

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Desarrollo de un sistema de sincronización espacial para
comunicaciones ópticas satelitales**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Efrén Antonio Domínguez Retamoza

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por

Efrén Antonio Domínguez Retamoza

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Arturo Arvizu Mondragón
Codirector

Dr. Juan Manuel Núñez Alfonso
Codirector

Dr. Joel Santos Aguilar

Dr. Horacio Soto Ortiz

Dr. Jorge Torres Rodríguez



Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo

Coordinador del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Efrén Antonio Domínguez Retamoza** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

Desarrollo de un sistema de sincronización espacial para comunicaciones ópticas satelitales

Resumen aprobado por:

Dr. Arturo Arvizu Mondragón
Codirector

Dr. Juan Manuel Núñez Alfonso
Codirector

A pesar de que actualmente la gran mayoría de los sistemas de comunicaciones ópticas comerciales se basan en el uso de la fibra óptica, existe una actividad importante de investigación y desarrollo tecnológico a nivel internacional de sistemas ópticos que emplean el espacio libre como canal de comunicaciones. El uso de un canal no guiado (inalámbrico) es necesario para aplicaciones tales como las comunicaciones ópticas espaciales en las que se incluyen la transmisión bidireccional entre una estación terrena y aviones o globos aerostáticos, de aviones hacia satélites en órbita LEO, de tierra hacia satélites en diferentes órbitas e incluso para construir redes ópticas satelitales. En el presente trabajo se aborda el estudio teórico – experimental de un subsistema de sincronización espacial, también denominado ATP por sus siglas en inglés, *acquisition, tracking and pointing* (adquisición, seguimiento y apuntamiento), el cual es fundamental para la buena operación de los enlaces ópticos satelitales. Para esto, se realizó en primer lugar el estudio de los fundamentos de las comunicaciones ópticas satelitales y en base a los diversos textos consultados se elaboró una metodología estructurada para el diseño de sistemas ATP. Se detallan los criterios para la selección del tipo de detector, elementos ópticos y faro óptico además de la rutina de rastreo. A partir de la colección de características de los elementos involucrados en estos enlaces se especifica el diseño e implementación de una montura gimbals en el cual se acopla el conjunto detector-elementos ópticos. Se reporta asimismo la caracterización del desempeño del subsistema ATP en el laboratorio y en enlaces en espacio libre de corta distancia.

Palabras clave: **Comunicaciones ópticas satelitales, Faro óptico, Adquisición, Apuntamiento, Rastreo.**

Abstract of the thesis presented by **Efren Antonio Dominguez Retamoza** as a partial requirement to obtain the Master in Sciences degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications.

Development of a spatial synchronization system for optical satellite communications

Abstract approved by:

Dr. Arturo Arvizu Mondragón
Codirector

Dr. Juan Manuel Núñez Alfonso
Codirector

Although currently the vast majority of commercial optical communication systems are based on the use of fiber optics, there exists an important international activity of research and technological development of the optical systems employing the free space as a communications channel. The use of an unguided channel (wireless) is required for applications such as space optical communications which include the bidirectional transmission between an earth station and airplanes or balloons, aircraft to satellites in low-earth orbit (LEO), from earth to satellites in different orbits and even to implement satellite optical networks. In this thesis we address the theoretical and experimental study of a spatial synchronization subsystem, also called ATP for short (acquisition, tracking and pointing), required for the good performance of optical satellite links. For this, the study of the fundamentals of optical communications satellite was made first, and based on the various texts consulted a structured methodology for the design of ATP system was developed. We detailed the criteria for selecting the type of detector, optic elements and optical beacon as well as the tracking routine. From the collection of characteristics of the elements involved in these links is specified the design and implementation of a gimbal mount. The set formed by the detector and the optical elements is coupled together in such mount. It is also reported the characterization of the performance of the ATP subsystem both in the laboratory as well as in free-space short-distance links.

Keywords: **Satellite optical communications, Optical beacon, Acquisition, Pointing, Tracking.**

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo que me han proporcionado durante todas las metas que me he propuesto a lo largo de mi vida, incluso cuando estas parecen difíciles y no es claro el camino a seguir, ellos siempre están a mi lado.

Como no agradecer a mis directores de tesis los Dres. Arturo Arvizu y Manuel Núñez que con sus consejos siempre buscaron la mejor manera de que yo desarrollara mi intelecto, capacidad de análisis e interés por realizar un trabajo de calidad.

A mi comité de tesis los Dres. Joel Santos, Horacio Soto y Jorge Torres quienes en cada avance de tesis o situaciones en las que precisaba de su ayuda me exhortaban, desde sus muy particulares puntos de vista, a realizar acciones en pro de mi trabajo de investigación.

A todas las personas del IA-UNAM que estuvieron involucradas durante el proceso de mi trabajo de tesis.

A mis amigos Pepe, Fortunato y Christian con quienes las tardes de trabajo en el cubículo eran todo menos aburridas, por todas esas salidas al cine, a comer o solo para reunirnos a platicar de un sin número de temas. A Víctor y Samuel por ser parte de ese grupo de amigos que aunque inician en un mismo lugar el destino les tiene preparados otros caminos.

A todos los amigos y personas que conocí durante mi paso por el CICESE.

A mi novia Topacio por acompañarme y apoyarme en todo, gracias linda.

Por ultimo a el CICESE por ser la institución que me abrió sus puertas y me permitió formar parte del selecto grupo que son sus egresados, siempre le estaré agradecido. Al CONACYT por el apoyo económico que en forma de beca me ofreció durante estos dos años.

Tabla de contenido

Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Agradecimientos	iv
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Generalidades.	1
1.2 Justificación.	2
1.3 Objetivo.....	3
Capítulo 2. Sistemas Ópticos	4
2.1 Formación de imágenes en lentes y espejos.....	4
2.2 Ley de refracción.	7
2.3 Ley de reflexión.	9
2.4 Ecuación de gauss para lentes y espejos.....	10
2.5 Amplificación.....	12
2.6 Número F (F/#).	12
2.7 Escala de placa (Ep).....	13
2.8 Límite de difracción óptico (θD).....	14
2.9 Divergencia.....	15
2.9.1 Parámetros de haces Gaussianos.	16
2.9.1.1 Cintura de haz.	17
2.9.1.2 Rango Rayleigh y parámetro confocal.....	17
2.9.1.3 Divergencia del haz gaussiano.....	18
2.10 Telescopios catadióptricos.....	18
2.11 Prueba de Ronchi.	20
Capítulo 3. Comunicación Óptica de Espacio Libre	22

3.1 Comunicaciones ópticas en espacio libre.....	22
3.1.1 El canal óptico no guiado.	23
3.1.1.1 Ventanas atmosféricas	24
3.1.2 Perturbaciones en el canal óptico no guiado.....	27
3.1.2.1 Niebla.	27
3.1.2.2 Rango meteorológico de visibilidad.	31
3.1.2.3 Ley de atenuación del contraste de Duntley.....	31
3.1.2.4 Turbulencia atmosférica.	33
3.1.2.5 Cintilación en comunicaciones ópticas de espacio libre.	34
3.2 Presupuesto de potencia de enlaces ópticos en espacio libre.....	39
3.2.1 Margen por desvanecimiento.	40
3.2.2 Pérdidas por propagación.	40
3.2.3 Pérdidas por turbulencia.	40
3.2.4 Pérdidas por apuntamiento.	41
3.2.5 Pérdidas atmosféricas.....	41
3.2.6 Pérdidas geométricas y ganancias de antenas ópticas.....	42
3.3 Sistemas ópticos de adquisición, apuntamiento y rastreo.	43
3.3.1 Adquisición óptica espacial.	44
3.3.2 Elementos de apuntamiento óptico.	46
3.3.2.1 Gimbal plano.....	46
3.3.2.2 Telescopio gimbal.....	47
3.3.2.3 Paquete gimbal.....	48
3.3.3 Rastreo.....	48
3.3.3.1 Tipos de rastreo.....	49
3.3.4 Antenas ópticas.....	52
3.3.5 Fotodetectores de cuatro cuadrantes.....	56
Capítulo 4. Componentes del Sistema de Sincronización Espacial	58
4.1 Elementos electrónicos.....	58
4.1.1 Detector de cuatro cuadrantes.	58
4.1.2. Adquisición y despliegue de datos.	64
4.2 Elementos ópticos.	65
4.2.1 Lente.	65
4.2.2 Cámara CCD.....	70

4.2.3 Telescopios.....	72
4.2.3.1 Comparación con telescopios del OAN.....	73
4.2.3.2 Estrella artificial.....	74
Capítulo 5. Diseño e Implementación del SSE.....	79
5.1 Introducción.....	79
5.2 Funcionamiento de la montura de precisión gimbal para el SSE.....	80
5.3 Caracterización del SSE.....	86
5.3.1 Pruebas experimentales de laboratorio.....	87
5.3.2 Pruebas experimentales de campo.....	90
5.4 Análisis de resultados.....	93
Capítulo 6. Conclusiones.....	98
6.1 Conclusiones.....	98
6.2 Trabajo a futuro.....	99
Referencias bibliográficas.....	100

Lista de figuras

Figura		Página
1	Símbolos para una lente convergente.....	5
2	Símbolos para una lente divergente.....	6
3	Principales parámetros de un (a) espejo cóncavo y un (b) espejo convexo.....	7
4	Representación de la refracción de la luz en dos medios con índices de refracción distintos.....	8
5	(a) Lente convergente y (b) Lente divergente.....	9
6	Leyes de la reflexión en un espejo plano.....	10
7	Formación de imágenes para una lente convergente para tres posiciones del objeto a) Objeto en ∞ , b) Objeto en $2f$, c) Objeto en f	11
8	Amplificación de un sistema óptico.....	12
9	(a)Número F rápido, (b) Número F lento.....	13
10	Escala de placa de un sistema óptico.....	13
11	Anchura de un haz gaussiano $w(z)$ en función de la distancia z a lo largo del haz.....	17
12	Diagrama esquemático de un telescopio Schmidt-Cassegrain.....	20
13	Diagrama esquemático utilizado para probar un espejo cóncavo usando la prueba de Ronchi.....	20
14	Enlaces ópticos en espacio libre.....	23
15	Perfil de intensidad de una señal óptica bajo los efectos del (a) esparcimiento y el (b) centelleo.....	24
16	Ventanas de atenuación de la fibra óptica.....	25
17	Ventanas de atenuación de la atmosfera.....	26
18	Fenómenos que provocan perturbaciones atmosféricas.....	27
19	Redistribución angular del campo óptico.....	30

20	Turbulencia representada en el modelo de Kolmogorov.....	34
21	(a)Frente de onda plano y (b) Frente de onda aberrado.....	37
22	PSF en presencia de turbulencia débil, $D/r_0 < 5$	38
23	PSF en presencia de turbulencia media, $5 < D/r_0 < 10$	38
24	PSF en presencia de turbulencia fuerte, $10 < D/r_0 < 15$	38
25	Pérdidas geométricas.....	42
26	Adquisición óptica espacial en un sentido.....	44
27	Adquisición óptica espacial de 2 sentidos.....	45
28	Secuencia de adquisición óptica espacial con un faro óptico.....	46
29	Gimbal plano.....	46
30	Telescopio gimbal.....	47
31	Paquete gimbal.....	48
32	Rastreo continuo en espiral.....	50
33	Rastreo por barrido.....	50
34	Rastreo en espiral por pasos.....	51
35	Rastreo segmentado.....	52
36	Antenas con óptica refractiva: a) lente convergente, b) lente divergente.....	53
37	Antenas con óptica reflectiva: a) tipo Newton, b) tipo Cassegrain.....	53
38	Antenas ópticas receptoras: a) refractiva (lentes convergentes), b) reflectiva (tipo Newton), c) reflectiva (tipo Cassegrain).....	55
39	Esquema de fotodetector de cuatro cuadrantes.....	56
40	Diagrama de la tarjeta del QPIN.....	60
41	Detector QPIN.....	61
42	Diagrama experimental para caracterización del QPIN.....	62
43	Esquema experimental para caracterización del QPIN.....	62

44	Gráfica de Voltaje (V) vs Potencia (dBm) en el QPIN.....	63
45	Módulo de adquisición de datos KEITHLEY KUSB 3100.....	64
46	Diagrama de flujo del programa posición.m.....	64
47	Diagrama esquemático de la lente plana convexa.....	66
48	Diagrama de prueba de Ronchi para lentes.....	66
49	Desplazamiento de la posición de la imagen/foco.....	67
50	FOV teórico del SSE.....	70
51	Cámara Prosilica GC 650.....	71
52	Telescopio astronómico MEADE® LX200®-ACF.....	73
53	Primera etapa para obtener una estrella artificial.....	76
54	Segunda etapa para obtener una estrella artificial.....	76
55	Diagrama experimental realizado para obtener una estrella artificial.....	77
56	Estrella artificial en el laboratorio.....	78
57	Diagrama esquemático del SSE.....	79
58	Modelo 3D de la montura de precisión gimbal.....	81
59	Caja de la montura de precisión gimbal (cm).....	82
60	Tapadera-rosca de la montura de precisión gimbal.....	83
61	Movimiento de la caja de la montura de precisión gimbal.....	84
62	Detalle del movimiento de la montura de precisión gimbal.....	85
63	Fotografía de la montura de precisión gimbal.....	86
64	Diagrama del banco de pruebas en laboratorio.....	87
65	Enlace de laboratorio. Análisis de la imagen formada en el plano focal del sistema óptico de la montura de precisión gimbal: a) gráfica de contorno, b) gráfica de perfil con ajuste gaussiano, c) gráfica de superficie.....	88

66	Enlace de laboratorio con turbulencia. Análisis de la imagen formada en el plano focal del sistema óptico de la montura de precisión gimbal: a) gráfica de contorno, b) gráfica de perfil con ajuste gaussiano, c) gráfica de superficie.....	90
67	Diagrama del enlace de media distancia de espacio libre.....	91
68	Fotografías del enlace de media distancia en espacio libre.....	92
69	Enlace de media distancia. Análisis de la imagen formada en el plano focal del sistema óptico del gimbal: a) grafica de contorno, b) grafica de perfil con ajuste gaussiano, c) grafica de superficie.....	93
70	Barrido del punto láser en el área activa del QPIN.....	95
71	Potencia total incidente vs movimiento anular del gimbal.....	96
72	Valor de los ejes X y Y del QPIN vs movimiento angular.....	96

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Radio de las partículas dispersantes típicas presentes y el proceso dispersivo que producen a una longitud de onda de 850 nm.....	30
2	Condiciones del clima y relación visibilidad-pérdidas ópticas a 1550 nm.....	32
3	Código de colores de las señales de la tarjeta del QPIN.....	61
4	Características de la lente plano-convexa.....	65
5	Desplazamiento de la imagen vs ángulo de incidencia en lentes comerciales.....	63
6	Especificaciones de la cámara Prosilica GC 650.....	71
7	Características de los telescopios MEADE® modelo LX200®-ACF.....	72
8	Comparación con telescopios de SPM.....	74
9	Requerimientos de la montura de precisión gimbal para el SSE.....	80
10	Comparación del FWHM de la imagen en cada enlace.....	94

Capítulo 1. Introducción

1.1 Generalidades.

Las comunicaciones ópticas inalámbricas de espacio libre (del inglés *Free Space Optics* o *FSO*) se realizan mediante el uso de enlaces a través de la atmósfera terrestre o en el espacio exterior. En este tipo de enlaces se utilizan láseres o diodos emisores de luz (del inglés *Light Emitting Diode* o *LED*) como elementos emisores, fotodetectores y antenas ópticas (telescopios o lentes) como elementos receptores que se utilizan para captar la luz en la que la información viaja.

Para este tipo de enlaces es muy conveniente contar con un sistema que mantenga la correcta alineación entre los dos puntos. Los sistemas de apuntamiento, adquisición y rastreo (del inglés *Acquisition Tracking and Pointing* o *ATP*) han sido ampliamente utilizados en numerosas aplicaciones militares, industriales y comerciales. Ejemplos comunes son el posicionamiento de brazos robóticos [Andreff, Horaud y Espiau, 1999], alineación de láseres [Kilpelä, 2004], posicionamiento de satélites, guiado de misiles [Kingsley y Quegan, 1999] y la alineación de sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas [Ho, Davis y Milner, 2005].

En general un subsistema ATP tiene la capacidad de adquirir objetivos remotos, apuntar un láser hacia el objetivo adquirido y realizar el rastreo del mismo incluso en ambientes con perturbaciones. En particular uno de los factores que limitan el desempeño de estos sistemas es la atenuación del haz debido al esparcimiento, absorción y presencia de aerosoles (lluvia, neblina, nieve, etc.) en el medio.

1.2 Justificación.

De manera similar a los sistemas de comunicaciones ópticas por fibra óptica, los sistemas de comunicaciones ópticas en espacio libre tienen una capacidad inherente (por usar portadoras ópticas) para transmitir altas tasas de información.

Estos sistemas son capaces de operar a grandes distancias debido a la pequeña divergencia de haz que tiene la señal óptica que se utiliza (normalmente es un láser), esta característica propia de la longitud de onda utilizada previene que la potencia óptica transmitida se disipe. El contar con una divergencia de haz pequeña ofrece canales con muy alta seguridad y poca probabilidad de interceptación, simultáneamente mejora la relación señal a ruido (del inglés *Signal to Noise Ratio* o SNR) de las señales recibidas lo que a su vez disminuye la tasa de error de bit (del inglés *Bit Error Rate* o BER). Como un ejemplo del aprovechamiento de estas características ha sido posible la implementación de enlaces FSO de varios kilómetros a 80 Gbps [Sova et al., 2006].

Los sistemas FSO utilizan la atmósfera como medio por el cual se transmite la información, aunque esta sea menos predecible que las alternativas más convencionales. Perturbaciones tales como la niebla, absorción, esparcimiento, obstrucciones físicas, oscilación de edificios y centelleo pueden afectar la disponibilidad y demeritar las prestaciones que el canal óptico inalámbrico ofrece [Willebrand y Ghuman, 2004].

Una característica importante de los sistemas FSO es el requerimiento de que sus enlaces cuenten con línea de vista (del inglés *Line Of Sight* o LOS). Para mantener una correcta alineación entre emisor y receptor el subsistema ATP se encarga de monitorear y contrarrestar las perturbaciones de alineación en el enlace, mantener la línea de vista es primordial en los enlaces FSO.

Debe notarse que para que el uso de sistemas FSO tenga una mayor difusión y logren convertirse en una alternativa importante al uso de enlaces de radiofrecuencia, tanto en tierra como en enlaces satelitales, es indispensable el contar con subsistemas de sincronización espacial (ATP) que sean eficaces y capaces de operar en condiciones adversas, incluso en regímenes de fuerte turbulencia óptica. A la fecha, el desarrollo de sistemas ATP para satélites medianos y de mayor tamaño, así como para enlaces

terrestres es una tecnología madura, sin embargo, al mismo tiempo, existe una actividad importante de investigación y desarrollo tecnológico a nivel mundial de dichos sistemas para enlaces hacia satélites de menores dimensiones tanto para comunicaciones clásicas como cuánticas. Es en este último punto donde se encuadra el trabajo presentado en esta tesis, así, se realizó el estudio teórico-experimental de sistemas FSO con especial énfasis en los subsistemas ATP de los mismos.

1.3 Objetivo.

El objetivo principal del presente trabajo es describir y caracterizar una metodología estructurada para el diseño de subsistemas ATP para comunicaciones ópticas en satélites pequeños.

Se diseñará, caracterizará y validará a nivel laboratorio una propuesta de un subsistema ATP óptico para enlaces satelitales de órbita baja, bajo esta visión se busca especificar los componentes (electrónicos y ópticos) a tener en cuenta para la realización de este tipo de enlaces.

A partir de las características necesarias para el enlace óptico se pretende diseñar un módulo de tamaño pequeño en el cual se coloque una lente y un dispositivo fotodetector. Se utilizará un telescopio comercial para generar un frente de onda plano (estrella artificial), esto con el fin de simular el comportamiento del haz óptico a través de su viaje por la atmósfera.

Se planea que la metodología elaborada como resultado de este trabajo pueda trasladarse a diferentes escenarios, en los cuales se requiera estudiar las características de diferentes configuraciones de enlaces FSO.

Capítulo 2. Sistemas Ópticos

En este capítulo se describen los conceptos de formación de imágenes así como el tipo de instrumentación óptica adecuada para las necesidades de las comunicaciones FSO. Estos fundamentos teóricos son esenciales para el desarrollo del trabajo de tesis que trata sobre el diseño, implementación y validación de un subsistema ATP para enlaces ópticos inalámbricos en satélites pequeños.

2.1 Formación de imágenes en lentes y espejos.

Cuando se trabaja con sistemas ópticos en los cuales se requiere una gran calidad en su funcionamiento, se vuelve una necesidad construir elementos o sistemas ópticos mucho más aproximados a los ideales. Existen varias técnicas ópticas con las cuales se puede probar un elemento óptico o un conjunto de ellos. La exactitud requerida en los sistemas ópticos es tal que solo este tipo de técnicas son capaces de proporcionar la exactitud deseada.

Las técnicas ópticas podemos clasificarlas en dos tipos: las interferométricas y las pruebas ópticas. Dentro de las pruebas interferométricas, las más usadas son las de Newton, Fizeau, Michelson y dentro de las pruebas ópticas se encuentran la prueba de Ronchi, Foucault, Hartmman, entre otras.

Tanto para probar elementos ópticos, así como para la incorporación de estos elementos ópticos en instrumentos ópticos, como los telescopios, es importante mencionar que esto se lleva a cabo a partir de la formación de imágenes.

Se define como imagen óptica a la figura formada por el conjunto de puntos donde convergen los rayos que provienen de fuentes puntuales de un objeto tras su interacción con un sistema óptico.

Los elementos básicos en un sistema óptico son las lentes y los espejos. Ambos nos permiten formar imágenes, pero la formación de estas imágenes obedece a dos leyes principales: las leyes de reflexión y las leyes de refracción.

Lentes.

Una lente es una placa de vidrio cuyas caras son esféricas, cóncavas o convexas y casi paralelas en el centro. Para realizar un estudio de la formación de imágenes en lentes, es necesario mencionar algunas características principales de las lentes:

- Diámetro de la lente: distancia máxima entre los bordes de la lente.
- Eje óptico: línea imaginaria que atraviesa el centro de ambas superficies. Esta línea siempre es normal a la superficie óptica.
- Vértice de la lente: punto que se encuentra en el punto de intersección entre el semidiámetro de la lente y eje óptico. Para una lente cuenta con dos vértices.
- Distancia Focal: distancia medida desde el vértice a un punto donde van a concurrir los rayos que entran paralelos al eje óptico, después de pasar por la lente.

A continuación (Figura 1) se muestran los símbolos aceptados para indicar una lente convergente

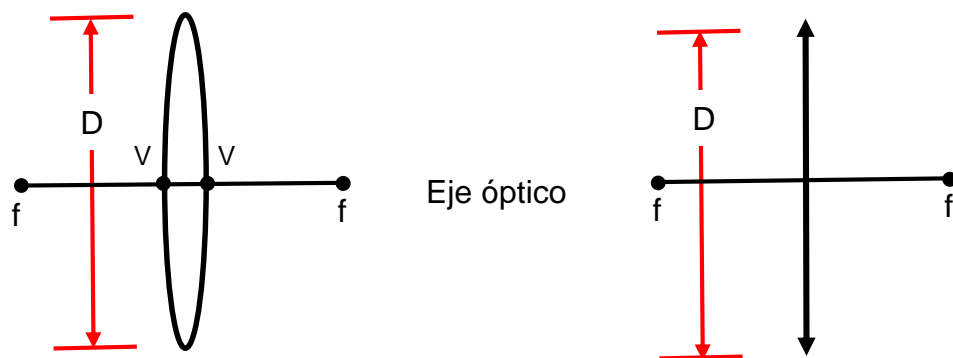


Figura 1. Símbolos para una lente convergente.

En forma análoga (Figura 2) se muestran los símbolos usados para indicar una lente divergente.

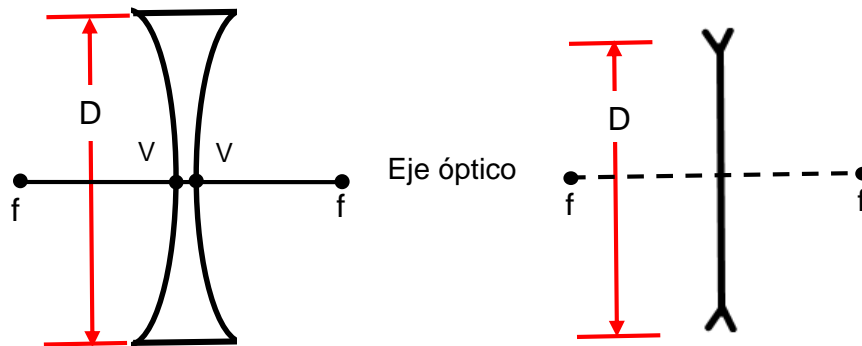


Figura 2. Símbolos para una lente divergente.

Espejos.

Un espejo es una superficie óptica (vidrio, metal, etc.) que se encuentra pulida, normalmente son superficies esféricas o cónicas. Los espejos pueden ser cóncavos o convexos.

Para realizar un estudio de la formación de imágenes en espejos, es necesario mencionar algunas características principales de los espejos:

- Diámetro del espejo: Se denota con la letra D y es la distancia máxima entre los bordes del espejo.
- Vértice del espejo: Se denota con la letra V y es el punto que se encuentra en el punto de intersección entre el semidiámetro del espejo y eje óptico.
- Eje óptico: Es la línea imaginaria que atraviesa el centro del espejo y el vértice del espejo.

- Centro de curvatura: Se denota con la letra C y es un punto imaginario el cual es el centro de la esfera a la que pertenece el espejo, este se encuentra a la distancia del radio de curvatura del espejo.
- Radio de curvatura: Es la distancia entre el vértice del espejo y el centro de curvatura del espejo, se representa con la letra r .
- Distancia Focal: se denota con la letra f , es la mitad de la distancia del radio de curvatura, esto es, se encuentra sobre el eje óptico entre el centro de curvatura y el vértice del espejo.

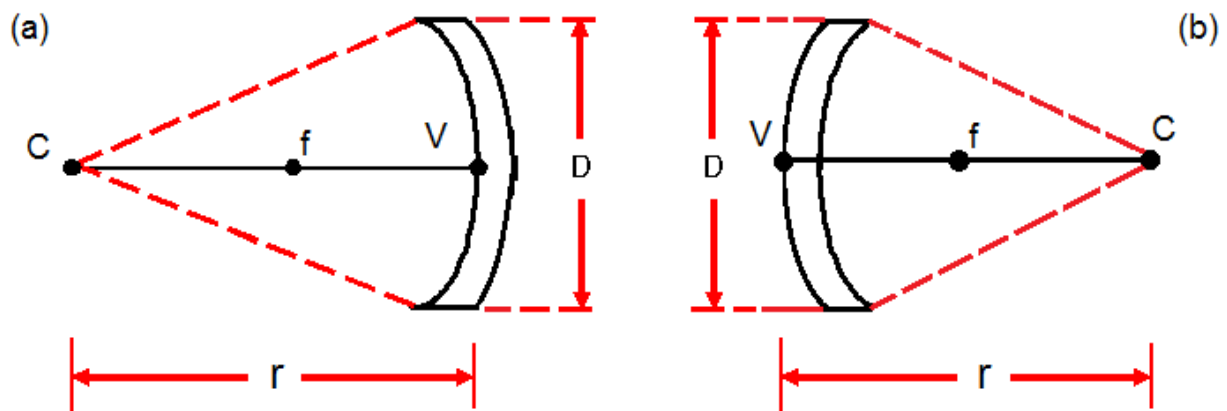


Figura 3. Principales parámetros de un (a) espejo cóncavo y un (b) espejo convexo.

