



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**Estudio teórico-experimental de la turbulencia óptica en
comunicaciones ópticas coherentes inalámbricas**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

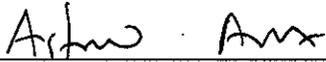
Presenta:

Alejandro Cabrera Nava

Ensenada, Baja California, México

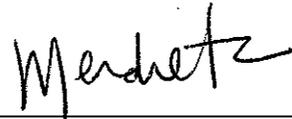
2012

TESIS DEFENDIDA POR
Alejandro Cabrera Nava
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



Dr. Arturo Arvizu Mondragón

Codirector del Comité



Dr. Francisco J. Mendieta Jiménez

Codirector del Comité



Dr. Horacio Soto Ortiz

Miembro del Comité



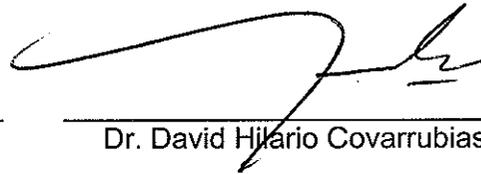
M.C. José Luis Briseño Cervantes

Miembro del Comité



Dr. Roberto Conte Galván

*Coordinador del programa de posgrado
en Electrónica y telecomunicaciones*



Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

29 de febrero del 2012

RESUMEN de la tesis de **Alejandro Cabrera Nava**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES con orientación en TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California, febrero 2012.

Estudio teórico-experimental de la turbulencia óptica en comunicaciones ópticas coherentes inalámbricas

Resumen aprobado por:



Dr. Arturo Arvizu Mondragón
Codirector de Tesis



Dr. Francisco. J. Mendieta Jiménez
Codirector de tesis

El uso de las comunicaciones ópticas inalámbricas es una tendencia tanto en la investigación científica como en el ámbito tecnológico-comercial, sin embargo son diversos los retos que este tipo de enlaces enfrentan, uno de ellos es la interacción con el canal atmosférico y las perturbaciones que el mismo ocasiona en la señal óptica al propagarse a través de él; de la misma manera son diversas las técnicas empleadas para la mitigación de dichos efectos, el procesamiento digital de la señal y el uso de la diversidad espacial son dos de estas técnicas.

Es en este sentido que el presente trabajo analiza los efectos del canal óptico atmosférico en dos parámetros específicos de la señal: la intensidad y el estado de polarización. Mediante un modelo de teoría-simulación se evalúa la repercusión de los tres regímenes de turbulencia (débil, media y fuerte) en las variaciones de intensidad de la señal, la magnitud de dichas variaciones es cuantificada por la variable índice de centelleo σ_I^2 . Los resultados obtenidos por dicho modelo fueron respaldados con enlaces en el exterior para valores diversos de longitud de onda λ y distancia del enlace L ; de igual modo se validó el uso del dispositivo emulador de turbulencia atmosférica para las pruebas en el entorno del laboratorio.

De esta manera, dentro del laboratorio se elaboró un enlace con modulación binaria de la fase de la portadora óptica, con un esquema de detección coherente y sometido a los tres regímenes de turbulencia (generados por la cámara de turbulencia). Tras la adquisición de las señales recibidas se implementó un estimador de fase (procesamiento fuera de línea). Por último se elaboró una adaptación del algoritmo de recepción para la evaluación del desempeño del sistema mediante variados escenarios con diversidad espacial, grados 2 y 4.

Palabras clave: comunicaciones ópticas inalámbricas, detección coherente, turbulencia atmosférica, índice de centelleo y diversidad espacial.

ABSTRACT of the thesis presented by **ALEJANDRO CABRERA NAVA** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in ELECTRONICS AND TELECOMUNICATIONS, with orientation in TELECOMUNICATIONS. Ensenada, Baja California, february, 2012.

Theoretical- experimental study of the optical turbulence in wireless coherent optical communications

The optical wireless communications are a trend not just for scientific research but also for the technological industry, however this kind of systems deal with several difficulties, the perturbation on the optical signal caused by it's interaction with the atmospheric channel is one of this impairments. By processing the signal digitally and using spatial diversity the aforementioned effect can be mitigated.

The current job analyzes the effects of the optical atmospheric channel in two specific signal's parameters: intensity and state of polarization. Based on a theoretical-simulated model the impact of the three turbulence regimes (weak, medium and strong) were evaluated as a function of the intensity variations, the magnitude of those variations is quantified by σ_I^2 . The results of this model were validated by an outdoor link with different values of wavelength λ and link distance L ; the use of the emulator device of atmospheric turbulence for the laboratory tests was also validated with the same model.

This project implements an optical communication link with binary phase shift keying and coherent detection in the laboratory, and tests it under three different regimes of turbulence (provided by the turbulanche chamber). A phase estimator was programmed to process the acquired signals (offline processing).

Finally, an adaption of the reception algorithm was proposed to evaluate the performance of the system under several scenarios with two different grades of spatial diversity, 2 and 4.

Keywords: wireless optical communications, coherent detection, atmospheric turbulence, scintillation index and spatial diversity.

Dedicatorias

Mono, Navita, Julianita y Paupau:

Quisiera usar las estrellas para escribirles un mensaje en el cielo y así hacerles saber cuanto pienso en ustedes y cuan afortunado me siento por tenerlos en mi vida.

Quisiera regalarle cada tarde la puesta del sol a mi mamá, quisiera guardar en una pequeña caja el sonido del silencio y que mi papá pudiera disfrutarlo a diario, quisiera comprar el algodón de azúcar mas grande del planeta y que mi hermana pudiera saborearlo a todas horas y quisiera guardar la luna en una enorme burbuja para que mi sobrina jugara con ella cada noche antes de dormir.

Se que algún día lo conseguiré, pero por ahora sólo puedo dedicarles este logro y usar unas cuantas líneas para agradecerles todo lo que han hecho por mi, no es sencillo plasmar todos mis sentimientos por ustedes pero espero hacérselos saber día tras día ofreciéndoles de manera incondicional todo lo que soy y lo que puedo ser. No fue posible escribir sus nombres en la portada de este trabajo, pero este viaje lo hicimos todos juntos... los amo al ritmo de todos los colores.

Agradecimientos

Al recorrer un nuevo camino no espero un sendero libre de obstáculos, espero encontrarme con gente que me enseñe y me apoye a superarlos, en este camino yo me encontré mucha gente con la cual estoy inmensamente agradecido:

Al Dr Arvizu le agradezco el haberme aceptado como su estudiante, gracias por haber sido mi asesor y mi amigo al mismo tiempo, gracias por enseñarme tanto sobre las comunicaciones ópticas pero sobre todo por haberme enseñado lo importante que es la calidad humana, y gracias por siempre tener una buena canción de rock que hiciera todo más sencillo.

Al Dr. Mendieta le agradezco su constante disposición y su eterno entusiasmo por compartir el conocimiento, nunca entenderé como es que alguien puede saber tanto sobre tantas cosas y a la vez ser tan sencillo y agradable.

Al Dr. Soto por siempre ser objetivo y preciso en sus comentarios, por orientar mi trabajo con seriedad, por ser un doctor en ciencias que no le tiene miedo al laboratorio pero sobre todo por permitirme ser su amigo.

Al maestro Briseño por acceder a ser parte de mi comité, por siempre darme una respuesta inmediata y una atención respetuosa, sus preguntas y planteamientos fueron de gran ayuda en la elaboración de este trabajo.

A todos mis maestros, desde los primeros cursos hasta los últimos, los que me impartieron alguna clase y los que no, los que se aprendieron mi nombre y los que simplemente estrechaban mi mano y saludaban con una sonrisa, a todo el personal del departamento y del instituto en general por ayudarme en la medida de lo posible con su compromiso y cumplimiento.

A todas las personas que conocí durante este periodo, porque de una u otra manera me ayudaron y me apoyaron en este logro, mención honorífica para mi compañero de aventuras, juntos no aprendimos nada, hermano... pero como nos divertimos, gracias Neto.

Al CONACYT por haberme brindado la beca para cursar mis estudios de mi maestría y al CICESE por permitirme formar parte de sus filas.

CONTENIDO

	Página
Resumen español.....	i
Resumen inglés.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	v
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tablas.....	xiv
Capítulo I. INTRODUCCIÓN	1
I 1.1 Presentación.....	1
I 1.2 Objetivo.....	2
I 1.3 Organización del documento.....	3
Capítulo II. SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS	4
II 1 Introducción.....	4
II 2 Sistemas ópticos no coherentes.....	5
II 3 Sistemas ópticos coherentes.....	7
II 3.1 Sistemas homodinos.....	9
II 3.2 Sistemas heterodinos.....	10
II 3.3 Fotodetección balanceada.....	13
II 4 Ventajas de los esquemas de detección coherente.....	14

CONTENIDO (continuación)

	Página
CAPÍTULO III. CANAL ÓPTICO ATMOSFÉRICO	16
III 1 Introducción.....	16
III 2 Ventanas atmosféricas.....	17
III 3 Perturbaciones atmosféricas.....	20
III 4 Turbulencia atmosférica.....	22
III 5 Centelleo en las comunicaciones ópticas.....	23
III 6 Efectos de la turbulencia en el estado de polarización.....	29
III 7 Presupuesto de potencia en las comunicaciones ópticas.....	31
 CAPÍTULO IV. DIVERSIDAD ESPACIAL EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS	 36
IV 1 Introducción.....	36
IV 2 Tipos de diversidad.....	37
IV 3 Sistemas MBT-MAR y técnicas de combinación.....	38
IV 4 Probabilidad de caída del sistema.....	43
 CAPÍTULO V. ESTIMADOR-CORRELACIONADOR	 47
V 1 Introducción.....	47
V 2 Estimador - correlacionador.....	48
V 2.1 Adaptación del proceso de estimación de fase a un esquema con diversidad espacial.....	53

CONTENIDO (continuación)

	Página
CAPÍTULO VI. VALIDACION EXPERIMENTAL DEL USO DE LA CAMARA DE TURBULENCIA	55
VI 1 Introducción.....	55
VI 2 Cámara de turbulencia.....	55
VI 3 Propuesta del modelo teórico experimental para la validación de la cámara de turbulencia.....	57
VI 3.1 Obtención práctica del índice de centelleo en el modelo de validación.....	64
VI 4 Cámara de turbulencia en las pruebas experimentales de laboratorio (centelleo).....	68
VI 5 Cámara de turbulencia en las pruebas experimentales de laboratorio (estado de polarización).....	71
 CAPÍTULO VII. ARREGLO EXPERIMENTAL	 76
VII 1 Introducción.....	76
VII 2 Experimento (primera versión).....	77
VII 3 Experimento (versión final).....	79
VII 4 Procesamiento de las señales adquiridas.....	84
VII 4.1 Diseño de un sistema con diversidad espacial (2x2).....	87
VII 4.2 Diseño de un sistema con diversidad espacial (4x4).....	91
 CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	 96
VIII 1 Conclusiones y aportaciones.....	96
VIII 2 Trabajo a futuro.....	100

CONTENIDO (continuación)

	Página
Bibliografía	102
Apéndice A	
Tablas de estimados.....	106
Apéndice B	
Antenas ópticas y tarjetas de adquisición.....	113

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		Página
1	Elementos básicos de un esquema de comunicaciones ópticas	5
2	Sistema óptico no coherente, esquema IMDD	6
3	Sistema óptico coherente (con modulación de fase)	8
4	Esquema de un receptor homodino	10
5	Esquema de un receptor heterodino	11
6	Esquema de detección balanceada	13
7	Perfil de intensidad de una señal óptica bajo los efectos de la dispersión y el centelleo	17
8	Ventanas atmosféricas	18
9	Función de fase para diferentes tipos de nubes	19
10	Fenómenos asociados a las perturbaciones atmosféricas	20
11	Turbulencia representada en el modelo de Kolmogorov	23
12	Variación de la constante de estructura del índice del aire a lo largo del día	24
13	Enlaces ópticos horizontales y de trayectoria inclinada	24
14	Frente de onda plano y frente de onda aberrado	27
15	PSF en presencia de turbulencia débil, $D/r_0 < 5$	28
16	PSF en presencia de turbulencia media, $5 < D/r_0 < 10$	28
17	PSF en presencia de turbulencia fuerte, $10 < D/r_0 < 15$	28
18	Posibles efectos de la atmosfera en la polarización de una señal	30

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
19	Parámetros importantes en la polarización de una señal. η es el ángulo azimut y ε es la elipticidad	30
20	Pérdidas geométricas	35
21	Técnicas de diversidad. a) diversidad temporal, b) diversidad frecuencial y c) diversidad espacial	38
22	Tipos de sistemas: a) Sistema de apertura única b) Sistema MBT-MAR	39
23	Esquemas de combinación en diversidad espacial. a) MRC b) SC c)EGC	40
24	Relación señal a ruido (SNR) para los diferentes esquemas de combinación operando bajo diversos niveles de turbulencia con un grado de diversidad $N=2$	41
25	BER para un régimen de turbulencia débil, $D/r_0=3.57$	42
26	BER para un régimen de turbulencia media, $D/r_0=7.14$	43
27	BER para un régimen de turbulencia fuerte, $D/r_0=14.28$	43
28	Probabilidad de caída del sistema para un esquema con diversidad espacial operando en un régimen de turbulencia fuerte	45
29	Duración de los cortes para sistemas con diversidad espacial operando bajo un régimen de turbulencia fuerte	46
30	Esquema receptor con estimador-correlacionador	48
31	Diagrama a bloques de la estructura de estimación de fase adaptada a un esquema con diversidad espacial.	54
32	Esquema de la cámara de turbulencia	56
33	Varianza de Rytov para diferentes λ 's, $L=1.5$ Km	58

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
34	Índices de Rytov y centelleo para un enlace con $\lambda=1550\text{nm}$ y $L=1.5\text{Km}$	60
35	Esquema experimental del enlace óptico entre el edificio de física aplicada y el edificio de telemática	62
36	Índices de Rytov y centelleo para enlace con $\lambda=550\text{ nm}$ y $L=353\text{m}$	62
37	Índices de Rytov y centelleo para enlace con $\lambda=830\text{ nm}$ y $L=353\text{m}$	63
38	Diagrama a bloques de la estación transmisora y la estación receptora empleadas para la medición del índice de centelleo	64
39	Pruebas experimentales, enlace entre telemática y física aplicada	65
40	Variación de intensidad para $\lambda = 550\text{nm}$ (verde)	65
41	Variación de intensidad para $\lambda = 830\text{nm}$ (infrarrojo)	66
42	Comparación en modo grafico entre los valores teóricos y los prácticos, los marcadores muestran los valores obtenidos en las pruebas experimentales	67
43	Arreglo empleado en laboratorio para la caracterización de la cámara de turbulencia	68
44	(a) Índice de centelleo=0.09 y (b) índice de centelleo=0.317	69
45	Índices de Rytov y centelleo calculados para turbulencia fuerte, $C_n^2 = \text{cte}$, variando la longitud del enlace	70
46	Diagrama a bloques para la medición del efecto de la cámara de turbulencia en el estado de polarización	71

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
47	Medición de estado de polarización con cámara de turbulencia apagada	72
48	Medición del estado de polarización con cámara de turbulencia encendida	73
49	Diseño del primer arreglo experimental propuesto	76
50	Diagrama del arreglo experimental y medición de potencia	78
51	Fotografías correspondientes al arreglo experimental en laboratorio	80
52	Diseño del arreglo experimental final, incluye el bloque receptor (trayectoria óptica #2) para la obtención simultánea de la señal de datos y el índice de centelleo instantáneo	81
53	Señales capturadas bajo el régimen de turbulencia débil, índice de centelleo=0.087	82
54	Señales capturadas bajo el régimen de turbulencia media. índice de centelleo=0.168	82
55	Señales capturadas bajo el régimen de turbulencia fuerte. índice de centelleo=0.341	82
56	Diagrama de ojo obtenido para un régimen de turbulencia débil	83
57	Diagrama de ojo obtenido para un régimen de turbulencia media	83
58	Diagrama de ojo obtenido para un régimen de turbulencia fuerte	84
59	Ecuaciones acopladas y calculador de máxima verosimilitud implementados en SIMULINK	85

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
60	a) Observable eléctrico (turbulencia débil), b) salida del estimador-correlacionador para "0", c) salida del estimador-correlacionador para "1"	86
61	Tres de las seis señales adquiridas, cada una bajo un régimen de turbulencia distinto, tramas alineadas en tiempo.	88
62	Esquema de diversidad de transmisión 2x2 (notación específica para caso #1)	89

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla</i>		Página
I	Relación entre la varianza de Rytov y en nivel de turbulencia reportada en algunos trabajos consultados, [Abtahi y Rush, 2009]	58
II	Relación entre la constante de estructura C_n^2 y en nivel de turbulencia	59
III	Valores de σ_R^2 para regímenes de turbulencia fuerte	60
IV	Valores de σ_R^2 y de σ_I^2 para un enlace con $\lambda=1550$ nm, $L=1.5$ Km bajo un régimen de turbulencia fuerte	61
V	Valores de σ_R^2 y de σ_I^2 esperados para un enlace de longitud $L = 353$ m bajo un régimen de turbulencia fuerte	63
VI	Comparación entre los índices de centelleo teóricos y prácticos	67
VII	Tabla comparativa entre los efectos reportados en otros estudios y los obtenidos en el laboratorio durante las pruebas experimentales	74
VIII	Conformación de los casos a analizar en un esquema de diversidad espacial 2x2	88
IX	Intensidad de las tramas de 16 bits adquiridas	90
X	Dato estimado para el caso #1 bajo un esquema transmisión 2x2	91
XI	Conformación de los casos a analizar en un esquema de diversidad espacial 4x4	92
XII	Dato estimado para el caso #1 bajo un esquema transmisión 4x4	93
XIII	Comparación entre la secuencia enviada y la secuencia estimada en todos los casos planteados	94
XIV	Valores de σ_I^2 para regímenes de turbulencia fuerte	97

Capítulo I

Introducción

I.1 Presentación

Las comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC por sus siglas en inglés) son un tipo de sistema de comunicaciones en el cual la atmósfera desempeña el papel del canal de comunicación, estos sistemas son atractivos debido a sus prestaciones relacionadas con el ancho de banda, su desarrollo relativamente desarrollo y la ausencia de requerimiento de una licencia. Sin embargo el desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas puede verse afectado por diversas perturbaciones de carácter aleatorio tal como la turbulencia atmosférica, dicha perturbación causa no solo atenuación en el campo óptico de la señal recibida sino que también provoca fluctuaciones de fase en el mismo. Para lidiar con dichas perturbaciones en la actualidad existe una tendencia en el desarrollo comercial de sistemas ópticos de comunicaciones coherentes que se hacen valer del procesamiento digital de la señal (DSP por sus siglas en inglés), tanto para sistemas de fibra óptica como para sistemas inalámbricos. Sin embargo, el procesamiento digital de la señal no es la única técnica utilizada y estudiada para la mitigación de los efectos de la turbulencia atmosférica, la implementación de esquemas de comunicación con diversidad espacial también representa una útil herramienta para la obtención de sistemas más robustos y con mejores prestaciones. Para sistemas de este tipo existen diversos métodos de combinación, entre ellos el esquema de SC (Selection Combining) donde la señal recibida con el mayor nivel de potencia es seleccionada para ser procesada y así recuperar los datos, otro esquema de combinación es el MRC (Maximal Ratio Combining) el cual consiste en procesar una señal resultante de la adición de todas la señales recibidas. El presente trabajo propone un sistema de

comunicaciones ópticas inalámbricas con transmisor de haz múltiple (MBT por sus siglas en inglés) y un receptor de apertura múltiple (MAR por sus siglas en inglés), la idea de un sistema basado en la diversidad espacial es que su uso puede mejorar el desempeño de los sistemas inalámbricos afectados por canales con desvanecimiento, tal como se ha estudiado en las comunicaciones por radiofrecuencia. Estos esquemas de combinación han sido usados tanto en sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas con detección directa como con detección coherente. Como se ha mencionado, la investigación, el desarrollo y la implementación comercial de este tipo de sistemas representa una tendencia en la actualidad; como parte de un proyecto a mediano plazo se pretende desarrollar un sistema óptico inalámbrico de telecomunicaciones dentro del CICESE. Es en función de todo lo anteriormente dicho, que la presente investigación puede ser considerada como un cimiento tanto de carácter teórico como práctico para el desarrollo de un trabajo de mayor alcance, es decir, este trabajo de tesis corresponde a una primera fase de un proyecto cuyo fin es el citado en renglones previos.

I.2 Objetivo

El objetivo general es el estudio teórico-experimental de los efectos que produce la turbulencia atmosférica en un sistema inalámbrico de comunicaciones ópticas con detección coherente.

Se estudiarán las diferentes alternativas existentes para compensar la degradación que sufre el campo óptico de información al viajar por el canal inalámbrico (turbulento).

Asimismo, se trabajará sobre la experimentación e implementación de una técnica que emplea un transmisor de haz múltiple y un receptor de múltiple apertura para la reducción de los efectos causados por la turbulencia atmosférica.

I.3 Organización del documento

Este trabajo de tesis se encuentra organizado de la manera siguiente: el capítulo II corresponde a los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas, sus componentes, su clasificación y un comparativo entre los dos principales esquemas de recepción, coherentes y no coherentes. El capítulo III aborda el canal atmosférico, se describen los principales fenómenos involucrados y se estudian los efectos que dichos fenómenos pueden causar en un sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas, particularmente se analizan los efectos en la variación de la intensidad de la señal óptica y las repercusiones en el estado de polarización de la misma. En el capítulo IV se introducen los conceptos relacionados a las técnicas de diversidad, se clasifican diversos esquemas de combinación y se presenta el desempeño de algunos trabajos anteriormente reportados, cuyos resultados ejemplifican el beneficio que conlleva el uso de la diversidad espacial en sistemas de comunicaciones ópticos. El esquema de recepción empleado es reportado en el capítulo V, se describe la obtención del algoritmo empleado y se introduce el arreglo experimental de este trabajo. Para el capítulo VI se presentan los primeros reportes correspondientes con la parte experimental realizada en este trabajo, experimentos tales como la validación del uso de la cámara de turbulencia mediante diversas pruebas. El penúltimo capítulo, VII, explica la configuración experimental desarrollada, reporta las características y diseño del arreglo final, y es en el capítulo VIII donde se muestran los resultados de esta tesis, las conclusiones y el trabajo a futuro que potencialmente este documento como apoyo, pudiese permitir desarrollar.

Capítulo II

Sistemas de comunicaciones ópticas

II.1 Introducción

De manera fundamental un sistema óptico de comunicaciones consta de tres elementos:

La estación transmisora. En las comunicaciones ópticas esta etapa consta esencialmente de un láser, es decir la fuente de luz coherente que representa a la señal portadora, y un generador de la señal de información también conocida como señal moduladora, la cual modifica alguna propiedad de la señal portadora (amplitud, frecuencia, fase o estado de polarización).

El canal de comunicaciones. Es el medio por el cual la señal de información se propaga, tratándose de las comunicaciones ópticas se tienen dos opciones como medio de propagación: la fibra óptica y el canal atmosférico, siendo este último el de interés para el presente trabajo.

La estación receptora. Esta etapa consta de dos bloques principales, la fotodetección y la demodulación. En el proceso de fotodetección la radiación luminosa es capturada por un elemento colector y posteriormente convertida del dominio óptico al eléctrico, y es en el bloque demodulador donde se recuperan los datos transmitidos partiendo de la señal eléctrica previamente generada en la fotodetección.

La figura 1 esquematiza la configuración básica de estos tres elementos:

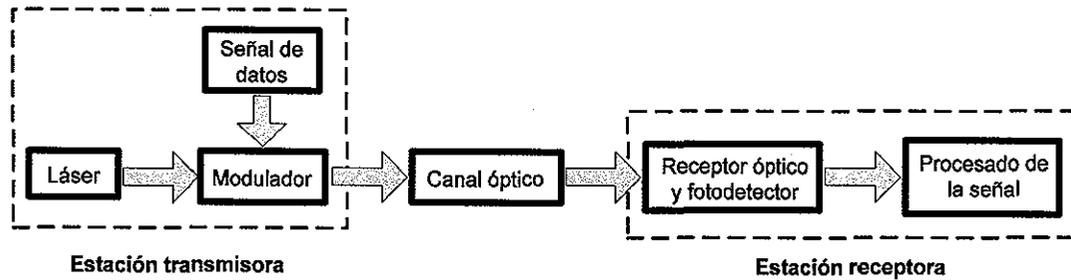


Figura 1. Elementos básicos de un esquema de comunicaciones ópticas.

En un sistema óptico de comunicaciones antes de inyectar la señal óptica al canal, ya sea fibra óptica o de carácter inalámbrico, la intensidad, la frecuencia o la fase de dicha señal es manipulada con respecto a los bits de información que se desean transmitir, esto es con la intención de adecuar la señal al canal de comunicación, naturalmente la técnica empleada en la etapa de recepción depende de la modulación utilizada, los sistemas ópticos de comunicación pueden ser clasificados en dos categorías debido a su esquema de recepción: receptores coherentes y receptores no coherentes [Gagliardi, 1976].

II.2 Sistemas ópticos no coherentes

Los receptores no coherentes corresponden a la mayoría de los sistemas ópticos de comunicaciones que operan actualmente, su esquema de modulación es relativamente sencillo pues en ellos una secuencia de datos modula la intensidad de una portadora óptica, la cual es recibida por un foto-receptor (diodo PIN o fotodiodo de avalancha, APD por sus siglas en inglés), la intensidad es modulada en la forma de conmutación encendido-apagado (OOK, por sus siglas en inglés), dicho esquema es referido como modulación de intensidad con detección directa (IMDD por sus siglas en inglés). La representación matemática de la señal para "1" y "0" son respectivamente:

$$E_s = A \cos \omega t \dots\dots\dots 0 < t < T \dots\dots\dots (1)$$

$$E_s = 0 \dots\dots\dots 0 < t < T \dots\dots\dots (2)$$

Donde A es la amplitud de la señal, ω es la frecuencia angular de la portadora óptica y T corresponde a la duración del bit.

En este tipo de sistemas el campo óptico recibido E_s , es convertido del dominio óptico al eléctrico mediante un foto-receptor, la expresión para la corriente generada en función del campo óptico recibido es:

$$i(t) = \Re E_s^2(t) \dots\dots\dots (3)$$

$$\Re = \frac{e\eta}{h\nu} \dots\dots\dots (4)$$

Donde la variable e representa la carga del electrón, η es la eficiencia cuántica, h es la constante de Planck y ν corresponde a la frecuencia óptica, el termino \Re es conocido como la responsividad del fotodetector.

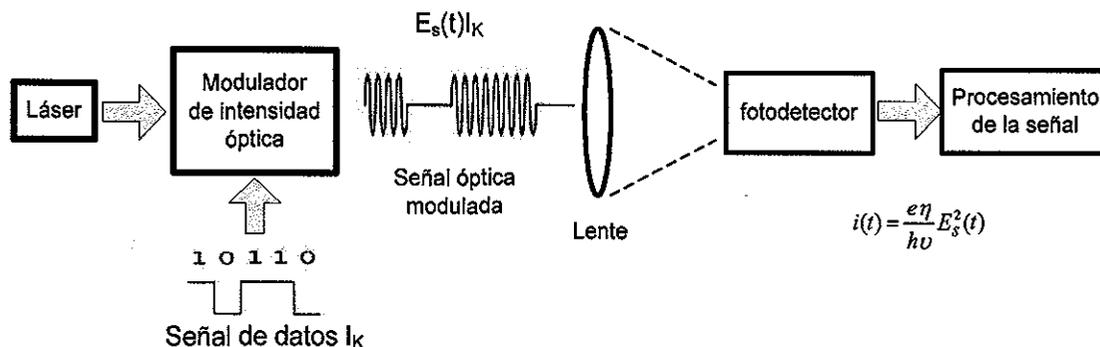


Figura 2. Sistema óptico no coherente, esquema IMDD.

Es posible considerar a la detección no coherente como un simple proceso de recolección de energía, como lo muestra la figura 2, básicamente sus únicos requerimientos son un foto-receptor acompañado de una óptica receptora

debidamente colocada, y una serie de circuitos electrónicos que permitan acondicionar la señal eléctrica recibida [Vilnrotter V. y Lau C. W., 2005].

En la actualidad se cuenta con esquemas alternativos que permiten la transmisión de la información mediante la modulación de la frecuencia o la fase de la portadora óptica, estos esquemas de transmisión son conocidos como sistemas de detección coherente debido a la relevancia que la coherencia de la fase tiene en ellos.

II.3 Sistemas ópticos coherentes

En un sistema óptico de comunicaciones, el término coherente determina que en la etapa de recepción la señal de la portadora óptica previamente modulada se mezcle con otra señal óptica proveniente de un oscilador local.

