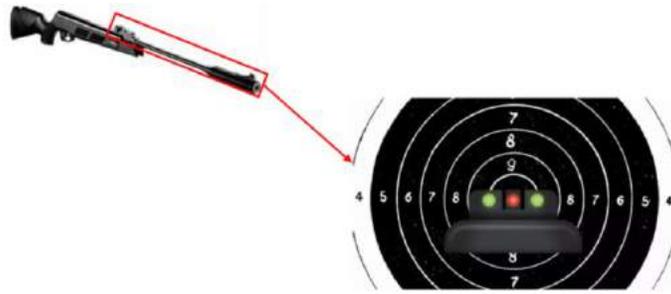


Figura 1.1. Mira abierta. Los dos puntos verdes están en la parte trasera del arma y están cerca del ojo humano, el punto rojo se encuentra en la punta del arma para apuntar al objetivo.

Una mira láser es simplemente un puntero láser de alta potencia que se acopla a un arma. La ventaja de esta mira es que cuando ves el láser ya se sabe hacia dónde va el tiro y no tienes que apuntar. El problema con este tipo de mira es que la visibilidad de una mira láser se ve muy afectada por la distancia desde el tirador, la superficie sobre la que se apunta y las condiciones de luz y ambientales del momento. Un ejemplo se muestra en la figura 1.2 [4].



Figura 1.2. Mira láser.

Las miras de prisma son pequeños dispositivos tubulares y reflejan una imagen a través de un prisma en el interior. Su ventaja es su pequeño tamaño y bajo aumento, hace que la imagen sea un poco más grande en el rango. La desventaja es que tienes que mantener los ojos muy cerca de tu línea de visión para apuntar. Un ejemplo se muestra en la figura 1.3.



Figura 1.3. Mira de prisma [4].

Las miras réflex expuestas, son aquellas que no están contenidas dentro de un tubo. Incluye una lente con una película que refleja la luz roja, pero transmite otros colores libremente. La retícula iluminada en sí misma es simplemente un reflejo de un haz de luz que emerge de una máscara de transmisión iluminada por un led. El resultado es un punto rojo que aparece como si se proyectara sobre el objeto mientras se observa a través de la mira réflex. Un ejemplo se muestra en la figura 1.4 [4] [5].



Figura 1.4. Mira réflex expuesta.

Las miras réflex tubulares utilizan el mismo concepto de reflejo que las miras réflex expuestas, pero tienen una estructura de tubo e incorporan un segundo lente (lente ocular) por la que pasa la luz antes de llegar al ojo del tirador. No tienen ningún tipo de aumento, sin embargo, como antes, la mira réflex tiene la gran ventaja de que puedes ver el objetivo claramente, sin importar qué tan lejos esté tu cabeza de la mira. Un ejemplo se muestra en la figura 1.5.



Figura 1.5. Mira réflex tubular [4].

Las miras holográficas, tienen un mecanismo de acción mucho más complicado. Consiste en pequeños reflectores que transmiten la luz emitida del diodo láser hacia una pantalla rectangular que contienen una retícula (retícula iluminada) que observamos en la mira. La empresa EOTECH es la dueña de la patente para su fabricación. Son muy precisos y al igual que las réflex, la imagen de la retícula iluminada siempre se ve nítida en la pantalla. Suelen ser utilizados por los militares. Un ejemplo se muestra en la figura 1.6 [4] [5].



Figura 1.6. Mira holográfica.

Las miras ACOG o miras ópticas avanzadas de combate (en inglés Advanced Combat Optical Gunsight), es un tipo especial de mira o Zoom telescópico de bajo aumento (entre 1.5x y 6x), fabricado por Trijicon para uso militar. Fueron creadas originalmente para los rifles de asalto M16 y la carabina M4, pero existen variantes para otros conocidos rifles de asalto, subfusiles y escopetas tácticas. En uso nocturno, las retículas de estas miras están iluminadas por una capsula de tritio recubierta internamente con fósforo; el tritio es un material radioactivo que emite luz propia y permite prescindir del uso de baterías. Este material emite luz en todo momento y tiene una vida útil de 10 a 15 años. En uso diurno, además utilizan una delgada fibra óptica que canaliza la luz solar hacia la capsula de tritio. Son populares en el ejército y se utilizan principalmente con fines militares. Un ejemplo se muestra en la figura 1.7.



Figura 1.7. Mira ACOG [4].

Las miras telescópicas son aquellas que utilizan un sistema de varias lentes, además son capaces de mostrarnos imágenes de objetivos muy distantes. Son más precisos y se utilizan cuando el objetivo está a una distancia fuera del alcance del ojo humano. Este tipo de alcance varía en aumento de 2x a 80x. Un ejemplo se muestra en la figura 1.8 [4] [5].



Figura 1.8. Mira telescópica [4].

Después de mostrar algunas miras ópticas disponibles comercialmente es fundamental conocer la diferencia entre la mira telescópica y la mira réflex, tema que se menciona en el siguiente subtema.

1.1.4 Diferencia de una mira telescópica y una mira réflex

Las miras telescópicas se usan para aumentar la precisión al disparar en distancias grandes, aumentando la imagen del objetivo, tienen de montaje de lentes de longitud bastante larga y brindando una retícula que indica exactamente hacia dónde apunta el arma. Las características normales de tales alcances se citan a menudo como: campo de visión (aumento lateral, 2x-80x), el diámetro de la pupila de salida de 5 a 8 mm, el alivio de ojo (eye relief), de 76.2 a 101.6 mm y la retícula generalmente se instala en el extremo frontal del telescopio en el plano focal de la lente del objetivo. A través de un mecanismo, se puede hacer que la retícula se traslade lateral y verticalmente, proporcionando así un medio no solo para apuntar

sino también para introducir las correcciones deseadas de altura y contraviento (vertical y horizontal) con respecto al calibre del arma [3].

En la figura 1.9 se muestra un diagrama óptico esquemático de una mira telescópica, que consta de un lente objetivo, una retícula, un lente erector y una lente ocular.

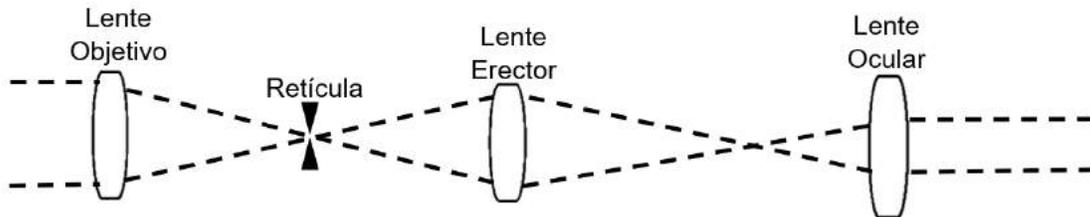


Figura 1.9. Diagrama óptico esquemático de una mira telescópica.

Estas miras telescópicas se fabrican en una gran variedad de modelos. A continuación, se hace mención de las ventajas y desventajas de las miras telescópicas:

Ventajas:

- Ofrece un aumento fijo o variable. Con aumento variable puede ser de 2 hasta 80 veces el tamaño de su objeto.
- Proporcionan bastante luz debido al tamaño del objetivo.
- La amplificación de la imagen ayuda a identificar con mayor certeza al objetivo sin obstrucción.
- La retícula regularmente es impresa o grabada y en color negro.

Desventajas:

- Su campo de visión es reducido.
- No son prácticas para enfocar objetivos móviles.
- Para fijar el objetivo se requiere utilizar un solo ojo.
- Las miras de mayor amplificación suelen requerir más tiempo para calibrar la puntería.
- Llegan a ser muy voluminosas y pesadas.
- Requieren de un mayor cuidado en su manipulación cuando se transportan.

En cambio, una mira réflex también conocida comúnmente como mira del punto rojo, mira holográfica o marcador, es quizá uno de los dispositivos ópticos más simples. Más recientemente, se han utilizado miras réflex para dirigir el fuego de

helicópteros armados. Generalmente no se consideran telescopios de observación sino más bien un sistema de puntería moderno, que se acopla a un arma, sea esta de cualquier tipo, reemplazando el alza y el punto de mira de esta, con el propósito de mejorar la eficacia y facilitar su uso [3].

En general, una mira réflex consta de una retícula iluminada, un lente objetivo y una placa divisora de haz, como se indica en la figura 1.10.

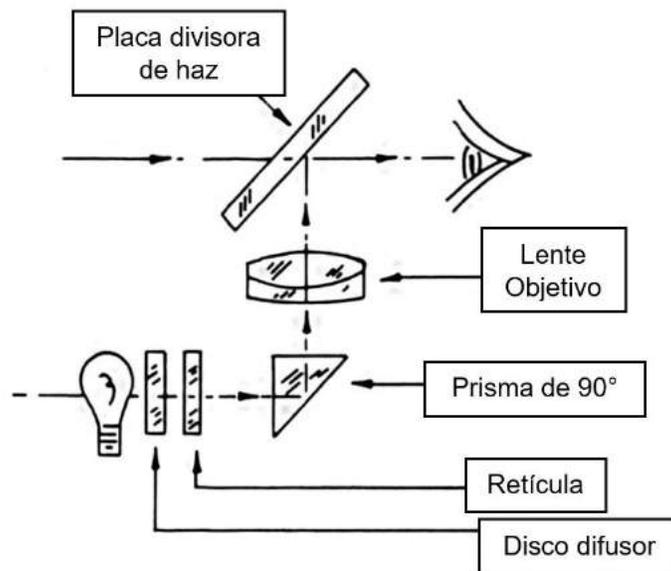


Figura 1.10. Mira réflex [3].

En la figura 1.11 se muestra una clasificación general de las miras réflex conforme a su estructura:

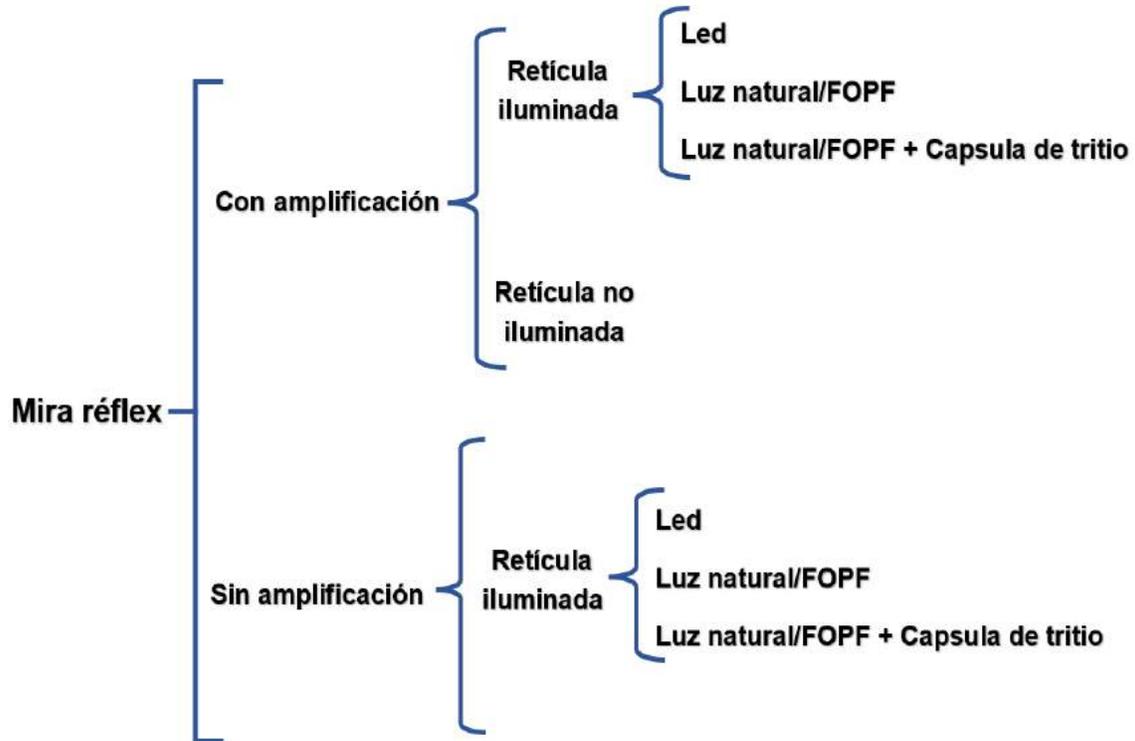


Figura 1.11. Clasificación de las miras réflex. FOPF (Fibra Óptica de Plástico Fluorescente).

De acuerdo a su funcionalidad, las miras réflex se pueden clasificar con amplificación y sin amplificación [6] [7]. Las miras con amplificación pueden presentar retículas iluminadas y no iluminadas y en las de sin amplificación solo se presentan retículas iluminadas [8] [9]. Hay tres tipos de sistemas que iluminan la retícula. Uno de ellos utiliza un led (rojo/verde) para iluminar la retícula [10]. Otro sistema de iluminación es mediante una fibra óptica de plástico fluorescente (FOPF), la cual recibe la luz natural del medio ambiente y posteriormente emite en una banda del visible (rojo/verde) para iluminar la retícula [11]. Por último, otro sistema utiliza una cápsula de tritio y una FOPF para iluminar la retícula. La cápsula de tritio tiene un recubrimiento de fosforo que emite en la misma longitud de la FOPF. De día la emisión de la capsula de tritio se combina con la luz colectada por la FOPF para iluminar la retícula. Por la noche solo la capsula de tritio ilumina la retícula [12].

Ventajas

- Su aplicación es de tiro rápido.
- A cortas distancias da una buena precisión dentro de los rangos.
- A diferencia del apuntador láser, solo se puede ver la marca sobre la lente.

- Tiene buena movilidad al apuntar.
- No son voluminosas ni pesadas.

1.2 Antecedentes

Recientemente en el Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. (CIO) realizó un proyecto con la Secretaria de la Defensa Nacional (SEDENA) para desarrollar una mira réflex sin amplificación. Posteriormente, se obtuvo la oportunidad de extender este proyecto, al proponerse el desarrollo de una mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente a través de un proyecto para una tesis de Maestría en Optomecatrónica.

1.3 Planteamiento del proyecto

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un prototipo de mira réflex con amplificación óptica con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar y simular el sistema óptico.
- Diseñar una amplificación de 2x.
- Obtener un alivio de ojo (eye relief) de 70 mm y el diámetro de pupila de salida de 10 mm.
- Diseñar el sistema réflex (sistema de iluminación) utilizando fibra óptica de plástico fluorescente, filtro dicróico y retícula.
Diseñar el sistema optomecánico de soporte.

Capítulo 2: Marco teórico

Las miras réflex están y las miras telescópicas están basadas parcialmente en el concepto del telescopio refractor (Kepleriano), conocer el funcionamiento de los telescopios Keplerianos resulta fundamental para su elaboración, por lo que en este apartado se hace mención de los sistemas afocales, sistemas ópticos erectores, además los conceptos de retículas, fibra óptica de plástico fluorescente y filtros dicróicos.

2.1 Sistemas afocales

La función principal de un telescopio es aumentar el tamaño aparente de un objeto lejano. Esto se consigue presentando al ojo una imagen que subtende un ángulo mayor (desde el ojo) que el objeto. El aumento, o la potencia, de un telescopio es simplemente la relación entre el ángulo subtendido por la imagen y el ángulo subtendido por el objeto. Nominalmente, un telescopio funciona con su objeto y su imagen situados en el infinito; por ende, se denomina instrumento afocal, ya que no tiene distancia focal [13].

Un telescopio astronómico o Kepleriano se compone de dos lentes positivas (es decir, convergentes) espaciados de manera que el segundo punto focal del primer componente coincide con el primer punto focal del segundo, como se muestra en la figura 2.1.

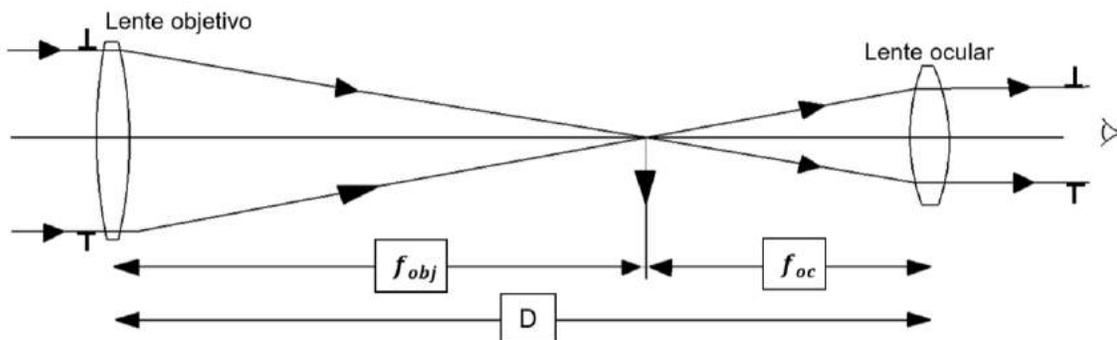


Figura 2.1. Telescopio astronómico básico.

La lente objetivo, que determina la pupila de entrada (el componente más cercano al objeto) forma una imagen invertida en su punto focal; segunda la lente ocular, visualiza el objeto en el infinito, donde puede ser visto la posición de la pupila de salida. Como la imagen interna está invertida y la lente ocular no reinvierte la imagen, la vista que se presenta al ojo está invertida de arriba abajo e invertida de izquierda a derecha [13].

Suponiendo que los componentes del telescopio son lentes delgadas, podemos entonces varias relaciones importantes que se aplican a todos los telescopios y sistemas afocales y que son de gran utilidad. En primer lugar, es evidente que la longitud (D) de un telescopio simple es igual a la suma de las distancias focales del objetivo y más la del ocular [13].

$$D = F_{obj} + F_{oc}. \quad (2.1)$$

El objeto visto sin el telescopio tiene un diámetro angular α , mientras que visto a través del telescopio tiene un diámetro angular aparente β . La imagen se observa invertida y con una amplificación angular M definida por [14]:

$$M = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}. \quad (2.2)$$

Si F_{obj} y F_{oc} son las distancias focales del objetivo y del ocular respectivamente y (l) la posición de la pupila de salida (alivio de ojo), podemos escribir la ecuación [14]:

$$l = \frac{F_{oc}}{F_{obj}} (F_{obj} + F_{oc}). \quad (2.3)$$

Además:

$$M = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} = \frac{F_{obj} + F_{oc}}{l}. \quad (2.4)$$

Por consiguiente, la amplificación del telescopio estará dada por:

$$M = \frac{F_{obj}}{F_{oc}}. \quad (2.5)$$

También la amplificación se determina con el cociente del diámetro del objetivo D_{obj} entre el diámetro de la pupila de salida D_{ps} [14]:

$$M = \frac{D_{obj}}{D_{ps}}. \quad (2.6)$$

2.2 Programa OSLO edu

OSLO es un software que permite diseñar sistemas ópticos en un ambiente gráfico interactivo utilizando un conjunto de elementos ópticos tales como espejos, lentes, prismas, diafragmas, pupilas, mostrando el detalle de los parámetros de cada elemento que se va incorporando sucesivamente, hasta obtener finalmente los parámetros esperados del sistema óptico que se desea construir [15].

Para el análisis se utilizó algunas funciones del programa OSLO edu, de la siguiente manera:

- a) **Aberración transversal:** Es la salida numérica que depende de la configuración del modo de aberración, que puede ser no convertida, transversal o angular. Para los sistemas evaluados en modo focal, la salida por defecto es transversal, que proporciona las aberraciones transversales en el plano de la imagen paraxial. Para los sistemas afocales, la salida predeterminada es en ángulo [16].
- b) **Diagrama de manchas:** La distribución de rayos se llama diagrama de manchas, aunque se utiliza para mucho más que para trazar los "puntos". Por ejemplo, dado que el frente de onda es la superficie que es ortogonal a los rayos en un camino óptico constante desde el punto de origen, podemos llevar un registro de las longitudes del camino óptico de los rayos y construir el frente de onda que sale de la lente [16].
- c) **PSF (Función de dispersión de puntos):** Se puede calcular la función de dispersión de puntos a partir de un conocimiento del frente de onda geométrico, que está disponible en el diagrama de manchas, por consistencia [16].
- d) **MTF (Función de transferencia de modulación):** Es la relación entre la modulación en la imagen y la modulación en el objeto [16].
- e) **Distribución radial de energía:** Saber qué parte de la energía total de la imagen del punto está contenida de un tamaño determinado. Se calcula en base geométrica (utilizando el diagrama de manchas, por consistencia) o de difracción (utilizando la función de dispersión de puntos) [16].

2.3 Sistemas ópticos erectores

2.3.1 Telescopio terrestre con lentes erectores

El telescopio terrestre con lente erectora como se muestra en la figura 2.2 está formado por una lente objetivo y una lente ocular con una lente erectora entre ambos y su distancia focal lo determina S_1 y S_2 . El erector invierte la imagen formada por el objetivo en el plano focal del ocular. De esta manera, la imagen final que se presenta al ojo es erecta. Esta es la forma de telescopio que se utiliza habitualmente para observar objetos terrestres. El aumento de un telescopio terrestre es simplemente el aumento que tendría el telescopio sin el erector, multiplicado por el aumento lineal del sistema erector [13].

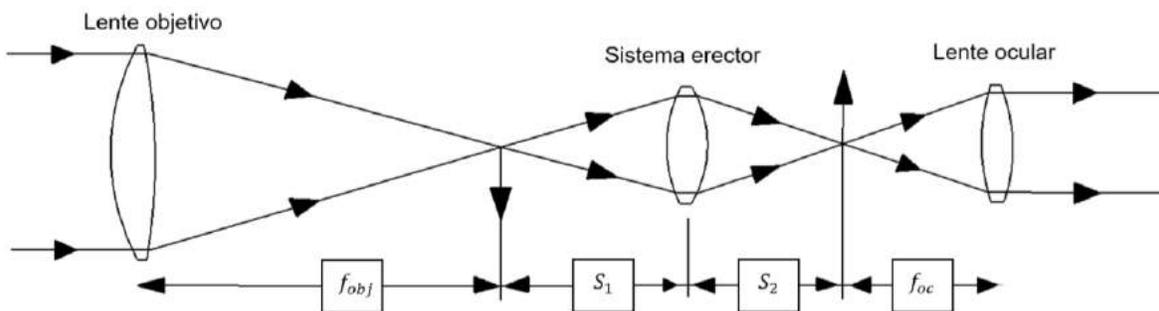


Figura 2.2. Telescopio terrestre con lente erectora.

2.3.2 Telescopio terrestre con prismas erectores

Un telescopio terrestre con prismas erectores tiene que estar diseñado para incluir un bloque de vidrio con caras planas paralelas entre el objetivo y el ocular para invertir la imagen. De esta manera, la imagen final que se presenta al ojo es erecta. Las aberraciones tienen que ser compensadas en el diseño del objetivo del telescopio. Un ejemplo es el sistema mostrado en la figura 2.3 [17].

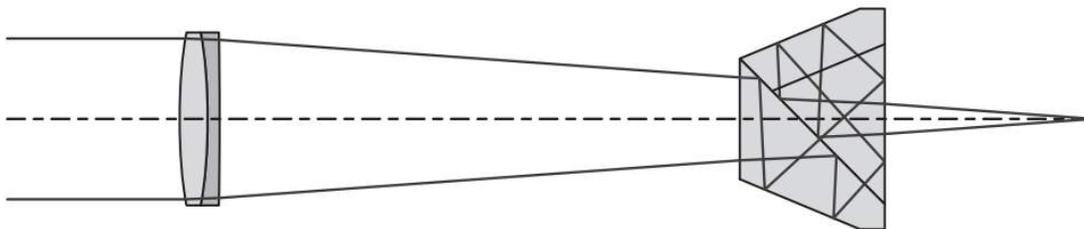


Figura 2.3. Telescopio terrestre con un objetivo telescópico $f/10$ y un prisma Schmidt-Pechan [17].

2.4 Retículas para telescopios refractores

Una retícula nos permite afinar la puntería sobre a un objetivo, independientemente del tipo de objetivo y de retícula que usemos [18].

Para el uso nocturno y al atardecer de una mira réflex, es una ventaja que sea posible obtener una imagen brillante de la retícula, y poder variar también la intensidad de la imagen de la retícula. Para ello, normalmente se suministran fuentes de iluminación en la retícula para una imagen de retícula brillante. Como se ilustró en la figura 1.11 existen varias opciones para iluminar una retícula.

Se puede presentar diferentes tipos de retículas. En la figura 2.4 se exponen los cuatro tipos de retículas más comúnmente utilizadas. El tamaño de las retículas puede expresarse en MOA [19].

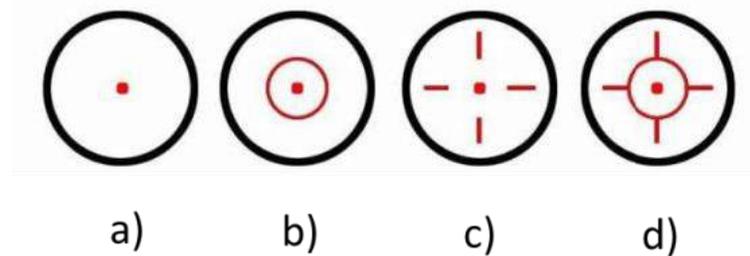


Figura 2.4. Retículas: a) punto, b) punto y círculo, c) punto y cruz y d) diana [18].

El nombre de MOA corresponde al arcmin del inglés a “**Minute Of Angle**” o Minuto de Ángulo, por lo tanto el MOA es una “medida angular” que corresponde a la sesentava parte o (1/60) de un grado de ángulo. Es decir, si elegimos un grado de un grado, y lo dividimos en 60 partes, cada parte corresponde a un MOA.

Como ejemplo, se toma el valor de 1 MOA a 100 yardas (91.44 metros) y equivale a 1.145 pulgadas de distancia transversal. Adaptando estos valores a nuestro sistema métrico decimal, el valor de 1 MOA a 100 metros equivale a 2.9 cm de distancia transversal. (que normalmente se redondea a 3 cm).

Al ser una medida angular, el valor de la distancia transversal varía en relación a la distancia de tiro. Así, a 50 metros su valor será la mitad de 100, 1.45 cm; a 200 metros el doble que, a 100 m, 6 cm; y así sucesivamente.

Distancia transversal equivalente de un MOA a diferentes distancias en metros de forma aproximada:

- 1 MOA= 3 cm a 100 m.
- 1 MOA= 6 cm a 200 m.
- 1 MOA= 9 cm a 300 m.

- 1 MOA= 12 cm a 400 m.
- 1 MOA= 15 cm a 500 m.

A continuación, en la figura 2.5 se muestra la relación entre el valor del MOA y la distancia de tiro a diferentes distancias medidas en metros, desde cero metros a doscientos metros. Mediante este sistema se puede alinear de forma efectiva la mira réflex a múltiples distancias de tiro [20].

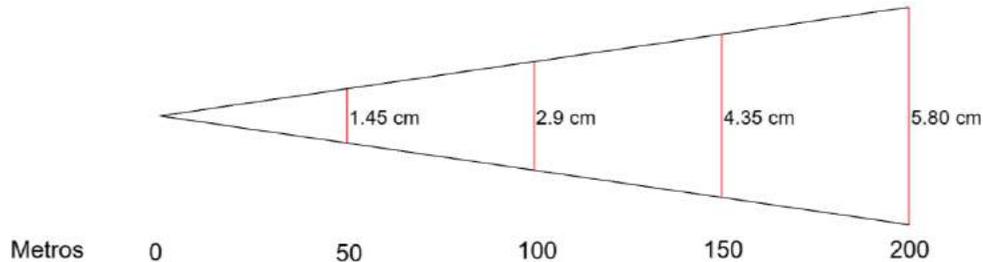


Figura 2.5. Sistema de centrado para una mira réflex utilizando el MOA.