2.2 Ley de refracción.

Las lentes están regidas por las leyes de refracción, y deben cumplirse para todo rayo que atraviesa la lente. A continuación se enuncian las dos leyes de la refracción.

Primera Ley:

El rayo incidente, el rayo refractado y la normal en el punto de incidencia, están en el mismo plano.

Segunda Ley:

La relación del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción tiene un valor constante entre los dos medios considerados y depende exclusivamente de la naturaleza de ellos.

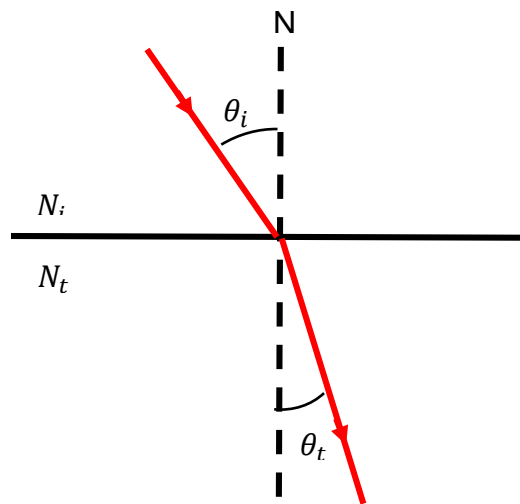


Figura 4. Representación de la refracción de la luz en dos medios con índices de refracción distintos.

La ley de Snell especifica los ángulos de los rayos que cruzan y salen de un medio a otro, se expresa con la fórmula siguiente:

$$N_i \text{ Sen } \theta_i = N_t \text{ Sen } \theta_t \quad (1)$$

Donde N_i y N_t son los índices de refracción para el medio del rayo incidente y para el medio del rayo refractado respectivamente, θ_i y θ_t son los ángulos (medidos respecto a la normal, N) del rayo incidente y refractado respectivamente (Figura 4).

Cuando un haz de luz colimado llega a la primera cara de la lente y este haz converge en un punto (foco) después de haber sido refractado por la lente, entonces se dice que

la lente es convergente o positiva (Figura 5a). En cambio si el haz de luz colimado diverge se tiene una lente divergente o negativa (Figura 5b).

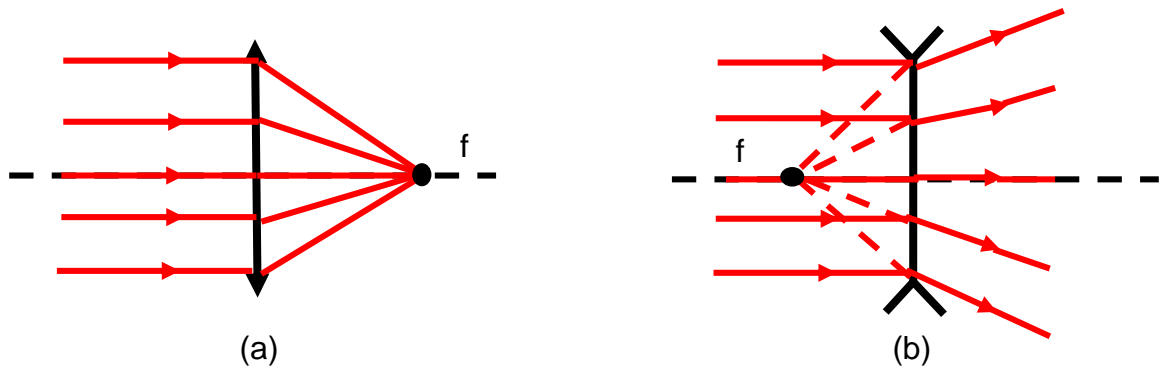


Figura 5. (a) Lente convergente y (b) Lente divergente.

2.3 Ley de reflexión.

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie pulida y lisa y este se refleja hacia el mismo medio se dice que se refleja y cumple las llamadas leyes de la reflexión:

Primera Ley:

El rayo incidente forma con la normal un ángulo de incidencia que es igual al ángulo que forma el rayo reflejado con la normal, que se llama ángulo reflejado.

Segunda Ley:

El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en el mismo plano.

En seguida (Figura 6) se muestra un rayo que se refleja en una superficie pulida y que cumple con las leyes de reflexión.

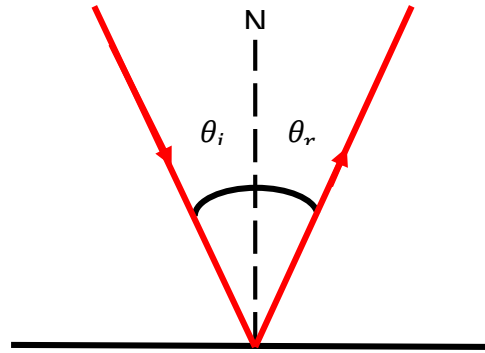


Figura 6. Leyes de la reflexión en un espejo plano.

2.4 Ecuación de Gauss para lentes y espejos.

La distancia de la imagen al lente d_i , la distancia del objeto a la lente d_o y la distancia focal están relacionada entre sí por la fórmula de Gauss (lentes). La cual se define como sigue:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

De esta ecuación se determinan tres casos especiales los cuales nos indican donde se formará la imagen.

- Si $d_o = \infty$, entonces $d_i = f$.
- Si $d_o = f$, entonces $d_i = \infty$.
- Si $d_o = 2f$, entonces $d_i = 2f$.

Para el caso de los espejos la fórmula de Gauss está definida de la siguiente manera:

$$\frac{1}{d_o} - \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r} \quad (3)$$

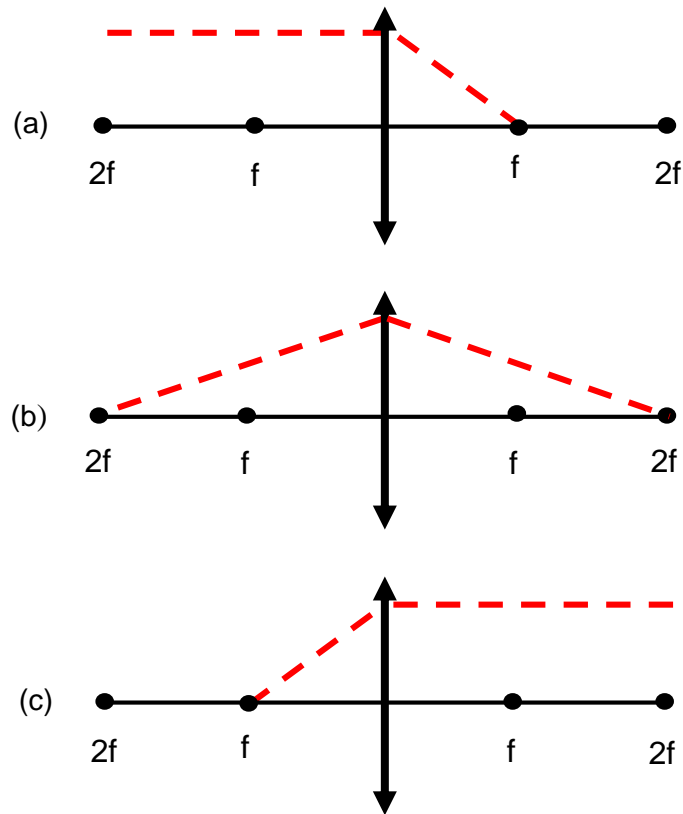


Figura 7. Formación de imágenes para una lente convergente para tres posiciones del objeto
 a) Objeto en ∞ , b) Objeto en $2f$, c) Objeto en f .

De la misma manera que con los lentes, en los espejos se tienen tres casos especiales de acuerdo a la fórmula de Gauss (espejos).

- Si $d_o = \infty$, entonces $d_i = -f$.
- Si $d_o = f$, entonces $d_i = -\infty$.
- Si $d_o = 2f$, entonces $d_i = -2f$.

En la figura anterior (Figura 7) se muestran los tres casos especiales de la fórmula de Gauss para el caso de los lentes convergentes.

2.5 Amplificación.

La amplificación, m , es el cociente de la altura de la imagen formada por un sistema óptico dividido por la altura del objeto, también es obtenida de la distancia del objeto medida desde el vértice del sistema óptico entre la distancia de la imagen medida desde el vértice del sistema óptico.

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{d_i}{d_o} \quad (4)$$

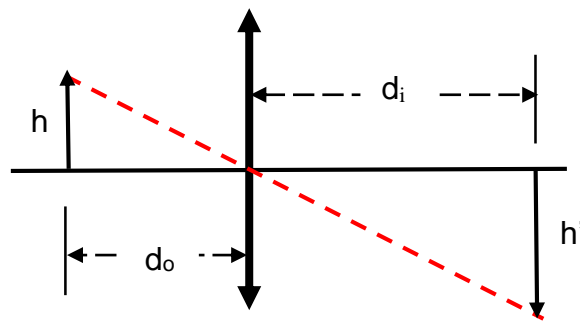


Figura 8. Amplificación de un sistema óptico.

2.6 Número F (F/#).

El número F describe la rapidez del sistema óptico, esto es, que tan rápido es enfocada la luz una vez que es refractada o reflejada dependiendo que sistema óptico se esté usando (lente o espejo). Mientras más pequeño sea el número F la lente tendrá la capacidad de enfocar la luz más rápido. Está definido por la siguiente fórmula:

$$F/\# = \frac{f}{D} \quad (5)$$

Donde f es la distancia focal y D es el diámetro del sistema óptico.

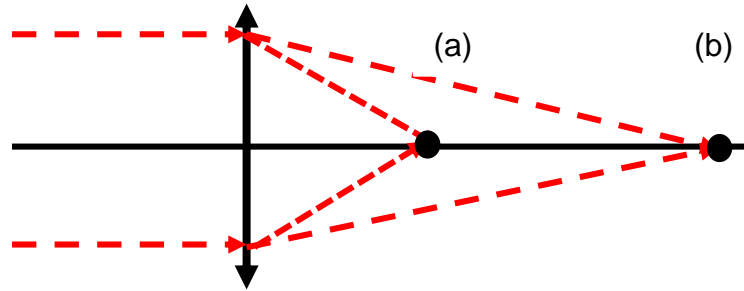


Figura 9. (a) Número F rápido, (b) Número F lento.

2.7 Escala de placa (Ep).

Este parámetro es uno de los más importantes ya que nos permite relacionar el tamaño de la imagen, h , que se forma en el plano de observación, con ángulo θ , con el tamaño del objeto. Si se considera que el rayo que viene del objeto pasa a través del vértice de la lente y forma su imagen a la distancia focal, f , de la lente; entonces es posible definir la escala de placa como la variación de la altura, h , de la imagen respecto del cambio en el ángulo θ (Figura 10).

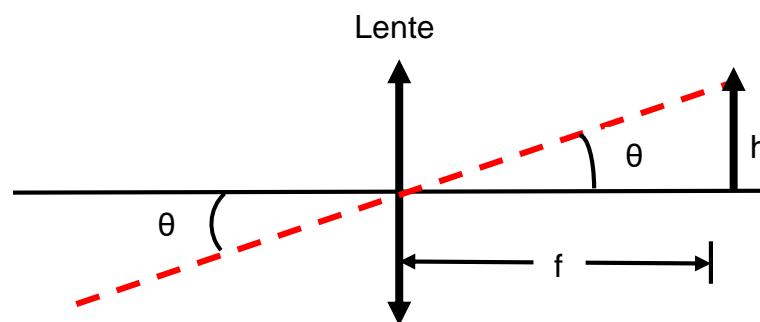


Figura 10. Escala de placa de un sistema óptico.

$$\tan \theta = \frac{h}{f} \quad (6)$$

Para ángulos pequeños $\tan \theta \approx \theta$ entonces es posible escribir

$$\theta = \frac{h}{f} \quad (7)$$

Y es posible obtener la derivada de θ con respecto a h , como

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta h} = \frac{1}{f} \quad (8)$$

o bien

$$E_p = \frac{\Delta \theta}{\Delta h} = \frac{1[\text{rad}]}{f[\text{mm}]} = \frac{\frac{1[\text{rad}]}{0.000004848[\text{rad}/'']}}{f[\text{mm}]} = \frac{206265['']}{f[\text{mm}]} \quad (9)$$

por lo tanto

$$E_p = \frac{206265['']}{f[\text{mm}]} \quad (10)$$

2.8 Límite de difracción óptico (θ_D).

Este parámetro indica cual es la separación máxima que debe existir entre dos objetos (puntos) para poder discernir entre uno u otro, se especifica en segundos de arco. Se define con la siguiente ecuación:

$$\theta_D = \frac{1.22 * (\lambda)}{D} \quad (11)$$

donde:

θ_D = Resolución angular (radianes).

λ = Longitud de onda utilizada.

D = Diámetro de apertura.

El factor 1.22 se deriva del cálculo de la posición del primer anillo oscuro que rodea al disco de Airy en el patrón de difracción [Malacara y Malacara, 2004].

2.9 Divergencia.

La divergencia de un haz de luz es una medida angular del incremento en el diámetro del haz de luz con respecto a la distancia desde la apertura óptica o la apertura desde donde emerge el haz. La divergencia es usada a menudo para caracterizar un haz electromagnético (como es el caso de los láseres) en un sistema óptico, para casos en que la apertura desde donde emerge dicho haz es muy grande con respecto a la longitud de onda.

La divergencia de un haz se puede calcular si se conoce el diámetro del haz en dos puntos separados (D_f, D_i), y la distancia (l) entre esos puntos. La divergencia del haz (Θ) de luz está dada por:

$$\Theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{D_f - D_i}{2l} \right) \quad (12)$$

Si el haz colimado es enfocado con una lente, el diámetro D_m del haz en el plano focal trasero de la lente está relacionado con la divergencia del haz inicial por:

$$\theta = \frac{D_m}{f} \quad (13)$$

Donde f es la distancia focal de a lente.

La divergencia de un haz laser es proporcional a su longitud de onda e inversamente proporcional al diámetro del haz en su punto más estrecho. La divergencia de los haces laser puede ser modelada usando haces gaussianos.

Se dice que un haz laser gaussiano está limitado en difracción cuando su divergencia radial, $\theta = \theta/2$, se acerca al mínimo valor posible, el cual está dado por:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega} \quad (14)$$

Donde λ es la longitud del láser y ω es el radio del haz en su punto más estrecho, el cual se denomina como "cintura del haz".

2.9.1 Parámetros de haces Gaussianos.

La dependencia geométrica de los campos de un haz gaussiano se rigen por la longitud de onda de la luz λ (en el espacio libre) y los siguientes parámetros. La figura siguiente muestra la anchura del haz gaussiano $w(z)$ en función de la distancia z (Figura 11). Los parámetros están relacionados entre sí como se detalla a continuación.

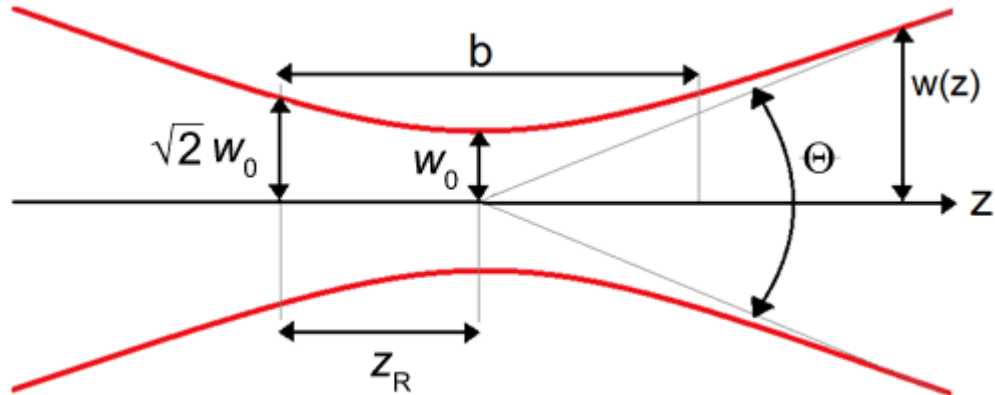


Figura 11. Anchura de un haz gaussiano $w(z)$ en función de la distancia z a lo largo del haz.

2.9.1.1 Cintura de haz.

La forma de un haz gaussiano de una determinada longitud de onda se rige únicamente por un parámetro, la cintura de haz w_0 . Esta es una medida del tamaño del haz en el punto donde se encuentra en foco ($z = 0$), donde la anchura de haz $w(z)$ es la menor y en donde la intensidad es la mayor. A partir de este parámetro se determinan los demás parámetros que definen la geometría del haz.

2.9.1.2 Rango Rayleigh y parámetro confocal.

El rango Rayleigh, z_R , está determinado dado un tamaño de cintura de haz gaussiano

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (15)$$

A una distancia de la cintura igual al rango Rayleigh z_R , la anchura w del haz es $\sqrt{2}$ veces más grande de lo que es en el foco donde la cintura del haz es $w = w_0$. Esto también implica que la intensidad en el eje ($r = 0$) es la mitad de la intensidad pico (en $z = 0$).

La distancia entre los dos puntos $z = \pm z_R$ se denomina como parámetro confocal (b) o profundidad de foco del haz.

2.9.1.3 Divergencia del haz gaussiano.

Aunque las colas de una función gaussiana nunca llegan a cero, definimos el borde del haz, el radio donde $r = w(z)$. Es en este punto donde la intensidad ha caído a $1/e^2$ de su valor en el eje. Ahora, para $z \gg z_r$, el parámetro $w(z)$ incrementa linealmente con z . Esto significa que estando lejos de la cintura, el borde del haz tiene forma cónica. El ángulo entre las líneas a lo largo del cono (en el cual $r = w(z)$) y el eje central del haz ($r = 0$) es la divergencia del haz. Esta dada por la siguiente ecuación:

$$\theta \cong \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (16)$$

La propagación angular total del haz lejos de la cintura viene dada por:

$$\Theta = 2\theta \quad (17)$$

Debido a que la divergencia es inversamente proporcional al tamaño del punto láser, para una λ dada, un haz gaussiano que es enfocado en un pequeño punto diverge rápidamente a medida que se propaga fuera de foco. Para minimizar la divergencia de un haz laser, e incrementar su intensidad a grandes distancias, este debe tener una cintura de haz (w_0) grande cuando se lanza dado que $w(z)$ nunca es menor que w_0 .

2.10 Telescopios catadióptricos.

Dado que se utilizaron telescopios catadióptricos, el estudio acerca de los telescopios se dirigió a los de este tipo. Un telescopio catadióptrico Schmidt-Cassegrain está formado por dos espejos, uno de ellos es cóncavo y es el de mayor diámetro, llamado espejo

primario, y el otro es un espejo convexo, llamado espejo secundario que se encuentra delante del espejo primario para reflejar la luz de regreso hacia éste. La imagen es formada detrás del espejo primario, gracias a que la luz pasa por un agujero en el centro del mismo.

La imagen formada por el espejo primario es utilizada por el espejo secundario como objeto, para así formar una imagen magnificada en el foco del espejo secundario. La distancia focal equivalente de este tipo de telescopios está definida por la siguiente ecuación:

$$F_{eq} = \frac{f_p f_s}{f_p + f_s - l} \quad (18)$$

donde:

f_p = Distancia focal del espejo primario.

f_s = Distancia focal del espejo secundario.

l = Separación entre espejos.

Entonces, modificando la separación entre los espejos primario y secundario, la distancia focal equivalente del telescopio Schmidt-Cassegrain se ve modificada también. A continuación se muestra (Figura 12) el arreglo esquemático de un telescopio del tipo Schmidt-Cassegrain.

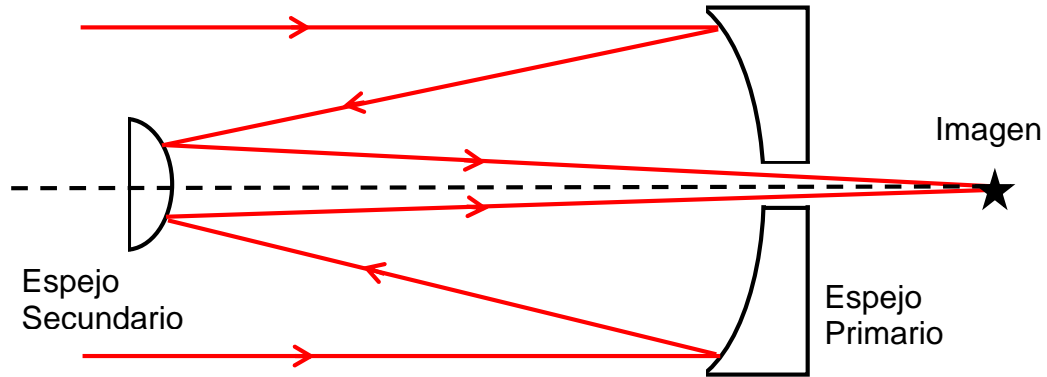


Figura 12. Diagrama esquemático de un telescopio Schmidt-Cassegrain.

2.11 Prueba de Ronchi.

La prueba de Ronchi es una de las pruebas ópticas más usadas para caracterizar espejos cóncavos o lentes convergentes [Núñez, Cordero, Vergara y Cuautle, 2001]. Esta prueba óptica permite obtener de manera cuantitativa parámetros como el radio de curvatura para el caso de los espejos y la distancia focal para el caso de las lentes convergentes. La prueba consiste en colocar el probador de Ronchi cerca del radio de curvatura del espejo que se desea analizar, como se muestra a continuación (Figura 13).

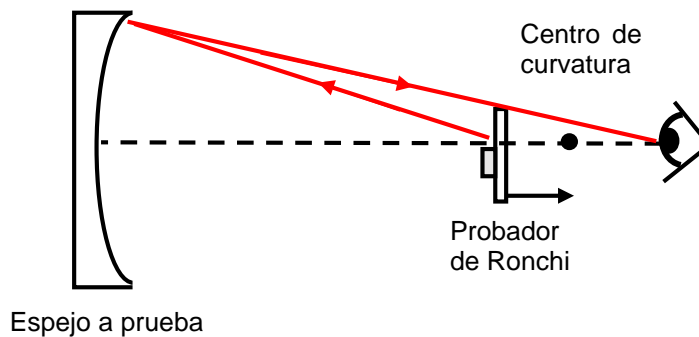


Figura 13. Diagrama esquemático utilizado para probar un espejo cóncavo usando la prueba de Ronchi.

El probador de Ronchi contiene una rejilla de Ronchi y en contacto detrás de ella se encuentra un LED, la información de la rejilla es enviada al espejo o lente que se está probando, este a su vez forma la imagen de la Rejilla de Ronchi la cual al superponerse con la rejilla real permite que se forme un patrón de franjas, la forma de las franjas nos permite determinar el tipo de superficie cóncava (esfera, parábola, hipérbola, etc.) y también determinar posibles problemas de aberraciones ópticas (esférica, astigmatismo, coma, etc.). El radio de curvatura se determina cuando se tiene el menor número de franjas en el probador de Ronchi, en algunos casos desaparecen totalmente.

Capítulo 3. Comunicación Óptica de Espacio Libre

3.1 Comunicaciones ópticas en espacio libre.

A pesar de que la mayoría de los sistemas de telecomunicaciones ópticas comerciales emplean un canal guiado (fibra óptica) como medio de transmisión, el interés en la utilización de los sistemas ópticos de comunicación no guiados (inalámbricos) se encuentra en ascenso debido a sus aplicaciones comerciales y potenciales tanto espaciales como terrestres.

La mayor limitación para la implementación y operación de los enlaces ópticos inalámbricos o comunicaciones ópticas de espacio libre es provocada por las condiciones atmosféricas, donde la trayectoria del haz empleado siempre incluirá efectos de turbulencia y esparcimiento.

El uso de los enlaces ópticos en satélites tiene diversas aplicaciones:

Dentro del satélite:

- En comunicaciones analógicas internas; por ejemplo para la generación y distribución del oscilador local, lo que conduce a una reducción de masa, volumen y consumo de potencia.
- Intercomunicación entre equipos y componentes, por ejemplo entre procesadores digitales y electrónica digital de alta velocidad con un menor consumo de potencia.

Comunicaciones ópticas intersatelitales (Figura 14) para aplicaciones en:

- Retransmisión de datos. (Por ejemplo datos a Mbps desde un satélite LEO/GEO o de un avión a tierra a través de otro satélite GEO).
- Para enlaces de banda ancha (multiGigabit) sobre miles de Kilómetros.
- Para enlaces espaciales científicos (Mbps o Kbps sobre millones de Kilómetros).
- Aplicaciones militares.

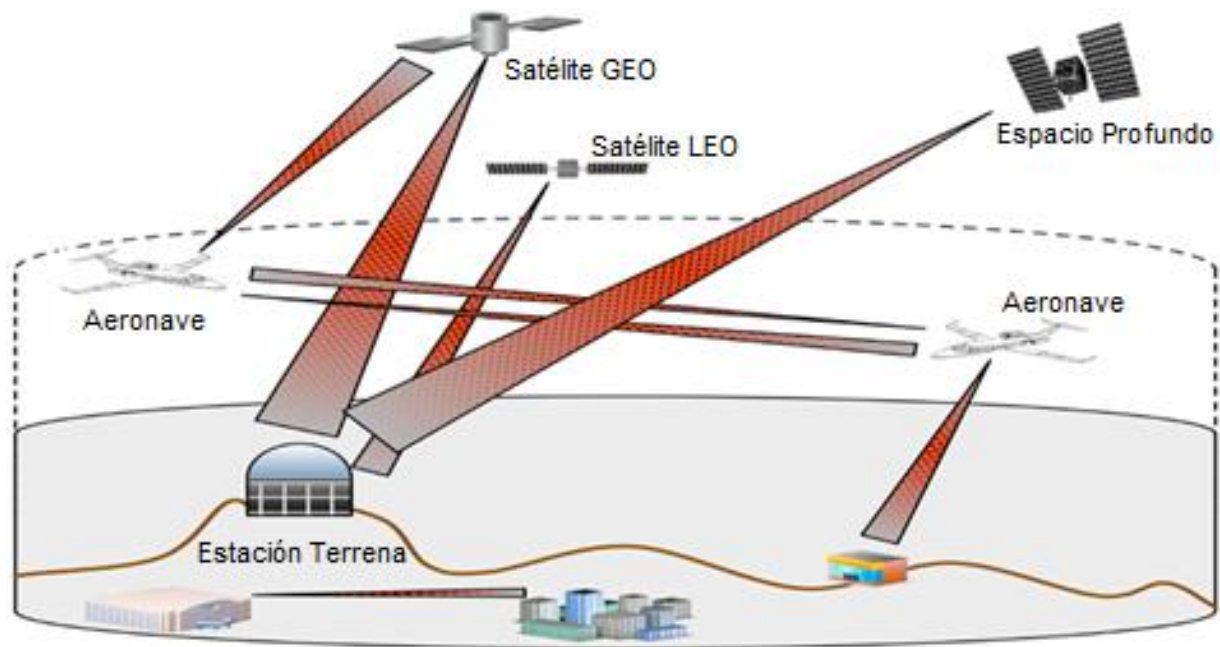
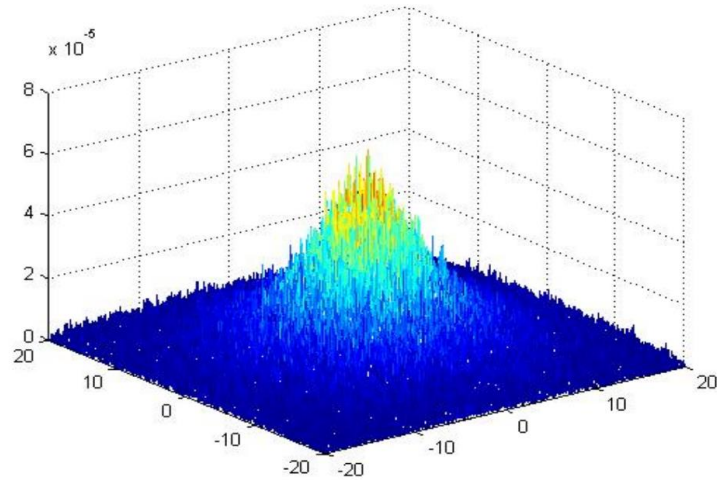


Figura 14. Enlaces ópticos en espacio libre.

