

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y
MATEMATICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FISICA



TESIS

Manufactura de un espejo parabólico de diámetro de apertura 140mm y
relación focal $f/9$ para observación planetaria.

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
LICENCIADO EN FÍSICA

Investigadores:

Cristian Alejandro Bocanegra Mongrut

Joel Cabrera Romero

Asesor:

Justo Vladimir Tuñoque Gutiérrez

Co-Asesor:

Franco Alejandro Gonzales Niño

Lambayeque – 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y
MATEMATICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FISICA



TESIS

**“Manufactura de un espejo parabólico de diámetro de apertura 140mm y
relación focal $f/9$ para observación planetaria”**

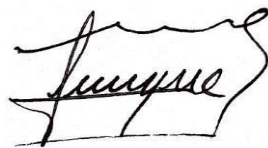
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
LICENCIADO EN FÍSICA

SUSTENTADA Y APROBADA ANTE EL SIGUIENTE JURADO

Dr. Lic. Fis. Arnulfo Cieza Ramos
Presidente

Mg. Ing. Jacinto Guillermo Uceda Pisfil
Secretario

Lic. Fis. ~~Julio Alejandro Valdiviezo Arellano~~
Vocal



M.Sc. Justo Vladimir Tuñoque Gutiérrez

Asesor



M.Sc. Franco Alejandro Gonzales Niño

Co-Asesor



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Cristian / Joel Bocanegra / Cabrera
Título del ejercicio:	INFORME FINAL
Título de la entrega:	Manufactura de un espejo parabólico de diámetro de apert...
Nombre del archivo:	Informe_final_oficial.pdf
Tamaño del archivo:	3.3M
Total páginas:	84
Total de palabras:	18,002
Total de caracteres:	95,724
Fecha de entrega:	11-jul.-2023 07:16p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre...	2129833470

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y
MATEMATICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FISICA



TESIS

Manufactura de un espejo parabólico de diámetro de apertura 100mm y
reflexión focal 150 para observación planetaria.

Investigadores:

Cristian Alejandro Bocanegra Montoya
Joel Cabrera Romero

Asesor:

Jaime Vladimir Talledo Gutiérrez

Co-Asesor:

Franco Alejandro González Nilo

Lambayeque - 2023

Manufactura de un espejo parabólico de diámetro de apertura 140mm y relación focal f/9 para observación planetaria

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%	8%	0%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	vdoc.pub Fuente de Internet	1%
3	dokumen.pub Fuente de Internet	1%
4	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	<1%
6	mafiadoc.com Fuente de Internet	<1%
7	documentop.com Fuente de Internet	<1%
8	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo, Mg Sc. JUSTO VLADIMIR TUÑOQUE GUTIÉRREZ, asesor de la tesis, de los bachilleres en física,
Bocanegra Mongrut Cristian Alejandro y Cabrera Romero Joel.

Titulada:

“MANUFACTURA DE UN ESPEJO PARABÓLICO DE DIÁMETRO DE APERTURA 140 mm Y RELACIÓN

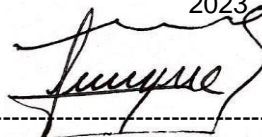
FOCAL F/9 PARA OBSERVACIÓN PLANETARIA”, luego de la revisión del informe final de tesis,

declaro que la misma tiene un índice de similitud de 8% verificable en el reporte de similitud del Programa Turnitin.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.


Lambayeque, 12 de julio del
2023



JUSTO VLADIMIR TUNOQUE GUTIÉRREZ

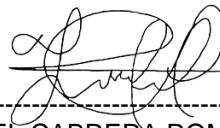
DNI: 16756567

ASESOR



CRISTIAN ALEJANDRO BOCANEGRA MONGRUT

DNI: 45851105
AUTOR



JOEL CABRERA ROMERO
DNI: 72384990
AUTOR



DECANATO

Ciudad Universitaria – Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCIÓN DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 0.3.-2023.-D/FACFyM

Siendo las 14:00 PM del día Jueves 27 de Julio del 2023, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

"MANUFACTURA DE UN ESPÉCULO PARABÓLICO DE DIÁMETRO DE APERTURA 140 mm y RELACIÓN FOCAL F/D PARA OBSERVACIÓN PLANETARIA"

Designados por Resolución N° 902-2022-VIRTUAL D/FACFyM de fecha 2 de noviembre 2022

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

<u>Dr. Lic. Fís. Arnulfo Cieza Ramos</u>	Presidente
<u>Mg. Ing. Jacinto Guillermo Ucda Pisfil</u>	Secretario
<u>Lic. Fís. Julio Alejandro Valdiviezo Arellano</u>	Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) M. Sc. Lic. Fís. Justo Vladimiro Tuñoque Gutiérrez nombrado por Resolución N° 902-2022-VIRTUAL D/FACFyM de fecha 2 de noviembre 2022

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 609-2023-VIRTUAL D/FACFyM de fecha 18 de Julio del 2023

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Bocanegra Mongrut Cristian
Alejandro y Cabrera Romero Joel y tuvo una duración de 90 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de Diecisiete (17) en la escala vigesimal, mención (BUENO).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de LICENCIADO EN FÍSICA, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 11:30 am se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Arnulfo Cieza Ramos
Presidente

Jacinto Guillermo Ucda Pisfil
Secretario

Julio Alejandro Valdiviezo Arellano
Vocal

Justo Vladimiro Tuñoque Gutiérrez
Asesor

CERTIFICO: Que, es copia fiel del original
Fecha: 11/07/2023
Dr. Marco Antonio Martín Peralta Luján
SECRETARIO DOCENTE - FACFyM
VÁLIDO PARA TRÁMITES INTERNOS DE LA UNPGRG

DECLARACION JURADA DE ORIGINALIDAD

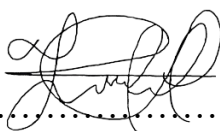
Nosotros, Cristian Alejandro Bocanegra Mongrut y Joel Cabrera Romero, investigadores principales, Justo Vladimir Tuñoque Gutiérrez y Franco Alejandro Gonzales Niño, asesores del trabajo de investigación “Manufactura de un espejo parabólico de diámetro de apertura 140mm y relación focal f/9 para observación planetaria”, declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso se demostrará lo contrario, asumimos responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiera lugar. Que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe. Lambayeque, 2023.

Investigadores:

Cristian Alejandro Bocanegra Mongrut:

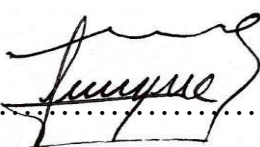
.....

Joel Cabrera Romero

.....

Asesor:

M.Sc. Justo Vladimir Tuñoque Gutiérrez:

.....

Co-asesor:

M.Sc. Franco Alejandro Gonzales Niño:

.....

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a nuestros Padres por el apoyo incondicional y constante, quienes a pesar de las adversidades nos apoyaron y creyeron en nosotros para lograr y llegar a este momento de suma importancia como es nuestra formación profesional.

A nuestros familiares, amigos, compañeros y todas las personas que de una u otra manera nos apoyaron de forma desinteresada, por la motivación que nos ofrecen día a día para seguir adelante, y cumplir nuestros objetivos y metas planteadas.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios, por permitirnos culminar una etapa de más de nuestras vidas, habernos guiado, y darnos la fortaleza para seguir adelante.

De igual manera agradecemos a todos los docentes de la escuela profesional de Física de nuestra prestigiosa Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, quienes, con sus conocimientos, enseñanzas y constante motivación, nos han inculcado el amor a la ciencia e investigación, demostrando que siempre hay algo nuevo que aprender.

Agradecer también a nuestros compañeros con los cuales hemos compartido cinco años de constante aprendizaje apoyo y aliento a seguir con los estudios y culminar nuestras metas.

Agradecemos de forma especial en este trabajo de investigación de Tesis a nuestros asesores Justo Vladimir Tuñoque Gutierrez y Franco Alejandro Gonzales Niño por siempre invitarnos a mejorar y seguir adelante con los recursos disponibles

INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN.....	5
Formulación del problema de investigación.....	6
Hipótesis.	6
Objetivos.....	6
Antecedentes.....	6
CAPITULO I.....	9
Diseño teórico.....	10
1.1. Fundamentos.....	10
1.2. Tipos de espejos.	12
1.2.1. Espejos esféricos.....	12
1.3. Porque elegir un espejo esférico.....	14
1.4. Tipos de Aberraciones.....	15
1.4.1. Aberración esférica	15
1.4.2. Aberración de coma	16
1.4.3. Astigmatismo	17
1.4.4. Curvatura de campo	18
1.4.5. Distorsión.....	18
1.5. Simulación y comparación del espejo primario esférico y parabólico (asferico)....	19
CAPITULO II.....	26
Parabolización de la superficie.....	27
2.1. Introducción.....	27
2.2. Fundamento.....	27
CAPITULO III	33

Manufactura.....	34
3.1. Taller de manufactura de óptica.	34
3.2. Manufactura óptica del espejo parabólico.....	34
3.2.1. Corte.....	36
3.2.2. Generado de curva.	38
3.2.3. Esmerilado.	43
3.2.4. Pulido.....	51
CAPITULO IV	57
Pruebas ópticas.....	58
4.1. Introducción de prueba óptica de Test de Ronchi.	58
4.2. Pruebas del test de Ronchi.....	59
CAPITULO V	69
Conclusiones y Recomendaciones.....	70
5.1. Conclusiones.....	70
5.2. Recomendaciones.	71
BIBLIOGRAFIA.....	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del objetivo de un Telescopio Newtoniano.	10
Figura 2: Esquema de Espejo esférico.....	13
Figura 3: Esquema de Espejo esférico paraboloide o espejo parabólico.....	13
Figura 4: Esquema de Espejo esférico elipsoide.	14
Figura 5: Esquema de Espejo esférico hiperboloide.	14
Figura 6: Tipo de aberración esférica.	14
Figura 7: Tipo de aberración de coma.	17
Figura 8: Tipo de aberración por astigmatismo.....	17
Figura 9: Tipo de aberración por curvatura de campo.....	18
Figura 10: Tipo de aberración por distorsión.	19
Figura 11: Simulación del Espejo esférico f/8.5 de diámetro de apertura 140mm con OSLO EDU. (a) Características ingresadas en el OSLO EDU (b) Esquema del espejo esférico (c) Análisis de diagrama de puntos para el espejo esférico.	21
Figura 12: Simulación de Telescopio Newtoniano con espejo esférico f/8.5 de diámetro de apertura 140mm con OSLO EDU. (a) Características ingresadas en el OSLO EDU (b) Esquema del Telescopio Newtoniano para espejo esférico (c) Análisis de diagrama de puntos para el Telescopio Newtoniano con espejo esférico.....	22
Figura 13: Simulación del Espejo parabólico f/8.5 de diámetro de apertura 140mm con OSLO EDU (a) Características ingresadas en el OSLO EDU (b) Esquema del espejo parabólico (c) Análisis de diagrama de puntos para el espejo parabólico.....	23
Figura 14: Simulación de Telescopio Newtoniano con espejo parabólico f/8.5 de diámetro de apertura 140mm con OSLO EDU (a) Características ingresadas en el OSLO EDU (b) Esquema del Telescopio Newtoniano para espejo parabólico (c) Análisis de diagrama de puntos para el Telescopio Newtoniano con espejo parabólico.....	25
Figura 15: Maquina realizando el proceso de pulido de una superficie esférica de un espejo telescópico. (Telescopico, 2022)	28

Figura 16: Fase de recubrimiento de un espejo de 8 metros, para ser utilizado en el observatorio Paranal de Chile. (Observatorio, 2017)	29
Figura 17: Maquina realizando el proceso de esmerilado de un espejo de 26 pies de ancho. (Observatory, 2014).....	29
Figura 18: Laboratorio de espejos del observatorio Steward dentro la Universidad de Arizona podemos encontrar la torre donde se realizan las pruebas ópticas. (OPTICAL, 2018).....	30
Figura 19: Proceso para cambiar de una superficie esférica inicial a una superficie parabólica.	31
Figura 20: Proceso para crear la herramienta de parabolización (a)Herramienta de pétalo en software (b) Impresión de herramienta de pétalo (c)Fabricado de la herramienta de pétalo en brea.	32
Figura 21: Máquina de corte.....	36
Figura 22: Arreglo de la pieza de vidrio fijada a la base de trabajo.	37
Figura 23: Ubicación y disposición del vidrio para el proceso de corte.	38
Figura 24: Resultado del proceso de corte.	38
Figura 25: Maquina generadora de curva.	39
Figura 26: Calibración de la pieza de vidrio y herramienta de generado (a) Angulo de trabajo (b) Posición del eje (c) Espesor.	40
Figura 27: Esquema de posición para generar la superficie (a) Superficie cóncava (b) Superficie convexa.	41
Figura 28: Posición de la pieza de vidrio y la herramienta para generar la curva de la superficie (a) Superficie cóncava (b) Superficie convexa.	42
Figura 29: Pasos para el control de radio de curvatura del espejo y de la herramienta (a) Esferómetro (b) Calibración del esferómetro (c) Control del espejo (d) Control de la herramienta.	43
Figura 30: Máquina de esmerilado y pulido.	44
Figura 31: Preparación de la herramienta para el esmerilado.	45
Figura 32: Calibración de tipo de carrera de la máquina de esmerilado.	45
Figura 33: Aplicación de abrasivo en el proceso del esmerilado.	46

Figura 34: Abrasivos para realizar el proceso de esmerilado (a) Abrasivo 25 μ m (b) Abrasivo 15 μ m (c) Abrasivo 5 μ m.	46
Figura 35: Control de superficie del espejo.....	47
Figura 36: Variación del cambio del Radio de curvatura del espejo y la herramienta.....	49
Figura 37: Variación del cambio de la Sagita del espejo y la herramienta.	50
Figura 38: Proceso para la herramienta de pulido (a) Preparación de la brea (b) Creación de la herramienta de brea (c) Preparación del cuadriculado de la herramienta de brea (d) Cuadriculado y biselado (e) Preparación para el prensado (f) Prensado de la herramienta de brea.	53
Figura 39: Proceso de pulido del espejo con la herramienta de brea.	54
Figura 40: Control de la superficie esférica durante el proceso de pulido (a) Proceso para control (b) Ronchigrama de control de superficie durante el pulido.....	55
Figura 41: Proceso para crear el pétalo en la herramienta de brea para el proceso de parabolización (a) Centrado del modelo de la herramienta de pétalo (b) Trazado del modelo del pétalo en la herramienta de brea (c) Creación de la herramienta de pétalo.	56
Figura 42: Proceso de parabolización.....	56
Figura 43: Esquema para prueba óptica en laboratorio de precisión para control de superficie.	59
Figura 44: Prueba óptica en laboratorio de precisión para control de superficie.	59
Figura 45: Distribución para prueba óptica para superficie esférica $k=0$ con diferentes Offset.	60
Figura 46: Prueba óptica para superficie esférica $k=0$, $f/8.5$, $d=142\text{mm}$, $R=2400\text{mm}$, rejilla $g=2$, con diferentes Offset de 0mm, $\pm 10\text{mm}$, $\pm 20\text{mm}$, $\pm 30\text{mm}$ y $\pm 50\text{mm}$, en la columna “a” se encuentra la simulación, en la columna “b” se encuentra el Ronchigrama y en la columna “c” se encuentra la comparación de la simulación con el Ronchigrama.	64
Figura 47: Distribución para prueba óptica para superficie parabólica $k=-1$ con diferentes Offset.	65
Figura 48: Prueba óptica para superficie parabólica $k=-1$, $f/8.5$, $d=142\text{mm}$, $R=2400\text{mm}$, rejilla $g=2$, con diferentes Offset de 0mm, $\pm 5\text{mm}$, $\pm 10\text{mm}$ y $\pm 15\text{mm}$, en la columna “a” se	

encuentra la simulación, en la columna “b” se encuentra el Ronchigrama y en la columna “c” se encuentra la comparación de la simulación con el Ronchigrama. 68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Velocidades según diámetro de broca. 37

Tabla 2: Datos del proceso de esmerilado del espejo con los diferentes abrasivos..... 48

RESUMEN

El tema del presente trabajo está abocado al diseño y manufactura de un espejo parabólico de un telescopio astronómico orientado a la observación planetaria, el espejo parabólico corresponde a un diámetro de apertura 140 mm y relación focal $f/9$.

La finalidad del presente trabajo además del diseño y elaboración de dicho espejo, es que sirva de guía e incentivo para la elaboración de diferentes componentes ópticos, que están abocados a la enseñanza e investigación científica dentro de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo (UNPRG).

Para lograr tales finalidades, hemos visto por conveniente solicitar el apoyo del laboratorio de manufactura óptica, de la escuela profesional de Física, de la Facultad de Ciencias e Ingeniería, de la Pontificia Universidad Católica Del Perú (PUCP); debido a que cuentan con el equipamiento adecuado para realizar el proyecto en mención.

El procedimiento a seguir con el proyecto, básicamente consiste en primera instancia, en el diseño óptico, dentro del cual se hará el cálculo numérico de los parámetros correspondientes, tomando en cuenta los diferentes parámetros, como las ecuaciones de los diferentes tipos de aberraciones; para luego apoyarse en la utilización del software OSLO®, el cual es una herramienta digital, la que nos permitirá realizar la simulación y optimización del espejo a construir.

La continuación del proyecto vendría a ser la manufactura óptica del espejo parabólico, la cual se realizó dentro del laboratorio de diseño y manufactura óptica, y el taller de tecnología óptica de la pontificia universidad católica del Perú (PUCP), en donde utilizando diferentes técnicas y pruebas, se logrará la manufactura del espejo parabólico con las condiciones requeridas en el presente proyecto.

Los resultados logrados son primero el diseño del espejo primario, es el espejo parabólico para este tipo de telescopio Newtoniano para observación lunar y planetaria, realizado con el sistema de simulación. Además, está la manufactura del espejo primario (corte de vidrio, generado de curvatura, esmerilado y pulido), para el pulido se hacen pruebas ópticas, estas pruebas se realizan con el Test de Ronchi.

En conclusión, dentro del grupo de Óptica Aplicada de la PUCP, es posible aprender a desarrollar cada parte de un telescopio astronómico Newtoniano como es el espejo parabólico, para efecto del trabajo hemos realizado la construcción del espejo parabólico de

140mm de apertura y de $f/8.5$ dado que se encuentra dentro de las especificaciones según Rutten (1999).

Palabras clave: Óptica, Manufactura óptica, telescopio Newtoniano, Diseño óptico.

ABSTRAC

The subject of this work focuses on the design and manufacture of a parabolic mirror for an astronomical telescope aimed at planetary observation. The parabolic mirror has an aperture diameter of 140 mm and a focal ratio of $f/9$.

The purpose of this work, in addition to the design and creation of the mirror, is to serve as a guide and incentive for the development of various optical components, which are aimed at teaching and scientific research within the National University Pedro Ruiz Gallo (UNPRG).

To achieve these goals, we deemed it convenient to request the support of the Optical Manufacturing Laboratory, part of the School of Physics, Faculty of Science and Engineering, at the Pontifical Catholic University of Peru (PUCP), as they have the proper equipment to carry out this project.

The procedure to be followed in the project essentially consists, in the first instance, of the optical design, in which numerical calculations of the corresponding parameters will be made, taking into account different factors such as the equations of various types of aberrations. This will be followed by the use of OSLO® software, a digital tool that will allow us to simulate and optimize the mirror to be built.

The next stage of the project is the optical manufacturing of the parabolic mirror, which took place in the Optical Design and Manufacturing Laboratory and the Optical Technology Workshop at the Pontifical Catholic University of Peru (PUCP). Using different techniques and tests, the parabolic mirror will be manufactured under the required conditions specified in this project.

The results obtained include the design of the primary mirror, which is the parabolic mirror for this type of Newtonian telescope intended for lunar and planetary observation, created using the simulation system. Additionally, the primary mirror was manufactured (glass cutting, curvature generation, grinding, and polishing). During the polishing process, optical tests were conducted, including the Ronchi Test.

In conclusion, within PUCP's Applied Optics Group, it is possible to learn how to develop each part of a Newtonian astronomical telescope, such as the parabolic mirror. For this project, we built a 140 mm aperture parabolic mirror with an $f/8.5$ focal ratio, which meets the specifications according to Rutten (1999).

Keywords: Optics, Optical Manufacturing, Newtonian Telescope, Optical Design.

INTRODUCCIÓN

La astronomía siendo parte de la física, hoy en día es una de sus ramas más excitantes, dado que nos permite poder observar y contemplar lo que está a nuestro alrededor en el universo. Las empresas por lo tanto construyen estos para que las personas puedan observar y contemplar el universo, como los planetas y demás cuerpos en el espacio.

Últimamente, gracias a los telescopios se encuentran nuevos lugares y galaxias que no se habían visto antes, uno de los grandes telescopios hoy en la actualidad son el telescopio Hubble, este es un telescopio reflector que orbita la tierra, o el telescopio James Webb, este último es un telescopio espacial, podemos decir entonces que los telescopios son las herramientas que ayudan a la labor de los astrónomos. (Zackrisson, Zitrin, & Trenti, 2012)

En el presente trabajo se realizará la manufactura de un espejo parabólico de diámetro de apertura 140mm y relación focal $f/9$ para observación lunar y planetaria. Para poder hacer la observación lunar y planetaria los instrumentos telescópicos hacen uso de espejos de vidrio ya que estos carecen de aberración cromática, en cambio si se utiliza un lente de vidrio este si originaria aberración cromática, eso es lo que se desea evitar. (Terexeau, 1984)

Un espejo parabólico es lo que más se usa en la construcción de un telescopio, ya que mientras más grande sea el diámetro de este se preferirá un parabólico a un esférico, esto es por las aberraciones que producen, el espejo esférico su aberración es mayor. Un espejo parabólico originara mejor enfoque de las imágenes observadas. (Hetch, 2002)

La relación focal $f/9$ es apropiada para este tipo de trabajo ya que es una relación polivalente, al tener un diámetro de apertura de 140mm queremos decir que tendremos mayor capacidad de captar más luz y esto nos permitirá tener mejor nitidez en las imágenes observadas, según los cálculos obtenidos en el trabajo realizamos un espejo de $f/8.5$, este espejo se encuentra dentro del rango para poder realizar observaciones planetarias o de la luna. (Venrooii, 1988)

El espejo parabólico en la construcción es más complicado que un espejo esférico, ya que para poder verificar que este correcto se tiene que hacer distintas mediciones en distintas zonas del espejo, el proceso de pulido de este tipo de espejos parabólicos tiene mayor complejidad que el de los espejos esféricos, ya que se tiene que pulir en diferentes zonas para obtener el pulido correcto, entonces podemos decir que la manufactura de un espejo parabólico lleva mayor tiempo, dedicación y trabajo. (Ingalls, 1935)

En síntesis, la problemática del ser humano es el no poder observar a simple vista objetos lejanos, es por ello que se hace tan indispensable el uso de telescopios, como ya

hemos gracias a estos se han podido ampliar el conocimiento de lo que nos rodea, se han podido hacer descubrimientos sobre nuevas galaxias y nuevos lugares.