Hay una gran variedad de miras réflex que utilizan a la medida angular MOA para centrar las miras réflex a la distancia de tiro deseada [20]. A continuación, se mostrará algunos ejemplos de miras réflex que cuentan con esta característica:

Mira réflex con 2 MOA:

- Mira aimpoint punto rojo 9000sc.
- Mira aimpoint punto rojo hunter h3ol.
- Mira aimpoint punto rojo micro h-2.

Mira réflex con 4 MOA:

- Mira aimpoint punto rojo micro h-2.
- Mira aimpoint punto rojo micro h-1.
- Mira aimpoint punto rojo 9000l.
- Mira aimpoint punto rojo 9000sc.

Mira réflex con 6 MOA:

- Mira aimpoint punto rojo micro s-1.

2.5 Fibra óptica fluorescente

Las fibras ópticas son guías dieléctricas ópticas que transmiten luz, las cuales se caracterizan por tener una estructura compuesta por un núcleo y un revestimiento, tal como se ilustra en la figura 2.6. El núcleo es por donde viaja la luz y se encuentra en el centro del filamento. El revestimiento envuelve el núcleo y permite el principio de la reflexión total interna, que se caracteriza cuando el índice de refracción n_1 en el núcleo es mayor que n_2 en el revestimiento para que la luz pueda viajar en la fibra óptica [21].

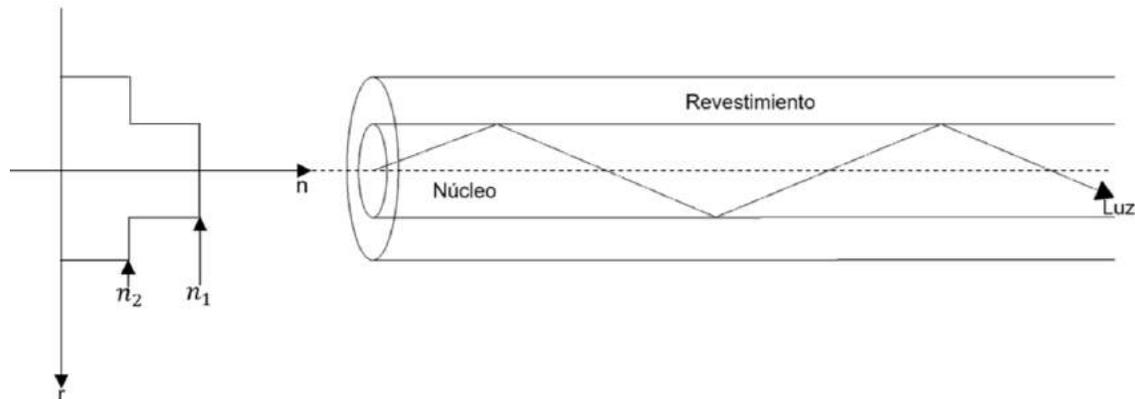


Figura 2.6. Estructura básica de una fibra óptica.

Las fibras ópticas pueden estar hechas de vidrio-vidrio, vidrio-plástico y plástico-plástico (núcleo-revestimiento). Las fibras ópticas de vidrio están diseñadas para transmitir datos a larga distancia y alta velocidad, mientras que las fibras ópticas de plástico están diseñadas para transmitir datos a baja velocidad y corta distancia. Adicionalmente tanto las fibras de plástico como las fibras de vidrios tienen otras aplicaciones como en sensores, láseres e iluminación etc. [22].

En la iluminación hay un tipo especial de fibra óptica de plástico llamadas fibras fosforescentes de plástico y ópticas fluorescentes, este trabajo se enfocó en estas últimas.

Las fibras ópticas de plástico fluorescentes (FOPF) tienen una estructura similar a las fibras ópticas de plástico, excepto las (FOPF) se caracterizan por una excitación comúnmente de manera lateral, mientras que en las fibras ópticas convencionales para telecomunicaciones la luz se inserta en los extremos debidamente preparados y limpios. Además, el núcleo de las fibras ópticas fluorescentes está dopado con algunos colorantes como la rodamina, cumarina y perileno. Su material base puede ser polimetilmetacrilato (PMMA), poliestireno [23] [24] y otros, pero el más común es el (PMMA), cuya estructura química se muestra en la figura 2.7.

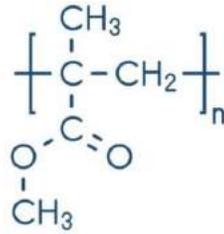


Figura 2.7. Estructura química del PMMA [25].

El revestimiento ocupa polímeros fluorados con PMMA, como el politetrafluoroetileno (PTFE) tal como se ilustra en la figura 2.8, hexafluoropropileno, fluoruro de vinilideno (THV) y otros.

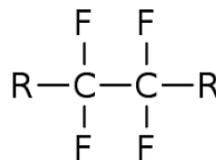


Figura 2.8. Estructura química del PTFE [26].

La fluorescencia es un proceso por el cual las moléculas absorben fotones de una banda de color (normalmente longitudes de onda más bajas) y emiten fotones de otro color (normalmente longitudes de onda más altas).

En la figura 2.9 se describen los procesos subyacentes del espectro de fluorescencia y el origen del tiempo de vida de la fluorescencia. Para entender los espectros de fluorescencia, es fundamental conocer lo que ocurre en las moléculas cuando interactúan con la luz. En el diagrama de la izquierda (diagrama de Jablonski), los grupos de líneas denominados S_0 y S_1 representan los niveles de energía electrónica (estados) de una molécula. Puede haber muchos de estos a energías cada vez más altas. La energía más baja se encuentra en la parte inferior del diagrama de Jablonski y la longitud de las flechas es proporcional a la energía de la transición. La energía es inversamente proporcional a la longitud de onda, por lo que cuanto más larga es la flecha, más corta es la longitud de onda en el espectro. Además, dentro de cada nivel de energía hay una serie de niveles vibracionales (etiquetados $v=1-4$) [27].

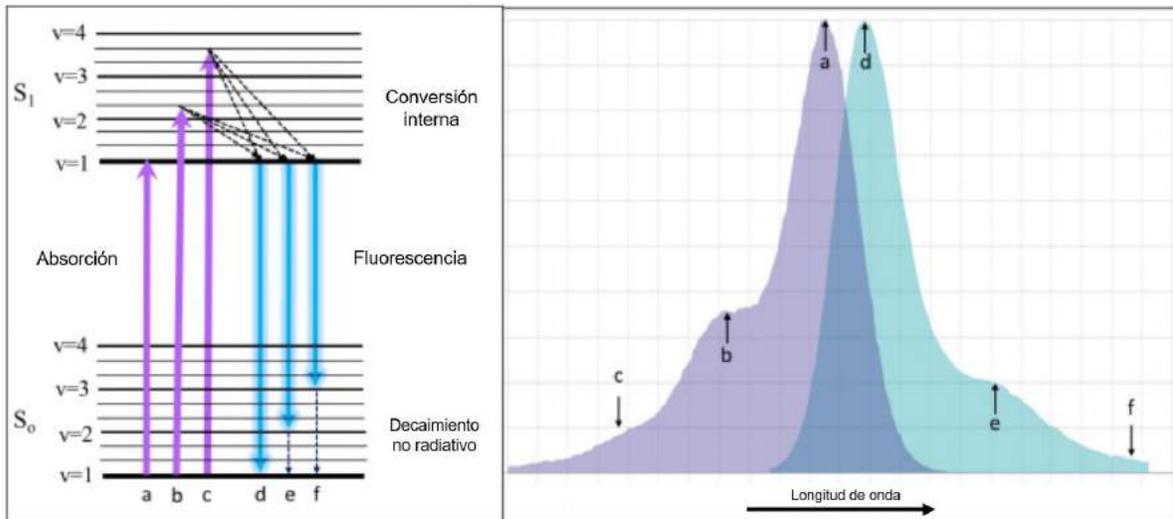


Figura 2.9. Diagrama de Jablonski (izquierda): la longitud vertical de las flechas es proporcional a la energía de la transición. Espectros de absorción (púrpura) y emisión (azul) correspondientes (derecha) con los picos vibracionales marcados [27].

Las moléculas pasan la mayor parte de su vida en el estado básico (S_0) con preferencia en los subniveles más bajos, aunque todos ellos están poblados. Cuando un fotón con la energía correcta interactúa con la molécula, éste es absorbido (líneas moradas) y termina en el estado excitado (S_1) con preferencia en los subniveles más bajos. Debido a que hay muchas moléculas que tienen uniones eléctricas vibracionales ligeramente diferentes y por lo tanto subniveles de energía, el espectro de absorción se amplía en el espectro que solemos ver (la zona morada de la izquierda). A menudo, aún es posible distinguir los niveles vibracionales del estado excitado (etiquetados a-c).

Una vez en los subniveles de estado excitado, las moléculas se relajan mediante un proceso no radiativo relacionado con la liberación de energía térmica a la red polimérica hasta el nivel vibracional más bajo en S_1 (en unos pocos nanosegundos). Esta relajación suele ser el origen del "Corrimiento Stokes". A partir de $v=1$ de S_1 , se produce la fluorescencia (flechas azules brillantes); entonces se emiten fotones y la molécula se encuentra de nuevo en el estado básico S_0 distribuida entre todos los subniveles, pero preferentemente en los más bajos. De forma similar a la absorbancia, la superposición de las bandas de fluorescencia también puede observarse en el espectro de fluorescencia (d-f). La fluorescencia se encuentra siempre a una energía más baja (longitud de onda más larga) que la absorción [27]. Tomando en cuenta los procesos de absorción y emisión utilizando el diagrama Jablonski en la figura 2.10 se ilustra esquemáticamente el proceso de captación de

la luz visible cuando se excita de manera lateral dentro de una fibra óptica de plástico fluorescente.

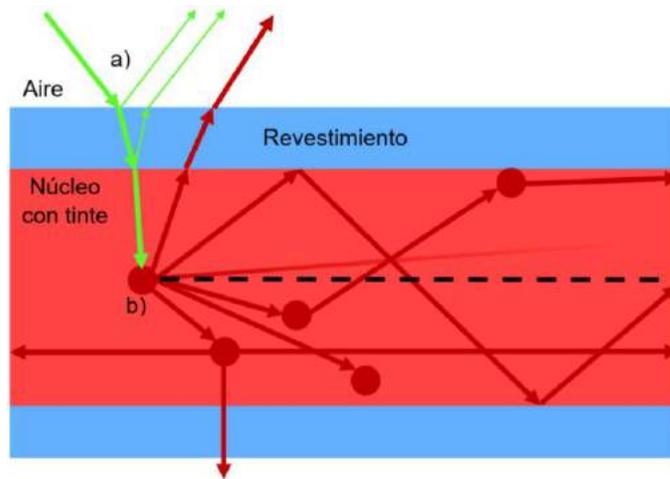


Figura 2.10. Principio del funcionamiento básico de una fibra óptica de plástico fluorescente [26].

La figura 2.10 muestra el núcleo y el revestimiento, el núcleo tiene unos círculos que representan los colorantes, y el proceso de fotoluminiscencia se lleva a cabo cuando parte de la luz que llega lateralmente se acopla a la fibra. Sin embargo, no toda la luz absorbida llegará al extremo de la fibra. Existen múltiples pérdidas de energía que pueden ocurrir a lo largo de la longitud de la fibra, tales como, procesos radiativos; procesos de reabsorción y esparcimiento [28].

El proceso de fotoluminiscencia en la FOPF se describe en la figura 2.10. La luz llega de manera lateral tal como se ilustra en el inciso a), se muestra la reflexión en la interfaz entre dos medios, finalmente la luz se ve refractada y pasa hasta el núcleo donde intercepta con una de las moléculas de colorante la cual lo absorbe y emite otra longitud de onda como se muestra en el inciso b) [26], al emitir pueden darse diferentes factores:

- Parte de la luz emitida no cumple con la condición de la reflexión total interna (RTI) y se ve fugada a través del revestimiento.
- Parte de la luz esparcida y convertida a otro color cumple con la condición (RTI) y es conducida a través de la FOPF.

En FOPF se han reportado el uso de diferentes colorantes. Uno de los más utilizados es la rodamina 6G o 590 que es un colorante catiónico con una fuerte de absorción en el visible y un alto rendimiento de fluorescencia.

El espectro de absorción y emisión de un PMMA dopado con rodamina 6G [29] se muestra en la figura 2.11.

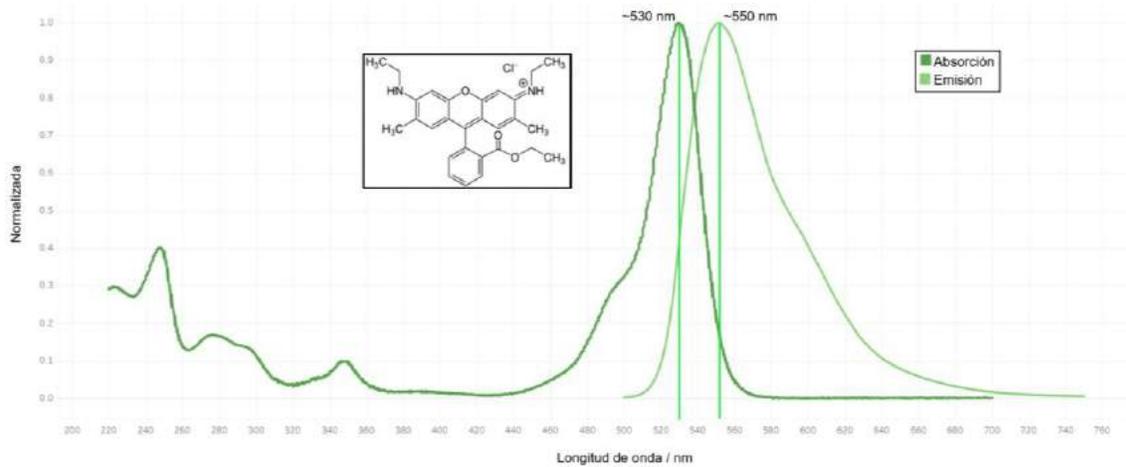


Figura 2.11. Espectro de absorción y emisión de la rodamina 6G en PMMA [30].

En el recuadro inserto en la figura 2.11 se puede observar la estructura molecular de la rodamina 6G [31] y el pico de absorción visible es ~530 nm (región verde), mientras que emite en una banda cuyo pico es ~550 nm (región verde).

Otro colorante es la rodamina B que presenta una fuerte absorción en el visible y un alto rendimiento de fluorescencia en la región de 602 nm [23]. El espectro de absorción y emisión de un PMMA dopado con rodamina B se muestra en la figura 2.12.

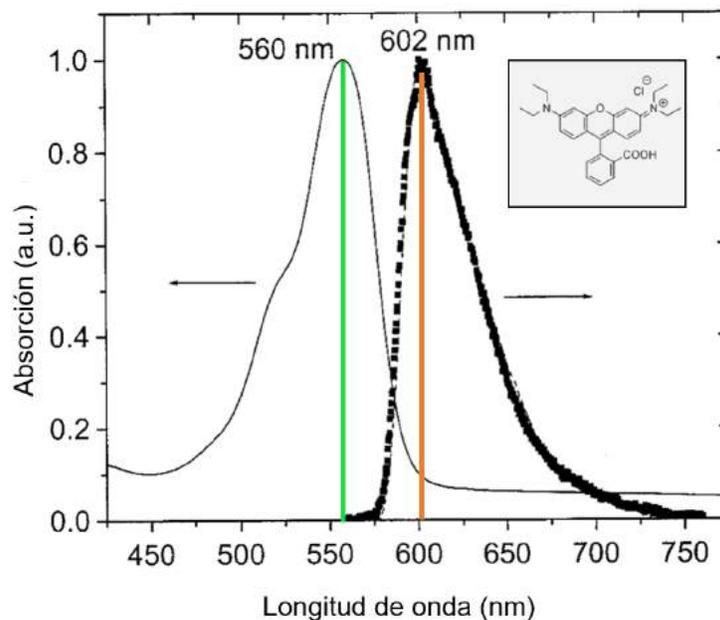


Figura 2.12. Espectro de absorción y emisión de la rodamina B en PMMA [23].

En el recuadro inserto en la figura 2.12 se puede observar la estructura molecular de la rodamina B [23] y se puede observar que el pico de absorción visible es ~560 nm (región verde), mientras que emite en una banda cuyo pico es ~602 nm (región naranja).

Cabe agregar, que existen otros colorantes para obtener diferentes tonos a partir de este mismo proceso de fluorescencia [28], como se muestran las guías de plástico fluorescente en la figura 2.13.

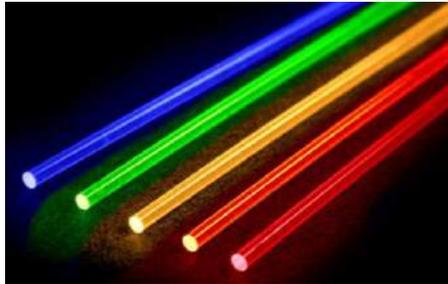
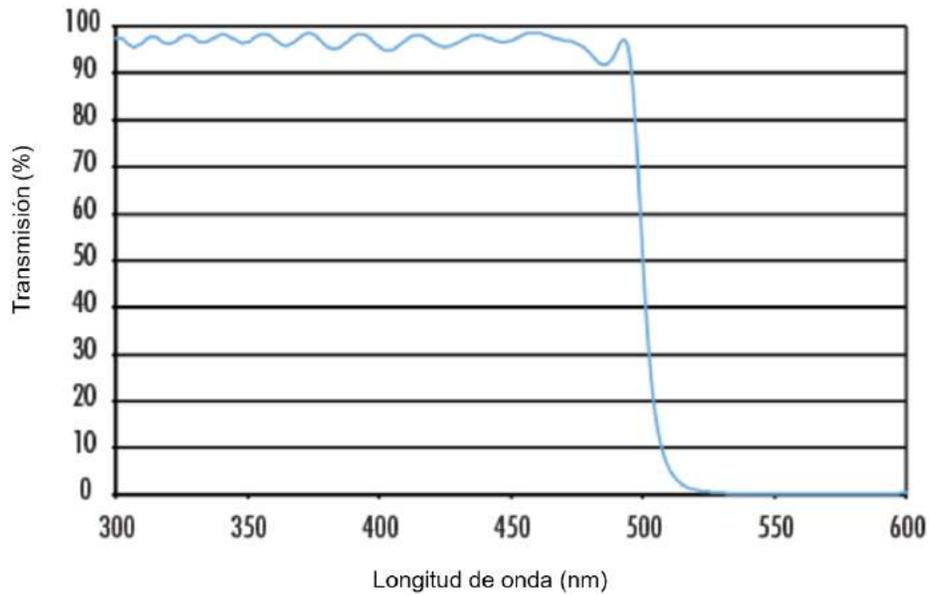


Figura 2.13. Guías de plástico fluorescentes con distintos colores [32].

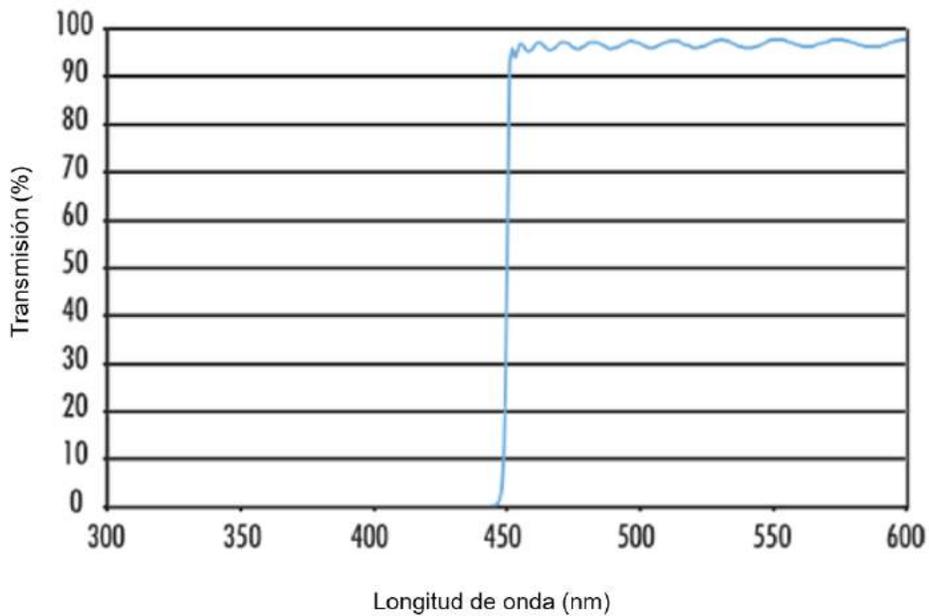
Por último, es importante mencionar que las FOPF son ligeras, delgadas, de alta durabilidad, son altamente brillantes, flexibles y resistentes. También hay una variedad de diámetros, lo que permite una fácil manipulación por parte del usuario y su uso en aplicaciones de longitud corta [33]. Además, tiene aplicaciones en publicidad, direccionamiento, y miras réflex entre otros [34] [35].

2.6 Filtros ópticos

Es un medio que sólo permite el paso a través de la luz con ciertas propiedades, suprimiendo o atenuando la luz restante. Los filtros ópticos más comunes son los filtros de color, es decir, aquellos que impiden el paso a una porción del espectro visible de la fuente luminosa o reflector de luz, absorbiendo y transmitiendo selectivamente. Hay varios tipos de filtros como: dicróicos, polarizadores, espacial, entre otros [36], pero cuando una aplicación tiene requisitos específicos de ancho de banda o longitud de onda central que no están fácilmente disponibles, los filtros de pasa altas y pasa bajas se pueden apilar para crear un filtro de paso de banda personalizado. Los filtros de pasa altas son filtros ópticos que reflejan longitudes de onda cortas mientras transmiten o pasan longitudes de onda largas. Por el contrario, los filtros de pasa bajas transmiten longitudes de onda cortas, pero reflejan las largas. En las siguientes gráficas se representan ejemplos de ambos [37].



Gráfica 2.1. Filtro de pasa bajas de 500 nm [37].



Gráfica 2.2. Filtro de pasa largas de 450 nm [37].

2.7 El ojo humano

Los primeros estudios serios sobre el ojo humano fueron realizados por Helmholtz, como se describe en su libro *Handbuch de Physiologischen Optik*. Los estudios

oculares continuaron a finales del siglo XIX con los trabajos pioneros de Gullstrand. En la figura 2.14 se presenta un diagrama del ojo humano [17].

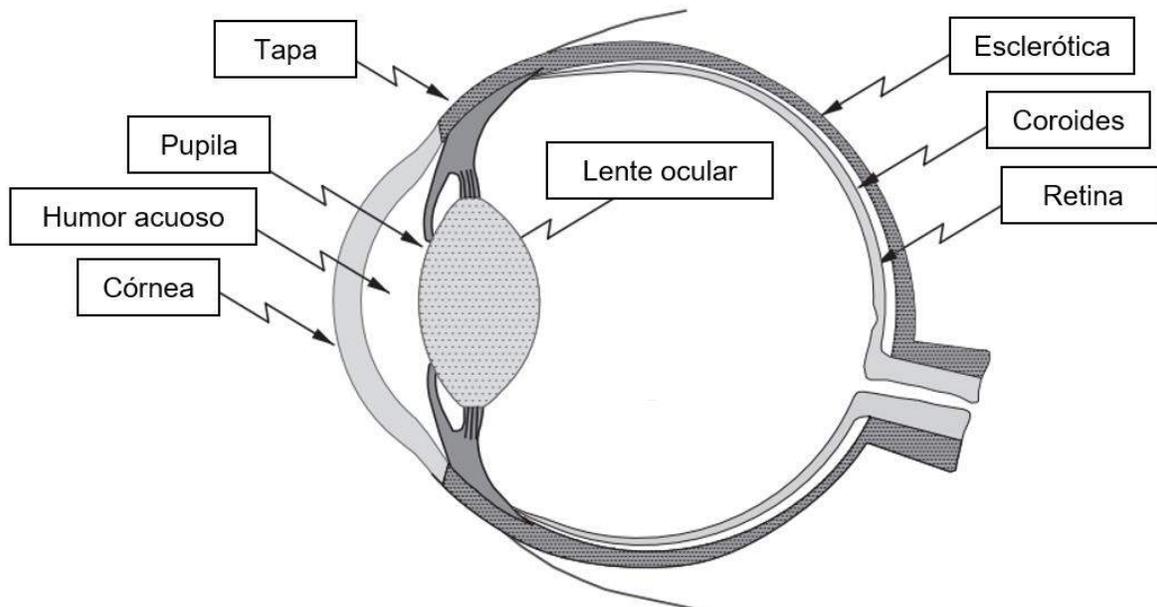


Figura 2.14. Esquema del ojo humano [17].

Y en la tabla 2.1 se enumeran sus principales constantes ópticas.

Tabla 2.1. Constantes ópticas medias del ojo humano (modelo de Gullstrand) [17].

Longitud total	24.75 mm
Diámetro de la pupila	1.5-8 mm
Distancia focal efectiva	22.89 mm
Potencia total (no acomodada)	58.6 dioptrías
Potencia de la lente (no acomodada)	19 dioptrías
Potencia de la córnea	43 dioptrías
Radio de curvatura corneal	7.98 mm
Índice de refracción del humor acuoso	1.336
Índice de refracción de la lente	
Centro	1.406
Borde	1.386
Índice de refracción del vítreo	1.337

Los componentes ópticos más importantes del ojo son los siguientes:

- **Cornea:** Es el tejido transparente frontal del ojo. Su forma ideal normal es casi esférica, con un poder dióptrico de aproximadamente 43 dioptrías. Cualquier desviación de su forma ideal produce errores de refracción. Si adopta una forma toroidal, con curvaturas diferentes a lo largo de dos diámetros mutuamente perpendiculares, aparece el astigmatismo corneal.
- **Pupila:** Es la abertura circular situada delante del ojo y está rodeada por el iris. La pupila aumenta o disminuye su diámetro para controlar la cantidad de luz que entra en el ojo. El diámetro máximo de la pupila, con niveles de iluminación bajos (noche clara), es de unos 8 mm y el diámetro mínimo con niveles de iluminación altos (día soleado) es de cerca de 1.5 mm. Su diámetro medio es de aproximadamente 3-4 mm (oficina bien iluminada).
- **Lente ocular:** Se trata de una lente flexible, también llamada cristalino, cuya potencia óptica puede ser modificada por los músculos ciliares. Aumenta la potencia (acomodación) para enfocar objetos cercanos y relaja su forma para enfocar objetos lejanos. El núcleo de esta lente tiene un índice de refracción superior al de sus partes externas. El cristalino relajado tiene una potencia dióptrica de aproximadamente 15 dioptrías y puede aumentar (amplitud de acomodación) aproximadamente 15 dioptrías en los niños o aproximadamente 0.5 dioptrías en las personas mayores [17].

2.7.1 Sistemas ópticos visuales

En los sistemas ópticos visuales, el detector final de la imagen es el ojo humano. Una característica importante es el hecho de que el ojo se mueve girando en su órbita. En tercer lugar, el ojo tiene la capacidad de enfocar, lo que se denomina acomodación [17].