Como ya se mencionó, a diferencia de los esquemas IMDD, en los sistemas coherentes es posible realizar una modulación de la frecuencia, la fase e incluso el estado de polarización de la portadora óptica.

La figura 3 ilustra la configuración básica de un sistema óptico coherente de comunicaciones. En él puede observarse la modulación de la señal proveniente del láser mediante una señal de datos. En la etapa receptora, se tiene una mezcla de la señal transmitida con la señal óptica proveniente del oscilador local, y es el campo óptico generado por la mezcla de este par de señales ópticas quien incide sobre el elemento fotodetector. Posteriormente, la etapa de demodulación recuperará la señal de información.

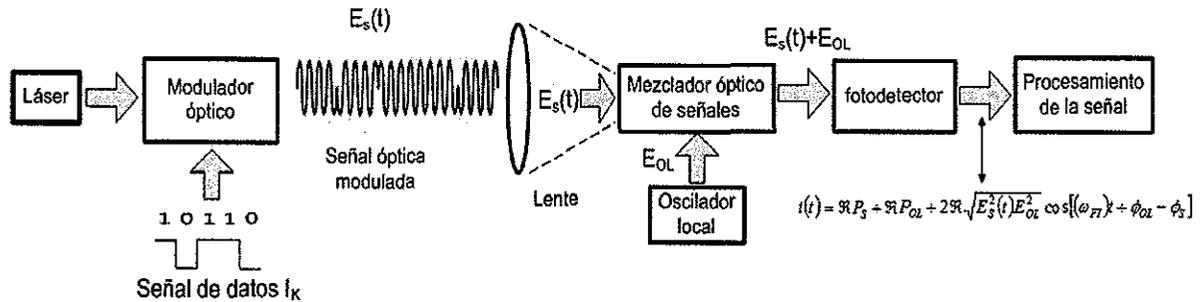


Figura 3. Sistema óptico coherente (con modulación de fase).

Llamémosle E_S y E_{OL} a la señal modulada en fase y a la señal proveniente del oscilador local respectivamente, los campos ópticos de dichas señales son representados por el siguiente par de ecuaciones:

$$E_S = \sqrt{2P_S} \cos(\omega_S t + \phi_S) \dots \dots \dots (5)$$

$$E_{OL} = \sqrt{2P_{OL}} \sin(\omega_{OL} t + \phi_{OL}) \dots \dots \dots (6)$$

Donde P_S es la potencia óptica, ω_S la frecuencia y ϕ_S la fase del campo óptico de la portadora mientras que P_{OL} , ω_{OL} y ϕ_{OL} son los parámetros correspondientes al oscilador local. El fotodetector funciona como un dispositivo de ley cuadrática, por la tanto la potencia $P(t)$ generada a la salida del mismo es calculada usando las ecuaciones (5) y (6):

$$P(t) = (E_S + E_{OL})^2 \dots \dots \dots (7)$$

$$P(t) = P_S + P_{OL} + 2\sqrt{P_S P_{OL}} \cos(\omega_{FI} t + \phi_S - \phi_{OL}) \dots \dots \dots (8)$$

Por tanto la corriente que circula a la salida del detector está dada por la expresión:

$$i(t) = \Re P_S + \Re P_{OL} + 2\Re \sqrt{E_S^2(t) E_{OL}^2} \cos[(\omega_{FI})t + \phi_{OL} - \phi_S] \dots \dots \dots (9)$$

Donde

$$\omega_{FI} = \omega_S - \omega_{OL} \dots \dots \dots (10)$$

El término expresado en (8) corresponde a la frecuencia angular intermedia ω_{FI} ,

El término de frecuencia intermedia es de suma relevancia en los sistemas ópticos coherentes, pues dos diferentes técnicas pueden ser implementadas dependiendo de si su valor es cero o diferente de cero. Este par de técnicas son conocidas como detección homodina y detección heterodina.

II.3.1 Sistemas homodinos

En este esquema de detección coherente, figura 4, el valor de la frecuencia del oscilador local, ω_{OL} , es seleccionado para ser coincidente con el valor de la frecuencia de la señal de portadora ω_S , de esta manera $\omega_{FI} = 0$, [Osche, 2002]. Sustituyendo este valor en la ecuación (9) se obtiene la siguiente expresión para la corriente generada en el fotodetector ($I = \Re P$).

$$i(t) = \Re \left[P_S + P_{OL} + 2\sqrt{P_S P_{OL}} \cos(\phi_S - \phi_{OL}) \right] \dots \dots \dots (11)$$

Es el último término de esta expresión donde se tiene la información transmitida y se hace uso de un circuito de decisión para extraerla.

De manera típica la potencia del oscilador local es mayor a la potencia de la señal de información, $P_{OL} \gg P_S$, por tanto es válido establecer $P_{OL} + P_S \approx P_{OL}$, si además se considera que la fase del oscilador local está amarrada con la fase de la señal de información, es decir $\phi_S = \phi_{OL}$, entonces la señal homodina se expresa como:

$$I_{\text{hom}}(t) = 2\Re \sqrt{P_S P_{OL}} \dots \dots \dots (12)$$

A partir de esta relación puede notarse una ventaja de la detección homodina sobre la detección directa cuya corriente generada es $I_{dd}(t) = \Re P_S(t)$. Al utilizar un esquema de detección homodina la potencia eléctrica promedio aumenta por un factor de [Sánchez López y Arvizu Mondragón, 2009]:

$$4P_{OL}\sqrt{P_S P_{OL}} \dots\dots\dots(13)$$

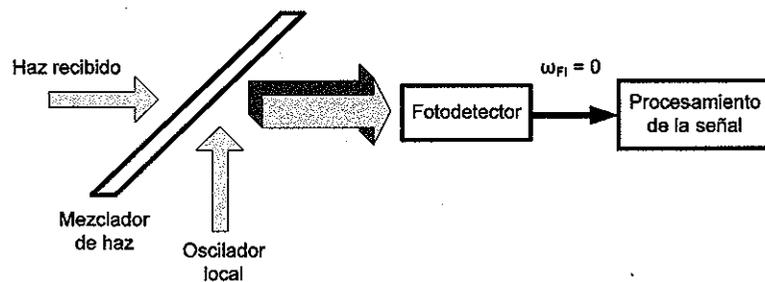


Figura 4. Esquema de un receptor homodino.

II.3.2 Sistemas heterodinios

En este tipo de sistemas (figura 5) el valor de la frecuencia del oscilador local, ω_{OL} , es seleccionado para diferir del valor de la frecuencia de la señal de información, ω_S , de tal modo que la frecuencia intermedia, ω_{FI} , tenga un valor aproximado a la región de microondas.

De la ecuación (9), que expresa la corriente que circula a la salida del fotodetector, y debido nuevamente a que $P_{OL} \gg P_S$, es decir el término de corriente directa prácticamente constante puede ser eliminado mediante un proceso de filtraje [Agrawal, 2005], la señal generada por el proceso de detección heterodino está dada por:

$$i(t) = 2\Re\sqrt{P_S(t)P_{OL}} \cos[(\omega_{FI})t + \phi_{OL} - \phi_S] \dots\dots\dots(14)$$

Al igual que en el caso de la detección homodina, la información transmitida se encuentra en los últimos términos de la ecuación anterior.

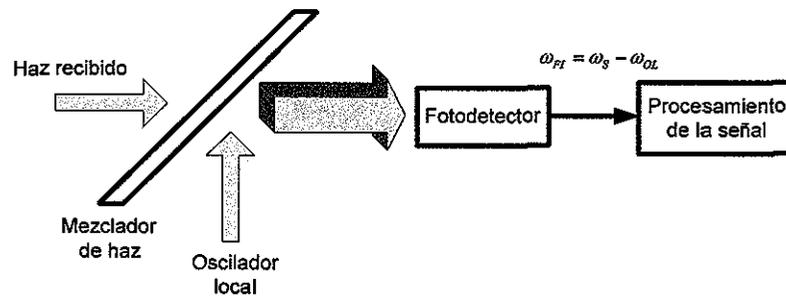


Figura 5. Esquema de un receptor heterodino.

Es importante hacer notar que el oscilador local sigue amplificando la señal recibida, de este modo mejora la relación señal a ruido (SNR), sin embargo este parámetro se reduce en un factor de 3dB's con respecto al caso homodino, esto es conocido como la penalización en potencia asociada a la detección heterodina [Agrawal, 2002].

Una manera de evaluar la prestación relativa de los receptores con detección directa y coherente es elaborando una comparación de sus sensibilidades:

$$S_{hom} = 4P_S P_{OL} \dots\dots\dots(15)$$

$$S_{het} = 2P_S P_{OL} \dots\dots\dots(16)$$

$$S_{dd} = P_S^2 \dots\dots\dots(17)$$

Donde S_{hom} , S_{het} y S_{dd} son las sensibilidades de la detección homodina, heterodina y directa respectivamente.

De las ecuaciones anteriores puede apreciarse que la detección homodina es mas sensitiva que la detección heterodina en un factor de 3 dB's, es decir, requiere la mitad de la potencia para ofrecer la misma prestación relativa, con respecto a la detección directa, es evidente que representa a la detección menos sensitiva [Kazovsky, Kagelarakis, 2006].

II.3.3 Fotodetección balanceada

En los sistemas de detección coherente, ya sean homodinos o heterodinos, existen dos configuraciones con respecto a la fotodetección:

- a) Fotodetección no balanceada. Se hace uso de un solo puerto
- b) Fotodetección balanceada. Se utiliza un fotodetector en cada puerto de salida del acoplador óptico utilizado para la mezcla de las señales E_S y E_{OL} .

En la figura 6 se muestra la configuración básica de un esquema de fotodetección balanceada, consiste de un acoplador óptico, un par de fotodetectores y un mezclador diferencial.

La señal de información E_S es insertada en una de las ramas del acoplador óptico de 180°, y la señal del oscilador local E_{OL} es insertada en la entrada restante del mismo acoplador.

La detección balanceada es utilizada por sistemas ópticos coherentes de comunicaciones como una estrategia para eliminar los términos de corriente directa (términos sin información) y maximizar así la foto-corriente de la señal de información. Al utilizar un acoplador óptico de 3dB's, se defasa 180° una de las

dos señales de entrada, E_S o E_{OL} , en uno de los puertos de salida (Kaminov, 2008).

La entrada a cada uno de los puertos del acoplador son las señales expresadas en (5) y (6). De esta manera, la salida en cada uno de los puertos del acoplador es:

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_S + E_{OL}) \dots \dots \dots (18)$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_S - E_{OL}) \dots \dots \dots (19)$$

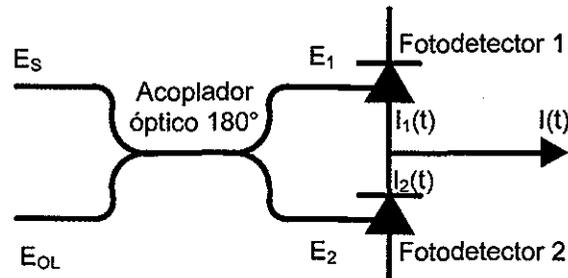


Figura 6. Esquema de detección balanceada.

La corriente generada en cada uno de los fotodetectores es:

$$I_1(t) = \frac{\Re}{2} [P_S + P_{OL} + 2\sqrt{P_S P_{OL}} \cos(\omega_{FI} + \phi_S(t) - \phi_{OL}(t))] \dots \dots \dots (20)$$

$$I_2(t) = \frac{\Re}{2} [P_S + P_{OL} - 2\sqrt{P_S P_{OL}} \cos(\omega_{FI} + \phi_S(t) - \phi_{OL}(t))] \dots \dots \dots (21)$$

Por último, la corriente generada a la salida del fotodetector balanceado es:

$$I(t) = I_1(t) - I_2(t) = 2\Re\sqrt{P_S P_{OL}} \cos(\omega_{FI} + \phi_S(t) - \phi_{OL}(t)) \dots \dots \dots (22)$$

Comparando esta ecuación (22) con la ecuación (9), es posible observar que las fluctuaciones de intensidad debidas tanto a la señal de información como del oscilador local pueden ser eliminadas con la operación diferencial del receptor

balanceado. Las expresiones anteriores fueron obtenidas suponiendo que la razón de separación de haz en el acoplador óptico es exactamente del 50%, que además la longitud de las trayectorias ópticas y eléctricas de la señal combinada son idénticas y que las polarizaciones de los campos a la entrada del acoplador son coincidentes.

II.4 Ventajas de los esquemas de detección coherente

Si bien es cierto que los sistemas ópticos coherentes brindan un mejor desempeño que los sistemas de detección directa [Betti y De Marchis, 1995], es también evidente que su implementación tiende a ser costosa y compleja [Ryu, 1995] además, para poder aprovechar la mayoría de las ventajas inherentes a dichos sistemas es necesario cumplir con algunos compromisos tales como: que la diferencia entre la longitud de onda de la portadora óptica recibida y el oscilador local óptico sea constante (igual a cero para los sistemas homodinos) y que ambos campos ópticos tengan el mismo estado de polarización para lograr una buena eficiencia en la mezcla y obtención de la señal eléctrica de batimiento lo que redundará en un mejor desempeño de la etapa de demodulación de fase. Si estas condiciones son satisfechas entre otras, entonces algunas de las ventajas en el uso de sistemas ópticos coherentes de comunicación son [Franz y Jain, 2000]:

- a) Es posible la utilización de la amplitud, la frecuencia y la fase de la señal óptica para la transmisión de la información y el uso de diversas técnicas de modulación digital.
- b) El uso del oscilador local permite una ganancia de conversión.

c) Independencia del ruido de amplitud respecto a la señal óptica recibida (límite cuántico) además de una independencia lineal de la señal detectada respecto al campo óptico incidente, esto permite hacer uso de las nociones de "receptor óptico" y "receptor adaptable", las cuales son ampliamente utilizadas en el dominio radioeléctrico.

d) Transposición frecuencial del espectro de modulación a la frecuencia intermedia (en el caso de sistemas heterodinos) o a banda base (para sistemas homodinos), esto representa la posibilidad de una sintonización fina de canal en sistemas con multicanalización por longitud de onda.

e) Selectividad espectral y directividad espacial elevadas en el receptor, esto provee un elevado rechazo a la radiación ambiental. La selectividad de los sistemas ópticos coherentes es debida a que los filtros electrónicos de banda angosta seleccionan mejor los canales con respecto a los amplios filtros ópticos. Por ejemplo: un filtro óptico típico tiene una banda de paso de 2 nm de longitud de onda, esto es equivalente a una banda de frecuencia de 240 GHz, este valor es muy alto comparado con el otorgado por un filtro eléctrico, 2 GHz, este último brinda un par de órdenes más de selectividad frecuencial, de este modo puede elevarse la densidad de canal de un sistema de multicanalización.

Capítulo III

Canal óptico atmosférico

III.1 Introducción

El interés en la utilización de los sistemas ópticos de comunicación de carácter inalámbrico se encuentra en ascenso debido a sus potenciales aplicaciones tanto espaciales como terrestres. Son diversos los beneficios y las ventajas que este tipo de tecnología aporta.

Pese al enorme avance tecnológico y la disposición de nuevos componentes, la mayor limitación de los enlaces ópticos inalámbricos o comunicaciones ópticas de espacio libre (FSO por sus siglas en inglés) es debida a las condiciones atmosféricas, donde la trayectoria del haz empleado siempre incluirá efectos de turbulencia y dispersión [Lambert y Casey, 1995].

El primer paso en el diseño de un sistema de comunicaciones a través de cualquier medio es saber que comportamiento tendrá una onda o señal al propagarse por dicho medio. Cuando se trata del canal atmosférico se tienen dos principales fenómenos: dispersión y centelleo inducido por la turbulencia atmosférica, cada uno de ellos tiene una repercusión distinta sobre la señal en cuestión [Hajjarian y Fadlullah, 2009].

Asumiendo que estos dos fenómenos son independientes, sería posible investigar los atributos de cada uno en el sistema. La figura 7 ejemplifica los efectos de cada uno de estos fenómenos sobre el perfil de intensidad del haz.

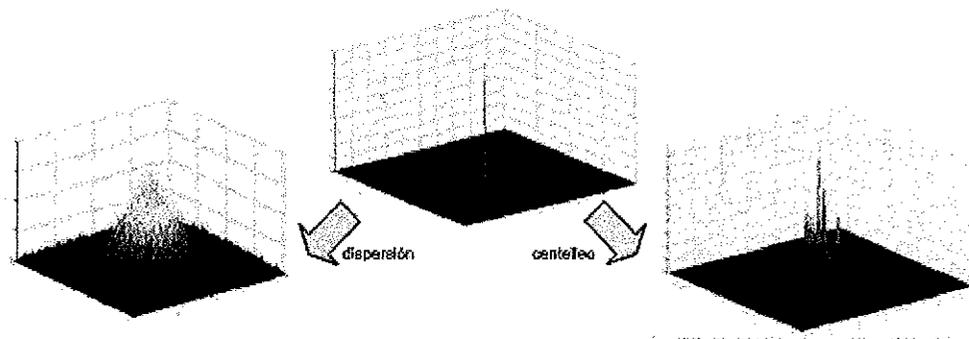


Figura 7. Perfil de intensidad de una señal óptica bajo los efectos de la dispersión y el centelleo [Kavehrad, 2011].

La interacción entre las ondas electromagnéticas (frecuencias ópticas) y la atmósfera es de carácter muy diferente al observado y ampliamente estudiado en las comunicaciones por radiofrecuencia. Un haz láser que se propaga por la atmósfera puede perder energía debido a la dispersión y absorción por moléculas y partículas.

III.2 Ventanas atmosféricas

A lo largo del texto anterior se ha mencionado la factibilidad en el uso de las frecuencias ópticas (señales infrarrojas) para la transmisión de información a través del canal atmosférico; es debido a la composición de la atmósfera que dicha propagación es posible.

La atmósfera está compuesta por partículas de oxígeno y nitrógeno, es el clima el que determina la temperatura, distribución y densidad de los gases presentes, y es importante agregar la posible presencia de algunos otros componentes debido a los niveles de contaminación de cada área específica, todo esto en conjunto es lo que repercute en la absorción y dispersión de los fotones del infrarrojo a lo largo de la propagación [Brusselbach et al 2005].

Si bien no es posible alterar la física de la atmósfera, si es posible tomar ventaja en función de la longitud de onda a transmitir y de este modo, reducir las repercusiones en la calidad de los sistemas ópticos inalámbricos.

Como puede observarse en la figura 8, en la región de los $1.5\mu\text{m}$ existe una ventana atmosférica, es decir un intervalo propicio para la propagación de la luz. En esta misma figura es posible observar que en el intervalo de $0.7\mu\text{m}$ – $2.0\mu\text{m}$ la absorción es dominada por vapor de agua, mientras que en el intervalo $2.0\mu\text{m}$ – $4.0\mu\text{m}$ la absorción es debida al bióxido de carbono en combinación con el agua.

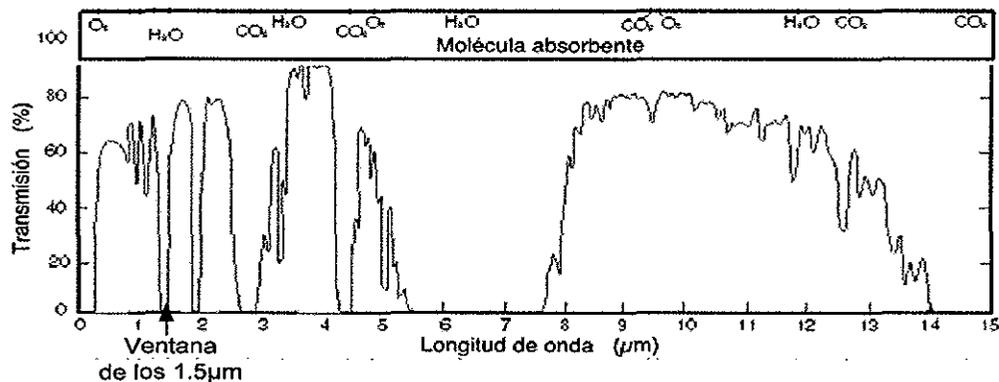


Figura 8. Ventanas atmosféricas.

Como es bien sabido, la fibra óptica y diversos componentes relacionados con ella tienen como longitud de onda de operación los $1.5\mu\text{m}$. El que se cuente con una ventana atmosférica alrededor de este mismo valor es de vital importancia, pues de este modo es posible la utilización de la mayoría de los dispositivos ópticos desarrollados y a la vez es viable relacionar los sistemas ópticos inalámbricos con la vasta infraestructura de fibra óptica actual. La propagación de un haz láser a través de las nubes, la niebla y los aerosoles es básicamente un problema de dispersión, las nubes formadas por partículas de agua tienen un tamaño comparable con las longitudes de onda empleadas en las comunicaciones ópticas.

En las comunicaciones ópticas es posible modelar a la señal como un conjunto de fotones. Cada uno de estos fotones se propaga por el medio hasta interactuar con una partícula. En este punto, el fotón es desviado y por tanto la dirección de su propagación es alterada, el fotón continúa en esta nueva dirección hasta que choca con una nueva partícula y el proceso se repite [Hajjarian y Fadlullah, 2009]. De acuerdo a la teoría Mie, la cual pretende relacionar lo anterior con la propagación en el medio atmosférico, la dirección de la propagación en tres dimensiones está dada por la función de distribución de probabilidad conocida como función de fase. En otras palabras, la función de fase es la PDF del ángulo sólido $\Psi = (\theta, \varphi)$ y está normalizado para que su integral sobre todo el ángulo sólido sea unitaria.

$$\int_{4\pi} P(\theta) d\psi = \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} P(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi = 1 \dots \dots \dots (23)$$

Dado que el ángulo azimut de dispersión está uniformemente distribuido entre $[0, 2\pi]$, la función de fase puede ser graficada únicamente en función del ángulo θ , la figura siguiente, 9, muestra la función de fase para diferentes tipos de nubes. Este es un modelo complicado pues requiere un pleno conocimiento de las características del medio atmosférico.

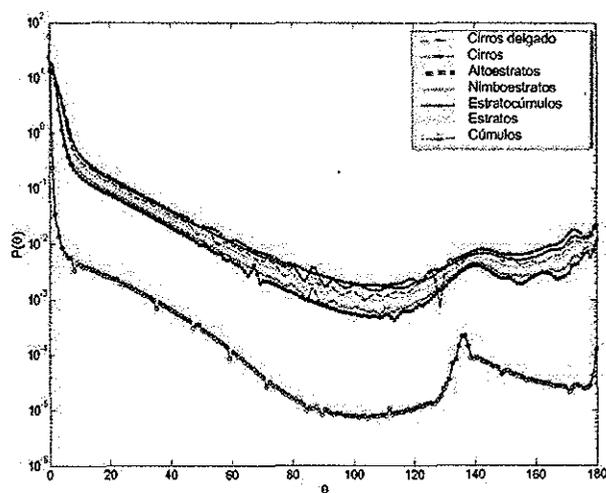


Figura 9. Función de fase para diversos tipos de nubes [Hajjarian y Fadlullah, 2009].

III.3 Perturbaciones atmosféricas

Una señal óptica que se propaga en un medio no guiado puede verse afectada por diversos factores debido a las longitudes de onda asociadas a este tipo de esquemas [Popoola et al, 2008]. Los factores predominantes que degradan el desempeño de los sistemas ópticos inalámbricos son la absorción, la dispersión y las variaciones en el índice de refracción [Andrews, 2005]. La absorción debida al vapor en conjunto con la dispersión causada por pequeñas partículas de agua (niebla) provocan una reducción en la potencia óptica de la señal incidente en el receptor. De lo anterior puede notarse la obvia susceptibilidad de los enlaces ópticos a las condiciones climáticas. Algunos de los fenómenos que pueden ser asociados a dichas perturbaciones son: la niebla, la lluvia, los gases atmosféricos, figura 10.

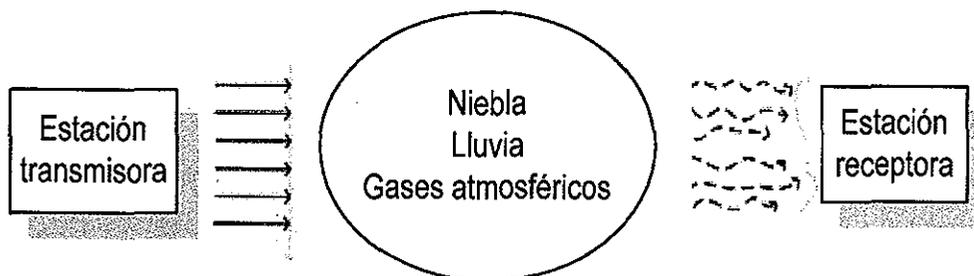


Figura 10. Fenómenos asociados a las perturbaciones atmosféricas.

Niebla

Para las comunicaciones ópticas inalámbricas este es el fenómeno de mayores repercusiones, esto es debido a la relación entre el tamaño de las partículas (gotas) y la longitud de onda (infrarrojo) empleada en estos enlaces [Hemmati, 2004]. Si se toma en cuenta la estrecha relación entre la densidad de la niebla y el

parámetro visibilidad, es posible definir tres niveles: neblina densa (0.05 – 0.2Km), neblina media (0.2 - 1Km) y neblina ligera (1 – 5Km).

La atenuación en función de la visibilidad es expresada en la siguiente ecuación:

$$L_v = \exp\left[\frac{-3.9}{V}\left(\frac{\lambda}{.55}\right)^m L\right] \dots\dots\dots(23)$$

Donde V es la visibilidad [Km], L es la distancia que el haz se propaga y m es la distribución del tamaño para las gotas de agua que conforman dicha niebla.

Lluvia

El impacto de esta condición climática en los sistemas ópticos de comunicación es menor en relación con el de la niebla, esto es debido a que el tamaño de las gotas de lluvia (200 μm -2000 μm) es significativamente mayor que el de la longitud de onda empleada en las comunicaciones ópticas inalámbricas [Wildebrand y Ghuman, 2002].

Gases atmosféricos

La dispersión causada por los gases presentes en la atmósfera puede ser definida como el redireccionamiento o la redistribución de luz a lo largo de la trayectoria del enlace. Es posible asociar un coeficiente de absorción para las partículas involucradas que a la vez presenta dependencia del tamaño de las mismas. De manera muy general las partículas absorbentes pueden ser clasificadas en dos grupos: absorbente molecular, que se refiere a los gases y absorbente aerosol, donde es posible incluir el polvo, el humo y gotas de agua [Wildebrand y Ghuman, 2002].

III.4 Turbulencia atmosférica

Las inhomogeneidades en la temperatura y las variaciones de presión en la atmósfera provocan variaciones en el índice de refracción, lo cual distorsiona las señales ópticas que se propagan a través de dicho medio. Este efecto es conocido como turbulencia atmosférica. Como ya se mencionó, 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 [Tatarski, 1970].

La turbulencia en los enlaces ópticos inalámbricos induce desvanecimientos similares a los desvanecimientos por multitrayectoria presentes en los sistemas de radiofrecuencia [Zsu y Kahn 2002].

El calentamiento de las masas de aire cerca de la superficie terrestre al ser mezcladas por efecto de la convección y el viento generan turbulencia atmosférica, pues dichas masas de aire tienen diferentes valores de presión y temperatura unas de otras, los efectos de la turbulencia tienden a ser más significativos cuando la distancia del enlace sobrepasa 1Km.

Una manera de describir la turbulencia es mediante el modelo de Kolmogorov, el cual representa a la turbulencia mediante remolinos de tamaños diversos, los remolinos de mayor tamaño se dividen en remolinos mas 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] como lo muestra la figura (11), donde L_0 corresponde a la escala exterior mientras que l_0 a la escala interior.

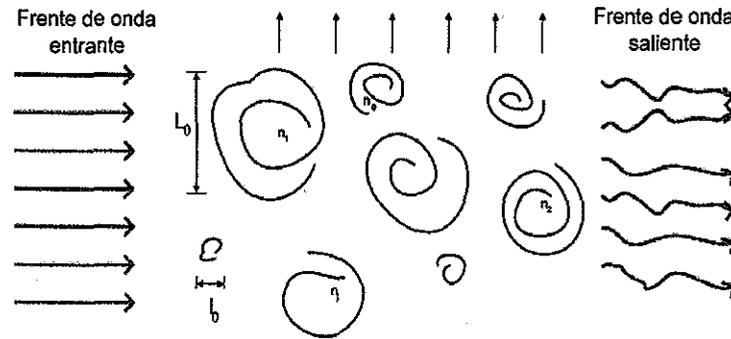


Figura 11. Turbulencia representada en el modelo de Kolmogorov.

Otra forma de modelar la turbulencia atmosférica es en función del índice de centelleo, de manera concreta este es el modelado del que hace uso este trabajo de tesis, en seguida se describe dicho modelo de manera mas explícita.