La física como ciencia se basa en un análisis teórico, la astronomía al ser una rama de la física de igual manera se basa en la teoría, la practica nos va a permitir poder apropiarnos de una mejor manera los conceptos sobre óptica.

Actualmente en la región Lambayeque y a nivel nacional existe la carencia de elementos ópticos para telescopios, en el trabajo de investigación realizaremos la manufactura de un espejo parabólico de un telescopio.

Formulación del problema de investigación.

Dentro del problema de investigación, que encontramos dentro de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo (UNPRG), podemos mencionar la carencia de elementos ópticos dentro del laboratorio de la escuela profesional de física, así como la falta de implementación de equipos relacionados a las ciencias ópticas.

Ante este contexto formularemos lo siguiente:

Carencia de elementos ópticos (espejos primarios) para la construcción de telescopios.

Hipótesis.

Construyendo un espejo parabólico (espejo primario) podremos obtener un elemento óptico para la futura construcción de un telescopio.

Objetivos.

Objetivo general:

Manufactura del espejo primario (espejo parabólico) de un telescopio Newtoniano.

Objetivos específicos:

Realizar el diseño del espejo parabólico en un software óptico especializado y analizar las aberraciones del espejo parabólico frente al espejo tipo esférico para observar la calidad de cada uno de los espejos.

Hacer la manufactura del espejo parabólico: generando de superficie (curvatura), esmerilado, pulido y pruebas ópticas.

Antecedentes

En la Pontificia Universidad Católica del Perú se han realizado múltiples trabajos de investigación en el área de óptica, a continuación, vamos a citar algunos de ellos, en los que

se trabaja la manufactura y diseño óptico, así como otros trabajos en los que se han realizado investigaciones en manufactura y diseño óptico, igualmente existen múltiples trabajos de investigación óptica como en la Universidad Tecnológica de Pereira en Colombia, de la cual también hemos hecho cita de una investigación, entre otros.

Accostupa (2007), nos presenta el desarrollo de un objetivo de un telescopio astronómico, que tendrá el objetivo de ser utilizado para la observación lunar y para la enseñanza de astronomía. Para ello hace uso del software óptico OSLO-EDU, para poder realizar un análisis de sensibilidad y tolerancia, pudiendo así obtener la mejor viabilidad del proyecto y elegir mejor sus parámetros. Considera también la manufactura del objetivo, empleando las diferentes técnicas y evaluaciones recomendadas, para luego evaluar las características principales y sometiendo a los diferentes tipos de pruebas ópticas. Logrando obtener un objetivo con una distancia focal de 725.83mm y una relación focal de 14.21.

Quinteros (2008), en su trabajo de investigación, desarrollado en la universidad tecnológica de Pereira de Colombia, se detalla la construcción de un telescopio del tipo newtoniano, el cual tiene por características principales un objetivo de 15 cm, una distancia focal de 120 cm y una relación focal $f\#$ de 8; en el cual también está considerado la montura acimutal. Describe los parámetros principales a tener en consideración para el diseño y elaboración de este tipo de telescopios; asimismo detalla los procesos que se deben tener en consideración en cuanto a la manufactura de los vidrios y los diferentes componentes de este tipo de telescopios. Finalmente se muestran los resultados del trabajo, logrando obtener excelentes resultados en su uso en astrofotografía del espacio profundo.

Romero Herrera (2012), dentro de su trabajo de investigación nos presenta un estudio de estandarización de los procedimientos a seguir dentro de la manufactura óptica de precisión, en la cual nos detalla los procesos de manufactura óptica, teniendo en cuenta los diferentes tipos equipos y materiales y las formas de cómo utilizarlos correctamente; como la máquina de corte, con sus procedimientos y precauciones durante el corte; la máquina generadora de curvas, con sus respectivas recomendaciones, precauciones y ajustes previos al generador de curva, para poder obtener el elemento óptico que se desea obtener; la máquina de pulido y esmerilado, con sus recomendaciones y especificaciones para un correcto pulido y esmerilado de la pieza óptica.

Gonzales Niño (2012), detalla en su trabajo de investigación el diseño de un telescopio para instrumentos Estadimétricos. Menciona el principio de funcionamiento de este tipo de telescopios y los parámetros importantes, y la realización de las correcciones de

las aberraciones de tipo cromática, esférica y de coma, y estas aberraciones están en función de los radios de curvatura de los lentes, se utilizó un programa de optimización óptica compatible con el OSLO, llamado OPIC. Nos describe es ocular diseñado, ocular ortoscopico de Kellner, e indica el proceso para el diseño y manufactura óptica para lograr así controlar las aberraciones antes mencionadas y la posición de la pupila de salida.

Montoya (2020), en su trabajo de investigación del Diseño y Manufactura óptica del objetivo de un telescopio de características de un objetivo de doblete acromático de apertura 50mm y longitud focal de 450mm, su trabajo de investigación tiene como finalidad hacer una guía básica para la manufactura de ópticos, objetivos y lentes, el procedimiento para realizarlo fue hacer primero el diseño óptico en un software especial OSLO, y luego realizar cálculos y ecuaciones para las aberraciones y realizar la manufactura del mismo, logrando un objetivo de doblete acromático cementado, haciendo la comprobación por el diagrama de manchas el cual le dio de respuesta que si se cumple el criterio de difracción y se cumple la finalidad de realizar una guía para la manufactura de los mismos.

Ochoa Suarez (2020) en su investigación de la Manufactura de un espejo parabólico tiene como objetivo el desarrollar la técnica para realizar la manufactura de un espejo parabólico, en el caso de su investigación es un espejo parabólico de 140mm de apertura y de $f/5$ relación focal. El proceso para realizar el trabajo de investigación es generar el moldeamiento del espejo mediante un software óptico, hacer la manufactura con diferentes herramientas y técnicas para lograr el objetivo, la comprobación de la superficie del espejo se realizó con el test de Ronchi, se concluye que se logró el objetivo de la realización de la manufactura de un espejo parabólico.

CAPITULO I

DISEÑO TEORICO

Capítulo 1.

Diseño teórico.

1.1. Fundamentos.

En el presente trabajo que es la manufactura de un espejo parabólico, se ha considerado el tipo de telescopio newtoniano, el cual, según podemos apreciar en la figura 1, cuenta básicamente con dos espejos: uno secundario, que generalmente es un espejo plano, y otro espejo primario que es el que se pretende construir, el cual es de una disposición parabólica. Se ha tomado las siguientes características principales que son un diámetro de apertura de 140 mm, y una relación focal $f/9$ que lo hacen ideales para la observación lunar y planetaria. (Rutten, 1999)

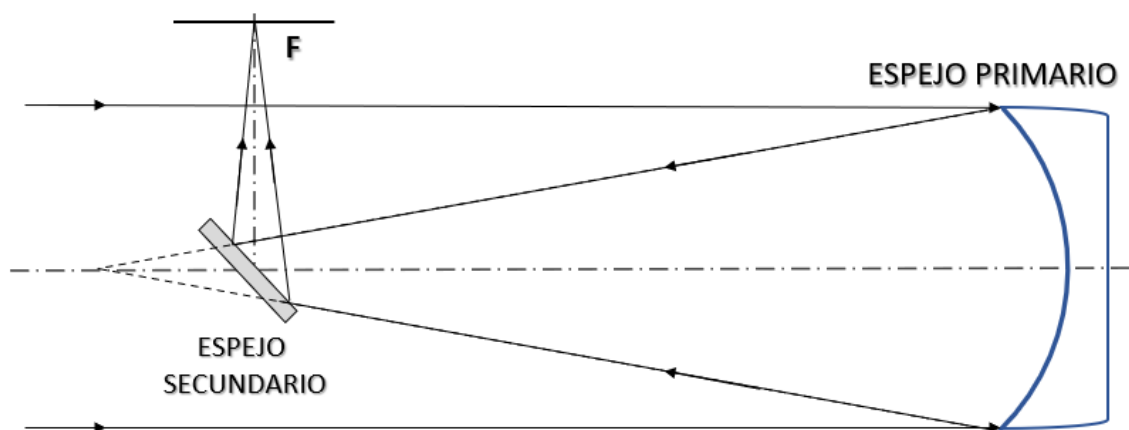


Figura 1: Esquema del objetivo de un Telescopio Newtoniano.

Empezaremos por definir el diámetro de apertura, el cual es un parámetro sumamente importante, ya que nos va a indicar la cantidad de luz que nuestro instrumento óptico es capaz de captar o recoger, cabe mencionar que este diámetro de apertura corresponde siempre al diámetro del espejo del telescopio. En resumen, podemos decir que entre más grande sea la superficie o diámetro de apertura, será mayor la cantidad de luz captada del objeto a estudiar.

Para tener la seguridad de que la manufactura de este espejo parabólico sea el adecuado para la observación planetaria, se ha elegido el diámetro de apertura de 140 mm, el cual capta una gran cantidad de luz, permitiendo así una mejor nitidez del objeto a estudiar.

Mientras que la relación focal o resolución de un telescopio óptico, se define por la relación entre la distancia focal y el diámetro del espejo principal. Generalmente esta relación focal oscila entre $f/4$ y $f/12$.

Se considera espejos primarios rápidos a aquellos que tiene una relación focal entre f/6 a f/4, que los hace adecuados para la observación de objetos del cielo profundo y enfoque de astrofotografía, debido al rápido aumento del coma alejándose del eje óptico.

Mientras que los espejos primarios lentos entre f/7 y f/12, se consideran mejores para observación lunar y planetaria, debido a que la longitud del instrumento se vuelve excesiva. (Rutten, 1999)

La relación focal del espejo está relacionada con el radio de curvatura previsto para el trabajo, la distancia focal, y el diámetro de apertura del espejo parabólico (Rutten, 1999).

Calculamos la relación focal para el espejo parabólico:

Radio de curvatura previsto: 2400 mm

Diámetro de apertura: 140 mm

Entonces:

$$f\# = \frac{f}{D} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

f#: numero de la relación focal

f: distancia focal

D: diámetro de apertura (diámetro del espejo)

Sabiendo que:

$$R = 2f$$

Donde:

R: radio de curvatura

$$R = 2f$$
$$f = \frac{R}{2} = \frac{2400 \text{ mm}}{2} = 1200 \text{ mm}$$

Entonces de Ec.1:

$$f\# = \frac{f}{D}$$
$$f\# = \frac{1200 \text{ mm}}{140 \text{ mm}}$$

$$f\# = 8.572$$

Con esto decimos que la relación focal que utilizaremos para nuestro trabajo de investigación será f/8.5 ya que, tomando en cuenta las consideraciones y recomendaciones

de Rutten, también sabiendo que se encuentra entre los rangos de $f/7$ y $f/12$ para observación lunar y planetaria según las especificaciones, optaremos por construir el espejo parabólico con una relación focal de $f/8.5$.

1.2. Tipos de espejos.

Existen espejos de diferente superficie, los espejos planos, esféricos y esféricos, dentro de los espejos esféricos encontramos los espejos parabólicos, elípticos e hiperbólicos, a continuación, explicaremos estos tipos de espejos.

1.2.1. Espejos esféricos.

Este tipo de espejos, resultan de un casquete esférico, que se forma como la sección de una esfera, separada por un plano; dentro de la cual la superficie reflejante puede ser tanto la parte interna o la parte externa. Por lo tanto, podemos decir que este tipo de espejos podemos encontrarlos tanto en su forma cóncava, así como convexa.

En general decimos que, si la superficie reflejante es la interna, el espejo es cóncavo; de manera contraria, si la superficie reflejante es la externa, decimos que el espejo es del tipo convexo. (Malacara, 2015)

Para la formación de imágenes habitualmente se emplean tres rayos o haces incidentes, pero solamente resulta indispensable dos de ellos.

Por tanto, en la siguiente imagen, figura 2, podemos observar un tipo de espejo cóncavo, la cual la superficie reflectora es la interna, al cual se le hace incidir haces de luz, y al proyectar los rayos reflejados, podemos visualizar que los rayos reflejados no convergen en un mismo punto, el cual crea un fenómeno óptico a la cual se le denomina aberración esférica.

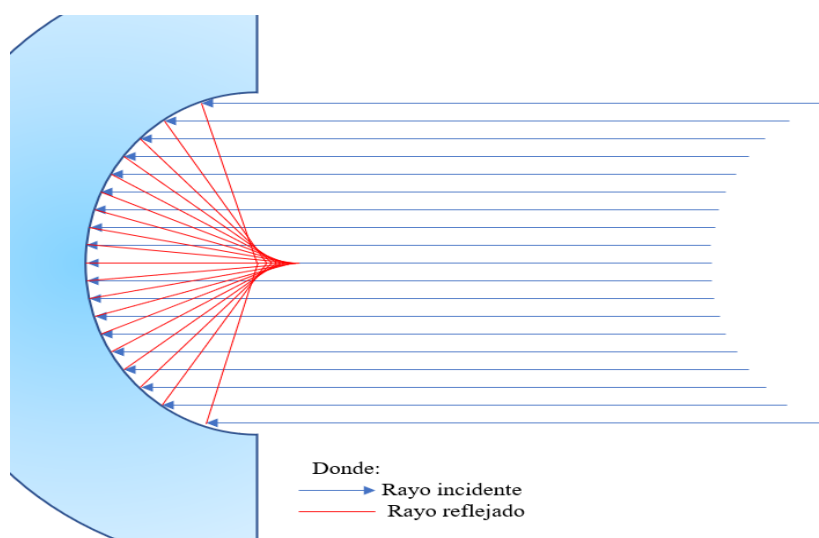


Figura 2: Esquema de Espejo esférico.

1.2.2. Espejos esféricos.

Son superficies no esféricas, y se utilizan principalmente para la corrección de aberración esférica, las superficies asféricas son diversas, aunque las más comunes o más utilizadas son las que hacen referencia a las cónicas. Dentro de las cuales podemos encontrar como por ejemplo un paraboloide de revolución, figura 3, siempre y cuando el objeto se encuentre en el eje óptico y al infinito.

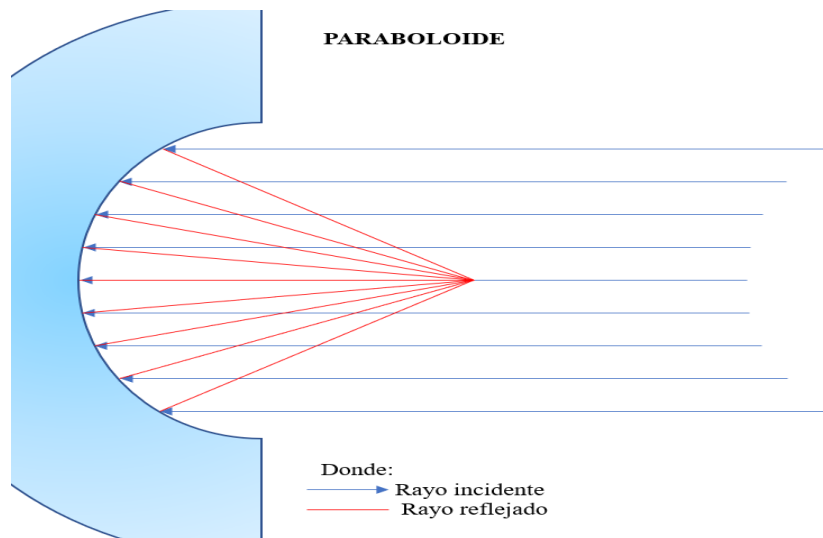


Figura 3: Esquema de Espejo asférico paraboloide o espejo parabólico.

También se puede considerar un elipsoide de revolución, figura 4, siempre que se cumpla que el objeto en estudio, se encuentre en cualquiera de los focos de la elipse.

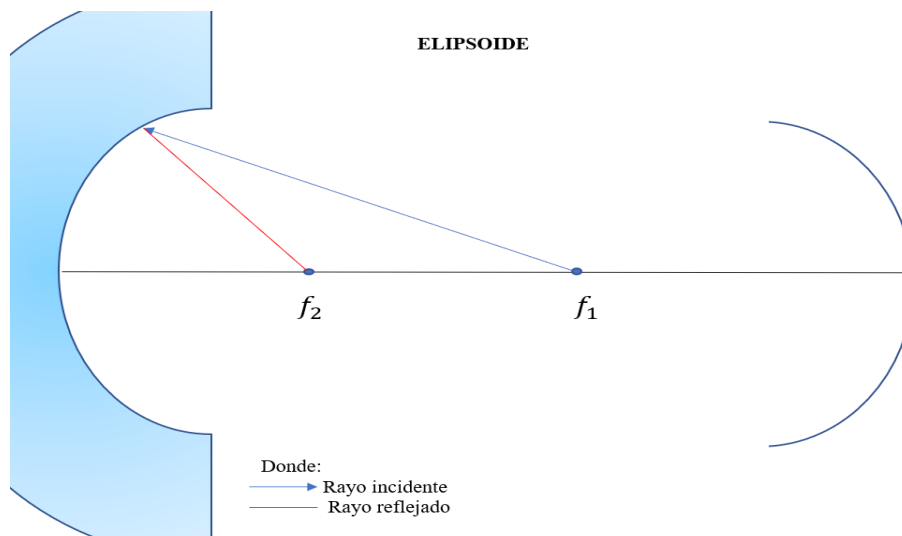


Figura 4: Esquema de Espejo esférico elipsoide.

De igual manera un hiperboloide de revolución, figura 5, puede estar exenta de aberración esférica siempre y cuando el objeto se encuentre en uno de los focos de la hipérbola.

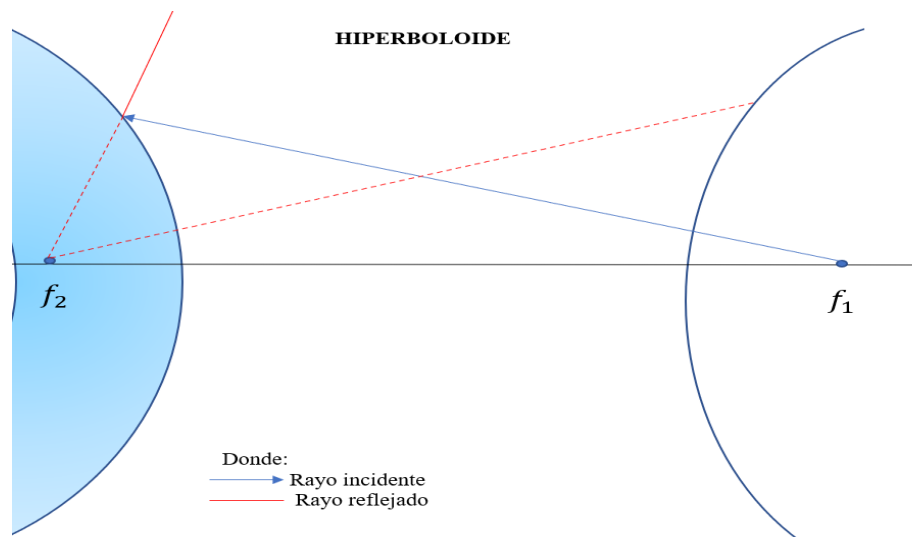


Figura 5: Esquema de Espejo esférico hiperboloide.

Los espejos parabólicos o de tipo paraboloide de revolución, generalmente son utilizados para exentar o eliminar la aberración esférica del objeto, debido a que este espejo parabólico tiene la particularidad de que todos los rayos que llegan paralelos al eje óptico o llamados rayos paraxiales, se reflejan pasando por el foco del paraboloide. Esto lo podemos evidenciar en la figura 3, en donde vemos que todos los rayos reflejados convergen en un mismo punto o foco del paraboloide.

1.3. Porque elegir un espejo esférico.

Uno de los grandes problemas que se tiene al momento de diseñar y construir un telescopio es los diferentes tipos de aberraciones con las que se tiene que lidiar, una de las principales es la aberración cromática, que básicamente se forma cuando un haz de luz atraviesa un material con un determinado índice de refracción, y que de cierta manera desvía y reduce la velocidad de haz de luz al penetrar la lente. Y es aquí donde aparece la denominada aberración cromática, debido a que el índice de refracción del material (lente), varía con las diferentes longitudes de ondas de la luz, en consecuencia, con el color, es decir

el foco de la lente no es el mismo para la luz amarilla, roja o azul. Debido que la luz blanca se descompone ligeramente cuando atraviesa un lente.

Para eliminar este tipo de aberración cromática en la construcción de telescopios, comúnmente se recurre a la utilización de dobletes acromáticos, que son un par de lentes que dispuestos de cierta manera, logran corregir, aunque no completamente, este tipo de aberración cromática.

Para eliminar por completo este tipo de aberración, se optó por utilizar un espejo, debido a que elimina completamente este tipo de aberración cromática, debido a que la luz no atraviesa medios que tengan diferente índice de refracción, por lo que los rayos incidentes son reflejados en su totalidad.

Otro problema frecuente en la elaboración de telescopios, es la aberración del tipo esférica, en la cual básicamente ocurre cuando los rayos o haces de luz paraxiales incidentes al espejo, son reflejados y se concentran en distintos puntos, que son diferentes a la del eje óptico, por lo cual genera una distorsión de la imagen.