2.7.2 Ubicación de la pupila de salida en sistemas ópticos visuales

La imagen final de un instrumento visual se forma en la retina de un ojo humano. Si el ojo es emétrepe, es decir, si no tiene ningún error de refracción, la imagen virtual proporcionada por el instrumento tiene que estar situada a una distancia infinita. El acoplamiento del instrumento visual al ojo se realiza situando el ojo cerca de la pupila de salida del instrumento. La distancia entre la última superficie óptica del sistema y la pupila de salida se denomina alivio de ojo (eye relief).

El alivio de ojo debe ser de al menos 10 mm para proporcionar suficiente espacio para las pestañas, 15 mm para una visión más cómoda, o incluso 20 mm para las personas que llevan gafas. En el caso de las miras para rifles, el alivio de ojo debe ser aún mayor, al menos 60 mm, para dejar espacio al retroceso del rifle.

Otra consideración que se debe hacer con respecto a la pupila de salida en los instrumentos visuales es su ubicación óptima con respecto al ojo observador. Se suele decir que la pupila de salida del instrumento debe estar en el mismo plano que la pupila del ojo observador. Sin embargo, en algunos instrumentos, una mejor ubicación es en el centro del globo ocular [17].

En la figura 2.15 se muestra la pupila de salida del sistema visual y el ojo observador.

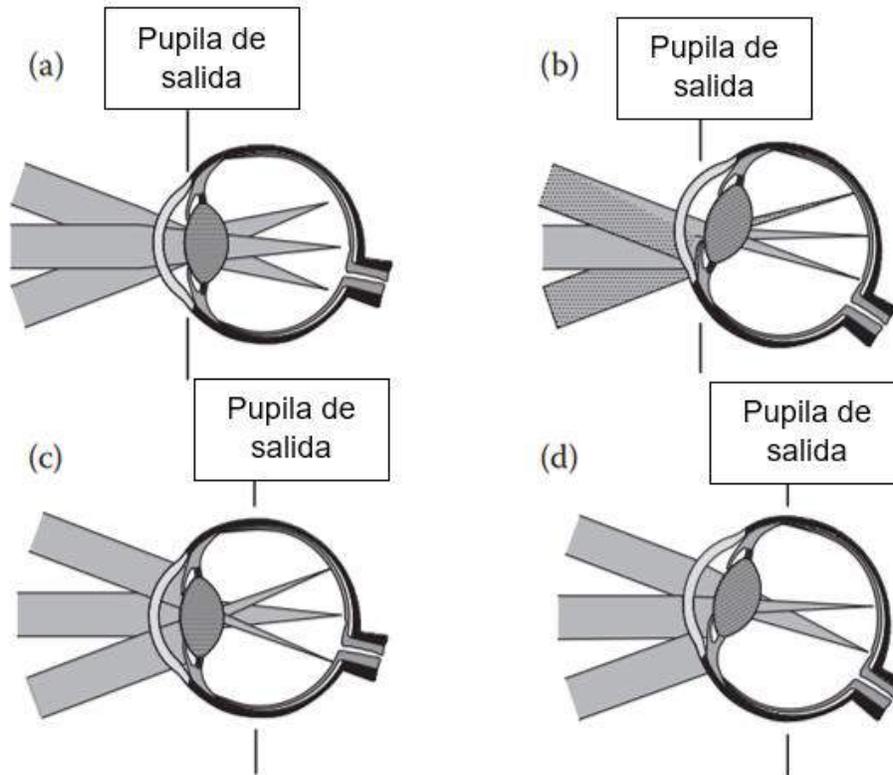


Figura 2.15. Diferentes posiciones del ojo observador con respecto a la pupila de salida del sistema visual [17].

En la figura 2.15 de los incisos a) y b), la pupila de salida del sistema y la pupila del ojo están en el mismo plano. Si el objeto de interés es pequeño y está situado en el centro del campo, se observa todo el campo, pero sólo se define claramente el objeto del centro. Cuando un objeto está en la periferia, se observa como en la figura 2.15 del inciso b), girando el globo ocular alrededor de su centro. Ahora, el objeto en la periferia del campo se ve claramente, pero mucho más débil, a menos que la cabeza se desplace ligeramente de forma lateral para centrar de nuevo la pupila de salida del sistema con la pupila del ojo. Por lo tanto, esta posición del ojo observador

con respecto a la pupila de salida es correcta si los objetos de interés son pequeños y están cerca del eje óptico. Un ejemplo típico es un telescopio astronómico visual. Luego para el siguiente caso en el que los objetos de interés están distribuidos uniformemente por todo el campo y la pupila de salida del sistema está en el centro del globo ocular, como se muestra en la figura 2.15 de los incisos c) y d). Ahora, el ojo tiene que moverse continuamente al ocular para observar el objeto de interés en un momento dado. Todos los objetos observados en cualquier posición dentro del campo tendrán la misma eficacia luminosa. Sin embargo, los objetos situados en el lado opuesto del eje óptico del objeto de interés serán mucho más tenues o incluso invisibles. Aparecerán brillantes y claros si el ojo se gira para observar en esa dirección. Esta posición de la pupila de salida del sistema es adecuada para lentes oftálmicas o sistemas de campo amplio en los que los objetos de interés se encuentran en todo el campo. Si la pupila de salida del sistema óptico es mucho menor que la pupila del ojo, la tolerancia en la posición del ojo a lo largo del eje óptico es mucho mayor.

Todas las consideraciones anteriores se han hecho suponiendo que la posición de la pupila de salida del instrumento óptico visual se define independientemente de la pupila del observador. Esto no es cierto en algunos sistemas ópticos en los que el tope del sistema es la pupila del ojo del observador, como en una lupa, una lente oftálmica o un telescopio galileano. En estos casos, es evidente que la pupila de salida debe considerarse en el centro de rotación del globo ocular [17].

2.8 Análisis de alternativas y definición de la propuesta

A nivel comercial se puede encontrar una amplia variedad de miras réflex, como se muestra en la tabla 2.2 donde se destacan algunas de sus principales características.

Tabla 2.2. Miras réflex comerciales.

Figura	Nombre	Descripción
	Trinity force.	Usa un conjunto de cuatro retículas: Punto, punto círculo y Diana. Ofrece dos colores (rojo y verde).
	MEPRO 21.	Emplea una fibra óptica de plástico fluorescente y una cápsula de tritio como fuente de iluminación y sin pilas.
	Ak 47	Funciona sin batería, utiliza una fibra óptica de plástico fluorescente para iluminar la retícula.
	ACOG	En uso nocturno, las retículas de estas miras están iluminadas por un fósforo interno de tritio, material radioactivo que emite luz propia. En uso diurno, utiliza una delgada fibra óptica de plástico fluorescente que canaliza la luz solar hacia el interior de la retícula y no requiere de baterías.
	Pilad pfo 1x28.	Construcción muy simple. Utiliza una guía óptica para iluminar a la retícula, no requiere de baterías.

Algunos de estos ejemplos destacan algunas de sus principales características. Como se puede notar, la mira réflex Trinity Force utiliza dos leds (rojo y verde) como fuente de iluminación y es la única que maneja 4 tipos de retículas en forma selectiva, así mismo puede operar en cualquier momento (día o noche). Sin embargo, tiene la desventaja de que la batería se descarga rápidamente, por lo que debe cambiarse frecuentemente. Las miras réflex Ak 47 y ACOG emplean una fibra fluorescente como fuente de iluminación, tienen la ventaja de que no ocupan batería, pero requieren de una buena iluminación ambiental para operar

eficientemente. La mira réflex Mepro 21 emplean una la fibra fluorescente y una cápsula de tritio como fuente de iluminación. Tiene la ventaja de que no ocupa batería y puede operar en cualquier momento con el inconveniente de que la cápsula de tritio es difícil de conseguir. Cabe resaltar que el tritio es un material radiactivo que no ofrece ningún riesgo para el usuario de la mira, sin embargo, el proceso de obtención y encapsulado del tritio es altamente peligroso. Por su parte, la mira réflex Pilad pfo 1x28 presenta la construcción más simple. Esta utiliza una guía óptica fluorescente como fuente de iluminación y ofrece prestaciones similares a las miras réflex Ak 47 y ACOG.

Por lo tanto, para la fabricación de un prototipo de mira réflex con amplificación óptica con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente acordamos los siguientes datos: una amplificación de 2x con un tamaño del objetivo de 25 mm, un diámetro de la pupila de salida de 10 mm, campo de vista (FOV) aproximadamente de 7°, un alivio de ojo (eye relief) de 70 mm, el dispositivo cuyo de largo no exceda los 150 mm y, además, poseería una retícula de color rojo iluminada por una fibra óptica de plástico fluorescente.

Después se inició la búsqueda de los materiales para crear el prototipo. Para el caso del sistema óptico se utilizó dos dobletes, uno para el objetivo y el otro para el ocular), tal como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 2.3. Datos de la lente ocular y objetivo [38] [39].

Lente ocular (#32-323)		Lente objetivo (#49-360)	
Diámetro (mm)	25.00 + 0.0/-0.025	Diámetro (mm)	25.00 + 0.0/-0.025
Distancia focal efectiva EFL (mm)	50 ± 2	Distancia focal efectiva EFL (mm)	100 ± 2
Distancia focal posterior BFL (mm)	43.53	Distancia focal posterior BFL (mm)	95.92
Especificación de longitud focal, longitud de onda (nm)	587.60	Especificación de longitud focal, longitud de onda (nm)	587.60
Apertura transparente CA (mm)	24.00	Apertura transparente CA (mm)	24.00
Radio R1 (mm)	34.53	Radio R1 (mm)	61.47
Radio R2 (mm)	-21.98	Radio R2 (mm)	-44.64

Radio R3 (mm)	-214.63
Grosor del borde ET (mm)	8.79
Sustrato	N-BAF10/N-SF10
F/#	2.00
Apertura numérica NA	0.25
Rango de longitud de onda (nm)	400-700

Radio R3 (mm)	-129.94
Grosor del borde ET (mm)	6.61
Sustrato	N-BK7/N-SF5
F/#	4.00
Apertura numérica NA	0.13
Rango de longitud de onda (nm)	400-1000

Se utilizaron dobletes para reducir lo más posible las aberraciones y cumplir con las características mencionadas, después para el sistema erector, se ocuparon dos prismas; un prisma Schmidt y un semiprisma pentagonal, los cuales juntos forman un prisma Schmidt-Pechan, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.4. Datos del prisma Schmidt-Pechan [40].

Prisma Schmidt-Pechan (#36-039)	
Sustrato	N-Bk7
Altura (mm)	50.45 ± 0.1
Calidad de la superficie	40-20
Espesor (mm)	32.04 ± 0.1
Desviación del rayo (°)	0
	400-700

Rango de longitud de onda (nm)	
Planitud de la superficie (PV)	$\lambda/8$
Ancho (mm)	29 ± 0.1
Tolerancia de desviación de rayos (arcmin)	± 10

Para mantener la longitud o igual de 5.80" (14.732 cm) de la mira y se mantuviera en el mismo eje óptico ya que a comparación de lentes se iba a largar el sistema óptico y sería, mayor a la longitud deseada. Por último, para el sistema réflex se utilizó una fibra óptica de plástico fluorescente que absorbe la luz del ambiente, un filtro dicroico que a 45° pueda reflejar la zona roja y transmitir la luz visible, esto se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 2.5. Datos del Filtro dicroico de pasa bajas [41].

Filtro dicroico de pasa bajas (#69-204)	
Diámetro (mm)	25
Ángulo de incidencia (°)	45.00
Longitud de onda de corte (nm)	600.00
Sustrato	Sílice fundida
Transmisión de polarización P (%)	>80
Reflexión (%)	>97 Polarización media
Longitud de onda de reflexión (nm)	625-795
	>80

Transmisión de polarización S (%)	
Espesor (mm)	1.05 ± 0.1
Transmisión (%)	>85 Polarización media
Longitud de onda de transmisión (nm)	400-580
Rango de longitud de onda (nm)	400-795

Capítulo 3: Diseño y ensamble experimental de mira réflex

En esta sección se mencionan los arreglos ópticos realizados, el primero una mira óptica no inversora y segundo una mira óptica con inversor. Así mismo se probaron diferentes distancias para conseguir un sistema afocal, sin embargo, en caso de que los conjugados no coincidieran sería un sistema formador de imagen con distancia focal.

3.1 Arreglo experimental de telescopio refractor terrestre

Se comenzó determinando D de la mira réflex, para esto se utilizaron dos dobletes con diámetro de 25 mm, el primero para la posición del lente objetivo con su distancia focal de 100 mm ($F_{obj} = 100 \text{ mm}$) y el segundo para la posición de la lente ocular con su distancia focal de 50 mm ($F_{oc} = 50 \text{ mm}$).

Entonces ocupando la ecuación 2.1, se sustituyen los valores tal como se muestra en la ecuación 3.1.

$$D = 100 \text{ mm} + 50 \text{ mm}. \quad (3.1)$$

La longitud es:

$$D = 150 \text{ mm}. \quad (3.2)$$

Posteriormente para obtener la amplificación se usó la ecuación 2.5 sustituyendo los valores como se observa en la ecuación 3.3.

$$M = \frac{100 \text{ mm}}{50 \text{ mm}}. \quad (3.3)$$

La amplificación es:

$$M = 2x. \quad (3.4)$$

También, es muy importante determinar l , utilizando la ecuación 2.3. Sustituyendo los valores se puede calcular l tal como se muestra en la ecuación 3.5.

$$l = \frac{50 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} (100 \text{ mm} + 50 \text{ mm}). \quad (3.5)$$

La posición del diámetro de la pupila de salida (alivio de ojo) es:

$$l = 75 \text{ mm}. \quad (3.6)$$

Y por último el D_{ps} , se obtuvo utilizando la ecuación 2.6 y sustituyendo los valores como se ilustra en la ecuación 3.7.

$$2x = \frac{25 \text{ mm}}{D_{ps}}. \quad (3.7)$$

Despejando D_{ps} , nos queda:

$$D_{ps} = \frac{25 \text{ mm}}{2}. \quad (3.8)$$

Por lo tanto:

$$D_{ps} = 12.5 \text{ mm}. \quad (3.9)$$

Para el montaje del sistema óptico afocal, que está compuesto por dos dobletes, se utilizó el programa OSLO edu para diseñar y simular. En la tabla 3.1 se observa los datos ingresados.

Tabla 3.1. Sistema óptico afocal.

Superficies	Radio de curvatura (mm)	Espesor (mm)	Material
1	61.47	6	N-BK7
2	-44.64	2.5	N-SF5
3	-129.94	139.5	Aire
4	214.63	2.5	N-SF10
5	21.98	9	N-BAF10
6	-34.53	-	Aire

En la figura 3.1, se muestra el diagrama esquemático del sistema óptico afocal.

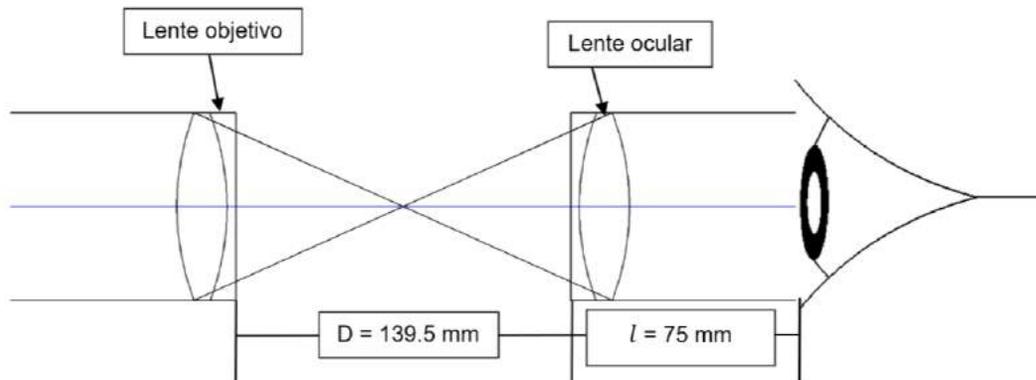


Figura 3.1. Diagrama esquemático del sistema óptico afocal (no a escala).

Para desarrollar el sistema erector se utilizaron dos prismas; un prisma Schmidt y un semiprisma pentagonal, los cuales juntos forman un prisma Schmidt-Pechan, también se utilizó el programa para su diseño y simulación. En la tabla 3.2 y 3.3 se observa los datos ingresados.

Tabla 3.2. Sistema óptico afocal con sistema erector.

Superficies	Radio de curvatura (mm)	Espesor (mm)	Material
1	61.47	6	N-BK7
2	-44.64	2.5	N-SF5
3	-129.94	53	Aire
4	-	20	N-BK7
5	-	77	Aire
6	214.63	2.5	N-SF10
7	21.98	9	N-BAF10
8	-34.53	-	Aire

Tabla 3.3. Sistema óptico focal con sistema erector.

Superficies	Radio de curvatura (mm)	Espesor (mm)	Material
1	61.47	6	N-BK7
2	-44.64	2.5	N-SF5
3	-129.94	36	Aire
4	-	20	N-BK7
5	-	55	Aire
6	214.63	2.5	N-SF10
7	21.98	9	N-BAF10

8	-34.53	-	Aire
---	--------	---	------

La figura 3.2, se muestra el diagrama.

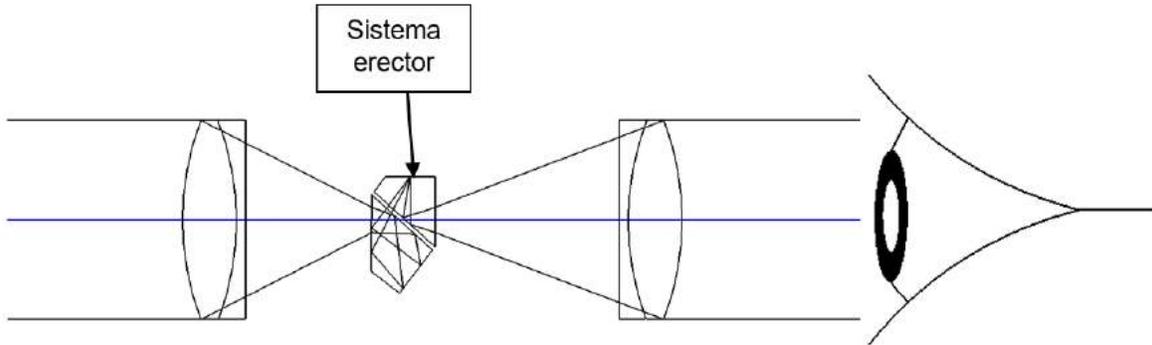


Figura 3.2. Diagrama esquemático del sistema óptico afocal con sistema erector.

Por último, para el sistema focal de la retícula iluminada, se utilizó el programa para diseñarlo. En la tabla 3.4 se observa los datos ingresados.

Tabla 3.4. Sistema focal de la retícula iluminada.

Superficies	Radio de curvatura (mm)	Espesor (mm)	Material
1	34.53	9	N-BAF10
2	-21.98	2.5	N-SF10
3	-214.63	-	Aire

La figura 3.3, se muestra el diagrama.

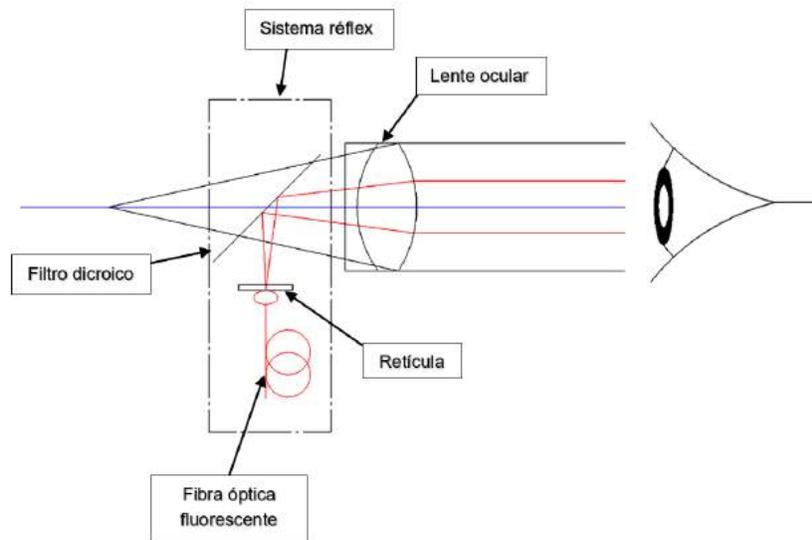


Figura 3.3. Diagrama esquemático del sistema focal de la retícula iluminada.

A continuación, en la tabla 3.5 se presenta una lista del material utilizado.

Tabla 3.5. Lista de materiales.

Cantidad	Material
1	Doblete en porta-lente, $\varnothing = 25 \text{ mm}$, $f_{obj} = 100 \text{ mm}$ (Lente objetivo)
1	Doblete en porta-lente, $\varnothing = 25 \text{ mm}$, $f_{oc} = 50 \text{ mm}$ (Lente ocular)
1	Riel óptico de 1 m
1	Hoja de papel vegetal
1	Cartón 80 x 80 mm, con agujero en el centro $\varnothing = 10 \text{ mm}$
1	Lampara luz blanca
1	Pantalla de observación
1	Prisma Schmidt-Pechan, Longitud= 20 mm

Para el arreglo óptico de un sistema afocal, primero se colocaron los dos dobletes en el riel óptico, después para hacer funcionar el lente objetivo como difusor, se iluminó el lente objetivo con la lámpara difundida por una hoja de papel vegetal pegada a éste, tal como se ilustra en la figura 3.4.

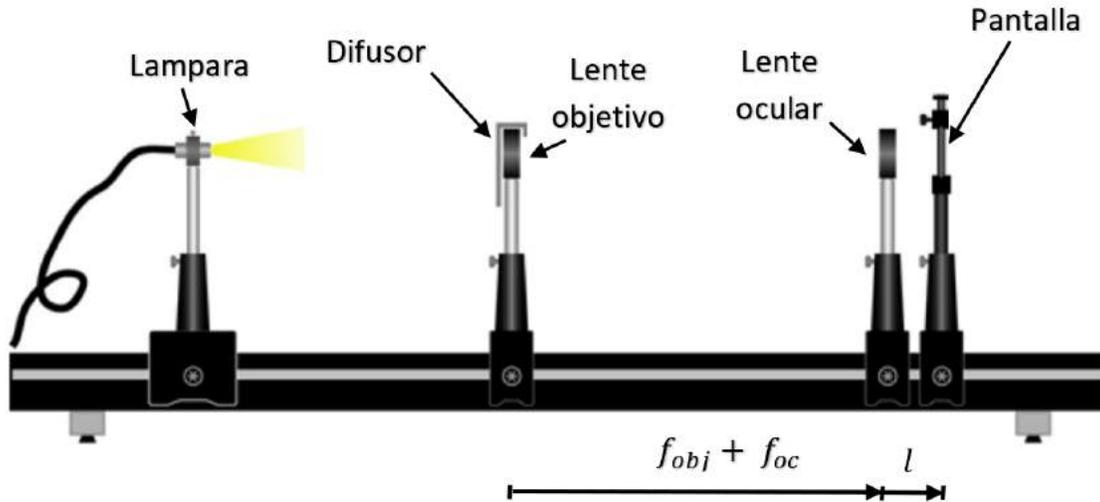


Figura 3.4. Esquema del arreglo experimental del sistema afocal [42].

En la figura 3.5, se muestra el arreglo óptico para determinar la posición y el tamaño de la pupila de salida, donde se tuvo que ajustar la pantalla a una distancia de 70 mm (alivio de ojo), observando una imagen bien definida.

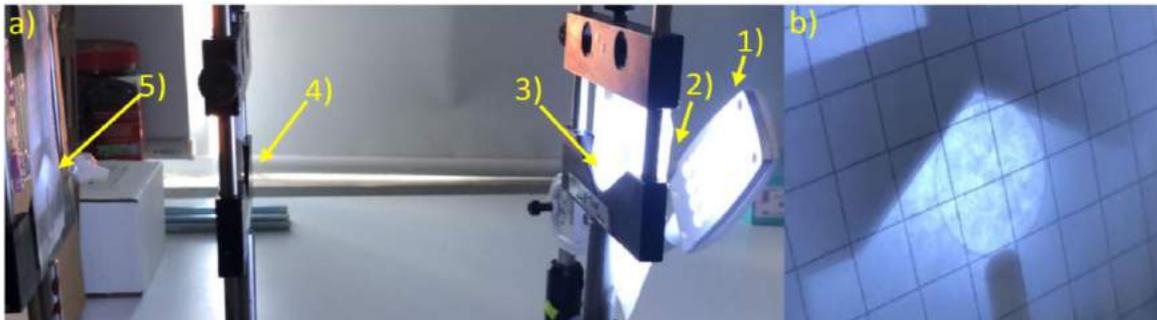


Figura 3.5. Arreglo óptico para la medida de la posición y el tamaño de la pupila de salida. a) 1) es la lámpara de luz blanca, 2) se colocó la hoja de papel vegetal, 3) se situó el lente objetivo con $f_{obj} = 100$ mm más la $f_{oc} = 50$ mm como la lente ocular 4) y en 5) se encuentra la pantalla de observación de $l = 70$ mm. Finalmente, en b) se observa el tamaño de la pupila de salida, $D_{ps} = 11$ mm.

Posteriormente se agregó el cartón (pupila de entrada) al arreglo experimental como se muestra en la figura 3.6.

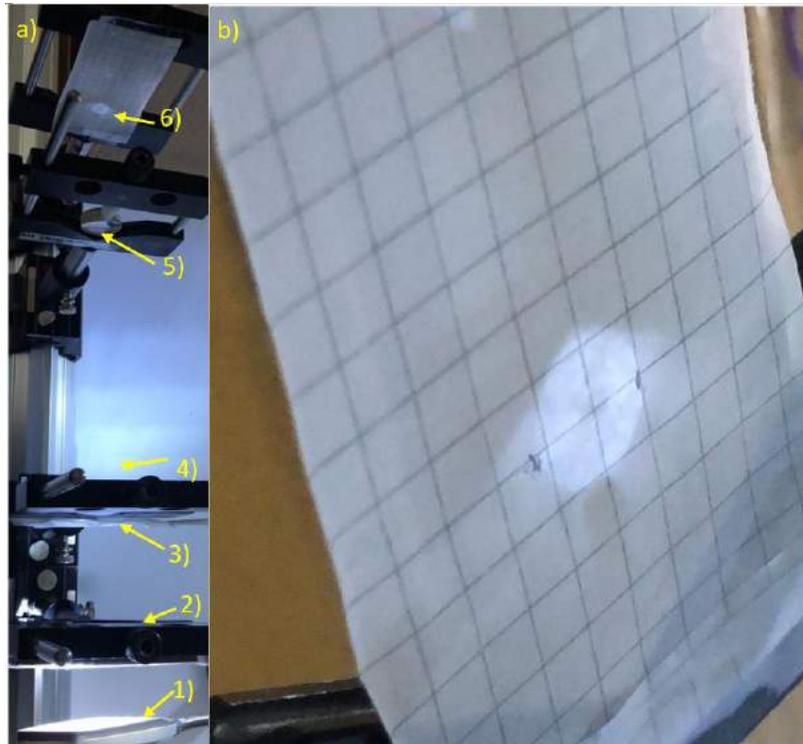


Figura 3.6. Arreglo óptico con pupila de entrada, con diámetro de 10 mm. a) 1) es la lámpara de luz blanca, 2) se colocó el cartón (pupila de entrada) en el arreglo experimental, 3) es la hoja de papel vegetal, 4) es el lente objetivo de $f_{obj}= 100$ mm más la $f_{oc}= 50$ mm como la lente ocular 5) y el 6) se encuentra la pantalla de observación. Finalmente, en b) se observa el tamaño de la pupila de salida, $D_{ps}= 10$ mm.