III.5 Centelleo en los enlaces de comunicaciones ópticas

Las fluctuaciones en la señal detectada provocadas por las variaciones aleatorias en el índice de refracción a lo largo del canal son conocidas como el centelleo. La magnitud del centelleo puede variar a lo largo de un día, teniendo estadísticamente su máximo alrededor del medio día (figura 12). El ruido presente en la potencia recibida producto del centelleo tiene como resultado un incremento en la tasa de bit erróneo (BER por sus siglas en inglés), el centelleo puede inducir desvanecimientos que provoquen la pérdida total de la comunicación entre emisor y receptor. Las investigaciones elaboradas en décadas anteriores permiten estimar los efectos de las fluctuaciones causadas por la turbulencia atmosférica mediante la relación con el parámetro de la constante de la función de estructura del índice de refracción del aire, C_n^2 . De esta manera es posible expresar el nivel de turbulencia atmosférica en función del índice de centelleo.

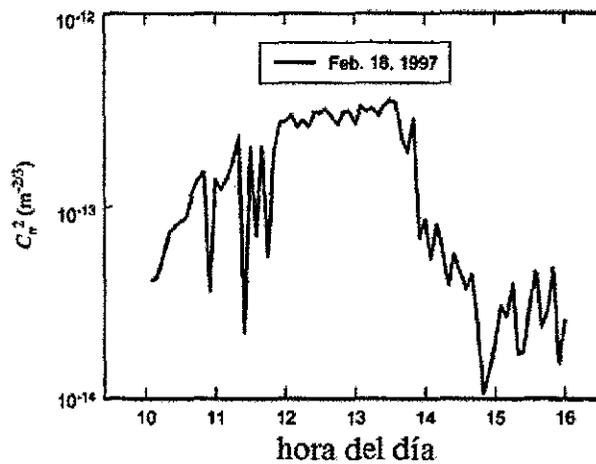


Figura 12. Variación de la constante de estructura del índice del aire a lo largo del día [Andrews y Phillips, 2005].

Para la aplicación de las comunicaciones ópticas inalámbricas, ya sean los llamados enlaces horizontales (terrestres), o los de trayectoria inclinada tales como enlace de subida (estación terrena – espacio) y enlace de bajada (espacio – estación terrena) presentes en las comunicaciones ópticas satelitales, es importante contar con estimaciones cuantitativas de la estadística asociada con la turbulencia atmosférica, figura 13.

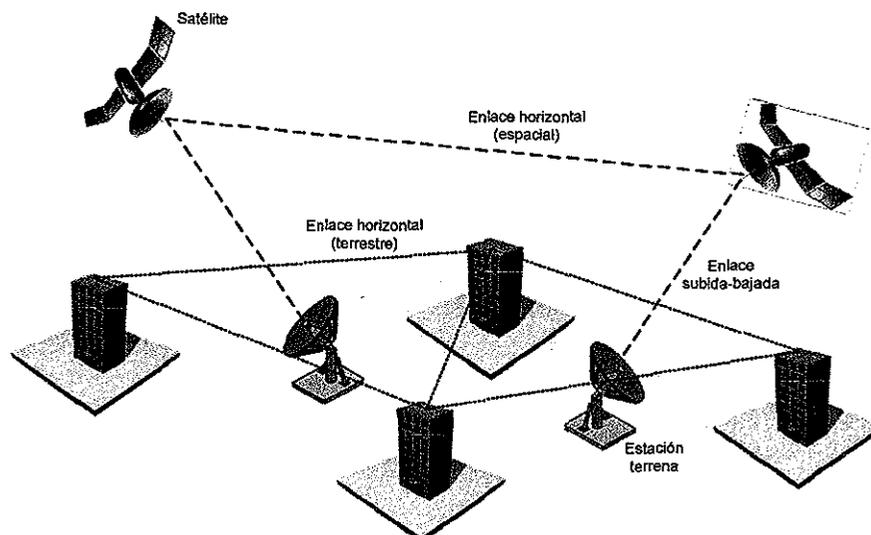


Figura 13. Enlaces ópticos horizontales y de trayectoria inclinada (subida y bajada).

Una medida de la turbulencia es 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:

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T} \right)^2 C_T^2 \dots \dots \dots (24)$$

Donde P es la presión atmosférica expresada en [milibars], T corresponde a la temperatura expresada en [°Kelvin], 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, con una distancia de propagación fija y una altura constante por encima del nivel de suelo es válido suponer C_n^2 prácticamente constante.

Valores de C_n^2 menores de 10^{-17} son considerados como un nivel de turbulencia débil, valores superiores 0.5×10^{-13} son clasificados en el régimen de turbulencia fuerte [Goodman, 1985].

Otra medición del nivel de turbulencia es la varianza de Rytov, este parámetro contempla el valor de la constante de la función de estructura del índice de refracción del aire, C_n^2 y la longitud de la trayectoria recorrida por el haz, su expresión es la siguiente:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \dots \dots \dots (25)$$

Donde $k=2\pi/\lambda$ es el número de onda óptico y L es la distancia en [metros] entre la estación emisora y receptora.

La propagación de un haz láser a través del canal turbulento presenta fluctuaciones de radiación tanto temporales como espaciales. Es posible que un

sistema óptico de comunicaciones integre alguna técnica en detección para cubrir todo el espacio de interés en el plano de recepción, pero se sigue lidiando con las fluctuaciones temporales en la intensidad. El desvanecimiento de la señal por debajo de cierto umbral definido degrada el desempeño del sistema.

Otro parámetro estadístico asociado a la turbulencia atmosférica y al centelleo descrito en el párrafo anterior es el índice de centelleo definido por:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \dots \dots \dots (26)$$

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 monitoreo. Para un nivel de turbulencia débil es válido establecer igualdad entre el índice de centelleo y la varianza de Rytov [Andrews y Phillips, 2005], es decir:

$$\sigma_I^2 = \sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \dots \dots \dots (27)$$

Para los regímenes de turbulencia media y fuerte existe otra relación entre el índice de centelleo y la varianza de Rytov:

$$\sigma_I^2 = 0.4 \sigma_R^2 \dots \dots \dots (28)$$

El modelado anteriormente enunciado no es la única manera de medir los efectos de la turbulencia, otra manera de cuantificar el efecto de la turbulencia atmosférica sobre una señal óptica propagada a través del espacio libre esta en función de la distorsión que dicha imagen sufra al propagarse por el medio atmosférico. Esta técnica es empleada en el diseño de telescopios, 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 aberrado, figura 14.

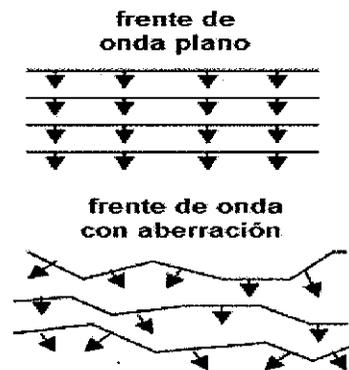


Figura 14. Frente de onda plano y frente de onda aberrado.

El parámetro de Fried, r_0 , es 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. De esto 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 (Point Spread Distribution en inglés), 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. (Ver figuras 15, 16 y 17)

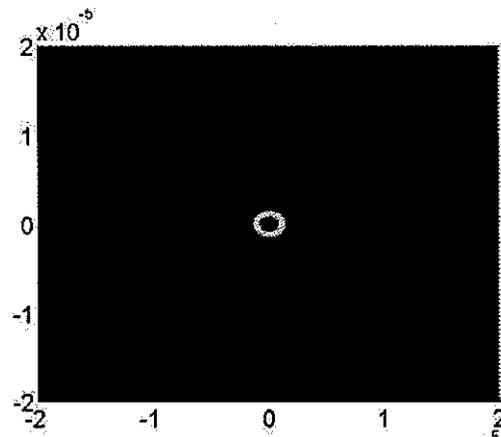


Figura 15. PSF en presencia de turbulencia débil, $D/r_0 < 5$ [Hajjarian y Fadlullah, 2009].

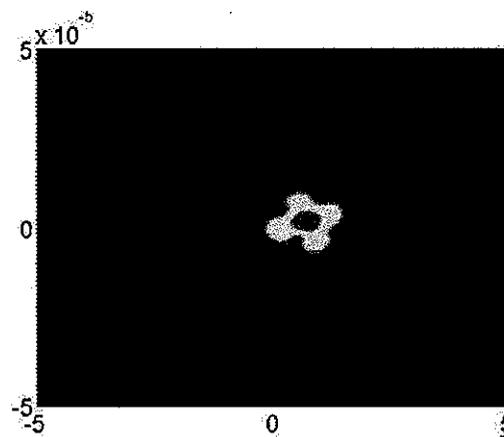


Figura 16. PSF en presencia de turbulencia media, $5 < D/r_0 < 10$ [Hajjarian y Fadlullah, 2009].

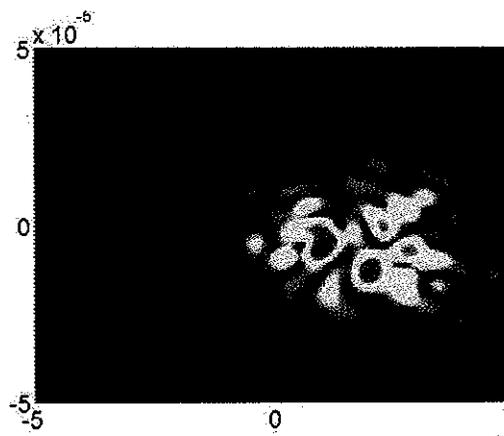


Figura 17. PSF en presencia de turbulencia fuerte, $10 < D/r_0 < 15$ [Hajjarian y Fadlullah, 2009].

Las figuras 15, 16 y 17 muestran la distribución de esparcimiento para diversos niveles de turbulencia. De ellas es posible apreciar que conforme el valor de D/r_0 incrementa, la distribución de intensidad luce mas distorsionada [Hajjarian y Fadlullah, 2009].

III.6 Efectos de la turbulencia atmosférica en el estado de polarización

Ya se han mencionado los efectos que la turbulencia atmosférica tiene en el perfil de intensidad de una señal, pero el estado de polarización es otro parámetro que puede ser afectado. Existen cuatro posibles impactos de un medio aleatorio sobre la polarización de un haz láser (figura 18) cuando un haz láser con determinado estado de polarización (SOP por sus siglas en inglés) se propaga a través en un medio aleatorio, en el receptor es posible observar cambios en dicho SOP:

- Un posible impacto es la despolarización parcial o absoluta del haz láser.
- Otra posibilidad es que la atmósfera actúe como un medio birrefringente, es decir, que las componentes x y y del campo eléctrico de la onda experimenten diferentes velocidades de fase, el resultado es un estado de polarización elíptica en la etapa receptora.
- Es probable que se presente una rotación en el ángulo de una polarización lineal, entonces ocurriría un defasamiento entre la dirección del vector del campo eléctrico en TX y su correspondiente en RX.
- La otra posibilidad es que la atmósfera actúe como un filtro de polarización, permitiendo la transmisión de un SOP en particular y atenuando el respectivo SOP ortogonal.

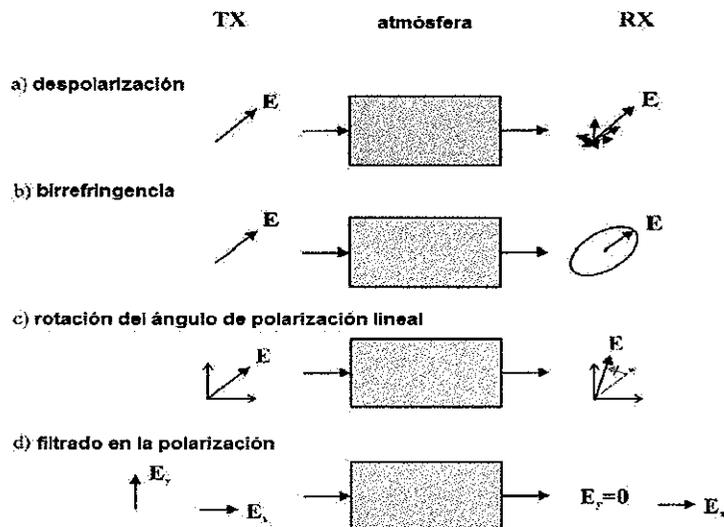


Figura 18. Posibles efectos de la atmósfera en la polarización de una señal.

Los posibles efectos pueden ser estimados con el uso de la polarimetría, la cual es un campo de la astronomía, donde la distribución de la polarización indica la dirección del campo galáctico y la dependencia de la longitud de onda proporciona información sobre la forma y el tamaño del objeto. En la polarimetría, las estrellas de polarización bien conocida son observadas para la calibración y caracterización de los dispositivos. Algunas de las mediciones proporcionadas por la polarimetría, figura 19, son el grado de polarización (DOP por sus siglas en inglés) y el ángulo de polarización lineal denotado como azimut, η .

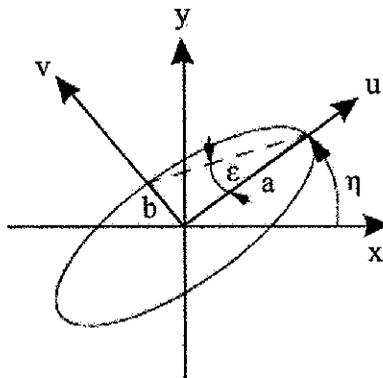


Figura 19. Parámetros importantes en la polarización de una señal. η es el ángulo azimut y ϵ es la elipticidad.

Se tienen reportes sobre la repercusión de la turbulencia atmosférica en función de las mediciones obtenidas por sistemas de polarimetría ubicados en estaciones terrenas (EUA y Chile), en dichos estudios para determinar los efectos de la atmósfera en la polarización de una señal se eligen diversos cuerpos celestes cuyo estado de polarización es bien conocido, esto es debido a los análisis de polarimetría elaborados concretamente por el HST (Hubble Space Telescope), debido a que la propagación de la luz es en el espacio libre estos resultados no involucran el efecto atmosférico. Posteriormente los resultados obtenidos en el telescopio espacial son comparados con los resultados obtenidos por las estaciones terrenas y de esa manera es posible determinar el efecto de la turbulencia atmosférica en la polarización de una señal. Los resultados arrojados por dichos estudios son básicamente:

El máximo cambio que el parámetro η experimenta por efecto de la turbulencia atmosférica es $\Delta\eta=13^\circ$, mientras que el efecto en el grado de polarización es mínimo, $\Delta DOP=0.275\%$, esto quiere decir que la turbulencia atmosférica no causa una despolarización de la luz pero si representa un ligero efecto de birrefringencia en la señal óptica [Grosinger, 2008].

III.7 Presupuesto de potencia

Si bien es cierto que el presente trabajo de tesis se enfoca en el estudio de los efectos de la turbulencia atmosférica en los sistemas ópticos inalámbricos existen otros factores que deben ser considerados en el diseño de un sistema de este tipo. El presupuesto de potencia para un enlace óptico contempla los deterioros que afectan el desempeño del sistema tales como: potencia de transmisión finita, pérdidas y ganancias por antenas ópticas, sensibilidad del fotodetector, pérdidas por propagación, el ruido electrónico, el ruido de fase proveniente de las fuentes ópticas, entre otros.

Es necesario establecer un presupuesto de potencia (M), dado por la siguiente expresión:

$$M = L_f - L_{tur} - L_{prop} - L_{poin} - L_{atm} - M_s \dots \dots \dots (29)$$

Donde:

L_f : margen de desvanecimiento

L_{tur} : pérdidas por turbulencia

L_{prop} : pérdidas por propagación

L_{poin} : pérdidas por apuntamiento

L_{atm} : pérdidas atmosféricas

M_s : margen del sistema

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. En seguida se describen cada una de las pérdidas asociadas al presupuesto de potencia.

Margen de desvanecimiento

Está definido como el monto total de las pérdidas permitidas por el sistema para llevar a cabo el enlace óptico, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$L_f = P_{Tx} - P_{sens} \dots \dots \dots (30)$$

Donde P_{Tx} y P_{sens} corresponden a la potencia transmitida y la potencia mínima requerida para cierto BER respectivamente

Pérdidas por propagación

Están dadas por la siguiente expresión:

$$L_{prop} = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi Z}{\lambda} \right)^2 \dots\dots\dots(31)$$

Z es la distancia entre TX y Rx y λ es la longitud de onda del láser empleado.

Pérdidas por turbulencia

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

$$L_{turb} = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\Omega_0}{\Omega_{turb}} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(32)$$

Donde

$$\Omega_0 = \frac{2\lambda}{\pi D_{Lens_Tx}} \dots\dots\dots(33)$$

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

$$\Omega_{turb} = \frac{\lambda}{\pi \rho_o} \dots\dots\dots(34)$$

ρ_o es el radio de coherencia.

Pérdidas por apuntamiento

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

$$L_{pointing} = 44.3229 \left(\frac{\phi_c}{\Omega_0} \right)^2 \dots\dots\dots(35)$$

Donde ϕ_c es el ángulo máximo del haz transmisor limitado por difracción, y esta dado por:

$$\phi_c = \frac{\lambda}{2D_{Lens_Tx}} \dots\dots\dots(36)$$

Perdidas atmosféricas

Describen la atenuación que la luz sufre al viajar por la atmósfera debido a la absorción y a la dispersión [Lambert, 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:

$$L_{atm} = 10 \log \tau \dots\dots\dots(37)$$

Donde:

$$\tau = \frac{I_d}{I_{Tx}} = \exp(-\gamma Z) \dots\dots\dots(38)$$

I_d/I_{Tx} es la relación entre la intensidad detectada y la transmitida y γ es el coeficiente de atenuación. Este coeficiente está dado por la suma de cuatro parámetros:

$$\gamma = \alpha_{moleculas} + \alpha_{aerosol} + \beta_{moleculas} + \beta_{aerosol} \dots\dots\dots(39)$$

α es el coeficiente de dispersión de las moléculas y los aerosoles y β es el coeficiente de absorción, estos últimos valores dependen de la longitud de onda que se propague [Lambert, 1995].

Pérdidas geométricas y ganancias de antenas Tx y Rx

Las pérdidas por trayectoria geométrica de un enlace óptico inalámbrico dependen del ancho del haz empleado como transmisor, de la longitud del enlace y del tamaño de la antena receptora, figura 20.

$$L_{geo} = 20 \log \left(\frac{\theta Z}{D_{Lens_Rx}} \right) \dots\dots\dots(40)$$

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

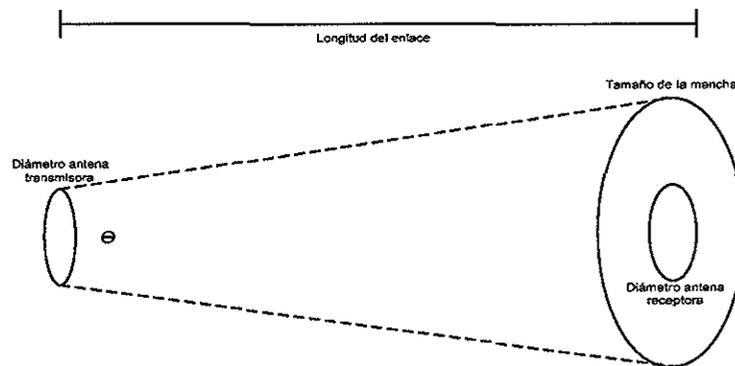


Figura 20. Pérdidas geométricas.

Los elementos ópticos utilizados en un enlace óptico inalámbrico desempeñan un papel fundamental, por lo que su diseño es de suma importancia. Las ganancias de las antenas transmisora y receptora. (ganancias con respecto a una antena isotrópica) están dadas por el siguiente par de ecuaciones:

$$G_{Tx} = 10 \log_{10} \left(\frac{2}{\Omega_0} \right)^2 \dots\dots\dots(41)$$

$$G_{Rx} = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \right) \dots\dots\dots(42)$$

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

Capitulo IV

Diversidad espacial en comunicaciones ópticas

IV.1 Introducción

Como se ha mencionado a lo largo de este documento las comunicaciones ópticas inalámbricas ofrecen diversas prestaciones que los hace atractivos, no sólo permiten establecer enlaces con distancias desde algunos cientos de metros hasta incluso decenas de kilómetros cuando se trata de un enlace estación terrena-satélite, también permiten alcanzar elevadas tasa de transmisión [Chan, 2006].

Es típico que los cambios de temperatura del orden de 1°K en la atmosfera provoquen fluctuaciones en el índice de refracción del medio y con esto provocar severos desvanecimientos en la señal recibida, dichos desvanecimientos pueden tener un intervalo de duración entre 1-100 μs , si se trata de un sistema que opera a una tasa de transmisión de gigabits por segundo es posible la pérdida de 10^9 bits consecutivos, lo cual se traduce en una elevada tasa de bit erróneo y por tanto de sistema con un bajo desempeño.

La diversidad espacial es una atractiva alternativa pues basándose en esta técnica es posible lidiar con los desvanecimientos y mitigar los efectos del medio atmosférico sobre la señal recibida. En contraste con la diversidad espacial para sistemas radioeléctricos, la diversidad espacial para sistemas ópticos inalámbricos puede ser implementada de manera compacta debido a que la longitud de coherencia de las señales utilizadas es del orden de los centímetros. Además de que los múltiples transmisores y receptores utilizados sólo necesitan ser situados a unos centímetros de distancia unos de otros para presentar canales con desvanecimientos independientes.

IV.2 Tipos de diversidad

Las llamadas técnicas de diversidad son empleadas para mejorar el desempeño de los sistemas que se ven afectados por desvanecimiento. En vez de transmitir y recibir la señal deseada a través de un solo canal, es posible obtener M versiones de la señal deseada a través de M diferentes canales, la idea básica es que cada canal sufre diferentes desvanecimientos.

De esta manera es posible una reconstrucción de la señal enviada en función de las señales recibidas [Hourani, 2005].

Existen diferentes técnicas de diversidad empleadas en los sistemas inalámbricos; de manera general dichas técnicas son las siguientes, (figura 21):

Diversidad temporal.- para el envío de la información se utiliza siempre la misma frecuencia pero dichos envíos se realizan en diferentes periodos de tiempo, es decir, cada símbolo se transmite M veces.

Diversidad frecuencial.- en cierta forma esta técnica es opuesta a la diversidad temporal, en este caso la transmisión de la información se realiza a través de M diferentes portadoras, cada una con frecuencia específica; de este modo se realiza una transmisión simultánea de los símbolos.

Diversidad espacial.- consiste en el uso de múltiples "copias" de la señal transmitida. Para esto se hace uso de múltiples antenas en las estaciones transmisoras y/o receptoras, las cuales tienen un espaciado entre ellas para que las señales recibidas por cada una tengan diferentes desvanecimientos. Mediante el uso de esta técnica de diversidad espacial es utilizada para combatir tanto el desvanecimiento selectivo en frecuencia como el desvanecimiento selectivo en tiempo.

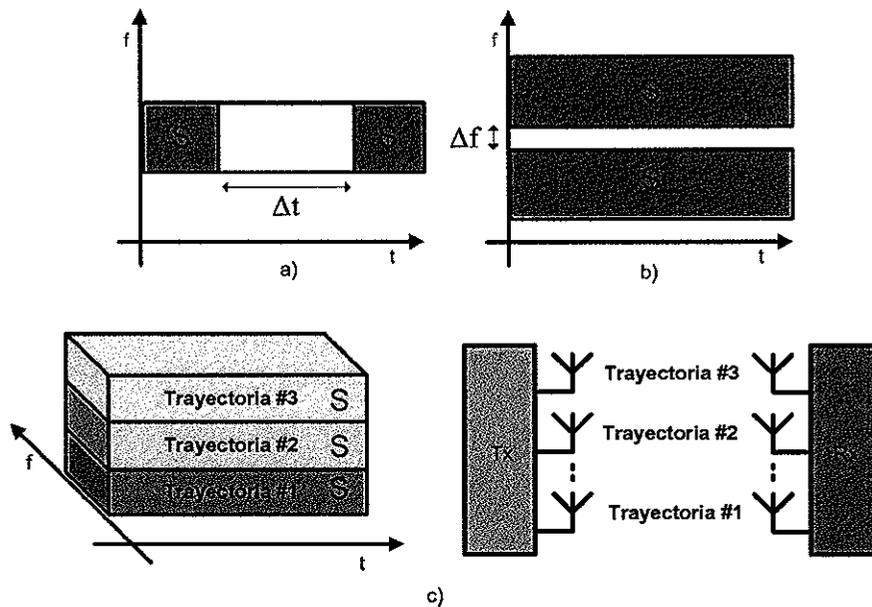


Figura 21. Técnicas de diversidad. a) diversidad temporal, b) diversidad frecuencial y c) diversidad espacial.

IV.3 Sistemas MBT-MAR y técnicas de combinación

Debido a la tendencia de importación de técnicas de los esquemas de radiocomunicación a las comunicaciones ópticas de espacio libre, una alternativa a los receptores coherentes de estructura mono-receptora, es decir con un área colectora única, son los sistemas con un área efectiva de colección múltiple, lo cual es alcanzado con arreglos de varios receptores, en los sistemas de radio frecuencia suelen llamarse sistemas MIMO (Multiple Input-Multiple Output), en el dominio de las comunicaciones ópticas estos sistemas (ver figura 22) son también conocidos como MBT-MAR (Multiple Beam Transmitter-Multiple Aperture Receiver), una de las ventajas asociadas a la utilización de la diversidad espacial es que el número de “partículas de turbulencia” sobre cada una de las trayectorias o subaperturas es menor con respecto a las que se presentarían en un esquema de apertura única. Las señales provenientes de cada uno de los receptores

pueden ser combinadas electrónicamente para mejorar el proceso de detección. De manera general, el desempeño de los sistemas de combinación mejora en función del incremento del número de subaperturas [Belmonte y Kahn, 2009]. Es importante remarcar que la combinación resultante del uso de un esquema de diversidad espacial consiste en recibir redundantemente la misma señal de información en los canales del sistema y beneficiarse de la baja probabilidad de grandes desvanecimientos simultáneos en cada uno de los diversos canales.

Entonces, una manera de mitigar los efectos de la dispersión y la turbulencia es empleando múltiples transmisores y múltiples receptores, de esta forma es posible beneficiarse con la recepción de múltiples copias independientes de la señal enviada [Shin y Chan, 2002]. Como se mencionó anteriormente, estas múltiples señales son provenientes de diversas trayectorias ópticas, pero en los enlaces ópticos de comunicación es igualmente válido plantear el uso de diversidad frecuencial (el uso de diversas longitudes de onda finamente separadas), o el uso de diversas ranuras de tiempo, tal y como se utiliza en los sistemas de radiofrecuencia.

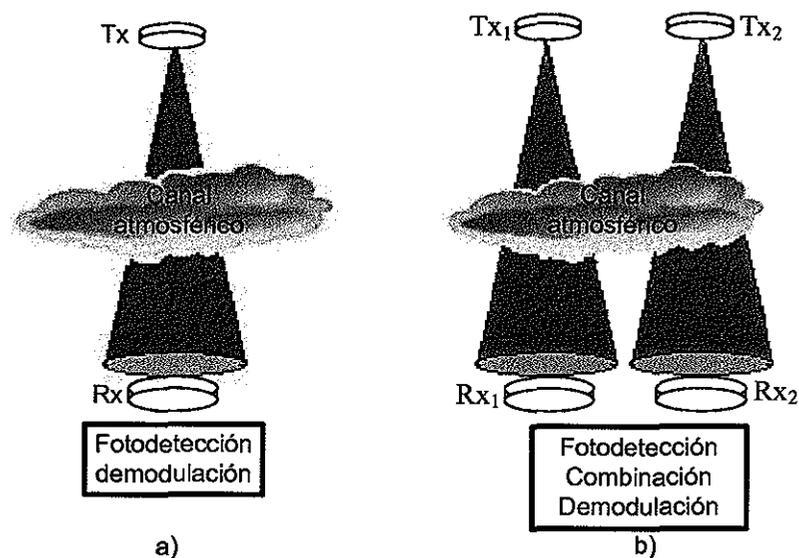


Figura 22. a) Sistema de apertura única b) Sistema MBT-MAR.

La diversidad espacial es una técnica atractiva que pretende mitigar los desvanecimientos en la señal recibida. En contraste con la diversidad espacial para los sistemas inalámbricos, la diversidad espacial en sistemas ópticos puede ser implementada fácilmente debido a que la longitud de coherencia es del orden de centímetros, es decir, los múltiples transmisores (y receptores) pueden ser colocados a centímetros uno del otro para presentar canales con desvanecimiento independiente.

Dentro de las técnicas de combinación de las M señales recibidas se consideran tres esquemas generales, MRC, SC y EGC, figura 23.