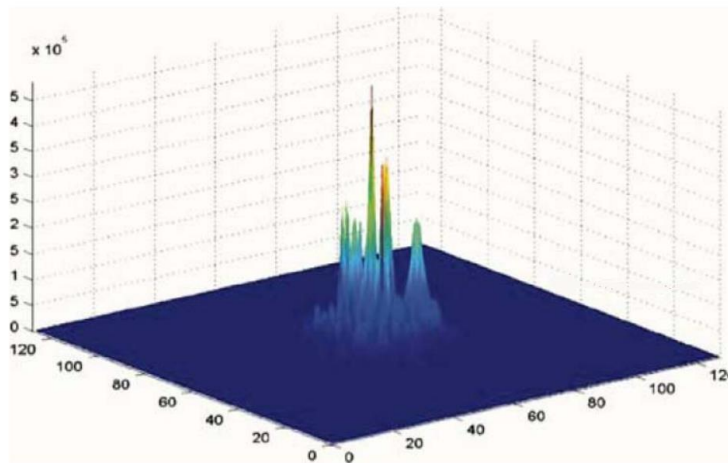
3.1.1 El canal óptico no guiado.

Al diseñar un sistema de comunicaciones a través de cualquier medio es necesario conocer el comportamiento que tendrá una onda o señal al propagarse por dicho medio. En particular, en el canal atmosférico se presentan principalmente dos fenómenos: el esparcimiento y el centelleo inducido por la turbulencia atmosférica.

Para su estudio, generalmente se supone que estos dos fenómenos son independientes. Para las gráficas (Figura 15) muestran un ejemplo de cómo los efectos de cada uno de estos fenómenos afecta el perfil de intensidad del haz.



(a) Esparcimiento



(b) Centelleo

Figura 15. Perfil de intensidad de una señal óptica bajo los efectos del (a) esparcimiento y el (b) centelleo [Kavehrad, 2011].

3.1.1.1 Ventanas atmosféricas

Las fibras ópticas tienen varias “ventanas” de transmisión óptima (donde su atenuación es mínima), dependiendo de la longitud de onda de la fuente óptica (Figura 16).

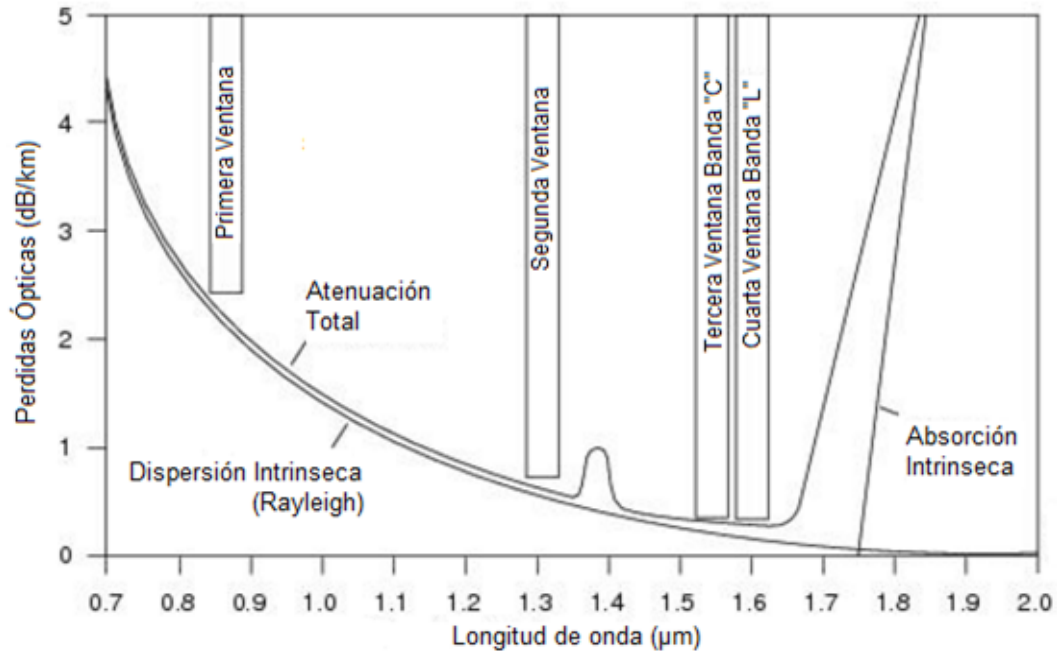


Figura 16. Ventanas de atenuación de la fibra óptica.

De manera similar, la atmósfera terrestre también tiene “ventanas” (Figura 17) donde su potencia se absorbe menos al propagarse a través de dicho medio, y por fortuna, algunas de estas ventanas son coincidentes con las longitudes de onda de las telecomunicaciones ópticas guiadas (850 nm, 1310 nm y 1550 nm). Esto permite aprovechar diversos de los principales componentes ópticos y optoelectrónicos empleados en los sistemas comerciales de telecomunicaciones vía fibra óptica para aplicaciones en espacio libre.

El canal óptico atmosférico atenúa el campo que lo atraviesa como un resultado de procesos de absorción y esparcimiento. Las concentraciones de materia en la atmósfera que producen la atenuación de la señal varían espacial y temporalmente dependiendo de las condiciones climatológicas locales.

La absorción de la atmósfera es un efecto cuántico donde las bandas de absorción de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) definen las 8 ventanas de transmisión (atmosféricas) en la banda de 720 nm a 12000 nm. El incremento en la humedad causa una absorción mayor producida por el agua.

El esparcimiento es el proceso por el cual pequeñas partículas suspendidas en la atmosfera hacen que una porción de la radiación incidente se propague en cualquier otra dirección. El esparcimiento, de este modo, representa una redistribución espacial de la energía.

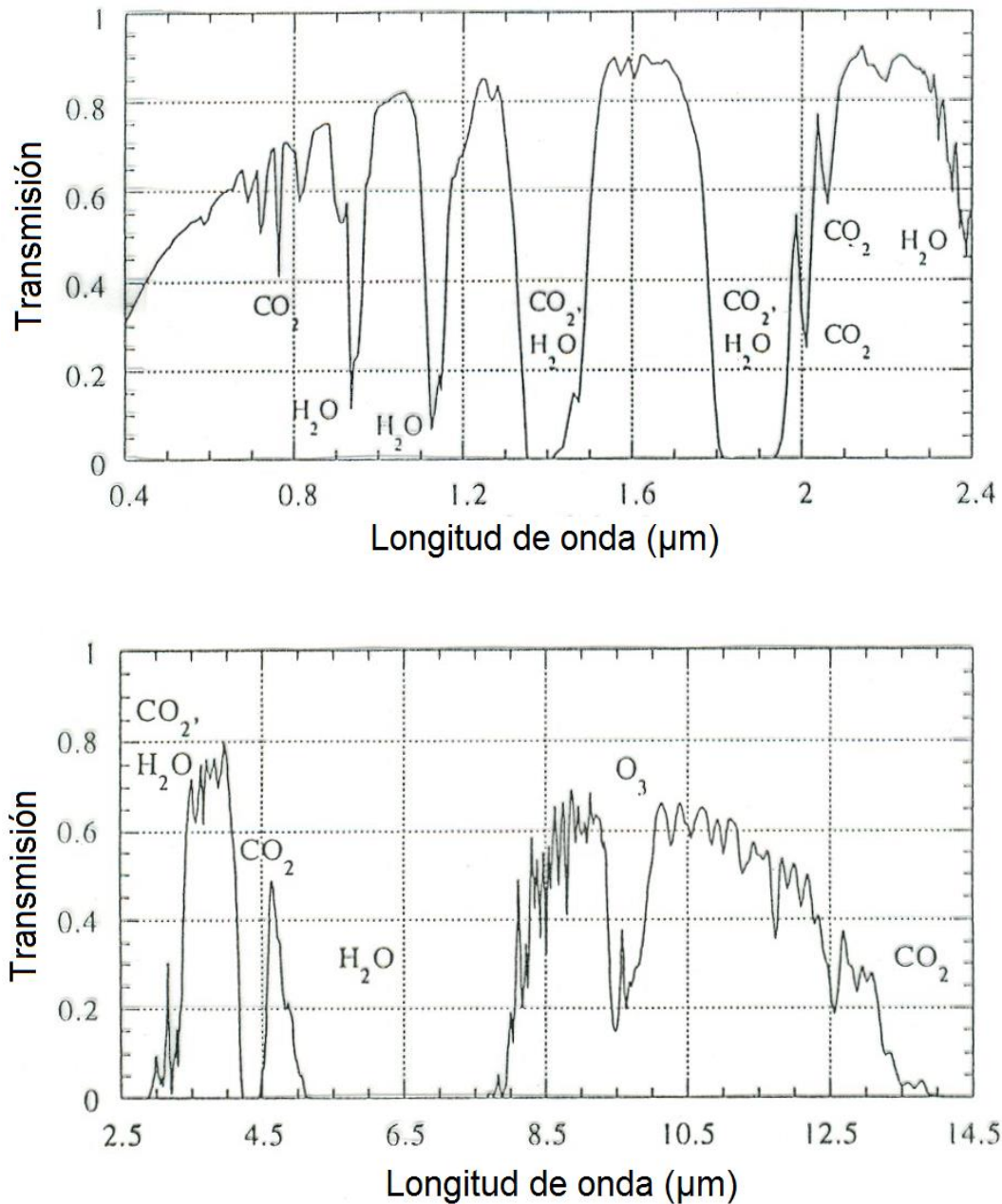


Figura 17. Ventanas de atenuación de la atmosfera.

3.1.2 Perturbaciones en el canal óptico no guiado.

Cuando una señal óptica se propaga en un medio no guiado tal como la atmósfera terrestre puede verse afectada por diversos factores tales como la absorción, la esparcimiento y las variaciones en el índice de refracción [Andrews y Phillips, 2005]. La absorción debida al vapor de agua presente en el medio, en conjunto con el esparcimiento causada por pequeñas partículas de agua (niebla) provoca una reducción en la potencia óptica de la señal incidente en el receptor. Algunos de los fenómenos que pueden provocar dichas perturbaciones son: la niebla, la lluvia, los gases atmosféricos (Figura 18).

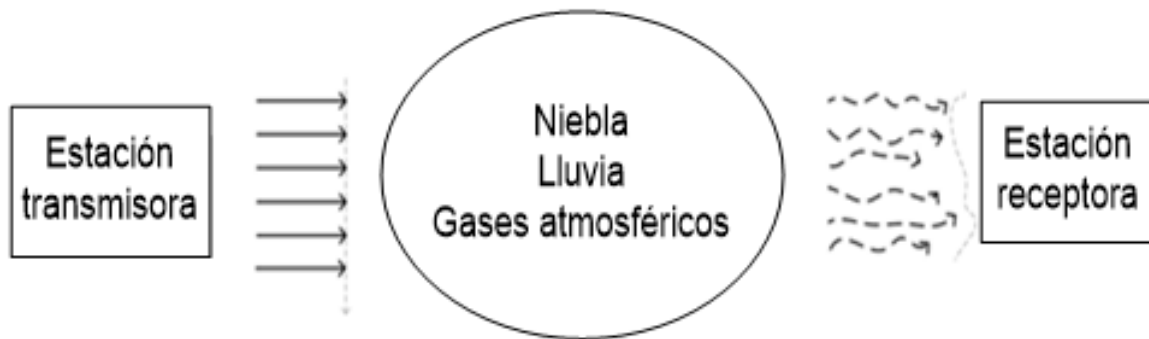


Figura 18. Fenómenos que provocan perturbaciones atmosféricas.

3.1.2.1 Niebla.

Este es el fenómeno de mayor impacto en los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas, debido a la relación entre el tamaño de las partículas (gotas) y la longitud de onda empleada en este tipo de enlaces [Hemmati y Mecherle, 2004].

En un enlace óptico inalámbrico terrestre, la potencia óptica recibida P_R a una distancia L (m) del transmisor está relacionada con la potencia óptica transmitida P_T a través de la ley de Beer-Lambert:

$$\tau(\lambda, L) = \frac{P_R}{P_T} = \exp(-\gamma(\lambda, L)) \quad (19)$$

Donde $\tau(\lambda, L)$ y $\gamma(\lambda, L)$ son la transmitancia de la atmósfera y el coeficiente de atenuación (extinción) en m^{-1} para una longitud de onda (λ) y una distancia dada.

La atenuación de la señal óptica en la atmósfera es debida a la presencia de componentes moleculares (gases) y aerosoles. Un aerosol está compuesto de pequeñas partículas de varias formas que pueden ser desde esféricas hasta formas totalmente irregulares suspendidas en la atmósfera. Las partículas generalmente tienen tamaños que van desde los nanómetros hasta algunos de centímetros. El coeficiente de atenuación es por lo tanto la suma de los coeficientes de absorción y esparcimiento de los aerosoles y componentes moleculares de la atmósfera de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (20)$$

Los primeros términos de la ecuación (20) representan los coeficientes de absorción molecular (m) y de aerosoles (a) respectivamente, mientras que los dos últimos términos son los coeficientes de esparcimiento molecular (m) y de aerosoles (a) respectivamente.

Los coeficientes de absorción y esparcimiento pueden ser calculados mediante las ecuaciones siguientes (los subíndices ab y s de las ecuaciones indican el efecto de absorción y esparcimiento respectivamente).

$$\alpha_{ab} = \sigma_{ab} N_{ab} [m^{-1}] \quad (21)$$

$$\beta_m = \sigma_s N_s [m^{-1}] \quad (22)$$

donde:

α_{ab}, σ_s = Parámetros de área de la sección transversal (m^2) de las partículas absorbentes y dispersantes respectivamente.

N_{ab}, N_s = Concentración por unidad de volumen (m^3) de las partículas absorbentes y dispersantes respectivamente.

La absorción ocurre cuando hay interacción entre los fotones que se están propagando y las moléculas presentes a lo largo de su trayectoria. Algunos de los fotones son extinguidos y su energía es convertida en calor. El coeficiente de absorción depende del tipo de moléculas de gas y de su concentración. La absorción es dependiente de la longitud de onda y por lo tanto es selectiva. Esto conduce a que la atmósfera tenga ventanas con zonas transparentes para varios intervalos de longitudes de onda donde la absorción es mínima las cuales son referidas como ventanas de transmisión óptica.

Las longitudes de onda usadas en comunicaciones ópticas inalámbricas son seleccionadas básicamente para coincidir con alguna de las ventanas de transmisión atmosféricas, resultando que el coeficiente de atenuación sea dominado esencialmente por los efectos del esparcimiento. El coeficiente de extinción se reduce entonces a:

$$\gamma(\lambda) \approx \beta_a(\lambda) \quad (23)$$

El esparcimiento resulta en una redistribución angular del campo óptico con o sin modificación de la longitud de onda. El efecto del esparcimiento (Figura 19) depende del radio r de las partículas (niebla, aerosol) encontradas durante la propagación. Una forma de describir esto es considerando el parámetro de tamaño $x_0 = \frac{2\pi r}{\lambda}$. Si $x_0 \ll 1$, el proceso es clasificado como esparcimiento o dispersión de Rayleigh, si $x_0 \approx 1$ se clasifica como dispersión de Mie, finalmente, si $x_0 \gg 1$, el proceso de esparcimiento puede explicarse usando la teoría de la difracción (óptica geométrica).

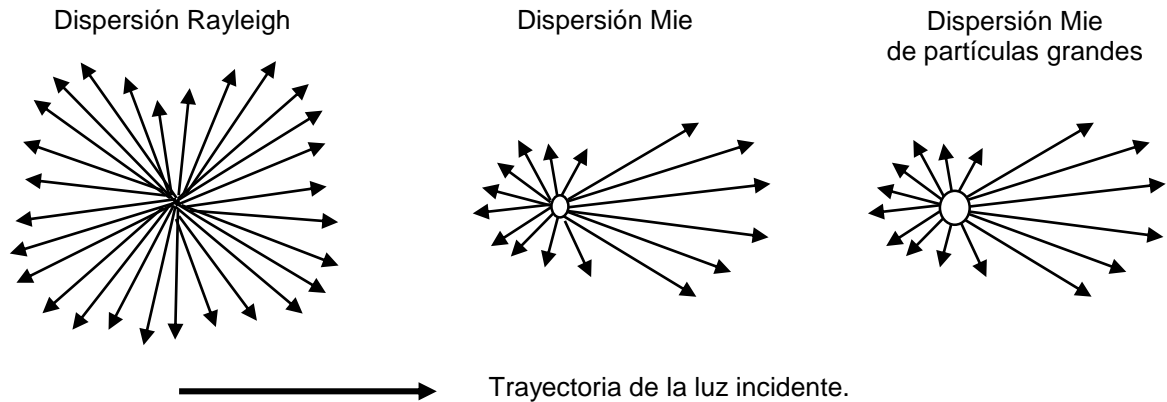


Figura 19. Redistribución angular del campo óptico.

En la tabla siguiente (Tabla 1) se muestra el radio de las partículas dispersantes típicas presentes y qué proceso dispersivo producen a una longitud de onda de 850 nm.

Tabla 1. Radio de las partículas dispersantes típicas presentes y el proceso dispersivo que producen a una longitud de onda de 850 nm.

Tipo	Radio(μm)	Parámetro x_0	Dispersión
Moléculas de aire	0.0001	0.00074	Rayleigh
Partículas de polvo, humedad, humo	0.01-1	0.074-7.4	Rayleigh-Mie
Niebla	1-20	7.4-147.8	Mie-Geométrica
Lluvia	100-10000	740-74000	Geométrica
Nieve	1000-5000	7400-37000	Geométrica
Granizo	5000-50000	37000-370000	Geométrica

El cálculo preciso de la atenuación atmosférica es un problema complejo debido al carácter aleatorio de la composición de las partículas y contaminantes que pueden estar presentes en la atmósfera. Existen programas computacionales comerciales que son empleados por agencias espaciales tales como la NASA, la industria aeronáutica y militar para cuantificar estos efectos. El programa más conocido es el llamado MODTRAN.

3.1.2.2 Rango meteorológico de visibilidad.

Organismos tales como la Organización Meteorológica Mundial (del inglés *World Meteorological Organization* o WMO) y la Organización de Aviación Civil Internacional (del inglés *International Civil Aviation Organization* o ICAD) han propuesto definiciones formales del rango meteorológico de visibilidad.

En particular para las comunicaciones ópticas inalámbricas se utiliza la siguiente definición:

“El rango meteorológico de visibilidad (V) es la distancia para la cual el contraste \mathcal{C} de la atmósfera es 2% en referencia a una longitud de onda de 550 nm (para la cual el ojo humano tiene mayor sensibilidad)”.

3.1.2.3 Ley de atenuación del contraste de Duntley.

Esta ley se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$C(d) = C_o \exp(-\gamma(\lambda)d) \quad (24)$$

donde

C_o = contraste de un objeto cercano con respecto a un fondo (por ejemplo el horizonte).

$\gamma(\lambda)$ = Coeficiente de extinción (ecuación 15).

d = Distancia a la que se evalúa el contraste.

C = Contraste del mismo objeto a una distancia d .

Para el rango meteorológico de visibilidad $d = V$ y haciendo uso de la ecuación (18) se tiene:

$$C(V) = C_o \exp(-\beta_a(\lambda)V) \quad (25)$$

de acuerdo a la definición del rango de visibilidad meteorológico

$$C(V) = 0.02C(0) = C_o \exp(-\beta_a(\lambda = 550 \text{ nm})V) \quad (26)$$

Despejando V se tiene:

$$C(\lambda = 550 \text{ nm}) = \beta_a^{-1}(\lambda = 550 \text{ nm}) \ln\left(\frac{1}{0.02}\right) = \frac{3.91}{\beta(\lambda = 550 \text{ nm})} \quad (27)$$

Sustituyendo (27) en la ecuación (19) (Ley de Beer-Lambert) se obtiene:

$$\tau(\lambda, L) = \exp\left(\frac{-3.91L}{V}\right) \quad (28)$$

En la tabla siguiente (Tabla 2) se muestran diferentes condiciones de clima y su relación con la visibilidad y las pérdidas ópticas.

Tabla 2. Condiciones del clima y relación visibilidad-pérdidas ópticas a 1550 nm.

Condiciones del clima	Precipitación		Visibilidad	Pérdidas dB/km
Niebla densa			0 m – 50 m	271.65
Niebla abundante			200 m	59.57
Niebla moderada	Nieve		500 m	20.99
Niebla ligera	Nieve	Ráfagas de nubes	770 m 1 km	12.65 9.26
Niebla delgada	Nieve	Lluvia densa	1.9 km 2 km	4.22 3.96
Neblina	Nieve	Lluvia mediana	2.8 km 4 km	2.58 1.62

Neblina ligera	Nieve	Lluvia ligera	5.9 km 10 km	0.96 0.44
Claro	Nieve	Llovizna	18.1 km 20 km	0.24 0.22
Muy claro			23 km 50 km	0.19 0.06

Si se definen las pérdidas del campo óptico cuantificables mediante el parámetro de la visibilidad, se tiene:

$$L = 10 \log\left(\frac{1}{\tau(\lambda, L)}\right) = 10 \log(\exp(\gamma L)) \quad (29)$$

Algunos valores típicos de pérdidas asociadas con la visibilidad son:

- Cielo claro ($\gamma = 0.1$), $L = 0.43$ (dB/km)
- Neblina ($\gamma = 1$), $L = 4.3$ (dB/km)
- Niebla ($\gamma = 10$), $L = 43$ (dB/km)

3.1.2.4 Turbulencia atmosférica.

La turbulencia atmosférica es resultado de inhomogeneidades en la temperatura y variaciones de presión en la atmósfera, que provocan variaciones en el índice de refracción; esto a su vez, distorsiona las señales ópticas que se propagan a través de dicho medio. Así, el desempeño de un sistema óptico inalámbrico se verá afectado debido a que el medio atmosférico es imperfecto, aleatorio y dinámico. Los efectos de la turbulencia atmosférica incluyen tanto variaciones de amplitud como de fase en la señal óptica detectada.

La turbulencia atmosférica se genera por el calentamiento de las masas de aire cerca de la superficie terrestre al ser mezcladas por efecto de la convección y el viento. Generalmente, los efectos de la turbulencia tienden a ser más significativos cuando la distancia de los enlaces ópticos sobrepasa 1Km.

La turbulencia puede ser descrita mediante el modelo de Kolmogorov que representa a la turbulencia mediante remolinos de tamaños diversos. Los remolinos de mayor tamaño se dividen en remolinos más pequeños pero sin pérdida de energía, la cual es disipada debido a la viscosidad, el tamaño de los remolinos oscila entre unos pocos metros y unos cuantos milímetros [Wheelon, 2003] (Figura 20), donde L_0 corresponde a la escala exterior mientras que l_0 a la escala interior.

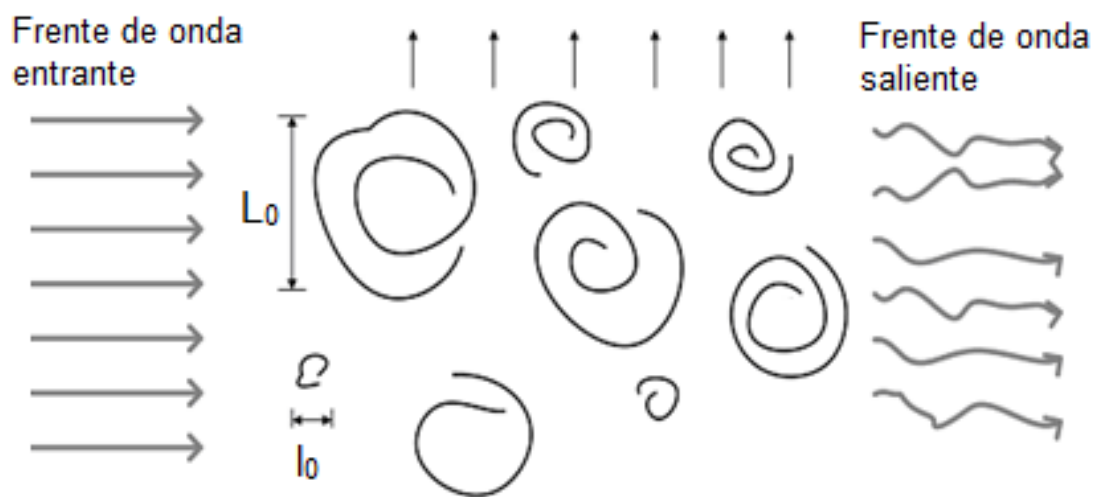


Figura 20. Turbulencia representada en el modelo de Kolmogorov.

La turbulencia óptica atmosférica puede modelarse también mediante la función del índice de cintilación, como se describe a continuación.

3.1.2.5 Cintilación en comunicaciones ópticas de espacio libre.

La cintilación es el efecto provocado por las variaciones aleatorias en el índice de refracción a lo largo del canal atmosférico en la señal detectada. La magnitud de la cintilación puede variar a lo largo de un día, teniendo estadísticamente su máximo alrededor del mediodía [Andrews y Phillips, 2005]. El ruido presente en la potencia óptica

recibida, producto de la cintilación, tiene como resultado un incremento en la tasa de bit erróneo y puede inducir desvanecimientos que provoquen la pérdida total de la comunicación entre emisor y receptor. Los efectos de las fluctuaciones causadas por la turbulencia atmosférica pueden ser estimados mediante la relación con el parámetro de la constante de la función de estructura del índice de refracción del aire, C_n^2 , el cual está relacionado con la temperatura y la presión atmosférica mediante la siguiente expresión:

$$C_n^2 = \left(79 * 10^{-6} \frac{P}{T^2}\right)^2 C_T^2 \quad (30)$$

Donde P es la presión atmosférica en (mb), T corresponde a la temperatura expresada en (°K) y C_T^2 es la constante de la función de estructura. Las unidades para C_n^2 son ($m^{-2/3}$). En intervalos cortos de tiempo (5 s), con una distancia de propagación fija y una altura constante por encima del nivel de suelo, es válido suponer C_n^2 como constante [Lee et al., 2014].

Se considera un nivel de turbulencia débil para valores menores de 10^{-17} , mientras que para valores superiores a 0.5×10^{-13} se considera un régimen de turbulencia fuerte [Goodman, 1985].

El nivel de turbulencia también puede ser evaluado mediante el uso de la varianza de Rytov:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (31)$$

Donde C_n^2 es la constante de la función de estructura del índice de refracción del aire, $k=2\pi/\lambda$ es el número de onda óptico y L es la distancia en (m) entre la estación emisora y receptora.

El índice de cintilación es otro parámetro asociado a la turbulencia y cintilación atmosféricas, está definido por:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (32)$$

donde I es la radiancia o intensidad de la señal óptica y el operador $\langle \rangle$ denota el valor promedio de la misma en el intervalo de tiempo de observación (o medición). Para un nivel de turbulencia débil se puede obtener la siguiente expresión [Andrews y Phillips, 2005]:

$$\sigma_I^2 = \sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (33)$$

Además, para los regímenes de turbulencia media y fuerte existe otra relación entre la varianza de Rytov y el índice de cintilación dada por:

$$\sigma_I^2 = 0.4 \sigma_R^2 \quad (34)$$

Adicionalmente a lo descrito anteriormente, existen otras formas de cuantificar el efecto de la turbulencia atmosférica sobre una señal óptica propagada a través del espacio libre, por ejemplo a través de la distorsión que una imagen sufra al propagarse por el medio atmosférico. Esta técnica es empleada en el diseño de telescopios, donde la premisa básica es que la luz reflejada por un objeto tiene un frente de onda plano, pero dado el efecto de la turbulencia atmosférica, al llegar a la estación receptora dicho frente está distorsionado o se dice que es un frente de onda con aberración (Figura 21).