En seguida se quitó el cartón (pupila de entrada) del arreglo experimental y se agregó como sistema erector el prisma Schmidt-Pechan para la posición y el tamaño de la pupila de salida, donde se tuvo que ajustar la pantalla a una distancia de 70 mm (alivio de ojo), observando una imagen bien definida tal como se muestra en la figura 3.7.

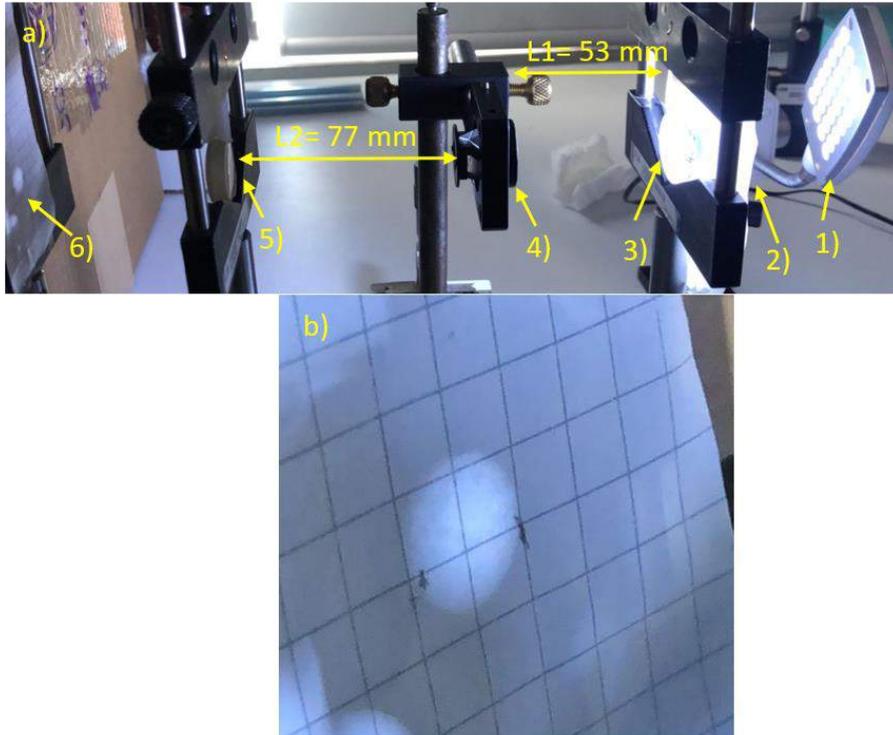


Figura 3.7. Arreglo óptico para la medida de la posición y el tamaño de la pupila de salida con sistema erector utilizando un prisma Schmidt-Pechan. a) 1) es la lámpara de luz blanca, 2) es la hoja de papel vegetal, 3) es el lente objetivo de $f_{obj} = 100$ mm, 4) se colocó el prisma Schmidt-Pechan, 5) es una lente ocular de $f_{oc} = 50$ mm, y en 6) se encuentra la pantalla de observación de $l = 70$ mm. Finalmente, en b) se observa el tamaño de la pupila de salida, $D_{ps} = 10$ mm.

Luego para comprobar las miras ópticas con objetos próximos, fue necesario modificar las distancias del arreglo óptico para reenfocar, pero para el nuevo objeto, el sistema sigue siendo afocal.

Para realizar correctamente el enfoque de un objeto próximo, se enfocó un objeto a 100 m de distancia, enseguida se desplazó la lente objetivo hacia la lente ocular hasta alcanzar una imagen nítida, tal como se observa en la figura 3.8.

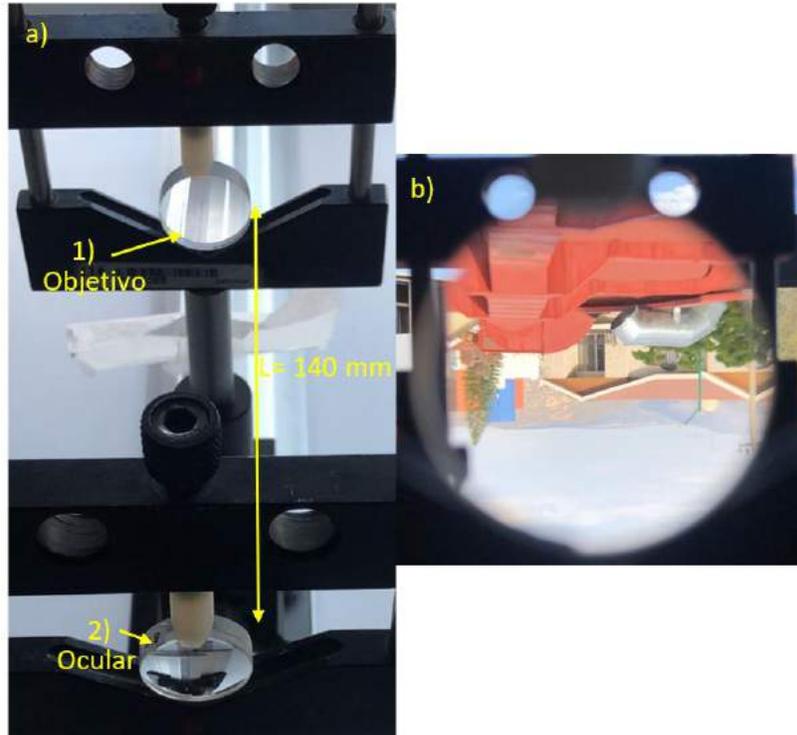


Figura 3.8. a) 1) se colocó el lente objetivo de $f_{obj} = 100$ mm, 2) se colocó la lente ocular de $f_{oc} = 50$ mm. En b) se observa la imagen invertida vista a través de la lente ocular.

Enseguida se agregó el cartón (pupila de entrada) al arreglo experimental tal como se muestra en la figura 3.9.

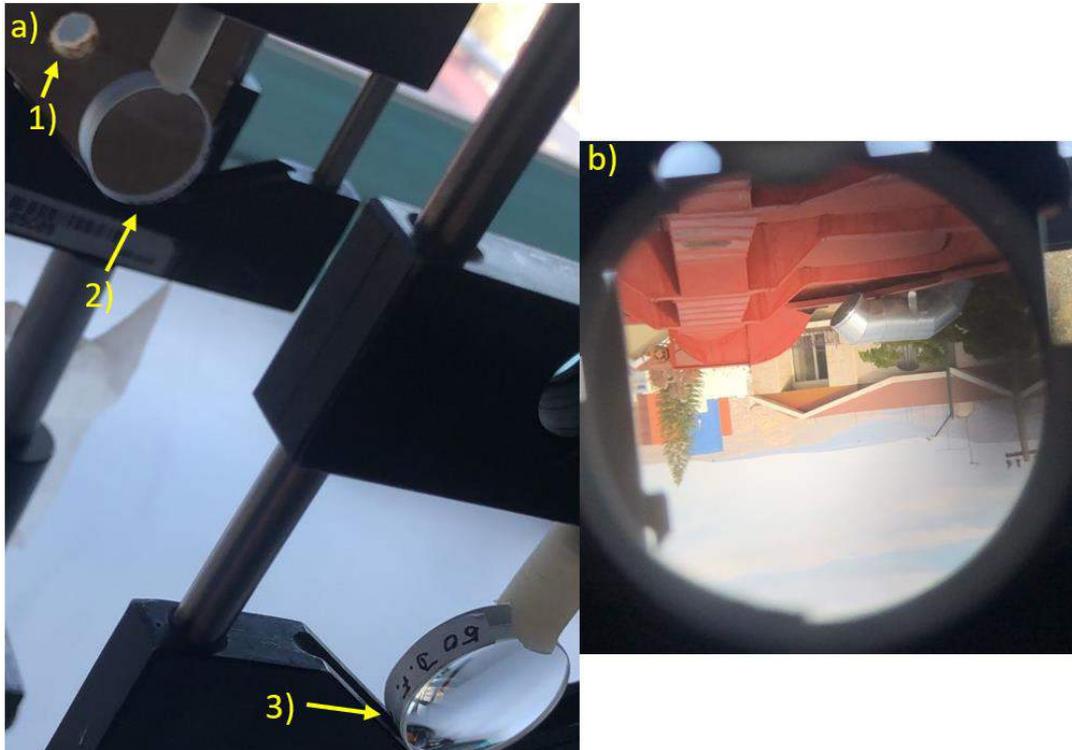


Figura 3.9. Arreglo óptico con pupila de entrada, con diámetro de 10 mm. a) 1) se agregó el cartón (pupila de entrada) al arreglo experimental, 2) es el lente objetivo de $f_{obj}= 100$ mm y 3) es la lente ocular de $f_{oc}= 50$ mm. En b) se observa la imagen invertida vista a través de la lente ocular.

Luego se quitó el cartón (pupila de entrada) y se agregó entre los dos dobletes el prisma Schmidt-Pechan como sistema erector, como se ilustra en la figura 3.10.

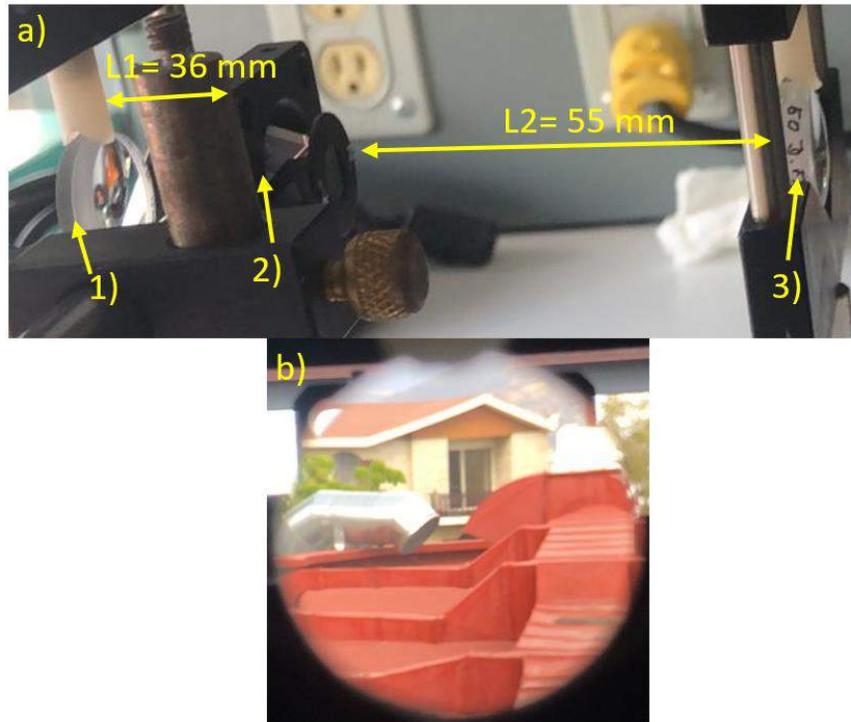


Figura 3.10. a) 1) es el lente objetivo de $f_{obj} = 100$ mm, 2) se colocó el prisma Schmidt-Pechan y el 3) es la lente ocular de $f_{oc} = 50$ mm. En b) se observa la imagen vista a través de la lente ocular.

Posteriormente se colocó el cartón (pupila de entrada) en el arreglo experimental como se muestra en la figura 3.11.

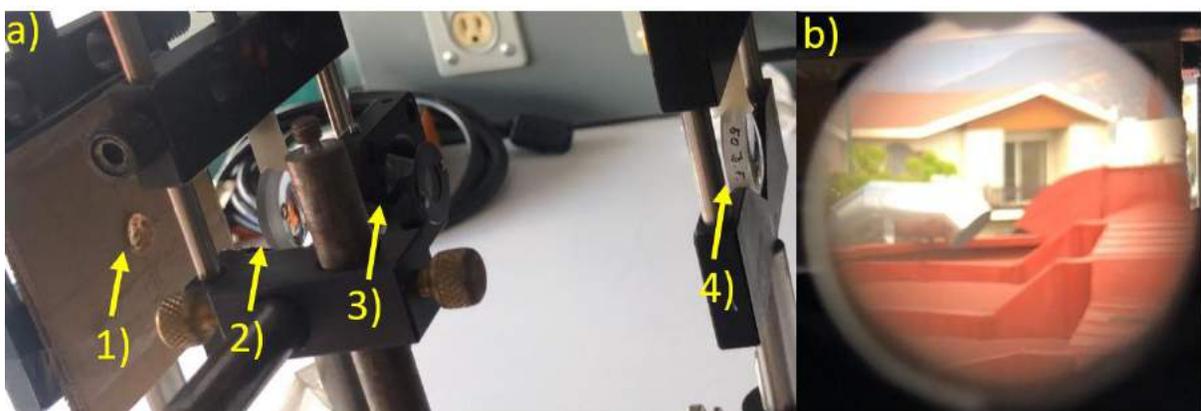


Figura 3.11. Arreglo óptico con pupila de entrada, con diámetro de 10 mm. a) 1) se colocó el cartón (pupila de entrada) en el arreglo experimental, 2) es el lente objetivo de $f_{obj} = 100$ mm, 3) es el prisma Schmidt-Pechan, 4) es la

lente ocular de $f_{oc} = 50$ mm. En b) se observa la imagen vista a través de la lente ocular.

En esta sección se presenta el concepto del sistema réflex y su diseño del sistema de iluminación de la retícula iluminada. También el uso de la fibra óptica de plástico fluorescente, y el análisis de optimización de acoplamiento del sistema réflex al sistema óptico.

3.2 Arreglo experimental de sistema de retícula iluminada

El arreglo del sistema réflex está compuesto por una fibra óptica de plástico fluorescente que emite en la banda del rojo, una retícula de transmisión y un filtro dicróico. La fibra óptica de plástico fluorescente tiene una abertura numérica de 0.63, un diámetro de 0.96 mm y una longitud de 1 m. En la tabla 3.6 se muestra las especificaciones de la fibra óptica de plástico fluorescente que se utilizó.

Tabla 3.6. Estructura de la fibra óptica de plástico fluorescente [33].

Fibra óptica de plástico fluorescente	
Material del núcleo	Polimetilmetacrilato (PMMA)
Material de revestimiento	Polímero fluorado
Rango del diámetro del núcleo, incluido el revestimiento	1 mm \pm 3 %
Grosor del revestimiento de 0.040" (micrómetros)	10 a 30
Apertura numérica NA	0.63 (ángulo de aceptación de 39°)
Componente de tinte	Sí
Límite de temperatura	85°C

En la figura 3.12 se ilustran los espectros de trasmisión y absorción de la fibra óptica de plástico fluorescente.

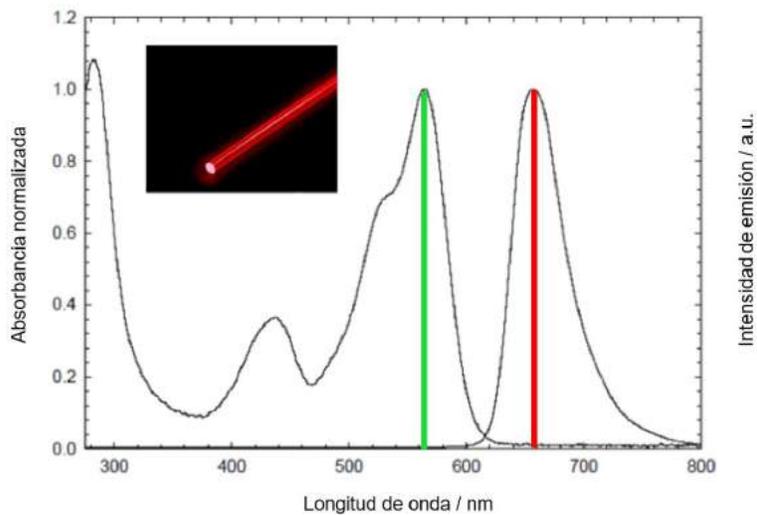


Figura 3.12. Espectro de absorción y emisión de la fibra óptica de plástico fluorescente. [33].

En la figura 3.12 se puede observar una fotografía de la fibra óptica de plástico fluorescente y se puede observar que el pico de absorción visible es ~560 nm (región verde), mientras que emite en una banda cuyo pico es ~660 nm (región naranja).

Por último, con la ayuda del microscopio digital nacional DC3-163 con una lente de objetivo de 10x y con una lente ocular de 10x, como se muestra en la siguiente figura 3.13.

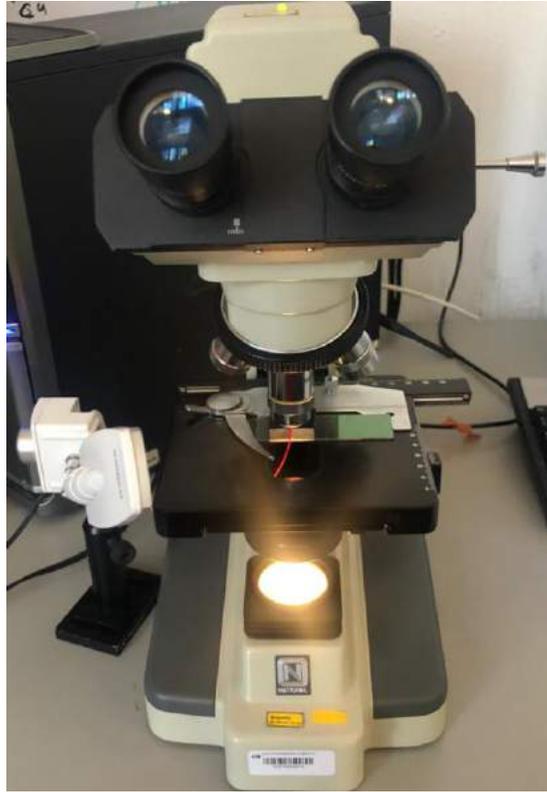


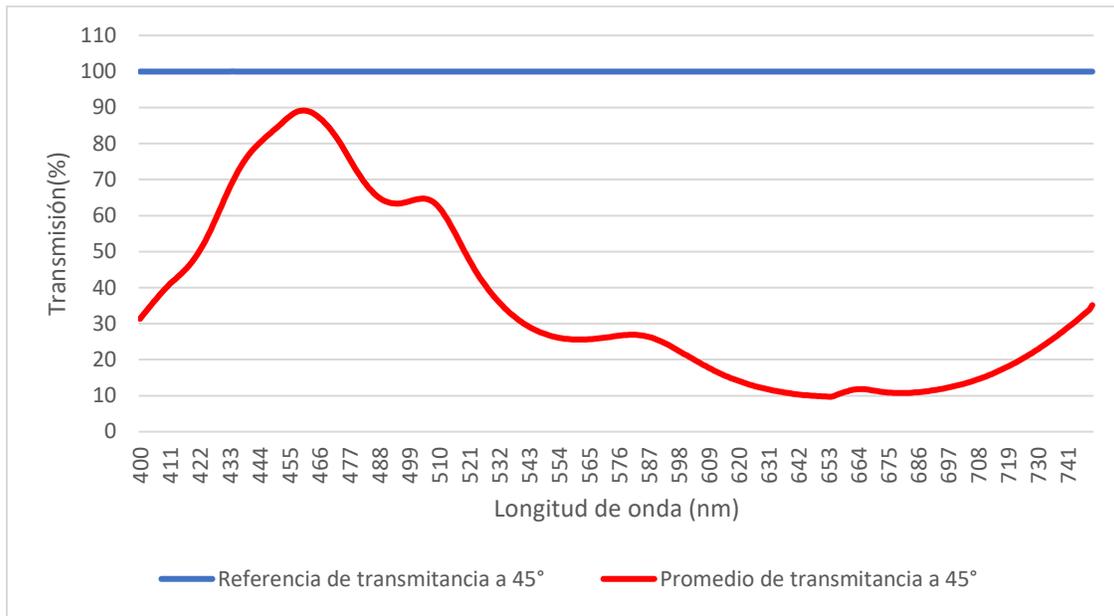
Figura 3.13. Microscopio digital nacional DC3-163.

Se pudo observar el resultado si se cortara una fibra óptica de plástico fluorescente con el filo de la navaja, como se ilustra en la figura 3.14.

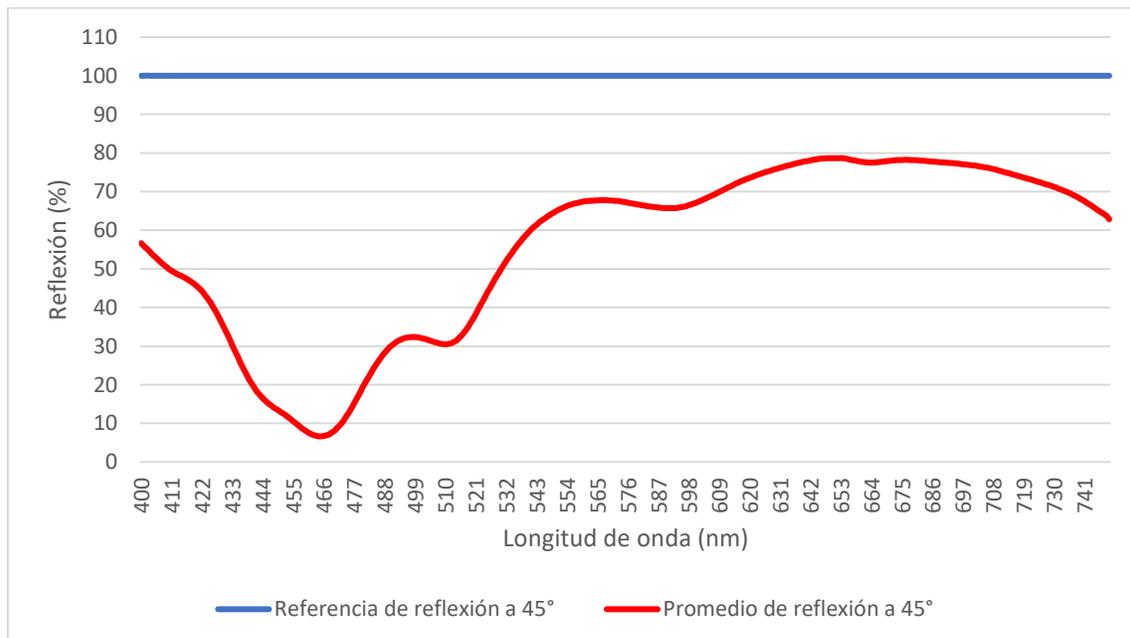


Figura 3.14. Corte de la fibra óptica de plástico fluorescente vista a través del microscopio.

El filtro dicróico a 45°, con la ayuda del taller óptico en el Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. (CIO) se pudo medir su espectro de reflexión de 600-705 nm y un espectro de transmisión de 400-750 nm tal como se muestra en las siguientes gráficas.



Gráfica 3.1. Espectro de transmisión.



Gráfica 3.2. Espectro de reflexión.

El filtro dicróico fue elaborado en el CIO. Para la integración del sistema réflex al sistema óptico, primero se colocó la lente ocular junto con el sistema réflex, que está constituido por una fibra óptica de plástico fluorescente, una retícula de transmisión con soporte de aluminio reflejando con el filtro dicróico con una inclinación de 45°, en el riel óptico, para enfocar la retícula iluminada, después se agregó la lente objetivo y se modificaron las distancias para efectuar el enfoque. Y por último se agregó entre los dos dobles el prisma Schmidt-Pechan tal como se muestra en la figura 3.15.

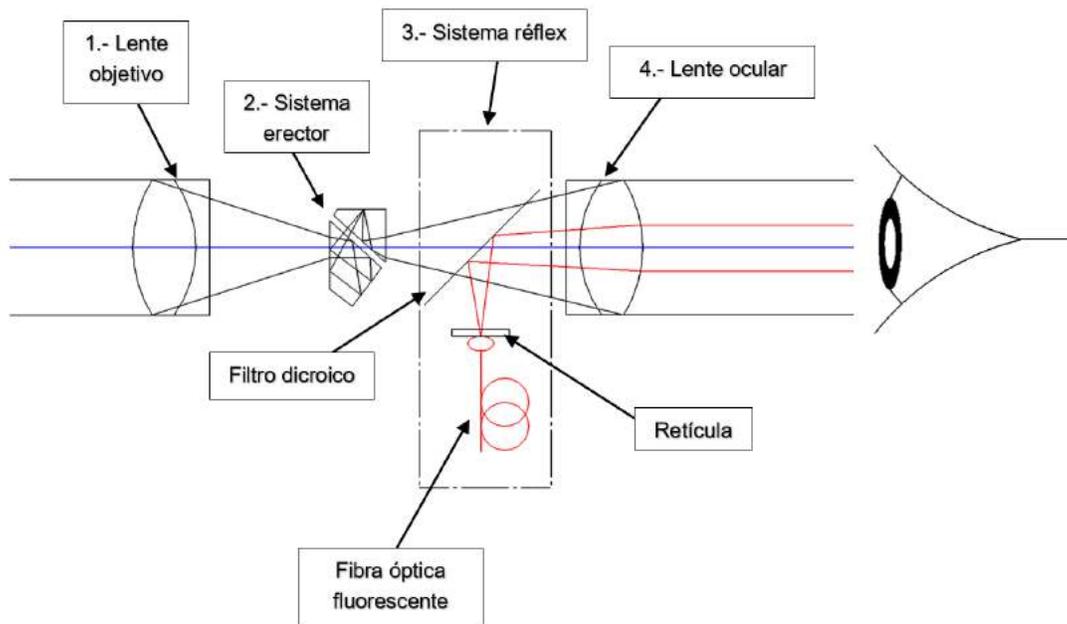


Figura 3.15. Diagrama esquemático del sistema óptico con el sistema réflex.

3.3 Integración experimental de la mira réflex

A continuación, en la tabla 3.7 se presenta una lista del material utilizado.

Tabla 3.7. Lista de materiales.

Cantidad	Material
1	Doblete en porta-lente, $\varnothing = 25 \text{ mm}$, $f_{obj} = 100 \text{ mm}$ (Lente objetivo)
1	Doblete en porta-lente, $\varnothing = 25 \text{ mm}$, $f_{oc} = 50 \text{ mm}$ (Lente ocular)
1	Riel óptico de 1 m
1	Pantalla de observación
1	Prisma Schmidt-Pechan, Longitud= 20 mm

1	Fibra óptica de plástico fluorescente
1	Filtro dicróico
1	Retícula con soporte de aluminio

En la figura 3.16, se muestra la integración del sistema réflex al sistema óptico para enfocar un objeto.