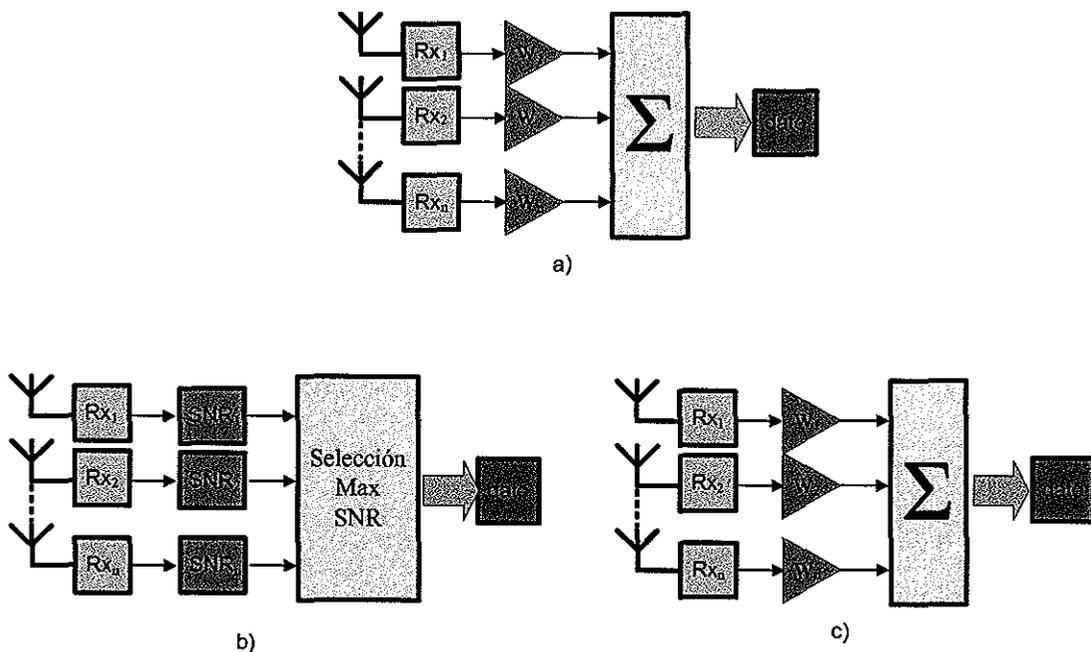


Figura 23. Esquemas de combinación en diversidad espacial.
a) MRC b) SC c) EGC.

La técnica MRC (Maximal Ratio Combining) asume un perfecto conocimiento de las amplitudes y las fases de cada rama, requiere procesamiento independiente para ajustar la amplitud y la fase de cada señal recibida y necesita que de manera

individual cada rama sea ponderada por su relación señal a ruido para después realizar una mezcla de todas las señales resultantes. El receptor MRC (ver figura 24) es el óptimo en el sentido en que se obtiene la más alta relación señal a ruido (SNR) [Gatt et al. 1996], figura 24.

Dada la posibilidad de que la señal en alguna de las ramas sea muy débil para ser tomada en cuenta, existe otro esquema de combinación en el cual no se realiza una combinación de todas las señales como en la técnica MRC, sino que se elige solo la señal proveniente de una rama, esta es la técnica SC (Selection Combining). De manera específica, la etapa combinadora tiene como función seleccionar la rama con el mayor número de fotones, es decir la señal más fuerte y no contempla el resto de las señales recibidas. Este esquema es el más simple de los arreglos receptores coherentes. Un tercer esquema en las técnicas de diversidad espacial es el EGC (Equal gain combining,) se diferencia en que las ganancias aplicadas a todas las señales son iguales, además de que solo la fase del campo del oscilador local es ajustada para coincidir con el campo de señal [Tang et al. 2010].

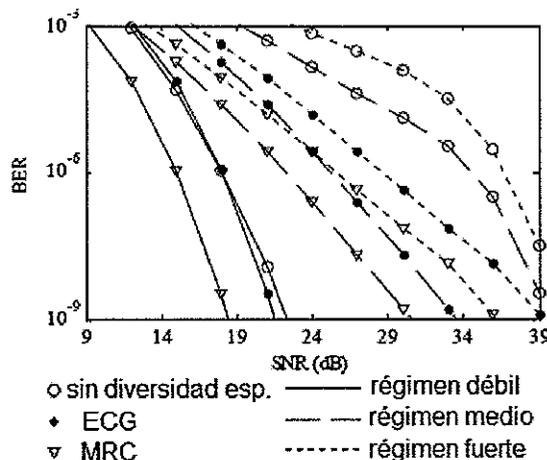


Figura 24. Relación señal a Rido (SNR) para los diferentes esquemas de combinación operando bajo diversos niveles de turbulencia con un grado de diversidad N=2.

Diversos trabajos reportan la comparación entre el desempeño de sistemas sin diversidad espacial y sistemas de múltiples antenas transmisoras y receptoras,

estos estudios afirman mejoras en la tasa de bit erróneo mediante el uso de una configuración MBT-MAR. La serie de gráficos siguientes muestran la comparación de desempeño entre sistemas SISO (Single Input Single Output) y sistemas MIMO. Para establecer una justa comparación entre los sistemas se tiene el mismo valor para la potencia total transmitida por una sola apertura que para la potencia total transmitida por los arreglos de múltiples receptores, asimismo la suma de las áreas del sistema multiapertura es igual al área total del sistema de apertura única. Cada una de las gráficas muestra la tasa de bit erróneo para un régimen de turbulencia distinto, débil, medio y fuerte (ver figuras 25, 26 y 27 respectivamente). En el caso de dichos gráficos, el nivel de turbulencia de cada uno está dado en función de la relación D/r_0 , que como se describió en el capítulo anterior, es una manera de determinar el nivel de turbulencia asociado a un enlace de comunicaciones ópticas. Dentro de cada gráfica se despliega el rendimiento para sistemas con grados diferentes de diversidad (2×2 , 3×3 , 4×4 y 7×7). El esquema de combinación empleado fue el de MRC debido a la superioridad que este presenta en relación al otro par de esquemas planteados. Las siguientes gráficas fueron extraídas de la referencia [Hajjarian, Fadlullah, 2009], y son aquí empleadas para ilustrar los beneficios del uso de la diversidad espacial en sistemas de comunicaciones ópticas.

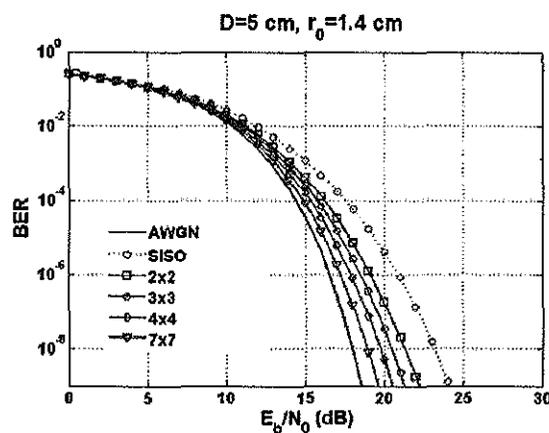


Figura 25. BER para un régimen de turbulencia débil, $D/r_0=3.57$.

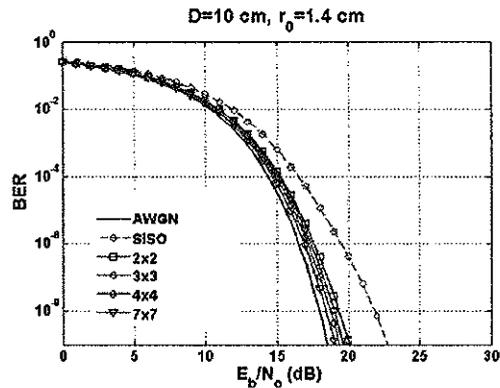


Figura 26. BER para un régimen de turbulencia media, $D/r_0=7.14$.

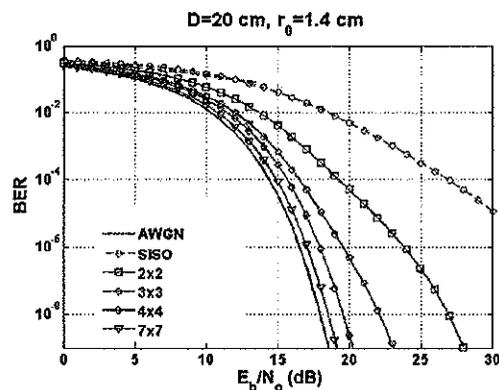


Figura 27. BER para un régimen de turbulencia fuerte, $D/r_0=14.28$.

IV.4 Probabilidad de caída del sistema

Si bien es cierto que muchos de los conceptos aplicados en las radiocomunicaciones son aplicables en el campo de las comunicaciones ópticas inalámbricas, algunos estudios proponen el uso de parámetros diversos para la evaluación del desempeño de los sistemas ópticos.

Para las comunicaciones ópticas inalámbricas es típico que la duración de los desvanecimientos profundos sea aproximadamente entre 1-100 μ s [Chan, 2006], si se opera a una alta velocidad, GHz, el resultado es la potencial pérdida de más de 10^8 bits. Esto implica el considerar la utilización de esquemas que minimicen la

probabilidad de que el receptor “observe” un desvanecimiento significativo. La medida que usualmente establece el desempeño de un enlace de telecomunicaciones es la probabilidad de error, sin embargo cuando se trata de sistemas ópticos a través del canal atmosférico la probabilidad de error promedio no representa la mejor manera de medir la calidad del sistema. Usar la probabilidad de caída del sistema como parámetro cuantificador del desempeño permite la evaluación directa de un sistema con diversidad espacial, y lo más importante es que indica cuán a menudo el desempeño del sistema esta por debajo de cierto umbral previamente establecido.

La probabilidad de caída del sistema es una métrica utilizada para evaluar el desempeño de los esquemas de comunicaciones ópticos inalámbricos, dicho parámetro representa la probabilidad de que la tasa de bit erróneo del canal sea mayor que un valor límite establecido.

Como ya se ha mencionado la configuración general de los esquemas de diversidad espacial tienen M transmisores y N receptores donde $M, N \geq 1$ o al menos uno de ellos debe ser mayor que uno, la mayoría de los esquemas MBT-MAR emplean el mismo número de elementos transmisores y receptores, es decir $M=N$. De esta manera se aporta una ganancia de potencia de diversidad espacial, definida como el decremento fraccional en la potencia transmitida con diversidad espacial comparada con la potencia requerida por un sistema sin diversidad espacial para obtener la misma probabilidad de apagón [Puryear y Chan, 2009]. Las señales entregadas por los M receptores serán combinadas de cierto modo para producir las observaciones finales que permitirán establecer la decisión de que dato fue enviado, “1” o “0”.

La probabilidad de caída del sistema definida en términos de la tasa de bit erróneo BER y el grado de diversidad del sistema, ecuación (43), es particularmente útil pues garantiza un mínimo desempeño del sistema.

Formalmente, la probabilidad de caída del sistema asociada a cierto BER, P^* , es la probabilidad de que el enlace establecido arroje un BER instantáneo mayor que el BER mínimo planteado como tolerado [Chan, 2006].

$$P_{outage}(P^*) = \Pr(P_i \geq P^*) \dots \dots \dots (43)$$

Donde P_{outage} es la probabilidad de caída del sistema, P_i es la probabilidad de tasa errónea instantánea y P^* es el desempeño mínimo que desea garantizar en función del BER. Para esquemas con grado de diversidad M y margen m , la probabilidad de caída del sistema está dada por:

$$P_{outage} \approx c_3 e^{-c_2 M (\ln m)^2} \dots \dots \dots (44)$$

Los valores de c_2 y c_3 son constantes que dependen de las condiciones de turbulencia que presente el enlace y m corresponde al margen de dB's. La figura 28 muestra valores típicos para la probabilidad de caída del sistema, en este caso se grafica contra el margen de potencia del enlace, es decir el valor de dB's que el sistema se puede permitir perder.

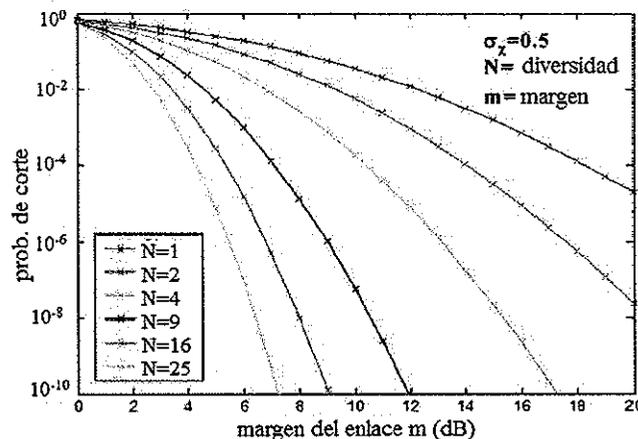


Figura 28. Probabilidad de caída del sistema para un esquema con diversidad espacial operando en un régimen de turbulencia fuerte.

La figura anterior y al igual que la siguientes, (figuras 27 y 28) fueron extraídas de la referencia [Chan, 2006], y son aquí empleadas para ejemplificar los efectos del uso de la diversidad espacial en sistemas ópticos.

Se ha mencionado que la evaluación de los sistemas ópticos inalámbricos en función de la probabilidad de caída del sistema, obedece a la ocurrencia y a la duración de los desvanecimientos profundos provocados por la turbulencia atmosférica presente en el enlace establecido: la duración de una caída del sistema está dada por la expresión siguiente:

$$E[\text{duración_la_caída}] \approx c_1 e^{-c_2 N (\ln m)^2} \dots\dots\dots(45)$$

La gráfica de la parte inferior (figura 29) muestra la relación existente entre la duración de los apagones y el margen de potencia del enlace para un enlace con diversidad espacial.

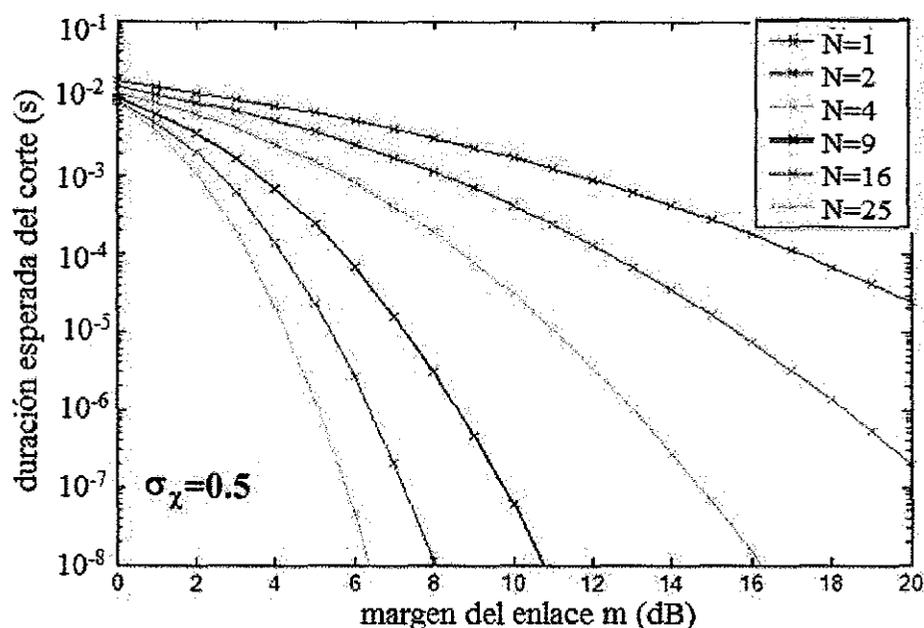


Figura 29. Duración de los cortes para sistemas con diversidad espacial operando bajo un régimen de turbulencia fuerte.

Capítulo V

Estimador-correlacionador

V.1 Introducción

Como se ha mencionado a lo largo de este documento, uno de los parámetros importantes en el desempeño de un sistema de comunicaciones es la tasa de bit erróneo, BER. La presencia inevitable de ruido aditivo del canal y del receptor implica un deterioro en dicho parámetro. En las comunicaciones coherentes, también se tiene una fuerte dependencia del ruido de fase presente en la señal recibida [Kasovsky et al. 1996].

Es evidente que los sistemas con modulación angular son los más afectados por estos efectos. [Kasovsky et al 1996, Cvijetic, 1996]. La sincronización eficiente de la fase de la portadora óptica es entonces de interés esencial, siendo su parámetro de desempeño la varianza del error de fase.

La función de sincronización es equivalente a un problema de estimación estadística de un parámetro de la señal (en nuestro caso se trata de la fase instantánea de la portadora óptica) inmerso en ruido a partir de un observable.

Este capítulo, describe el desarrollo del algoritmo empleado en la etapa receptora del esquema de comunicación empleado, es decir, el proceso de detección de la señal y el modelo matemático correspondiente a la obtención del estimado de la fase. Con la intención de ser más claro en la presentación del documento, primero se muestra el desarrollo para un sistema sin diversidad espacial y finalmente se enuncia la adaptación del modelo a un esquema con diversidad espacial.

V.2 Estimador – correlacionador

El fundamento teórico para la síntesis del sincronizador de fase, o estimador de fase óptica, es la teoría estadística de las comunicaciones [Gitlin et al. 1973, Van Trees, 1967], el cálculo de Ito y el uso de las ecuaciones de estimador y varianza. La solución de estas ecuaciones permite obtener una configuración conocida como estimador-correlacionador. A continuación se hace una descripción a detalle del estimador de fase subóptimo bajo el criterio de la máxima verosimilitud.

El estimador-correlacionador se obtiene a partir de la señal eléctrica entregada por el fotodetector balanceado, es decir el observable eléctrico, la figura 30 muestra la estructura del estimador-correlacionador.

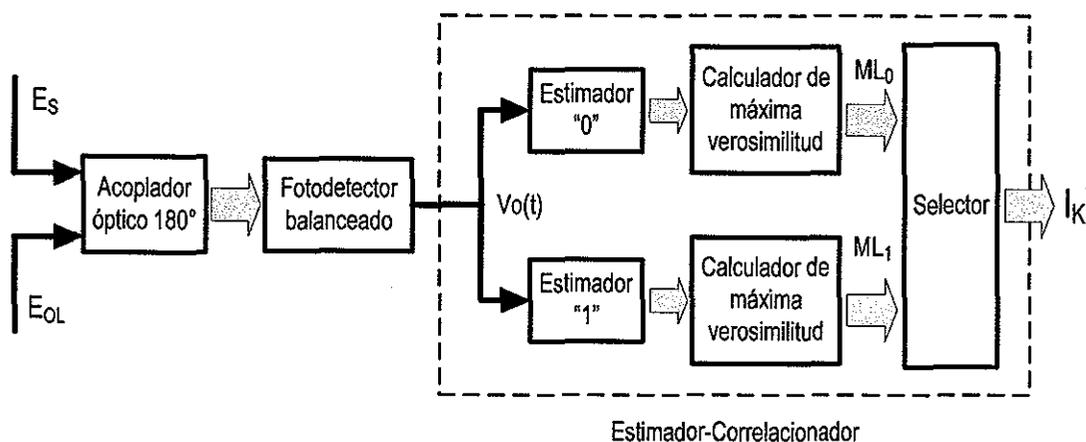


Figura 30. Esquema receptor con estimador-correlacionador.

Del primer capítulo de este documento recordemos las expresiones tanto para la señal portadora óptica como para el oscilador local.

$$E_s = \sqrt{2P_s} \text{sen}(\omega_s(t) + W_1(t) + \theta_1 + I_K(t)), \dots \dots (46)$$

$$E_{OL} = \sqrt{2P_{OL}} \text{sen}(\omega_{OL}(t) + W_2(t) + \theta_2), \dots \dots (47)$$

Donde E_s corresponde al campo óptico con fase modulada (BPSK) y E_{OL} al campo óptico del oscilador local.

P_s y P_{OL} son la amplitud de la señal óptica modulada y el oscilador local, respectivamente.

ω_s y ω_{OL} corresponden a la frecuencia angular de la señal óptica recibida y del oscilador local, respectivamente.

$W_1(t)$ y $W_2(t)$ son procesos aleatorios que modelan la inestabilidad (ruido de fase) del transmisor láser y del oscilador local, respectivamente.

Θ_1 y Θ_2 son variables aleatorias uniformemente distribuidas dentro del intervalo $(-\pi, \pi)$. Estas variables toman en cuenta la ausencia de referencia.

$I_K(t)$ representa los posibles valores de fase de la señal de modulación, para el caso del presente trabajo los valores son 0 o π .

Dado el esquema de foto-recepción implementado el observable eléctrico está dado por la siguiente expresión:

$$V_o(t) = 4Ar\Re\sqrt{P_s P_{OL}} \text{sen}[\omega_{FI}(t) + x + I_K] + n(t) \dots \dots \dots (48)$$

A es la ganancia de la etapa de foto-recepción diferencial.

r es la resistencia de carga de los foto-detectores.

\Re es la responsividad de los foto-detectores.

$$\omega_{FI} = \omega_s - \omega_{OL} \dots \dots \dots (49)$$

$$W = W_1 - W_2 \dots \dots \dots (50)$$

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 \dots \dots \dots (51)$$

$$x = W + \theta \dots \dots \dots (52)$$

$n(t)$ es el ruido aditivo de amplitud generado por el proceso de fotodetección, en este caso se trata de ruido blanco con una densidad espectral $S_n(f)$ Gaussiana especificada en la ecuación siguiente [Georghiades, 1985, Arvizu et al. 1998]:

$$S_n(f) = 2A^2 e I_{cd} r^2 = \frac{N_o}{2} \dots \dots \dots (53)$$

Donde e es la carga del electrón.

$I_{cd} = I_{cd1} + I_{cd2}$, donde I_{cd1} , $cd2$ son las corrientes generadas en la etapa de fotodetección diferencial.

Por conveniencia y con la finalidad de usar el cálculo de Ito [9], se establecen las siguientes relaciones:

$$V_o = S(x, t, I_K) + n(t) \dots \dots \dots (54)$$

Donde:

$$S(x, t, I_K) = \sqrt{2P_H} \text{sen}(\omega_{FI}t + x + I_K) \dots \dots \dots (55)$$

$$\sqrt{2P_H} = 4Ar\Re \sqrt{P_S P_{OL}} \dots \dots \dots (56)$$

Realizando algunas operaciones algebraicas se obtienen las siguientes relaciones:

$$\sqrt{2P_H} = \sqrt{(4Ar\Re)^2 P_S P_{OL}} = \sqrt{2(8A^2 r^2 \Re^2 P_S P_{OL})} \dots \dots \dots (57)$$

Por tanto el término P_H , el cual será de utilidad posteriormente, está dado por:

$$P_H = 8P_S P_{OL} A^2 r^2 \Re^2 \dots \dots \dots (58)$$

Por otro lado definiremos al observable eléctrico como:

$$V_o(t) = r(t) = \frac{dy(t)}{dt} \dots \dots \dots (59)$$

La ecuación de Ito del observable viene dada por:

$$dy(t) = V_o(t)dt = S(x, t, I_K)dt + n(t)dt \dots \dots \dots (60)$$

Usando la integral de Stratonovich y el cálculo de Ito [Meyr, 1990] es válido hacer uso de la siguiente igualdad:

$$n(t) = \sqrt{\frac{N_o}{2}} du(t) \dots \dots \dots (61)$$

$du(t)$ es un proceso de ruido blanco Gaussiano con densidad espectral $N_0/2$. Sustituyendo en (60), se tiene que:

$$dy(t) = S(x, t, I_K)dt + \sqrt{\frac{N_0}{2}}du(t) \dots \dots \dots (62)$$

El modelo sobre el cual se realiza la síntesis del receptor se encuentra definido por las ecuaciones (60 y 62). La síntesis de las ecuaciones de estimación de fase y varianza es un proceso complejo y largo, dado que el objetivo de este trabajo no es su obtención no se reporta el desarrollo, la explicación detallada del mismo puede ser consultada en la referencia [Arvizu, 2000].

Partiendo de estas expresiones se generan las ecuaciones del estimador de fase y la varianza para una aproximación Gaussiana en la estadística del ruido de fase.

Los estimados de la fase y de la varianza están dados por las expresiones:

$$x^*(t) = \int \left[\frac{\sqrt{8P_H}}{N_0} v^* \exp\left(\frac{-v^*}{2}\right) \cos(x^* + I_K) r(t) \right] dt - \int \left[\frac{2P_H}{N_0} v^* \exp(-v^*) \operatorname{sen}(2(x^* + I_K)) \right] dt \dots \dots \dots (63)$$

$$v^*(t) = \int \frac{1}{t_c} dt - \int \left[\frac{\sqrt{8P_H}}{N_0} (v^*)^2 \exp\left(\frac{-v^*}{2}\right) \operatorname{sen}(x^* + I_K) r(t) \right] dt - \int \left[\frac{4P_H}{N_0} (v^*)^2 \exp(-v^*) \cos(2(x^* + I_K)) \right] dt \dots \dots \dots (64)$$

Donde $x^*(t)$ y $v^*(t)$ son aproximaciones al valor estimado de la fase $x(t)$ y la varianza $v(t)$, respectivamente. Es a partir de estas expresiones que se lleva a cabo el cálculo de estimación del dato transmitido.

La entrada de los bloques denominados estimador es el observable eléctrico descrito en la ecuación (60), dado que se tienen dos posibilidades en los datos

transmitidos “1 lógico” o “0 lógico”, es decir, $I_K = 0$ o π , respectivamente, son necesarios dos bloques estimadores.

La salida de los bloques estimadores estará dada por:

$$S^*(x, t, I_K) = \exp\left(\frac{-v^*(t)}{2}\right) S(x^*, t, I_K) \dots \dots \dots (65)$$

$$S(x^*, t, I_K) = \sqrt{2P_H} \text{sen}(x^*) \dots \dots \dots (66)$$

Sin embargo no es suficiente alcanzar el resultado final que indique el valor verdadero del bit transmitido, tan sólo en términos de S^* , por lo tanto se recurre al criterio de máxima verosimilitud.

Los calculadores de máxima verosimilitud realizan una operación de correlación del estimado con el observable, ecuación (67). Esta operación permite obtener el mayor máximo en la probabilidad condicional inducida en el observable, dado el estimado calculado por cada estimador.

La operación de correlación debe realizarse para cada dato, por tanto la correlación está definida en un intervalo de tiempo equivalente al periodo de bit de la secuencia de datos digitales que son transmitidos.

$$\lambda(I_K) = \int_0^T S^*(t, x, I_K) V_o(t) dt \dots \dots \dots (67)$$

Las salidas de los calculadores de máxima verosimilitud $\lambda(I_K)$ son comparadas en un bloque denominado “selector”, dicho bloque elige la mayor de las magnitudes proporcionadas por los calculadores de máxima verosimilitud para el estimado “0” y para el estimado “1”. La salida del bloque “selector” es el dato estimado.

V.2.1 Adaptación del proceso de estimación de fase a un esquema con diversidad espacial

Ya se ha expuesto el desarrollo del algoritmo empleado para la estimación de fase, enseguida se describe la estructura diseñada para un esquema de comunicaciones que contemple la diversidad espacial.

Dicho esquema plantea el uso de un bloque estimador-correlacionador para cada antena receptora del arreglo con diversidad espacial, es decir, se procesarán tantos observables eléctricos, $V_o(t)$, como antenas receptoras se tengan. El algoritmo asigna un peso, P_k , a cada una de estas ramas, este peso corresponde a un cociente entre la intensidad recibida en cada rama óptica I_k y la intensidad total recibida por todas las ramas I_T , el asignar este peso a cada rama tiene la intención de ponderar cada una de las señales que arriban a la estructura receptora.

Tras multiplicar el valor numérico del estimado ML por el peso específico de cada rama se contará en cada bloque estimador con un par de salidas, el estimado ponderado para "1", PML_1 , y el estimado ponderado para "0", PML_0 , la etapa siguiente consiste en asignar a la variable S_0 el resultante de la suma de todos los estimados ponderados de "0" y de manera semejante asignar a la variable S_1 el resultado de la suma de todos los estimados ponderados de "1". Por último se realiza una comparación entre los valores de S_0 y S_1 , si S_0 resulta mayor entonces el dato estimado $D_k=0$, por el contrario, si S_1 resulta mayor entonces el dato estimado $D_k=1$.

Todo lo anterior es esquematizado en la figura 31; es importante aclarar que el valor del peso se determina para toda una trama de bits y permanece constante una vez que fue calculado, a diferencia del resto de las variables involucradas y descritas enseguida las cuales son determinadas para cada periodo de bit.