Para reducir este tipo de aberración, se optó por la utilización de un espejo del tipo parabólico, debido a su forma y gracias a su disposición geométrica, como ya hemos visto, logra corregir la aberración esférica; haciendo que los rayos paraxiales incidentes, al momento de su reflexión, son dispuestos de una manera eficaz en el mismo punto focal del eje óptico.

1.4. Tipos de Aberraciones.

1.4.1. Aberración esférica

Este tipo de aberraciones se produce aun cuando las superficies sean perfectamente esféricas, se produce debido a una desviación de los rayos, la cual produce diferentes puntos de convergencia. Es decir, que los rayos de luz que inciden lejos del eje no se focalizan en el mismo punto que los más próximos al eje. En la figura 6 observamos un ejemplo del tipo de aberración esférica.

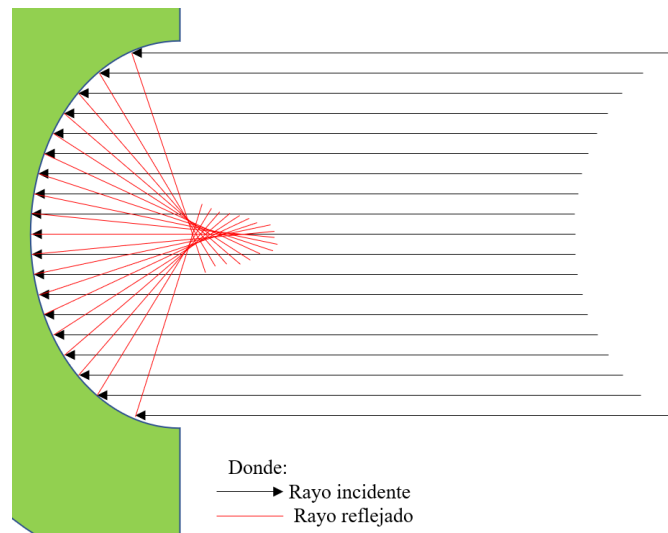


Figura 6: Tipo de aberración esférica.

Es decir, en este defecto óptico en el cual los rayos de luz incidentes que son paralelos y próximos al eje óptico (llamados también rayos paraxiales), ya sea de un espejo o lente esférica, son llevados y se concentran en un foco diferente al del eje óptico, cuando lo esperado o ideal sería que todos los rayos se concentren en un mismo foco o punto focal. (Malacara, Óptica Básica, 2015)

1.4.2. Aberración de coma

Este tipo de aberración, se manifiesta exclusivamente fuera del eje óptico, y se manifiesta debido a que la amplificación paraxial es diferente a la amplificación marginal. Donde la coma sagital es la distancia entre el foco paraxial y el foco marginal sagital, mientras que la coma tangencial es la distancia entre el foco marginal tangencial y el foco paraxial, vemos en la figura 7 un ejemplo del tipo de aberración de coma. (Hetch, 2002)

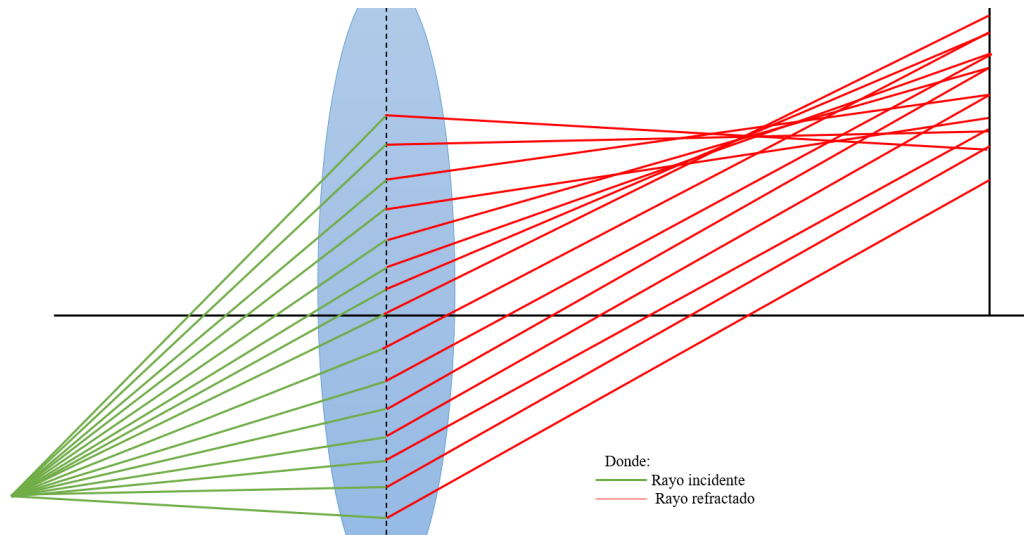


Figura 7: Tipo de aberración de coma.

Dicho de otra manera, podemos decir que este defecto óptico, se produce cuando los rayos que son emitidos por la fuente de luz, no llegan paralelos al eje óptico, sino de forma oblicua, por lo tanto, convergen en distintos puntos del plano focal.

1.4.3. Astigmatismo

La aberración de astigmatismo, también degrada la imagen fuera del eje, y se debe a la separación entre los puntos de convergencia de los rayos sagitales, con el punto de convergencia de los rayos meridionales, en la siguiente figura, figura 8, se observa un ejemplo del tipo de aberración de astigmatismo.

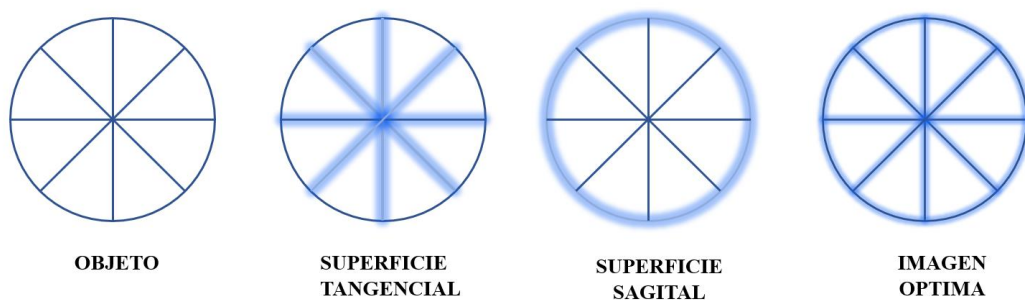


Figura 8: Tipo de aberración por astigmatismo.

La superficie tangencial y sagital, son las superficies generadas a partir del enfoque de los rayos tangenciales y sagitales respectivamente. De tal manera que, si el campo es pequeño, estas superficies adoptan forma esférica, y si de alguna manera se eliminará el astigmatismo, las superficies sagital y tangencial se unirían formando una sola a la cual se le denomina superficie de petzval.

El astigmatismo, se mide tomando en cuenta y como referencia la superficie de petzval; de esta manera tenemos que el astigmatismo longitudinal sagital es la distancia entre la superficie sagital a la de petzval, mientras que el astigmatismo longitudinal tangencial, es la distancia entre la superficie tangencial a la superficie de petzval. (Malacara, Óptica Básica, 2015)

En resumen, la principal característica del fenómeno óptico de astigmatismo, es que la lente o espejo proyectan planos distintos a diferentes distancias, por lo tanto, no permite enfocar de manera correcta una imagen.

1.4.4. Curvatura de campo

En la curvatura de campo, si se tiene un objeto plano, y se forma la imagen a través de una lente o superficie refractora, la imagen que se forma, resulta no ser plana como la del objeto, sino que comúnmente se evidencia una curvatura, en la figura 9 podemos ver un ejemplo del tipo de aberración de curvatura de campo.

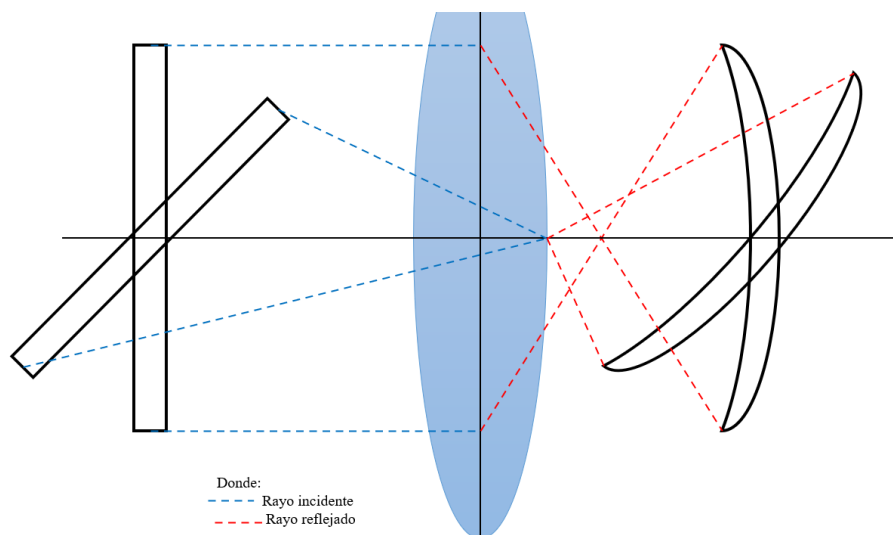


Figura 9: Tipo de aberración por curvatura de campo.

La curvatura depende de varios factores. En esta sección, para calcular la curvatura de campo, se utiliza el teorema de Petzval. Debido a que nos da el desplazamiento longitudinal de la imagen que se encuentra fuera del eje, en relación al plano focal, como consecuencia de la curvatura de la superficie en la que se forman las imágenes. (Hetch, 2002)

1.4.5. Distorsión

La distorsión es un tipo de aberración, que se forma sin importar que todos los rayos que parten del punto objeto, llegaran a un solo punto en el plano focal. Este tipo de distorsión puede ser positiva o negativa. Así tenemos en la siguiente imagen un ejemplo de la aberración por distorsión, figura 10, que, si el objeto es cuadrado, la distorsión positiva

adopta una forma de barril, mientras que, en la distorsión negativa, la imagen se curva en sus lados.

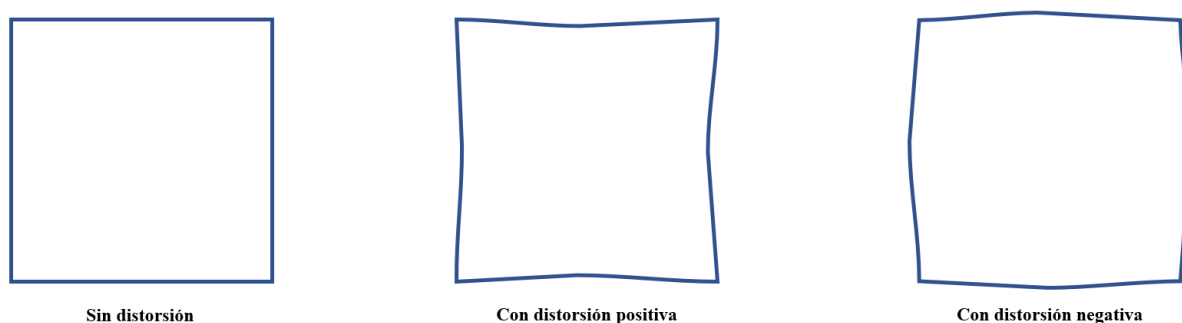


Figura 10: Tipo de aberración por distorsión.

De aquí podemos decir que esta distorsión se evidencia como una amplificación de la imagen, y que no es la misma para las diferentes alturas de la imagen. Es decir, la amplificación aumenta o disminuye si la distorsión es negativa o positiva.

Podemos mencionar también que la distorsión es nula en una lente delgada, salvo la colocación de un diafragma, delante o detrás de ella, esto se debe a la presencia de las demás aberraciones. (Hetch, 2002)

1.5. Simulación y comparación del espejo primario esférico y parabólico (asférico).

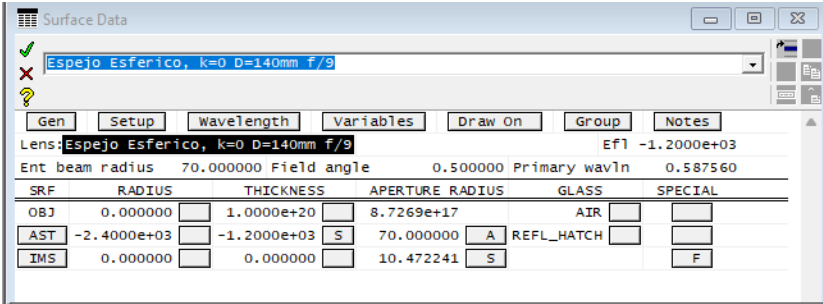
Para poder realizar la simulación del espejo esférico introducimos las características del espejo en OSLO EDU para diseño óptico (Lambda Research Corporation. Optical design software leader).

Las características que introducimos son el diámetro de apertura del espejo esférico de 140mm, la relación focal ($f\#$), distancia focal de 1200mm, el ángulo de visión de 0.5° , y la constante de la cónica $K=0$, para espejo esférico, en la figura 11.a observamos los datos ya ingresados en el programa.

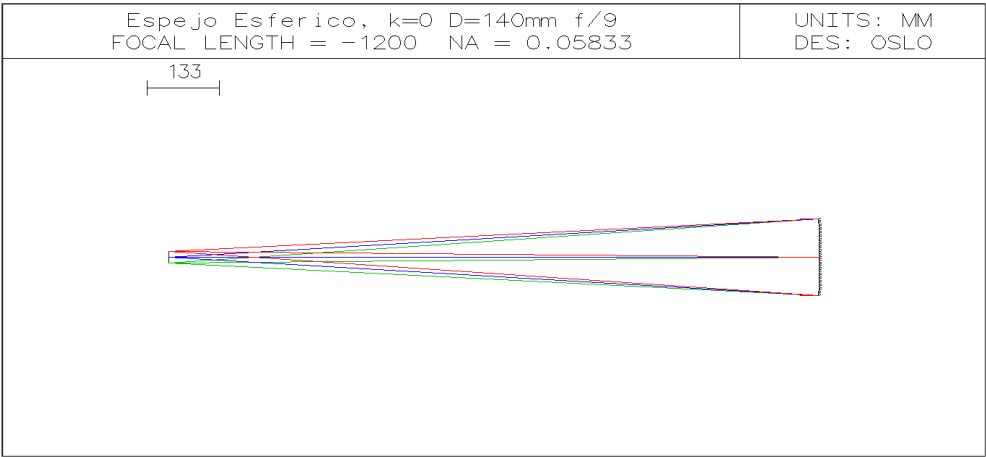
La figura 11.b nos brinda una simulación del espejo esférico con las características ya dadas, en el cual se ven los rayos de luz que no llegan a converger en un solo punto, ocasionando esto aberración esférica en la imagen formada.

Para hacer el análisis de la imagen, nos enfocamos en el análisis del diagrama de puntos o diagrama de manchas, ver figura 11.c, del haz de luz para el espejo esférico, este se muestra en color rojo, y para los rayos de luz con desviación de 0° , 0.35° y 0.5° se muestra su respectivo círculo en color negro que nos aportara el límite de resolución de la imagen, los rayos de luz se evalúan enfocados en el foco y alejados con un offset de $\pm 0.1\text{mm}$, el punto

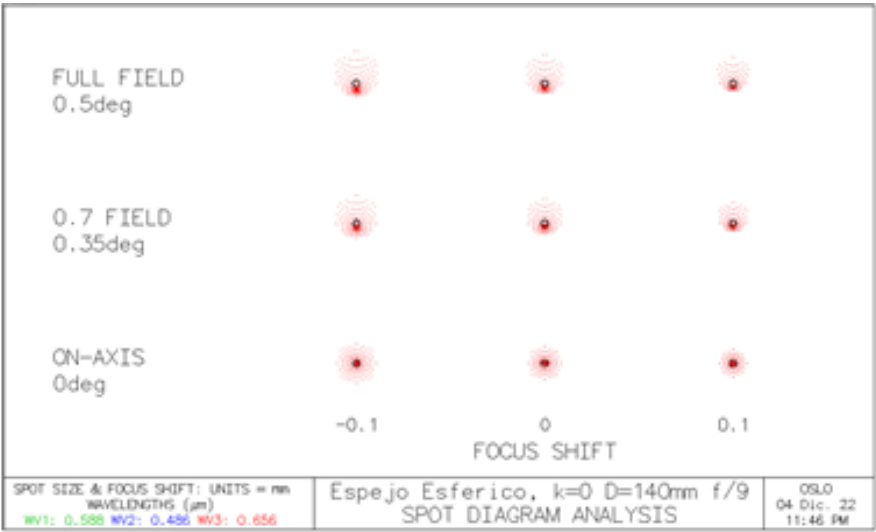
que más nos interesa es el de la imagen formada en el foco, según esto podemos observar que el rayo o haz de luz no se concentra en un solo punto, genera una mancha de puntos dispersados de la zona central del límite de resolución, en el centro de nuestro límite de resolución los rayos se encuentran concentrados con mayor intensidad, vemos también que la mancha o diagrama de puntos es mayor que el límite de resolución y esto hará que la imagen se vea borrosa.



(a)



(b)



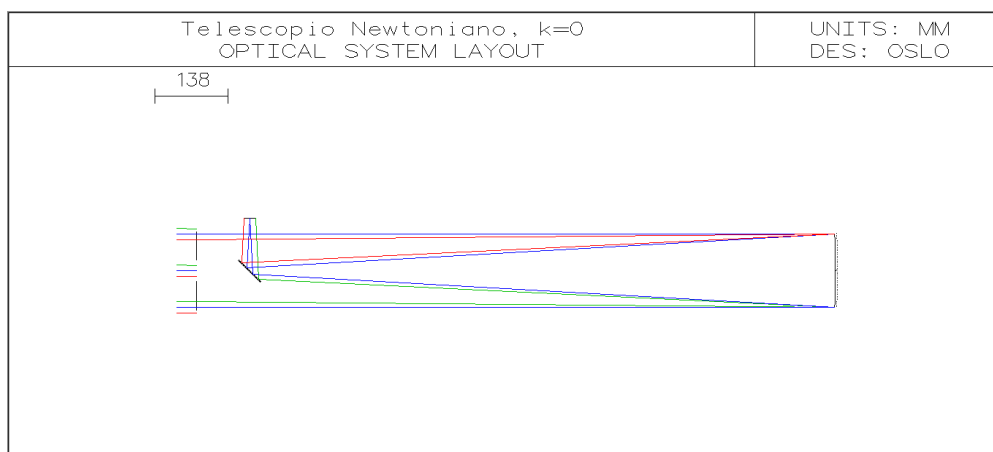
(c)

Figura 11: Simulación del Espejo esférico f/8.5 de diámetro de apertura 140mm con OSLO EDU. (a) Características ingresadas en el OSLO EDU (b) Esquema del espejo esférico (c) Análisis de diagrama de puntos para el espejo esférico.

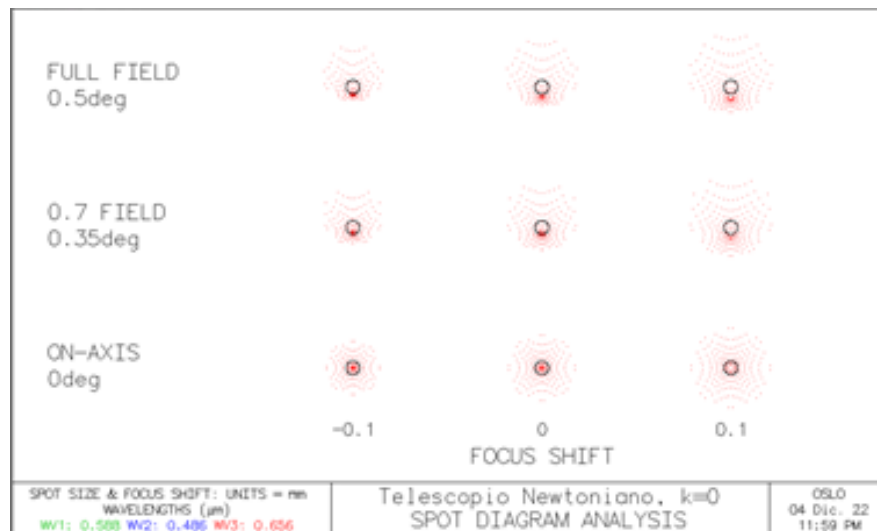
En la siguiente imagen podemos ver la simulación del telescopio newtoniano para el espejo esférico, las características ingresadas en programa óptico son las mismas que las ingresaras para la simulación del espejo primario, esférico, ver figura 12.a, en la figura 12.b observamos el sistema de distribución completo del telescopio newtoniano para el espejo esférico, y en la figura 12.c podemos ver que el diagrama de puntos o manchas es de similar forma comparado con el evaluado para el espejo esférico, el sistema del telescopio newtoniano si genera variación en la formación y resolución de la imagen, pero en general el tamaño de la mancha de puntos o del diagrama de puntos son muy parecidos con los evaluados para el espejo esférico.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE	RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	8.7269e+17		AIR	
1	0.000000	1.2000e+03	75.000000	KX	AIR	
AST	-2.4000e+03	-1.1000e+03	70.000000	A	REFL_HATCH	
3	0.000000	100.000000	20.500000	X	REFL_HATCH	C
IMS	0.000000	0.000000	10.472241	S		F

(a)



(b)



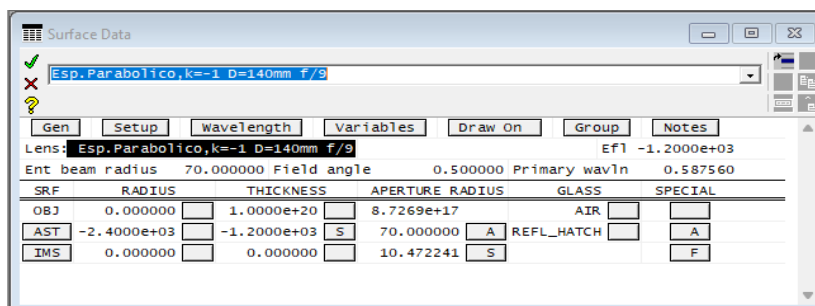
(c)

Figura 12: Simulación de Telescopio Newtoniano con espejo esférico f/8.5 de diámetro de apertura 140mm con OSLO EDU. (a) Características ingresadas en el OSLO EDU (b) Esquema del Telescopio Newtoniano para espejo esférico (c) Análisis de diagrama de puntos para el Telescopio Newtoniano con espejo esférico.