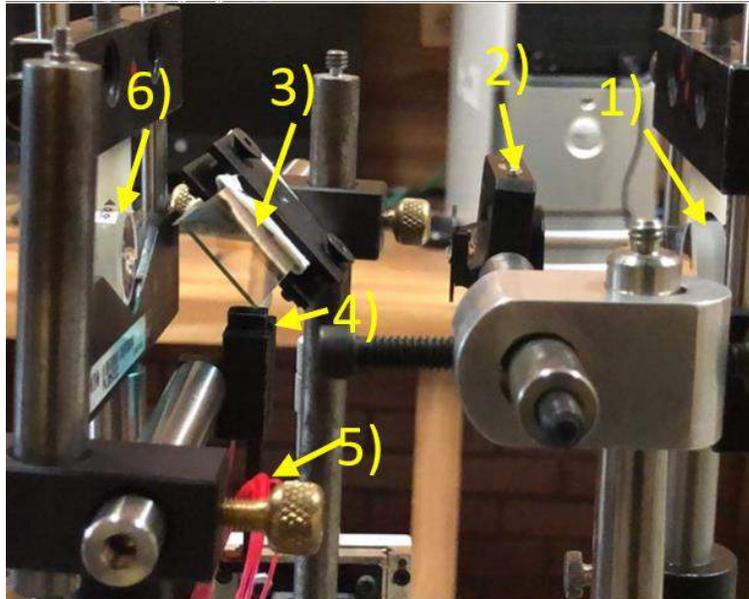


Figura 3.16. Arreglo experimental para enfocar a un objeto próximo. 1) Es el lente objetivo de $f_{obj}= 100$ mm, 2) es el prisma Schmidt-Pechan, 3) es el filtro dicróico, 4) la retícula con soporte de aluminio, 5) la fibra óptica de plástico fluorescente y 6) es la lente ocular $f_{oc}= 50$ mm.

Enseguida se presenta el funcionamiento del sistema réflex. La luz natural incide lateralmente sobre la fibra óptica de plástico fluorescente. Ésta absorbe en la banda del visible y emite en la banda del rojo, la luz roja guiada por el extremo derecho de la fibra óptica de plástico fluorescente incide sobre la máscara de transmisión. A su vez la retícula de transmisión proyecta la retícula iluminada sobre al filtro dicróico y refleja solo la banda roja a la lente ocular. En este caso, la retícula iluminada presenta un patrón de un punto y un círculo como se observa en la figura 3.17.

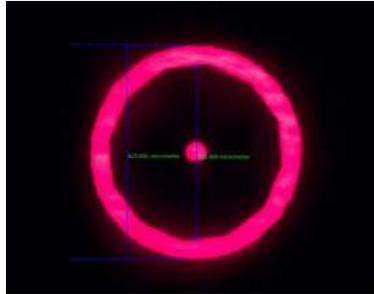


Figura 3.17. Máscara de transmisión de acrílico.

En la figura 3.17 se muestra la máscara de transmisión de acrílico con un espesor de 3 mm con una película de cromo, que presenta un patrón de transmitancia con un hueco en el centro y una abertura circular. El diámetro del hueco central es 60 μm y los diámetros interno y externo de la abertura circular son de 500 y 620 μm respectivamente.

Para realizar correctamente el enfoque de un objeto próximo, se enfocó un objeto a 940 mm de distancia, como se observa en la figura 3.18.

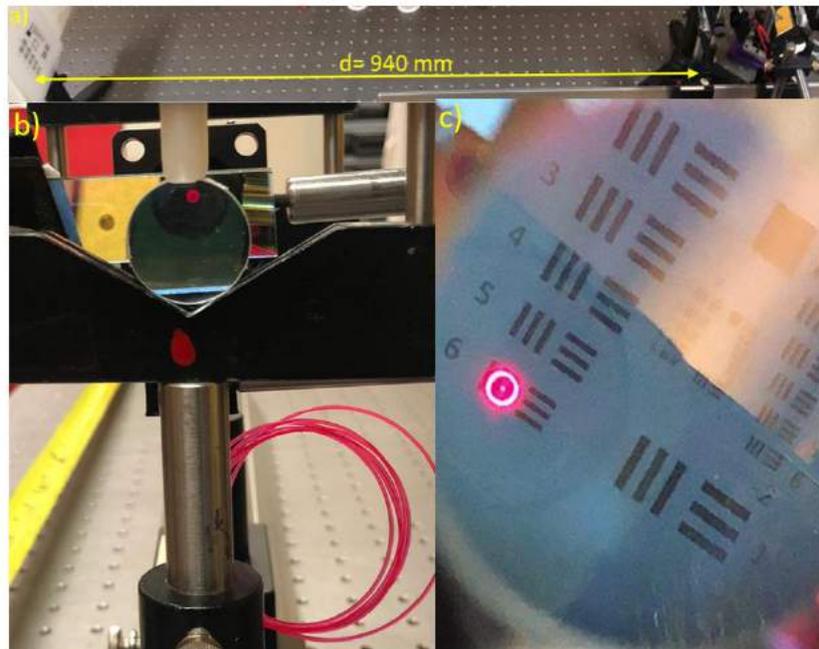


Figura 3.18. a) se enfocó un objeto a una distancia de 940 mm. b) se observa el punto y un círculo (retícula iluminada) bien iluminado vista a través de la lente ocular. En c) se observa la retícula iluminada bien definida.

3.4 Caracterización y análisis de resultados

Mediante el programa de diseño óptico se procedió a realizar el análisis del sistema óptico afocal, el sistema óptico afocal y focal con sistema erector y el sistema focal de la retícula iluminada. Se obtuvieron sus diagramas de aberración transversal, diagrama de manchas, PSF, MTF y distribución radial de energía:

a) Para las aberraciones transversales se obtuvieron los siguientes análisis de rayos:

Se puede observar el análisis de rayos, que contiene diferentes evaluaciones basadas en varios grados de campo de visión y también muestra astigmatismo, aberración esférica longitudinal, cambio de foco cromático, distorsión y color lateral. También se muestra un dibujo de los sistemas en la esquina inferior derecha.

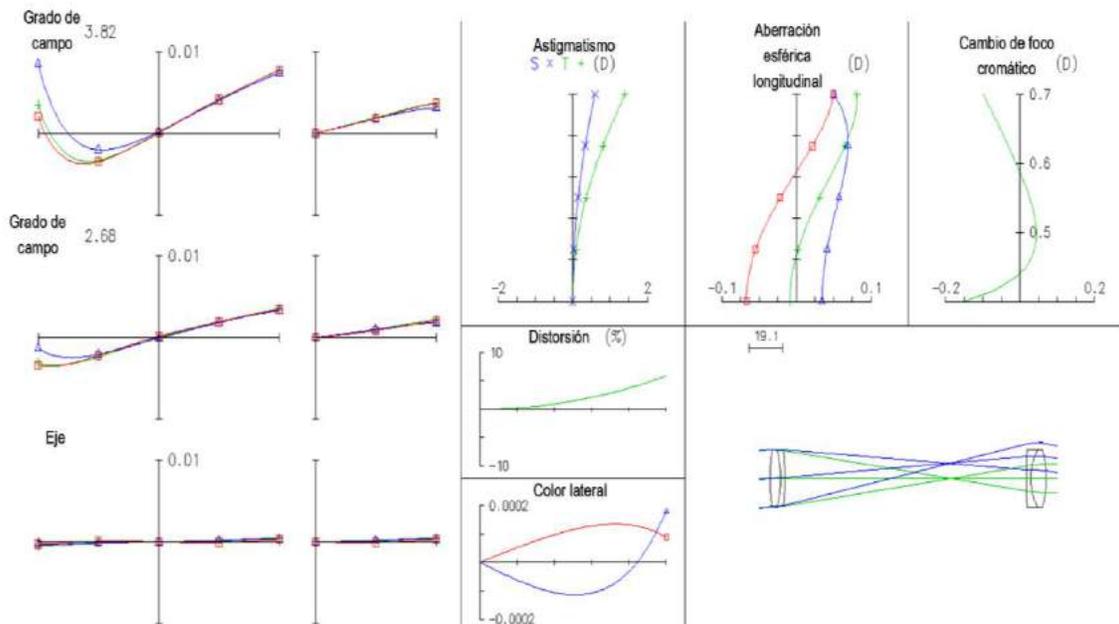


Figura 3.19. Análisis de rayos del sistema óptico afocal.

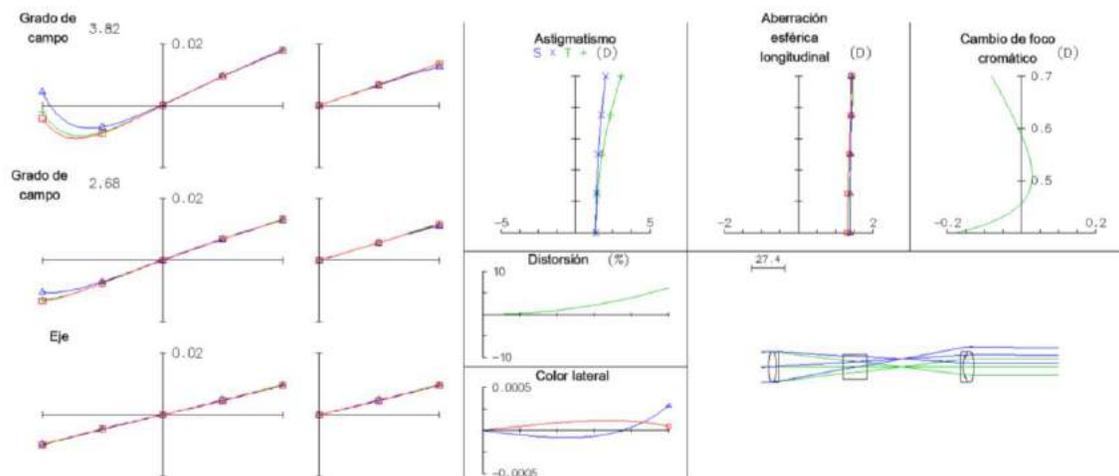


Figura 3.20. Análisis de rayos del sistema óptico afocal con sistema erector.

Con los sistemas afocales, aberración transversal, el sistema está desenfocado, por lo que hay un poco de viñeta debida, además no captura todos los rayos en el eje. En el astigmatismo, la sagital (S) y tangencial (T) muestran una variación afocal a lo largo del campo visual. Posteriormente, se observan tres curvas en la aberración esférica longitudinal, lo que da el afocal a lo largo del eje. En cambio, en el foco cromático se observa una variación afocal de la onda longitudinal. En el caso de distorsión, aparecen desviaciones aumentadas en función de una altura del campo inferior al 10%. Finalmente, el color lateral muestra la diferencia de altura entre el rayo rojo y el azul dependiendo de la altura del campo de visión.

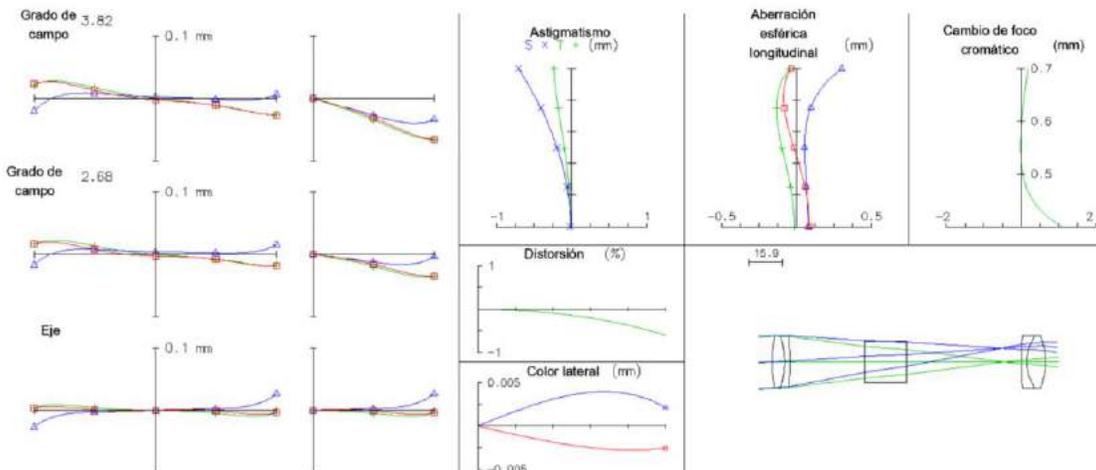


Figura 3.21. Análisis de rayos del sistema óptico focal con sistema erector.

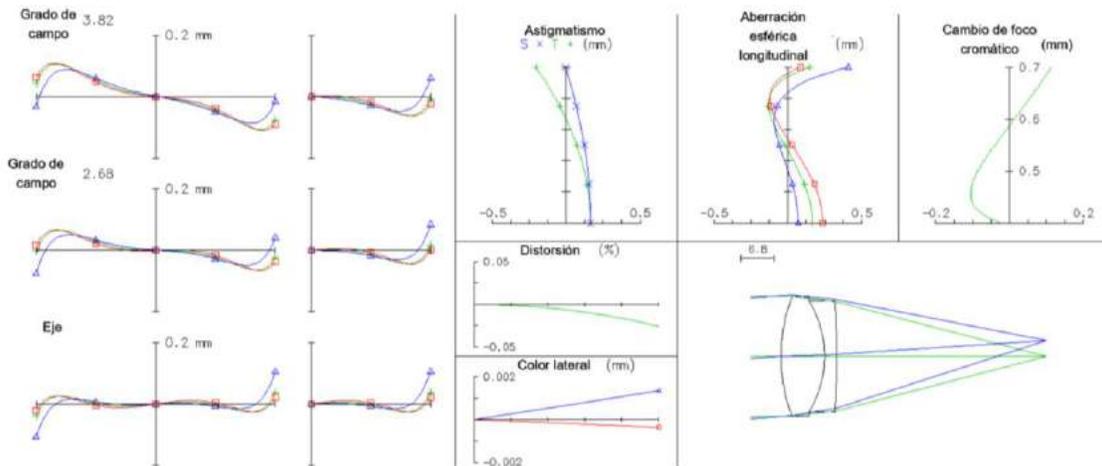


Figura 3.22. Análisis de rayos del sistema focal de la retícula iluminada.

Con los sistemas focales, aberración transversal, el sistema está más enfocado. En el astigmatismo, la sagital (S) y tangencial (T) muestran una variación focal a lo largo del campo visual. Posteriormente, se observan tres curvas en la aberración esférica longitudinal, lo que da el enfoque a lo largo del eje. En cambio, de foco cromático se observa una variación focal de la onda longitudinal. En el caso de distorsión, aparecen desviaciones aumentadas en función de una altura del campo inferior al 1%. Finalmente, el color lateral muestra la diferencia de altura entre el rayo rojo y el azul dependiendo de la altura del campo de visión.

b) Los resultados para el diagrama de manchas fueron los siguientes:

Se puede observar una colección de datos de rayos obtenidos del seguimiento de una gran cantidad de rayos desde cada punto correspondiente a un solo punto de objeto a través de la apertura de la lente, que contiene diferentes evaluaciones basadas en varios grados de campo de visión.

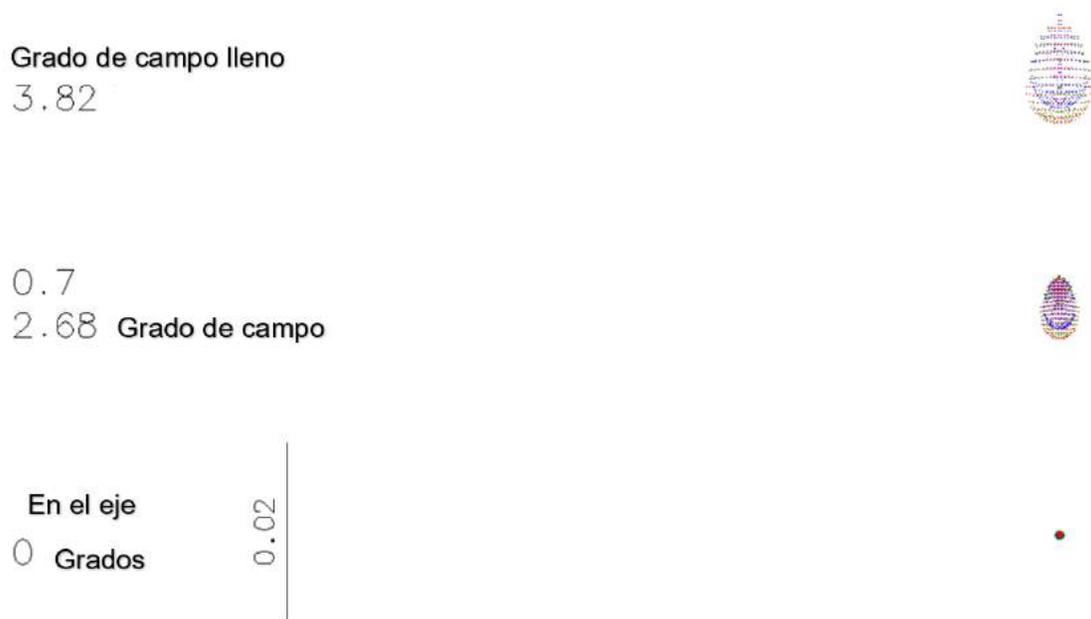
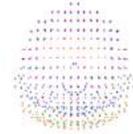


Figura 3.23. Diagrama de manchas del sistema óptico afocal.

Grado de campo lleno
3.82



0.7
2.68 Grado de campo



En el eje
0 Grados

0.04



Figura 3.24. Diagrama de manchas del sistema óptico afocal con sistema erector.

El sistema óptico afocal, a ciertos grados de campo se puede observar la coma y en el eje los puntos se concentran a un punto, esto significa que está al foco. En el sistema óptico afocal con sistema erector, los puntos están dispersos en lugar de formar un punto, pero se observa una mancha porque no está enfocado.

Grado de campo lleno
3.82



0.7
2.68 Grado de campo



En el eje
0 Grados

0.2

-0.1 -0.05 0 0.05 0.1

Cambio de enfoque

Figura 3.25. Diagrama de manchas del sistema óptico focal con sistema erector.

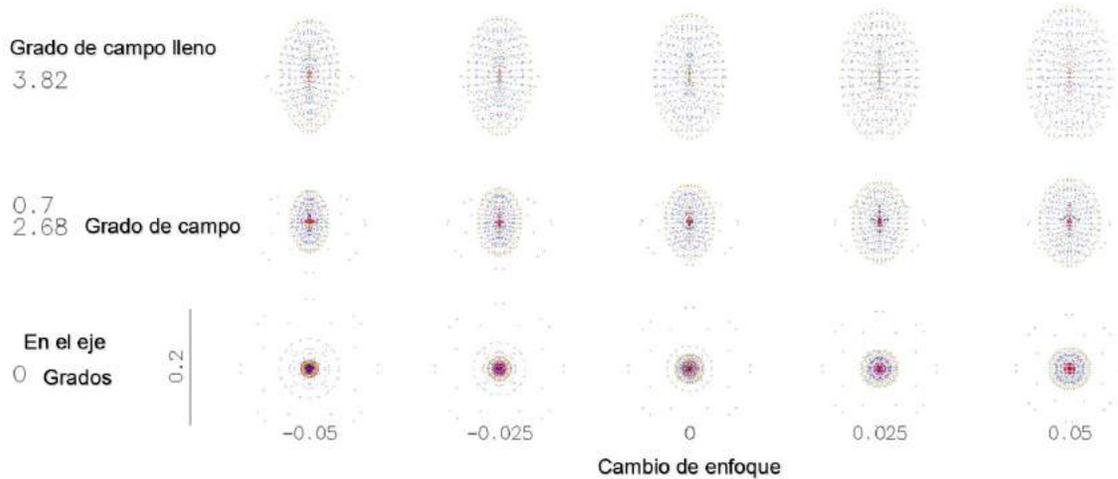


Figura 3.26. Diagrama de manchas del sistema focal de la retícula iluminada.

En el sistema óptico focal con sistema erector, a ciertos grados de campo, se puede observar el astigmatismo en el foco tangencial y en el eje los puntos se concentran a un punto, lo que significa que está enfocado. Asimismo, en el sistema focal de la retícula iluminada, se puede apreciar que a ciertos grados de campo se muestra el astigmatismo en el foco sagital y en el eje los puntos se concentran a un punto, esto significa que está enfocado.

c) Función de dispersión de puntos (PSF):

El resultado del cálculo de la función de dispersión de puntos se puede obtener el diagrama de puntos a partir del conocimiento del frente de onda geométrico.

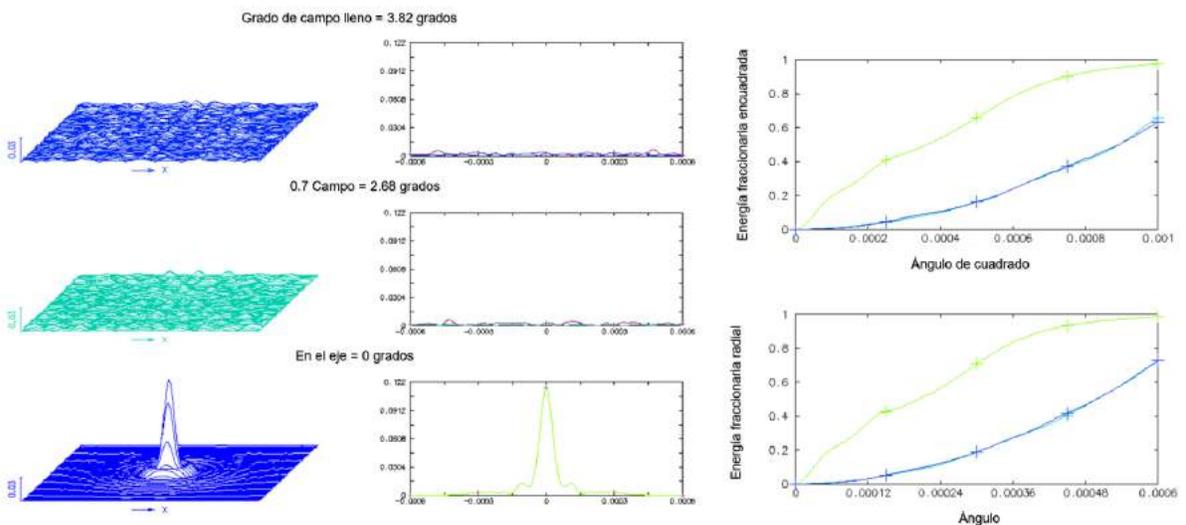


Figura 3.27. Función de dispersión de puntos del sistema óptico afocal.

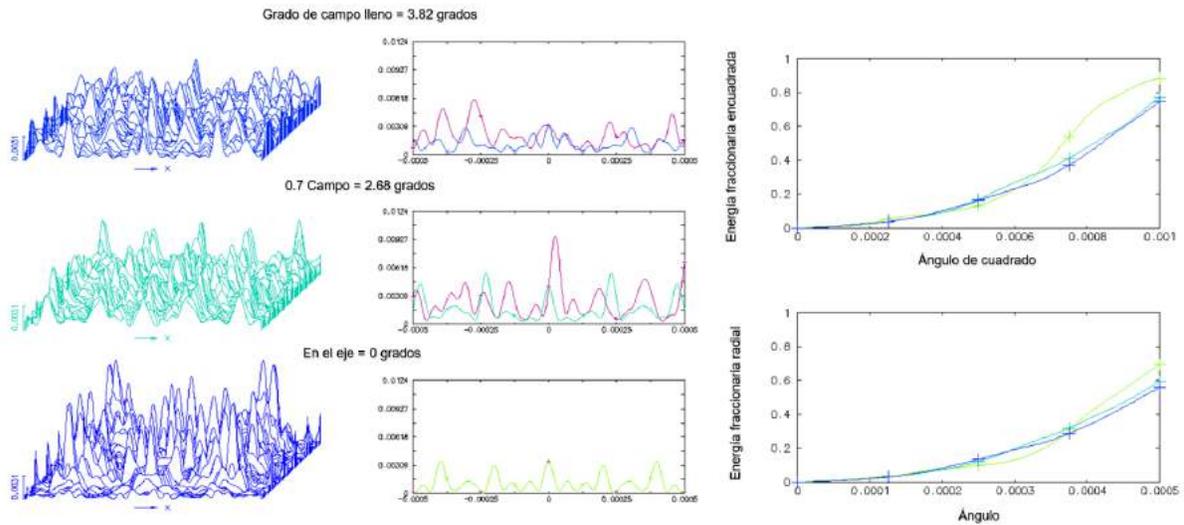


Figura 3.28. Función de dispersión de puntos del sistema óptico afocal con sistema erector.

El sistema óptico afocal, a ciertos grados de campo se puede observar, que la energía se desplaza a los lados y en eje se observa el punto, esto quiere decir, la energía es concentrada un 80% al eje y no se desplaza a los lados. En el sistema óptico afocal con sistema erector, la energía se desplaza, por lo que hay energía concentrada en el eje un 60%.

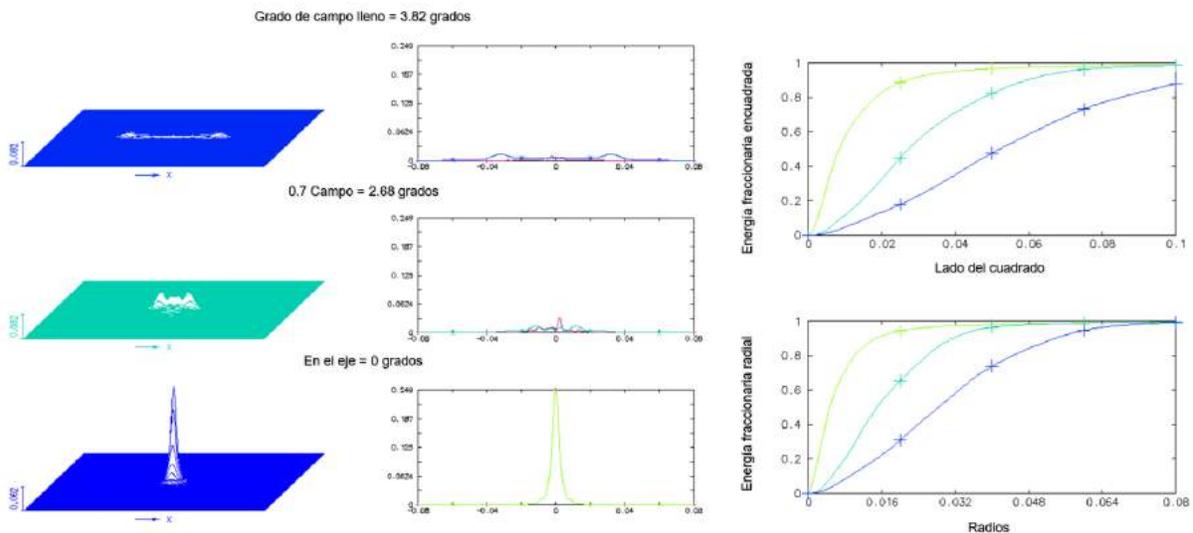


Figura 3.29. Función de dispersión de puntos del sistema óptico focal con sistema erector.