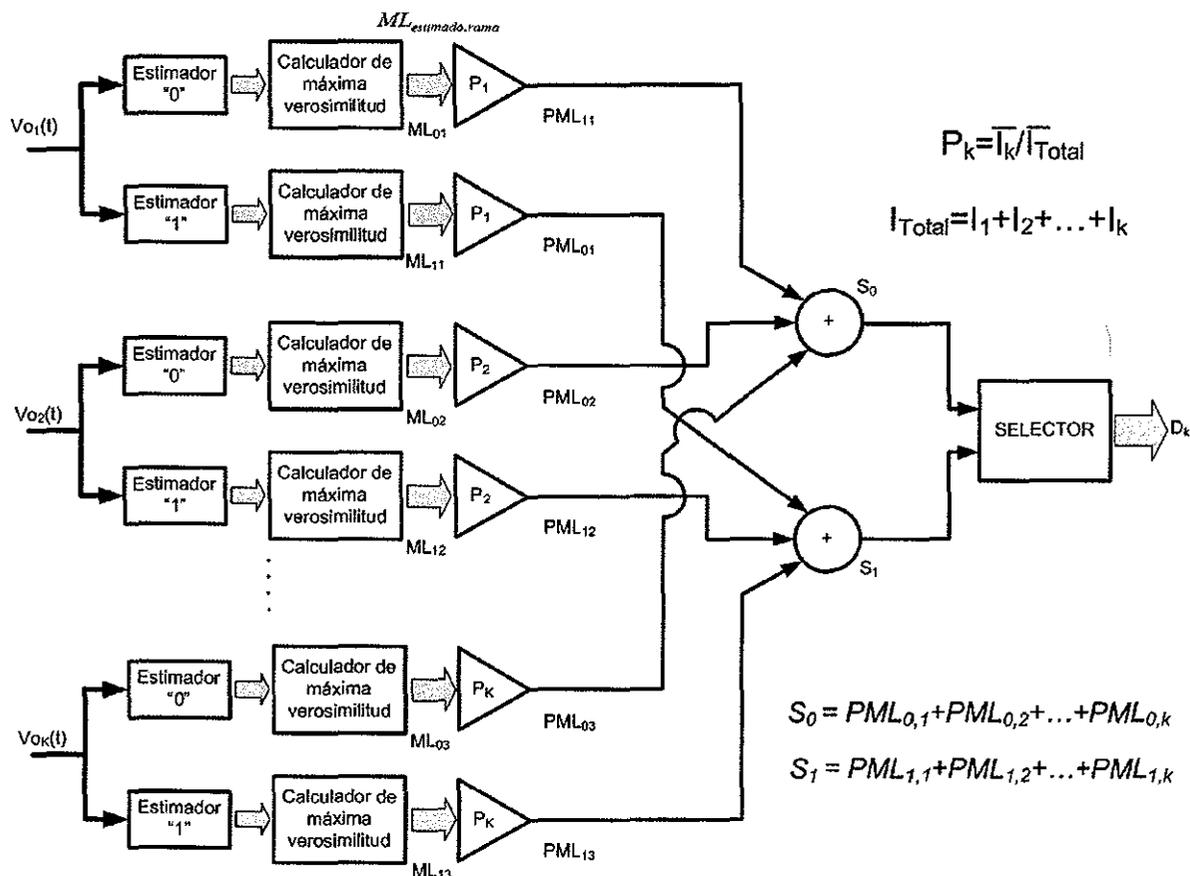


Figura 31. Diagrama a bloques de la estructura de estimación de fase adaptada a un esquema con diversidad espacial.

Se ha expuesto todo lo referente al apartado teórico de este trabajo, los siguientes capítulos son los correspondientes al trabajo experimental. En ellos se exponen las pruebas realizadas en laboratorio y se describen la implementación y el desarrollo práctico, así como los detalles técnicos de cada prueba realizada.

Capítulo VI

Validación experimental del uso de la cámara de turbulencia

VI.1 Introducción

Como se mencionó en la introducción de este documento, uno de los objetivos de este trabajo es la evaluación de un esquema de telecomunicaciones óptico inalámbrico a través del canal turbulento atmosférico. También se ha mencionado que este trabajo de tesis pretende ser una antesala, una fase preliminar a la implementación de un sistema más robusto en el exterior y con la intención de cumplir este propósito se diseñó una plataforma experimental en laboratorio que permitiera cubrir los objetivos de este trabajo.

La idea de dicho arreglo básicamente consiste en la utilización de un dispositivo que permita emular los efectos de la turbulencia atmosférica en un enlace óptico de manera parcialmente controlada dentro del laboratorio, para esto se hizo uso de una cámara de turbulencia. El siguiente capítulo explica el diseño básico de dicho dispositivo a la vez que valida su funcionamiento y utilización mediante la obtención y comparación de una serie de gráficos generados a partir tanto de datos teóricos como experimentales.

VI.2 Cámara de turbulencia

En el segundo capítulo de este documento se introdujeron los conceptos básicos relacionados a la turbulencia atmosférica, se mencionó que esta es debida al calentamiento en forma desigual de las masas de aire, esto conlleva a pequeños bloques de aire con diferentes índices de refracción a lo largo de la trayectoria

óptica causando así perturbaciones tanto en la intensidad como en la fase de la señal transmitida. La intención del uso de la cámara de turbulencia es el recrear estas condiciones mediante la mezcla del aire caliente de su interior con el aire frío del exterior, produciendo así pequeñas masas de aire con valores variados del índice de refracción. La literatura reporta diversas configuraciones para los dispositivos de este tipo [Abtahi y Rusch2009], la empleada en nuestras pruebas experimentales y aquí reportada obedece a su relativa sencilla implementación.

El diseño de la cámara de turbulencia y operación de la cámara empleada es el siguiente:

La cámara de turbulencia consiste en una caja de madera con:

- a) aperturas circulares en un par de sus costados
- b) en su interior se tiene colocado un dispositivo calefactor
- c) en una de sus paredes laterales cuenta con un ventilador que es el encargado de insertar el aire frío del exterior
- d) un segundo ventilador, su función es realizar la mezcla de aire frío y caliente. Las dimensiones de la caja son 30cm x 30cm x 60cm, figura 32:

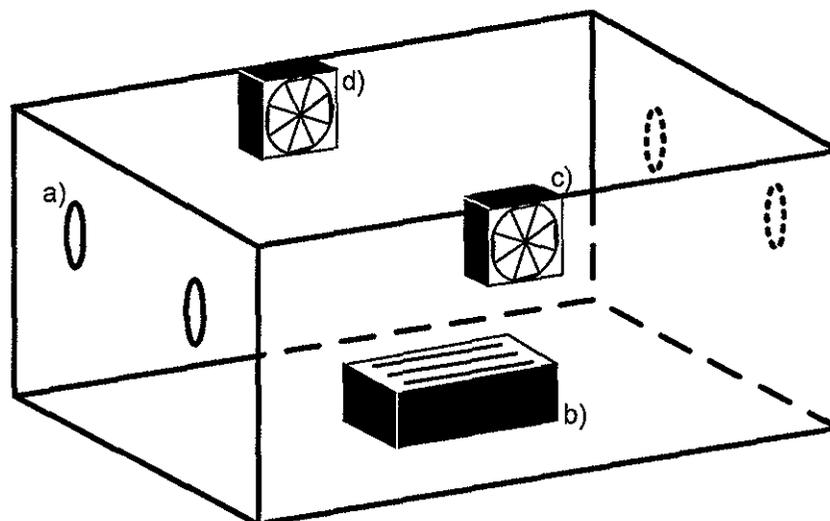


Figura 32. Esquema de la cámara de turbulencia.

Es prudente mencionar que dicha cámara no fue construida para este trabajo de tesis en específico, sin embargo se realizó un trabajo experimental para validar su utilización, como se describe a continuación.

Para garantizar que la turbulencia generada por la cámara es equiparable con la turbulencia presentada en un enlace óptico de telecomunicaciones es necesario recordar el par de coeficientes o índices que permiten determinar el nivel de la turbulencia atmosférica de manera cuantitativa; dichos parámetros son la varianza de Rytov y el índice de centelleo, cuyas expresiones son nuevamente enunciadas por conveniencia:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \dots\dots\dots(68)$$

$$\sigma_I^2 = 0.4 \sigma_R^2 \dots\dots\dots(69)$$

La importancia de establecer una relación entre la varianza de Rytov y el índice de centelleo radica en que el equipo que se posee para las pruebas experimentales no permite una obtención directa de la varianza de Rytov, parámetro en función del cual la mayoría de los textos referentes a las COI reporta el nivel de la turbulencia atmosférica, sin embargo el equipo disponible nos permite, mediante la detección de la intensidad de la señal óptica y un procesamiento de la misma, la obtención del índice de centelleo, y por ende, de la varianza de Rytov. Más adelante dentro de este mismo capítulo se reporta con mas detalle la mecánica para la obtención de σ_I^2 .

VI.3 Propuesta del modelo teórico experimental para la validación de la cámara de turbulencia

En las ecuaciones (68) y (69) se observa una dependencia de la longitud de onda empleada y la distancia del enlace en cuestión, esta dependencia es también

mostrada en la figura 33, figura obtenida tras elaborar un programa (MatLab) que permitiera graficar la ecuación 68:

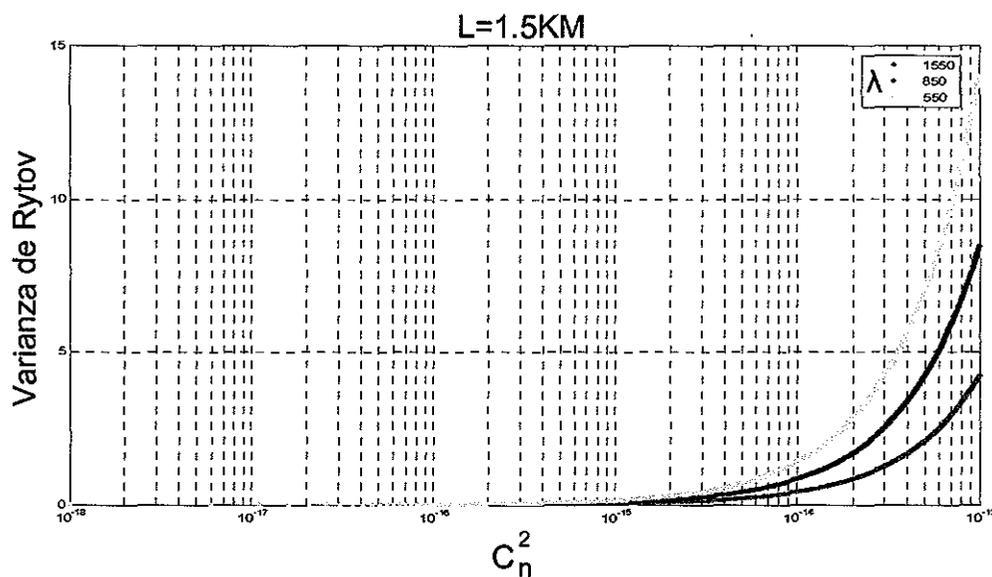


Figura 33. Varianza de Rytov para diferentes λ 's, longitud de enlace $L=1.5$ Km.

Los textos consultados reportan en su mayoría la siguiente relación entre la varianza de Rytov y el nivel de turbulencia asociado.

Tabla I. Relación entre la varianza de Rytov y en nivel de turbulencia reportada en algunos trabajos consultados [Abtahi y Rusch, 2009].

Varianza de Rytov σ_R^2	Nivel de turbulencia Asociado
$\sigma_R^2 < 0.5$	Turbulencia débil
$0.5 < \sigma_R^2 < 1$	Turbulencia media
$\sigma_R^2 > 1$	Turbulencia fuerte

En dichos reportes no se manifiesta una dependencia explícita de la longitud de onda empleada, además de que al no mencionar la longitud del enlace pareciera que se ignora el factor acumulativo que dicho parámetro aporta. Por tanto se decidió obtener relaciones puntuales entre los coeficientes de turbulencia y los parámetros del enlace tales como la λ (longitud de onda) y la L (longitud del enlace).

De cualquier manera, para establecer un modelo es necesario partir de algún punto, de la ecuación (69) puede notarse el término C_n^2 ; trabajos en el área de astronomía enfocados al diseño de telescopios, donde el factor de turbulencia también desempeña un papel importante establecen una relación entre la constante de estructura del índice de refracción y el nivel de turbulencia, tabla II [Andrews, Phillips, 2005]:

Tabla II. Relación entre la constante de estructura C_n^2 y el nivel de turbulencia.

C_n^2 Constante. de estructura del índice de refracción	Nivel de turbulencia Asociado
$C_n^2 < 10^{-17}$	Débil
$10^{-17} \leq C_n^2 \leq 0.5 \times 10^{-13}$	Media
$C_n^2 > 0.5 \times 10^{-13}$	Fuerte

Si se parte desde el valor de la constante de estructura del índice de refracción para determinar el nivel de la turbulencia, y suponiendo una distancia $L=1.5\text{Km}$, entonces con la ayuda de la gráfica mostrada en la figura 33 es posible determinar los valores en el índice de Rytov asociados a cada nivel de turbulencia para una

longitud de onda específica, por ejemplo, los valores del índice de Rytov para un régimen de turbulencia fuerte son los mostrados en la tabla siguiente:

Tabla III. Valores de σ_R^2 para regímenes de turbulencia fuerte.

Turbulencia fuerte ($C_n^2 > 0.5 \times 10^{-13}$) L = 1.5Km	
Varianza de Rytov, σ_R^2	Longitud de onda, λ
>7.1	550nm
>4.3	830nm
>2.1	1550nm

Usando los valores para los que el experimento principal de esta tesis fue planteado ($\lambda=1550\text{nm}$ y $L=1.5\text{Km}$), y de acuerdo a las ecuaciones (68) y (69) se obtiene la siguiente gráfica (figura 34) el marcador está colocado en el punto donde comienza el régimen de turbulencia fuerte:

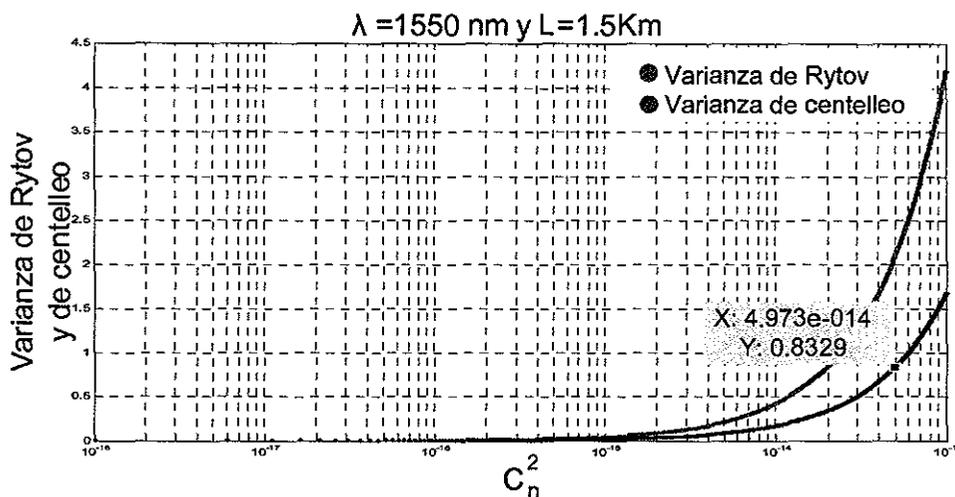


Figura 34. Índices de Rytov y centelleo para un enlace con $\lambda=1550\text{nm}$ y $L=1.5\text{Km}$.

Tabla IV. Valores de σ_R^2 y de σ_I^2 para un enlace con $\lambda=1550$ nm, $L = 1.5$ Km bajo un régimen de turbulencia fuerte.

Turbulencia fuerte ($C_n^2 > 0.5 \times 10^{-13}$)	
$\lambda=1550$ nm , $L = 1.5$ Km	
Varianza de Rytov	Varianza de centelleo
σ_R^2	σ_I^2
>2.1	>0.84

La tabla IV, muestra cuales son los valores que se esperarían en los índices de Rytov y de centelleo para un enlace óptico de comunicaciones sometido a un régimen de turbulencia fuerte. Una vez que se estableció un modelo teórico para el cálculo del índice de Rytov y el índice de centelleo, se consideró que el paso siguiente era probar de manera experimental la validez del mismo, es decir, comprobar que los valores de σ_R^2 y σ_I^2 bajo condiciones reales son concordantes con los valores determinados por el uso de las ecuaciones mostradas. Con este fin se decidió elaborar un enlace óptico entre un par de edificios del CICESE (edificio de física aplicada y edificio de telemática), la idea de dichas pruebas es que tras considerar las variables del enlace tales como, longitud de onda empleada y distancia del enlace, se determinarían los índices de Rytov y centelleo de manera tanto teórica como práctica, para después comparar los resultados obtenidos; si dicha comparación mostraba concordancia en los resultados, entonces consideramos que el modelo planteado tiene validez.

Las características del enlace, mostrado en la figura 35, son:

- 1) Longitud del enlace: 353m
- 2) Longitud de onda empleada: 550nm y 830nm (para las pruebas experimentales se dispone de un láser para cada una de estas longitudes de onda)

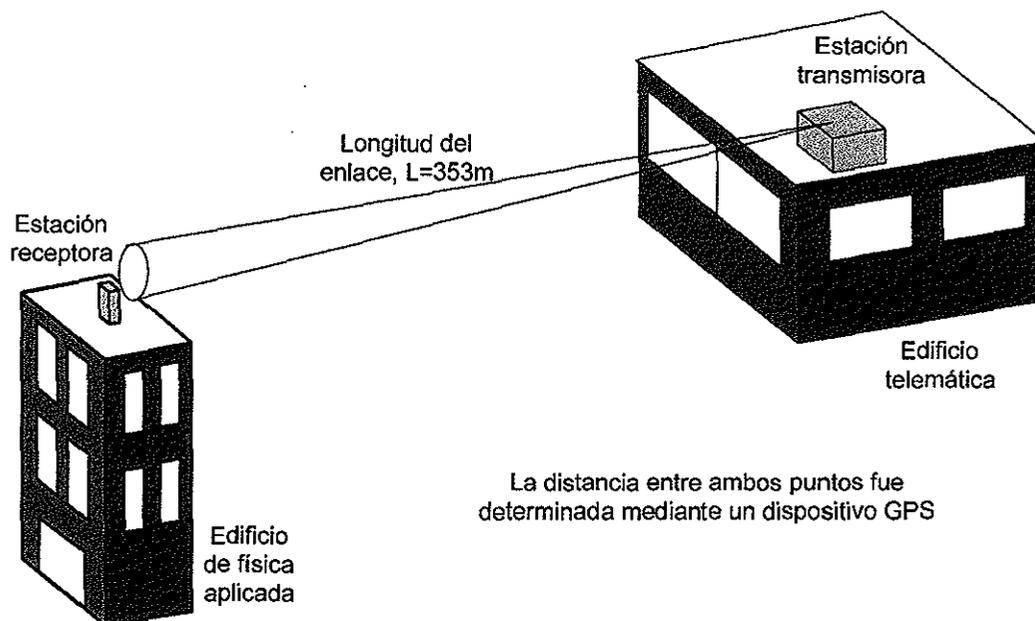


Figura 35. Esquema experimental del enlace óptico entre edificio de física aplicada y el edificio de telemática.

Con los datos anteriormente mencionados se elaboró el siguiente par de gráficos, figuras 36 y 37, a partir de los cuales es posible determinar cual sería el rango de valores que se esperaba arrojaría una prueba experimental.

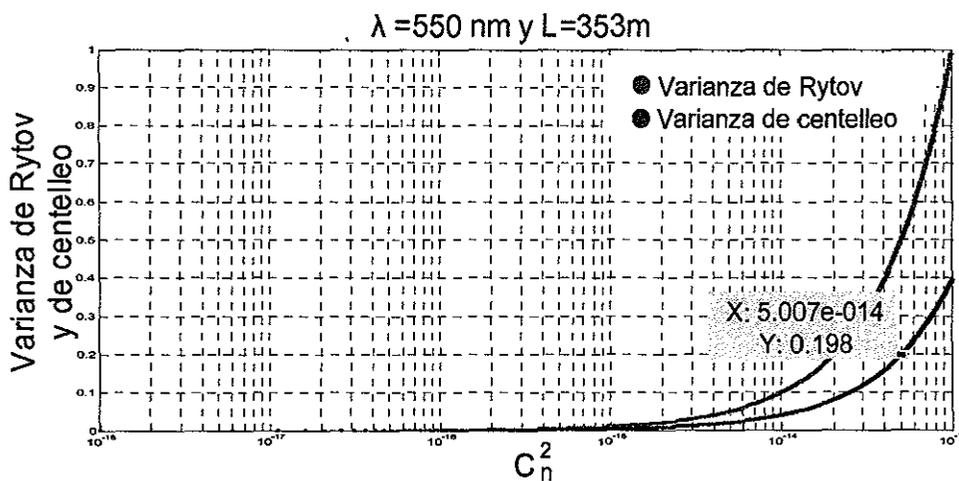


Figura 36. Índices de Rytov y centelleo para enlace con $\lambda=550$ nm y $L=353$.

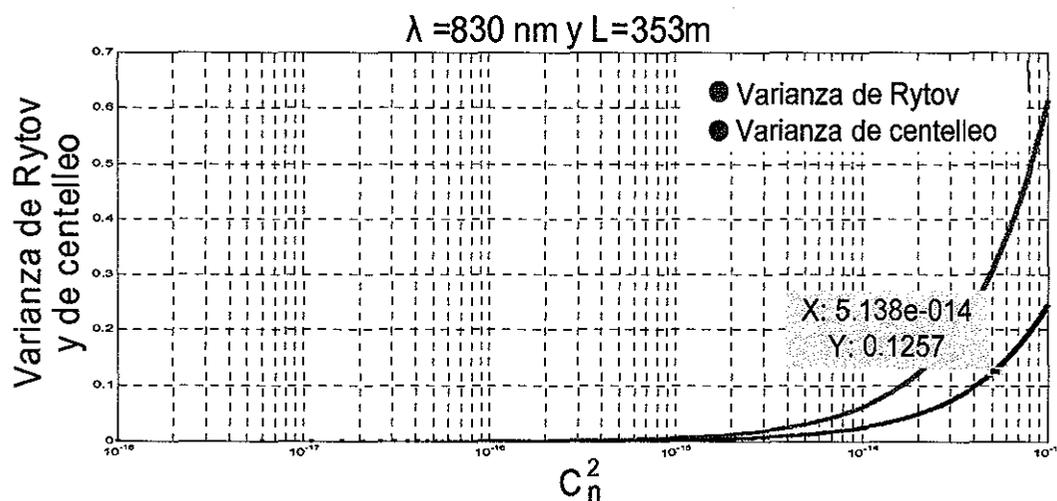


Figura 37. Índices de Rytov y centelleo para enlace con $\lambda=830 \text{ nm}$ y $L=353 \text{ m}$.

Tabla V. Valores de σ_R^2 y de σ_I^2 esperados para un enlace con $L = 353 \text{ m}$ bajo un régimen de turbulencia fuerte.

Longitud del enlace, $L = 353 \text{ m}$			
$C_n^2 \left[\frac{\text{grados}^2}{\text{m}^{2/3}} \right]$	$\lambda \text{ [nm]}$	σ_R^2	σ_I^2
$C_n^2 < 0.5 \times 10^{-13}$	550	0.5	0.19
$C_n^2 < 0.5 \times 10^{-13}$	830	0.3	0.12

Las tabla V muestra los valores para σ_R^2 y σ_I^2 , o el límite de los mismos, que se esperarían obtener para los enlaces ópticos con los parámetros de longitud de onda λ y longitud de enlace L planteados y suponiendo que se tiene un régimen de turbulencia media o menor.

El paso siguiente consistió en la realización práctica del enlace.

VI.3.1 Obtención práctica del índice de centelleo en el modelo de validación

En la figura 35 se muestra el esquema empleado para la medición del índice de centelleo, la figura 38 muestra los diagramas a bloques para la estación transmisora y receptora:

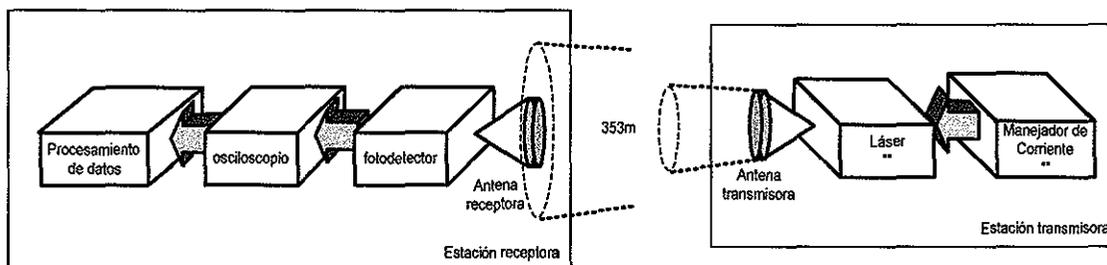


Figura 38. Diagrama a bloques de la estación transmisora y la estación receptora empleadas para la medición del índice de centelleo.

La estación transmisora, como lo muestra la figura 38, consta básicamente de un láser, un manejador de corriente y en el caso del láser infrarrojo empleado (550nm) también se utilizó una lente encargada de compensar la divergencia del haz.

La estación receptora mostrada en la misma figura, consta de una lente colectora, un fotodetector y un osciloscopio digital que en este caso fue empleado para la adquisición de las variaciones de intensidad del haz recibido, estos datos adquiridos fueron procesados fuera de línea para la obtención del índice de centelleo.

El mosaico de imágenes de la figura 39 corresponde a diversas fotografías tomadas durante la elaboración de las pruebas experimentales.

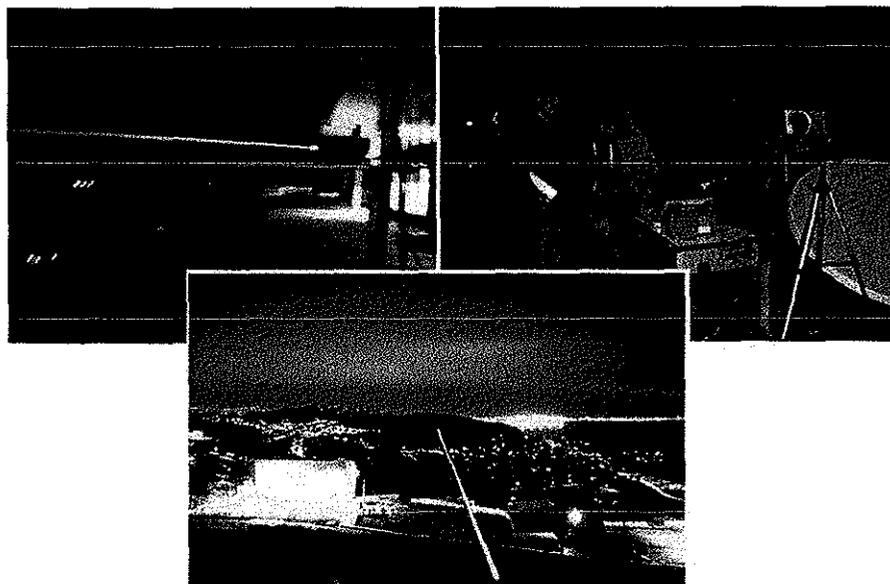


Figura 39. Pruebas experimentales, enlace entre telemática y física aplicada.

El primer enlace que se estableció fue el correspondiente a la longitud de onda $\lambda = 550\text{nm}$ (verde), tras adquirir los datos y procesarlos se obtuvieron las siguientes gráficas, figura 40.

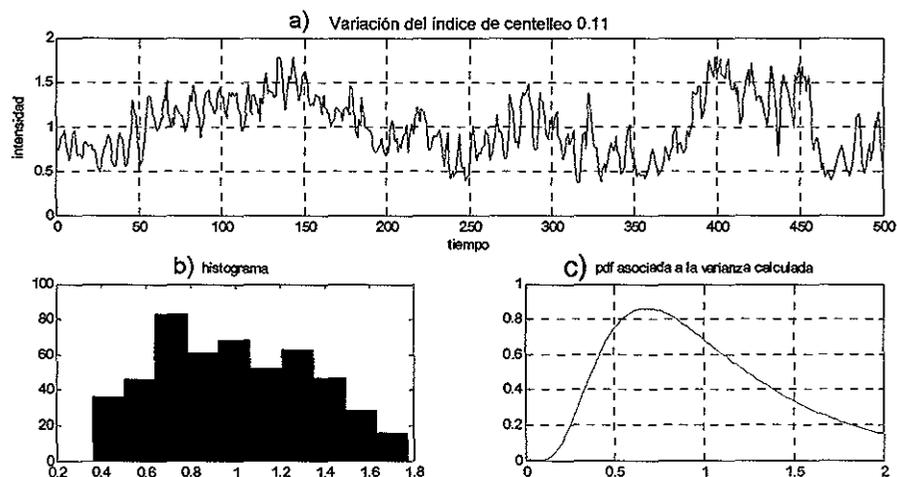


Figura 40. Variación de intensidad para $\lambda = 550\text{nm}$ (verde).

Posteriormente se realizó la misma prueba experimental pero ahora para la longitud de onda $\lambda = 830\text{nm}$ (infrarrojo).