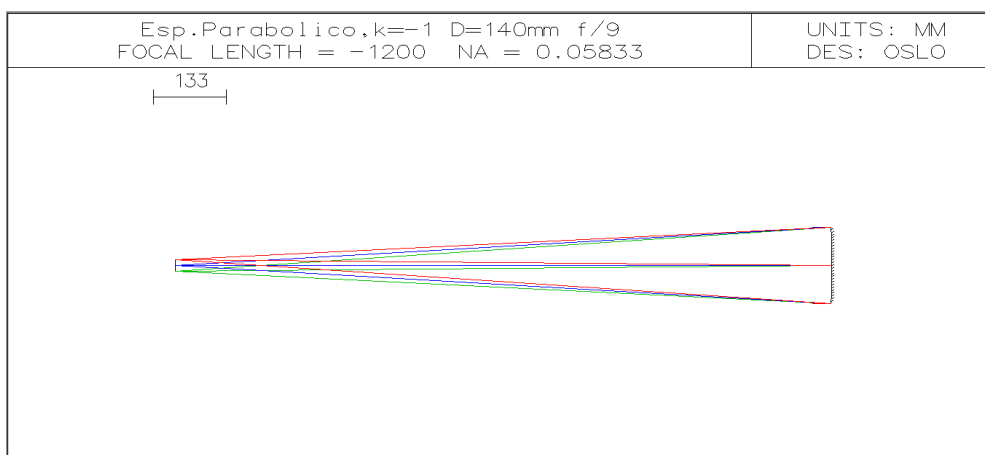
Realizamos la simulación para el espejo parabólico de constante de la cónica $K=-1$, en el cual las características que introducimos sobre el diámetro de apertura, la relación focal ($f\#$), distancia focal, el ángulo de visión, son las mismas que para el espejo esférico, entonces en la figura 13.a observamos los datos ya ingresados en el programa.

La simulación del espejo parabólico con las características ya dadas, vemos que los rayos de luz si llegan a converger en un solo punto, punto de foco, ocasionando esto una reduciendo de la aberración tipo esférica en la imagen formada, ver figura 13.b.

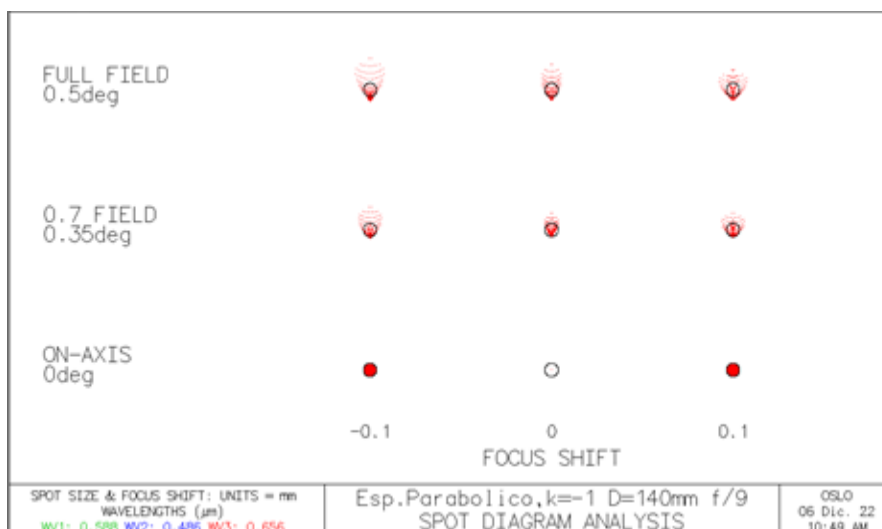
El diagrama de puntos o diagrama de manchas, ver figura 13.c, nos brinda un análisis de la imagen dado por el haz de luz para el espejo parabólico, en color rojo, y para los rayos de luz con desviación de 0° , 0.35° y 0.5° , estos se evalúan enfocados en el foco y alejados con un offset de $\pm 0.1\text{mm}$, el límite de resolución esta dado por un círculo en color negro, el punto que nos interesa evaluar la formación y resolución de la imagen es en el foco, observamos entonces que el rayo o haz de luz se llega a concentrar en un solo punto, las manchas de puntos no se encuentran dispersados de la zona central del límite de resolución, en comparación al espejo esférico en el centro de nuestro límite de resolución los rayos se encuentran concentrados con mayor intensidad, vemos también que la mancha o diagrama de puntos no excede el límite de resolución y esto hará que la imagen no se vea borrosa.



(a)



(b)



(c)

Figura 13: Simulación del Espejo parabólico f/8.5 de diámetro de apertura 140mm con OSLO EDU (a) Características ingresadas en el OSLO EDU (b) Esquema del espejo parabólico (c) Análisis de diagrama de puntos para el espejo parabólico.

La siguiente imagen podemos es la simulación del telescopio newtoniano para el espejo parabólico, con las mismas características anteriores, figura 14.a, en la figura 14.b se

simula el sistema de distribución completo del telescopio, y en la figura 14.c podemos evaluar el diagrama de puntos dando a entender que es de similar forma que evaluando el espejo parabólico por separado.

El sistema del telescopio newtoniano si genera variación en la formación y resolución de la imagen en comparación a lo que nos aporta el espejo parabólico, pero en general el tamaño de la mancha son muy parecidos, los diagramas de puntos son parecidos.

Surface Data

Conic

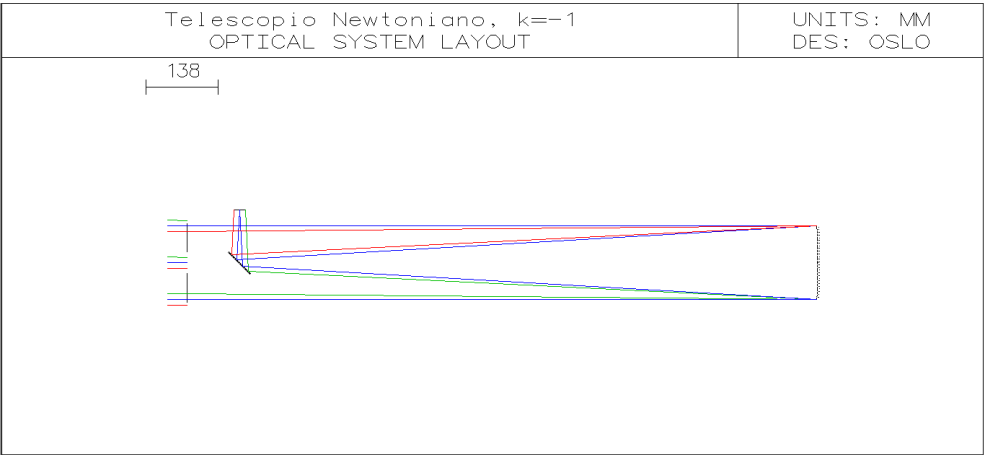
Gen Setup Wavelength Variables Draw On Group Notes

Lens: Telescopio Newtoniano, k=-1

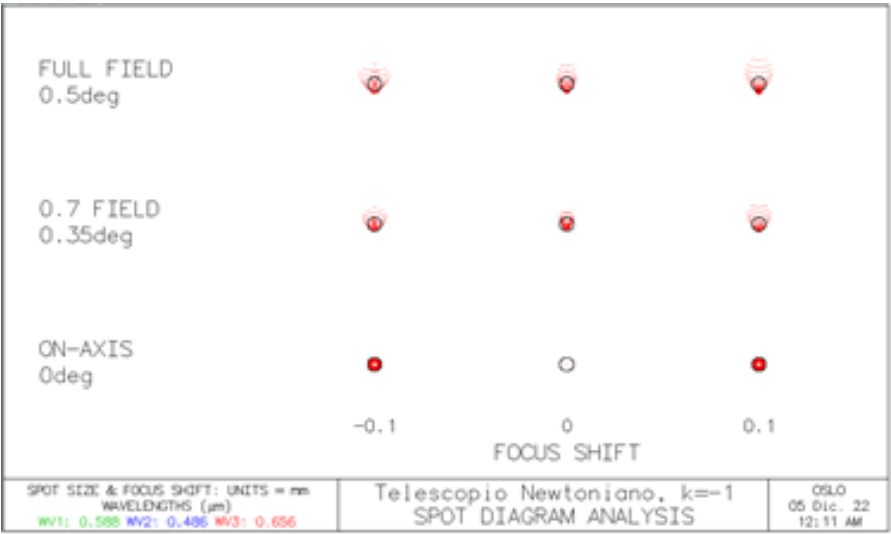
Ent beam radius 70.000000 Field angle 0.500000 Primary wavln 0.587560

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE	RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	8.7269e+17		AIR	
1	0.000000	1.2000e+03	75.000000		AIR	
AST	-2.4000e+03	-1.1000e+03	70.000000		REFL_HATCH	A
3	0.000000	100.000000	20.500000		REFL_HATCH	C
IMS	0.000000	0.000000	10.472241		S	F

(a)



(b)



(c)

Figura 14: Simulación de Telescopio Newtoniano con espejo parabólico $f/8.5$ de diámetro de apertura 140mm con OSLO EDU (a) Características ingresadas en el OSLO EDU (b) Esquema del Telescopio Newtoniano para espejo parabólico (c) Análisis de diagrama de puntos para el Telescopio Newtoniano con espejo parabólico.

Comparando el espejo esférico con el espejo parabólico, podemos observar que el espejo parabólico controla, elimina, la aberración esférica, y según la comparación de los diagramas de punto se observa que el espejo de tipo parabólico nos aportara una mejor resolución de imagen que la que nos puede generar el espejo esférico.

CAPITULO II

PARABOLIZACION DE LA SUPERFICIE

Capítulo 2.

Parabolización de la superficie.

2.1. Introducción.

En el presente trabajo para lograr la parabolización de la superficie esférica, se ha utilizado una maquina pulidora tradicional, aunque también es necesario mencionar que existen maquinas mucho más complejas que nos ayudan en el proceso de parabolización de la superficie, cabe mencionar que anteriormente se realizaba este proceso de forma manual, la cual demandaba un gran esfuerzo tanto en el tiempo empleado, así como en los parámetros que se deseaban obtener.

Actualmente estas máquinas van desde las más simples que generalmente utilizan platos giratorios y técnicas tradicionales de pulido; hasta las maquinas más complejas que utilizan diferentes técnicas para parabolizar, diferentes materiales para la devastación y pulido así como sensores y softwares más complejos que nos facilitan el modelado de las superficies con los parámetros deseados, las cuales son utilizadas comúnmente en la construcción de grandes espejos esféricos de grandes dimensiones, las cuales reducen el enorme trabajo, tanto en la consideración de errores como en el tiempo empleado para tener un espejo con las especificaciones deseadas; este tipo de máquinas son de gran ayuda, debido a que reducen considerablemente el tiempo empleado en los procesos de devastación y pulido, y en consecuencia la optimización y eficiencia en cuanto a la construcción de este tipo de espejos.

2.2. Fundamento.

Las maquinas generalmente más utilizadas para la construcción de espejos esféricos y asfericos, suelen ser unas máquinas que utilizan platos giratorios, los cuales pueden hacer movimientos rotarios u oscilatorios o una combinación de ambos movimientos. Existen diferentes fabricantes y modelos, por lo que no se puede discernir si uno es mejor que otro, ya que depende la calibración de la maquina y las técnicas empleadas al momento de la elaboración de un determinado espejo.

Por ejemplo, en la siguiente imagen, figura 15, podemos apreciar una máquina, realizando el proceso de pulido de una superficie asférica, la cual realiza movimiento de

rotación del espejo y un movimiento oscilatorio de la herramienta de brea (Telescopico, 2022).

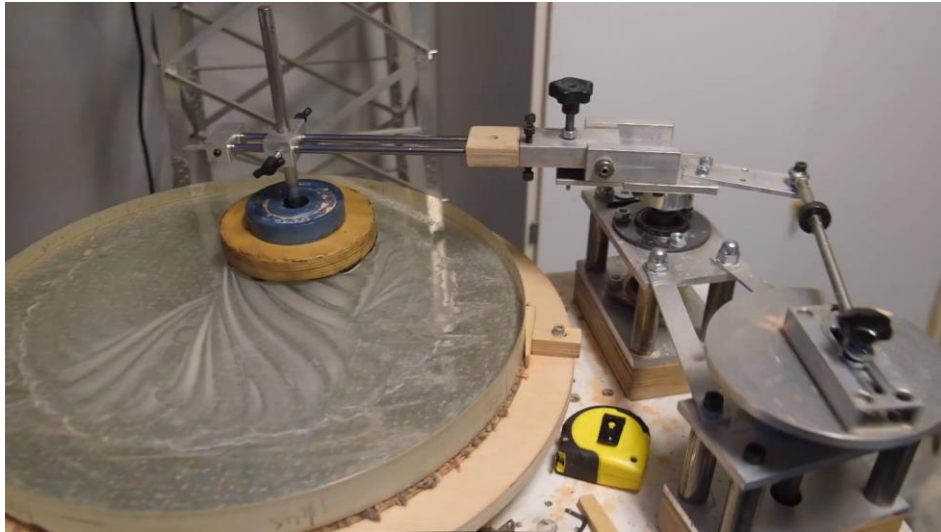


Figura 15: Maquina realizando el proceso de pulido de una superficie esférica de un espejo telescópico. (Telescopico, 2022)

Mientras tanto, las grandes maquinas suelen ser utilizadas para trabajos complejos, que, de ser realizados manualmente, demandarían mucha pericia en los trabajadores y una excesiva cantidad de tiempo para poder llegar a obtener las superficies deseadas. Para ello se han construido máquinas que faciliten y hagan el trabajo de manera más eficiente; hay muchos ejemplares como por ejemplo en el observatorio Paranal en Chile.

En la siguiente imagen, figura 16, podemos observar la fase de recubrimiento de un espejo de 8 metros, para ser utilizado en el observatorio Paranal de Chile. (Observatorio, 2017)

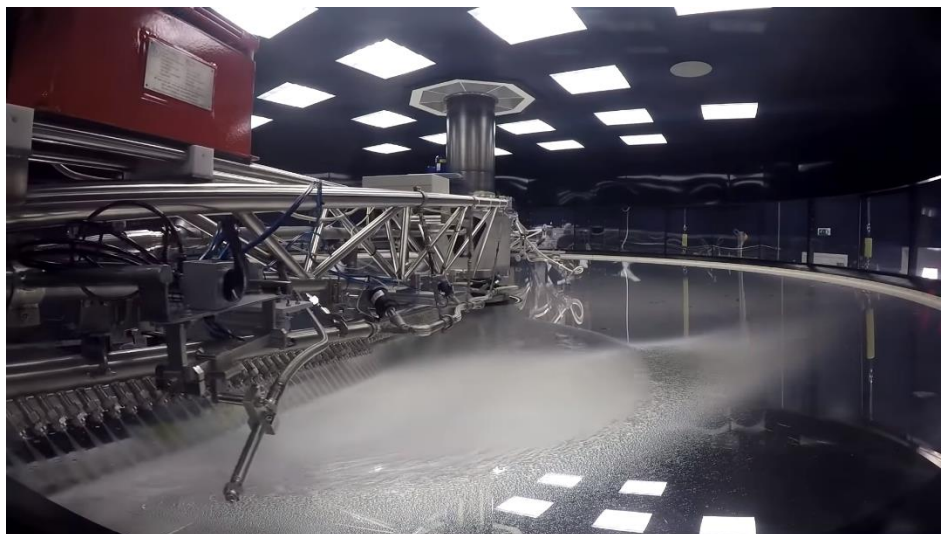


Figura 16: Fase de recubrimiento de un espejo de 8 metros, para ser utilizado en el observatorio Paranal de Chile. (Observatorio, 2017)

En la siguiente imagen, figura 17, podemos ver el proceso de esmerilado de un espejo de 26 pies de ancho, en la cual se utiliza una máquina que se encuentra en el laboratorio de espejos del observatorio Steward, de la universidad de Arizona en Estados Unidos. Dicha maquina cuenta con una precisión aproximada de milésimas de pulgada, comparado a la cuarta parte del grosor de una hoja de papel. (Observatory, 2014)

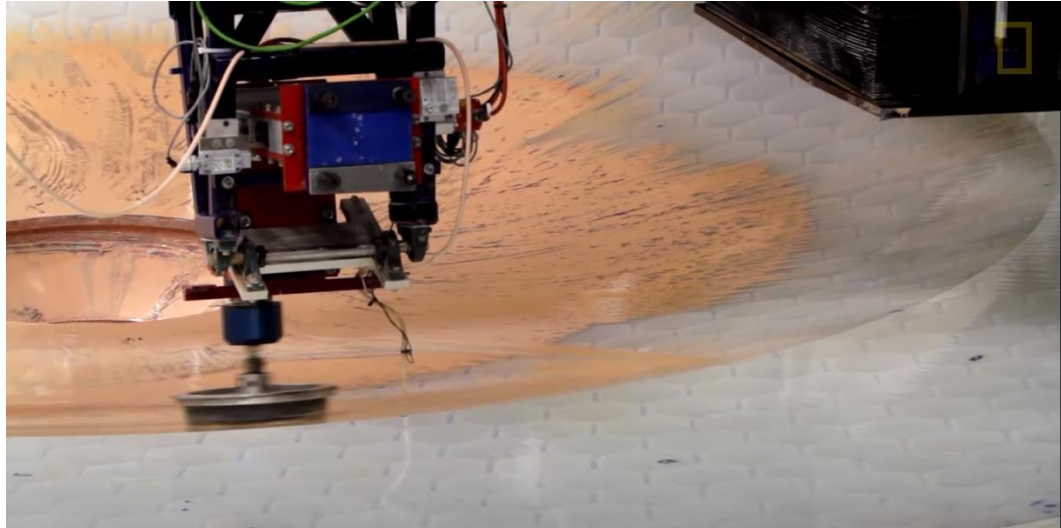


Figura 17: Maquina realizando el proceso de esmerilado de un espejo de 26 pies de ancho. (Observatory, 2014)

En el Laboratorio de espejos del observatorio Steward dentro la Universidad de Arizona podemos encontrar la torre donde se realizan las pruebas ópticas, como por ejemplo la realización de pulido de un espejo telescópico, esta torre tiene un sistema de pruebas ópticas vertical que cuenta con un aislamiento contra vibraciones para poder lograr un mejor trabajo, observamos la figura 18. (OPTICAL, 2018)



Figura 18: Laboratorio de espejos del observatorio Steward dentro la Universidad de Arizona podemos encontrar la torre donde se realizan las pruebas ópticas. (OPTICAL, 2018)

Para el trabajo de investigación, el proceso de parabolización de una superficie de un espejo parabólico consta de diversos pasos a seguir, a groso modo o de manera general se empieza con el corte de vidrio elegido para el espejo parabólico, seguidamente la generación de curvatura de la superficie, para luego pasar a un proceso de esmerilado y pulido para hacer variar el radio de curvatura del espejo y de esta manera convertir la superficie del vidrio, en una superficie esférica, para que por consiguiente por medio de un proceso de desbastado con una herramienta especial convertir el espejo esférico a uno parabólico. (Ochoa Suarez, 2020)

Cabe mencionar que para el proceso de creación del espejo esférico se utiliza una maquina generadora de curvas y se utiliza un polvo abrasivo de diferentes características según convenga, utilizando herramientas especiales, posteriormente se pasa a un proceso de figurado donde el vidrio toma la forma de un espejo parabólico. Para mencionar la etapa de la parabolización de la superficie del espejo, es necesario resaltar que, para el pulido del espejo esférico, se utiliza una herramienta de pulido, que se hace con brea de pulir, la cual se amolda con el radio de curvatura del espejo.

Mientras que, para el proceso de convertir la superficie esférica a una superficie parabólica, ya no se utiliza la herramienta de brea sólida, sino una de tipo pétalo. Antes de utilizar la herramienta tipo pétalo, se hacía manualmente, pero se dejó de hacer ya que esta herramienta de tipo pétalo hace un trabajo mucho más eficiente y predecible. La herramienta tipo pétalo se calcula mediante un programa, siguiendo los parámetros que convengan para

la realización del espejo parabólico y sus determinadas características (Lima, Davila, Garcia, & Lopez, 2016).

En la siguiente imagen, figura 19, podemos apreciar que la superficie de vidrio, después de los procesos antes mencionados, nos da como resultado una superficie esférica, a la cual se somete a un proceso de parabolización de la superficie, en la cual se utiliza la herramienta tipo pétalo. De esta manera, se logra parabolizar la superficie de una manera eficiente y con los parámetros y características deseadas en el espejo parabólico.

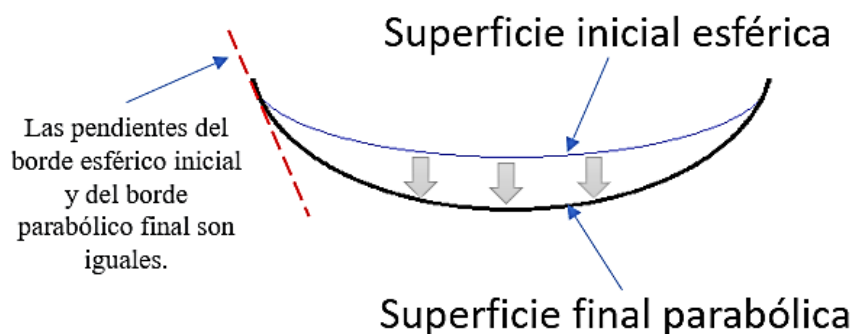


Figura 19: Proceso para cambiar de una superficie esférica inicial a una superficie parabólica.