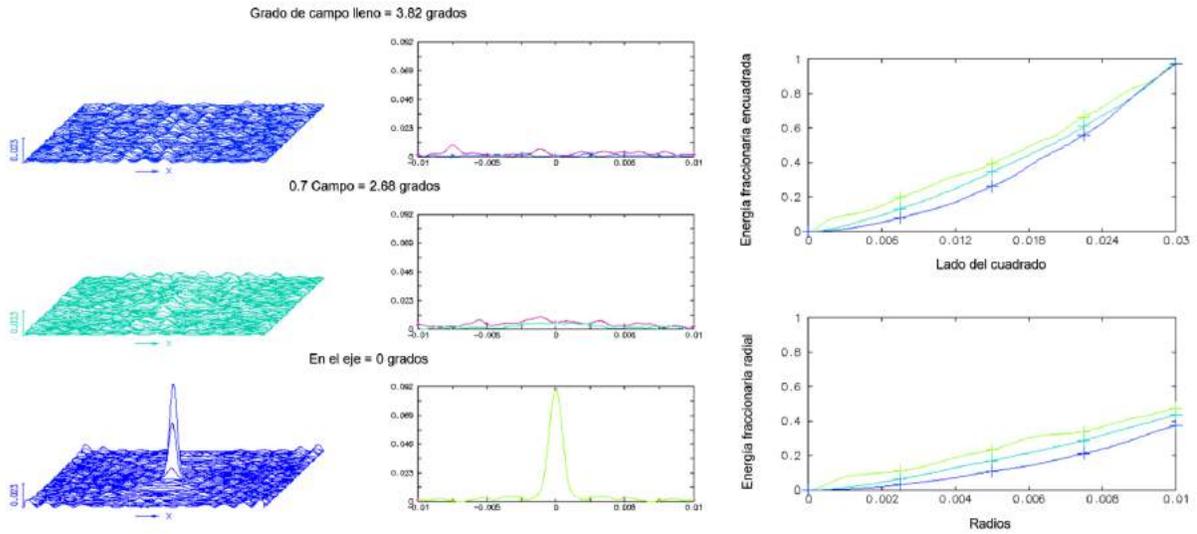


Figura 3.30. Función de dispersión de puntos del sistema focal de la retícula iluminada.

El Sistema óptico focal con sistema erector y el sistema focal de la retícula iluminada, a ciertos grados de campo se puede observar que la energía se desplaza a los lados y en eje se observa el punto, esto quiere decir, que la energía es concentrada al eje y no se desplaza a los lados.

d) Función de transferencia de modulación (MTF):

Se muestra la relación entre la modulación en la imagen y la modulación en el objeto.

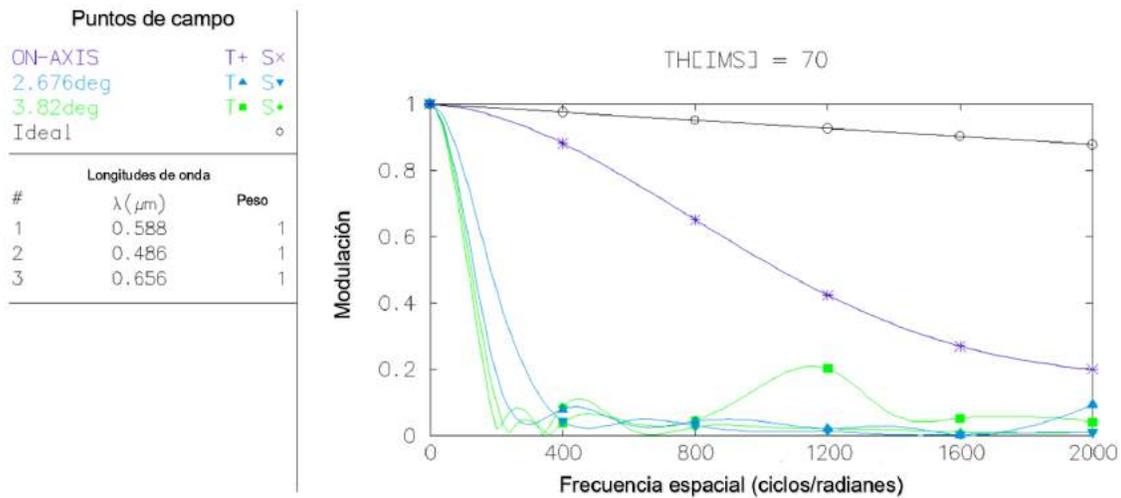


Figura 3.31. Función de transferencia de modulación del sistema óptico afocal.

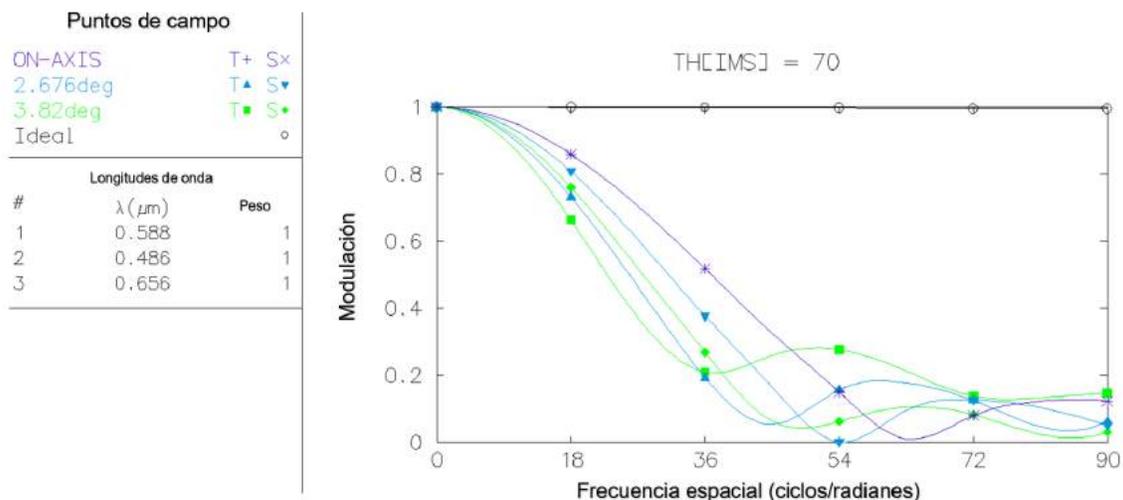


Figura 3.32. Función de transferencia de modulación del sistema óptico afocal con sistema erector.

Los sistemas ópticos; afocal y afocal con sistema erector, que muestran las funciones de transferencia de modulación para todos los puntos de campo en frecuencias espaciales, que muestran curvas (verde y azul), presentan la MTF a ciclo entre radianes, aún por debajo del nivel deseado, en parte del campo de visión.

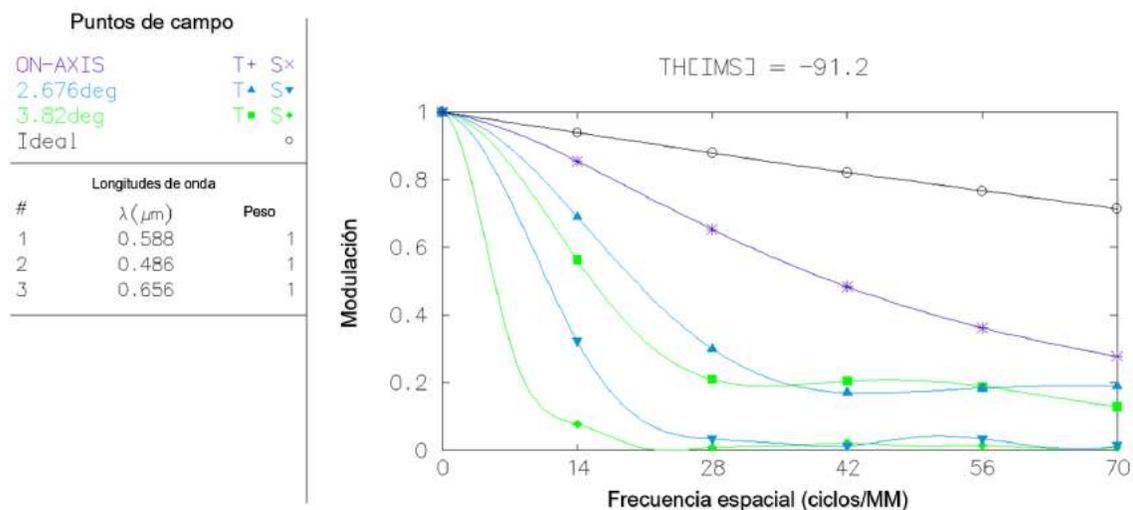


Figura 3.33. Función de transferencia de modulación del sistema óptico focal con sistema erector.

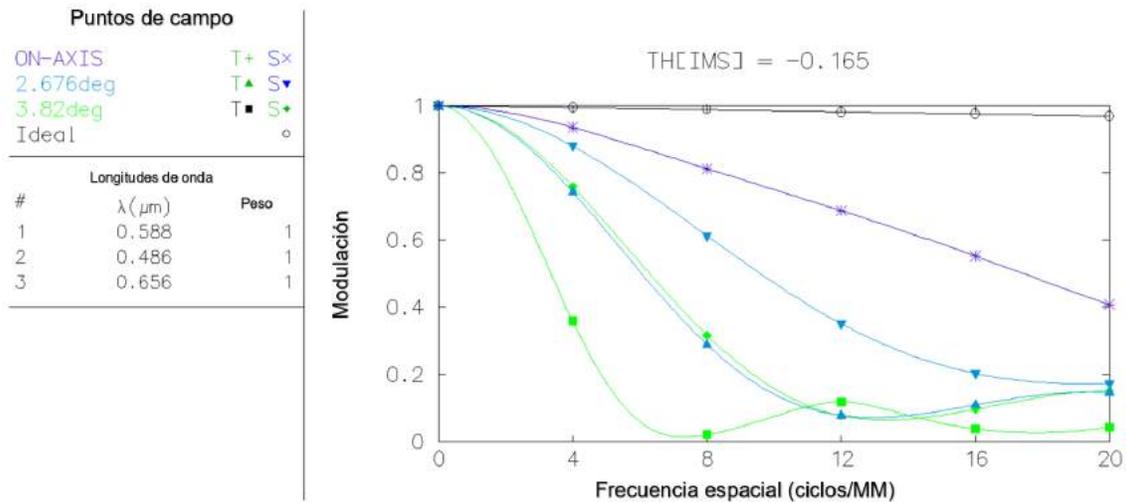


Figura 3.34. Función de transferencia de modulación del sistema focal de la retícula iluminada.

Los sistemas; óptico focal con sistema erector y focal de la retícula iluminada, que muestran las funciones de transferencia de modulación para todos los puntos de campo en frecuencias espaciales, presentan curvas (verde y azul), que muestra la MTF a ciclo entre mm, aún por debajo del nivel deseado, en parte del campo de visión.

e) Distribución radial de energía:

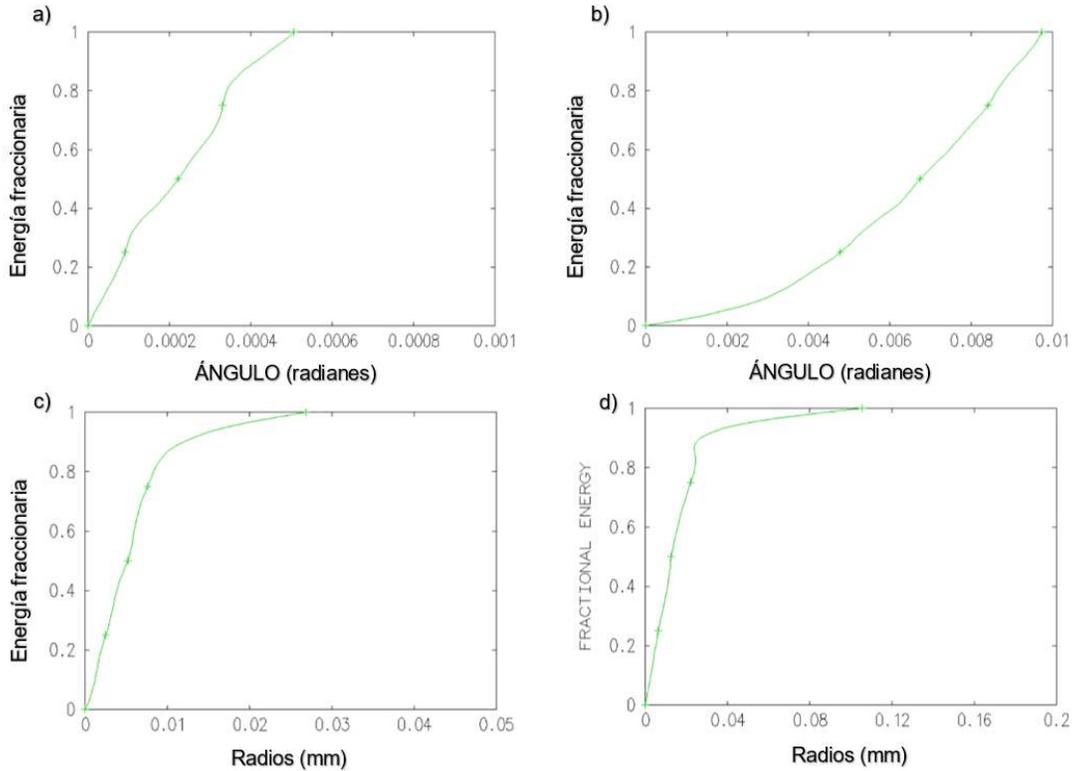


Figura 3.35. a) sistema óptico afocal. b) sistema óptico afocal con sistema erector. c) sistema óptico focal con sistema erector. d) sistema focal de la retícula iluminada.

Se muestra las distribuciones que están centradas en el centroide del PSF y diagrama de manchas.

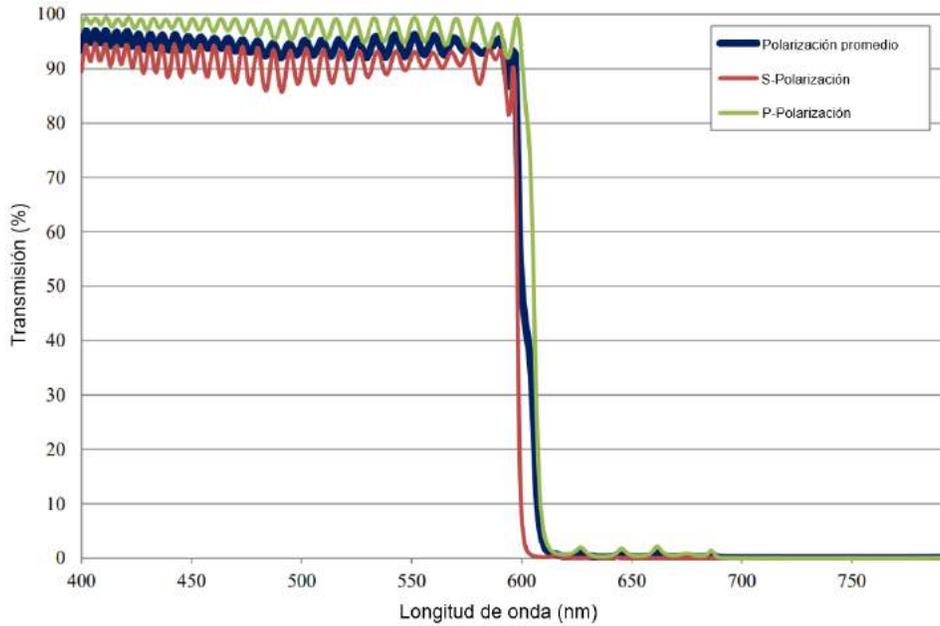
Con los sistemas ópticos; afocal y afocal con sistema erector, muestra la distribución radial de energía (verde) en ángulo (radianes).

Asimismo, con los sistemas; óptico focal con sistema erector y focal de la retícula iluminada, muestran la distribución radial de energía (verde) en radios (mm).

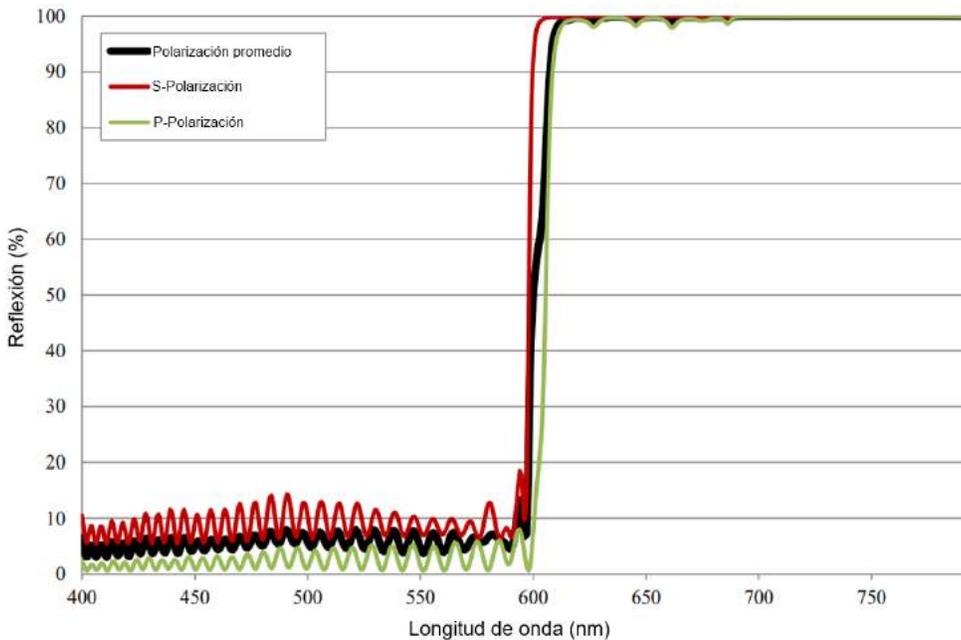
Una vez simulados los sistemas ópticos, se procedió a realizar las pruebas de concepto, y se presentó cada arreglo. Primero se observó cómo se formó la imagen de la lente del objetivo al poner los dos dobletes (lente objetivo y la lente ocular) separados con la suma de sus distancias focales ($D = 150 \text{ mm}$), con un alivio de ojo ($l = 70 \text{ mm}$) y el tamaño de la pupila de salida, ($D_{ps} = 11 \text{ mm}$) tal cómo se pudo observar en la figura 3.5. Como resultado del experimento de la misma figura del inciso b) se pudo observar que la imagen formada fue clara. Entonces comparando los cálculos de las ecuaciones con las pruebas de concepto se puede deducir que los resultados son casi parecidos, pero al colocar el cartón (pupila de entrada) en el arreglo óptico, como se mostró en la figura 3.6 cambia el diámetro de la pupila de entrada a 10 mm y la pupila de salida se reduce a $D_{ps} = 10 \text{ mm}$. Después cuando

se quitó el cartón y se agregó el prisma Schmidt-Pechan como sistema erector, como se mostró en la figura 3.7 la mayoría de los datos se quedaron constantes a excepción del diámetro de la pupila de salida, que fue de $D_{ps} = 10 \text{ mm}$, esto se debe a que la montura del prisma Schmidt-Pechan toma al agujero como si fuera de pupila de entrada y si se hubiera agregado el cartón como de pupila de entrada al arreglo los datos no iban a cambiar. Luego en la comprobación en la mira óptica con objetos próximos, se volvió a repetir el mismo procedimiento, primero con los dos dobles (lente objetivo y la lente ocular), como se mostró en la figura 3.8 y se pudo observar la imagen nítida pero invertida, como se ilustró en esa misma figura del inciso b), sin embargo, al colocar el cartón (pupila de entrada) como se mostró en la figura 3.9, la imagen se siguió viendo nítida e invertida. Por otra parte, cuando se quitó el cartón (pupila de entrada) y se agregó el prisma Schmidt-Pechan como sistema erector entre los dobles, se pudo observar la imagen nítida y casi sin aberraciones como se observó en la figura 3.10 del inciso b), pero si se agregara el cartón como pupila de entrada se puede ver que la imagen se sigue manteniendo nítida debido a que la montura del prisma Schmidt-Pechan toma al agujero como la pupila de entrada, tal como se mostró en la figura 3.11 del inciso b).

Después se continuó con la integración del sistema de retícula iluminada y se pudo observar que esta al ser vista a través de la lente ocular se ve claramente bien definida como se ilustró en la figura 3.18 del inciso c). Esto se debe a que el filtro dicróico refleja perfectamente el área roja a 45° además la retícula que se utilizó forma el círculo punto de manera definida, sin embargo, es importante mencionar que se había solicitado fabricar una retícula a la DTI en el CIO, pero los primeros resultados no fueron satisfactorios, debido a que la forma del círculo punto no estaba bien definida y por esa razón no se ocupó la retícula del CIO. Sin embargo, es evidente que se puede superar la fabricación de retículas para miras réflex en el CIO. También para poder proceder en el diseño optomecánico se tuvo que cambiar el filtro dicróico del CIO por uno de Edmundoptics, debido a que se presentó un accidente con el primero y se tuvo que cambiar por otro filtro dicróico (pasa bajas) el cual tiene de diámetro de 25 mm, una longitud de onda de reflexión de 625-795 nm y una longitud de onda de transmisión de 400-580 nm tal como se muestra en las siguientes gráficas.



Gráfica 3.3. Espectro de transmisión [41].



Gráfica 3.4. Espectro de reflexión [41].

También, la distancia del lente objetivo a la lente ocular se mantuvo con una cierta distancia de 111 mm, la cual presenta suficiente espacio para agregar los componentes del sistema erector y el sistema réflex. Por último, al integrar el sistema réflex al sistema óptico los resultados obtenidos y el espacio fueron satisfactorios.

Capítulo 4: Prototipo de la mira réflex

En este capítulo se muestra el diseño optomecánico, fabricación e integración de la mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente. También la caracterización de campo de vista (FOV) de longitudes de 25 m y 50 m, junto con el tamaño de la retícula iluminada en MOA.

4.1 Diseño optomecánico de soporte de mira réflex

El diseño comenzó con el desarrollo de los dibujos en SOLIDWORKS® de los elementos del modelo. En la figura 4.1 se observan las monturas para el sistema óptico y el sistema réflex diseñados.

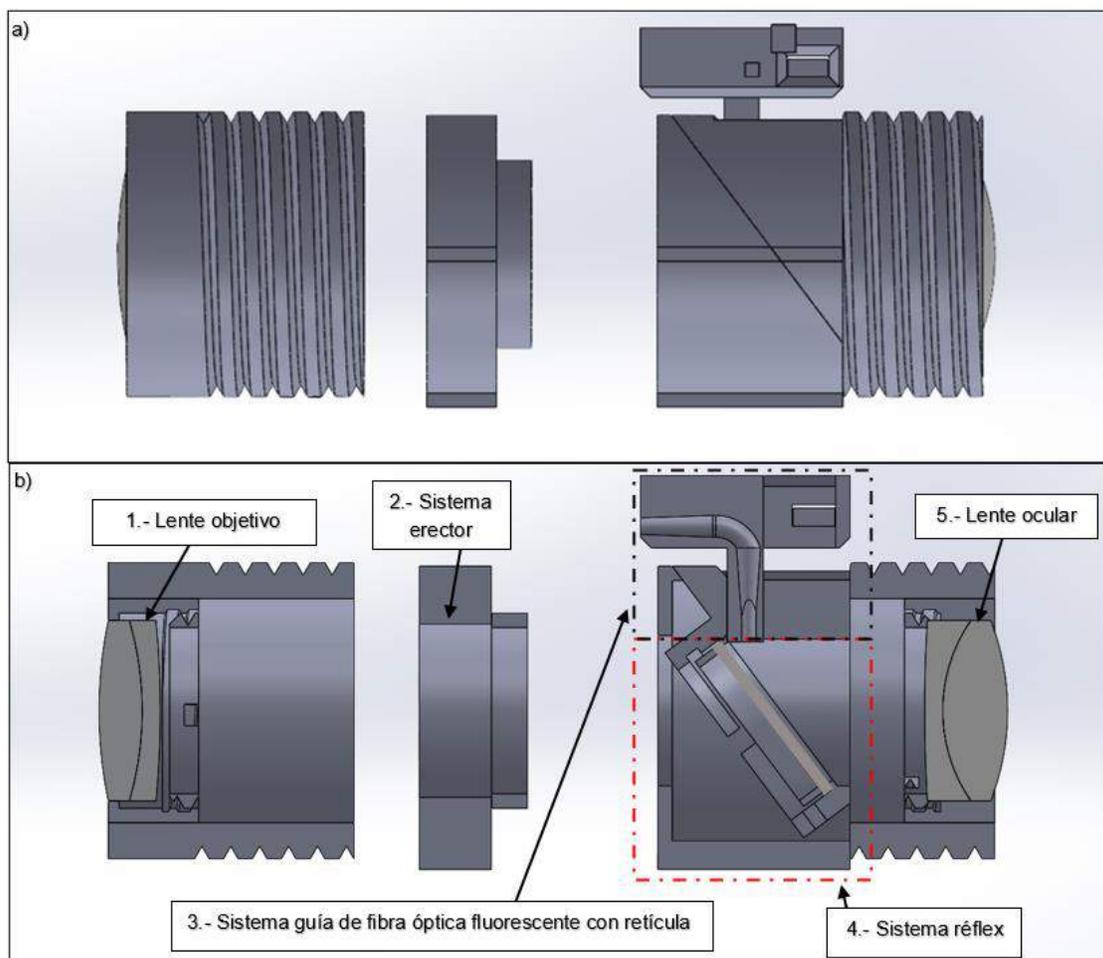


Figura 4.1. Monturas para el sistema óptico y el sistema réflex. a) vista lateral. b) vista de sección.

Obsérvese en la figura 4.1 en el inciso b) en la vista de sección la separación de los materiales la cual se siguió respetando el arreglo experimental para enfocar a un objeto próximo, lo único que se cambio fue el filtro dicroico de forma rectangular por el circular.

Después se diseñó un tubo para poder insertar los componentes, como se puede observar en la figura 4.2.

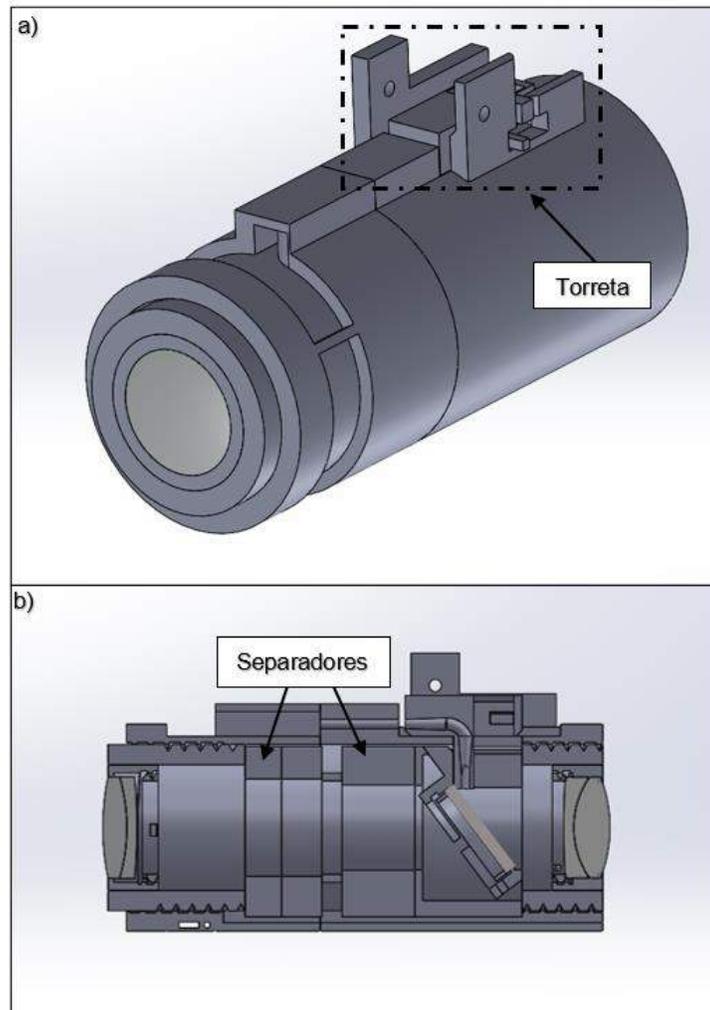


Figura 4.2. Montura para el prototipo de mira réflex. a) vista isométrica. b) vista de sección.