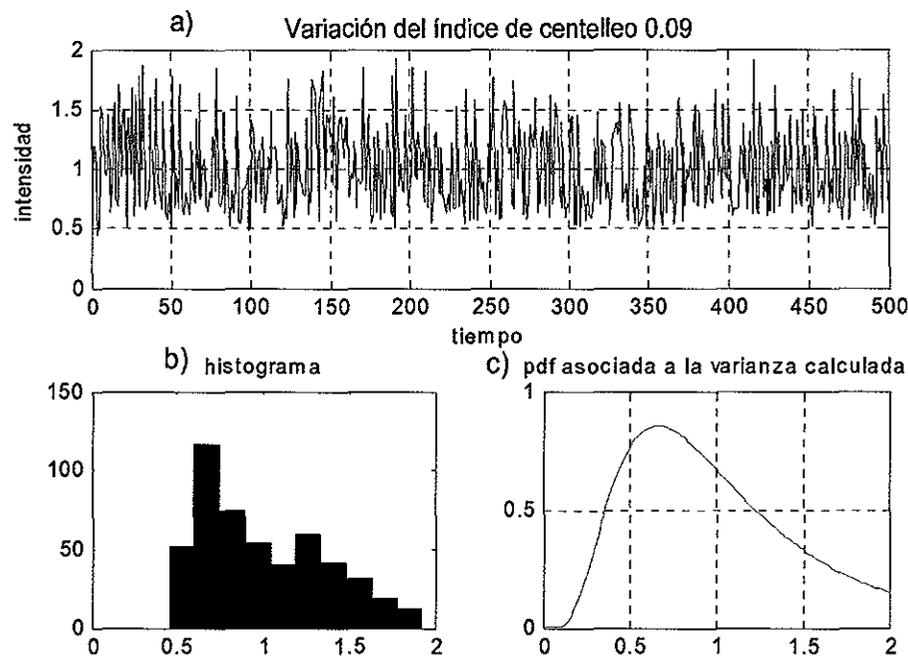


Figura 41. Variación de intensidad para $\lambda = 830\text{nm}$ (infrarrojo).

Las gráficas 40a) y 41a) corresponden a las señales adquiridas por el osciloscopio, el valor obtenido en la varianza de centelleo fue de 0.112 para $\lambda = 550\text{nm}$ y 0.09 para $\lambda = 830\text{nm}$, las gráficas 40b) y 41b) son las funciones de densidad de probabilidad generadas con los datos adquiridos y las figuras 40c) y 41c) corresponden a las funciones de densidad de probabilidad lognormal generadas sólo con los parámetros de varianza obtenidos.

En este punto ya se contaba tanto con valores teóricos como experimentales, el último paso es la comparación entre ambos, tabla VI, dadas las condiciones climatológicas observadas durante las pruebas (temperatura promedio 20°C , visibilidad aproximada 3Km) se determinó que los resultados obtenidos deberían obedecer a un régimen de turbulencia entre medio y débil.

La comparación es desplegada en la tabla siguiente y en la figura 42:

Tabla VI. Comparación entre los índices de centelleo teóricos y prácticos.

Distancia del enlace, L = 353 m.		
Longitud de onda λ	550nm (verde)	830nm (infrarrojo)
σ_I^2 teórico	$0 < \sigma_I^2 < 0.125$	$0 < \sigma_I^2 < 0.2$
σ_I^2 experimental	0.09	0.11

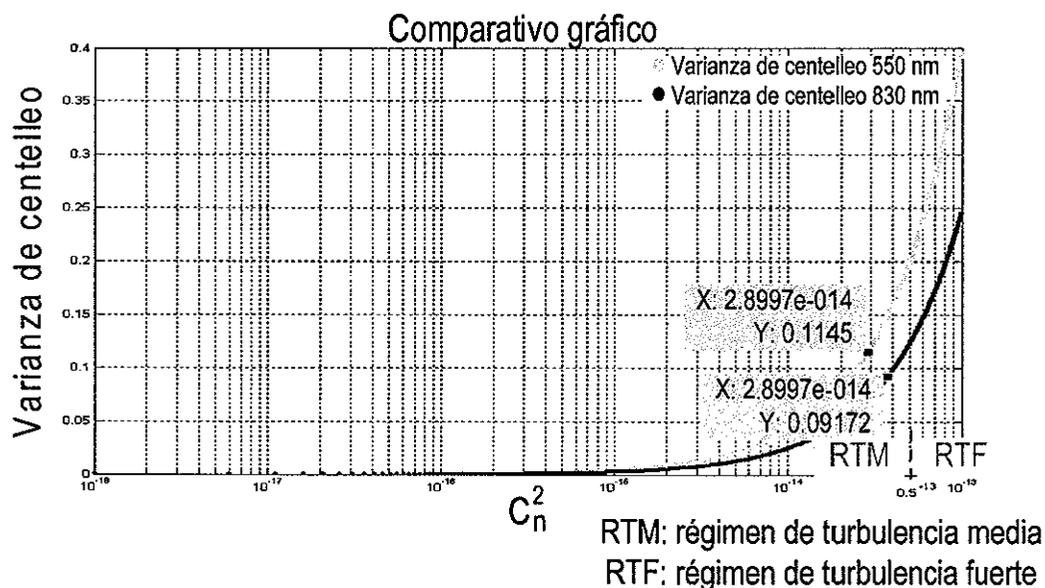


Figura 42. Comparación en modo gráfico entre los valores teóricos y los prácticos, los marcadores muestran los valores obtenidos en las pruebas experimentales.

En función de la tabla comparativa (tabla VI) y al observar que los valores de centelleo obtenidos durante el experimento caen dentro de la curva teórica, consideramos que el modelo teórico empleado para la determinación del régimen de turbulencia al que está asociado un enlace óptico de comunicaciones de características específicas tales como la longitud de onda (λ) y la distancia del enlace (L) es válido.

VI.4 Cámara de turbulencia en las pruebas experimentales de laboratorio (índice de centelleo)

Una vez que desde nuestro punto de vista se ha validado el modelo teórico planteado es necesario validar el uso de la cámara de turbulencia para los experimentos finales, como se mencionó anteriormente el propósito de dicho dispositivo es recrear los efectos de la turbulencia en sus tres niveles, dados los parámetros ($\lambda = 1550 \text{ nm}$ y $L=1.5 \text{ Km}$) del enlace que se pretende emular, la figura 34 y la tabla IV muestran los valores de varianza de centelleo que la cámara de turbulencia debe producir; $\sigma_I^2 > 0.84$

El esquema empleado para la medición de los índices de centelleo producidos por la cámara es muy semejante al empleado para el enlace entre edificios, la figura 43 esquematiza el arreglo usado en el laboratorio.

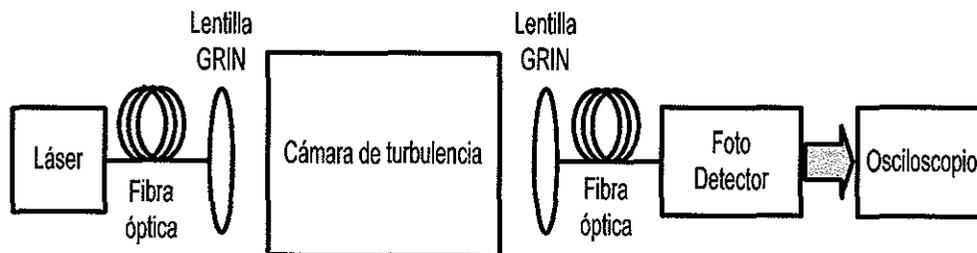


Figura 43. Arreglo empleado en laboratorio para la caracterización de la cámara de turbulencia.

Las primeras pruebas elaboradas con la cámara de turbulencia arrojaron valores en el índice de centelleo muy por debajo de los requeridos, figura 44a) $\sigma_I^2 = 0.0901$, además de observarse un bajo nivel de repetibilidad en los resultados. Tras realizar algunos cambios en el dispositivo se logró incrementar el índice de centelleo obtenido, sin embargo el mayor valor generado fue de $\sigma_I^2 = 0.317$ (figura 44b).

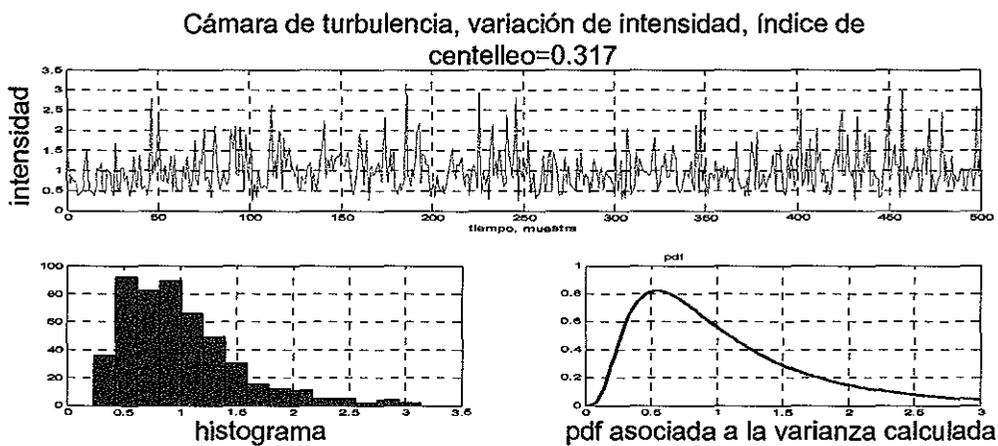
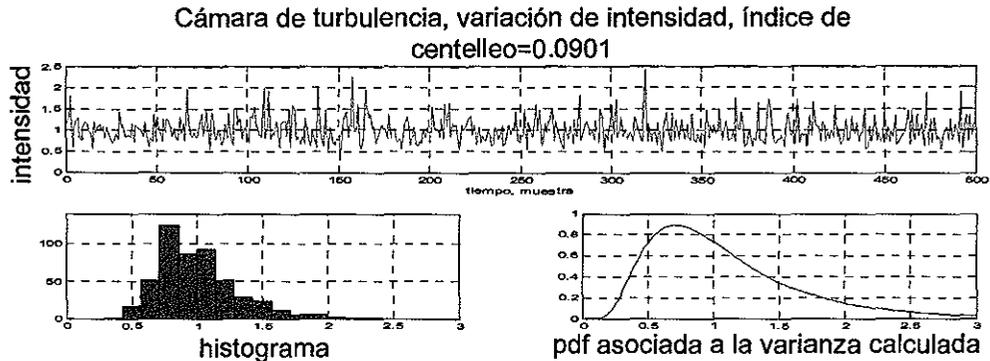


Figura 44. (a) Índice de centelleo = 0.09 y (b) índice de centelleo = 0.317.

Es importante notar que la función de densidad de probabilidad de las variaciones de intensidad generada con la cámara de turbulencia tiene la misma distribución que la generada en las pruebas experimentales entre edificios, en este sentido la cámara de turbulencia cumple su propósito para niveles de turbulencia débil y media, pero los niveles de turbulencia generados con ella no emulan turbulencia fuerte para un enlace con parámetros $\lambda = 1550 \text{ nm}$ y $L=1.5 \text{ Km}$.

Sin embargo, esto no implica que la cámara de turbulencia no pueda ser utilizada, si bien es cierto que no es posible cambiar la longitud de onda empleada en el experimento, si es posible variar el parámetro L . Tras realizar algunas modificaciones en el código empleado para la generación de las gráficas

mostradas hasta ahora (donde el valor de C_n^2 variaba en el intervalo posible) se obtuvo una nueva gráfica en la que el valor de C_n^2 permaneciera constante y correspondiente a un régimen de turbulencia fuerte (figura 45):

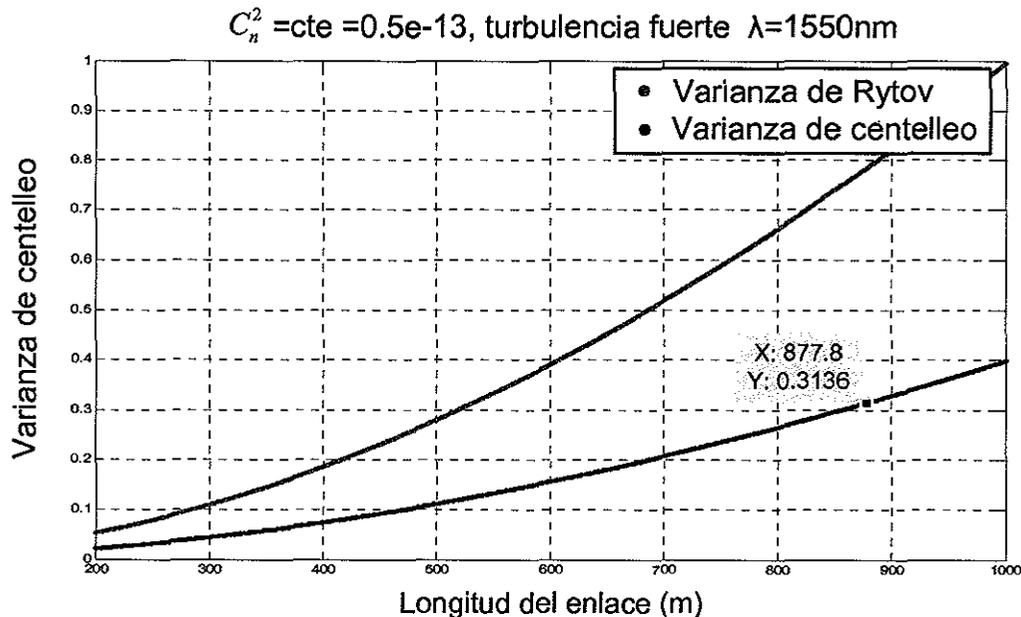


Figura 45. Índices de Rytov y centelleo calculados para turbulencia fuerte $C_n^2 = \text{cte}$ y variando la longitud del enlace.

La intención es obtener el valor del parámetro L que es correspondiente tanto con un nivel de turbulencia fuerte, $C_n^2 \approx 0.5 \times 10^{-13}$, como con el valor máximo de índice de centelleo obtenido con la cámara, $\sigma_I^2 = 0.317$, y obviamente con el valor planteado de $\lambda = 1550 \text{ nm}$, y de esta manera determinar cuál es la distancia de enlace que las pruebas de laboratorio podrían emular.

La gráfica anteriormente desplegada muestra que la cámara de turbulencia puede ser empleada para emular niveles de turbulencia fuerte para un enlace óptico de comunicaciones con una longitud $L \approx 850 \text{ m}$, distancia que es aún razonable al tratarse de enlaces ópticos inalámbricos. Por tanto esta será la distancia reportada en las pruebas que se desarrollarán para el esquema final.

V.5 Cámara de turbulencia en las pruebas experimentales de laboratorio (estado de polarización)

Así como se realizaron pruebas relacionadas al índice de centelleo para validar el uso de la cámara de turbulencia, también se efectuaron experimentos que permitieran evaluar el efecto de dicha cámara en el estado de polarización. Obviamente se deseaba verificar la correspondencia entre los efectos reportados en algunos estudios, particularmente los citados en el capítulo dos de este documento, y los conseguidos en este trabajo.

La técnica empleada para la medición del efecto de la cámara de turbulencia en el estado de polarización de la luz fue muy semejante a la utilizada para medir el índice de centelleo.

La figura 46 muestra un diagrama a bloques de la configuración empleada en estas pruebas:

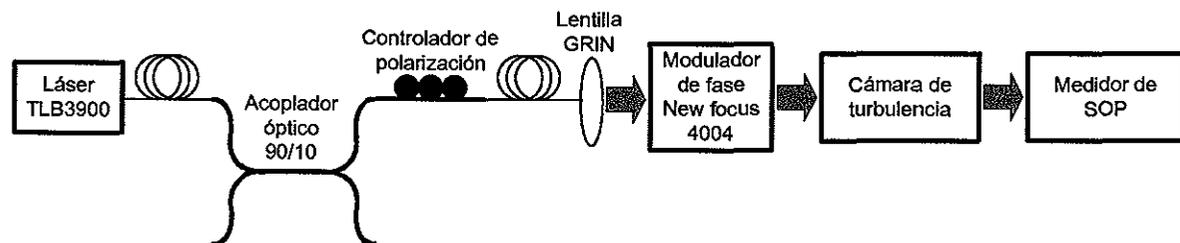


Figura 46. Diagrama a bloques para la medición del efecto de la cámara de turbulencia en el estado de polarización.

Un haz de luz, de 1550nm, incide sobre el medidor de polarización el cual tiene una interfaz directa con una computadora y esta elabora un despliegue de los datos obtenidos. Dentro de los parámetros reportados por el equipo empleado son

de nuestro interés el grado de polarización de la señal incidente y valor del ángulo azimut, η .

La primera serie de pruebas que se realizaron consistieron en la medición de este ultimo par de parámetros mencionados en ausencia de turbulencia (cámara de turbulencia apagada), obviamente esto se hizo con la intención de establecer una base con la cual se compararían las pruebas siguientes (cámara de turbulencia en funcionamiento), y de esta manera establecer los verdaderos efectos de la cámara de turbulencia en la polarización de la señal óptica.

La figura 47 muestra la imagen desplegada por el programa empleado para el experimento, y corresponde a una de las pruebas realizadas con la cámara de turbulencia apagada.

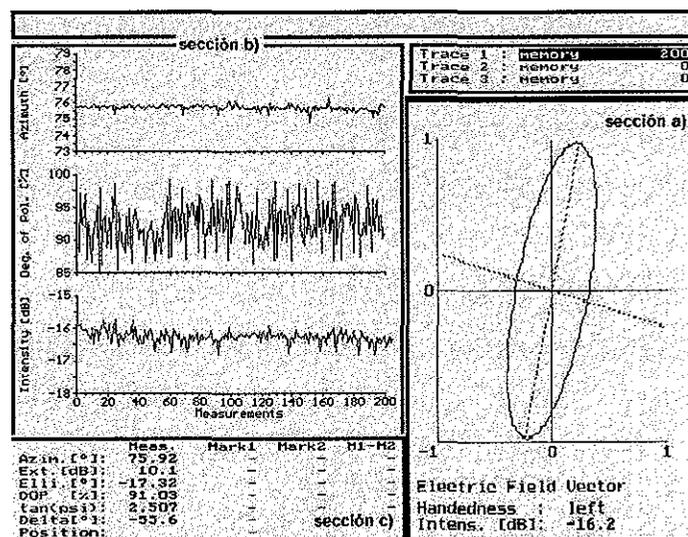


Figura 47. Medición de estado de polarización con cámara de turbulencia apagada.

Las gráficas y datos desplegados en la figura anterior son divididos en tres secciones para su interpretación. La sección a) corresponde al vector del campo eléctrico, es decir al tipo de polarización de la señal, la sección b) contiene

gráficos del ángulo azimut (η), del grado de polarización (DEP) y de la intensidad, y la sección c) despliega los datos numéricos promedio.

Una vez explicado esto es posible la interpretación de la figura: la señal presenta un estado de polarización elíptico (sección a), la variación del ángulo azimut es $\Delta\eta=1^\circ$, el grado de polarización oscila entre el 85% y el 95% y el nivel de intensidad varía alrededor de 1 dB (sección b).

Una vez realizadas estas mediciones se procedió con el encendido de la cámara de turbulencia, el resultado de dicha prueba es mostrado en la figura 48

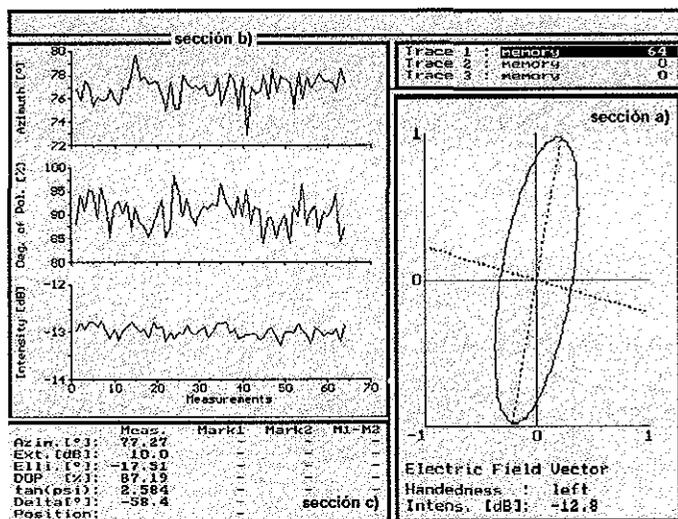


Figura 48. Medición del estado de polarización con cámara de turbulencia encendida.

En la figura anterior puede notarse que con la presencia de turbulencia atmosférica (inducida por la caja) el estado de polarización permanece elíptico (sección a), los cambios relevantes se presentan en la (sección b), donde es posible apreciar que el valor del ángulo azimut η presenta oscilaciones entre los 73° y los 80° , es decir $\Delta\eta=7^\circ$, el grado de polarización, DEP, conserva el mismo

comportamiento que el observado en ausencia de turbulencia atmosférica inducida por la cámara, y las variaciones de intensidad permanecieron menores a 1 dB. Tras la elaboración de este par de pruebas es posible establecer algunas conclusiones. Por efecto de la turbulencia inducida no se presentaron cambios en el estado de polarización, es decir, el estado de polarización elíptico se conservó y la elipticidad prácticamente no sufrió cambios, conservando un valor semejante (17°). Si bien es cierto que las gráficas muestran variaciones en el grado de polarización no es válido asociar esta oscilación a la turbulencia inducida, pues dichas variaciones están también presentes en las pruebas realizadas sin presencia de turbulencia. El efecto que es notablemente provocado por la turbulencia atmosférica inducida por la caja es la variación del ángulo azimut η , lo importante es que dicha variación corresponde con el rango de variación reportado por otros estudios y citado en el capítulo II de este documento.

Los resultados anteriormente descritos son resumidos en la tabla siguiente:

Tabla VII. Tabla comparativa entre los efectos reportados en otros estudios y los obtenidos en el laboratorio durante las pruebas experimentales (*Variaciones no producidas por la turbulencia generada con la cámara).

Parámetros evaluados	Valores reportados en otros estudios (turbulencia)	Valores obtenidos en laboratorio	
		Sin turbulencia	Con turbulencia
$\Delta\eta$	13°	1°	7°
ΔDOP	0.275%	$\approx 15\%^*$	$\approx 15\%^*$

El propósito de esta caracterización radica en la importancia que tiene el estado de polarización de la señal óptica en el esquema de recepción planteado, por ejemplo, si se tratase de un esquema de detección directa el estado de polarización de la señal óptica recibida no juega un papel primario, simplemente porque la fotocorriente detectada en dichos receptores es dependiente únicamente del número incidente de fotones. Para el caso de las comunicaciones coherentes,

que como se mostrará en el capítulo referente al arreglo experimental es el empleado en este trabajo, el esquema receptor requiere una coincidencia en el estado de polarización del oscilador local E_{OL} y la señal de información E_S , en la ecuación (8) se asume el mismo estado de polarización para ambos campos ópticos, pero si se desea contemplar las repercusiones de un desajuste en la coincidencia de los estados de polarización es necesario incluir un factor $\cos(\Theta)$ en la ecuación antes citada, donde Θ representa el ángulo entre los vectores unitarios a lo largo de la dirección de polarización de los campos E_{OL} y E_S . Dado que el término citado es utilizado para la recuperación de la información transmitida, cualquier variación del ángulo Θ con respecto a su valor ideal $\Theta = 0$ reduciría la señal resultante de la mezcla óptica y afectaría el desempeño de la estructura receptora, el peor caso ocurre cuando $\Theta = 90^\circ$, pues entonces la señal desaparecería por completo. De acuerdo a lo anteriormente descrito, la variable Θ , ángulo entre los vectores de polarización de los campos E_{OL} y E_S , toma el valor de η obtenido en la prueba experimental, y por tanto es posible cuantificar su repercusión en la potencia generada en un esquema de recepción coherente mediante la expresión:

$$P(t) = \cos\eta \left[P_S + P_{OL} + 2\sqrt{P_S P_{OL}} \cos(\omega_{FI}t + \phi_S - \phi_{OL}) \right] \dots\dots\dots (70)$$

Sustituyendo el valor máximo de η obtenido se tiene:

$$P(t) = \cos(7^\circ) \left[P_S + P_{OL} + 2\sqrt{P_S P_{OL}} \cos(\omega_{FI}t + \phi_S - \phi_{OL}) \right] \dots\dots\dots (71)$$

$$P(t) = 0.9925 \left[P_S + P_{OL} + 2\sqrt{P_S P_{OL}} \cos(\omega_{FI}t + \phi_S - \phi_{OL}) \right] \dots\dots\dots (72)$$

Esto implica una pérdida de 0.0075% en la potencia debido a la variación del estado de polarización provocada por la turbulencia atmosférica

Capítulo VII

Arreglo experimental

VII.1 Introducción

De acuerdo con lo reportado en el apartado organización del documento, en este apartado se muestra la configuración empleada en el laboratorio para la realización de las pruebas experimentales. La descripción general del experimento es la siguiente:

Transmisión inalámbrica de una señal óptica cuya fase es modulada por una señal de información (datos); la señal modulada pasa a través del dispositivo emulador de turbulencia atmosférica y posteriormente es capturada en la etapa de recepción. El esquema empleado es el de un sistema coherente autohomodino, la configuración del receptor es balanceada y para la adquisición de los datos se utilizó un osciloscopio digital. Dichos datos son procesados fuera de línea para la determinación final de la señal recibida.

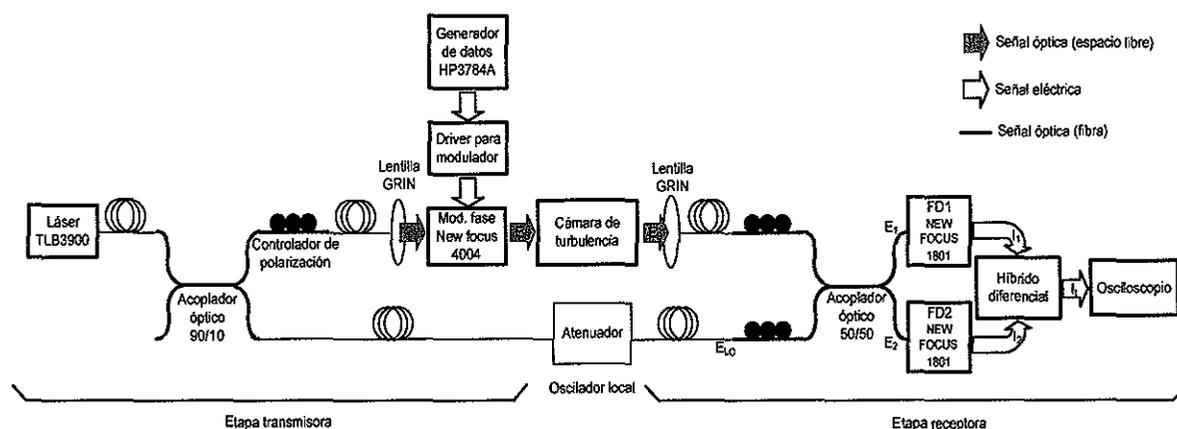


Figura 49. Diseño del primer arreglo experimental propuesto.

VII.2 Experimento (primera versión)

La figura 49 esquematiza el arreglo diseñado para el experimento, posteriormente se enuncia una descripción mas detallada de la función de cada uno de los dispositivos empleados:

Etapa transmisora

La señal portadora es generada por un dispositivo láser, esta señal es dividida por un acoplador de 90/10, como se mencionó anteriormente el esquema es autohomodino así que parte de la potencia es modulada (E_S) y la parte restante es empleada como oscilador local (E_{OL}). Los datos son generados de manera pseudoaleatoria, el dispositivo modulador (de espacio libre) es el encargado de modular la fase de la señal portadora en función de la secuencia de datos previamente mencionada, la señal eléctrica de datos debe ser propiamente acondicionada para que el modulador opere correctamente, por ello es necesario el uso del dispositivo “driver” o manejador de datos.

El controlador de polarización colocado en la entrada óptica del modulador es utilizado debido a que la polarización de la señal incidente es también importante para la correcta operación del modulador.

Canal de comunicación, medio atmosférico (cámara de turbulencia)

La salida óptica del modulador de fase proporciona la señal E_S , es decir la señal de información, por tanto es la señal óptica que viajará por el canal de comunicaciones, en este caso el canal atmosférico emulado por la cámara de turbulencia que provocará afectaciones en la señal como las descritas en capítulos anteriores.