El figurado para convertir el espejo esférico en parabólico como ya se mencionó, hace referencia al cambio de herramienta de brea sólida a una herramienta tipo pétalo. Para obtener esta herramienta, se realiza con la obtención de los porcentajes, los cuales son porcentajes que la herramienta debe tener a lo largo de su radio.

Para ello, se toman alrededor de diez puntos discretos a lo largo del radio con sus correspondientes porcentajes de arco de circunferencia, los cuales debería tener cada pétalo en sus radios. Dichos puntos, forman un par de coordenadas que corresponden a un radio y un ángulo, que nos servirán para que el programa logre dibujar las curvas correspondientes a los pétalos requeridos para utilizarlos en la parabolización de nuestro espejo deseado.

El programa que utilizaremos para generar la herramienta de pétalo es con el que la PUCP viene realizando los trabajos para la parabolización de espejos esféricos. (Ochoa Suarez, 2020)

A continuación, en la figura 20.a vemos la creación de la herramienta de pétalo en el software especial para el modelado de herramientas para parabolización de superficies, podemos apreciar que se imprime el diseño de la herramienta tipo pétalo en una hoja común

como de papel bond y la cual nos servirá como plantilla sobre la herramienta de brea usada en el pulido, observar figura 20.b, la conversión de la herramienta de brea solida a una de tipo pétalo, vemos la figura 20.c.

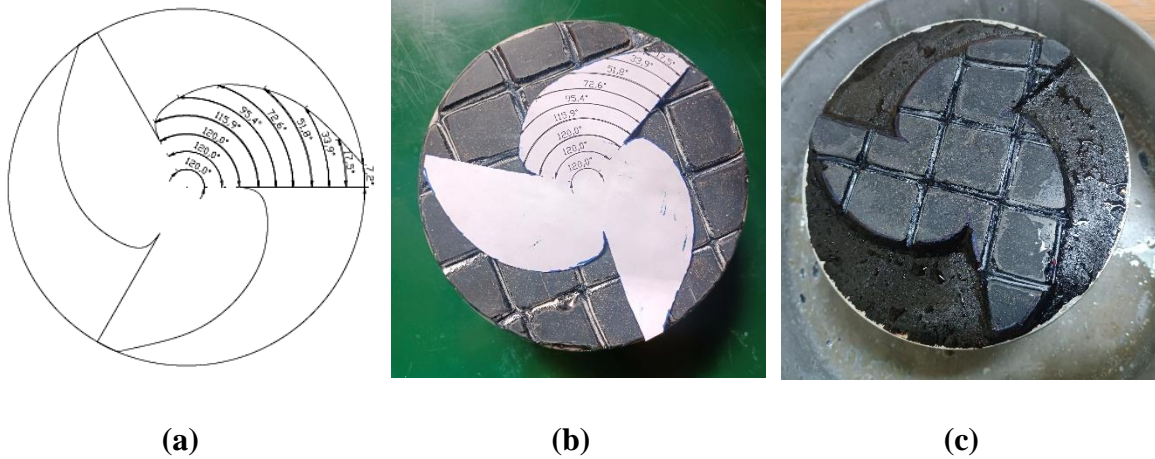


Figura 20: Proceso para crear la herramienta de parabolización
(a) Herramienta de pétalo en software (b) Impresión de herramienta de pétalo
(c) Fabricado de la herramienta de pétalo en brea.

Este tipo de herramienta nos asegura el desbaste de material sobrante en el espejo esférico para así obtener el espejo parabólico, el cual es el que necesitamos en nuestro trabajo de investigación.

CAPITULO III
MANUFACTURA

Capítulo 3.

Manufactura.

3.1. Taller de manufactura de óptica.

Un taller de manufactura de óptica de precisión no es lo mismo que hablar de los talleres para manufactura óptica de lentes oftálmicos, muchas personas confunden estos términos debido a que los procedimientos utilizados son parecidos, pero en cambio los materiales que se utilizan se aplican de diferente manera según la funcionalidad y empleabilidad que se les quiere dar, ya que los de óptica de precisión se emplean para usos de investigación y los oftálmicos para realizar correcciones en la formación de imágenes en el ojo humano.

Entonces, un taller de manufactura óptica de precisión se dedica a generar los componentes tales como los lentes ópticos, espejos sean planos, parabólicos o esféricos, etc., siendo sus especificaciones características según su aplicación óptica, ya que estos elementos se emplean para un uso específico en instrumentos ópticos sean como microscopios, cámaras, o en el caso de nuestro trabajo de investigación, un telescopio.

Debido que la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, UNPRG, no cuenta con un taller implementado para realizar manufactura óptica de precisión, los procedimientos de trabajo de manufactura para realizar el trabajo de investigación fueron realizados en la Pontificia Universidad Católica del Perú, PUCP, ya que en este se cuenta con las herramientas e instrumental como una máquina para realizar el corte, generado de curva, esmerilado, pulido y pruebas ópticas.

En el taller de óptica de la PUCP se encuentra en el edificio de la escuela de Física vamos a encontrar los ambientes ya acondicionados con las herramientas y máquinas para el uso y empleo en la fabricación y manufactura de óptica de precisión.

Hoy en día en el taller de manufactura óptica de precisión de la PUCP se realizan diversos trabajos de investigación, por lo cual podemos decir que es un área de formación académica y de investigación en los procesos de la óptica de precisión.

3.2. Manufactura óptica del espejo parabólico.

Al realizar la manufactura óptica del espejo parabólico de diámetro de apertura 140mm y relación focal $f/8.5$ para observación planetaria se tiene que seguir un protocolo o procedimiento de trabajo, ya que sin esta guía no se puede obtener los resultados esperados

con las características específicas que se solicitan para que el espejo cumpla con su función precisa.

El proceso de trabajo para la manufactura se lleva a cabo por medio de los siguientes pasos según Harry Schade en su libro Procedimientos de trabajo en óptica de taller (1961):

- Corte
- Generado
- Esmerilado
- Pulido

Los procesos mencionados se realizan en orden consecutivo, para poder empezar con el proceso de la manufactura, ósea el diseño y construcción, una vez realizado el modelado del espejo en un software óptico, como ya hemos podido apreciar anteriormente en el capítulo 1 del trabajo de investigación, con la modelación del espejo se va a poder realizar las comprobaciones ópticas por ejemplo las aberraciones, en esta etapa lo que se desea es poder comprobar la calidad que tendrá la imagen que proyecte el espejo parabólico de apertura 140mm y f/8.5 con respecto a un espejo esférico de las mismas características, entonces ya habiendo realizado el modelado se procede a realizar el primer paso del proceso, el corte del vidrio, este se realiza con herramientas especiales.

A continuación, se realiza el generado de curva de la superficie del vidrio, luego con la ayuda de tres tamaños de abrasivo se empieza a esmerilar la superficie, desbastar, para lograr las medidas correctas, en un inicio se realiza la manufactura de un espejo esférico, luego se continúa devastando con herramientas especiales para lograr lo requerido en la simulación del software y así llegar a tener un espejo parabólico de las características dadas.

Para poder lograr el espejo esférico, entonces luego del esmerilado se procede a pulir la superficie logrando así la forma de espejo esférico, posteriormente para poder convertirlo en espejo parabólico utilizamos herramientas especiales de brea, puliendo hasta lograr la forma parabólica deseada.

El control se realizará por medio del test de Ronchi o prueba de Ronchi, este control se realiza durante el proceso de pulido de la superficie esférica para ir verificando la superficie y la forma, y al terminar la manufactura del pulido, se realiza el control el cual evaluará la superficie del espejo parabólico, esto lo explicaremos en el capítulo 4 de pruebas ópticas.

Para realizar la manufactura del espejo parabólico del presente trabajo de investigación usaremos vidrio de tipo Pírex, ya que este tipo de vidrio tiene una mejor

oposición a la dilatación o contracción por cambios de temperatura, esto evitara que el espejo se deforme, ya que se fabricara a precisión para una función específica.

A continuación, especificaremos los procedimientos del trabajo de manufactura óptica para el espejo parabólico.

3.2.1. Corte.

La máquina de corte es un taladro de pie de Industria Argentina, marca Barbero, modelo CMB 19/23 de 5 velocidades, figura 17, estas varían según la combinación de 3 piezas, el husillo, el reductor y el motor, que se encuentran dentro de la caja de velocidades en la parte superior de la máquina de corte.

El taladro para poder utilizarse como una máquina de corte se le colocan brocas con borde diamantado especiales para realizar trabajos en vidrio, como se muestra en la figura 21, observamos también la caja de velocidades, la disposición del taladro para poder realizar el corte del vidrio, y la caja de líquido refrigerante que se encuentra en un módulo superior de la máquina de corte conectada con mangueras hacia donde se procederá a trabajar.



Figura 21: Máquina de corte.

Según el diámetro del vidrio que se necesita para el trabajo se usara una broca diamantada diferente especial para cortar vidrio, de igual manera las velocidades a usar en la máquina de corte varían según el diámetro de la broca que se utiliza (Lapcraft, 2015), ver tabla 1, estas velocidades varían como ya se ha mencionado según la combinación de husillo, reductor y motor que se encuentran en la parte superior del taladro, ya que el vidrio que requerimos para realizar el trabajo es de 140 mm utilizaremos una broca diamantada de este diámetro y sabiendo que una pulgada (1 in) equivale a 25.4 mm, entonces el diámetro de la broca en pulgadas es:

$$D = 140 \text{ mm} * \frac{1 \text{ in}}{25.4 \text{ mm}} = 3.556 \text{ in} = 3 \frac{139}{250} \text{ in}$$

La broca a utilizar se encuentra entonces entre los valores de 3 1/4 in y 6 in, esto nos refiere a que la velocidad recomendada en la que realizaremos el proceso de corte es de 500 rpm.

Tabla 1: Velocidades según diámetro de broca.

Diámetro min (in)	Diámetro Max (in)	Velocidad (RPM)
1/8	1/2	4000
9/16	1	2000
1 1/16	2	1500
2 1/4	3	1000
3/1/4	6	500

La fijación del vidrio a cortar sobre la base, mesa de trabajo, que se coloca dentro de la caja de seguridad se realiza con un pegamento especial, cera de abeja, en la figura 22 observamos el arreglo de la pieza de vidrio fijada a la base de trabajo.



Figura 22: Arreglo de la pieza de vidrio fijada a la base de trabajo.

Debido a la fricción que se realiza entre el corte de vidrio y la broca diamantada, generando calor entre las piezas, se adaptó en la maquina cortadora unos conductos o mangueras que transportan liquido refrigerante, por el interior y en el exterior de la broca, en la parte inferior se ubica una caja de seguridad acrílica, para protección por alguna astilla o fragmento que en el proceso de corte se desprenda a gran velocidad, dentro de la caja de

seguridad se estabiliza la pieza de vidrio para proceder al trabajo de corte y depósito de líquido refrigerante, estas partes se muestran en la figura 23.

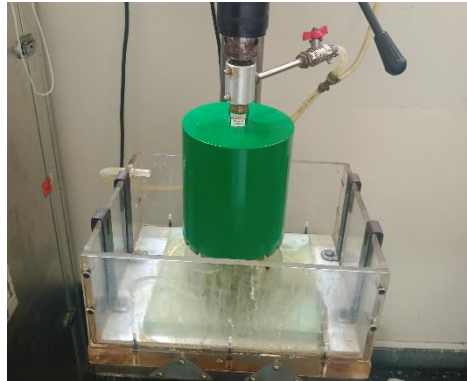


Figura 23: Ubicación y disposición del vidrio para el proceso de corte.

Al terminar con el corte de la pieza de vidrio esta se tiene que separar de la base de trabajo y limpiar del pegamento de la cera de abeja para poder dejarla lista para el siguiente paso de manufactura, tal cual se muestra en la figura 24.

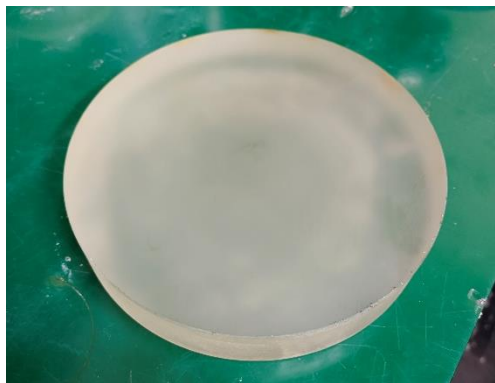


Figura 24: Resultado del proceso de corte.

Al realizar el trabajo de corte de vidrio se recomienda que el diámetro de la broca diamantada sea al menos 10% mayor que el diámetro final que se desea lograr, en este caso el diámetro de la pieza de vidrio resultante después del proceso de corte es de 142mm, y se tiene que tener en cuenta no realizar un esfuerzo sobre el corte ya que esto producirá un sobrecalentamiento en la broca y en el vidrio, originando así un quiebre del vidrio o broca, o un atoro del vidrio en el interior de la broca, antes y después del proceso mantener el área de trabajo y la maquina limpia para su correcto funcionamiento.

3.2.2. Generado de curva.

La máquina generadora de curva es de industria coreana, marca SIDAI, modelo del producto CG-2.0, ver figura 25, esta máquina tiene una capacidad de trabajo tanto para

realizar superficies con radios de curvatura cóncavas o convexas y también superficies planas.

La máquina posee controles que permiten realizar el ajuste necesario para el posicionamiento de la pieza de vidrio y así también lograr el trabajo de precisión para lograr el generado de la curva, esta máquina es altamente productiva en el caso de generar las piezas de trabajo en vidrio con un radio de curvatura deseado, observamos la figura 25.

La máquina la podemos dividir para una manera más practica en dos partes, una es el eje donde ira la pieza de vidrio en la cual se trabajará, el cual sostiene la pieza mientras se realiza el generado de la curva, la otra parte es el eje que sostiene la herramienta con la que se genera la curva, esta herramienta es diamantada para poder así trabajar con vidrio, el resultado dependerá de cómo trabajen los dos ejes en conjunto, tanto el de la pieza de vidrio como el de la herramienta diamantada.



Figura 25: Maquina generadora de curva.

La herramienta diamantada está determinada según el tamaño de la pieza de vidrio, el ajuste para el ángulo de trabajo para generar la curva se calibra por medio de un control manual, ver figura 26.a, este ajuste del ángulo tiene una escala que indica el ángulo que se posiciona la herramienta diamantada con respecto al eje óptico de la pieza de vidrio.

La posición del eje que sostiene la pieza de vidrio está determinada por dos controles que realizan el ajuste para poder determinar cómo trabajara la pieza, el ajuste que determina la posición del eje óptico de la pieza de vidrio con respecto a la herramienta diamantada, este tiene una calibración de 0.02 mm de paso de manera horizontal, ver figura 26.b, el eje óptico de la pieza de vidrio se moverá de manera horizontal con respecto a la parte posterior o frontal de la máquina generadora de curva.

Para poder determinar la posición de avance o control de espesor para el trabajo de la pieza de vidrio utilizamos el control para calibrarlo, este se encuentra en un costado de la maquina generadora, ver figura 26.c, la calibración de avance es de 0.01 mm, esto es tanto para acercar la pieza como para alejarla de la herramienta diamantada y trabaja en la misma dirección del eje óptico de la pieza de vidrio.



(a)

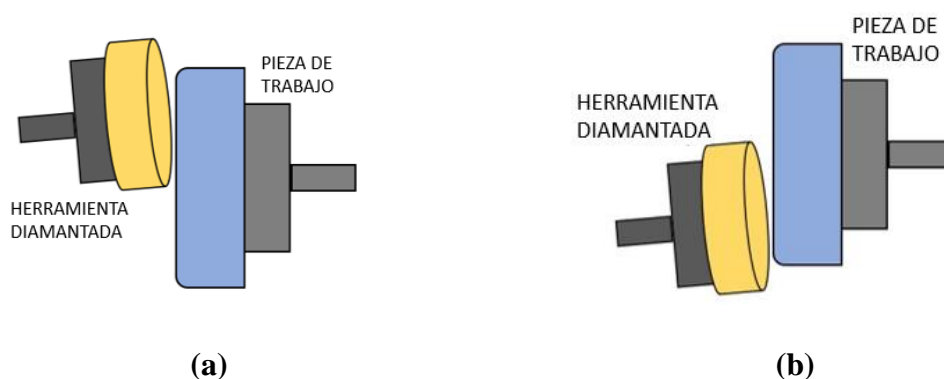
(b)

(c)

Figura 26: Calibración de la pieza de vidrio y herramienta de generado (a) Angulo de trabajo (b) Posición del eje (c) Espesor.

Al realizar el trabajo de generado de curva se ira inyectando liquido refrigerante en la zona de trabajo, ya que el proceso genera calor entre la pieza de vidrio y la herramienta diamantada, tener en cuenta no forzar el trabajo de la herramienta ya que esto puede generar fracturas, quiebres o estrías en la pieza de trabajo.

Para realizar el generado de las superficies, en el caso del vidrio o pieza de trabajo se generará una superficie cóncava, la posición de trabajo se observa en la figura 27.a, y para el caso de la pieza de trabajo que se empleará como herramienta de esmerilado se generará una superficie convexa, ver esquema de la figura 27.b.



(a)

(b)

Figura 27: Esquema de posición para generar la superficie (a) Superficie cóncava (b) Superficie convexa.

Los ángulos de trabajo para la herramienta diamantada con respecto a la pieza de trabajo se determinan teniendo en cuenta el Radio de curvatura previsto, 2400 mm, y el diámetro de la herramienta diamantada, el diámetro interior es 71 mm y el diámetro exterior es 75 mm, se toman los valores tanto del diámetro interior para generar superficies convexas y diámetro exterior para determinar superficies cóncavas.

La ecuación para calcular el ángulo es:

$$\text{sen } \alpha = \frac{D}{2R} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

α : ángulo de trabajo

D: diámetro de la herramienta diamantada, diámetro interior (Dint) y diámetro exterior (Dext)

R: Radio de curvatura previsto

Dados los datos:

R=2400mm

Dint=71mm

Dext=75mm

Reemplazamos los datos en la ecuación Ec.2 para calcular el ángulo de trabajo para generar la superficie cóncava del vidrio:

$$\text{sen } \alpha = \frac{D_{\text{ext}}}{2R}$$
$$\alpha = \arcsen\left(\frac{D_{\text{ext}}}{2R}\right) = \arcsen\left(\frac{75\text{mm}}{2 * 2400\text{mm}}\right) = 0.895^\circ$$

La herramienta diamantada trabajara con el ángulo de 0.895° respecto a la pieza de trabajo, vidrio, así como se muestra en el esquema de la posición de trabajo de la figura 27.a y en la figura 28.a.

Para calcular el ángulo para generar la superficie convexa reemplazamos los datos en la ecuación Ec.2:

$$\text{sen } \alpha = \frac{D_{\text{int}}}{2R}$$
$$\alpha = \arcsen\left(\frac{D_{\text{int}}}{2R}\right) = \arcsen\left(\frac{71\text{mm}}{2 * 2400\text{mm}}\right) = 0.847^\circ$$

La herramienta diamantada entonces trabajara con el ángulo de 0.847° respecto a la pieza de trabajo para generar la superficie convexa, tal como se especifica en la figura 27.b se trabaja según ese esquema, ver la figura 28.b.



(a)



(b)

Figura 28: Posición de la pieza de vidrio y la herramienta para generar la curva de la superficie (a) Superficie cóncava (b) Superficie convexa.

Una vez generadas las superficies sea cóncava y convexa, cóncava para el vidrio que denominaremos espejo y convexa para el vidrio que denominaremos herramienta, verificamos el radio de curvatura, para poder calcularlo tenemos la siguiente ecuación que relaciona el radio de curvatura con la sagita y el diámetro. (Rutten, 1999)

$$R = \frac{D^2}{8 * H} + \frac{H}{2} \quad (Ec. 3)$$

Donde:

R: Radio de curvatura

H: Sagita medida con el esferómetro

D: Diámetro del esferómetro

La sagita la mediremos con el esferómetro, ver figura 29.a, antes de emplear el esferómetro para cada medición se verifica que este calibrado con un vidrio de prueba plano tal como se muestra en la figura 29.b.

Para medir el radio de curvatura de la superficie cóncava del espejo se emplea el diámetro exterior de la copa del esferómetro, D_{ext} , y para medir el radio de curvatura de superficie convexa de la herramienta usaremos el diámetro interior de la copa del esferómetro, D_{int} , ver figura 29.c y figura 29.d. Al ser el radio de curvatura mucho mayor que la sagita entonces la ecuación Ec.3 se modifica.

$$R = \frac{D^2}{8 * H} \quad (Ec. 4)$$

Entonces calculando el radio de curvatura del espejo reemplazamos con los datos en la ecuación Ec.4, sabiendo:

Dext = 140 mm

Sagita del espejo: Hespejo = 0.894 mm

$$Respejo = \frac{Dext^2}{8 * Hespejo} = \frac{(140mm)^2}{8 * 0.894mm} = 2740.49 mm$$

Calculando el radio de curvatura de la herramienta entonces reemplazamos con los datos en la ecuación Ec.4:

Dint = 125 mm

Sagita de la herramienta: Hherramienta = 0.723 mm

$$Rherramienta = \frac{Dint^2}{8 * Hherramienta} = \frac{(125mm)^2}{8 * 0.723mm} = 2701.41 mm$$

Las medidas de la sagita del espejo, sagita de la herramienta, radio de curvatura del espejo y radio de curvatura de la herramienta son los valores antes de empezar el proceso del esmerilado, teniendo en cuenta que los radios de curvatura del espejo y la herramienta son similares.