Obsérvese que en la figura 4.2 en el inciso a), donde se encuentra la posición del lente objetivo irá enrollada la fibra óptica de plástico fluorescente, la cual pasará a un canal donde se ubica la torre hasta llegar al otro extremo en el sistema réflex. En el inciso b) se muestra la vista de sección, a las cuales se les agregaron separadores para mantener las mismas distancias.

Por último, donde la torreta tiene la función de mover la retícula iluminada en forma vertical a través en la lente ocular.

En la figura 4.3 se puede ver el dibujo final de montura para el prototipo de mira réflex con amplificación óptica con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente.

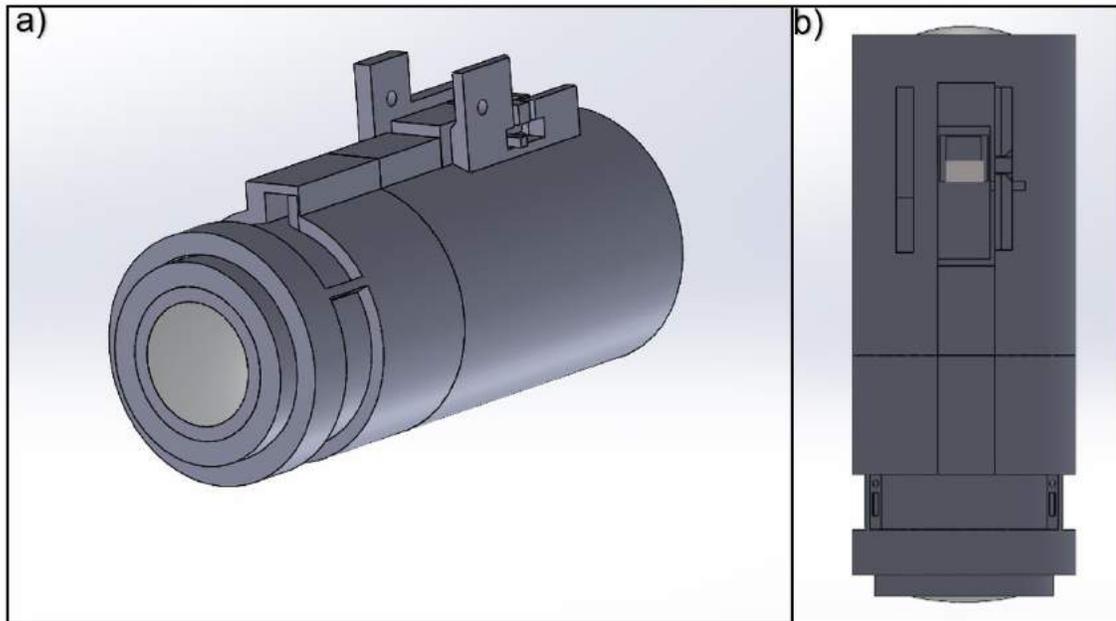


Figura 4.3. Diseño final de la optomecánica. a) vista isométrica. b) vista superior.

4.2 Fabricación de componentes

Para la fabricación de los componentes se imprimieron los elementos mencionados en el capítulo 2, para eso se utilizó una impresora 3D, un tipo cartesiano tipo prusa con técnica FDM (impresión con filamento).

A continuación, se hace mención del proceso de impresión en 3D el cual se realizó de la siguiente manera; a los elementos dibujados en SOLIDWORKS® se les aplicó el formato adecuado para ser impresos en la impresora 3D.

Enseguida se presenta el resultado final de las 7 piezas diseñadas en la impresora 3D con el programa Simplify3D tal como se muestra en la figura 4.4.

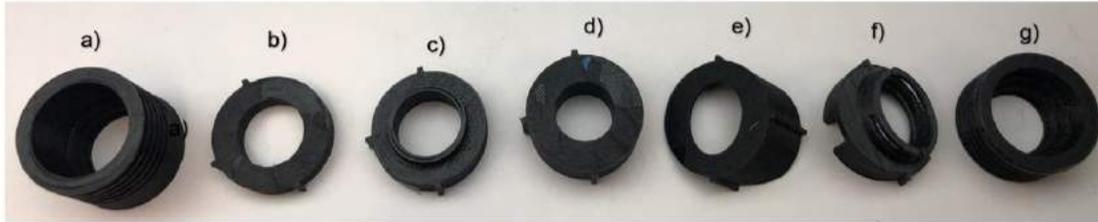


Figura 4.4. Monturas impresas desde la impresora 3D. a) montura para el lente objetivo. b) Separador uno. c) montura para el prisma Schmidt-Pechan. d) separador dos. e) mitad de la montura para el filtro dicroico. f) otra mitad para la montura del filtro dicroico. g) montura para la lente ocular.

Después se llevó a cabo la impresión del tubo el cual se observa en la figura 4.5.

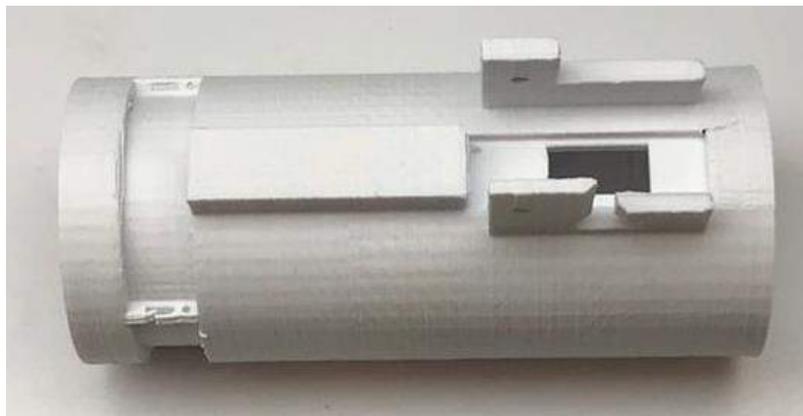


Figura 4.5. Montura del tubo para poder insertar el sistema óptico y el sistema réflex.

En la figura 4.6 se muestran los materiales ya insertados a las monturas.



Figura 4.6. Materiales dentro de las monturas.

4.3 Integración de mira réflex

Para insertar las monturas al tubo se colocaron de manera vertical, debido a la posición de la lente ocular, además con las guías se sigue manteniendo el eje óptico, tal como se puede observar en la figura 4.7.



Figura 4.7. Vista trasera de la montura del tubo.

Enseguida se enlistan cada uno de los pasos que se siguieron para insertar los componentes:

1. Separador uno.
2. Montura del prisma Schmidt-Pechan.
3. Separador dos.
4. Mitad de la montura para el filtro dicroico.
5. Otra mitad de la montura del filtro dicroico.
6. Montura de la lente ocular.

Al llegar al paso número 6 “montura de la lente ocular” solamente se tuvo que enroscar al tubo tal como se puede apreciar en la figura 4.8.

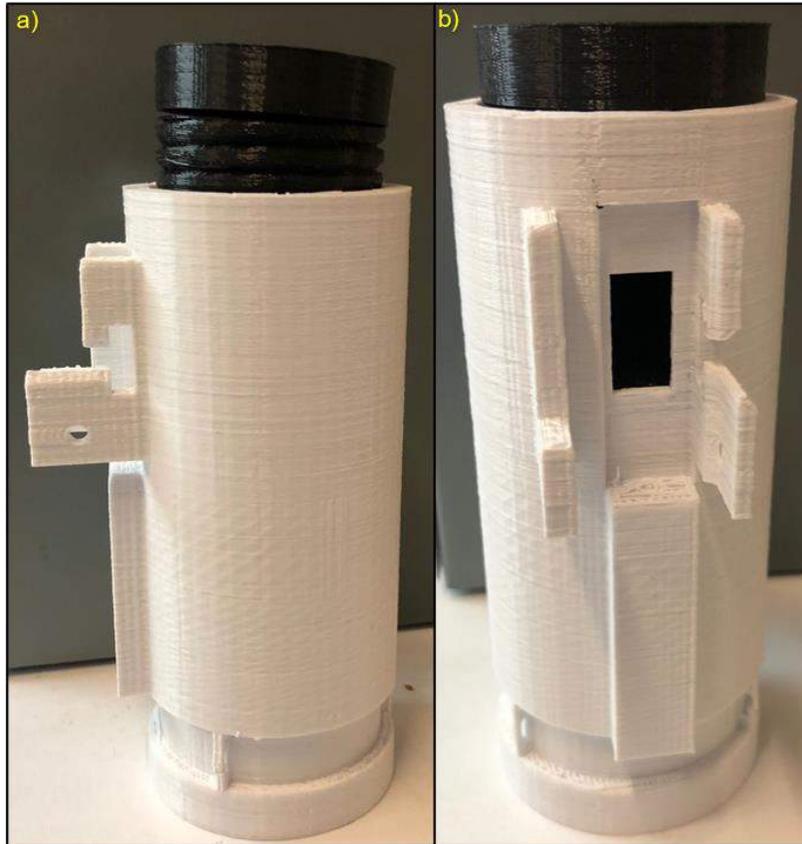


Figura 4.8. Ensamblando el prototipo. a) insertando la montura de la lente ocular. b) enroscando la montura de la lente ocular.

Enseguida se puede observar en la figura 4.9 la vista alzada de la montura de la lente ocular con dos orificios.

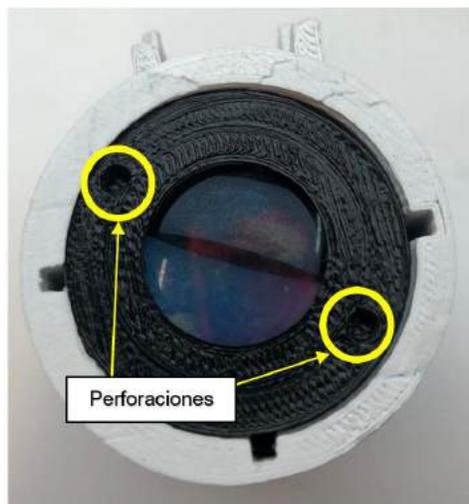


Figura 4.9. Montura de la lente ocular en la vista alzada.

Para poder enroscar completamente la montura de la lente ocular sin dañar la lente se diseñó e imprimió una pieza especial con dos protuberancias tal como se muestra en la figura 4.10, cuya función es enroscar la montura de la lente ocular a la montura del tubo completamente hasta llegar al tope, como se ilustra en la figura 4.11.

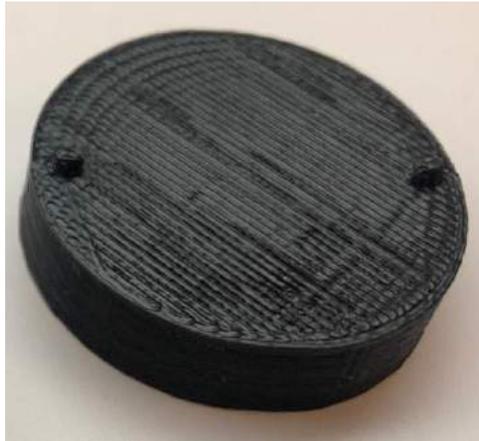


Figura 4.10. Herramienta para la montura de la lente ocular.



Figura 4.11. Montura de la lente ocular enroscada completamente.

Después para la montura del lente objetivo se tuvo que enroscar en el otro extremo hasta llegar al tope, esto se puede apreciar en la figura 4.12.

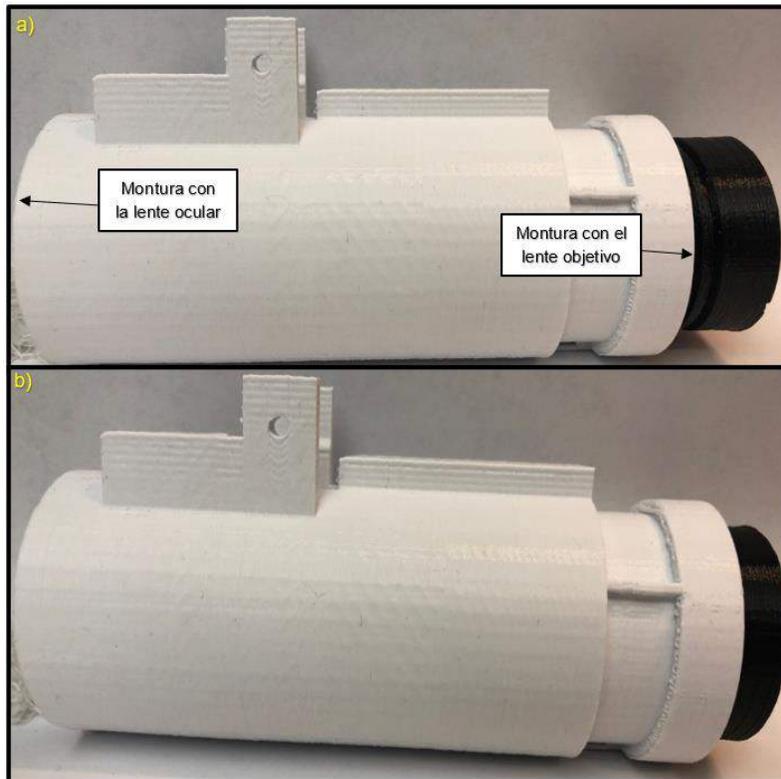


Figura 4.12. Enroscando monturas. a) enroscando la montura del lente objetivo. b) enroscando completamente hasta llegar un tope del lente objetivo.

Por último, se acopló un mecanismo llamado torreta cuya función es mover la retícula iluminada. Para eso se imprimió con ayuda de la impresora 3D una montura para acoplarlo con la retícula, la fibra óptica de plástico fluorescente y un juego de engranes, tal como se presenta en la figura 4.13.

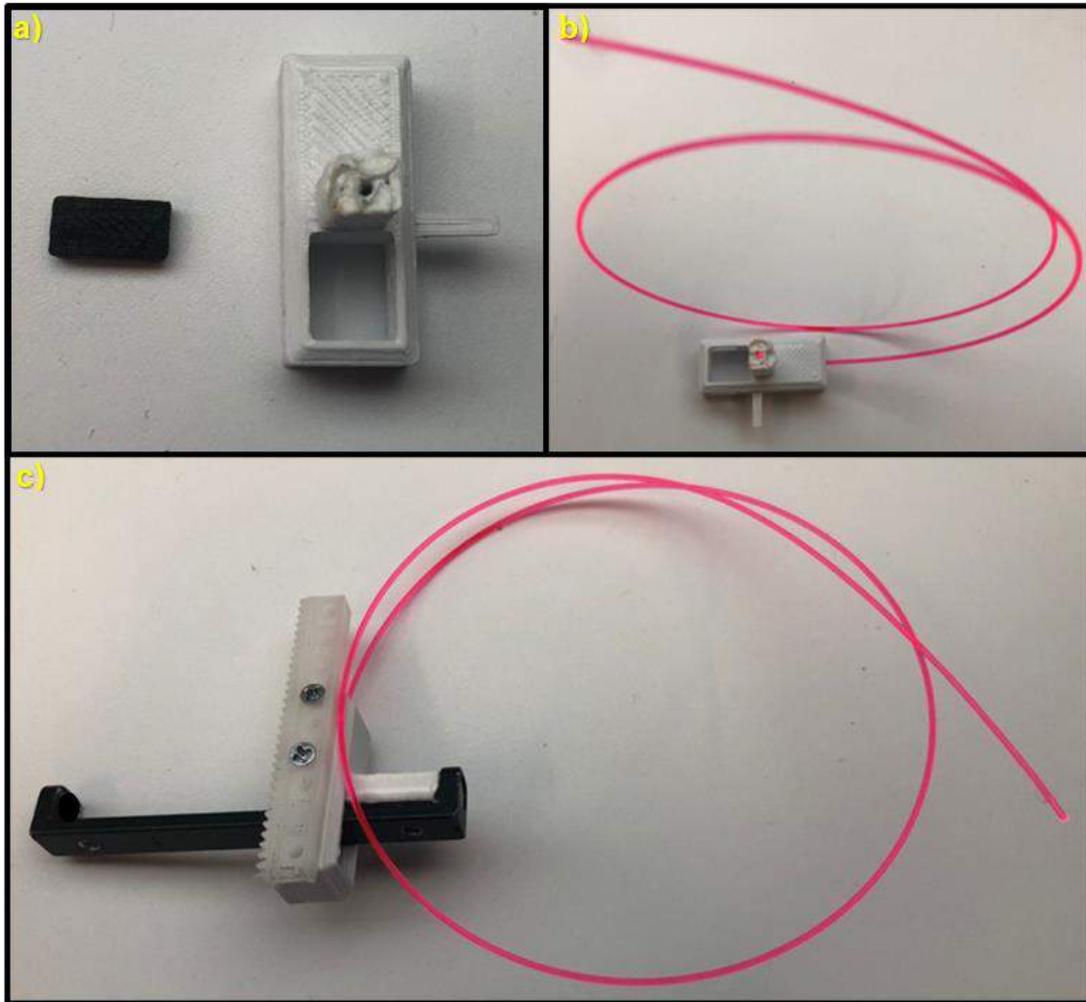


Figura 4.13. Monturas para el acoplamiento para la torreta. a) monturas para insertar la fibra óptica de plástico fluorescente y la retícula con montura metálica. b) insertando la fibra óptica de plástico fluorescente. c) insertando la retícula con montura metálica y la cremallera.

Después se insertó el tubo en la parte de la torreta, tal como se ilustra en la figura 4.14.

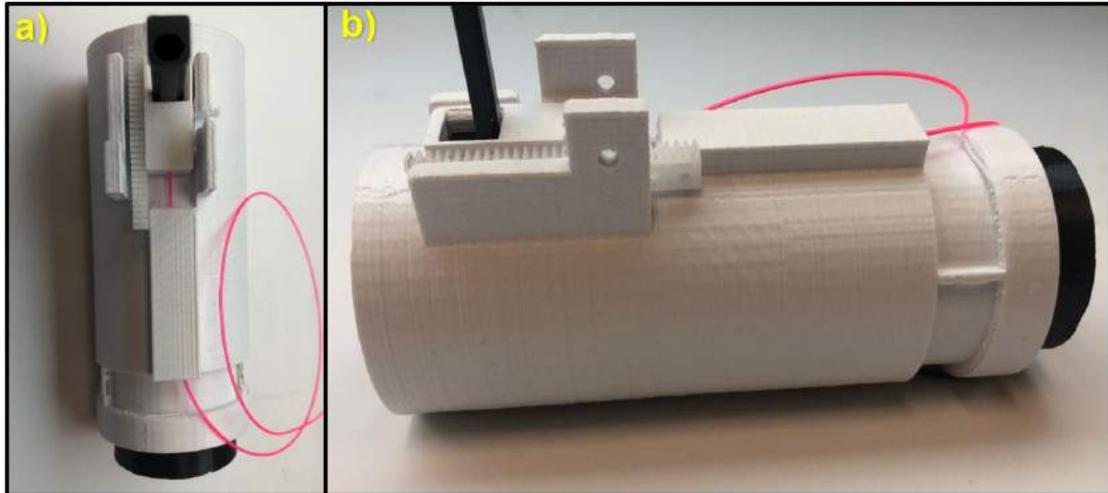


Figura 4.14. Acoplamiento en la torreta. a) vista planta. b) vista alzada.

Para mover la retícula y la cremallera se colocó el engrane con su respectivo eje, ver figura 4.15.

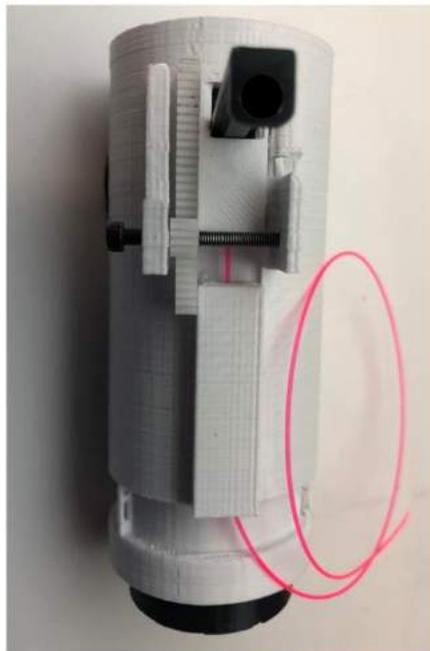


Figura 4.15. Acoplamiento final en la torreta.

Por último, la fibra óptica de plástico fluorescente se fue enrollando con su radio de curvatura de 22.5 mm, ver figura 4.16.

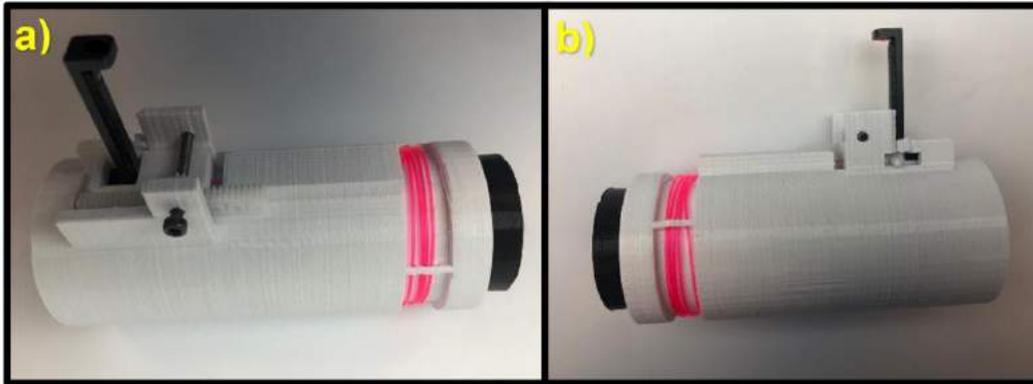


Figura 4.16. Prototipo de mira réflex 2x25 con retícula iluminada enrollada completamente a la fibra óptica de plástico fluorescente. a) vista alzada. b) el otro lado de vista alzada.

Al final en la figura 4.17, se muestra el primer prototipo de mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente.

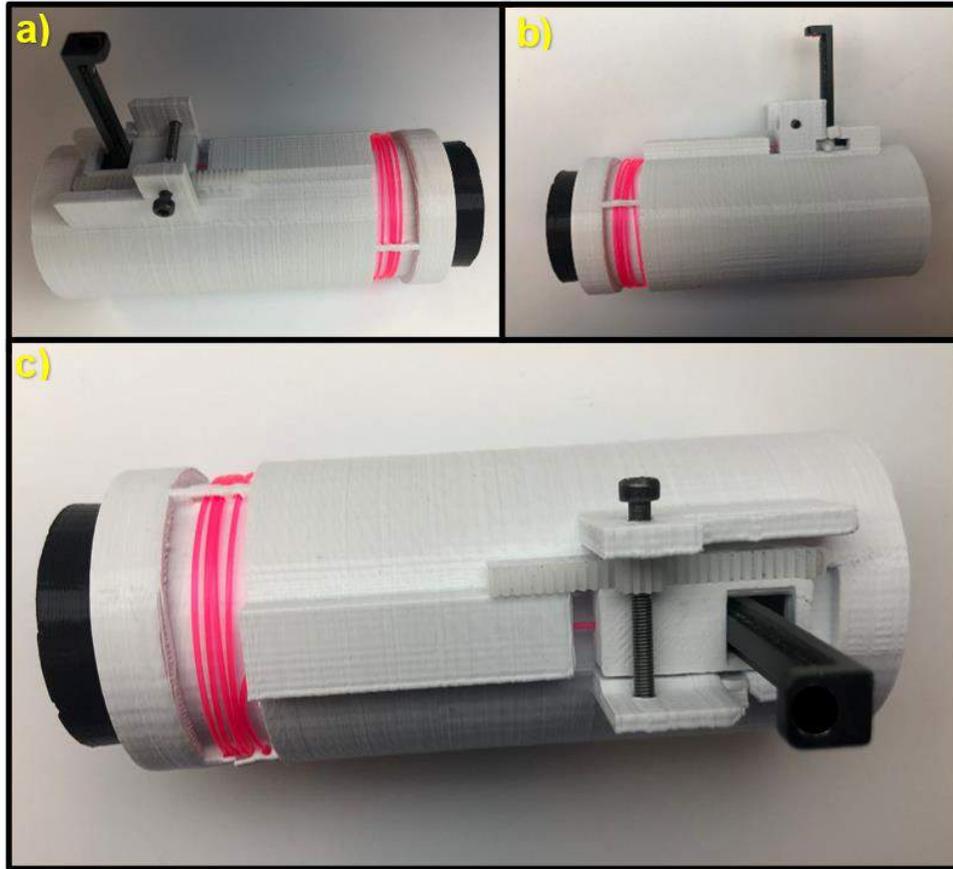


Figura 4.17. Primer prototipo de mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente. a) vista alzada. b) el otro lado de vista alzada. c) vista planta.

4.4 Caracterización de la mira réflex

La posición de la pupila de salida (alivio de ojo) sigue manteniendo la misma distancia, tal como se muestra en la figura 4.18.



Figura 4.18. Prototipo de mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente con un alivio de ojo de 70 mm.

A través de la lente ocular se puede ver la imagen con la retícula iluminada, ver figura 4.19.



Figura 4.19. Se observa la amplificación lateral de la imagen con la retícula iluminada vista a través de la lente ocular.

Por último, para el caso de los movimientos de la retícula iluminada con el mecanismo (torreta) se mueven satisfactoriamente de manera vertical, se observa en la figura 4.20 la retícula iluminada hacia abajo y hacia arriba.

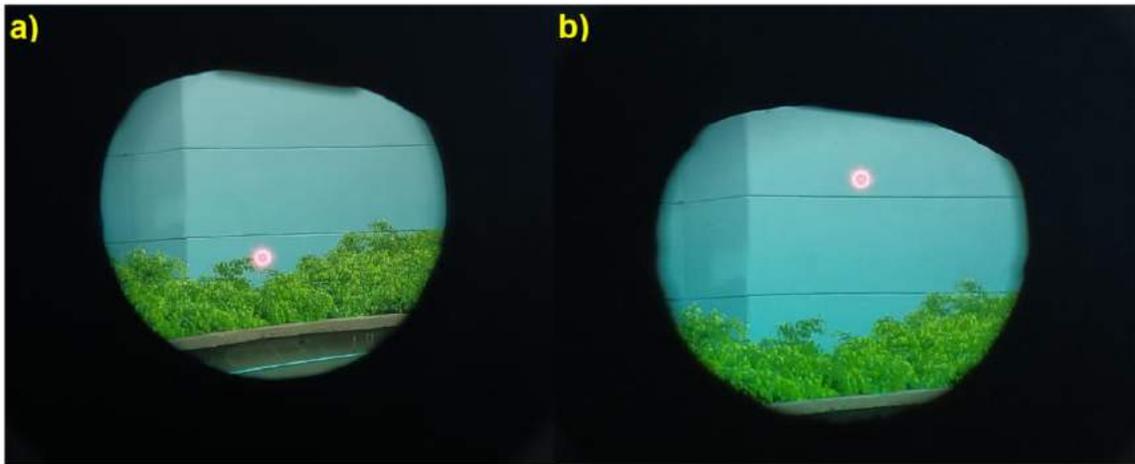


Figura 4.20. La retícula iluminada vista a través de la lente ocular. a) retícula iluminada hacia abajo. b) retícula iluminada hacia arriba.

A continuación, en la tabla 4.1 se presenta una lista del material utilizado.

Tabla 4.1. Lista de materiales.