Etapa receptora

La señal óptica E_S previamente afectada por la cámara de turbulencia es capturada por una lentilla de GRIN fibrada y es una de las señales de entrada al acoplador encargado de la mezcla de la señal de información E_S y la señal de oscilador local E_{OL} , esta última es insertada en la entrada restante del acoplador de 3 dB's. Es necesaria la utilización de un controlador de polarización en cada una de las entradas del acoplador, pues si se desea obtener una correcta mezcla de las señales E_S y E_{OL} es importante hacer coincidentes los estados de polarización de ambas señales. Una vez que se ha realizado la mezcla de las señales, cada una de las salidas del acoplador (E_1 y E_2) es insertada en los fotodetectores, las corrientes generadas por estos son utilizadas para generar el observable eléctrico, $V_o(t)$.

En el siguiente diagrama (figura 50) se muestra el esquema empleado para el experimento, en él es posible observar los modelos específicos de los dispositivos utilizados así como la medición de las potencias ópticas obtenidas en cada una de las etapas del arreglo, al igual que en la figura previa nuevamente se utiliza determinada simbología para indicar la naturaleza óptica o eléctrica de la señal en cada una de las etapas.

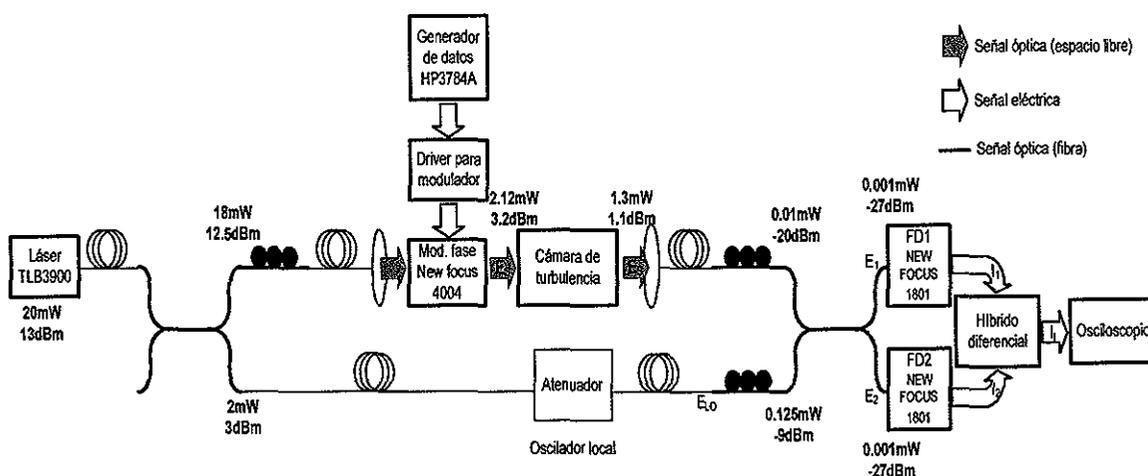


Figura 50. Diagrama del arreglo experimental y medición de potencia óptica.

En el arreglo mostrado es posible observar diversas pérdidas en la potencia de la señal óptica, esencialmente las pérdidas de potencia en la etapa receptora son debidas a la adaptación a espacio libre necesaria para el uso del modulador de fase, las pérdidas presentadas entre transmisor y receptor (1.5m aproximadamente) en ausencia de turbulencia inducida son causadas por la divergencia geométrica del haz, en la etapa receptora se tiene una lentilla de GRIN cuya superficie es menor que el tamaño de la mancha, por tanto no es posible coleccionar la totalidad de la potencia transmitida.

Como se muestra en la figura, elementos como los controladores de polarización también repercuten en la potencia transmitida, a todo lo anterior es posible agregar las pérdidas causadas por conectores o empalmes ópticos.

De cualquier manera se propuso e implementó un arreglo que permitiera conocer el índice de centelleo de manera simultánea con la transmisión de la señal de datos. La técnica empleada para la medición instantánea del índice de centelleo asociado a una transmisión de datos en el laboratorio es descrita en el apartado siguiente.

VII.3 Experimento (versión final)

El mosaico de imágenes de la figura 51 corresponde a fotografías del arreglo experimental en el laboratorio.

En el capítulo anterior se describieron una serie de pruebas cuyo objetivo fue la validación en el uso de la cámara para la emulación de la turbulencia atmosférica, sin embargo en dicho capítulo igualmente se explica que dadas las características de operación del dispositivo no es posible ajustar y tener control sobre el valor exacto del índice de centelleo que dicha cámara provocará en el haz láser en cuestión.

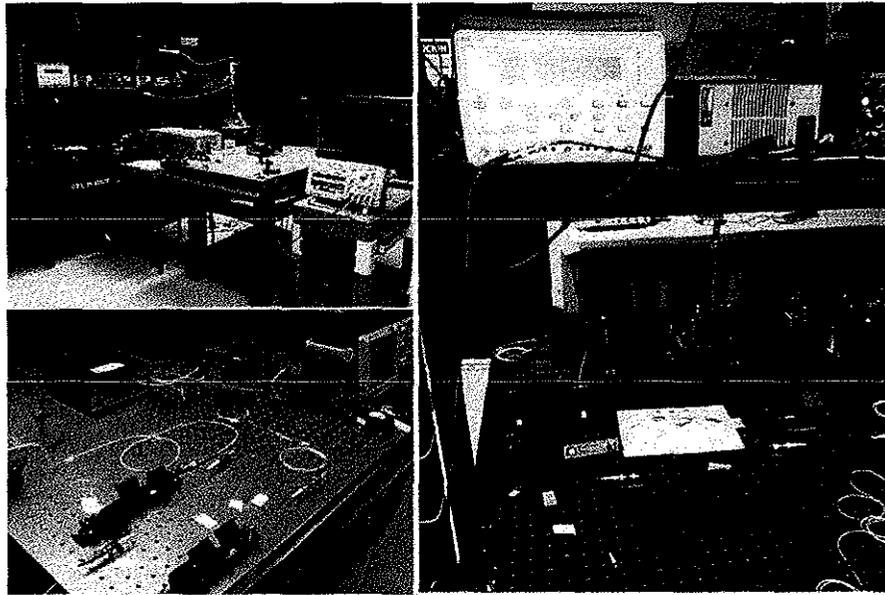


Figura 51. Fotografías correspondientes al arreglo experimental en laboratorio.

De acuerdo al diseño de la cámara de turbulencia mostrado en la figura 32 (capítulo VI), se cuenta con un par de aperturas en cada uno de los costados de la misma, permitiendo dos trayectorias ópticas a través de ella. Uno de estos caminos ópticos (trayectoria óptica #1) es utilizado para la transmisión de la señal de datos E_s y por el camino óptico restante se transmite la señal láser portadora, es decir sin modular (trayectoria óptica #2), al otro extremo de la cámara de turbulencia se colocaron dos bloques receptores: el esquema receptor coherente con detección balanceada (trayectoria óptica #1); este bloque permite la recepción y demodulación de la señal de datos.

El arreglo propuesto consiste en la colocación de un fotodetector extra conectado a un osciloscopio (trayectoria óptica #2), este bloque anexo permite capturar de manera simultánea con la transmisión de datos las variaciones de centelleo en la intensidad del haz, y por ende determinar el índice y el régimen de turbulencia presente en el enlace. La anterior descripción del esquema utilizado puede apreciarse e interpretarse de mejor manera con la figura 52.

Una vez que se contaba con el arreglo final en el laboratorio fue posible realizar las transmisiones de datos, cabe mencionar que las mediciones aquí reportadas son las correspondientes a las pruebas finales, entre estas y las primeras versiones del experimento existieron numerosas pruebas intermedias, obviamente las últimas pruebas realizadas son las más representativas del experimento.

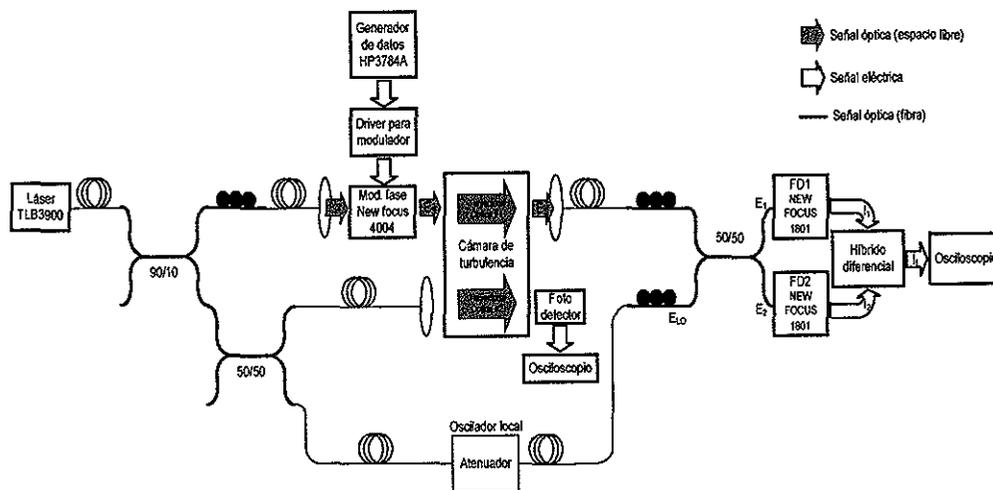


Figura 52. Diseño del arreglo experimental final, incluye el bloque receptor (trayectoria óptica #2) para la obtención simultánea de la señal de datos y el índice de centelleo instantáneo.

La serie de imágenes siguientes, figuras 53, 54, 55 corresponden a las capturas de datos transmitidos bajo los tres niveles de turbulencia generados con la cámara, débil, media y fuerte respectivamente.

La pantalla del osciloscopio despliega cuatro señales: la señal etiquetada "Tx" corresponde a la secuencia transmitida, las señales "FD₁" y "FD₂" son las señales eléctricas entregadas por los fotodetectores 1 y 2 respectivamente y finalmente la señal etiquetada "Vo" corresponde al observable eléctrico, es decir, la señal generada por el arreglo receptor.

En la descripción de cada una de las imágenes se enuncia el valor del índice de centelleo instantáneo medido en cada transmisión.

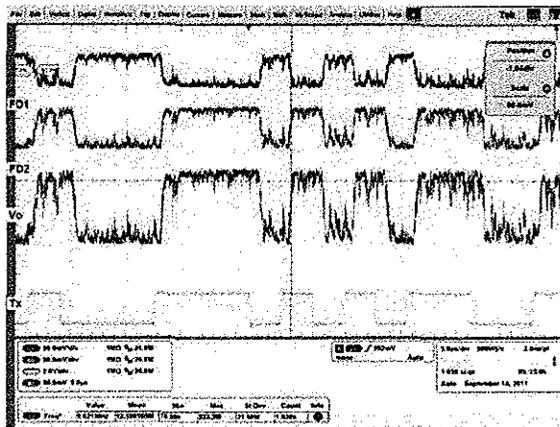


Figura 53. Señales capturadas bajo el régimen de turbulencia débil, $\sigma_I^2=0.087$.

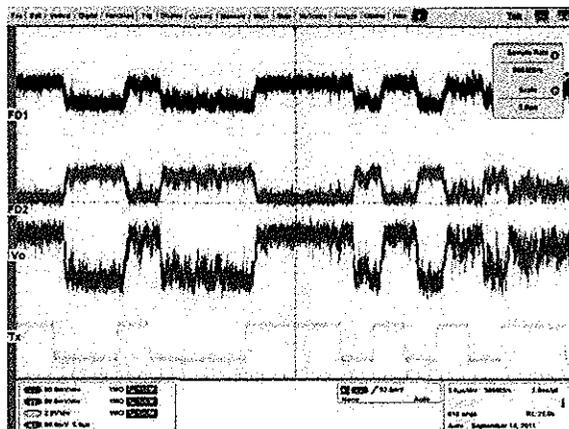


Figura 54. Señales capturadas bajo el régimen de turbulencia media, $\sigma_I^2=0.168$.

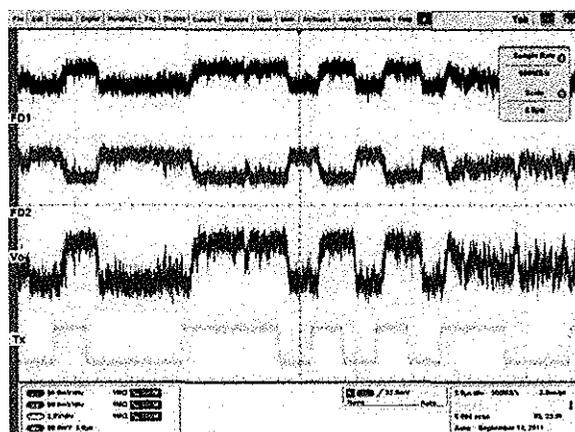


Figura 55. Señales capturadas bajo el régimen de turbulencia fuerte, $\sigma_I^2=0.341$
 Nota: Tx es la secuencia transmitida, FD1 y FD2 son señales eléctricas entregadas por los fotodetectores 1 y 2 respectivamente, y Vo es el observable eléctrico.

Existen diversas cuestiones que pueden ser determinadas mediante la observación e interpretación de las imágenes anteriores, como puede notarse el efecto de la turbulencia en una señal transmitida no es tanto de atenuación sino de variación en la intensidad de la misma, es decir, en las tres imágenes anteriores se aprecia que la amplitud de la señal recibida bajo los diferentes regímenes de turbulencia es prácticamente la misma pero la magnitud de las variaciones aumenta a la par del incremento de la turbulencia generada, siendo este fenómeno mas evidente en la comparación entre las señales obtenidas bajo turbulencia débil y turbulencia media. Otra considerable observación surge al apreciar la velocidad de estas variaciones, mientras mayor sea el régimen de turbulencia los cambios en las variaciones de intensidad se presentan con mayor frecuencia. Por ultimo, para visualizar los efectos de la turbulencia atmosférica en la transmisión de la señal óptica se realizó un procesamiento de los datos adquiridos y se obtuvo el diagrama de ojo para las transmisiones realizadas bajo cada uno de los niveles de turbulencia generados, el análisis cualitativo de estos diagramas respalda las observaciones previamente enunciadas.

Para la generación de estas figuras se procesó la misma cantidad de muestras en cada una de ellas

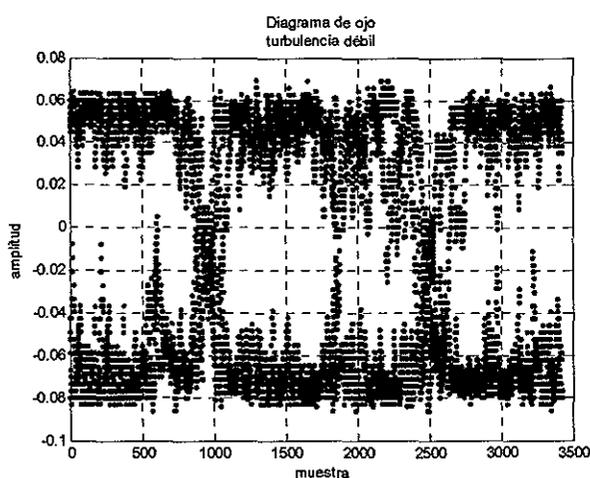


Figura 56. Diagrama de ojo obtenido para un régimen de turbulencia débil

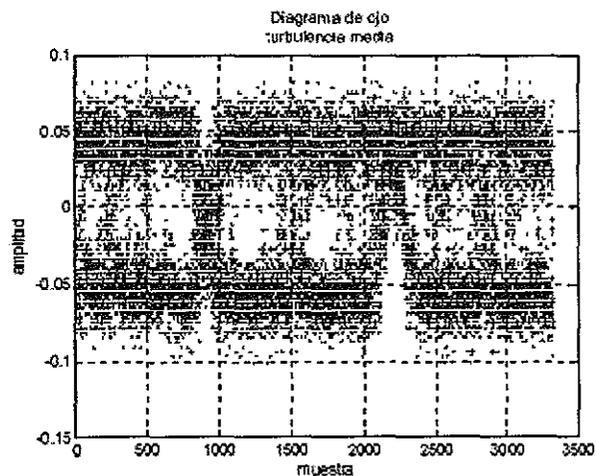


Figura 57. Diagrama de ojo obtenido para un régimen de turbulencia media

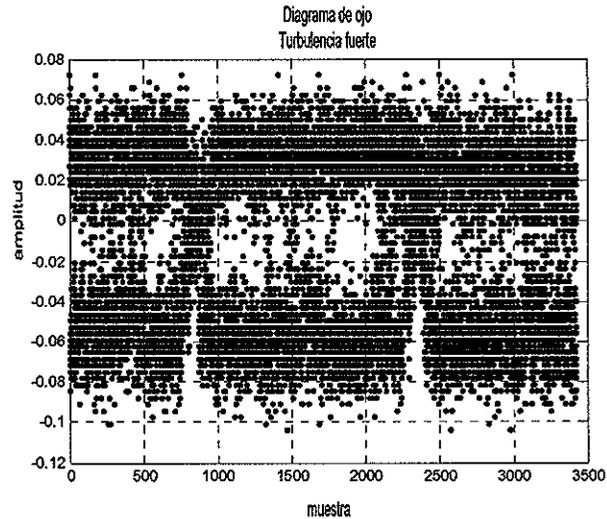


Figura 58. Diagrama de ojo obtenido para un régimen de turbulencia fuerte.

VII.4 Procesamiento de las señales adquiridas

Una vez que se contaba con señales transmitidas (y adquiridas) bajo cada uno de los regímenes de turbulencia planteados el paso siguiente consistió en procesar dichos datos, es decir, hacerlos pasar por el estimador correlacionador. Dicha estructura fue implementada en la plataforma programable SIMULINK, la cual es usualmente empleada para la realización de simulaciones pero en este caso, fue utilizada como etapa de procesamiento fuera de línea, procesando datos reales.

Con la intención de ser más claros en la explicación del trabajo realizado, en esta sección se presenta el procesamiento de una de las señales adquiridas (V_o), es decir, una trama de 16 bits enviados a través del canal atmosférico (cámara de turbulencia), detectados con el arreglo receptor (coherente) y el equipo de adquisición mostrados en la figura 52. Será en la sección siguiente donde se exponga el modelo empleado para la evaluación del desempeño de un sistema de comunicaciones con diversidad espacial. La imagen siguiente (figura 59) corresponde a la implementación en SIMULINK de la estructura “estimador-correlacionador”, es decir, las ecuaciones de estimación de fase y varianza (63 y

64) reportadas en el capítulo V, así como el bloque encargado de realizar la máxima verosimilitud.

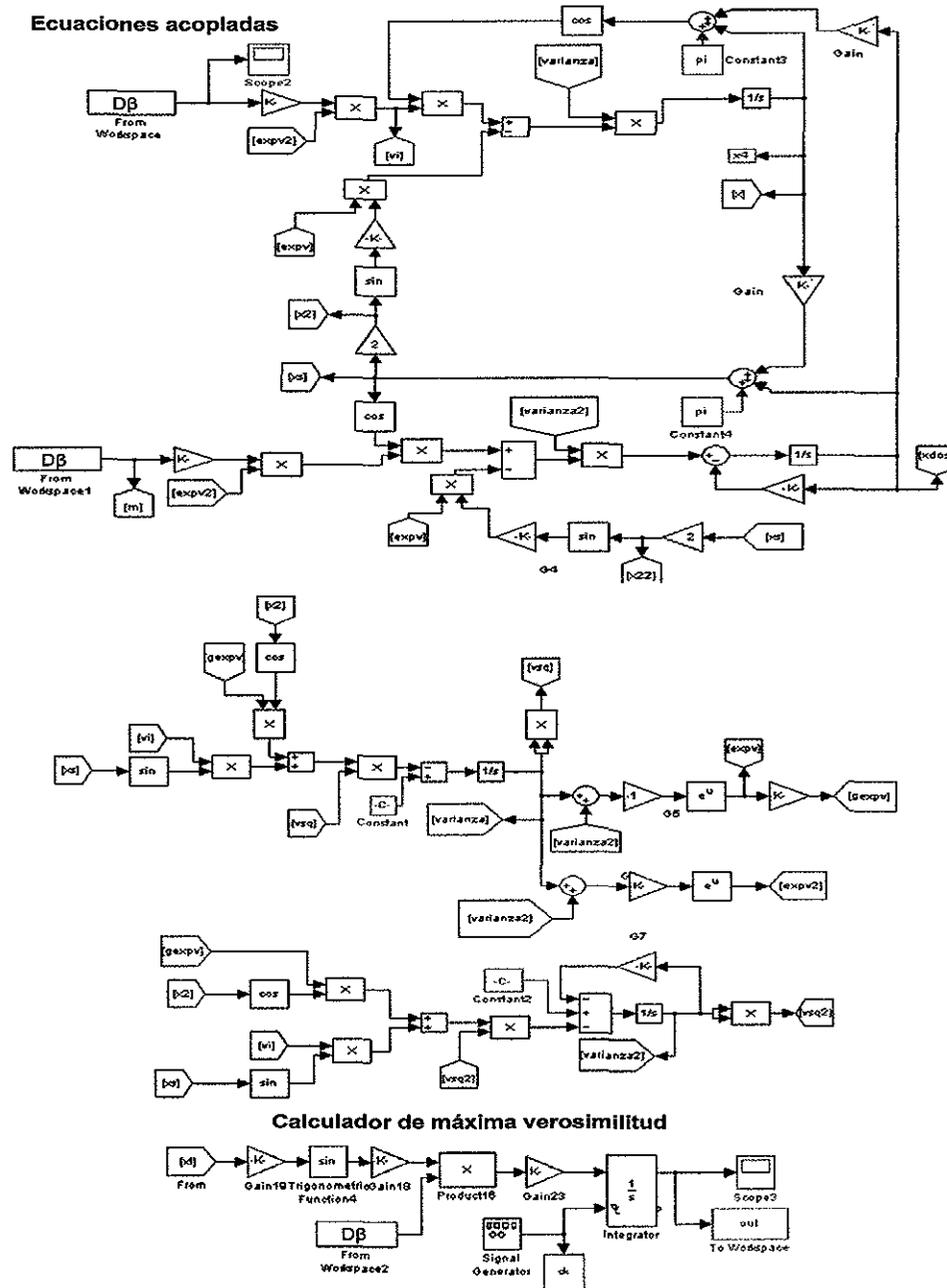


Figura 59. Ecuaciones acopladas y calculador de máxima verosimilitud implementados en SIMULINK.

La serie de gráficos siguientes muestra el observable eléctrico V_O , es decir la señal de entrada en este caso una señal transmitida bajo el régimen de turbulencia débil, y la salida de cada uno de los bloques “estimador-correlacionador” tanto de “0” como de “1”, indicados en la figura 30 como las señales ML_0 y ML_1 .

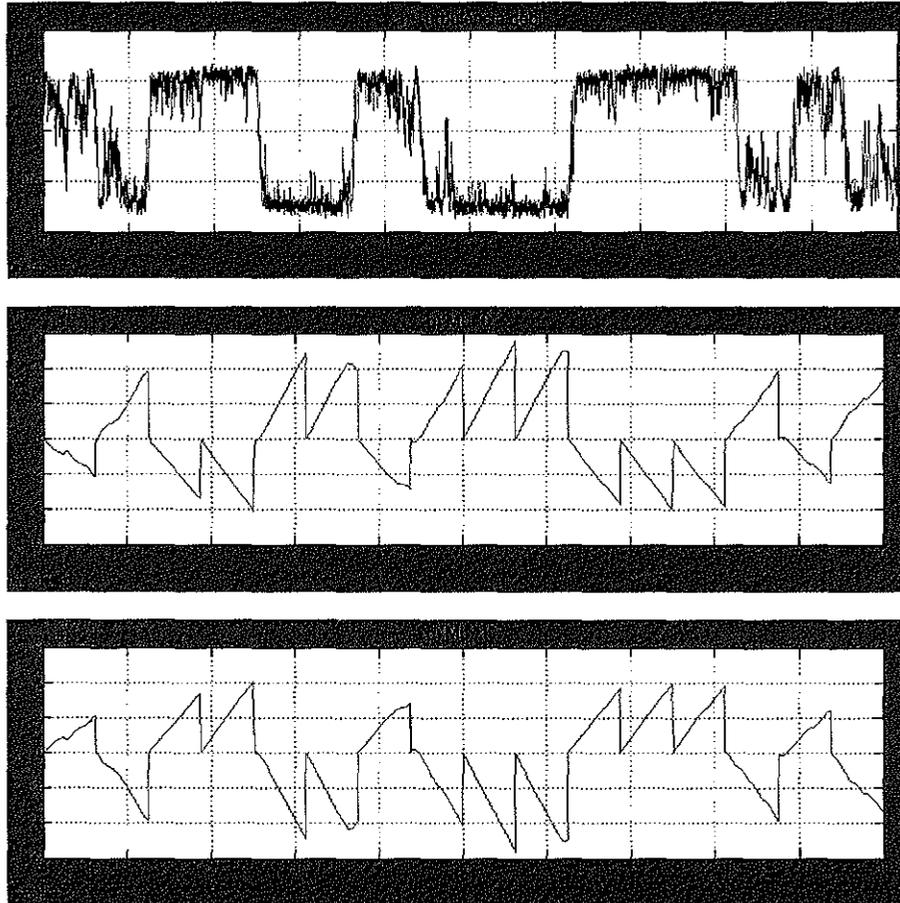


Figura 60. a) Observable eléctrico (turbulencia débil), b) salida del estimador-correlacionador para “0”, c) salida del estimador-correlacionador para “1”.

La magnitud de los valores de las señales ML_0 y ML_1 son almacenados en un vector al término de cada periodo de bit, es decir se tienen 16 valores para cada estimado, tras compararlos uno a uno aquel que resulte mayor corresponde al dato estimado.

VII.4.1 Diseño de un sistema con diversidad espacial (2x2)

Uno de los objetivos mencionados al inicio fue el probar un sistema de comunicaciones ópticas operando bajo un esquema de diversidad espacial. Si bien es cierto que la implementación práctica de dicho sistema dentro del laboratorio es complicada, pues como puede observarse el arreglo final mostrado en la figura 52 no contempla el uso de múltiples transmisores y múltiples receptores, sin embargo se desarrolló una estrategia que permitiera cubrir el objetivo antes citado. La idea básica consiste en la adquisición y procesamiento no simultáneo de varias señales de información, es decir tramas de bits, bajo diferentes regímenes de turbulencia, siempre se enviaría la misma palabra digital (1 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 1 0 1 0) y posteriormente se agruparían para así conformar un sistema con diversidad espacial, cada uno de los diferentes grupos que se formen con las señales adquiridas representará un sistema con diversidad espacial diferente. De este modo se adquirieron dos tramas de 16 bits cada una para cada nivel de turbulencia, es decir, en el laboratorio se generaron, transmitieron, recibieron y adquirieron seis tramas diferentes; dos bajo un régimen de turbulencia débil, dos mas bajo un régimen de turbulencia media y otras dos bajo el régimen de turbulencia fuerte. La figura 61 muestra tres de las seis señales mencionadas, cabe mencionar que al adquirir estos observables eléctricos no se tenía la garantía de que cada trama estuviera alineada en tiempo con las demás, por lo que fue necesario alinearlas todas antes de procesarlas con el estimador-correlacionador implementado en SIMULINK.

La notación que emplearemos para referirnos y distinguir a cada una de estas tramas es la siguiente:

Señales adquiridas con nivel bajo de turbulencia: $D\alpha$, $D\beta$

Señales adquiridas con nivel medio de turbulencia: $M\alpha$, $M\beta$

Señales adquiridas con nivel alto de turbulencia: $F\alpha$, $F\beta$

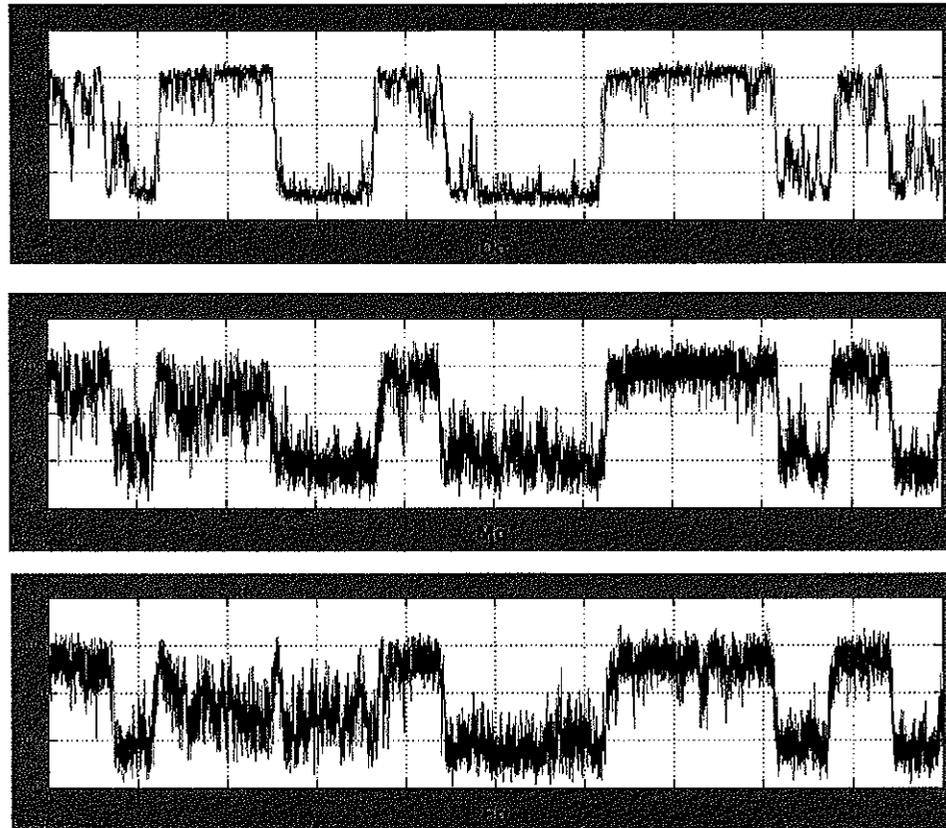


Figura 61. Tres de las seis señales adquiridas, cada una bajo un régimen de turbulencia distinto, tramas alineadas en tiempo.