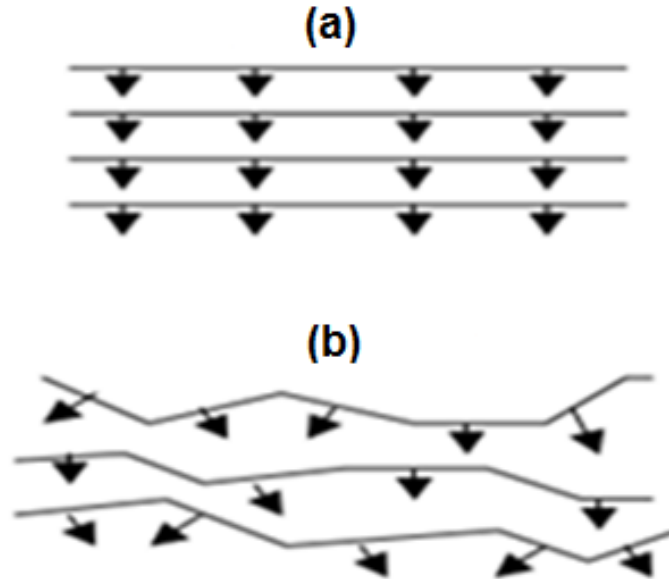


Figura 21. (a) Frente de onda plano y (b) Frente de onda aberrado.

En esta técnica, el parámetro de Fried (r_0) sirve como una medida de la presencia de la turbulencia atmosférica; la calidad de la imagen o resolución espacial de la imagen obtenida por un telescopio caracterizada por r_0 , es la misma que tendría un telescopio de diámetro r_0 en ausencia de turbulencia atmosférica. Así es posible asociar el nivel de turbulencia a las dimensiones de la lente usada para capturar el haz transmitido.

El efecto primario de las perturbaciones de fase es el ensanchamiento y la distribución de esparcimiento puntual (del inglés *Point Spread Function*), es decir, dada la severidad de la turbulencia la energía recolectada por la lente empleada, de diámetro D , no puede ser concentrada en un punto focal pequeño y por tanto el fotodetector no será capaz de capturar la energía de la señal en su totalidad (Figuras 22, 23 y 24).

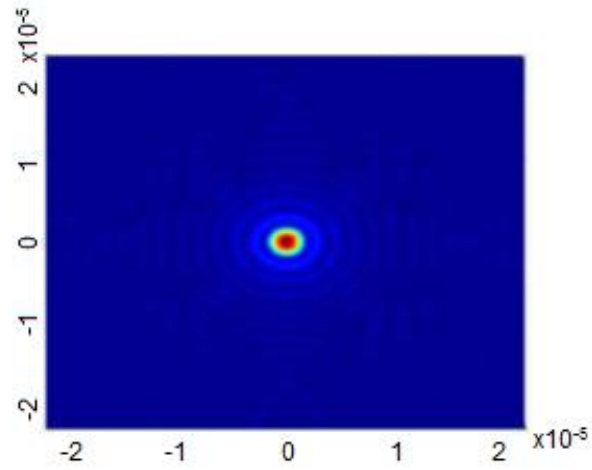


Figura 22. PSF en presencia de turbulencia débil, $D/r_0 < 5$ [Hajjarian, Fadlullah y Kavehrad, 2009].

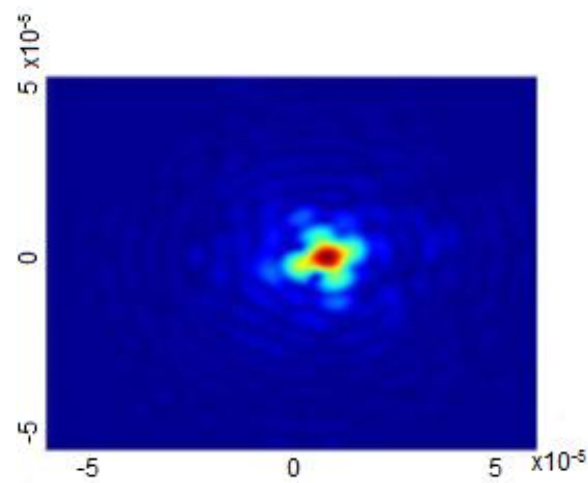


Figura 23. PSF en presencia de turbulencia media, $5 < D/r_0 < 10$ [Hajjarian, Fadlullah y Kavehrad, 2009].

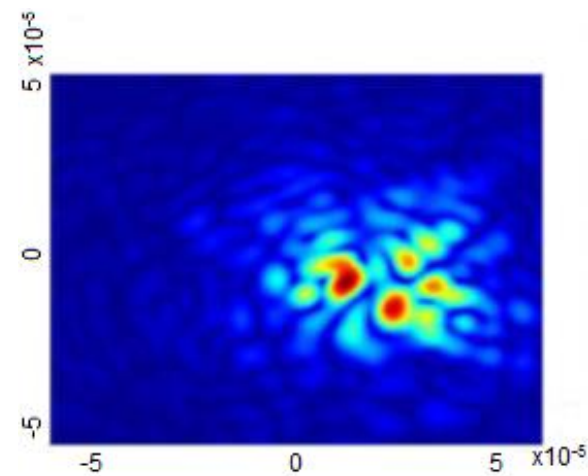


Figura 24. PSF en presencia de turbulencia fuerte, $10 < D/r_0 < 15$ [Hajjarian, Fadlullah y Kavehrad, 2009].

3.2 Presupuesto de potencia de enlaces ópticos en espacio libre.

El presupuesto de potencia para un enlace óptico en espacio libre sirve para el diseño y/o evaluación de factibilidad del mismo. En este trabajo, nos enfocaremos en la etapa de sincronización espacial mediante el uso de un faro óptico y no en el enlace de comunicaciones, sin embargo, consideramos conveniente introducir los conceptos respectivos, pues si el cálculo indica que el enlace no es factible, entonces no tendría sentido diseñar e implementar la etapa de sincronización espacial. A continuación describiremos una metodología para dichos cálculos.

El presupuesto de potencia M (dB) de un enlace óptico en espacio libre está dado por la siguiente expresión:

$$M[dB] = L_f - L_{turb} - L_{prop} - L_{poin} - L_{atm} - M_S \quad (35)$$

donde:

- L_f : Margen de desvanecimiento (dB).
- L_{turb} : Pérdidas por turbulencia (dB).
- L_{prop} : Pérdidas por propagación (dB).
- L_{poin} : Pérdidas por apuntamiento (dB).
- L_{atm} : Pérdidas atmosféricas (dB).
- M_S : Margen del sistema (dB).

Algunos de los parámetros que se consideran en el diseño del sistema son: la longitud de onda, la longitud del enlace, las dimensiones de las antenas tanto transmisoras como receptoras, la potencia de transmisión y la sensibilidad en recepción. A continuación se describen cada una de las pérdidas asociadas al presupuesto de potencia.

3.2.1 Margen por desvanecimiento.

Define las pérdidas permitidas por el sistema para llevar a cabo el enlace óptico y se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$L_f[dB] = P_{Tx} - P_{sens} \quad (36)$$

Donde P_{Tx} (dBm) y P_{sens} (dBm) corresponden a las potencias ópticas transmitida y mínima requerida en el foto receptor para asegurar un cierto valor de tasa de bit erróneo (del inglés *Bit Error Rate* o BER) respectivamente.

3.2.2 Pérdidas por propagación.

Están dadas por la siguiente expresión:

$$L_{prop}[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi Z}{\lambda} \right)^2 \quad (37)$$

Z (m) es la distancia entre el transmisor y el receptor y λ (m) es la longitud de onda del láser empleado.

3.2.3 Pérdidas por turbulencia.

Estas pérdidas toman en cuenta el efecto de la variación de la intensidad del haz láser debido a la turbulencia atmosférica (cintilación) y pueden ser obtenidas mediante:

$$L_{turb}[dB] = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\Omega_0}{\Omega_{turb}} \right)^2 \right] \quad (38)$$

donde:

$$\Omega_0 = \frac{2\lambda}{\pi D_{Lens_Tx}} \quad (39)$$

D_{Lens_Tx} (m) es el diámetro de la antena transmisora, y

$$\Omega_{turb} = \frac{\lambda}{\pi \rho_0} \quad (40)$$

ρ_0 (m) es el radio de coherencia.

3.2.4 Pérdidas por apuntamiento.

Son debidas a las fallas de alineamiento entre las antenas transmisora y receptora, lo cual conlleva a una reducción en la potencia recibida:

$$L_{pointing}[dB] = 44.3229 \left(\frac{\phi_c}{\Omega_0} \right)^2 \quad (41)$$

Donde ϕ_c (rad) es el ángulo máximo del haz transmisor limitado por difracción, y está dado por:

$$\phi_c[rads] = \frac{\lambda}{2D_{Lens_Tx}} \quad (42)$$

3.2.5 Pérdidas atmosféricas.

Describen la atenuación que sufre la luz al viajar por la atmósfera debido a la absorción y a la esparcimiento [Lambert y Casey, 1995]. La transmisión es función de la longitud

del enlace, Z , es decir, establece las pérdidas por kilómetro [dB/Km]. Esta atenuación se expresa en la ley de Beer-Lambert descrita anteriormente, tenemos así que:

$$L_{atm} = 10 \log \tau \quad (43)$$

3.2.6 Pérdidas geométricas y ganancias de antenas ópticas.

Las pérdidas por trayectoria geométrica de un enlace óptico en espacio libre dependen del ancho del haz empleado como transmisor (Figura 25), de la longitud del enlace y del tamaño de la antena receptora, se expresan mediante la siguiente ecuación:

$$L_{geo}[dB] = 20 \log \left(\frac{\theta Z}{D_{Lens_Rx}} \right) \quad (44)$$

Z (m) es la longitud del enlace, θ (rads) es el ángulo de divergencia del haz emitido y D_{Lens_Rx} (m) es el diámetro de la antena receptora.

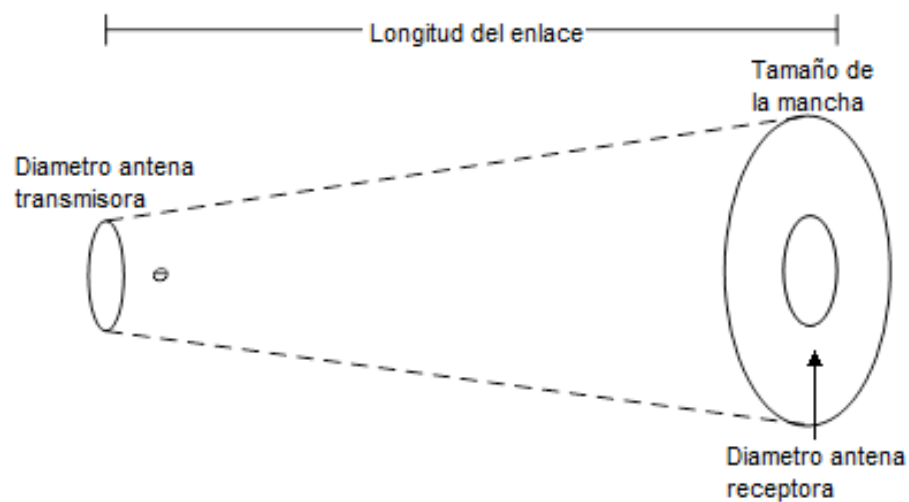


Figura 25. Pérdidas geométricas.

Las ganancias de las antenas transmisora y receptora (ganancias con respecto a una antena isotrópica) están dadas por el siguiente par de ecuaciones.

$$G_{Tx}[dBi] = 10 \log \left(\frac{2}{\Omega_0} \right)^2 \quad (45)$$

$$G_{Rx}[dBi] = 10 \log \left(\frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \right) \quad (46)$$

El área de la antena receptora está dada por la fórmula del área de un círculo $A [m^2] = \pi r^2$.

Los enlaces ópticos satelitales generalmente se auxilian del uso de un faro óptico y sistema de sincronización espacial para poder llevar a cabo una transmisión-recepción de información exitosa, ya que son sistemas altamente directivos que requieren operar en "línea de vista".

3.3 Sistemas ópticos de adquisición, apuntamiento y rastreo.

Para poder establecer un enlace de comunicaciones ópticas en espacio libre se requiere que tanto el transmisor como el receptor estén apuntados correctamente, es decir, deben estar en línea de vista, así el proceso de apuntamiento (del inglés *pointing*) es el primer paso para lograr este tipo de enlaces. A continuación, se busca que tanto el transmisor como el receptor permanezcan en línea de vista durante todo el tiempo que exista comunicación, a este proceso se le denomina seguimiento (del inglés *tracking*). Si inicialmente el transmisor y el receptor no se encuentran en línea de vista, se debe proceder a hacer un rastreo o proceso de adquisición de la señal de información o de un posible faro óptico (del inglés *acquisition*). Al sistema que realiza el proceso de sincronización espacial descrito anteriormente se le conoce comúnmente como sistema ATP.

Para este proceso se puede usar la transmisión de un haz expandido como faro o un faro independiente, en este último, el faro óptico es un láser no modulado a una longitud de

onda diferente a la del transmisor. Este se coloca en el receptor o cerca del receptor. Alternativamente, en un sistema bidireccional, cada transmisor puede servir como faro. A continuación, describiremos los conceptos relacionados con este proceso.

3.3.1 Adquisición óptica espacial.

La adquisición espacial puede ser establecida en un sentido o en doble sentido, por ejemplo, consideremos las estaciones mostradas en el diagrama (Figura 26), donde un solo transmisor envía un haz expandido como faro a un solo receptor localizado en otro punto. Si el apuntamiento es satisfactorio, el receptor sabe la dirección del transmisor con un cierto ángulo sólido incierto Ω_u definido desde la posición del receptor. El receptor entonces alineará la antena óptica hacia la señal que llega dentro de una resolución de ángulo sólido predefinido Ω_r .

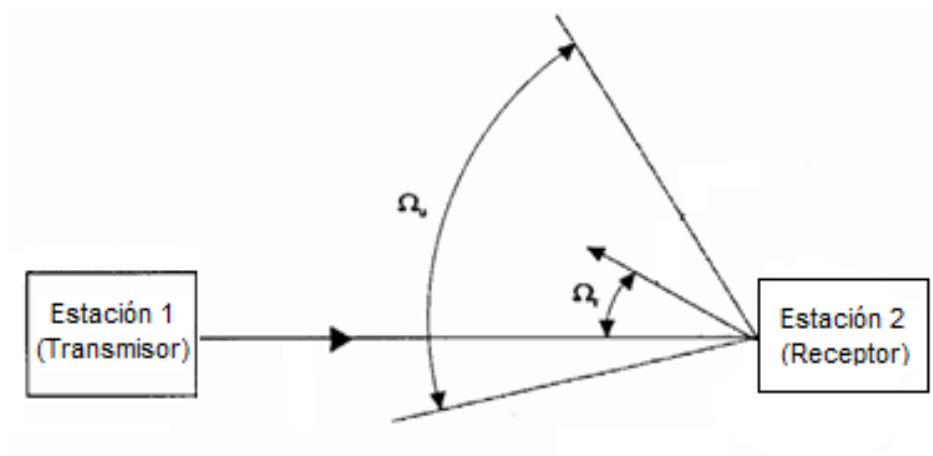


Figura 26. Adquisición óptica espacial en un sentido.

En una secuencia de adquisición de doble sentido (Figura 27), la estación transmite un haz lo suficientemente ancho (ángulo sólido Ω_{u1}) para cubrir su error de apuntamiento. La estación 2 buscará dentro de un campo de visión incierto Ω_{u2} para adquirir. Después

de una adquisición exitosa, la estación 2 transmitirá a la estación 1 con ancho de haz Ω_{r2} usando la dirección obtenida de la adquisición.

La estación 1 puede ahora adquirir el haz de retorno con su resolución deseada Ω_{r1} . Para seguir haciendo los haces más angostos, el procedimiento se repite, entonces, el enlace se establece con la resolución deseada y la comunicación puede comenzar.

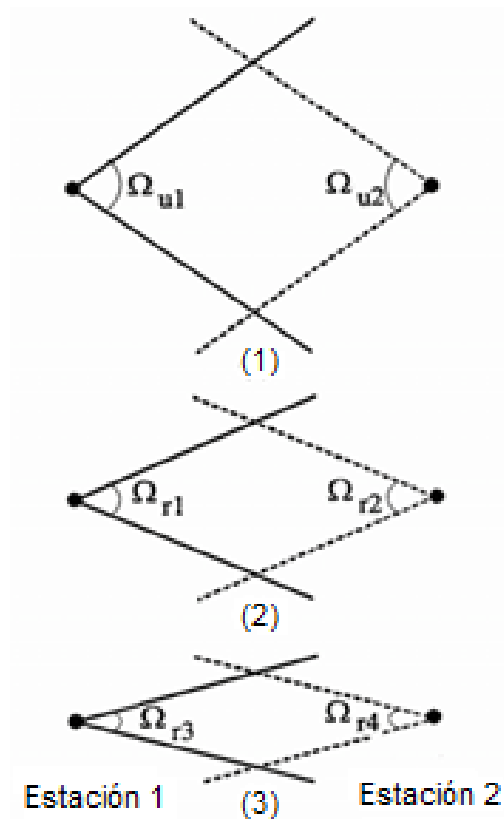


Figura 27. Adquisición óptica espacial de 2 sentidos.

Cuando se usa un faro por separado (Figura 28) para la adquisición, después de que la estación 2 adquiere el haz transmitido, envía una señal faro hacia la estación 1. La estación 1 recibe el faro y entonces transmite su haz láser modulado hacia la dirección de donde llega el faro. Para comunicaciones en dos sentidos, ambas estaciones deben tener un láser transmisor y un receptor óptico.

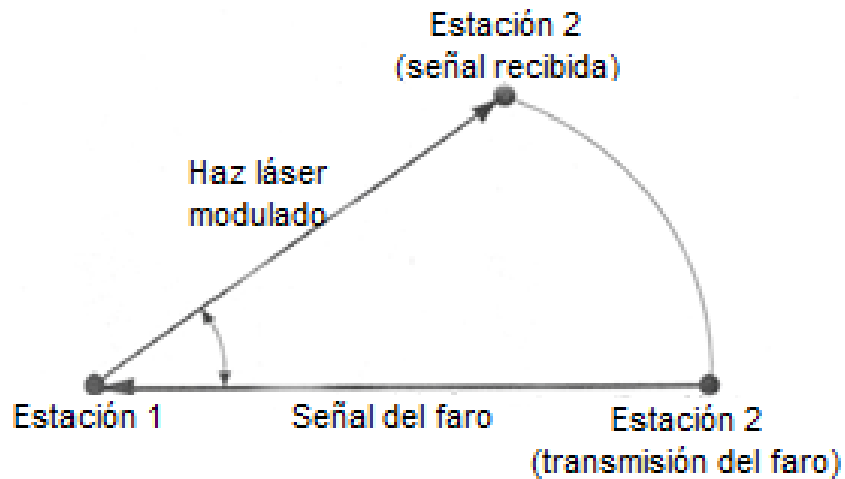


Figura 28. Secuencia de adquisición óptica espacial con un faro óptico.

3.3.2 Elementos de apuntamiento óptico.

Existen tres tipos principales de elementos de apuntamiento que se emplean en comunicaciones ópticas espaciales.

3.3.2.1 Gimbal plano.

El gimbal plano o espejo gimbal se muestra a continuación (Figura 29).

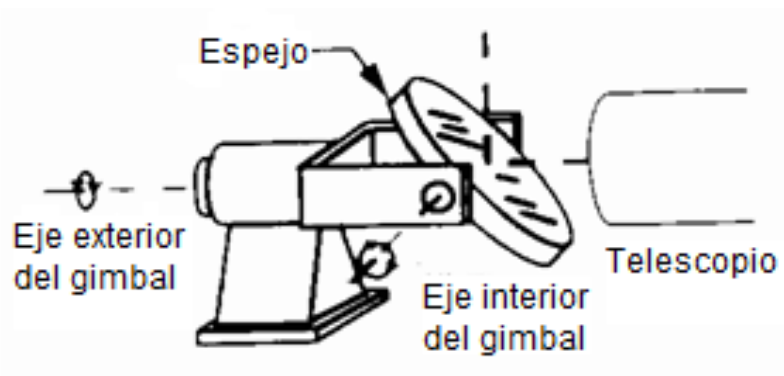


Figura 29. Gimbal plano.

Este se posiciona frente al telescopio receptor ya que el espejo plano no tiene la capacidad de recoger y enfocar la energía como el telescopio, solo puede redirigir la línea de vista. El gimbal plano ofrece la ventaja de que el telescopio y la óptica de imagen, el detector y el láser, están fijos, esto es, no se necesitan mover para alterar la línea de vista. Una de las desventajas de este dispositivo es su peso, ya que generalmente es más grande que el de otros dispositivos como el telescopio gimbal. Además el espejo debe de ser mayor que la apertura normalmente por un factor de 1.4 o mayor, dependiendo del ángulo por el cual deberá reflejar la línea de vista. Otra desventaja es que tiene un ángulo sólido limitado, considerablemente menos que un hemisferio.

3.3.2.2 Telescopio gimbal.

El telescopio gimbal (Figura 30) es la forma de elemento de apuntamiento más usado para los enlaces largos. Este también tiene el resto del sistema fijo, sin embargo, con el telescopio gimbal se mueve menos masa para redirigir la línea de vista. El ángulo sólido puede ser hemisférico o mayor.

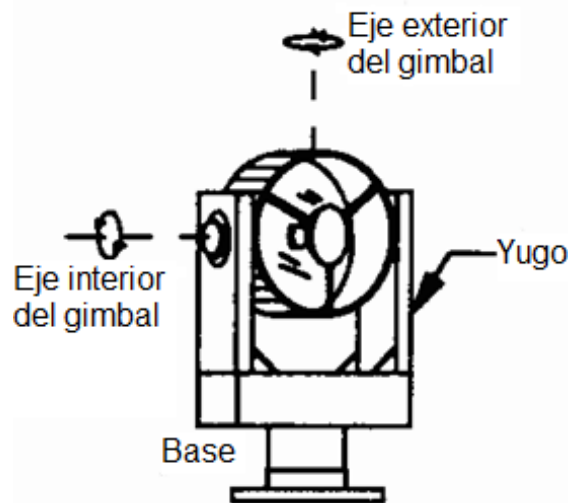


Figura 30. Telescopio gimbal.

El telescopio gimbal puede ser diseñado para ser menos pesado que el espejo gimbal ya que ninguno de sus elementos ópticos excede el tamaño de la apertura.

3.3.2.3 Paquete gimbal.

Todo el paquete gimbal (Figura 31), esto es, todos los elementos que componen el dispositivo de adquisición, apuntamiento y seguimiento se montan sobre un gimbal.

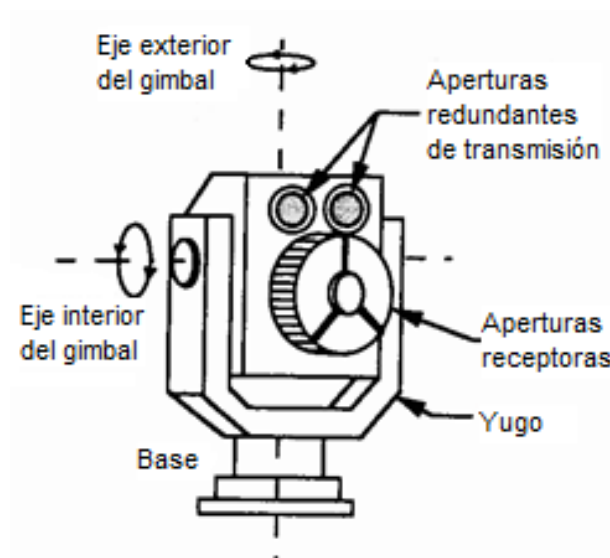


Figura 31. Paquete gimbal.

3.3.3 Rastreo.

Como se mencionó anteriormente, si inicialmente el transmisor y el receptor no se encuentran en línea de vista, se debe proceder a hacer un rastreo o proceso de adquisición de la señal de información o de un posible faro óptico.

3.3.3.1 Tipos de rastreo.

Para buscar el haz del transmisor en el canal óptico no guiado existen diferentes formas de rastreo, tales como rastreo continuo en espiral, rastreo por barrido, rastreo en espiral por pasos y rastreo segmentado.

Rastreo continuo en espiral:

El rastreo continuo en espiral (Figura 32) es la técnica más eficiente para cubrir el área de incertidumbre (área a rastrear). El ancho de la espiral está determinado por la divergencia del haz, el traslape deseado y el área de incertidumbre. Las ecuaciones para este tipo de rastreo [Lambert y Casey, 1995] son las siguientes:

$$X_s = V_r t \cos(V_\theta t) \quad (47)$$

$$Y_s = V_r t \sin(V_\theta t) \quad (48)$$

Las cuales nos representan la posición en el eje X y en el eje Y respectivamente y donde V_r es la velocidad radial V_θ es la velocidad angular y están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$V_r = \frac{R_{max}}{T_{max}} = \frac{\text{Máxima distancia radial recorrida}}{\text{Tiempo máximo}} \quad (49)$$

$$V_\theta = \frac{2\pi N}{T_{max}} = \text{Velocidad angular} \quad (50)$$

donde N es el número de anillos de la espiral.

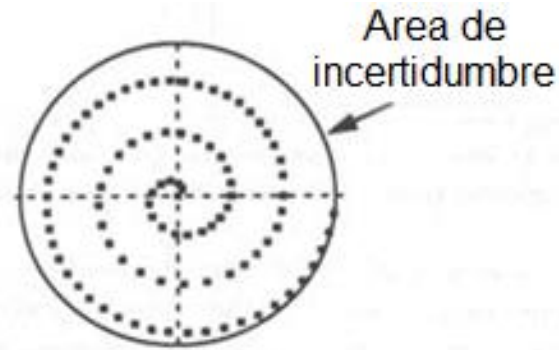


Figura 32. Rastreo continuo en espiral.

Rastreo por barrido:

El rastreo por barrido es otra técnica utilizada para rastrear el área de incertidumbre. El barrido consiste en rastrear un eje a lo largo del campo determinado para rastrear e incrementa el otro eje al final del campo. El primer eje se regresa entonces en la dirección contraria (Figura 33).

El rastreo por barrido puede ser descrito como una función que consiste de N escaneos horizontales y $N - 1$ pasos verticales, por lo tanto, es una función discontinua [Lambert y Casey, 1995]. Este tipo de rastreo es más lento y por lo cual es menos utilizado para los sistemas de comunicaciones ópticas por espacio libre.

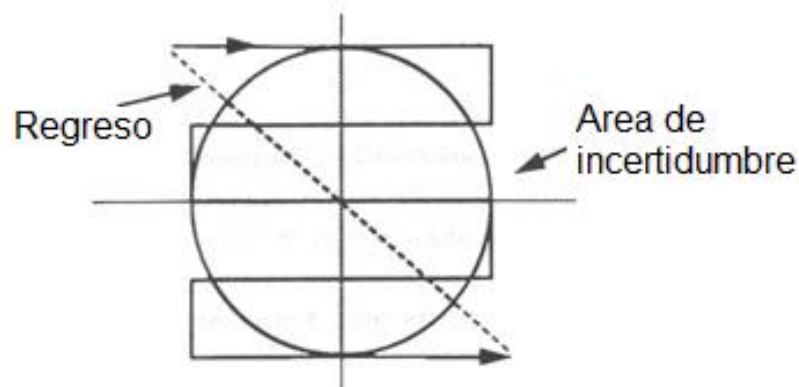


Figura 33. Rastreo por barrido.

Rastro en espiral por pasos:

Esta es una técnica que consiste en una mezcla de los rastreos por barrido y en espiral (Figura 34). El ancho de la espiral está determinado también por la divergencia del haz, los traslapes deseados y el área de incertidumbre [Lambert y Casey, 1995]. Se requiere que tenga una velocidad lineal constante e incrementar un eje cada determinada distancia.