Cantidad	Material
1	Mileseey-P7AK
1	Mira réflex 2x25
1	Tripie
2	Varillas
1	Lona blanca de calibración para retícula iluminada de 60 cm x 60 cm
1	Flexómetro de 10 m

Para el campo de visión, primero se colocó el Mileseey-P7AK para verificar las longitudes de 25 m y 50 m y también es donde irá la mira réflex 2x25, señalada como punto 1), el punto 2) es donde se pondrá la lona blanca de calibración para retícula iluminada y los puntos 3) y 4) es donde colocará una varilla de referencia para medir la distancia del campo de visión y después el tamaño de la retícula iluminada tal como se ilustra en la figura 4.21.

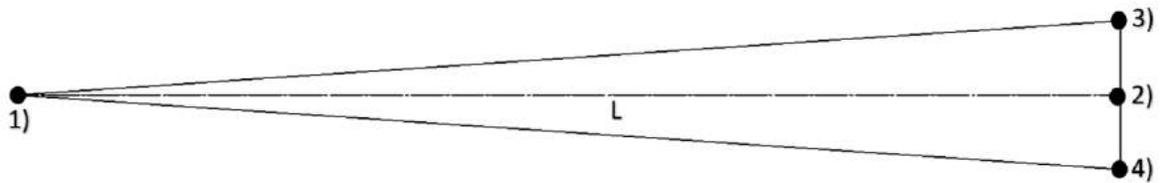


Figura 4.21. Triángulo con puntos de referencias. El punto 1) mira réflex 2x25, punto 2) lona blanca de calibración para retícula iluminada 3) y 4) una varilla.

Después para calcular el ángulo α , se necesitó la mitad del triángulo y de ahí la distancia del punto 1) hasta el 2) como cateto adyacente (ca) y la distancia del punto 2) hasta el 3) como cateto opuesto (co), ver la figura 4.22.

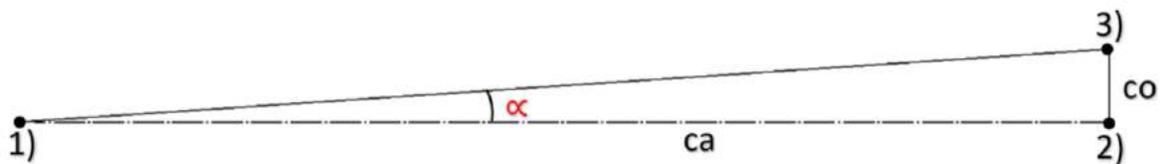


Figura 4.22. Mitad del triángulo con puntos de referencias. El punto 1) mira réflex 2x25, punto 2) lona blanca de calibración para retícula iluminada y el punto 3) una varilla.

Así mismo en las figuras 4.23 y 4.24, se muestra una distancia de (25 ± 0.00275) m y (50 ± 0.004) m. En el inciso a) se muestra el Mileseeey-P7AK verificando las longitudes hasta la lona blanca de calibración para la retícula iluminada que está pegada en la pared, ya una vez verificada la longitud. En el inciso b) se muestra la mira réflex apuntando a la lona blanca de calibración para retícula iluminada.

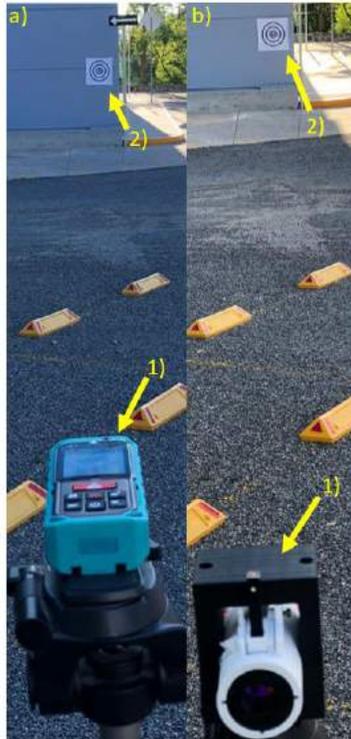


Figura 4.23. Arreglo experimental para campo de visión y tamaño de la retícula iluminada a 25 m. a) 1) se colocó Mileseey-P7AK, 2) es la lona blanca de calibración para retícula iluminada de 60 cm x 60 cm. En b) 1) se colocó la mira réflex 2x25, 2) es la lona blanca de calibración para retícula iluminada de 60 cm x 60 cm.



Figura 4.24. Arreglo experimental para el campo de visión y tamaño de la retícula iluminada a 50 m. a) 1) Se colocó Mileseey-P7AK, 2) es la lona blanca de calibración para retícula iluminada de 60 cm x 60 cm. En b) 1) se colocó la mira réflex 2x25, 2) es la lona blanca de calibración para retícula iluminada de 60 cm x 60 cm.

Posteriormente se observó la retícula iluminada centrada con la lona blanca de calibración para retícula iluminada vista a través de la lente ocular, luego se colocó una varilla en cada extremo hasta su límite de visibilidad a través de la lente ocular para medir su distancia, como se muestra en la figura 4.25.

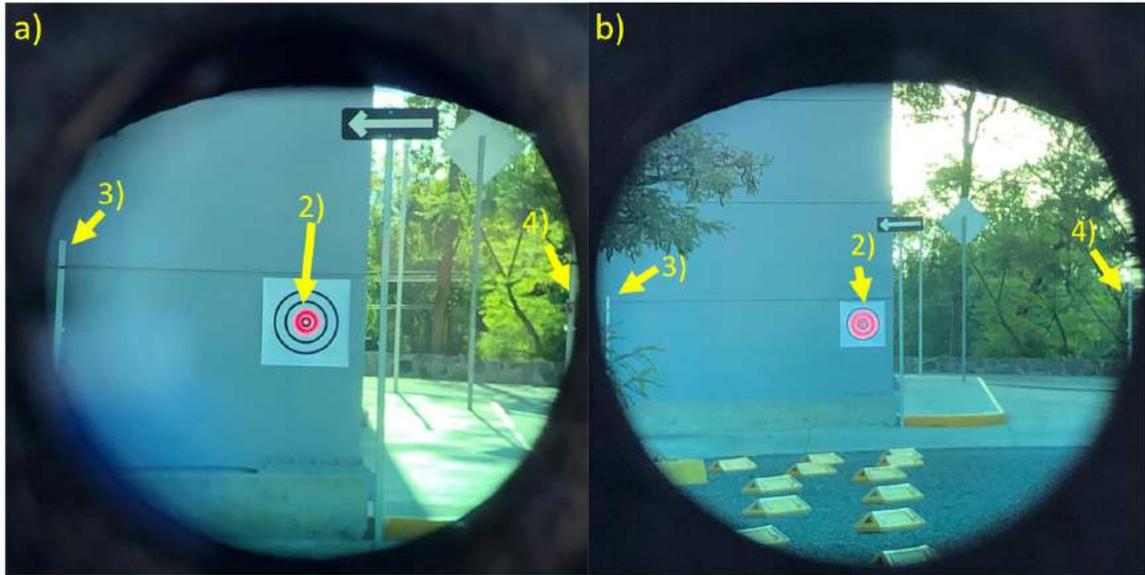


Figura 4.25. Campo de visión vista a través de la lente ocular. En el punto 2) es la lona blanca de calibración para retícula iluminada, el punto 3) y 4) son varillas a los extremos. a) longitud de 25 m. b) longitud de 50 m.

Y por último se redujo la longitud de las varillas hasta llegar el límite del diámetro de la retícula iluminada, tal como se ilustra en la figura 4.26.



Figura 4.26. Tamaño de la retícula iluminada. a) longitud de 25 m. b) longitud de 50 m.

4.5 Análisis de resultados

Primero se comenzó con el diseño optomecánico, en la figura 4.1, se puede observar las monturas de los elementos del sistema óptico y réflex, que se pueden ensamblar fácilmente al tubo y enrollar la fibra óptica de plástico fluorescente, pero en el sistema réflex, el filtro dicroico, debido a la forma circular de su diseño de la montura, se vuelve elíptica cuando se coloca en un ángulo de 45° desde la perspectiva del ocular de SOLIDWORKS®. Posteriormente, se desarrollaron unos separadores para mantener la distancia, como se mostró en la figura 4.2, así como un mecanismo para mover la retícula iluminada (torreta). Nuevamente, como diseño final, la figura 4.3 muestra el primer prototipo de mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente.

Una vez corroborado el diseño del prototipo con SOLIDWORKS®, se procedió a desarrollar el modelo real de la mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente. El modelo físico se ensambló utilizando los elementos desarrollados en el capítulo anterior. En las figuras 4.5 y 4.6 se mostraron las monturas impresas con la impresora 3D y como ensamble final, en la figura 4.17 se mostró el ensamble en físico del primer prototipo de mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente.

Después se caracterizó la mira réflex, y se comprobó que la posición de la pupila de salida (alivio de ojo) siguió manteniendo la misma distancia, tal como se mostró en la figura 4.18 y que a través de la lente ocular se pudo apreciar la imagen con la retícula iluminada y así poder moverla satisfactoriamente arriba y abajo, como se mostró en la figura 4.20. En las figuras 4.25 y 4.426 se pudo observar la imagen nítida del campo de visión y los tamaños de la retícula iluminada a través de la lente ocular. Para el campo de visión para las longitudes de (25 ± 0.00275) m y (50 ± 0.004) m, se tomaron diez mediciones de longitud del cateto opuesto (co), como se ilustra los siguientes datos.

Tabla 4.2. Longitudes de 25 m y 50 m.

Longitud de 25 m		Longitud de 50 m	
Mediciones	CO (m)	Mediciones	CO (m)
1	3.33	1	6.68
2	3.34	2	6.67
3	3.34	3	6.67
4	3.34	4	6.67
5	3.34	5	6.67
6	3.34	6	6.67
7	3.34	7	6.67
8	3.34	8	6.67

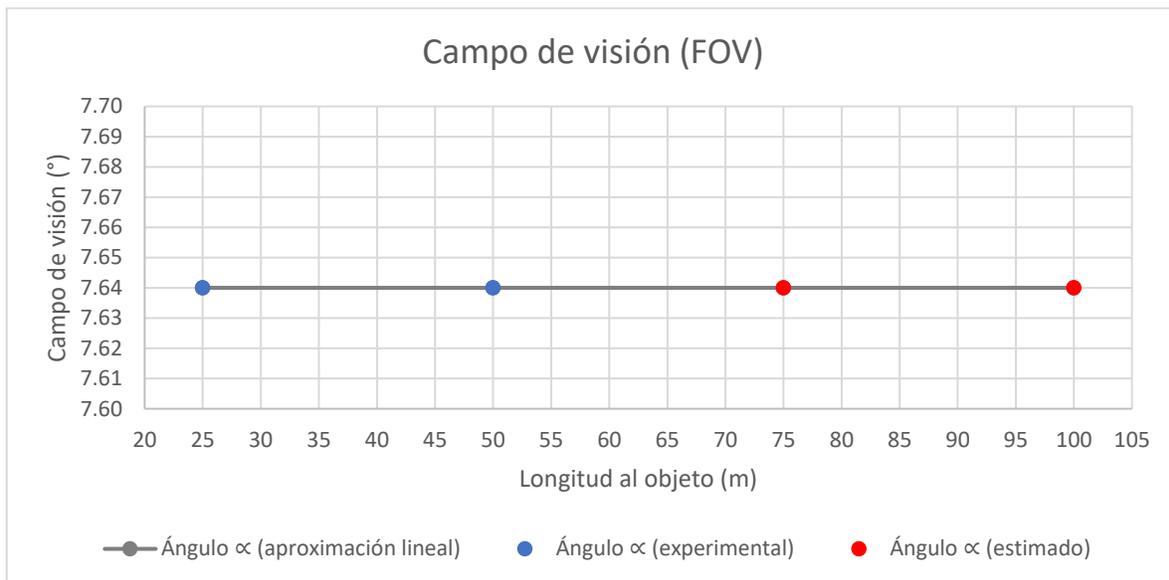
9	3.34	9	6.67
10	3.31	10	6.68
Promedio	3.34	Promedio	6.67

Luego tomando el ángulo de α , tenemos los siguientes datos.

Tabla 4.3. El campo de visión del ángulo α de longitudes de 25 m y 50 m.

Longitudes (m)	Ángulo α
25	7.64
50	7.64

Entonces comparando los datos experimentales y con los datos estimados, se tendría el siguiente dato de la gráfica para el campo de visión (FOV).



Gráfica 4.1. Campo de visión (FOV).

Esto indica que el campo de visión (FOV) del prototipo de la mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente cada 25 m tiene un ángulo de 7.64°.

Después, para el tamaño de la retícula iluminada para las longitudes de (25 ± 0.00275) m y (50 ± 0.004) m, se tomaron diez mediciones de longitud del (co), como se ilustra en la siguiente tabla.

Tabla 4.4. Longitudes de 25 m y 50 m.

Longitud de 25 m	Longitud de 50 m
------------------	------------------

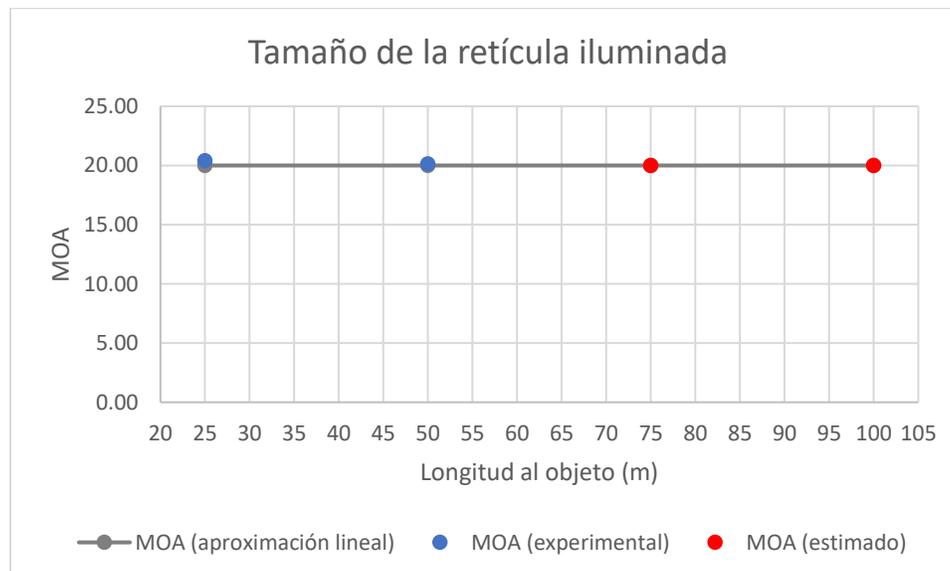
Mediciones	CO (cm)	Mediciones	CO (cm)
1	15.4	1	30
2	15.5	2	30.3
3	15.3	3	30.2
4	15.2	4	30.2
5	15.3	5	30.3
6	15.1	6	30.1
7	15.5	7	30.2
8	15.2	8	30
9	15.3	9	30.2
10	15.2	10	30.3
Promedio	15.3	Promedio	30.18

Luego tomando el tamaño de (co) se calculó el tamaño en MOA, dando como resultado los siguientes datos.

Tabla 4.5. Tamaño de la retícula iluminada en MOA de longitudes de 25 m y 50 m.

Longitudes (m)	MOA
25	20.40
50	20.12

Entonces comparando los datos experimentales con los datos estimados, se tendría el siguiente dato de la gráfica para el tamaño de la retícula iluminada en MOA.



Gráfica 4.2. Tamaño de la retícula iluminada en MOA.

Esto indica que el tamaño de la retícula iluminada del prototipo de la mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente con tamaño en MOA, se mantiene a los 20 MOA cada 25 m y la imagen de la retícula iluminada fue variando, tal como se ilustra en la figura 4.26, esto se debe al efecto de la lupa la cual amplifica 5x a la retícula iluminada.

Conclusiones y trabajo a futuro

Conclusiones

En conclusión, este trabajo abarcó varios puntos importantes como fue el procedimiento de la elaboración del prototipo de una mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente.

Primero se diseñó, después se simuló y por último se ensambló la parte experimental de la mira réflex, además se realizaron varios diseños preliminares y simulaciones para alcanzar los parámetros requeridos para la mira réflex y diseñar diversos arreglos ópticos. También es importante mencionar acerca del sistema afocal, para comprobar las miras ópticas con objetos próximos, fue necesario modificar las distancias del arreglo óptico para reenfocar, pero para el nuevo objeto, el sistema sigue siendo afocal. Ya que las distancias entre los dos dobletes, el lente objetivo y la lente ocular puede variar. Asimismo, en el sistema erector, usando los dos prismas que son Schmidt y el semi prisma pentagonal juntos conforman un prisma Schmidt-Pechan, el cual resulta muy útil para invertir la imagen y en reducción de distancias entre la lente objetivo a la lente ocular, a comparación de lentes. Después el siguiente paso fue la integración del sistema óptico al sistema réflex y cuando se integró el sistema réflex (retícula iluminada) se repitió el mismo procedimiento de armado óptico, pero esta vez con el sistema réflex como se vio en el capítulo 3. Los datos obtenidos con el filtro dicróico diseñado en el CIO que se utilizó para realizar el experimento fueron aceptables, además la fibra óptica de plástico fluorescente en combinación con la retícula y el filtro dicroico operan adecuadamente y la retícula iluminada vista a través de la lente ocular se ve claramente bien definida.

Por último, ya una vez diseñado el sistema óptico y el sistema réflex, el siguiente paso fue la optomecánica, una combinación de la óptica con la mecánica. Una vez corroborado el diseño del prototipo con SOLIDWORKS® y de las impresiones con la impresora 3D se realizaron las pruebas a la integración del sistema óptico y el sistema réflex al sistema optomecánico y los resultados fueron aceptables. Asimismo, para el campo de visión y el tamaño de retícula iluminada para longitudes de 25 m y 50 m, cumplieron la perspectiva para el campo de visión. En el caso del tamaño de la imagen de la retícula se obtuvieron 20 MOA en lugar de 6 MOA. Esto se debió fundamentalmente a que no fue posible conseguir la retícula apropiada comercialmente ni tampoco se alcanzó a realizar su fabricación. Basándose en los objetivos planteados en el proyecto podemos concluir que se cumplió con la amplificación de 2x con un tamaño de lente objetivo de 25 mm, un alivio de ojo de 70 mm, diámetro de pupila de salida de 10 mm, una longitud menor o igual a 150 mm y una retícula iluminada por una fibra óptica de plástico fluorescente de color rojo. Se realizó satisfactoriamente el mecanismo sofisticado para su funcionamiento. Por lo que el sistema optomecánico con la combinación del sistema

óptico, y el sistema réflex con el sistema mecánico garantizó el acoplamiento de los materiales y el movimiento de la retícula iluminada (arriba y abajo) a través de la lente ocular. Y, por último, un campo de vista (FOV) de 7.64° cada 25 m y un tamaño de la retícula iluminada de 20 MOA.

Trabajo a futuro

El proyecto requiere mejoras, en la parte de simulación con el programa OSLO edu, aprender más usos de herramientas y terminología. Después con el filtro dicróico, el cual se puede mejorar en su forma para que en lugar de ser circular tenga forma elíptica y así aprovechar el campo visual. También la fibra óptica de plástico fluorescente se puede remplazar por otra de mejor calidad, mejorar el proceso de cortar y pulir. El tamaño de la retícula iluminada se puede modificar, todo depende del tamaño del objeto, mejorar el mecanismo del movimiento de la retícula iluminada con un tornillo sin fin y el autofocus entre las lentes del objetivo y ocular a diferentes distancias del objeto.

Por último, además de estas mejoras mencionadas, se pretende crear la pieza metálica inoxidable color negro, sin embargo, la evolución y resultados del prototipo de mira réflex 2x25 con retícula iluminada por fibra óptica de plástico fluorescente han sido positivos.

Bibliografía

- [1] «Weekend,» 15 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://weekend.perfil.com/noticias/armas-2/la-precision-viene-de-varios-siglos-atras.phtml#:~:text=Mientras%20tanto%2C%20en%20Europa%2C%20m.> [Último acceso: 13 Diciembre 2022].
- [2] «HOLOSUN,» Copyright, 2022. [En línea]. Available: <https://www.holosun.eu/es/Acerca-de-los-visores-reflex/#:~:text=La%20idea%20de%20un%20visor.> [Último acceso: 13 Diciembre 2022].
- [3] R. Kingslake, Applied Optics and Optical Engineering, vol. V, London: United Kingdom, 1969, pp. 186,189, 190,191, 198.
- [4] «Mira telescópica.com,» [En línea]. Available: https://miratelescopica.com/tipos-de-miras/#Que_tipos_de_miras_existen. [Último acceso: 27 Octubre 2022].
- [5] L. armería, «Youtube,» [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=cSJ_fiuT__k. [Último acceso: 28 Octubre 2022].
- [6] N. D. J. Matthews, «MIRA PARA RIFLE Y DISPOSITIVO DE ALINEACIÓN». España Patente 2330377, 9 Diciembre 2009.
- [7] Manuer et al, «MIRA DE REFLEJO CON ESPEJO COMBINADOR DE HAZ DICROICO». Estado Unidos Patente 2780130, 5 Febrero 1957.
- [8] B. R. Stanislaw Szapiel, «VISOR DE VISUALIZACIÓN Y OBTENCIÓN DE MÚLTIPLES AUMENTOS». Estado Unidos Patente 7869125B2, 11 Enero 2011.
- [9] Horvath et al, «SISTEMA DE JUEGO PARA ARMAS». Estados Unidos Patente 8336776B2, 25 Diciembre 2012.
- [10] Timothy et al, «VISOR CON SUPERPOSICIÓN DE PANTALLA». Estados Unidos Patente 9323061B2, 26 Abril 2016.
- [11] W. Schick et al, «MIRA ÓPTICA». Estados Unidos Patente 7676137B2, 9 Marzo 2010.
- [12] A.J. Bindon et al, «DISPOSITIVO DE MIRADA RÉFLEX PARA DÍA Y AVISTAMIENTO NOCTURNO». Estados Unidos Patente 5653034, 5 Agosto 1997.
- [13] W. J. Smith's, Modern Optical Engineering, United States of America: The McGraw-Hill, 2000, pp. 251-255-290.
- [14] D. Malacara, Óptica básica, México, D.F.: Fondo de cultura económica, 2015, pp. 148-149.
- [15] R. A. M. y. P. H. Rivera, «Uso del OSLO en la enseñanza de la óptica,» Investigación de Física, 2012.
- [16] L. R. Corporation, OSLO Optics Software for Layout and Optimization, Copyright, 2011, pp. 119-173-178-185-183.

- [17] D. M.-H. Z. Malacara-Hernández, Handbook of optical design, Tercera ed., Taylor & Francis Group, 2013, pp. 345-347,401-402, 415-416.
- [18] elfaisanblog, «EL FAISÁN,» 26 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://elfaisanblog.wordpress.com/2015/12/26/tipos-de-reticulas-de-las-miras-telescopicas/>. [Último acceso: 22 Octubre 2022].
- [19] «PDFSLIDE,» Mils and MOA; A tactical Shooters, [En línea]. Available: <https://pdfslide.net/documents/mils-and-moa-a-tactical-shooters-guide.html?page=1>. [Último acceso: 22 Octubre 2022].
- [20] «Carabinas y pistolas,» [En línea]. Available: <https://www.carabinasypistolas.com/es/blog/algatec-academy-que-es-el-moa/>. [Último acceso: 5 Octubre 2022].
- [21] M. T. B.E.A. Saleh, Fundamentals of Photonics, Second ed., New, Jersey: Copyright, 2007.
- [22] J. C. a. B. Elliot, Introduction to fiber optics, Third ed., Copyright, 2005.
- [23] E. de la Rosa-Cruz et al, «Characterization of Fluorescence Induced by side illumination of rhodamine B doped plastic optical fibers,» *Fiber & Integrated Optics*, p. 9, 2010.
- [24] I. Industrial fiber optics, «Industrial fiber optics,» Copyright , 2000. [En línea]. Available: <https://i-fiberoptics.com/fluorescent-fiber-detail.php?id=1010>. [Último acceso: 8 Noviembre 2022].
- [25] «Lifeder,» [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/polimetilmetacrilato/>. [Último acceso: 16 Enero 2023].
- [26] Jakubowski et al, «Recent advances in photoluminescent polymer optical fibers,» *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, p. 18, 2021.
- [27] «OMEGA OPTICAL,» Omega Optical, LLC All Rights Reserved, 2014-2022. [En línea]. Available: https://www.omegafilters.com/fluorescence_overview. [Último acceso: 20 Enero 2023].
- [28] Itxaso et al, «Fabrication and characterization of polymer optical fibers doped with perylene-derivatives for fluorescent lighting applications,» *Fibers*, p. 11, 2017.
- [29] Ayesta et al, «Optical characterization of doped thermoplastic and thermosetting polymer-optical-fibers,» *Polymers*, p. 13, 2017.
- [30] «PhotochemCAD™,» [En línea]. Available: <https://www.photochemcad.com/spectra-viewers/common-compounds>. [Último acceso: 27 Noviembre 2022].
- [31] I T Sugiarto et al, «Analysis of dual peak emission from Rhodamine 6G organic dyes using photoluminescence,» *OPEN ACCESS*, p. 7, 2017.
- [32] I. Nanoptics, «Nanoptics,» The future of fiber, 2022. [En línea]. Available: <https://www.nanoptics.com/product/0-019-usf-multi-fiber-12-5-pcs/>. [Último acceso: 11 Julio 2022].

- [33] I. Nanoptics, «Nanoptics,» The future of fiber, 2022. [En línea]. Available: <https://www.nanoptics.com/service/fluorescent-fiber/>. [Último acceso: 11 Julio 2022].
- [34] E. Daniel Naum, «Laser dye doped fluorescent optical fiber and method of preparation of the same». United States Patente 5579429, 26 November 1996.
- [35] G. A. J. Bindon, «DISPOSITIVO DE MIRADA RÉFLEX PARA DÍA Y AVISTAMIENTO NOCTURNO». Estados Unidos Patente 5653034, 5 Agosto 1997.
- [36] Niebla et al, «Slideshare,» 2 Julio 2010. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/canva1/02-filtro-ptico>. [Último acceso: 30 Enero 2023].
- [37] «Edmundoptics,» Copyright, [En línea]. Available: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/custom-bandpass-filter-using-shortpass-and-longpass-filters/>. [Último acceso: 23 Octubre 2022].
- [38] E. O. Inc, «Edmund optics,» Copyright, 2022. [En línea]. Available: <https://www.edmundoptics.com/p/25mm-dia-x-50mm-fl-mgfsb2sub-coated-achromatic-doublet-lens/2286/>. [Último acceso: 8 Febrero 2022].
- [39] E. O. Inc, «Edmund optics,» Copyright, 2022. [En línea]. Available: <https://www.edmundoptics.com/p/25mm-dia-x-100mm-fl-vis-nir-coated-achromatic-lens/9763/>. [Último acceso: 8 Febrero 2022].
- [40] «Edmundoptics,» Copyright, 2023. [En línea]. Available: <https://www.edmundoptics.com/p/25mm-pechan-prism/33146/>. [Último acceso: 29 Enero 2023].
- [41] Edmundoptics, «Edmundoptics,» [En línea]. Available: <https://www.edmundoptics.com/p/600nm-25mm-diameter-dichroic-shortpass-filter/23545/>. [Último acceso: 20 Julio 2022].
- [42] M. M. A. Pons, «Práctica 3: Sistemas telescópicos. Objeto lejano,» 2009/10.