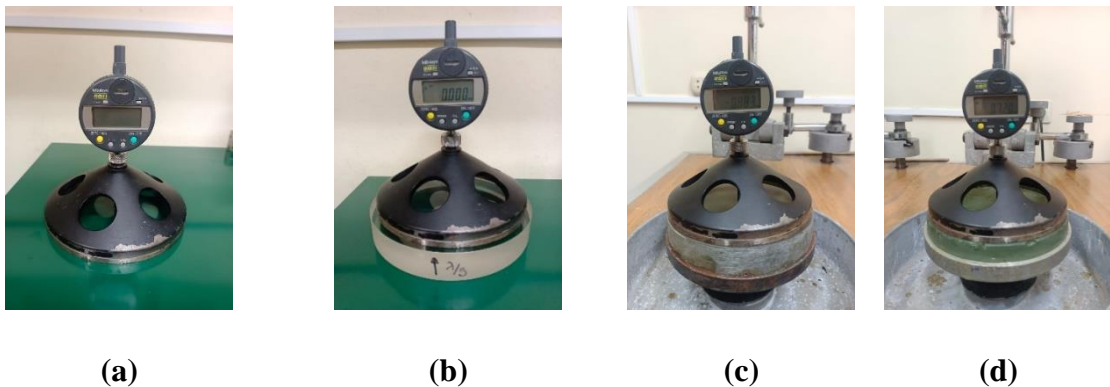


Figura 29: Pasos para el control de radio de curvatura del espejo y de la herramienta (a) Esferómetro (b) Calibración del esferómetro (c) Control del espejo (d) Control de la herramienta.

Durante el proceso de generado mantener con el líquido refrigerante para evitar recalentamiento en la pieza de vidrio y en la herramienta diamantada, se tiene que prestar atención que antes y después del proceso se debe mantener el área de trabajo y la maquina limpia para su correcto funcionamiento.

3.2.3. Esmerilado.

La máquina para realizar el trabajo de esmerilado del vidrio se encuentra en el taller de óptica de precisión de la PUCP es de industria mexicana, la maquina fue fabricada por el Centro de investigaciones en óptica, esta máquina se utiliza igualmente para el proceso de pulido, aunque con la diferencia de una herramienta de brea especial para el trabajo.

El eje de trabajo de la máquina genera el esmerilado por medio de dos movimientos diferentes, un movimiento en el que la pieza que se coloca abajo, denominada herramienta, genera rotación, y el otro movimiento que se produce con la pieza que va arriba, denominada espejo, es de tipo oscilatorio, las dos piezas trabajan de manera conjunta para realizar el esmerilado. En la figura 30 podemos observar la máquina de esmerilado, en la cual se ve que esta cuenta con dos ejes para trabajar simultáneamente ya que cada uno de los ejes se pueden calibrar de manera indistinta, se pueden realizar los trabajos simultáneamente evitando la contaminación en el lugar de trabajo.



Figura 30: Máquina de esmerilado y pulido.

En el proceso de esmerilado los tamaños de la herramienta y el espejo son similares para poder realizar un buen proceso, y los radios de curvatura tienen que ser casi iguales, como ya hemos verificado anteriormente, esto hará que trabajen de una mejor manera. Para que la herramienta trabaje de una forma correcta el abrasivo tiene que fluir uniformemente durante el proceso de esmerilado, entonces se le hace a la herramienta un cuadrículado, unos surcos en forma de cuadrícula, se recomienda que los surcos no pasen por el centro de la herramienta, tal como se muestra en la figura 31, esto lo realizamos con un disco especial para vidrio y así evitar que la herramienta se fracture y que esto genere un mal esmerilado ocasionando alguna malformación en el espejo.

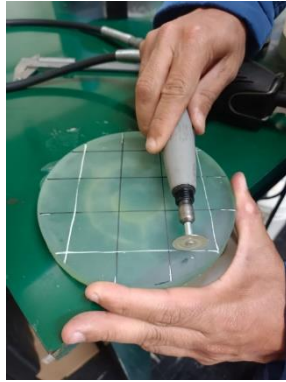


Figura 31: Preparación de la herramienta para el esmerilado.

El tipo de carrera influye en como trabajara el espejo con la herramienta, la carrera se define como el desplazamiento o amplitud que tendrá el brazo de la maquina esmeriladora que controlara el movimiento oscilatorio del espejo con respecto a la herramienta, ver figura 32, el tipo de carrera lo calibramos según como queremos que trabajen las piezas, si queremos que el espejo trabaje mas el centro, los bordes o de manera uniforme.



Figura 32: Calibración de tipo de carrera de la máquina de esmerilado.

El tipo de carrera normal es cuando la amplitud de movimiento es igual a $1/3$ del diámetro del espejo, una carrera larga es cuando la amplitud o desplazamiento es mayor a $1/3$ del diámetro, y una carrera corta es cuando es menor a $1/3$ del diámetro.

En nuestro caso del proceso de esmerilado lo haremos con un tipo de carrera normal, usando los posicionadores para centrar el espejo con la herramienta y calibrando el tipo de carrera normal, haciendo esto se procede a empezar el esmerilado. Para poder empezar el esmerilado se debe depositar el abrasivo en la herramienta, ver figura 33, el tipo de abrasivo que usaremos es alúmina en polvo, oxido de aluminio, y para que este abrasivo pueda fluir se mezcla con agua destilada, durante el proceso el abrasivo debe estar depositándose continuamente.



Figura 33: Aplicación de abrasivo en el proceso del esmerilado.

El proceso del esmerilado se realiza con diferentes tipos de abrasivo, estos tienen que ser de un tamaño considerable para que vayan borrando, eliminando, la porosidad dejada por el proceso anterior, y así eliminar la porosidad del espejo. Los abrasivos que emplearemos para el esmerilado son en primera instancia de $25\mu\text{m}$, figura 34.a, luego de $15\mu\text{m}$, figura 34.b, y finalmente de $5\mu\text{m}$, figura 34.c.



(a)



(b)



(c)

Figura 34: Abrasivos para realizar el proceso de esmerilado (a) Abrasivo $25\mu\text{m}$ (b) Abrasivo $15\mu\text{m}$ (c) Abrasivo $5\mu\text{m}$.

Durante el proceso de esmerilado se verifica un correcto avance en la superficie del espejo y se evalúa que no se produzcan rayas, fracturas, o malformaciones, el control de la superficie lo vamos a realizar en una cámara oscura y con una lupa para poder visualizar lo que a simple vista no se observa, ver figura 35.



Figura 35: Control de superficie del espejo.

El abrasivo de $25\mu\text{m}$ se utiliza para eliminar la porosidad dejada por el proceso de generado, el abrasivo de $15\mu\text{m}$ elimina la porosidad dejada por el abrasivo anterior, y el abrasivo de $5\mu\text{m}$ elimina la porosidad anterior y deja el espejo con una porosidad suave ya lista para el proceso del pulido, cada aplicación de los abrasivos las realizamos por un tiempo de 15 minutos, con una carrera normal, tener en cuenta que para cada finalización y comienzo de la aplicación del abrasivo el espejo, la herramienta y el lugar de trabajo deben ser correctamente limpiados para evitar la contaminación con algún agente externo, el espejo y la herramienta se limpian lavando con agua y jabón neutro, el lavado tiene que hacerse con gran cuidado cuando se va a cambiar de espesor de abrasivo ya que si llegara a quedar algún residuo de abrasivo de grano más grande puede generar el rayado del espejo.

Al finalizar cada aplicación del abrasivo y el correcto lavado del espejo y la herramienta se controla el radio de curvatura, esto lo hacemos midiendo con el esferómetro la sagita y con la ecuación Ec.4 calculamos el radio de curvatura, este es un indicador para saber cuánto nos estamos acercando al radio previsto y también para saber en qué momento ir realizando el cambio de grano del abrasivo.

El proceso del esmerilado lo podemos observar en la tabla 2, donde especificamos el proceso de avance paso a paso, con qué tipo de abrasivo se trabajó, el tipo de carrera, si se colocó algún peso adicional para generar una mejor fricción entre el espejo y la herramienta, el tiempo empleado, y los valores de las sagitas y los radios de curvatura iniciales y finales del espejo y la herramienta.

Tabla 2: Datos del proceso de esmerilado del espejo con los diferentes abrasivos.

Paso	Abrasivo (μm)	Carrera (mm)	Peso (Kg)	Tiempo (min)	Sagita espejo (mm)		Sagita herramienta (mm)		R espejo (mm)		R herramienta (mm)	
					Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	25	46.7	0	15	0.894	0.892	0.723	0.732	2740.49	2746.63	2701.41	2668.20
2	25	46.7	0.5	15	0.892	0.917	0.732	0.754	2746.63	2671.75	2668.20	2590.35
3	25	46.7	0.5	15	0.917	0.940	0.754	0.772	2671.75	2606.38	2590.35	2529.95
4	25	46.7	0.5	15	0.940	0.962	0.772	0.791	2606.38	2546.77	2529.95	2469.18
5	15	46.7	0.5	15	0.962	0.976	0.791	0.798	2546.77	2510.24	2469.18	2447.52
6	15	46.7	0.5	15	0.976	0.988	0.798	0.809	2510.24	2479.75	2447.52	2414.24
7	15	46.7	0.5	15	0.988	1.001	0.809	0.819	2479.75	2447.55	2414.24	2384.76
8	5	46.7	0.5	15	1.001	1.009	0.819	0.824	2447.55	2428.14	2384.76	2370.29
9	5	46.7	0.5	15	1.009	1.016	0.824	0.829	2428.14	2411.41	2370.29	2356.00

Al inicio del proceso de esmerilado tomamos la medida de la sagita del espejo y la sagita de la herramienta con el esferómetro y registramos los radios de curvatura correspondientes, estos radios de curvatura los calculamos con la ecuación Ec.4.

Esto lo realizamos con el mismo procedimiento que ya habíamos detallado anteriormente, de igual manera se calcula el avance paso a paso en el proceso de esmerilado, esto lo podemos observar de manera grafica en la siguiente imagen, figura 36, donde se ve la variación del cambio del radio de curvatura del espejo y de la sagita según los datos de la tabla 2.

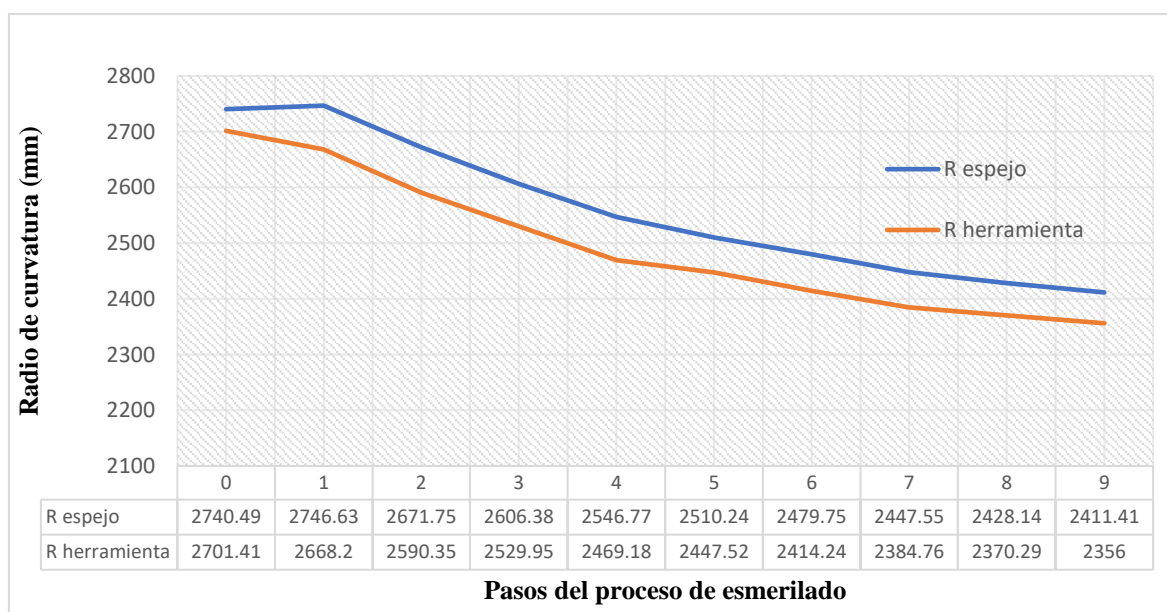


Figura 36: Variación del cambio del Radio de curvatura del espejo y la herramienta.

Entonces, registramos un radio de curvatura inicial del espejo de 2740.49mm correspondiente a un valor de sagita inicial del espejo de 0.894mm, de igual manera se registra el radio de curvatura inicial de la herramienta de 2701.41mm y la sagita inicial de la herramienta de 0.723mm, en la figura 36 estos valores corresponden al paso inicial cero “0”.

El abrasivo que usamos para empezar el proceso como ya habíamos mencionado es de 25μm y el tipo de carrera que usamos es normal, esto quiere decir que la carrera es 1/3 el diámetro del espejo, este diámetro del espejo es el medido al finalizar el proceso de corte, entonces calculamos la carrera que usaremos para el esmerilado:

$$Carrera\ normal = \frac{1}{3} * D\ espejo = \frac{1}{3} * 142mm = 46.7mm$$

La carrera indicada entonces es de 46.7mm tal como se especifica también en la tabla 2, en la figura 32 podemos ver gráficamente los pasos del proceso y cómo van variando los

radios de curvatura, en la imagen siguiente, figura 37, se observa como varían las sagitas del espejo y de la herramienta según los datos obtenidos de la tabla 2, recordamos que la sagita la denominamos con la letra H.

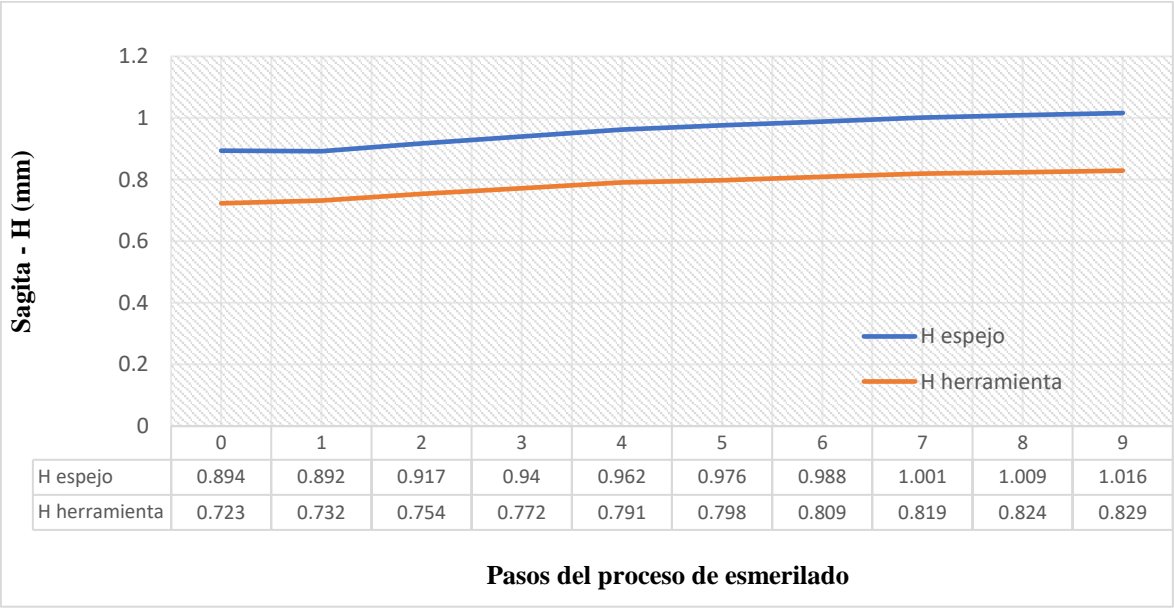


Figura 37: Variación del cambio de la Sagita del espejo y la herramienta.

Durante el proceso de esmerilado el valor del radio de curvatura es inversamente proporcional al valor de la sagita, esto lo podemos ver en la ecuación Ec.4 y gráficamente lo observamos en la figura 36 donde durante los pasos del proceso de esmerilado el valor del radio de curvatura disminuye mientras que en la figura 37 el valor de la sagita aumenta.

El esmerilado con el abrasivo de 25µm corresponde a los pasos de proceso 1, 2, 3 y 4, en lo que podemos observar que en el paso 1 se realiza el esmerilado sin colocar peso lo cual al concluir el tiempo de 15 minutos no se ve un cambio significativo en los radios de curvatura, por lo tanto para el paso siguiente, paso 2, se le coloca un peso de 1/2kg para que de esta manera el espejo realice una mejor fricción con la herramienta y el abrasivo realice un mejor trabajo de esmerilado, al finalizar el proceso con el abrasivo de 25µm el radio de curvatura del espejo es de 2546.77mm y la sagita del espejo es de 0.962mm, habiendo variado el radio 193.72mm y la variación de la sagita 0.068mm, esto quiere decir que la variación promedio con el abrasivo de 25µm en el radio de curvatura del espejo es de 48.43mm y la variación promedio de la sagita del espejo es de 0.017mm, en el caso de la herramienta, al finaliza el proceso con 25µm el radio de curvatura de la herramienta es de 2469.18mm y la sagita de la herramienta es de 0.791mm, habiendo variado el radio de curvatura 232.23mm y la sagita 0.068, en promedio la variación del radio de curvatura de la herramienta es de 58.05mm y la sagita en promedio varia 0.017mm, la diferencia entre los

radios de curvatura iniciales del espejo y la herramienta es de 39.08mm y al finalizar el proceso con 25 μ m la diferencia es de 77.59mm.

El paso 5, 6 y 7 en el proceso de esmerilado lo realizamos con abrasivo de 15 μ m, así como se indica en la tabla 2, el valor del radio de curvatura del espejo al finalizar el esmerilado con 15 μ m es de 2447.55mm y su sagita correspondiente es de 1.001mm, el valor del radio de curvatura de la herramienta es de 2384.76mm y la sagita correspondiente a este es de 0.819mm, en promedio la variación del radio de curvatura del espejo es de 33.073mm y la sagita del espejo varía en promedio de 13 μ m, la variación promedio del radio de curvatura de la herramienta es de 28.306mm y la sagita de la herramienta varía en promedio de 9.33 μ m, la diferencia entre los radios de curvatura del espejo y la herramienta al finalizar el proceso con 15 μ m la diferencia es de 62.79mm.

El proceso con el abrasivo de 5 μ m corresponde a los pasos 8 y 9 del proceso de esmerilado donde el valor final del radio de curvatura del espejo es de 2411.41mm y su sagita correspondiente es de 1.016mm por lo tanto la variación promedio del radio de curvatura del espejo es de 18.07mm y la variación promedio de la sagita del espejo es de 7.5 μ m, y el valor final del radio de curvatura de la herramienta es de 2356.00mm y su sagita de 0.829mm, dado esto la variación promedio del radio de curvatura de la herramienta es de 14.38mm y la variación promedio de su sagita es de 5 μ m.

Al finalizar el proceso de esmerilado la diferencia del radio de curvatura del espejo respecto al radio de curvatura de la herramienta es de 55.41mm, esto nos indica que el espejo y la herramienta durante todo el proceso del esmerilado se han estado acoplado de una manera correcta ya que sus variaciones promedio son similares, los radios de curvatura y las sagitas de igual manera similares, así como podemos apreciar en las figuras 36 y 37, y nos indica también que con el tipo de carrera normal las piezas han trabajado de manera uniforme.

3.2.4. Pulido.

En el taller de óptica de precisión de la PUCP el pulido lo realizamos con la máquina esmeriladora, como ya hemos especificado anteriormente, este proceso de pulido es necesario para poder eliminar la porosidad dejada en el esmerilado, para empezar a pulir el espejo se tiene que preparar una herramienta especial de brea para pulir, la herramienta de brea tiene como característica que es un material viscoso elástico que se puede moldear para que se acople correctamente al espejo.

El proceso para preparar la herramienta de pulido lo detallamos en la figura 38, empezamos con la preparación de la brea sabiendo que tiene que ser una brea especial para realizar el trabajo, procedemos a calentar la brea para derretirla y que sea más maleable para trabajarla, ver figura 38.a, una vez ya estando la brea derretida procedemos a elegir el soporte sobre el cual formaremos la herramienta, ver figura 38.b, depositando la brea en el soporte adecuado dejamos enfriar la brea, el soporte se elige en consideración que la herramienta de brea sea de similar diámetro al espejo para que se pueda realizar un correcto proceso de pulido.

Luego de formar la herramienta procedemos a realizar el cuadriculado para que el elemento pulidor pueda fluir correctamente, se recomienda que los surcos del cuadriculado no pasen por el centro de la herramienta para que de esta manera no se genere una malformación en la superficie del espejo, ver figura 38.c, los surcos del cuadriculado es recomendable que sean biselados al igual que los bordes de la herramienta, esto lo realizaremos con una cuchilla de manera cuidadosa para evitar que la herramienta de brea se fracture.

El cuadriculado lo podemos observar en la figura 38.d, después de haber realizado el cuadriculado se tiene que amoldar la herramienta de brea a la forma del espejo, esto lo realizamos sumergiendo la herramienta en agua caliente para que la brea se ablande, figura 38.e, en este proceso se sumerge en tiempos cortos verificando que el estado de la brea este lista para poder prensar, si la brea no está en el punto correcto al realizar el prensado no tomara la forma correcta del espejo y se realizara un mal pulido y si la brea se calienta demasiado se formara porosidad haciendo que el pulido sea incorrecto.

Cuando la brea esta blanda se procede con el prensado haciendo presión para que la herramienta de brea para que se adapte correctamente al espejo, ver figura 38.f, el proceso se repite hasta verificar que el prensado sea correcto.

Es muy importante realizar un buen prensado, ya que de esto depende que el proceso de pulido sea correcto, si la herramienta de brea no ha sido prensada correctamente entonces durante el pulido se observara que se está puliendo de manera no uniforme, siendo esto por ejemplo los casos en que se pule solo los bordes, o por el caso contrario un mal prensado puede generar que la herramienta de brea se fracture o quiebre, si esto sucede se tiene que volver a generar una herramienta de brea nueva.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 38: Proceso para la herramienta de pulido (a) Preparación de la brea (b) Creación de la herramienta de brea (c) Preparación del cuadriculado de la herramienta de brea (d) Cuadriculado y biselado (e) Preparación para el prensado (f) Prensado de la herramienta de brea.