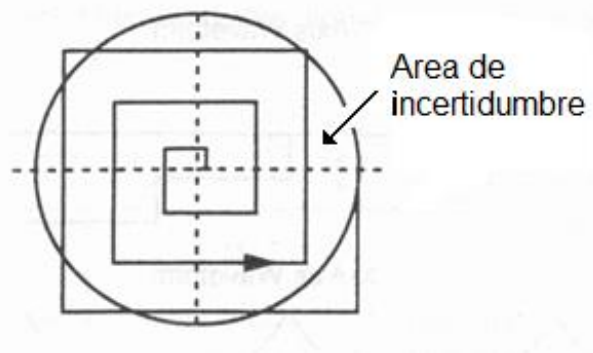


Figura 34. Rastreo en espiral por pasos.

Rastreo segmentado:

En ciertos casos, el rastreo se divide en segmentos o secciones del área de incertidumbre (Figura 35). Se rastrea primero la sección que tiene mayor probabilidad de detección espacial, la cual es el centro del detector y después las secciones de alrededor [Lambert y Casey, 1995].

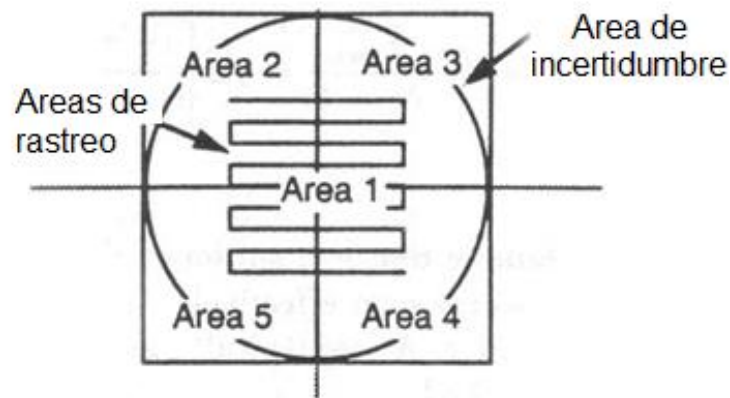


Figura 35. Rastreo segmentado.

3.3.4 Antenas ópticas.

Las antenas ópticas son elementos clave para el desempeño de los enlaces ópticos en espacio libre, pues conforman y direccionan el haz a ser radiado (antena transmisora) al espacio libre además de concentrar la energía óptica recibida (antena receptora) sobre el fotodetector.

La antena transmisora debe ser siempre diseñada lo más cercanamente posible al límite de difracción ya que esto resulta en un tamaño más pequeño de la antena. Las antenas pueden estar basadas tanto en óptica refractiva como reflectiva (Figura 36,37).

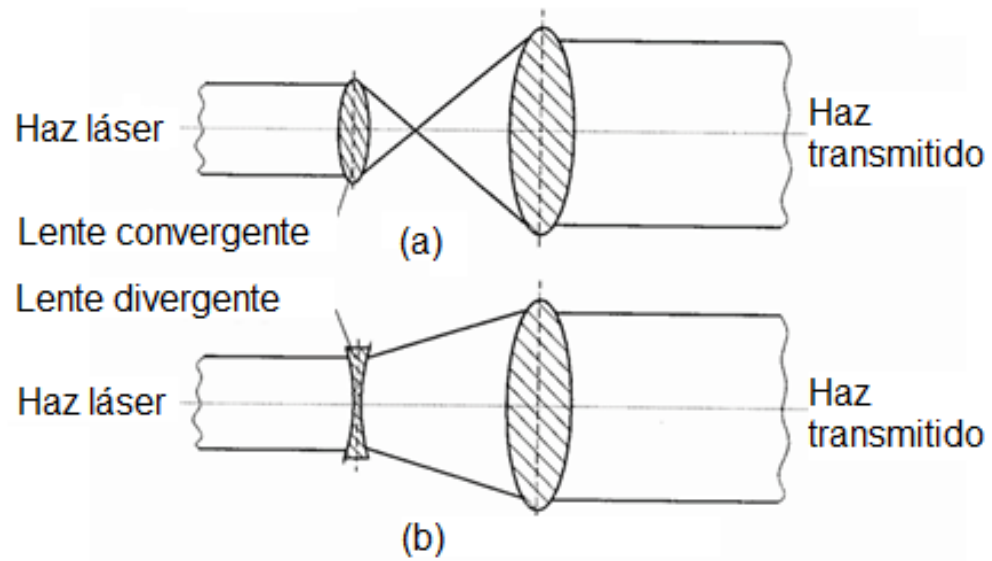


Figura 36. Antenas con óptica refractiva: a) lente convergente, b) lente divergente.

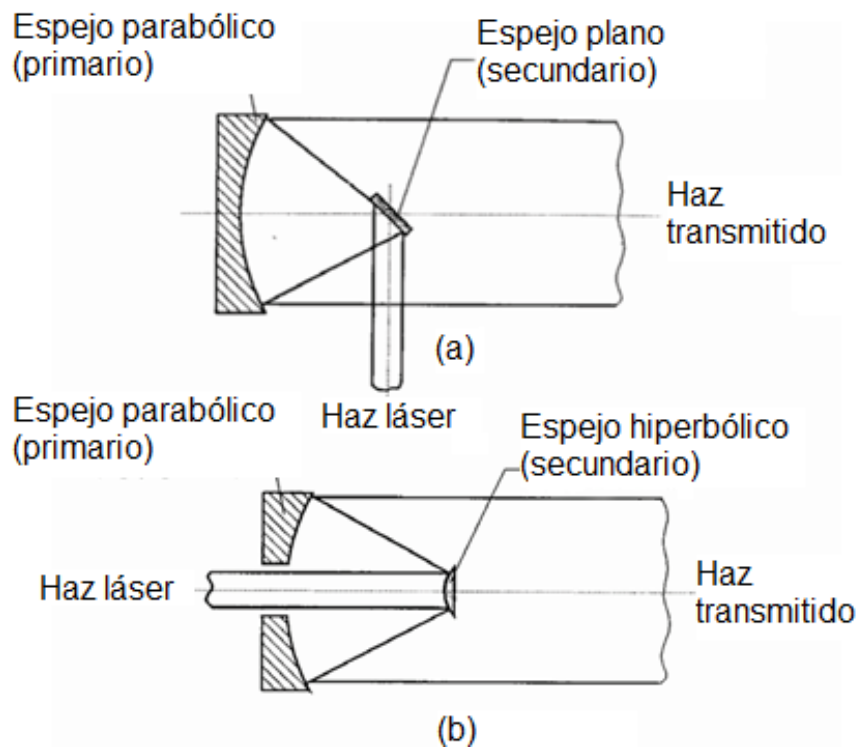


Figura 37. Antenas con óptica reflectiva: a) tipo Newton, b) tipo Schmidt-Cassegrain.

La ganancia de antena en dB para un haz limitado por difracción a longitudes de onda cortas es:

$$G_a = 20 \log\left(\frac{\pi D_a}{\lambda}\right) \quad (51)$$

En la ecuación (51), G_a es la ganancia de a antena en dB, D_a es el diámetro de la antena y λ representa la longitud de onda.

El ángulo del ancho de línea de media potencia (FWHM) del transmisor en radianes es:

$$\psi_0 = 1.03 \left(\frac{\lambda}{D_a}\right) \quad (52)$$

Ambas ecuaciones son válidas tanto para antenas de microondas como para antenas ópticas. Entre más corta sea la longitud de onda, resulta un haz más delgado, por lo tanto, una mancha más pequeña [Franz y Jain, 2000].

Una mancha pequeña de haz óptico incrementa la potencia óptica recibida por lo que mejora el desempeño del receptor. Entre más alta sea la ganancia de la antena alcanzada a la frecuencia óptica permite reducir el diámetro de la antena, incrementar tanto la razón de datos como la distancia de transmisión [Franz y Jain, 2000]. Para aperturas pequeñas, son más prácticas las lentes para formar la antena transmisora. Para aperturas grandes, es mejor usar dispositivos reflectores (espejos) por su bajo costo y peso.

La antena receptora puede ser reflectiva o refractiva (Figura 38). Esta capta la energía óptica a través de la apertura de la lente o espejo y produce un haz de diámetro tal que sea más pequeño que el área del detector, para permitir el apuntamiento del receptor y detección de la señal óptica. El fotodetector se debe colocar en el punto focal de la antena.

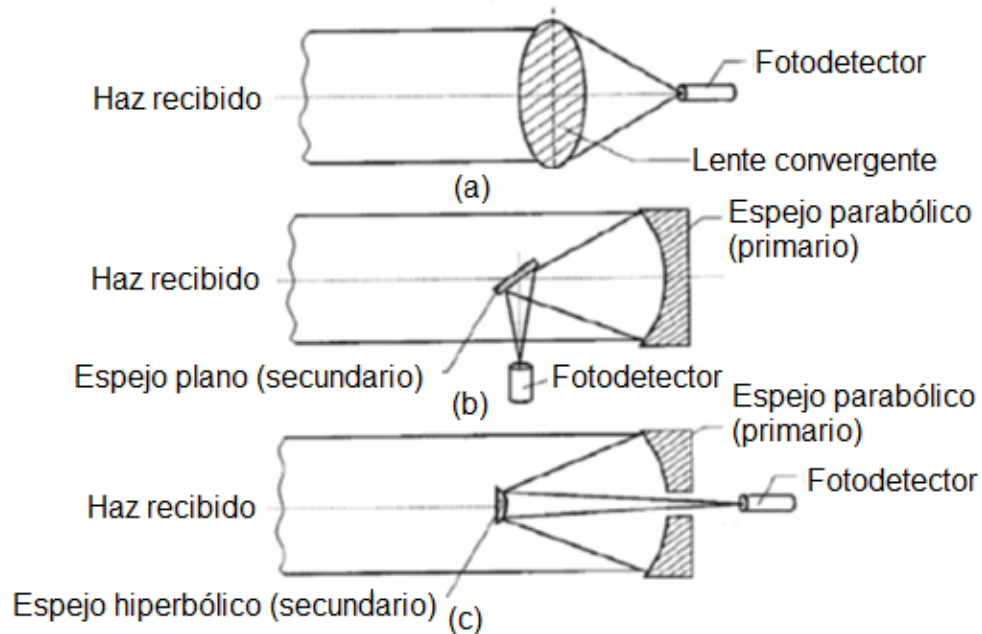


Figura 38. Antenas ópticas receptoras: a) refractiva (lentes convergentes), b) reflectiva (tipo Newton), c) reflectiva (tipo Schmidt-Cassegrain).

En detección directa, el diámetro de la antena receptora debe ser lo más grande posible para captar la máxima cantidad de energía de la señal. En detección coherente hay algunos compromisos, al aumentar la apertura, el efecto de fluctuaciones en intensidad decrece pero se incrementa la contribución a la varianza de fluctuaciones de fase. Un fotodetector responde a todas las radiaciones enfocadas sobre su superficie, entonces el campo de visión dependerá del área del detector A_d y de la distancia focal f_c , en lugar del tamaño del área A_r de las lentes receptoras. Por lo tanto, el campo de visión del sistema puede ser ajustado independientemente de A_r [Franz y Jain, 2000].

Típicamente, la distancia focal de las lentes receptoras es tomada aproximadamente como la raíz cuadrada de A_r .

$$f_c = \sqrt{A_r} \quad (53)$$

El campo de visión es entonces

$$\Omega_r = \frac{A_d}{f_c^2} \frac{A_d}{A_r} \left(\frac{A_d}{\lambda^2} \right) \left(\frac{\lambda^2}{A_r} \right) \quad (54)$$

En donde Ω_r es el campo de visión del receptor, A_d y A_r son el área del detector y el área del receptor respectivamente, f_c es la distancia focal de la lente receptora y λ es la longitud de onda.

3.3.5 Fotodetectores de cuatro cuadrantes.

Los dispositivos más comunes para detectar señales ópticas en comunicaciones son el fotodiodo QPIN (del inglés *Quadrant P region - Intrinsic region - N region*) y el QAPD (del inglés *Quadrant Avalanche Photodiode*). Para aplicaciones donde se requiere de alta ganancia, generalmente se prefiere el APD por su ganancia interna. Cuando no se requiere ganancia, se opta por un fotodiodo PIN por su alta eficiencia cuántica.

Un número importante de sistemas de comunicaciones ópticas en espacio libre cumplen con algún tipo de rastreo por cuadrante de la señal recibida, con el fin de optimizar la relación señal a ruido. Esta operación puede ser realizada empleando, por ejemplo, un detector de cuatro cuadrantes (Figura 39).

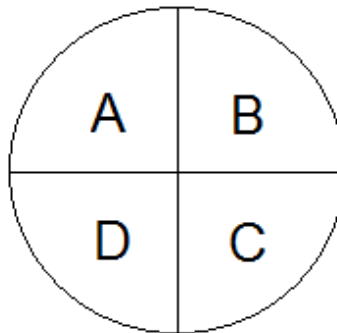


Figura 39. Esquema de fotodetector de cuatro cuadrantes.

A continuación describiremos el principio de funcionamiento de estos dispositivos. En el sentido más simple, la señal recibida es dividida en cuadrantes. La señal de los cuadrantes es entonces sumada y restada para obtener la posición de la señal rastreada en azimut y elevación, los cuales se pueden deducir con las siguientes ecuaciones:

$$Azimut = \frac{A + D - B - C}{A + B + C + D} \quad (55)$$

$$Elevación = \frac{A + B - C - D}{A + B + C + D} \quad (56)$$

Así, las señales de corriente que proveen la información sobre los parámetros de azimut y elevación pueden ser utilizadas por un sistema que ejecute las acciones de rastreo y adquisición de una señal proveniente de un faro óptico. En los capítulos subsiguientes se describe el diseño de dicho subsistema.

Capítulo 4. Componentes del Sistema de Sincronización Espacial

En este capítulo se describe el desarrollo llevado a cabo para la caracterización tanto de los elementos ópticos como electrónicos. Realizando una serie de análisis y experimentos se llevó a cabo la caracterización de los elementos ópticos a utilizar, enfocándose al estudio de las principales características que afectan el diseño del sistema de sincronización espacial (SSE). Utilizando el mismo enfoque, los elementos electrónicos se caracterizaron teniendo en cuenta qué características son las más importantes para el buen desempeño del SSE. Los experimentos y resultados de estas actividades se detallan a continuación.

4.1 Elementos electrónicos.

En esta sección se detalla la caracterización de los elementos ópticos del SSE. Para la propuesta de un sistema de sincronización espacial determinamos la conveniencia del uso de un QPIN como elemento detector y un módulo de adquisición de datos.

El propósito de esta sección fue el de caracterizar en voltaje y potencia el QPIN así como en cada una de sus 4 secciones de detección. Las salidas de este QPIN son empleadas para establecer la posición del punto láser.

4.1.1 Detector de cuatro cuadrantes.

Existen diferentes alternativas en cuanto a fotodetectores para comunicaciones de espacio libre se refiere. Las opciones más utilizadas son los APD y los PIN. En comunicaciones ópticas de espacio libre donde se hace uso de detección directa el dispositivo más usado es el APD mientras que para aplicaciones que emplean detección coherente se utiliza el PIN.

Los PIN presentan las mismas cualidades que los APD a excepción de que la ganancia de avalancha no está presente en estos dispositivos. Aunque los detectores PIN no tienen ganancia como los APD, en aplicaciones con detección coherente la ganancia está dada en el oscilador local del receptor y con esto se vuelven una alternativa menos costosa que además no necesita de altos niveles de voltaje como los APD. Dado lo anterior se eligió un PIN como elemento detector del SSE.

Para detectar el haz láser (faro óptico) la señal óptica incidente se divide en cada cuadrante, esto con el objetivo de obtener la posición del haz láser en azimut y elevación de acuerdo a las ecuaciones (55) y (56).

En particular, se eligió al fotodiodo PIN de 4 cuadrantes (QPIN) modelo QP50-6-18u-SD2 debido a sus características ópticas y eléctricas, adecuadas para el presente trabajo, así como a la disponibilidad del mismo. Este dispositivo es un arreglo de 4 fotodiodos PIN (Figura 40) y se encuentra montado en una tarjeta la cual contiene la circuitería necesaria para convertir las señales, que entrega el QPIN, de corriente a voltaje y entregar las señales de diferencia entre los diferentes cuadrantes del QPIN (B-T, L-R), así como de la suma de los mismos (SUM). Las señales de voltaje que entrega este detector son proporcionales a la intensidad luminosa censada por el arreglo de fotodiodos.

Los voltajes de salida se obtienen convirtiendo la corriente de cada sección del QPIN a voltaje, se utilizan amplificadores operacionales de transimpedancia para llevar a cabo esto.

$$V_{B-T} = [(I_{3,4}) - (I_{1,2})] * (10^4) \quad (57)$$

$$V_{L-R} = [(I_{2,3}) - (I_{1,4})] * (10^4) \quad (58)$$

$$V_{SUM} = [(I_{1,2,3,4})] * (10^4) \quad (59)$$

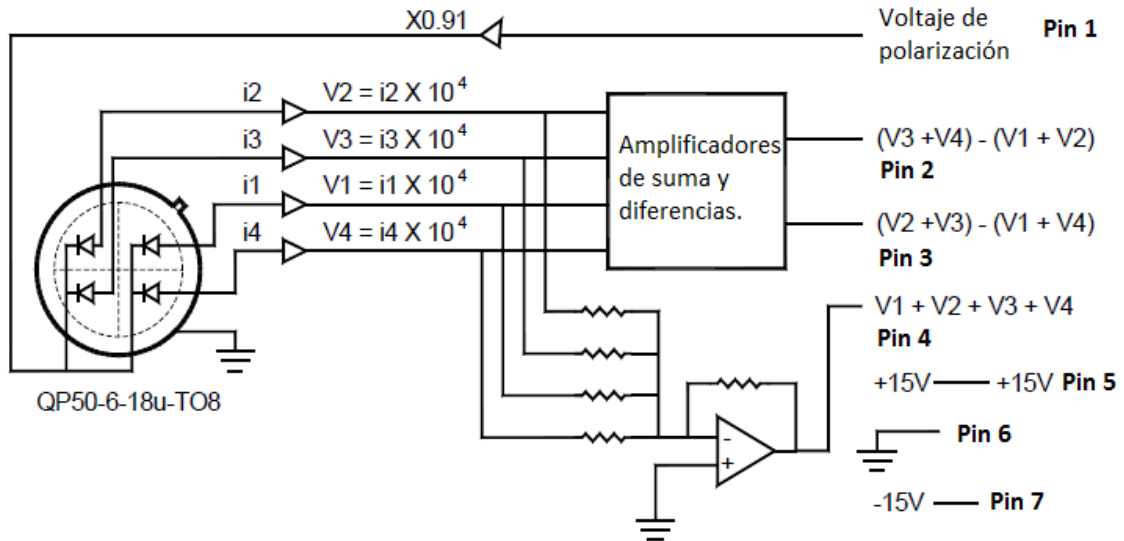


Figura 60. Diagrama de la tarjeta del QPIN.

Dado que el diámetro del área activa del QPIN es de 7.8 mm, se debe asegurar que el haz láser enfocado en el dispositivo sea menor al diámetro del QPIN para que el punto se localice dentro de esta región.

Se observó una disminución en la intensidad de las señales cuando el punto pasa por la región no activa (gap) del QPIN. Esta región, con una anchura de $18 \mu\text{m}$, es la separación que existe entre cuadrantes.

El efecto de la disminución de la intensidad es más pronunciado a medida que el diámetro del punto disminuye, ya que un gran porcentaje de la luz del punto cae dentro de la región no activa del QPIN. El diámetro mínimo del punto debe ser de 1 mm.

Para asegurar que el punto captado está centrado en el QPIN primero se necesita obtener el máximo valor posible de la señal SUM, después el detector se ajusta hasta que las señales L-R y B-T estén al mínimo. Con este procedimiento se asegura que el punto está en el centro del QPIN.

Las señales encargadas de reportar el error en la posición del haz incidente (faro óptico o señal de comunicación) se describen a continuación (Tabla 3), siendo así utilizadas por

el sistema que mantendrán en correcta posición al QPIN. La tarjeta del QPIN se muestra en la imagen siguiente (Figura 41)

Tabla 3. Código de colores de las señales de la tarjeta del QPIN.

Pin conector DB9	Color cable	Señal
1	X	X
2	X	X
3	Verde	PD Bias
4	Azul	V(B-T)
5	Blanco	V(L-R)
6	Negro	V(SUM)
7	Rojo	V+
8	Gris	GND
9	Naranja	V-

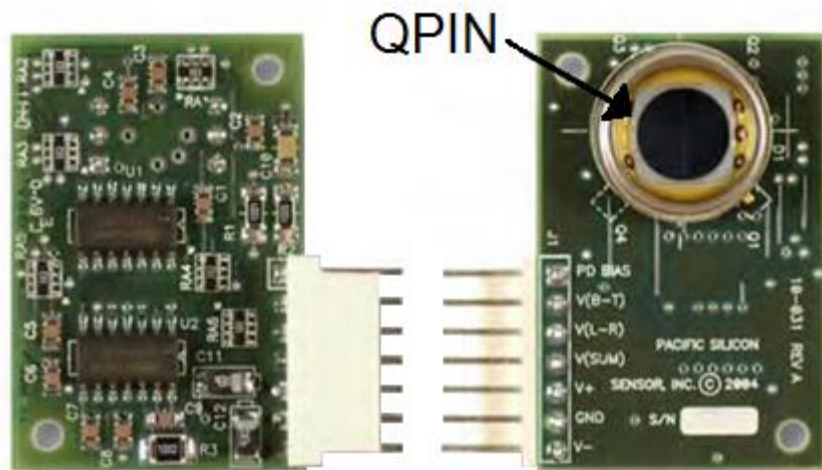


Figura 41. Detector QPIN.

Para realizar el análisis de potencia-voltaje del QPIN se le hizo incidir un haz láser colimado a su área activa y se tomaron mediciones de la potencia del láser y el voltaje entregado por cada sección del QPIN. Como el láser utilizado para este experimento es demasiado potente (200 mW) y su longitud de onda, 830 nm, esta es una a la cual el QPIN tiene una responsividad elevada. Se utilizaron un divisor de haz (*beam splitter*) y atenuadores de espacio libre para llegar a un nivel de potencia adecuado (Figura 42, 43).

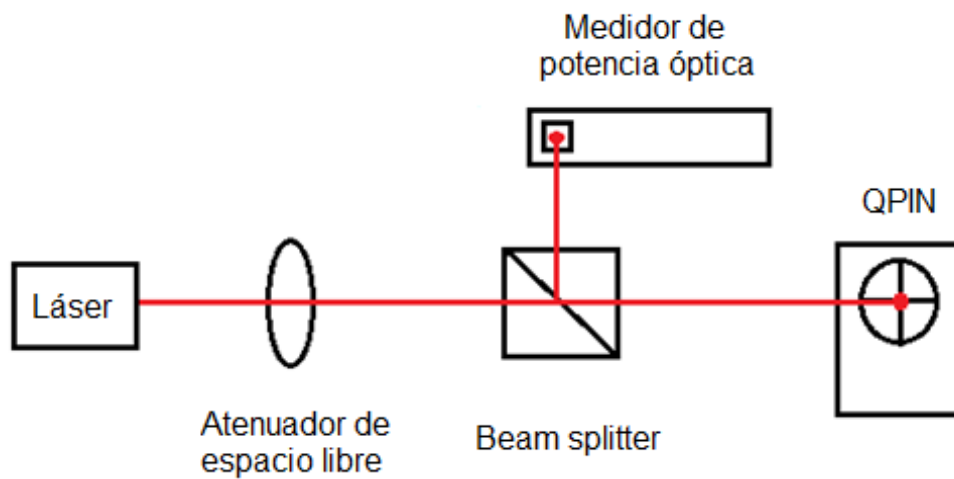


Figura 42. Diagrama experimental para caracterización del QPIN.

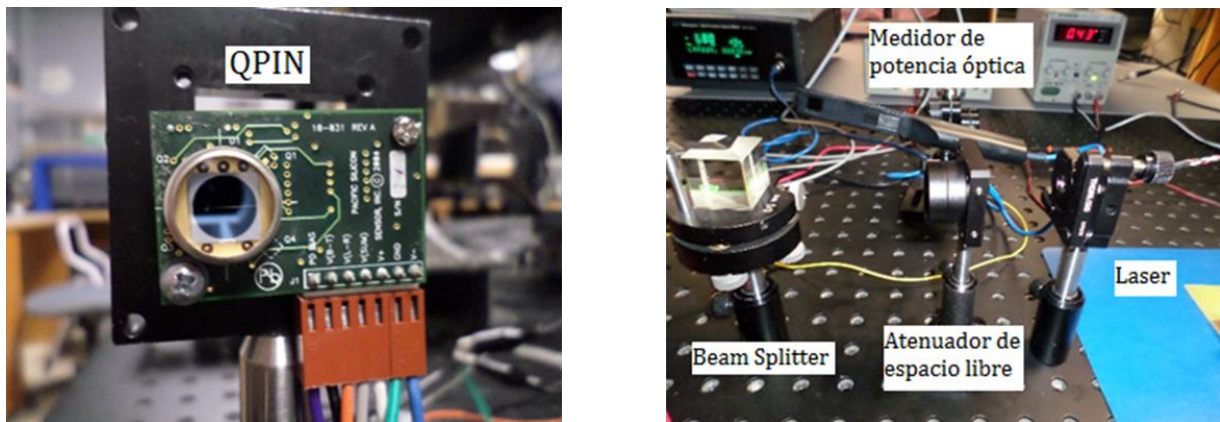


Figura 43. Esquema experimental para caracterización del QPIN.

Se hizo incidir el láser en una sección del QPIN variando su potencia hasta llegar a un valor máximo de voltaje (10 v), a partir de este punto se fue disminuyendo la potencia del láser para lograr decrementos de 0.5 V y para cada decremento se registró la potencia del láser a ese valor; se realizó este procedimiento para cada sección del QPIN (Figura 44).

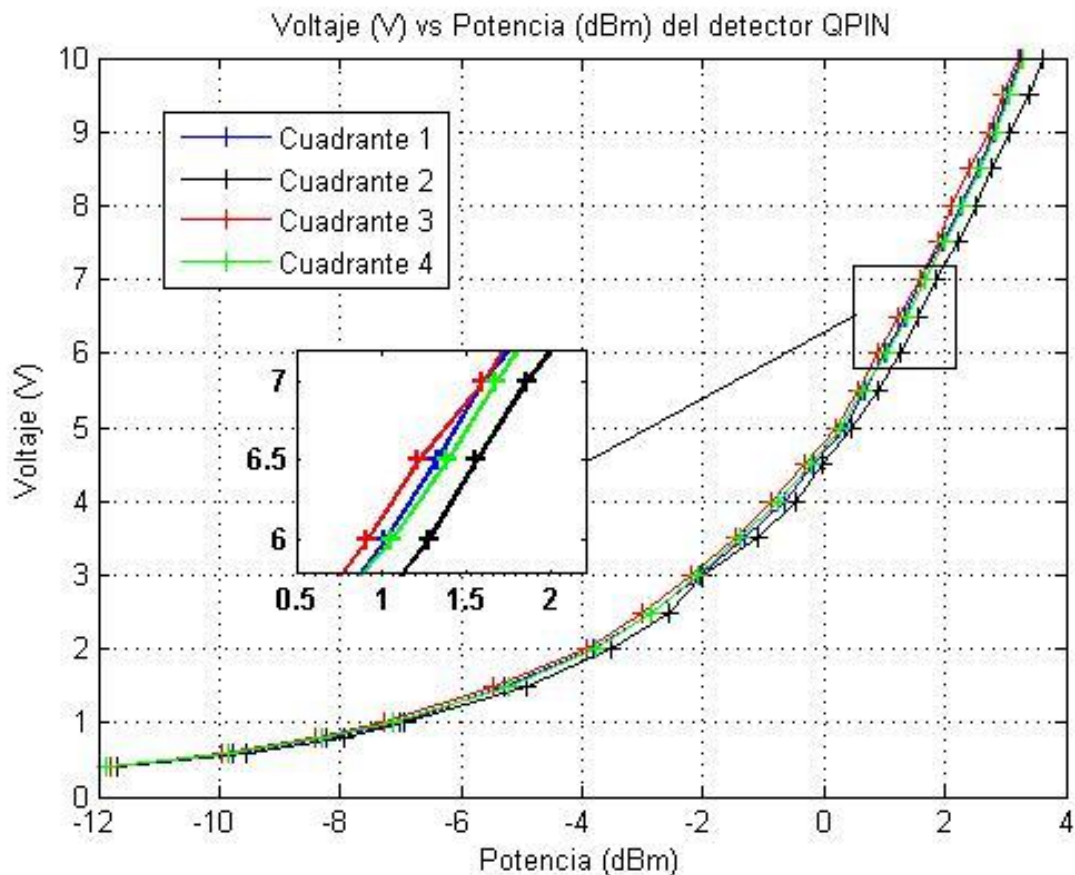


Figura 44. Gráfica de Voltaje (V) vs Potencia (dBm) en el QPIN.

En la gráfica anterior se aprecia que cada una de las cuatro secciones del QPIN se comportan de manera muy similar, con esto queda asegurado un comportamiento del QPIN sin variaciones.

4.1.2. Adquisición y despliegue de datos.

La digitalización de las señales provenientes de la tarjeta del QPIN se lleva a cabo con el módulo digitalizador KEITHLEY KUSB 3100 que genera las señales a ser procesadas en una computadora (Figura 45).



Figura 45. Módulo de adquisición de datos KEITHLEY KUSB 3100.

Se obtienen 3 señales que se utilizan en las ecuaciones (55) y (56) y mediante el uso de un programa de Matlab llamado *posición.m*, se obtienen los valores en X y Y de la posición del punto en el área activa del QPIN. Este programa se encarga de inicializar la tarjeta, obtener los valores de la posición del punto y desplegar en pantalla un gráfico que dibuje el punto en la posición actual (Figura 46).

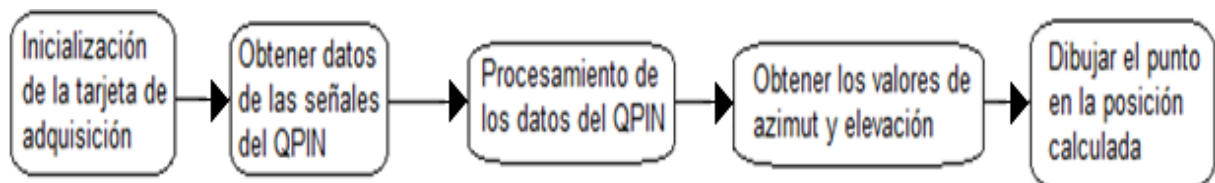


Figura 46. Diagrama de flujo del programa *posición.m*

4.2 Elementos ópticos.

Como es común en los subsistemas de sincronización espacial (ATP) es necesario utilizar elementos ópticos para captar la luz del faro óptico y del haz de telecomunicaciones.

Se utilizó una lente plano-convexa como elemento para captar la luz y un par de telescopios astronómicos para la realización de diversas pruebas de laboratorio a lo largo del desarrollo del trabajo de tesis.

4.2.1 Lente.

La principal función de este elemento óptico es coleccionar la mayor cantidad de luz posible del haz óptico y enfocarla hacia el fotodetector. Se utilizó la lente plano-convexa LA1401 de THORLABS pues sus características las consideramos convenientes para nuestro sistema. Las características de esta lente son listadas en la tabla siguiente (Tabla 4), el diagrama esquemático se muestra enseguida (Figura 47).

Tabla 4. Características de la lente plano-convexa.

Característica	Valor
Material.	BK7
Diámetro.	50 mm
Distancia focal.	59.8 mm \pm 1 %
Distancia focal posterior.	49.1 mm.
Long. de onda de diseño.	587.6 nm.
Apertura.	> 90%
Centración.	< 3 arcmin.

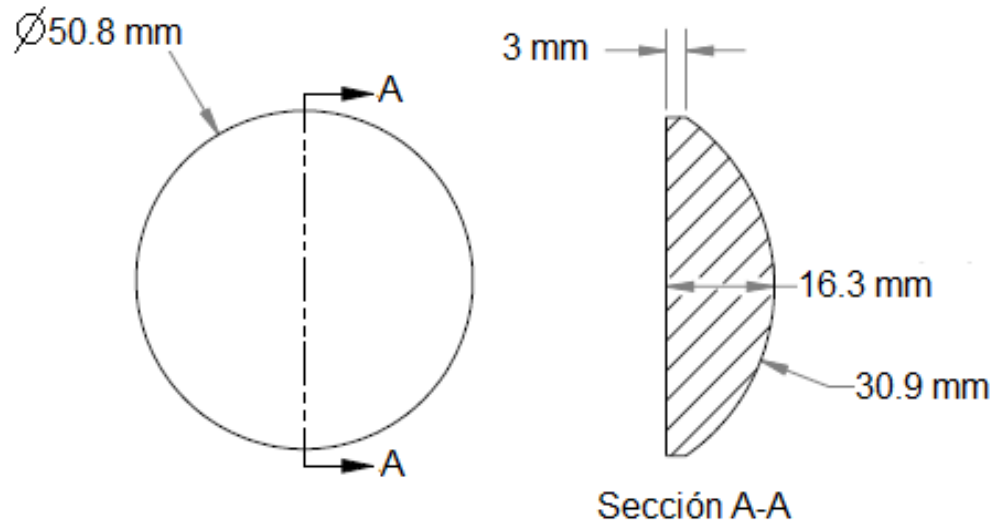


Figura 47. Diagrama esquemático de la lente plana convexa.

Como se muestra en la tabla anterior el fabricante de la lente proporciona una distancia focal ya establecida, para fines de construcción y diseño del prototipo gimbal es necesario saber desde que plano se determinaron esos valores, por esto se realizó la prueba de Ronchi a la lente para determinar su distancia focal medida desde su cara posterior (cara plana) (Figura 48).

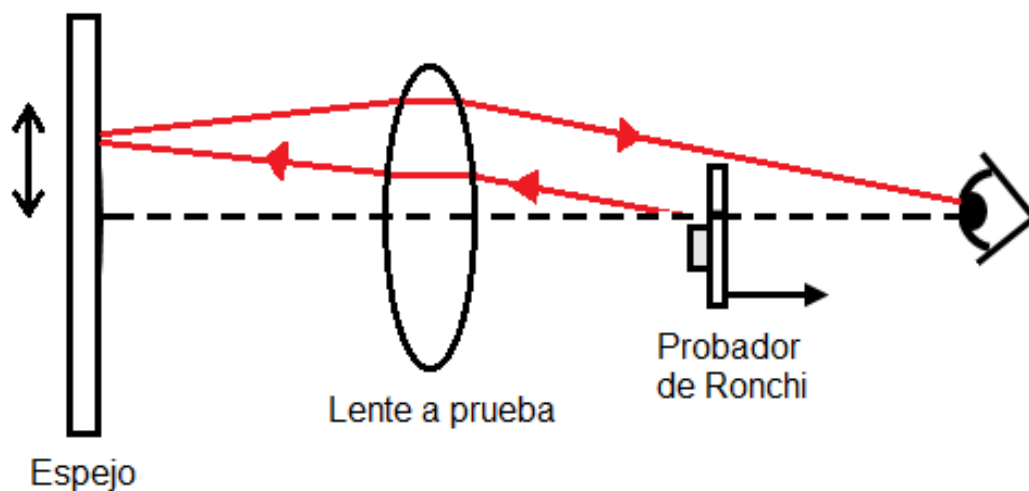


Figura 48. Diagrama de prueba de Ronchi para lentes.

A partir de la realización de esta prueba se determinó que la distancia focal de la lente medida desde su cara posterior es de 43 mm.

El número F, que es la relación entre la longitud focal y el diámetro, de esta lente es pequeño, lo que quiere decir que este elemento enfoca la luz “rápidamente”. Esta característica indica un compromiso entre la rapidez del sistema y su capacidad de enfocar la luz.

Para números F pequeños, variaciones de la posición de la lente cuando se encuentra enfocando la luz así como cambios en el ángulo de incidencia de la luz hacia la lente producirán desplazamientos pequeños de la posición donde se forma la imagen (lugar donde se enfoca la luz) (Figura 49).

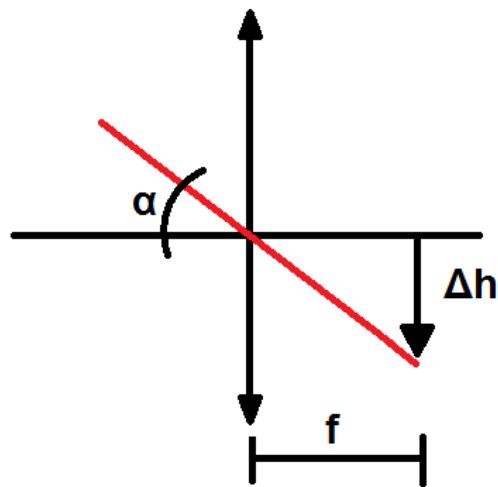


Figura 49. Desplazamiento de la posición de la imagen/foco.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta h}{f} \right) \rightarrow \Delta h = f * (\tan \alpha) \quad (60)$$

donde:

Δh : Desplazamiento de la imagen (mm).

f : Distancia focal de la lente (mm).

α : Ángulo de incidencia del haz láser ($^{\circ}$).

Dada la formulación anterior se realizó una tabla comparativa en la cual se observa el desplazamiento que tiene el punto en el plano imagen para diferentes ángulos de incidencia y para diferentes lentes comerciales todas con el mismo diámetro que la lente elegida (Tabla 5).

Tabla 5. Desplazamiento de la imagen vs ángulo de incidencia en lentes comerciales.

Lentes comerciales						D = 50 mm			
f (mm)	50	75	100	125	150	175	200	250	500
F/#	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5	10
Ángulo ($^{\circ}$)	Desplazamiento (mm)								
0.25	0.218	0.327	0.436	0.545	0.655	0.764	0.873	1.091	2.182
0.50	0.436	0.655	0.873	1.091	1.309	1.527	1.745	2.182	4.363
0.75	0.655	0.982	1.309	1.636	1.964	2.291	2.618	3.273	6.545
1.00	0.873	1.309	1.746	2.182	2.618	3.055	3.491	4.364	8.728
1.25	1.091	1.637	2.182	2.728	3.273	3.819	4.364	5.455	10.910
1.50	1.309	1.964	2.619	3.273	3.928	4.583	5.237	6.546	13.093
1.75	1.528	2.291	3.055	3.819	4.583	5.347	6.111	7.638	15.276
2.00	1.746	2.619	3.492	4.365	5.238	6.111	6.984	8.730	17.460
2.25	1.965	2.947	3.929	4.911	5.894	6.876	7.858	9.823	19.645
2.50	2.183	3.275	4.366	5.458	6.549	7.641	8.732	10.915	21.830
2.75	2.402	3.603	4.803	6.004	7.205	8.406	9.607	12.008	24.017
3.00	2.620	3.931	5.241	6.551	7.861	9.171	10.482	13.102	26.204
3.25	2.839	4.259	5.678	7.098	8.518	9.937	11.357	14.196	28.392
3.50	3.058	4.587	6.116	7.645	9.174	10.703	12.233	15.291	30.581
3.75	3.277	4.916	6.554	8.193	9.832	11.470	13.109	16.386	32.772

4.00	3.496	5.245	6.993	8.741	10.489	12.237	13.985	17.482	34.963
4.25	3.716	5.573	7.431	9.289	11.147	13.005	14.863	18.578	37.156
4.50	3.935	5.903	7.870	9.838	11.805	13.773	15.740	19.675	39.351
4.75	4.155	6.232	8.309	10.387	12.464	14.541	16.619	20.773	41.547
5.00	4.374	6.562	8.749	10.936	13.123	15.311	17.498	21.872	43.744

La tabla anterior expone el comportamiento del desplazamiento del punto en el plano imagen para diferentes números F. Se puede apreciar que a medida que aumenta el número F los desplazamientos del punto en el plano imagen son cada vez más grandes.

Las casillas sombreadas de la tabla 5 indican los valores a los cuales el haz de luz captado por la lente ya no es enfocado en el área activa del detector QPIN, debido a esta característica se tendrá un campo de visión (del inglés *Field Of View* o FOV) cada vez menor.

Así pues bajo la condición anterior se determinó cual sería el FOV máximo que se tendrá debido al diámetro del área activa del detector y la distancia focal de la lente planoconvexa (Figura 50).

$$\alpha_{MAX} = \tan^{-1} \frac{r}{f}$$

$$\alpha_{MAX} = \tan^{-1} \frac{3.9}{43} \quad (61)$$

$$\alpha_{MAX} = 5.1824$$

donde:

r: Radio de la región activa del QPIN (mm).

f : Distancia focal medida desde la cara posterior (mm).

α_{MAX} : Ángulo máximo de incidencia del haz láser (°).

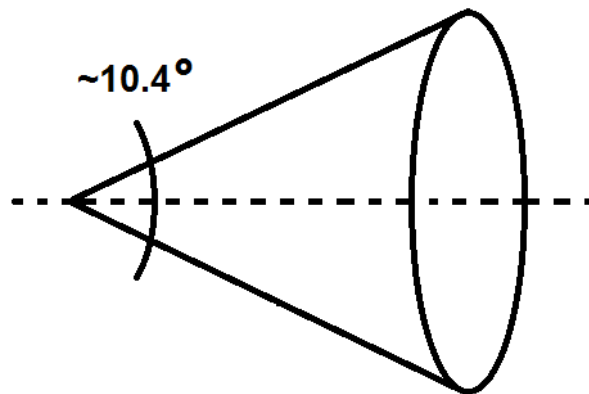


Figura 50. FOV teórico del SSE.

Es importante destacar que este valor del FOV determina el movimiento que debe tener el gimbal en el cual se acopla tanto el detector como la lente. Con este resultado se puede hacer una estimación de que tanta libertad angular tendrá el gimbal del SSE a la hora de realizar la secuencia de rastreo y seguimiento.

4.2.2 Cámara CCD.

Fue necesario utilizar una cámara CCD (del inglés *Charge-Coupled Device*) para la realización de las diferentes pruebas llevadas a cabo. Se utilizó la cámara Prosilica GC 650 con las características apropiadas para aplicaciones en las cuales se requiere velocidad y excelente calidad de imagen (Figura 51).

Esta cámara se utiliza en los experimentos, detallados en el capítulo siguiente, en los cuales se hace un análisis del tamaño de la mancha (punto), capacidad de enfoque del sistema y las afectaciones que sufre el haz láser a su paso por el aire libre. Sus características se especifican en la tabla siguiente (Tabla 6).

Tabla 6. Especificaciones de la cámara Prosilica GC 650.

Especificación	Valor
Interfaz	IEE 802.3 1000baseT
Resolución	659 x 493 px.
Sensor	CCD Progresivo
Tamaño del pixel	7.4 μm
ADC	12 bit



Figura 51. Cámara Prosilica GC 650.

Otra característica importante es la escala de placa. Este aspecto es significativo ya que permite analizar el tamaño de la imagen (punto enfocado por la lente) y el efecto que tiene la turbulencia en ella. Por ello es necesario calcular la escala de placa que tiene el sistema óptico formado por la lente y la cámara, la E_p de este sistema es de 79.94 $'/\text{mm}$ o lo que es igual a 35.5 $''/\text{pixel}$.

$$E_p = \frac{206265 [']}{f[\text{mm}]} = \frac{206265 [']}{43 [\text{mm}]} = 79.94 [']/\text{mm} \quad (62)$$

si cada pixel del CCD mide 7.4 μm entonces tenemos:

$$Ep(\text{pixel}) = 79.94 \text{ [\'/mm]} * .0074[\text{mm/pixel}] = 0.5916[\text{\'/pixel}]$$

$$0.5916[\text{\'/pixel}] * 60 = 35.5[\text{''/pixel}]$$
(63)

4.2.3 Telescopios.

Para la realización de este trabajo de investigación se utilizaron dos telescopios astronómicos de la marca MEADE® modelo LX200®-ACF (Figura 52). Fue necesario caracterizarlos para lograr establecer un panorama de las capacidades de estos instrumentos (Tabla 7).

Tabla 7. Características de los telescopios MEADE® modelo LX200®-ACF.

Características
D: 355.6 mm
F: 3556 mm
F/10
Catadióptrico
Contraste ultra alto
Multi capa



Figura 52. Telescopio astronómico MEADE® LX200®-ACF.

4.2.3.1 Comparación con telescopios del OAN.

El Observatorio Astronómico Nacional es operado por el Instituto de Astronomía de la UNAM y su propósito es hacer observaciones astronómicas para hacer investigación de la más alta calidad. Para esto, pone los telescopios con los que cuenta al servicio de astrónomos profesionales, no sólo del Instituto de Astronomía de la UNAM, sino de todas las instituciones tanto nacionales como internacionales donde se haga investigación astronómica de frontera.

Las principales características de estos telescopios pueden compararse de mejor manera si se utilizan otros telescopios como marco de referencia. El Observatorio Astronómico Nacional (OAN) cuenta actualmente con tres telescopios cuyos diámetros son 2.1 m, 1.5 m, 0.84 m, los cuales operan en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California.

Realizando los cálculos para obtener el diámetro, distancia focal, número F, escala de placa y límite de difracción de cada telescopio se elaboró la siguiente tabla (Tabla 8).

Tabla 8. Comparación con telescopios de SPM.

D (mm)	F (mm)	F/#	Ep ("/mm)	Detector 1 (")	Detector 2 (")	Θ_D (")	Planetas
840	12557	14.95	16.43	6.73	8.41	0.165	Todos menos Sol y Luna
1500	19575	13.05	10.54	4.32	5.40	0.092	Todos menos Sol y Luna
2108	15824	7.51	13.03	5.34	6.67	0.066	Todos menos Sol y Luna
2108	28816.8	13.67	7.16	2.93	3.66	0.066	Todos menos Sol y Luna
2108	63460	30.10	3.25	1.33	1.66	0.066	Todos menos Sol y Luna
355.6	3556	10.00	58.00			0.389	

De ésta tabla podemos decir que mientras más grande sea la apertura del sistema óptico, en este caso, el diámetro del telescopio, mayor cantidad de luz será colectada; de acuerdo con la tabla en este caso será con el telescopio de 2.1m con el que se colecta más luz.

El otro parámetro importante es la escala de placa (Ep), que como se ha discutido en el capítulo del marco teórico esta depende de la distancia focal efectiva del telescopio, este parámetro es muy importante ya que conociendo el tamaño del detector (que será usado para formar la imagen) es posible determinar el campo de visión óptico del telescopio. Entonces la Ep determina el tamaño que se verá el objeto en el telescopio

4.2.3.2 Estrella artificial.

Para poder caracterizar y realizar pruebas al subsistema de sincronización espacial (SSE) se utilizó el concepto de estrella artificial utilizado comúnmente en astronomía. Esta técnica es de importancia para el proceso de alineación del satélite con la estación terrena ya que todas las antenas ópticas (telescopios) usados en el enlace serán comprobados (antes que el satélite sea lanzado) enfocándolos al infinito, en donde el telescopio MEADE de 14" será utilizado como estación óptica terrena.

La comprobación en tierra del SSE se estableció mediante el uso de una estrella artificial generada en laboratorio, lo cual representa una importante alternativa para caracterizar sistemas ópticos [Malacara y Welford, 2007] y es de gran ayuda para optimizar el desempeño de sistemas ópticos, desde los más sencillos que cuentan con un solo elemento óptico hasta sistemas mucho más complejos como lo son los telescopio astronómicos.

En nuestro caso esta técnica facilita el comprobar nuestros sistemas ópticos, ya que es posible enfocar ambas antenas ópticas (transmisor y receptor) sin la necesidad de lanzar un satélite.

En instrumentación astronómica una estrella artificial se construye utilizando una fuente de luz blanca, un sistema formador de imagen, un orificio muy pequeño (*pinhole*) y un filtro [Malacara y Welford, 2007]. Para este caso utilizamos un láser como fuente de luz, esto nos permite no tener que utilizar un filtro debido a que la emisión láser es monocromática. En vez de utilizar un *pinhole* se utiliza fibra óptica y como elemento formador de imagen se utiliza un telescopio.

Para realizar la caracterización de un enlace horizontal de espacio libre es necesario simular que se cuenta con un faro óptico (láser) situado a la distancia de un enlace óptico de espacio libre satelital (por ejemplo, los satélites de órbita baja, orbitan normalmente a una distancia de 640 km a 3000 km de la superficie terrestre). Para llevar a cabo la calibración usando la técnica de estrella artificial se utilizan los dos telescopios MEADE, con estos telescopios se produce un haz colimado con un diámetro de 14" que está enfocado a infinito, de esta manera se puede observar una estrella en el laboratorio de la misma manera en la que se observaría en el cielo.

Lo primero que se realiza es enfocar un objeto en el infinito (mirar una estrella o planeta). Un primer telescopio se utiliza para captar un objeto en el infinito. Se hace uso de la cámara CCD Prosilica para captar las imágenes del objeto. La finalidad de esta etapa es dejar calibrado este primer telescopio para que cuando se tenga un frente de onda plano incidente se forme imagen en el plano focal del telescopio en el cual se encuentra la cámara CCD Prosilica (Figura 53).

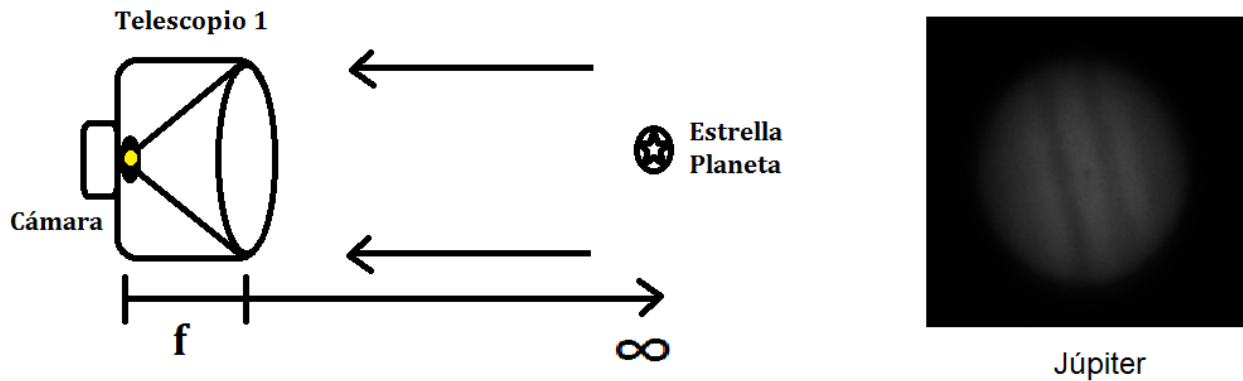


Figura 53. Primera etapa para obtener una estrella artificial.

Al mirar con este primer telescopio un objeto que se encuentra en el infinito se asegura que el telescopio formará una imagen cuando se tenga un frente de onda plano (fuente puntual en el infinito).

La segunda etapa para generar una estrella artificial en laboratorio implica utilizar un segundo telescopio al cual se le acopla una fuente de luz láser (faro óptico). En nuestro caso la fuente de luz que se le acopla al telescopio en cuestión es un láser confinado en una fibra óptica. Un extremo de la fibra óptica es colocado en el plano focal del segundo telescopio, al estar colocada la fuente de luz a la distancia focal del dispositivo se genera un haz colimado (Figura 54).

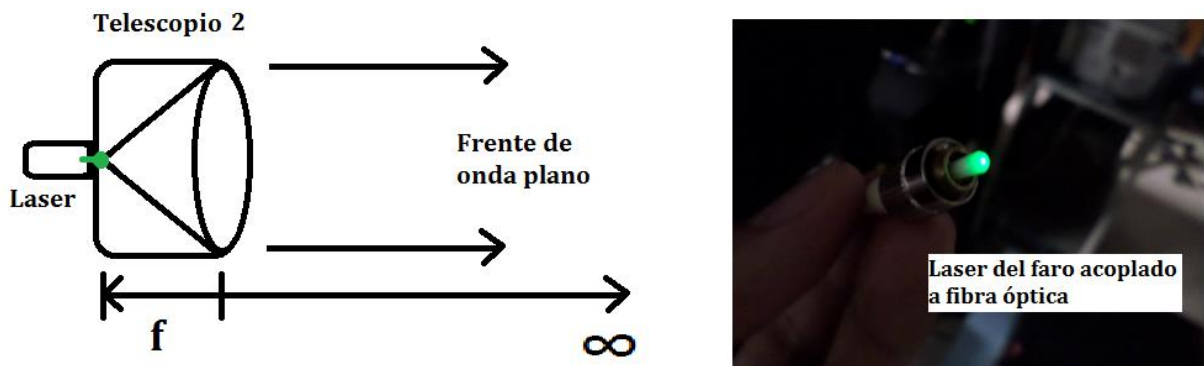


Figura 54. Segunda etapa para obtener una estrella artificial.

Lo siguiente es colocar los dos telescopios frente a frente (mismo eje óptico) esto se realiza mediante la correcta alineación de uno con respecto al otro. Lo que se pretende es que una vez que ambos telescopios comparten el mismo eje óptico, en el telescopio 1 se vea la imagen de la fuente láser del telescopio 2.

Para asegurar que se tiene un haz colimado en el telescopio 2 es necesario ajustar la distancia focal de este. Visualizando en una computadora la imagen que se forma en la cámara del telescopio 1 se procede a ajustar la distancia focal del telescopio 2, una vez que se tiene imagen en la cámara del telescopio 1 se tiene un haz colimado (Figura 55).

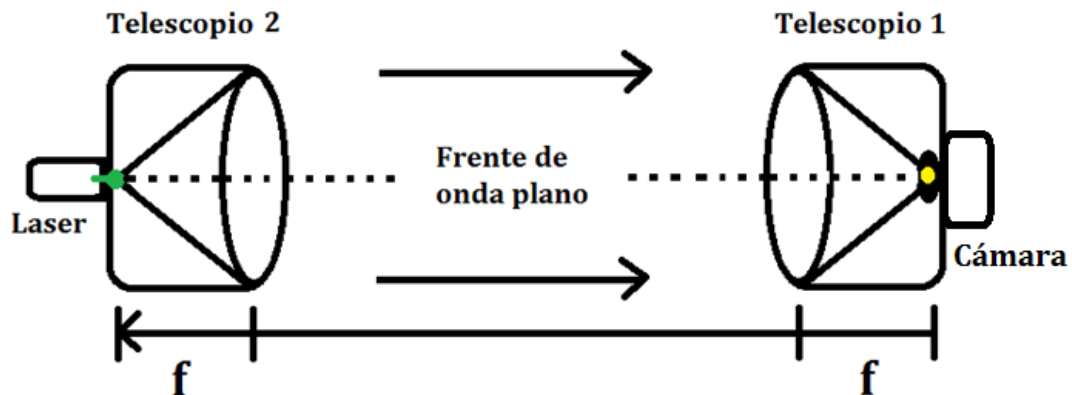


Figura 55. Diagrama experimental realizado para obtener una estrella artificial.

Dado que el telescopio 1 está enfocado para ver una estrella (enfocado a infinito), se asegura que se tiene un haz colimado que sale del telescopio 2 cuando en el telescopio 1 se forma una imagen en su plano imagen. Esto quiere decir que el haz que sale del telescopio 2 (telescopio con fibra) está colimado cuando se forma una imagen en el telescopio 1 (telescopio con cámara) y por lo tanto el telescopio 2 pasa a ser la estrella artificial. A continuación se muestra la realización en el laboratorio del experimento de la estrella artificial (Figura 56).