El prensado de la herramienta de brea se tiene que realizar siempre que el pulido se detenga por un tiempo prolongado, ya que la brea es un material que puede modificar su forma según la temperatura del ambiente, para prensar la herramienta se realiza el mismo proceso de las figuras 38.e y 38.f, en el caso los surcos se cierran realizar nuevamente el marcado de la cuadrícula para otorgar que en el proceso del pulido el agente pulidor circule y fluya uniformemente.

Antes de empezar con el proceso de pulido se debe tener el área totalmente limpia, para evitar algún agente contaminante en el pulido, ya que esto puede generar que el espejo se raye, si esto sucede se tiene que evaluar la gravedad del daño en la superficie, según esto se opta por generar nuevamente el generado o realizar el esmerilado del espejo y volver a empezar con el pulido.

El elemento o agente que se utiliza en el taller de óptica de precisión es Oxido de Circonio, Zirox-K, el cual es de tamaño de abrasivo de $1\mu\text{m}$, para el uso del agente pulidor se debe mezclar con agua para aportar la fluidez necesaria en el proceso. Para comenzar con el pulido se debe depositar el agente pulidor entre la herramienta de brea y el espejo, se debe centrar los ejes de la máquina de pulido, en nuestro caso se trabaja con carrera normal, la ubicación de la herramienta de brea es en la parte inferior y el espejo en la parte superior, ver figura 39, el pulidor debe ser depositado de manera continua durante el proceso evitando que este se seque.



Figura 39: Proceso de pulido del espejo con la herramienta de brea.

Cada ciclo o paso del proceso de pulido recomendado es de una hora, cada vez que se cumple el ciclo de una hora se limpia todo el lugar de trabajo, limpiando y lavando el espejo y la herramienta de brea, en la primera hora aun no podemos verificar como está la superficie del espejo, luego de las tres horas de pulido podemos ir verificando y controlando la superficie a través del test de Ronchi, para esto se armó con dos plataformas a la misma altura un sistema para poder ir controlando la superficie a medida que se completaban los ciclos de pulido, ver figura 40.a, y observando el ronchigrama dado se controla la superficie hasta que se logre tener una superficie esférica, el ronchigrama de una superficie esférica tiene que mostrar líneas completamente paralelas, en la figura 40.b podemos verificar que el espejo está logrando tener una superficie tipo esférica, pero que aún le falta tiempo de pulido.



(a)



(b)

Figura 40: Control de la superficie esférica durante el proceso de pulido (a) Proceso para control (b) Ronchigrama de control de superficie durante el pulido.

En nuestro trabajo de investigación lo que se necesita lograr es un espejo parabólico y para ello lo primero que tenemos que realizar es que el espejo tenga una forma esférica, luego de comprobar por medio del test de Ronchi que el espejo sea esférico se procede a crear la forma parabólica.

Para lograr la forma parabólica en el espejo primero debemos crear la herramienta, esta herramienta se denomina herramienta de pétalo, en la figura 41.a podemos ver la herramienta de pétalo ya impresa en papel, siendo del mismo tamaño que nuestra herramienta de brea, esta herramienta de pétalo va a crearse a partir de la herramienta de brea que se ha usado para realizar todo el proceso de pulido, en la figura 41.b se realiza el trazado del molde de forma de pétalo sobre la brea en el cual se marco con rayas la parte que se iba a eliminar, como resultante vemos en la figura 41.c la herramienta de pétalo ya fabricada y lista para continuar el pulido, este proceso lo hemos explicado anteriormente en el capítulo 2 de Parabolización.



(a)

(b)

(c)

Figura 41: Proceso para crear el pétalo en la herramienta de brea para el proceso de parabolización (a) Centrado del modelo de la herramienta de pétalo (b) Trazado del modelo del pétalo en la herramienta de brea (c) Creación de la herramienta de pétalo.

El pulido con la herramienta de pétalo es más corto, en pasos de 15 minutos, y se realiza de la misma manera que se ha hecho el pulido normal, ver figura 42, para cada paso se verifica la forma que va adquiriendo el espejo, se desea que tome una forma parabólica, para esto se va verificando por medio del test de Ronchi.



Figura 42: Proceso de parabolización.

Los controles específicos del test de ronchi verificando la forma del espejo tanto de manera esférica y parabólica lo detallaremos en el capítulo de pruebas ópticas.

CAPITULO IV
PRUEBAS OPTICAS

Capítulo 4.

Pruebas ópticas.

4.1. Introducción de prueba óptica de Test de Ronchi.

El Test de Ronchi es una prueba óptica muy utilizada para la verificación de superficies de espejos empleados en óptica de precisión para telescopios, esta evaluación de la superficie de los espejos nos permite observar los defectos o malformaciones para que de esta manera hacer una corrección preventiva durante el proceso de fabricación.

Los patrones del test de Ronchi los podemos simular con un programa para que de esta manera posteriormente poder usarlos como guía y comprobarlos con la superficie del espejo.

El test de Ronchi consiste en hacer pasar un haz de luz con una fuente ubicada sobre el eje óptico del espejo, así logrando ubicar el reflejo de la luz hacemos que el haz de luz pase a través de una rejilla, esta rejilla, llamada rejilla de Ronchi, tiene líneas opacas y no opacas perfectamente graduadas para que así la luz pueda atravesar y formar la imagen en la superficie del espejo, al enviar el haz de luz a través de la rejilla de ronchi y observar a través de esta se verá un patrón de líneas proyectadas en forma de sombras, rectas o curvas, el patrón formado es único según la forma y características de la superficie del espejo. Según el patrón formado en la superficie del espejo podemos evaluar si existiera alguna malformación. (Malacara, 2007)

En la figura 43 podemos ver el esquema para realizar las pruebas ópticas del test de ronchi, la rejilla de ronchi la representamos con una barra de color negro y blanco simulando las franjas, esta rejilla se colocará en un punto de enfoque, radio de curvatura, y en una ubicación antes y después de este punto de enfoque para que nos pueda dar una evaluación más certera de la forma de la superficie.

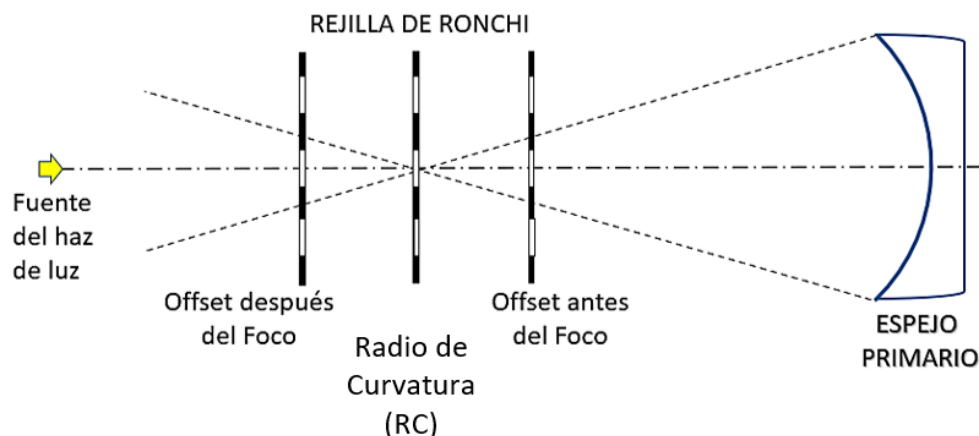


Figura 43: Esquema para prueba óptica en laboratorio de precisión para control de superficie.

En la siguiente imagen, figura 44, vemos el armado del sistema para realizar las pruebas ópticas en el laboratorio de precisión, donde se calibro el espejo con el haz de luz y se colocó una guía para poder variar las distancias de la formación de la imagen y también una cámara monocromática para poder visualizar la imagen en una computadora.



Figura 44: Prueba óptica en laboratorio de precisión para control de superficie.

A continuación, explicaremos el proceso para realizar las pruebas ópticas con el test de Ronchi.

4.2. Pruebas del test de Ronchi.

Para poder evaluar la superficie del espejo esférico nos vamos a guiar según el diagrama de distribución de la figura 45, en el que vemos las diferentes ubicaciones de la rejilla de ronchi con respecto al espejo en las cuales evaluaremos la superficie, la rejilla se colocara de manera que el patrón de franjas sea de forma vertical. La ubicación de la rejilla

será en el punto de enfoque, un offset igual a 0, y luego de colocará a una distancia de 10mm, 20mm, 30mm y 50mm antes y después de este punto, la rejilla que se utilizara es de 2 franjas por milímetro.

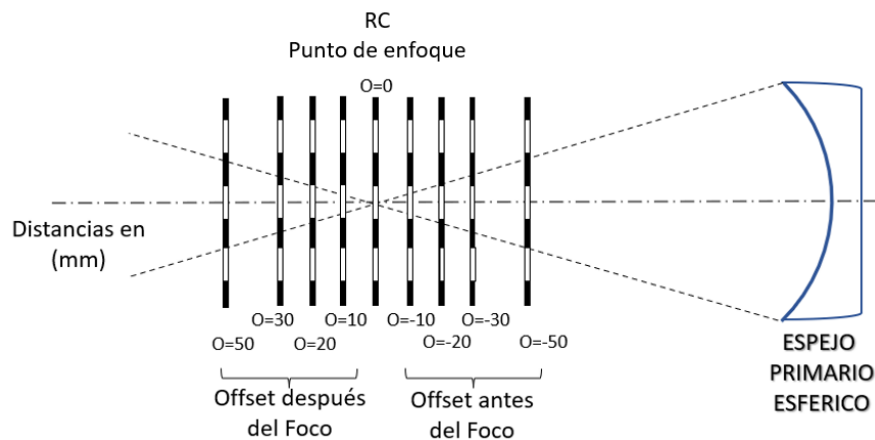


Figura 45: Distribución para prueba óptica para superficie esférica $k=0$ con diferentes Offset.

En el caso de la superficie esférica observamos que las líneas del patrón de franjas son de forma vertical, en la figura 46 evaluamos los puntos de ubicación antes especificados, cuando evaluamos en el punto de enfoque, offset igual a 0mm, podemos ver la simulación en la cual el ronchigrama nos dará toda la zona reflejada ya que en ese punto la luz pasa por una sola franja, ver figura 46.a1, en la figura 46.b1 observamos el ronchigrama generado en el espejo y en la figura 46.c1 realizamos la comparación de la simulación y lo que nos genera el espejo en la cual vemos que coinciden.

Al evaluar la superficie 10mm después del punto de enfoque vemos en la figura 46.a2 la simulación en la cual el haz de luz al pasar por la rejilla de ronchi reflejan dos franjas oscuras de forma paralelas y de misma proporción, en la figura 46.b2 vemos el ronchigrama generado en la superficie del espejo y en la figura 46.c2 realizamos la comparación viendo que coinciden en forma y dimensiones.

La superficie evaluada a 20mm después del punto de enfoque, figura 46.a3, la simulación en la cual el haz de luz pasa por la rejilla de ronchi, donde cuatro franjas oscuras se ven reflejadas en la superficie de forma paralelas, en la figura 46.b3 vemos el ronchigrama generado en la superficie y en la figura 46.c3 realizamos la comparación de la simulación y el ronchigrama generado en el espejo viendo que coinciden la cantidad de franjas reflejadas siendo estas de misma forma y dimensiones.

A 30mm después del punto de enfoque, figura 46.a4 la simulación nos indica siete franjas de luz generadas por el haz de luz que pasa a través de la rejilla de ronchi que se ven reflejadas en la superficie del espejo, en la figura 46.b4 vemos el ronchigrama generado en la superficie y en la figura 46.c4 observamos que coinciden la cantidad de franjas reflejadas en la superficie del espejo con la simulación, siendo estas paralelas de misma forma y dimensión.

En el punto a 50mm después del punto de enfoque, figura 46.a5 la simulación indica doce franjas oscuras generadas por las franjas opacas de la rejilla de ronchi que impide el paso de la luz, estas se ven reflejadas en la superficie del espejo, en la figura 46.b5 vemos el ronchigrama generado y en la figura 46.c5 observamos que coinciden la cantidad de franjas con la simulación

En el caso de la superficie esférica guiándonos según el diagrama de distribución de la figura 45 evaluamos la superficie en el punto -10mm antes del punto de enfoque vemos en la figura 46.a6 la simulación la cual nos da un patrón de franjas generadas el haz de luz al pasar por la rejilla de ronchi donde se refleja dos franjas oscuras sobre la superficie de forma paralelas y de misma proporción, en la figura 46.b6 vemos el ronchigrama generado en la superficie del espejo y en la figura 46.c6 vemos la comparación observando que las franjas coinciden en forma y dimensiones.

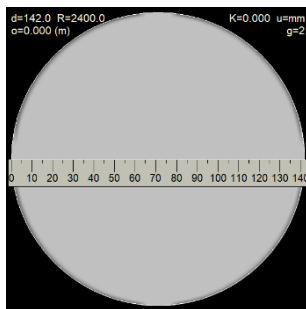
La superficie al ser evaluada antes del punto de enfoque a -20mm, figura 42.a7, la simulación del ronchigrama nos da cuatro franjas oscuras, en la figura 46.b7 vemos el ronchigrama generado en la superficie y en la figura 46.c7 realizamos la comparación de la simulación y el ronchigrama generado en el espejo viendo que coincide el patrón de franjas reflejadas con el patrón simulado siendo estas de misma forma y dimensiones.

A -30mm, figura 46.a8, la simulación nos indica siete franjas de luz generadas por el haz de luz que pasa a través de la rejilla de ronchi que se reflejan en la superficie del espejo, en la figura 46.b8 vemos el ronchigrama generado en la superficie del espejo correspondiendo con el mismo patrón simulado y en la figura 46.c8 observamos la comparación viendo que coinciden la cantidad de franjas reflejadas en la superficie del espejo con la simulación del ronchigrama.

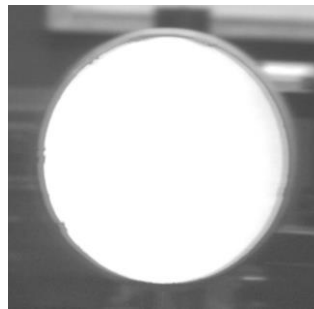
El punto a -50mm antes del punto de enfoque, figura 46.a9, la simulación indica doce franjas oscuras, en la figura 46.b9 vemos el ronchigrama generado en la superficie del espejo observando las doce franjas generadas por las franjas opacas de la rejilla de ronchi que

impiden el paso de la luz y en la figura 46.c9 comparamos y observamos que coinciden el patrón de franjas simulado con el generado en la superficie del espejo.

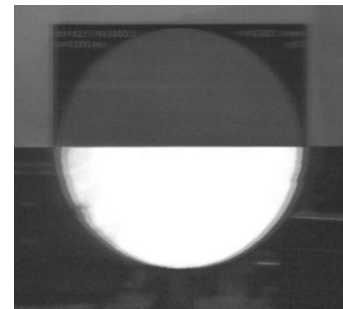
La cantidad y forma de las franjas varían según la ubicación donde se evalué la superficie, mientras que nos alejemos más del punto de enfoque, radio de curvatura, se formarán mayor cantidad de franjas, siendo estas cada vez más delgadas, y mientras nos acercamos más al foco la cantidad de franjas irán disminuyendo y se harán más gruesas, en el caso del espejo esférico esto sucede de manera indistinta antes y después del punto de enfoque.



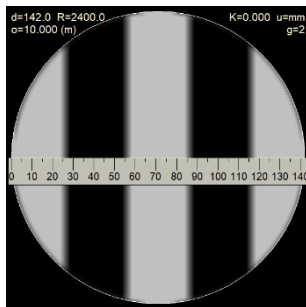
(a1)



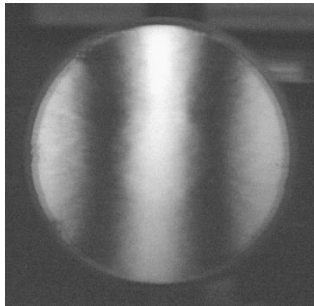
(b1)



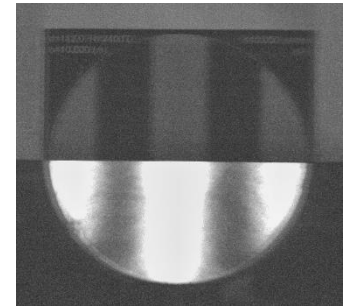
(c1)



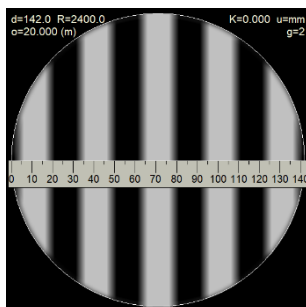
(a2)



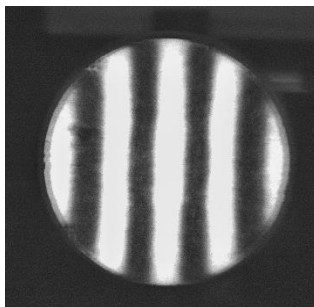
(b2)



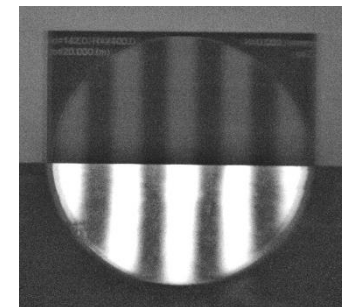
(c2)



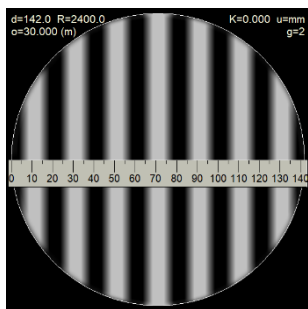
(a3)



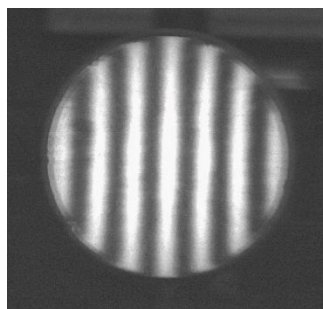
(b3)



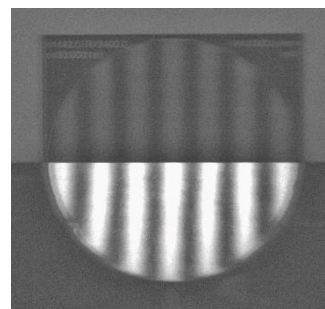
(c3)



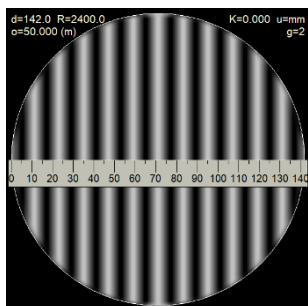
(a4)



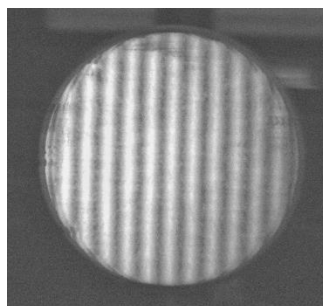
(b4)



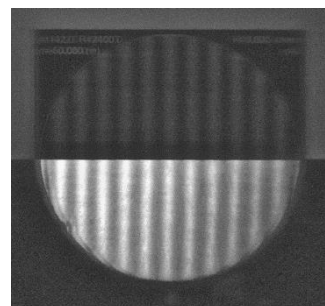
(c4)



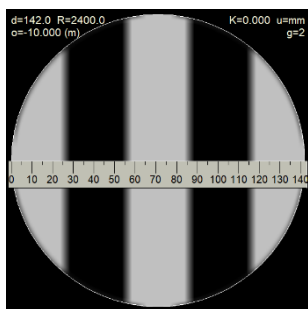
(a5)



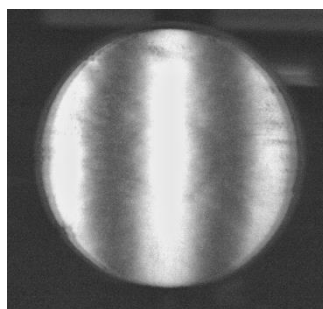
(b5)



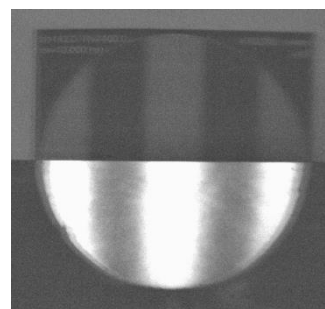
(c5)



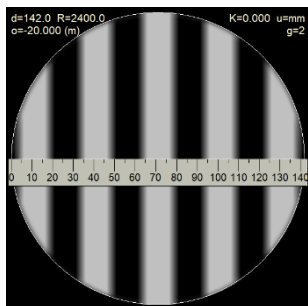
(a6)



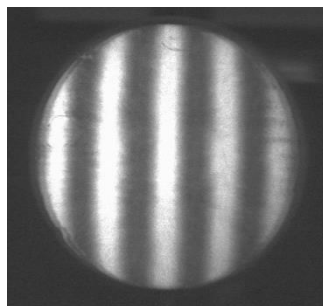
(b6)



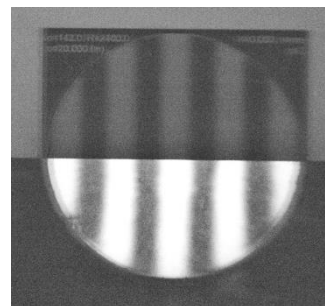
(c6)



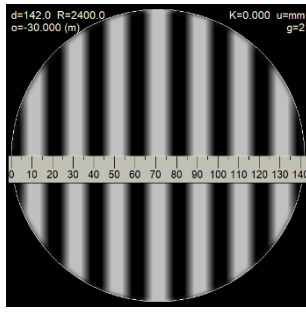
(a7)



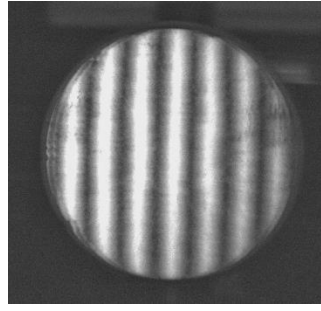
(b7)



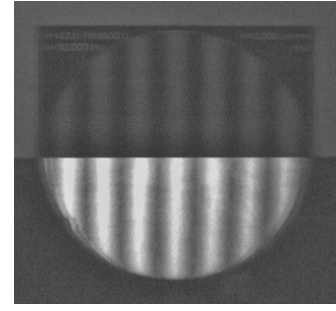
(c7)



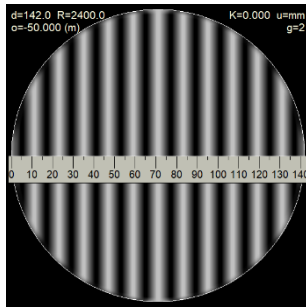
(a8)



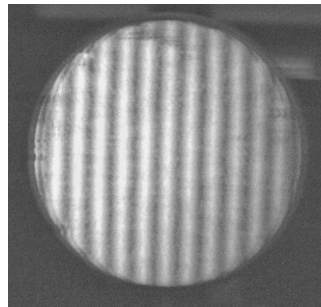
(b8)



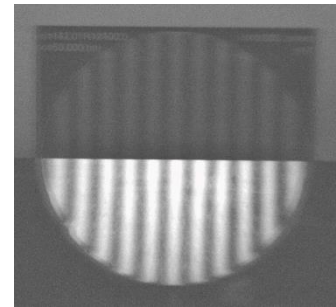
(c8)



(a9)



(b9)



(c9)

Figura 46: Prueba óptica para superficie esférica $k=0$, $f/8.5$, $d=142\text{mm}$, $R=2400\text{mm}$, rejilla $g=2$, con diferentes Offset de 0mm , $\pm 10\text{mm}$, $\pm 20\text{mm}$, $\pm 30\text{mm}$ y $\pm 50\text{mm}$, en la columna “a” se encuentra la simulación, en la columna “b” se encuentra el Ronchigram y en la columna “c” se encuentra la comparación de la simulación con el Ronchigram.

En la figura 47 observamos el diagrama de distribución para evaluar la superficie del espejo parabólico, en el tenemos las diferentes ubicaciones de la rejilla de ronchi con respecto al espejo, la rejilla se colocará de manera que el patrón de franjas sea de forma vertical.

La ubicación de la rejilla será en el punto de enfoque donde el offset igual a 0mm , luego de colocará respectivamente antes y después del punto a una distancia de 5mm , 10mm y 15mm .

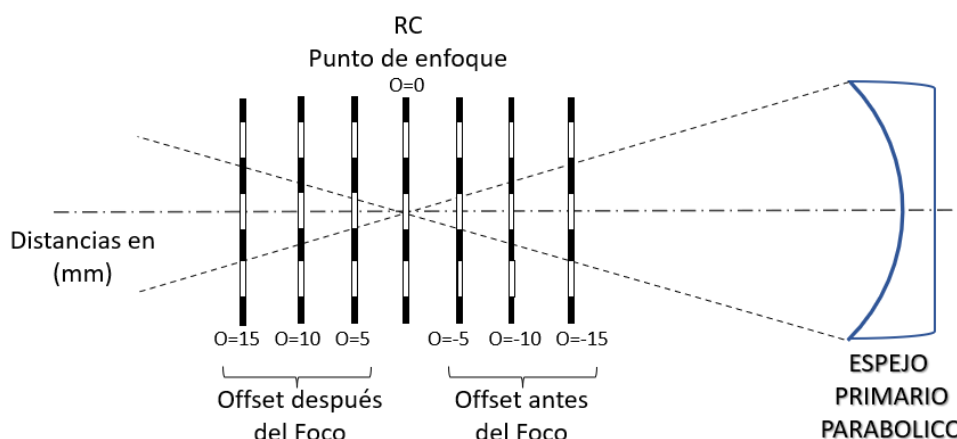


Figura 47: Distribución para prueba óptica para superficie parabólica $k=-1$ con diferentes Offset.

Para el caso de la superficie del espejo parabólico observamos que las líneas del patrón de franjas no son de forma vertical como para el espejo esférico, cuando evaluamos en el punto de enfoque podemos ver la simulación en la cual el ronchigrama, ver figura 48.a1, en la figura 48.b1 observamos el ronchigrama generado en el espejo que nos muestra toda la superficie reflejada ya que en ese punto la luz pasa por una sola franja y en la figura 48.c1 realizamos la comparación de la simulación y lo que nos genera el espejo en la cual vemos que coinciden.

Al evaluar la superficie del espejo a 5mm después del punto de enfoque, figura 48.a2 la simulación nos muestra una franja la cual se genera por el haz de luz al pasar por la rejilla de ronchi, en la figura 48.b2 vemos el ronchigrama generado en la superficie del espejo, la franja formada por el haz de luz es más gruesa en sus extremos y más delgada en la parte central, se curva ligeramente, y en la figura 48.c2 realizamos la comparación viendo que el patrón formado coincide en forma y dimensiones.

La superficie evaluada a 10mm después del punto de enfoque, figura 48.a3, la simulación muestra dos franjas oscuras de forma que se curvan ligeramente a los extremos, las franjas se hacen más gruesas a los extremos y son más finas en el centro, en la figura 48.b3 vemos el ronchigrama generado en la superficie y en la figura 48.c3 realizamos la comparación de la simulación y el ronchigrama generado en el espejo observando que coinciden la forma del patrón de franjas.

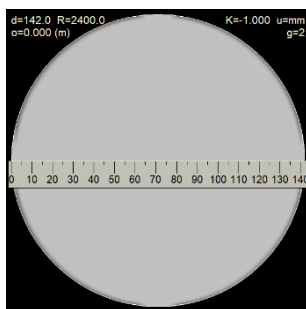
Al evaluar después del punto de enfoque en el punto 15mm, figura 48.a4 la simulación nos genera tres franjas de luz que se curvan y se hacen más gruesas ligeramente

a los extremos, en la figura 48.b4 vemos el ronchigrama generado en la superficie y en la figura 48.c4 observamos que coinciden la forma y la cantidad de franjas reflejadas en la superficie del espejo con la simulación.

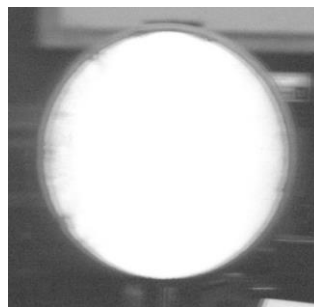
En el punto -5mm antes del punto de enfoque para la superficie del espejo parabólico vemos en la figura 48.a5 la simulación del ronchigrama, esta nos da un patrón de franjas en la que se observa una franja que es más gruesa en el centro y más delgada en los extremos, curvándose ligeramente, en la figura 48.b5 vemos el ronchigrama generado en la superficie del espejo y en la figura 48.c5 vemos la comparación observando que las franjas coinciden en forma y dimensiones.

La superficie al ser evaluada antes del punto de enfoque a -10mm, figura 48.a6, la simulación del ronchigrama nos da dos franjas oscuras que se curvan ligeramente haciéndose más delgadas hacia el centro y más gruesas hacia los extremos, en la figura 48.b6 vemos el ronchigrama generado en la superficie del espejo parabólico y en la figura 48.c6 realizamos la comparación de la simulación y el viendo que coincide el patrón de franjas.

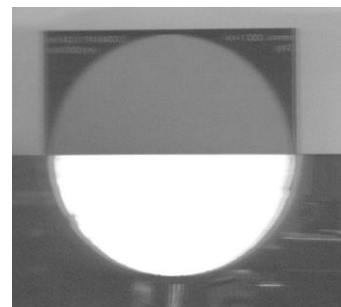
A -15mm, figura 48.a7, la simulación nos indica tres franjas de luz curvadas hacia los extremos, en la figura 48.b7 vemos el ronchigrama generado en la superficie del espejo correspondiendo con el mismo patrón simulado y en la figura 48.c7 observamos que la comparación del patrón simulado con el patrón que se refleja en la superficie del espejo coincide.



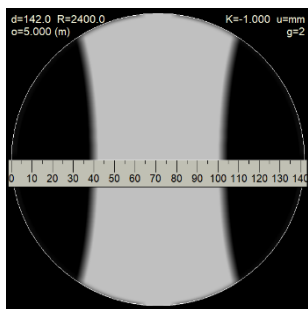
(a1)



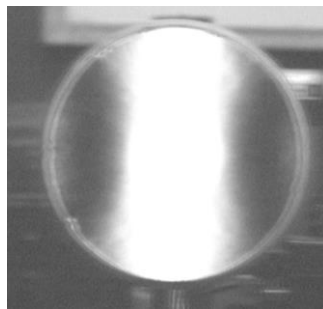
(b1)



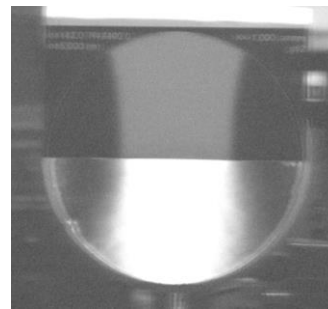
(c1)



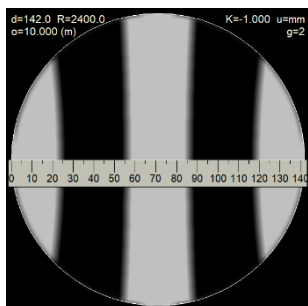
(a2)



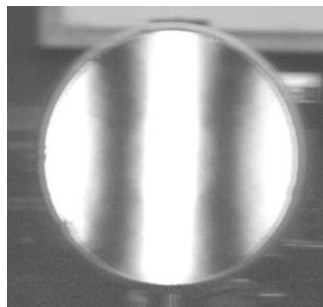
(b2)



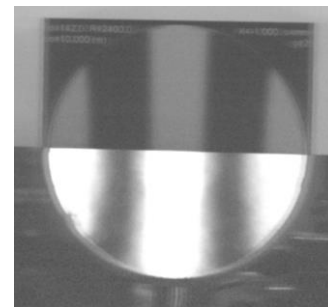
(c2)



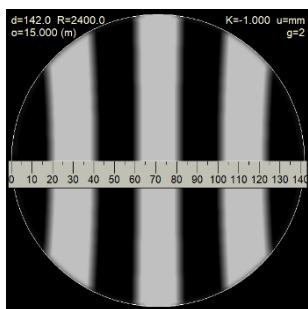
(a3)



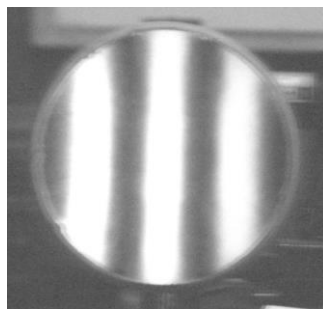
(b3)



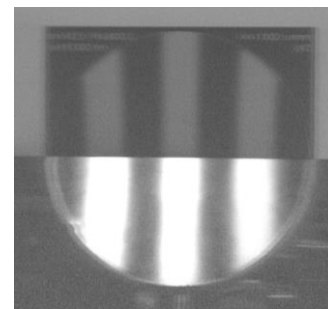
(c3)



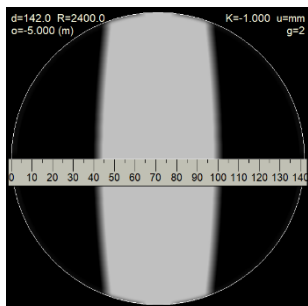
(a4)



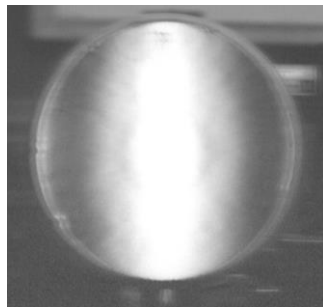
(b4)



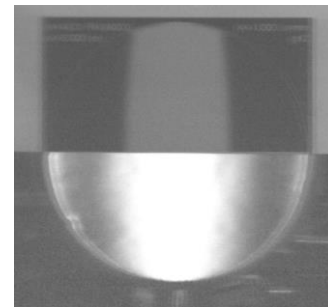
(c4)



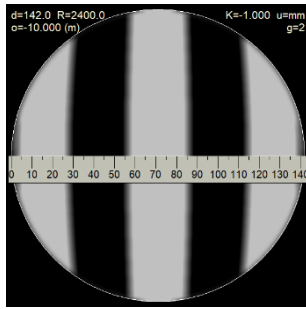
(a5)



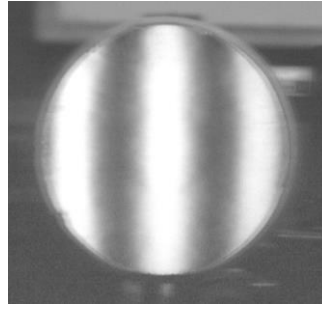
(b5)



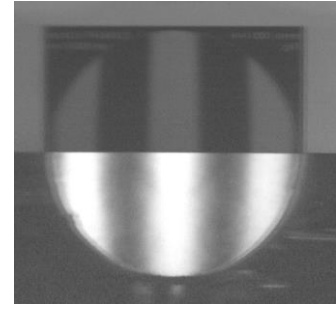
(c5)



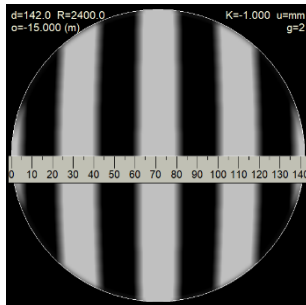
(a6)



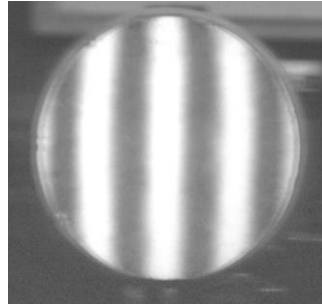
(b6)



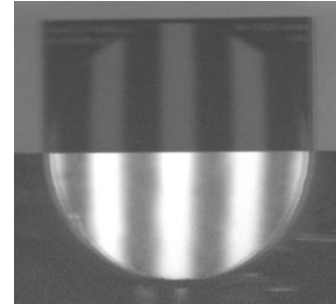
(c6)



(a7)



(b7)



(c7)

Figura 48: Prueba óptica para superficie parabólica $k=-1$, $f/8.5$, $d=142\text{mm}$, $R=2400\text{mm}$, rejilla $g=2$, con diferentes Offset de 0mm , $\pm 5\text{mm}$, $\pm 10\text{mm}$ y $\pm 15\text{mm}$, en la columna “a” se encuentra la simulación, en la columna “b” se encuentra el Ronchigram y en la columna “c” se encuentra la comparación de la simulación con el Ronchigram.

Entonces, para el espejo parabólico, mientras nos alejemos más del radio de curvatura, punto de enfoque, se formarán mayor cantidad de franjas y mientras nos acercamos más al foco la cantidad de franjas irán disminuyendo, la cantidad de las franjas varían según la ubicación donde se evalué la superficie, conservando la forma que se curvan hacia los extremos, siendo esto para la superficie del espejo parabólico.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Capítulo 5.

Conclusiones y Recomendaciones.

5.1. Conclusiones.

Se logró el objetivo principal que fue el de la manufactura de un espejo primario del tipo parabólico para un telescopio newtoniano, variando ligeramente en las previsiones iniciales, es decir la relación focal $f/8.5$.

Al realizar el diseño del espejo primario se utilizó OSLO EDU, especialista en diseño de lentes y espejos ópticos, el cual nos brinda los parámetros y diseños teóricos del espejo que se requería

Se logró analizar las aberraciones y calidad del espejo parabólico en relación a un espejo esférico, la cual resulta mucho más eficiente, reduciendo considerablemente los tipos de aberraciones, especialmente la aberración de esfericidad. Aunque la manufactura de un espejo parabólico es mucho más tedioso y complicado que un espejo esférico; resulta más conveniente debido a que se obtiene mejores resultados en cuando a la disminución de aberraciones y por ende mejorar las imágenes a observar.

Se realizó la fabricación del espejo esférico desde la elección del vidrio para la utilización del espejo esférico y pasando por todas sus faces que anteriormente hemos descrito; como el corte del vidrio con el taladro siguiendo las recomendaciones y el procedimiento debido; la generación del radio de curvatura utilizando la maquina generadora de curva tomando en cuenta el ángulo de trabajo, posición del eje y espesor; el esmerilado utilizando la máquina de esmerilado y los diferentes tipos de abrasivos; el proceso de pulido en el cual se ha utilizado la herramienta de brea para lograr una superficie esférica y posteriormente una herramienta tipo pétalo, que nos sirvió para generar la superficie parabólica deseada; y las pruebas ópticas como el test de Ronchi tanto en la superficie esférica así como en la superficie parabólica.

Es necesario mencionar que la herramienta de pétalo fue de gran ayuda, ya que nos ahorró tiempo de pulido en comparación al método tradicional que consistía en realizar el trabajo a mano, en el cual se realizaba el exhaustivo trabajo por horas y se estaba más propenso a la incurrir en errores.

Con el presente trabajo se da inicio en la elaboración de un proyecto que es el armado de un telescopio newtoniano para nuestra escuela de Física, de la Facultad de Ciencias

Físicas y Matemáticas, de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Como incentivo a nuestros compañeros y estudiantes de la escuela profesional de física, la cual no cuenta con esta herramienta óptica. De esta manera exhortamos a los estudiantes de nuestra escuela a culminar el proyecto con la elaboración del espejo secundario y el montaje; y de esta manera aportar mucho más al estudio y la observación de los cuerpos celestes y su interacción con nuestro entorno.

5.2. Recomendaciones.

En el proceso de generar la curva del espejo parabólico, se debe trabajar con mucho cuidado y teniendo en cuenta la superficie que se desea obtener, debido a que un error en este proceso, podría retrasar considerablemente todo lo avanzado hasta ese momento.

La herramienta generadora de la curva de la superficie del espejo, tiene que cortar el vidrio en intervalos de distancia muy pequeños y controlados, debido a que, si se pretende avanzar bruscamente, podría ocasionar que el vidrio presente quemaduras junto con el sujetador.

Se recomienda, que en el proceso de esmerilado los vidrios deben estar centrados, para evitar que el vidrio se quiebre en algunas zonas y exponer la superficie generada a rayaduras, de igual manera podría afectar a quien manipula el vidrio, ya que las zonas afectadas pueden generar cortes.

BIBLIOGRAFIA

- Accostupa Quispe, Y. (2007). Desarrollo de un objetivo de telescopio astronomico refractor para observación lunar orientado a la enseñanza de astronomía. Lima, Perú: Pontificia Universidad Catolica del Perú.
- Gonzales Niño, F. A. (2012). Diseño de un Telescopio de apertura pequeña con enfoque interno para instrumentos de medicion Estadimétrica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Escuela de Postgrado.
- Hetch. (2002). Optics. 4th Ed. Addison Wesley.
- Ingalls, A. G. (1935). Amateur Telescope Making. 4th Ed. Munn and Co Inc.
- Lapcraft, I. (2015). Lapcraft, Inc. Obtenido de https://www.lapcraft.com/_files/ugd/d75e72_854deb40ac0d4de6a0c19f6eabdf97b8.pdf
- leader, L. R. (s.f.). Lambda Research Corporation. Optical design software leader. Obtenido de OSLO EDU: <https://lambdares.com/oslo-edu-download>
- Lima, O., Davila, C., Garcia, G., & Lopez, G. (2016). Small Petal Tools used to Parabolize Mirrors. Applied Optics.
- Malacara, D. (2007). Optical shop testing. United states of America: Wiley-interscience.
- Malacara, D. (2015). Óptica Básica. Ediciones Científicas Universitarias.
- Montoya Janampa, A. (2020). Diseño y manufactura optica del objetivo de un telescopio astronomico refractor. Pontificia Universidad Catolica del Perú, Lima: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/16985>.
- Observatorio. (2017). Coating and handling operation of an 8 meter telescope mirror at Paranal Observatory in Chile. Obtenido de Observatorio Paranal: <https://www.youtube.com/watch?v=h4FBKbNY258>
- Observatory, T. S. (2014). Go Inside a Telescope Mirror Factory | To a Billionth of a Meter. Obtenido de The Steward Observatory Mirror Laboratoy: <https://www.youtube.com/watch?v=MjUcBWYVF9s>

- Ochoa Suarez, J. (2020). Manufactura de un espejo parabólico de diámetro de apertura 140mm y relación focal f/5 para observación de espacio profundo. Lima: Pontificia Universidad Catolica del Perú.
- OPTICAL, S. O. (2018). THE UNIVERSITY OF ARIZONA STEWARD OBSERVATORY OPTICAL TEST TOWER. Obtenido de <https://m3eng.com/es/portfolio/the-university-of-arizona-steward-observatory-optical-test-tower/>
- Quinteros, E., Gallego, H., & Gallego, H. (2008). Construcción de un telescopio reflector newtoniano de 15 cm. *Scientia et Technica*, XIV(40), 228-233.
- Romero Herrera, S. (2012). Estandarización de procedimientos de manufactura de óptica de precisión en la Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú: Pontificia Universidad Catolica del Perú.
- Rutten. (1999). Telescope optics, a comprehensive manual for amateur astronomers. United States, Richmond Virginia: Willmann-Bell, Inc.
- Schade, H. (1961). Procedimientos de trabajo en Optica de taller. Reverte S.A.
- Telescopico, E. (2022). Figuring of a 20" telescope mirror with the mirror-o-matic. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=VvV6ubJMi6A>
- Terexeau, J. (1984). How to make a telescope. 2nd Ed. William-Bell Inc.
- Venrooi, H. R. (1988). Telescope Optics. Willman-Bell Inc.
- Zackrisson, E., Zitrin, A., & Trenti, M. (11 de December de 2012). Detecting gravitationally lensed Population III galaxies with the Hubble Space Telescope and the James Webb Space Telescope. Obtenido de *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 427, Issue 3, Pages 2212–2223: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.22078.x>