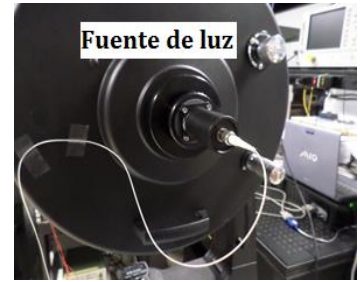
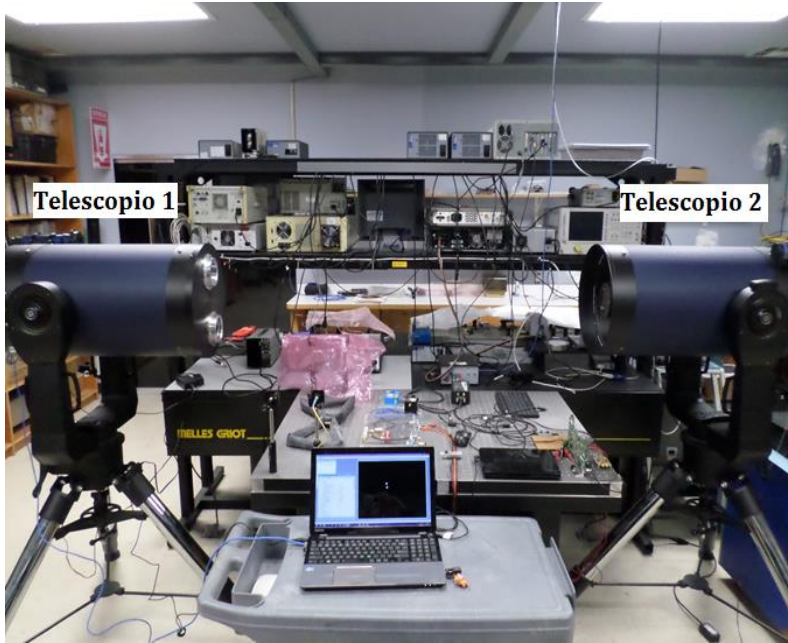


Figura 56. Estrella artificial en el laboratorio.

Capítulo 5. Diseño e Implementación del SSE

5.1 Introducción.

El objetivo de este capítulo es el de describir el diseño del SSE y su implementación en laboratorio. En este sentido utilizando la caracterización llevada a cabo en el capítulo anterior se reúnen los aspectos que definen las características y el funcionamiento del SSE.

Primeramente se presentan las bases en las cuales se fundamenta el diseño de la montura de precisión gimbal en el cual van acoplados el detector y la lente. A continuación se describe el diseño y construcción de la montura de precisión gimbal, en esta sección se detallan sus características principales. Por último se llevan a cabo la caracterización del SSE y las pruebas experimentales para validar dicho sistema.

El SSE se implementó en base al siguiente diagrama (Figura 57). En él se definen los componentes involucrados y el papel que desempeñan en el SSE. El sistema tiene como función captar un haz de luz láser y utilizar un fotodetector para establecer la posición del punto enfocado por la lente.

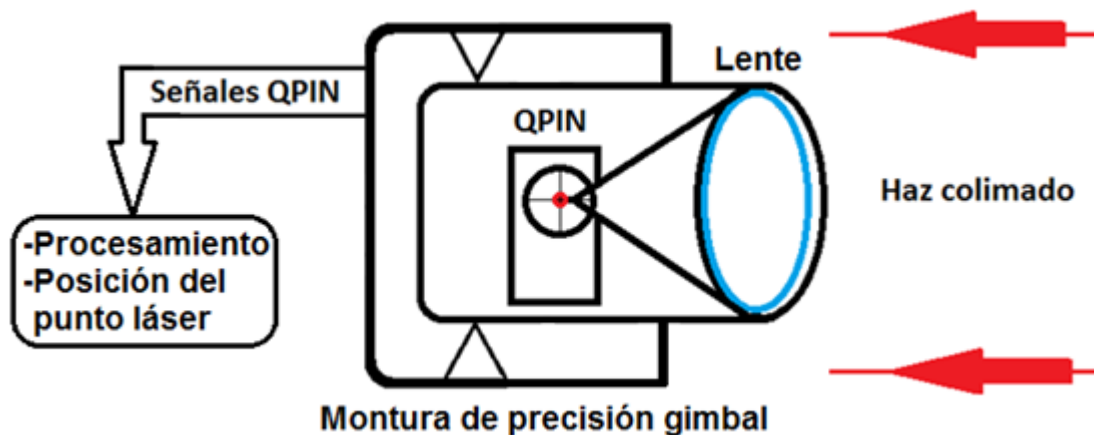


Figura 57. Diagrama esquemático del SSE.

En términos generales el SSE funciona de la siguiente manera: la lente capta la luz del haz óptico, el fotodetector QPIN transforma la energía óptica en señales eléctricas las cuales son utilizadas para determinar la posición del punto enfocado por la lente, las señales del QPIN son adquiridas utilizando una tarjeta de adquisición de datos la cual por último se conecta a una computadora en la que se realiza el cálculo de la posición del punto y se despliega en pantalla un gráfico donde se dibuja el área del detector y la posición en la que se encuentra el punto.

5.2 Funcionamiento de la montura de precisión gimbal para el SSE.

Un sistema espacial de comunicaciones ópticas de espacio libre debe ser capaz de realizar el apuntamiento, la adquisición y el rastreo del haz óptico de una manera rápida y precisa. La comunicación en espacio libre depende de sistemas opto mecánicos para realizar varias de sus funciones [Lambert y Casey, 1995]. El apuntamiento se realiza gracias a la utilización de elementos de apuntamiento conocidos como gimbals.

Se eligió utilizar una montura de precisión gimbal en el que irán acoplados los elementos ópticos, mecánicos y electrónicos. A partir de la caracterización de los diferentes elementos del SSE realizada en el capítulo anterior es posible delimitar los requerimientos que definieron el diseño de la montura de precisión gimbal para el SSE propuesto (Tabla 9).

Tabla 9. Requerimientos de la montura de precisión gimbal para el SSE.

Requerimiento	Valor
FOV	$\geq 10.4^\circ$
Material	Aluminio.
Montura	Compatible con mesas ópticas.

El proceso de diseño y construcción consideró que el prototipo de paquete gimbal presentara la facilidad de empotrarse en bases o mesas flotadas, necesarias para la realización de los experimentos, que sea ligero y de un tamaño pequeño. Siguiendo la información proporcionada en la tabla 9 se estableció un panorama de las características y dimensiones mínimas que debe tener la montura de precisión gimbal del SSE.

A partir de un modelo en 3D se construyó el prototipo de la montura de precisión gimbal (Figura 58). Fue construido de manera que el movimiento de búsqueda pueda ser ejecutado de manera manual y también de manera automática, aunque la realización de este trabajo no contempla una etapa de automatización de la montura de precisión gimbal.

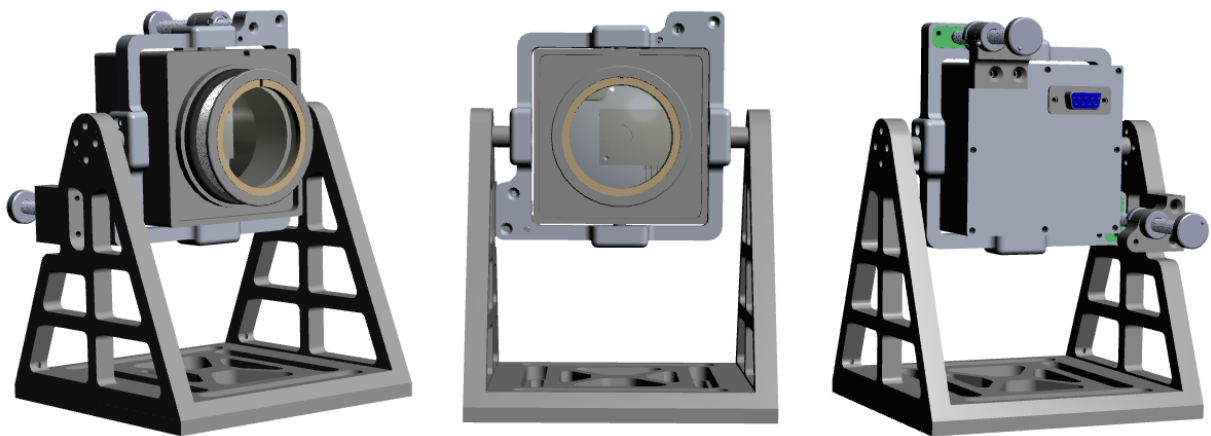


Figura 58. Modelo 3D de la montura de precisión gimbal.

La montura de precisión gimbal cuenta con varios elementos los cuales cumplen funciones específicas, a continuación se detalla el funcionamiento de cada elemento de la montura de precisión gimbal. El cuerpo principal de la montura de precisión gimbal es una caja cuadrada con una tapa trasera desmontable, dentro de la caja, en la tapa trasera, va montado el fotodetector QPIN, cuenta con un conector DB9 hembra para los cables de las señales del QPIN.

Las medidas de esta caja tienen el suficiente espacio para dar margen a la distancia focal establecida anteriormente. La tarjeta del detector QPIN es colocada en la tapa trasera de manera que el área activa del QPIN quede justo en el centro geométrico de la misma (Figura 59).

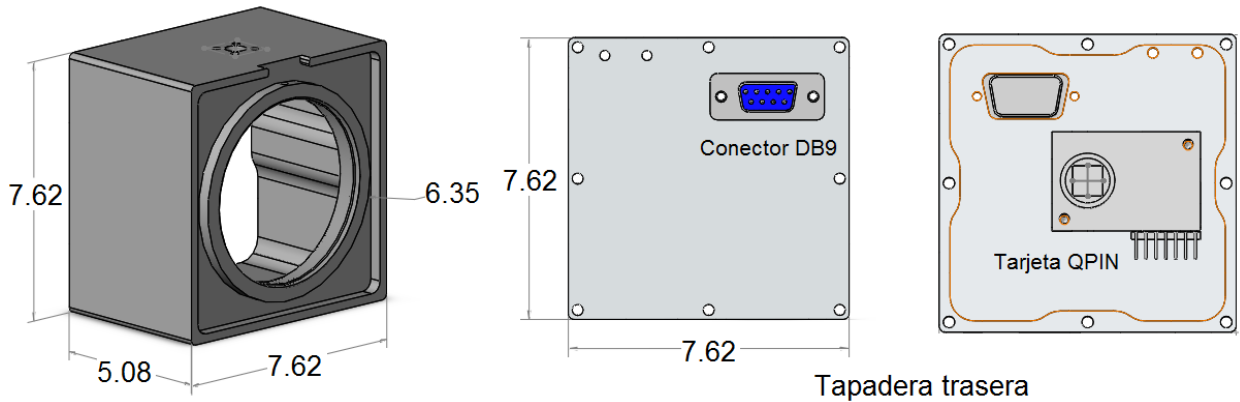


Figura 59. Caja de la montura de precisión gimbal (cm).

Esta caja cuenta además con un orificio circular roscado en su cara anterior. En esta parte de la caja va un tubo roscado en el cual se acopla la lente y el seguro de la lente, además de hacer uso de una segunda rosca para asegurar esta pieza a la caja. Este componente tiene la función de ajustar la distancia a la cual se encuentra la lente del detector, para así asegurar que esta sea colocada a la distancia requerida para enfocar la luz (formar imagen) sobre el área activa del detector QPIN (Figura 60).



Figura 60. Tapadera-rosca de la montura de precisión gimbal.

Para dotar al paquete gimbal de rotación con respecto a los ejes X y Y se utilizan 2 micrómetros los cuales trabajan en conjunto con un sistema “cargado” (se utilizan resortes para mantener la caja siempre en una posición inicial). Al girar los micrómetros estos se mueven a lo largo del eje Z con un movimiento lineal empujando a la caja en sentido contrario en el que se encontraba cargada, los micrómetros hacen contacto en dos pequeñas placas de acero inoxidable para evitar el desgaste. Un micrómetro se utiliza para mover la caja con respecto al eje X y el otro se utiliza para moverla con respecto al eje Y (Figura 61). El movimiento de rotación en estos ejes permite realizar la búsqueda del faro óptico.

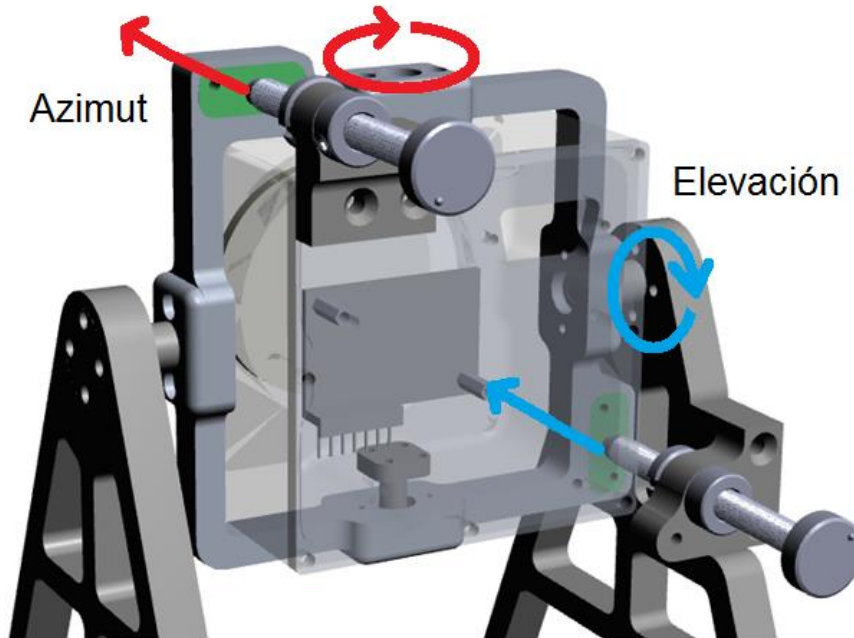


Figura 61. Movimiento de la caja de la montura de precisión gimbal.

Al girar los micrómetros se lleva a cabo el movimiento de búsqueda del gimbal. Los micrómetros utilizados proporcionan un movimiento lineal de 1/80 de pulgada equivalente a 0.3175 mm lineales por cada vuelta realizada. La caja se mueve utilizando rodamientos en los 4 puntos de apoyo de cada eje (2 en el eje X y 2 en el eje Y)

Para convertir el movimiento lineal de los micrómetros en desplazamiento angular en el eje X y Y respectivamente, se tiene que al realizar 1 vuelta del micrómetro la caja del gimbal gira 0.545° en el eje correspondiente (Figura 62).

$$1 \text{ vuelta} = \frac{1}{80} \text{ pulgada} = 0.3175 \text{ mm}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{a}{c}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.3175 \text{ [mm]}}{33.35 \text{ [mm]}}\right) \quad (64)$$

$$\alpha = 0.545^\circ$$

donde:

α = Ángulo de giro.

a = Desplazamiento lineal por 1 vuelta de micrómetro.

c = Distancia desde el eje de giro hasta punto de contacto del micrómetro.

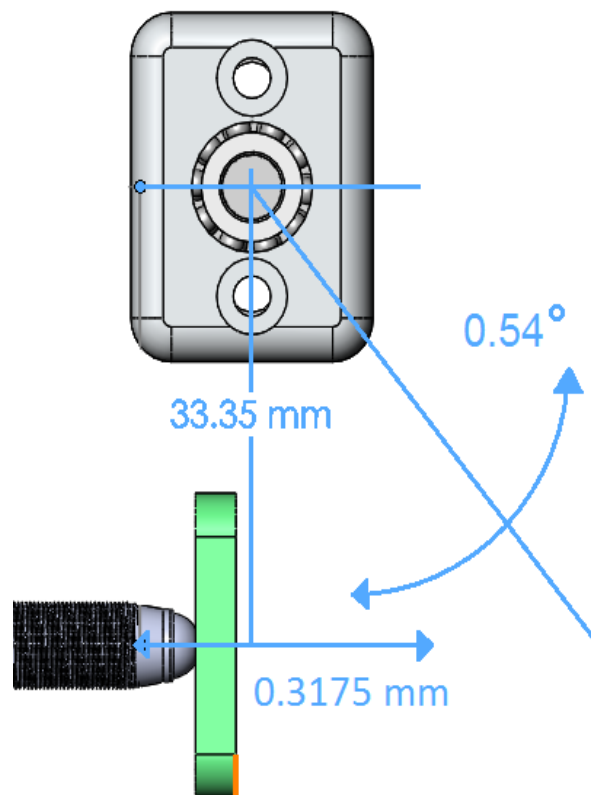


Figura 62. Detalle del movimiento de la montura de precisión gímbal.

El diseño y construcción del prototipo contempló el FOV que debe tener la montura de precisión gímbal, por lo que el prototipo se construyó de manera que cuenta con un FOV más grande, esto es, de 6° en cada eje.

Se muestra una imagen del prototipo final de la montura de precisión gímbal con la tarjeta del QPIN acoplada a la tapa trasera (Figura 63)

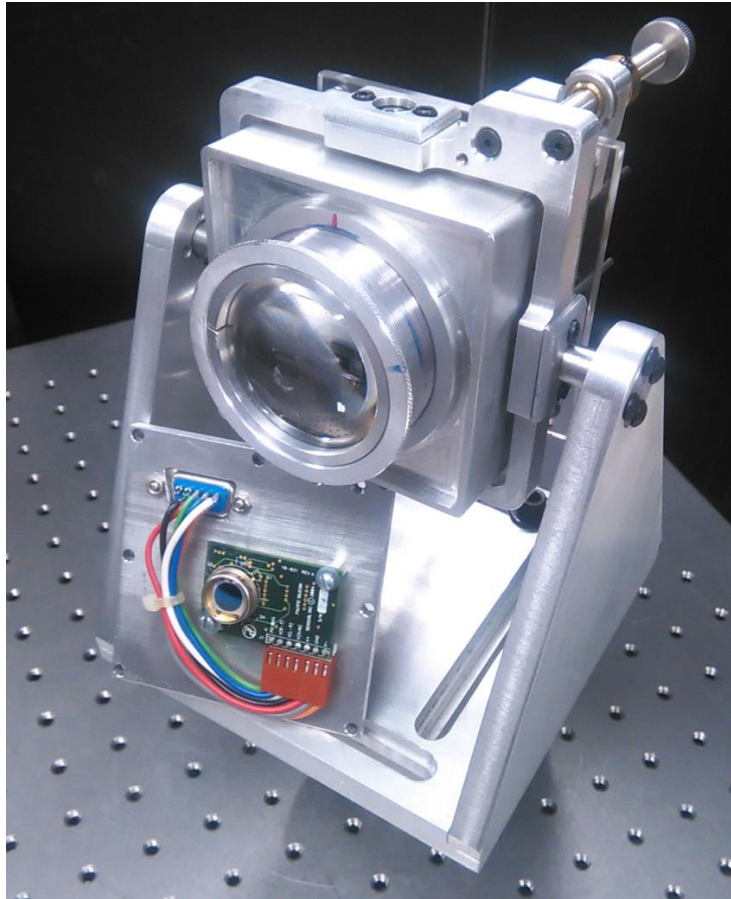


Figura 63.Fotografía de la montura de precisión gimbal.

Como resumen a este apartado el gimbal del SSE está compuesto por: una montura de precisión gimbal con FOV de 12° de movimiento manual, un fotodetector QPIN y una lente para enfocar la luz hacia el QPIN.

5.3 Caracterización del SSE.

La siguiente sección trata sobre la caracterización del SSE, esta se dividió en dos secciones principales. Una primera sección se enfoca en explicar las pruebas experimentales llevadas a cabo dentro del laboratorio mientras que en una segunda sección se detalla las pruebas realizadas en campo. Así mismo en una última sección se analizan los resultados obtenidos en las secciones anteriores.

Una de las características más importantes a estudiar fue el tamaño de la imagen formada en el plano focal de la lente la cual está montada sobre la montura de precisión gimbal, para esto se hace uso del FWHM como elemento para realizar la medición del ancho del objeto en la imagen (en imágenes astronómicas las estrellas tienen un perfil cuasi-Gaussiano).

El FWHM es un valor que puede ser utilizado para comparar la calidad de imágenes obtenidas bajo la influencia de diferentes condiciones de observación. En este contexto el impacto que tiene la turbulencia atmosférica en el sistema óptico-detector que se encuentra montado en la montura de precisión gimbal es evaluado utilizando esta técnica.

5.3.1 Pruebas experimentales de laboratorio.

El objetivo principal de esta sección es la de caracterizar el desempeño del SSE propuesto. Se implementó un banco de pruebas en el laboratorio el cual utilizó la estrella artificial construida anteriormente, el diagrama del banco de pruebas se presenta a continuación (Figura 64).

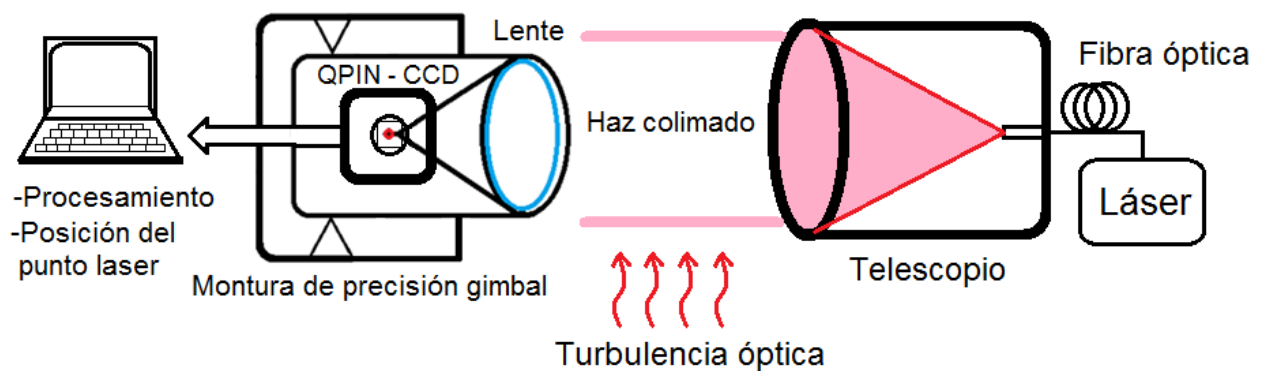


Figura 64. Diagrama del banco de pruebas en laboratorio.

En esta prueba se tiene el siguiente escenario: un enlace muy corto afectado por turbulencia óptica. Tenemos una estrella artificial (frente de onda plano), la cual es afectada por turbulencia, que se hace incidir al sistema óptico de la montura de precisión gimbal con el objetivo de analizarla con la cámara CCD y localizarla con el QPIN.

Se analizaron las imágenes de la estrella artificial sin turbulencia en las cuales el FWHM fue de 1.98 pixeles (1.17 arcmin), la figura siguiente muestra las imágenes analizadas (Figura 65).

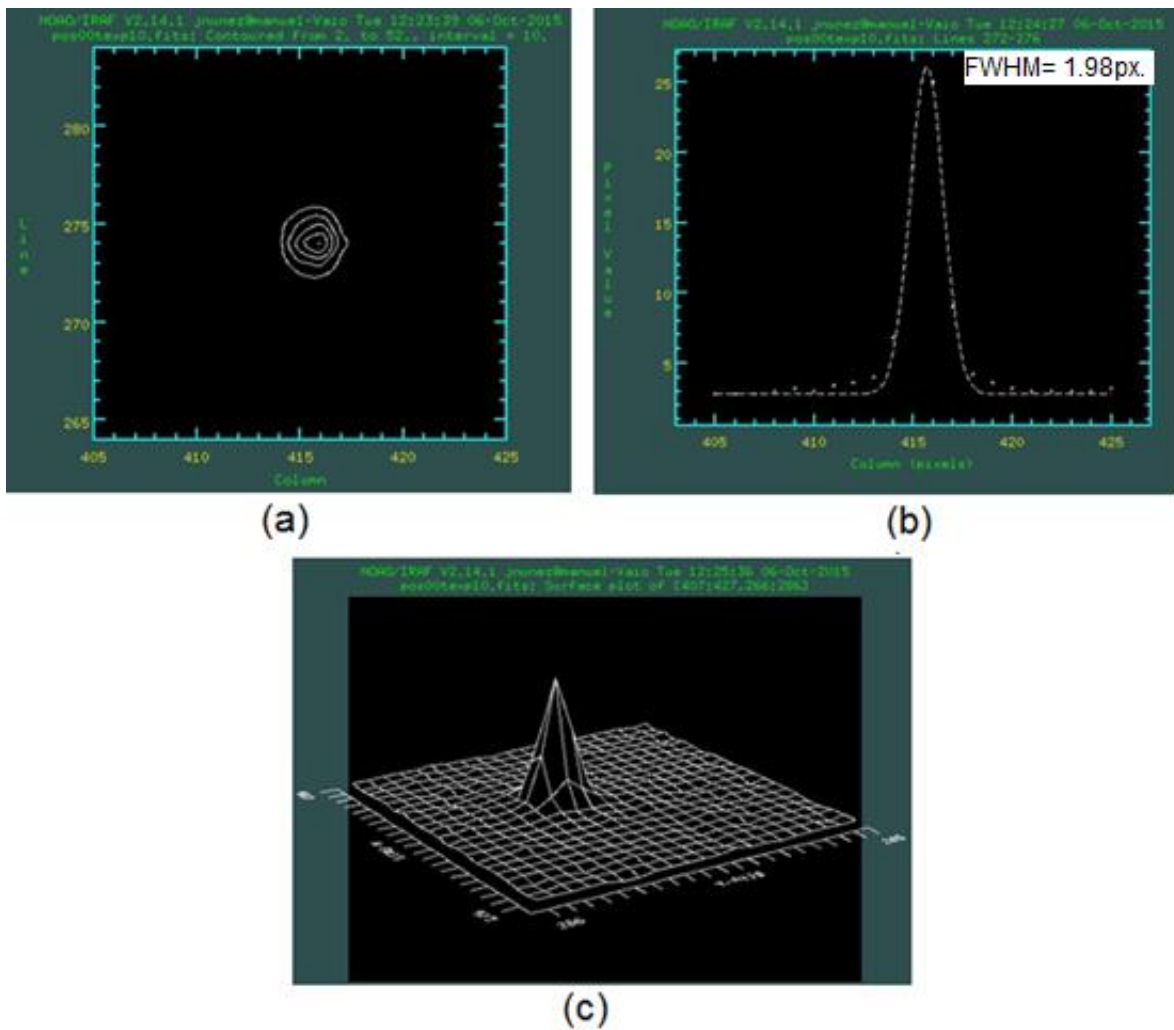


Figura 65. Enlace de laboratorio. Análisis de la imagen formada en el plano focal del sistema óptico de la montura de precisión gimbal: a) gráfica de contorno, b) gráfica de perfil con ajuste gaussiano, c) gráfica de superficie.

La imagen de la estrella artificial es capturada por la cámara CCD, colocada a la distancia focal del sistema óptico, acoplada en la montura de precisión gimbal. La imagen se analiza usando el software de análisis de imágenes astronómicas IRAF (del inglés *Image Reduction and Analysis Facility*) [IRAF Homepage, 2015].

Después para realizar el análisis en presencia de turbulencia, la cámara de turbulencia se coloca entre la estrella artificial y la montura de precisión gimbal. Esta cámara de turbulencia es capaz de producir turbulencia débil. Entonces de manera análoga cuando el efecto de la turbulencia está presente, el FWHM fue de 3.16 pixeles (1.86 arcmin) (Figura 66). La gráfica de contorno presenta esta vez una ligera deformación causada por el efecto de la turbulencia lo que a su vez se ve reflejado en un FWHM más grande.

Para utilizar de manera correcta el FWHM, como medida del tamaño del punto, se aseguró que el CCD no estuviera saturado. El emplear este criterio permite comparar de manera numérica los efectos de la turbulencia atmosférica sobre la calidad de la imagen que se tiene en el QPIN y CCD respectivamente.

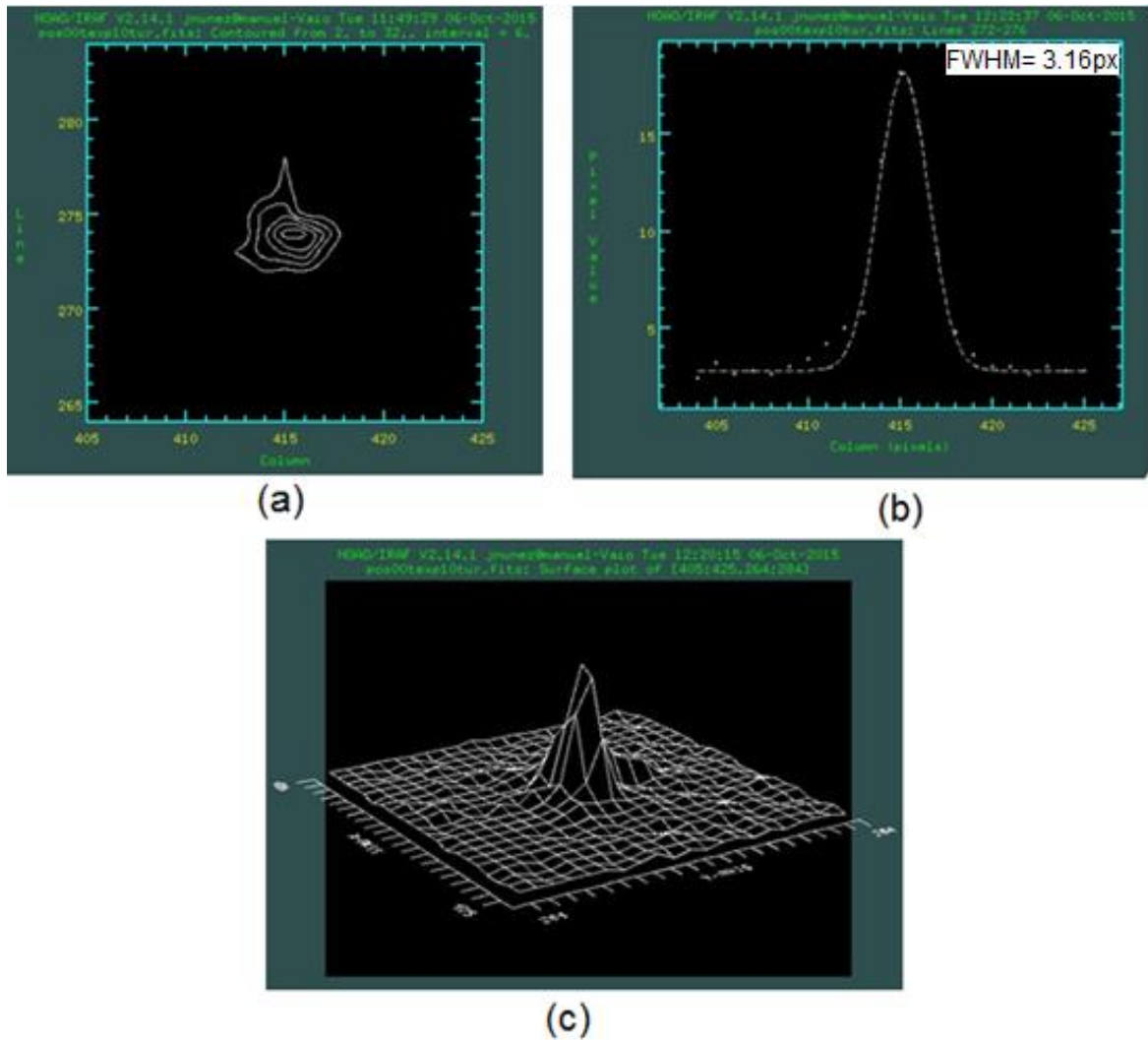


Figura 66. Enlace de laboratorio con turbulencia. Análisis de la imagen formada en el plano focal del sistema óptico de la montura de precisión gimbal: a) gráfica de contorno, b) gráfica de perfil con ajuste gaussiano, c) gráfica de superficie.

5.3.2 Pruebas experimentales de campo.

El siguiente experimento realizado fue un enlace de mayor longitud. Se llevó a cabo un enlace de media distancia (500 m) entre dos edificios en la ciudad de Ensenada. El enlace se estableció entre un estacionamiento de la UABC y un cubículo del tercer piso en el edificio de física aplicada (Figura 67).

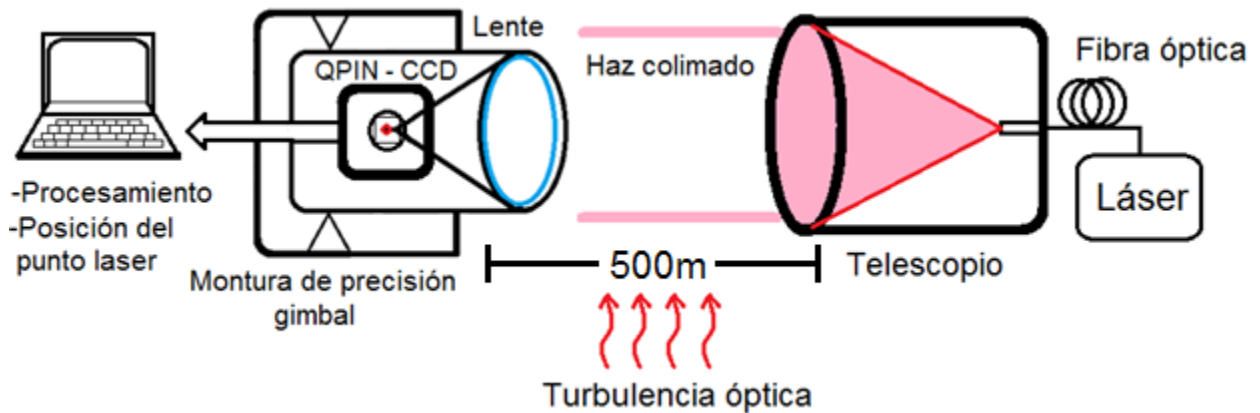


Figura 67. Diagrama del enlace de media distancia de espacio libre.

El telescopio (estrella artificial) se colocó en la ventana del cubículo, con ayuda del buscador del telescopio este se apuntó hacia el estacionamiento de la UABC. El sistema óptico acoplado en la montura de precisión gimbal se montó en un tripié para elevarlo del nivel del suelo (Figura 68), el procedimiento llevado a cabo fue el siguiente:

- Paso 1:** Apuntar la estrella artificial hacia el lugar donde se encontraba la montura de precisión gimbal.
- Paso 2:** Orientar el sistema óptico gimbal en la dirección que recibe la luz de la estrella artificial.
- Paso 3:** Realizar una búsqueda con el telescopio y luego buscar con el gimbal.
- Paso 4:** Encontrar el haz láser con el detector QPIN.
- Paso 5:** Visualizar en la computadora la posición del punto láser.
- Paso 6:** Cambiar el detector QPIN por la cámara CCD.
- Paso 7:** Tomar imágenes de la estrella artificial.



Figura 68.Fotografías del enlace de media distancia en espacio libre.

El mismo procedimiento utilizado en el enlace de laboratorio se usó para medir el FWHM de la estrella artificial. Se tomaron distintas imágenes del faro óptico con la cámara para su posterior análisis. Para el enlace de 500 m el FWHM fue de 1.637 píxeles lo que corresponde a 0.96 arcmin, se muestran las tres diferentes gráficas de análisis de la imagen (Figura 69).

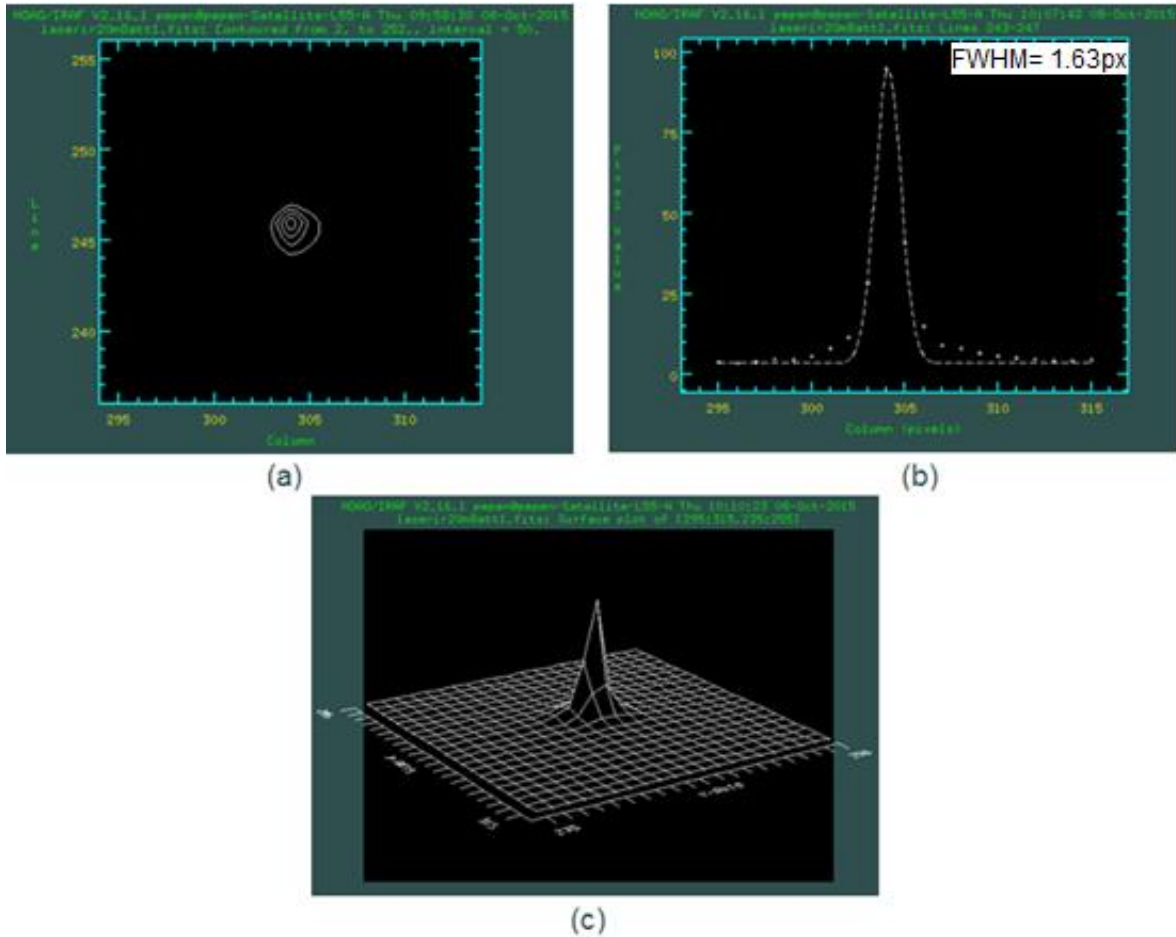


Figura 69. Enlace de media distancia. Análisis de la imagen formada en el plano focal del sistema óptico del gimbal: a) grafica de contorno, b) grafica de perfil con ajuste gaussiano, c) grafica de superficie.

5.4 Análisis de resultados.

Al realizar los dos enlaces se observa que la turbulencia óptica siempre afectará la forma y el tamaño de la imagen en el detector. Para establecer una comparación del efecto de la turbulencia en ambos enlaces se puede utilizar la siguiente tabla (Tabla 10).

Tabla 10. Comparación del FWHM de la imagen en cada enlace.

Enlace en laboratorio			
	FWHM		Desviación Estándar
Sin turbulencia	1.98 px.	1.17 arcmin	0.47 arcmin
Turbulencia	3.16 px.	1.86 arcmin	0.79 arcmin
Enlace de media distancia (500 m)			
	1.63 px.	0.96 arcmin	0.41 arcmin

Se puede notar que la turbulencia siempre afecta a la imagen formada, en las gráficas de contorno, se nota que en vez de tener una imagen con forma circular se tiene una imagen con una forma irregular. Cuando se analiza el perfil de la imagen formada en presencia de turbulencia se observa que este perfil se hace más ancho, se nota que la imagen se hace más grande debido a que el FWHM aumenta en valor (píxeles).

Un resultado importante es el valor de la E_p del SSE, teniendo 35.5 "/pixel es de esperarse que cambios muy pequeños en la imagen no tendrán un peso significativo a la hora de realizar un análisis utilizando el FWHM. Esto se puede corroborar al estudiar el enlace de 500 m, el efecto de la turbulencia en la forma de la imagen adquirida es mínimo en este enlace, correspondiendo así con el resultado teórico de la E_p , donde los píxeles del CCD no resolverán pequeños desplazamientos de imagen.

Este resultado es importante ya que se podría esperar que en un enlace de mayor longitud (500 m) en el cual no se tiene algún grado de control en la turbulencia óptica se tengan imágenes más deformadas por este efecto.

Los resultados obtenidos en secciones previas usando la cámara CCD se utilizaron para encontrar el valor experimental del FOV y los ángulos máximos alcanzados por el sistema óptico del gimbal cuando se utiliza el detector QPIN. Lo que se realiza es girar los micrómetros 8 pasos por cada vuelta, teniendo así una mejor resolución en el movimiento

angular del gimbal (0.0675°). Lo que se realizó es un barrido desde un extremo a otro del movimiento total angular del gimbal (Figura 70).

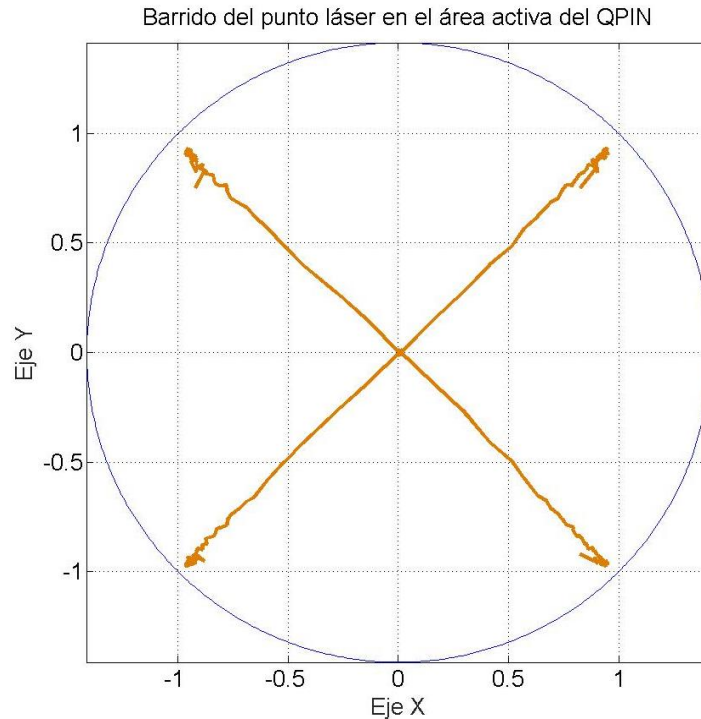


Figura 70. Barrido del punto láser en el área activa del QPIN.

El método para encontrar la restricción angular consiste en colocar la imagen de la estrella artificial en el centro del detector QPIN, para después mover el punto a lo largo de los cuatro cuadrantes (área activa) hasta tener una pérdida de 3 dB en la potencia de la señales del QPIN (Figura 71).

En la figura siguiente se puede observar el comportamiento de los ejes X y Y del detector QPIN (Figura 72). Los resultados experimentales mostrados en las gráficas coinciden con los resultados teóricos calculados para el gimbal, el análisis llevado a cabo nos permitió corroborar que la montura de precisión gimbal cuenta con un FOV de 9.5 grados bajo el criterio de los 3dB.

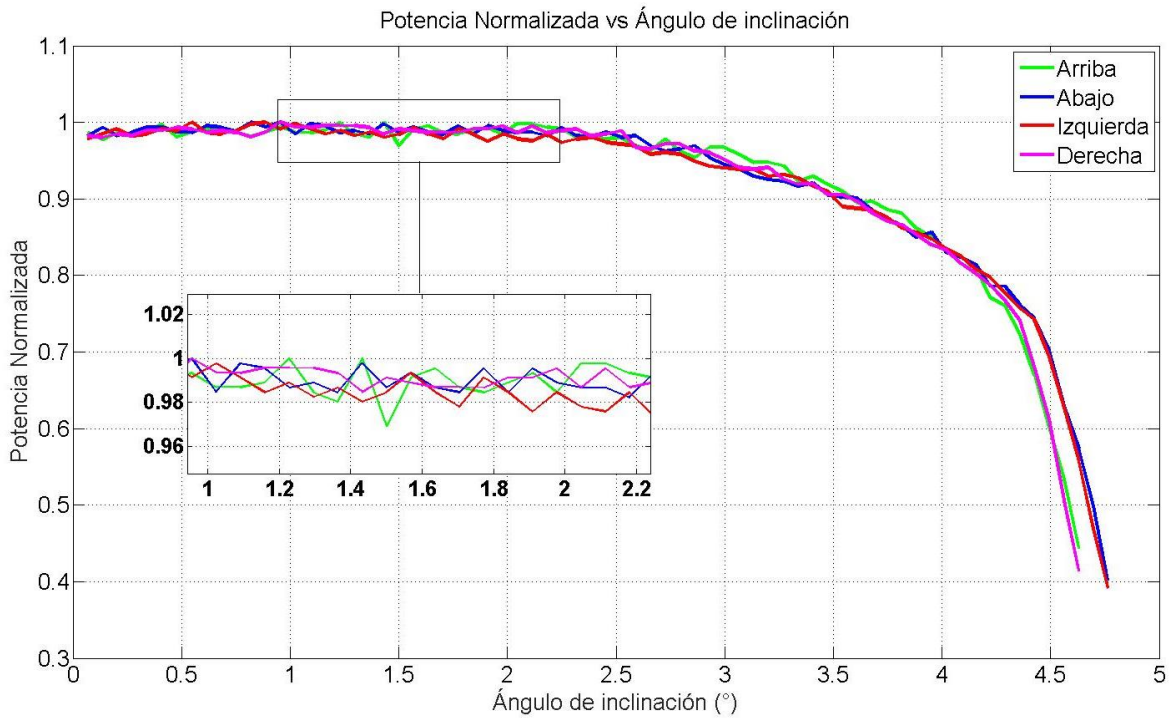


Figura 71. Potencia normalizada vs Angulo de inclinación.

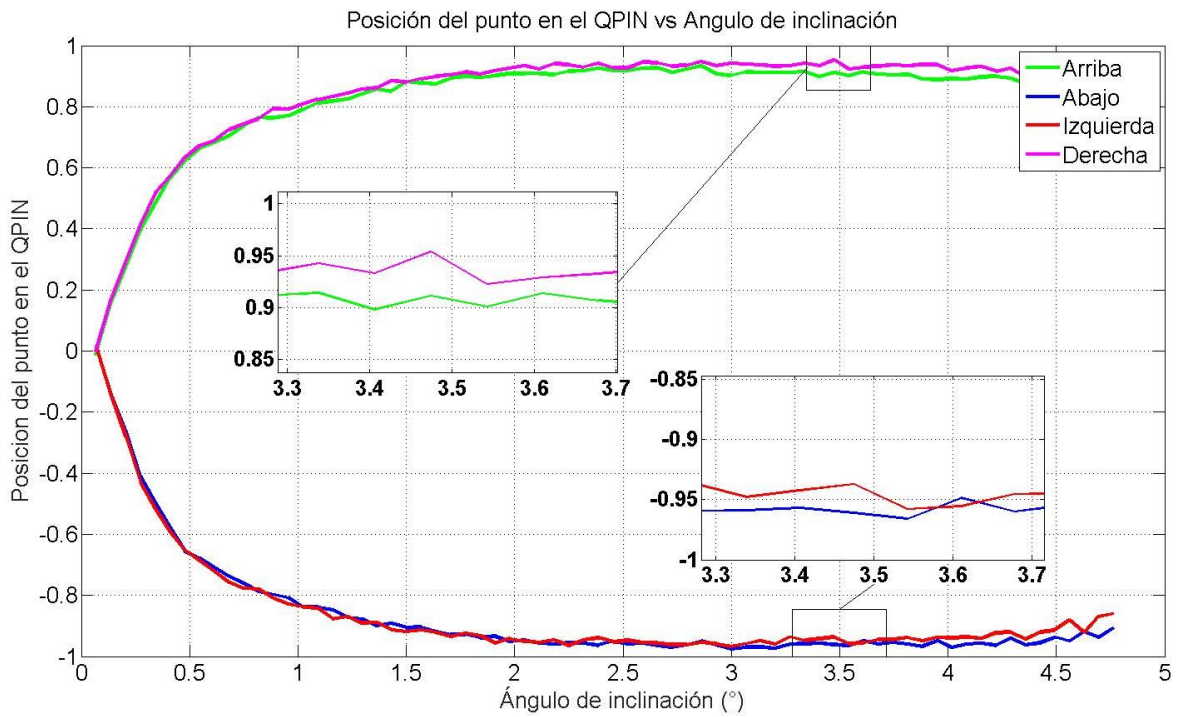


Figura 72. Posición del punto en el QPIN vs Angulo de inclinación.

Derivado de este trabajo se presentó parte de los resultados del mismo en uno de los congresos internacionales de mayor importancia dedicados a este tema. Se participó en el congreso internacional IEEE ICSOS 2015 (*International Conference on Space Optical Systems and Applications*) con el trabajo *ATP subsystem for Optical Communications on a Cubesat*.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1 Conclusiones.

En el presente trabajo se realizó el estudio teórico – experimental de un subsistema de sincronización espacial (SSE), también denominado ATP, obteniendo los siguientes subsistemas: a) prototipo de montura de precisión gimbals para un SSE destinado a usarse en comunicaciones ópticas satelitales, b) subsistema para generación en el laboratorio de una estrella artificial utilizando una fuente láser, fibra monomodo y un telescopio astronómico.

El uso de una estrella artificial permite utilizar telescopios comerciales para comprobar sistemas de comunicaciones ópticas satelitales en tierra, esto es comprobar dichos sistemas sin la necesidad de lanzarlos al espacio. Utilizando la técnica de la estrella artificial y la metodología propuesta en este trabajo es posible certificar el buen desempeño del subsistema antes de ser puesto en órbita.

En este sentido, la correcta alineación del sistema ATP en el satélite con respecto a la estación terrena está garantizada antes del lanzamiento gracias al uso de la técnica de estrella artificial. De esta manera tenemos un frente de onda que es utilizado para alinear el haz del faro óptico con el de haz de comunicaciones asegurando así que ambos compartan el mismo canal óptico.

Aunque el diseño de los gimbals es muy preciso, la existencia de pequeños errores en la construcción y tolerancias de los elementos ópticos que son incluidos en un satélite pueden resultar en una mala e inclusive nula alineación.

Adicionalmente, gracias a esta técnica, fue posible la medición de la turbulencia atmosférica, utilizando el criterio del FWHM, sin el uso de elementos más complejos que una cámara CCD y una lente. Pero un inconveniente de esta técnica radica en que se necesita contar con telescopios astronómicos para la calibración de la “estrella”.

Con lo descrito anteriormente, consideramos que se cumplió cabalmente con el objetivo principal del trabajo de tesis, pues se generó una metodología estructurada para el diseño de subsistemas ATP para comunicaciones ópticas en satélites pequeños, implementando un gimbal como parte del mismo y empleando la técnica de estrella artificial para su caracterización en tierra.

Como parte del trabajo de tesis se participó en el congreso internacional IEEE ICSOS 2015 (*International Conference on Space Optical Systems and Applications*) con el trabajo *ATP subsystem for Optical Communications on a Cubesat*, llevado a cabo los días 27 y 28 de octubre de 2015 en New Orleans, USA.

6.2 Trabajo a futuro.

Algunas líneas de investigación para actividades futuras que surgieron de este trabajo de tesis son:

- Motorizar la montura de precisión gimbal y diseñar su correspondiente etapa de control.
- Realizar un estudio más profundo de las técnicas de compensación de los efectos de la turbulencia atmosférica en enlaces de comunicaciones de espacio libre.
- Investigación sobre técnicas de mitigación de los efectos de la turbulencia óptica en enlaces de comunicación de espacio libre.
- Comprobar el SSE utilizándolo en enlaces ópticos a distancias más grandes (varios km).

Referencias bibliográficas

- Andreff, N., Horaud, R., and Espiau, B. (1999). On-line hand-eye calibration. In 3-D Digital Imaging and Modeling, 1999. Proceedings. Second International Conference on (pp. 430-436). IEEE.
- Andrews, L. C., and Phillips, R. L. (2005). Laser beam propagation through random media (Vol. 1). Bellingham, WA: SPIE press.
- Franz, J., and Jain, V. K. (2000). Optical Communications: Components and Systems: Analysis--design--optimization--application. CRC press.
- Goodman, J. W. (1985). Statistical Optics (New York: J. Wiley and Sons).
- Hajjarian, Z., Fadlullah, J., and Kavehrad, M. (2009). MIMO free space optical communications in turbid and turbulent atmosphere. Journal of Communications, 4(8), 524-532.
- Hemmati, H., Mecherle, S. (2004). "Free-Space Optical Communications" May 3-6 Short course Engineering 881.220 Q4795, University of California Los Angeles.
- Ho, T. H., Milner, S. D., and Davis, C. C. (2005, January). Fully optical real-time pointing, acquisition, and tracking system for free space optical link. In Proc. SPIE (Vol. 5712, pp. 81-92).
- IRAF Homepage, Image Reduction and Analysis Facility, a general purpose software system for the reduction and analysis of astronomical data. IRAF is written and supported by the National Optical Astronomy Observatories (NOAO). Recuperado de: <http://iraf.noao.edu/>
- Kavehrad, M. (2011). MIMO Free Space Optical Communications in Clouds and Turbulence. Conferencia Toronto, Ontario. Canada.
- Kilpelä, A. (2004). Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications. Universidad de Oulu, Tesis de maestría.
- Kingsley, S., and Quegan, S. (1999). Understanding radar systems. SciTech Publishing.
- Lambert, G. S. y Casey, L. W. 1995. "*Laser Communication in Space*". Artech House, inc., Norwood. 390 pp.

- Lee, I. E., Ghassemlooy, Z., Ng, W. P., Gourdel, V., Khalighi, M. A., Zvanovec, S., & Uysal, M. (2014, July). Practical implementation and performance study of a hard-switched hybrid FSO/RF link under controlled fog environment. In *Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), 2014 9th International Symposium on* (pp. 368-373). IEEE.
- Malacara, D. and Welford, W. T. "Star tests" in *Optical Shop Testing*, (3rd ed). D. Malacara, ed. (Wiley, New Jersey, 2007), pp. 398-434.
- Malacara, D., & Malacara, Z. (2004). *Handbook of Optical Design*.
- Núñez-Alfonso, J. M., Cordero-Dávila, A., Vergara-Limón, S., and Cuautle-Cortes, J. (2001). Improved Ronchi tester. *Applied optics*, 40(4), 501-505.
- Sova, R. M., Sluz, J. E., Young, D. W., Juarez, J. C., Dwivedi, A., Demidovich III, N. M., ... and Driver, D. (2006, August). 80 Gb/s free-space optical communication demonstration between an aerostat and a ground terminal. In *SPIE Optics+ Photonics* (pp. 630414-630414). International Society for Optics and Photonics.
- Wheelon, A. D. (2003). *Electromagnetic scintillation: volume 2, weak scattering (Vol. 2)*. Cambridge University Press.
- Willebrand, Heinz and Ghuman, S. Baksheesh. 2002. "*Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*", by Sams Publishing, 259 pp.