La manera en la que agruparemos estas señales para conformar diversos escenarios con diversidad espacial es la siguiente:

Tabla VIII. Conformación de los casos a analizar en un esquema de diversidad espacial 2x2.

	Rama A	Rama B
Caso #1	$D\alpha$	$M\beta$
Caso #2	$D\beta$	$F\alpha$
Caso #3	$M\alpha$	$F\beta$

De esta manera se plantean tres casos diferentes para un esquema con diversidad espacial 2x2 (figura 62), la razón de agrupar así los casos está basada

en que cada una de las ramas de un sistema de comunicaciones con diversidad espacial representa un canal independiente y por tanto es factible el hecho de que cada rama sufra un desvanecimiento diferente o en nuestro caso, un nivel de turbulencia distinto.

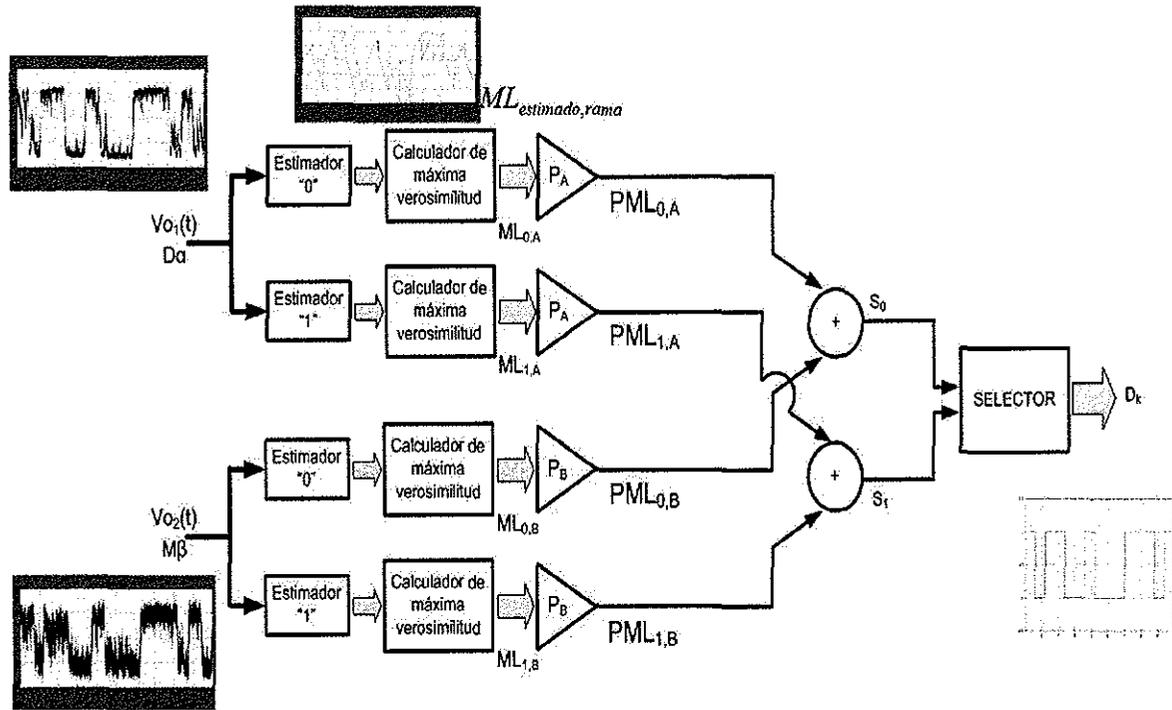


Figura 62. Esquema de diversidad de transmisión 2x2 (notación específica para caso #1).

Como puede observarse es necesario determinar los pesos de cada una de las ramas, dentro del esquema 2x2 se calcularán tantas intensidades totales como casos y en cada caso existen tantos pesos a determinar como ramas.

Para la determinación de los pesos la primera operación realizada fue el cálculo de la intensidad promedio de cada trama de datos, esta fue generada mediante la operación $I = \langle A^2 \rangle$.

La tabla siguiente muestra los valores obtenidos en cada una de las tramas planteadas:

Tabla IX. Intensidad de las tramas de 16 bits adquiridas.

Trama	Intensidad
D α	3.9768
D β	3.9985
M α	3.9877
M β	3.9977
F α	3.9543
F β	3.9526

Planteemos ahora el cálculo de los pesos para el caso #1, la notación empleada es la siguiente:

$$I_{rama} \qquad I_{T_{caso,esquema}} \qquad P_{caso,rama}$$

$$I_{T_{1,2 \times 2}} = I_A + I_B = I(D\alpha) + I(M\beta)$$

$$I_{T_{1,2 \times 2}} = 3.9768 + 3.9977 = 7.9745$$

$$P_{1,A} = \frac{I_A}{I_{T_{1,2 \times 2}}} = \frac{3.9768}{7.9745} = 0.498689$$

$$P_{1,B} = \frac{I_B}{I_{T_{1,2 \times 2}}} = \frac{3.9977}{7.9745} = 0.501310$$

De esta manera se importan las señales D α y M β al programa elaborado en SIMULINK, estructura presentada en la figura 59, el cual arroja los valores de los estimados "0" y "1" (ML_{0,A}, ML_{1,A}, ML_{0,B}, ML_{1,B}) para cada señal, estos 16 valores deben ahora ser ponderados por los pesos anteriormente calculados para así obtener las señales (PML_{0,A}, PML_{1,A}, PML_{0,B}, PML_{1,B}), posteriormente se realiza la suma correspondiente para la obtención de los valores de S₀ y S₁, ambas variables se comparan bit a bit y el mayor de estos es el dato estimado D_k. Todo esto es más claro y sencillo de observar en la tabla siguiente:

Tabla X. Dato estimado para el caso #1 bajo un esquema transmisión 2x2.

CASO #1, ESQUEMA 2X2								S ₀ = PML _{0,A} + PML _{0,B}	S ₁ = PML _{1,A} + PML _{1,B}	D _k
Rama A				Rama B						
P _{1,A} = 0.49868957				P _{1,B} = 0.50131042						
ML _{0,A}	ML _{1,A}	PML _{0,A}	PML _{1,A}	ML _{0,B}	ML _{1,B}	PML _{0,B}	PML _{1,B}			
2.09	2.12	1.042	1.057	2.06	2.11	1.032	1.057	2.074	2.114	1
3.7	3.65	1.845	1.820	2.64	2.59	1.323	1.298	3.168	3.118	0
3.99	4.01	1.989	1.999	3.84	3.9	1.925	1.955	3.914	3.954	1
4.73	4.77	2.358	2.378	1.79	1.84	0.897	0.922	3.256	3.301	0
4.21	4.18	2.099	2.084	1.72	1.68	0.862	0.842	2.961	2.926	0
3.91	3.88	1.949	1.934	1.65	1.61	0.827	0.807	2.777	2.742	0
2.61	2.76	1.301	1.376	2.13	2.19	1.067	1.097	2.369	2.474	1
4.03	4	2.009	1.994	3.88	3.81	1.945	1.909	3.954	3.904	0
5.7	5.63	2.842	2.807	4.58	4.54	2.296	2.275	5.138	5.083	0
4.85	4.84	2.418	2.413	3.75	3.69	1.879	1.849	4.298	4.263	0
3.66	3.71	1.825	1.850	2.1	2.18	1.052	1.092	2.877	2.942	1
3.88	3.93	1.934	1.959	2.55	2.61	1.278	1.308	3.213	3.268	1
3.79	3.82	1.890	1.904	2.3	2.35	1.153	1.178	3.043	3.083	1
3.79	3.76	1.890	1.875	3.85	3.8	1.930	1.904	3.820	3.780	0
2.67	2.71	1.331	1.351	2.48	2.52	1.243	1.263	2.574	2.614	1
3.31	3.28	1.650	1.635	3.68	3.61	1.844	1.809	3.495	3.445	0

De manera semejante se generaron las tablas de dato estimado para los casos #2 y #3 del esquema de diversidad 2x2, la obtención de los pesos y dichas tablas son reportadas en el primer apéndice de esta tesis.

VII.4.2 Diseño de un sistema con diversidad espacial (4x4)

Dado lo sistemático de la estrategia empleada para la generación del esquema de diversidad espacial se decidió realizar el mismo procedimiento para la generación

de un esquema 4x4, la forma en la que se procedió fue exactamente la misma que la descrita para el esquema 2x2.

La manera en la que se agruparon las señales para conformar los diversos escenarios con diversidad espacial 4x4 es la siguiente:

Tabla XI. Conformación de los casos a analizar en un esquema de diversidad espacial 4x4.

	Rama A	Rama B	Rama C	Rama D
Caso #1	D α	D β	M α	F α
Caso #2	D β	M α	M β	F β
Caso #3	M β	F α	F β	D α
Caso #4	M α	M β	F α	F β

Nuevamente se presenta la obtención de los pesos correspondientes al caso #1:

$$I_{T1,4x4} = I_A + I_B + I_C + I_D$$

$$I_{T1,4x4} = I(D\alpha) + I(D\beta) + I(M\alpha) + I(F\alpha)$$

$$I_{T1,4x4} = 3.9768 + 3.9985 + 3.9877 + 3.9543 = 15.9173$$

$$P_{1,A} = \frac{I_A}{I_{T1,4x4}} = \frac{3.9768}{15.9173} = 0.249841$$

$$P_{1,B} = \frac{I_B}{I_{T1,4x4}} = \frac{3.9985}{15.9173} = 0.251204$$

$$P_{1,C} = \frac{I_C}{I_{T1,4x4}} = \frac{3.9877}{15.9173} = 0.250526$$

$$P_{1,D} = \frac{I_D}{I_{T1,4x4}} = \frac{3.9543}{15.9173} = 0.248427$$

Tabla XII. Dato estimado para el caso #1 bajo un esquema transmisión 4x4.

CASO #1, ESQUEMA 4X4										
Rama A		Rama B		Rama C		Rama D				
$P_{1,A} =$ 0.24984136		$P_{1,B} =$ 0.25120464		$P_{1,C} =$ 0.25052615		$P_{1,D} =$ 0.24842781		$S_0 =$ PML _{0,A} +PML _{0,B} +PML _{0,C} +PML _{0,D}	$S_1 =$ PML _{1,A} +PML _{1,B} +PML _{1,C} +PML _{1,D}	D_k
PML _{0,A}	PML _{1,A}	PML _{0,B}	PML _{1,B}	PML _{0,C}	PML _{1,C}	PML _{0,D}	PML _{1,D}			
0.527	0.529	0.512	0.532	0.591	0.598	0.511	0.511	2.142	2.185	1
1.900	1.870	1.854	1.814	0.333	0.328	0.655	0.655	4.744	4.656	0
1.699	1.690	2.000	1.993	0.229	0.230	0.953	0.953	4.8835	4.8839	1
2.056	2.044	2.371	2.371	0.230	0.340	0.444	0.444	5.102	5.214	1
2.468	2.418	2.110	2.078	0.931	0.924	0.427	0.427	5.938	5.838	0
1.945	1.919	1.960	1.929	0.967	0.713	0.409	0.409	5.282	4.963	0
1.427	1.436	1.308	1.372	0.701	0.706	0.529	0.529	3.966	4.059	1
2.086	2.039	2.020	1.988	0.766	0.754	0.963	0.963	5.837	5.729	0
2.820	2.737	2.857	2.799	0.844	0.824	1.137	1.137	7.660	7.489	0
2.478	2.433	2.431	2.406	1.014	0.997	0.931	0.931	6.856	6.753	0
1.845	1.835	1.834	1.844	0.811	0.819	0.521	0.521	5.013	5.040	1
2.016	2.039	1.945	1.954	0.904	0.921	0.633	0.633	5.499	5.564	1
1.910	1.949	1.899	1.899	0.844	0.849	0.571	0.571	5.226	5.282	1
1.930	1.900	1.899	1.869	0.683	0.663	0.956	0.956	5.470	5.377	0
1.080	1.092	1.338	1.347	0.826	0.836	0.616	0.616	3.862	3.902	1
1.654	1.610	1.659	1.630	0.809	0.799	0.914	0.914	5.036	4.937	0

Las tablas IX y XI muestran diversos parámetros, entre ellos se aprecia el dato estimado D_k , este es propiamente el resultado final que debe ser analizado y discutido, pues es el que está directamente relacionado con el funcionamiento del algoritmo empleado. Los resultados de los datos estimados (en comparación con

la secuencia de datos enviada) por cada uno de los casos planteados para ambos esquemas, 2X2 y 4X4, son desplegados en la tabla XII.

Tabla XIII. Comparación entre la secuencia enviada y la secuencia estimada en todos los casos planteados.

esquema	Dato env.	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
2x2	Caso #1	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Caso #2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Caso #3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4x4	Caso #1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Caso #2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Caso #3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Caso #4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Es importante darle no sólo una correcta interpretación sino también una justa dimensión a la tabla de la parte superior, en ella puede observarse que sólo un dato fue estimado de manera incorrecta, en el caso #1 para el esquema 2X2. Es evidente que el procesar únicamente tramas de 16 bits en cada caso no permite una evaluación completa del arreglo empleado, pues la manera en la que se determina la calidad y desempeño de un sistema de comunicaciones usualmente requiere del envío y recepción de millones de datos. Sin embargo los resultados obtenidos nos permiten asumir que el sistema propuesto es funcional, es decir, el sistema planteado, con características de sistema coherente y el uso de la estimación de fase para la recuperación de los datos es capaz de representar una opción para un sistema de comunicaciones, y por otro lado, es posible enunciar, con la misma cautela, que el uso de la diversidad espacial, en este caso elevando el grado de diversidad de 2 a 4, representó una mejora en el resultado de la

secuencia estimada. Estas aseveraciones pueden tener mayor solidez cuando los componentes del sistema permitan alcanzar el potencial deseado.

El análisis e interpretación de estos resultados y los presentados a lo largo de todo el documento, así como el alcance de los mismos y la proyección de este trabajo son planteados y presentados en el siguiente y último capítulo del presente trabajo de tesis.

Capítulo VIII

Conclusiones y trabajo futuro

VIII.1 Conclusiones y aportaciones

El principal objetivo del presente trabajo de tesis fue el estudio teórico-experimental de los efectos producidos por la turbulencia atmosférica en un sistema de comunicaciones ópticas inalámbrico con detección coherente así como de las diversas alternativas existentes para compensar los efectos de dicha turbulencia sobre el campo óptico de información.

En particular, se implementó y caracterizó un esquema de diversidad espacial novedoso del tipo transmisor de haz múltiple y receptor de aperturas múltiples (MBT-MAR: por sus siglas en inglés) combinado con estimación de fase óptica y ponderación de cada una de sus ramas en base a la intensidad relativa.

Se realizaron asimismo pruebas experimentales sobre los efectos de la turbulencia atmosférica en dos parámetros básicos de la portadora óptica que viaja a través del canal inalámbrico: la intensidad y el estado de polarización.

La repercusión del canal atmosférico en la intensidad de la señal fue caracterizada por la variable índice de centelleo, la cual asocia una magnitud en función de las variaciones de la intensidad provocadas por la turbulencia atmosférica; el modelado empleado para la cuantificación de la turbulencia atmosférica contempla variables tales como la longitud de onda, la distancia del enlace e incluso las condiciones asociadas al entorno meteorológico al contemplar la variable C_n^2 . La ecuación que describe este comportamiento es la siguiente:

$$\sigma_I^2 = 0.492 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \dots\dots\dots (73)$$

Esta última fue programada y permitió la realización de una simulación y un análisis para diferentes escenarios, es decir, diversas longitudes onda. Los resultados obtenidos de dicho proceso de teoría - simulación denotaron la explícita dependencia a los parámetros asociados y lo más importante, hicieron posible determinar el rango de valores que el índice de centelleo tendría en enlaces de características típicas de las comunicaciones ópticas inalámbricas (longitud de onda $\lambda=550\text{nm}$, 850nm y 1550nm y una longitud de enlace $L=1.5\text{ Km}$)

Tabla XIV. Valores de σ_I^2 para regímenes de turbulencia fuerte.

Turbulencia fuerte ($C_n^2 > 0.5 \times 10^{-13}$) $L = 1.5\text{Km}$	
Varianza de centelleo, σ_I^2	Longitud de onda, λ
>2.84	550nm
>1.72	830nm
>0.84	1550nm

La determinación de este rango, en específico el generado para $\lambda=1550\text{nm}$, y la plataforma de simulación generada son las que permitieron la elaboración de pruebas experimentales en el exterior y posteriormente en el laboratorio.

Las pruebas realizadas en el exterior involucraron la obtención del índice de centelleo de manera práctica para parámetros específicos tales como $\lambda=830\text{nm}$ y $\lambda=550\text{nm}$ y una distancia de enlace $L=353\text{m}$, los valores obtenidos en el índice de centelleo fueron comparados con los generados por la simulación. Con el análisis de los resultados obtenidos no solamente se cumple con uno de los objetivos

planteados desde un comienzo, sino que de igual manera constituye una de las aportaciones fundamentales de este trabajo.

Posteriormente se realizaron pruebas en laboratorio, generando turbulencia con la cámara descrita en este documento. Mediante el modelo propuesto se determinaron los valores de centelleo que debían ser generados en laboratorio si se deseaba emular un régimen de turbulencia fuerte, para un enlace con parámetros $\lambda=1550\text{nm}$ y $L=1.5\text{Km}$ ($\sigma_I^2 > 0.84$), las primeras pruebas realizadas arrojaban como resultado un índice de centelleo muy bajo ($\sigma_I^2 > 0.09$), pese a algunas modificaciones los valores de centelleo deseados no pudieron ser generados con la cámara, sin embargo el modelo creado permitió determinar que la turbulencia generada por la cámara empleada ($\sigma_I^2 > 0.317$) era correspondiente al régimen fuerte si se asociaba a una distancia de enlace $L=850\text{m}$. Otra característica que mostró correspondencia entre las pruebas experimentales en el exterior y las elaboradas en el laboratorio con la cámara de turbulencia fue la relacionada con la función de densidad de probabilidad obtenida para ambos casos, es decir, las variaciones de intensidad generadas en el laboratorio no sólo son correspondientes en magnitud con las observadas en el enlace real, sino que dichas variaciones también presentan un mismo perfil de distribución.

Con respecto a los efectos de la turbulencia atmosférica en el estado de polarización de una señal óptica se procedió de manera un tanto diferente, en este caso no fue posible realizar mediciones del estado de polarización en las pruebas realizadas en el exterior. Se realizaron pruebas de dicho parámetro en el entorno del laboratorio y el resultado de dichas pruebas permitió establecer que los efectos en el estado de polarización provocados por la turbulencia atmosférica implican una variación de alrededor de 7° , dato que fue posteriormente comparado y

correspondiente con los resultados reportados en la referencia citada [Grossinger, 2008].

El conjunto de pruebas experimentales realizadas fueron congruentes con la teoría estudiada y presentada (bajo las condiciones planteadas), y todo ello respaldó y validó (desde nuestro punto de vista), el uso del dispositivo diseñado para la emulación de la turbulencia atmosférica en el entorno del laboratorio. Lo anterior nos permitió alcanzar el objetivo de la implementación experimental de un esquema con diversidad espacial.

Para la estimación de fase óptica en la etapa de recepción nos basamos en resultados previos de la tesis doctoral de Juan de Dios Sánchez López [Sánchez López, 2009]. Es pertinente mencionar, que una de nuestras aportaciones es la continuación de dicho trabajo adaptando dicha técnica a un esquema MBT-MAR.

La adaptación empleada para la generación de esquemas con diversidad espacial no fue elaborada propiamente en la plataforma experimental del laboratorio, la cual consistía de un enlace de comunicaciones ópticas con modulación de fase de la portadora óptica y con detección coherente mediante un esquema de recepción de fotodetección balanceada. La estrategia diseñada para las pruebas del sistema MBT-MAR consistió en la adquisición de las señales, en este caso, diversas tramas de 16 bits bajo diferentes regímenes de turbulencia (débil, media y fuerte de acuerdo al índice de centelleo medido de manera simultánea con la transmisión) para su posterior procesamiento fuera de línea, esto quiere decir que los datos adquiridos, datos reales, fueron procesados de manera posterior en el entorno de programación de SIMULINK, plataforma que es usualmente empleada para la simulación, pero que en este caso fue utilizada para el procesamiento digital de la señal, específicamente para la implementación de las ecuaciones acopladas de estimado de fase y varianza. Debido al procesamiento fuera de línea fue posible el diseño de un par de escenarios de diversidad espacial (7 casos en

total, 3 para un esquema 2x2 y otros 4 para un esquema 4x4), pues de esta manera era posible procesar cada trama adquirida por separado para posteriormente realizar el procesamiento propuesto en el algoritmo descrito. Los resultados arrojaron una mejora en el desempeño del sistema, bits estimados sin error, debido al uso de la diversidad espacial.

Otra aportación de este trabajo de tesis consistió en la obtención de una plataforma teórica-experimental para evaluar los efectos de la turbulencia en un enlace de comunicaciones óptico-inalámbrico.

En relación con este propósito, se efectuó el análisis de las antenas ópticas de características comerciales de acuerdo a parámetros reales tales como la distancia del enlace, la potencia que es posible transmitir y la potencia que se espera recibir, dicho análisis arrojó una propuesta de las lentes que pueden ser adquiridas y que cumplirían con los requerimientos planteados para el enlace real. En este mismo sentido se elaboró un estudio sobre los equipos, en concreto, tarjetas de adquisición y procesamiento de datos que podrían ser utilizadas para el procesamiento de las señales en tiempo real, en este campo el resultado de dicho estudio no fue tan concreto como el obtenido con las lentes (antenas ópticas), pero si fue de utilidad el tener un primer acercamiento con las posibilidades existentes en el mercado, se evaluó en un primer plano la relación entre el beneficio y el costo de diversos productos y como una decisión preliminar se determinó que lo mas adecuado es el uso de un dispositivo FPGA. Lo respectivo a estas aportaciones está incluido en el apéndice B de este documento.

VIII.2 Trabajo a futuro

En base a los resultados obtenidos de este trabajo de tesis se propone como trabajo a futuro:

a) Implementación y caracterización del subsistema desarrollado para operar en campo. La evaluación de su desempeño puede ser mejorada mediante el uso de equipo más avanzado, (de reciente adquisición en el laboratorio de comunicaciones ópticas), tal como osciloscopios de mejores características a las del empleado en nuestro caso.

b) En relación con las pruebas experimentales en el laboratorio es posible mejorar las prestaciones de la cámara de turbulencia, es decir, cambiar el diseño para obtener de ella mayores valores de turbulencia para mayores rangos de distancia que el aquí reportado, y lo que es más importante aún, poder generar dichos niveles de manera controlada para así no tener que recurrir a una estrategia secundaria para la determinación del centelleo como fue el caso. Las sugerencias personales para dichas mejoras ya fueron comentadas con un grupo de trabajo que se encuentra realizando una nueva versión de la cámara de turbulencia, algunas de ellas fueron: la utilización de un material más térmico para la fabricación de la caja, la implementación de ventiladores con movimiento y además de carácter independiente para la generación de la variación de temperatura en el interior de la caja e incluso el uso de una interfaz de usuario más amigable y de un despliegue de datos más rápido. Igualmente es posible mejorar el análisis de los efectos de la turbulencia óptica en las comunicaciones coherentes al realizar estudios sobre la repercusión de dicho fenómeno en la fase de la señal óptica, y realizando pruebas experimentales fuera del laboratorio para una distancia mayor a la aquí reportada (353m).

c) El tercer aspecto a abordar es el procesamiento digital de la señal. En este trabajo se realizó la adquisición de las señales mediante un osciloscopio digital y el procesamiento de las mismas se elaboró en modo fuera de línea con una plataforma muy básica como lo es el programa SIMULINK. Al utilizar equipo de propósito más específico es posible explotar fortalezas del esquema planteado, tales como la velocidad de transmisión o el grado de diversidad a emplear.

Bibliografía

Abtahi, M. y Rusch, L. A. 2006. *"Mitigating of scintillation noise in FSO communications links using saturated optical amplifiers"*. Military Communications Conference, 23-25 Oct, Washington, DC. 1-5p.

Agrawal, G. P., 2005. *"Lightwave technology telecommunications systems"*, John Wiley and Sons, tercera edición. Canada. 461pp.

Agrawal, G. P. 2002. *"Fiber-Optic Communication Systems"*, John Wiley and Sons, New York, tercera edición. 626 pp.

Andrews, L. C. y Phillips, R.L. 2005. *"Laser beam propagation through random media"*. SPIE Press. Bellingham, Washington. 782 pp.

Arvizu Mondragón, A. 2000. *"Estimación de fase en comunicaciones ópticas coherentes"*, Tesis doctoral, CICESE, Ensenada. 145pp.

Arvizu Mondragón, A., Mendieta Jiménez F. J. y Chavez Olivarez, R. 1998 *"Diseño y caracterización de un PLL optoelectrónico con términos de alto orden"*, Memorias del SOMI XIII Congreso de Instrumentación. Ensenada, Baja California. 532-536p.

Belmonte, A. y Kahn J. M., 2009. *"Capacity of coherent free-space optical links using Diversity-combining techniques"*, Optics Express 17(15): 12601-12611p.

Betti, S., De Marchis, G. y Iannone, E., 1995. *"Coherent optical communications systems"*, John Wiley and Sons, New York. 539 pp.

Brusselbach H., Wang S., Minden M., Jones C. D. y Mangir M., 2005. *"Power-scalable phase-compensating fiber-array transceiver for laser communications through the atmosphere"*, Optical society of America. 22(2):347-353p

Chan, V. W, 2006. *"Free-space optical communications"*, Journal of lightwave technology", IEEE 24 (12): 4750-4762p.

Cvijetic, M. 1996. *"Coherent and nonlinear lightwave communications"*, Artech House, Boston. 304pp.

Franz, J. H. y Jain, V. K. 2000. *"Optical communications, components and systems"*. CRC Press. New Delhi, 717 pp.

Gagliardi, R. M. 1976. *“Optical communications”*. John Wiley and Sons Inc. New York, 432pp.

Gatt, P., Costello, T. P., Heimmermann, D.A., Castellanos, D. C., Weeks, R. A. y Stickley M. C. 1996. *“Coherent optical array receivers for the mitigation of atmospheric turbulence and speckle effects”*. Optical society of America. 35 (31): 5999-6009p.

Georghiades, C. N. 1985. *“A proposed receiver structure for heterodyne optical communication systems”*, IEEE Communications. 33(4): 382-384p.

Gitlin, R. D., Hayes, J. F, Weinstein, S. B. 1973. *“Data communications principles”*, Plenum Press, New York. 733pp.

Goodman, J. W. 1985. *“Statistical optics”*, Wiley and Sons. New York. 549pp.

Grosinger, J. 2008. *“Investigation of Polarization Modulation in Optical Free Space Communications through the Atmosphere”*, Tesis de maestría, Instituto de comunicación y de ingeniería de radio-frecuencia, Viena, Austria, 83pp.

Hajjarian, Z. y Fadlullah, J. 2009. *“MIMO free space optical Communications in turbid and turbulent atmosphere”*, Journal of communications. 4 (8). 524-532p.

Hemmati, H. y Mecherle, S. 2004. *“Free-Space Optical Communications”*, May 3-6 Short course Engineering, University of California, Los Angeles.

Hourani, H. 2005. *“An Overview of Diversity Techniques Wireless Communication Systems”*, Notes from Postgraduate Course in Radio Communications, Helsinki University of Technology. Helsinki, Finlandia.

Kaminow, I. P., Tingye, L., y Willner, A. E. 2008. *“Optical Fiber Telecommunications”* V B Systems and Networks, Vol. 2. Elsevier, San Diego Ca. USA, quinta edición. 915 pp.

Kasovsky, L., Benedetto, S. y Willner, A. 1996. *“Optical fiber communications systems”*, Artech house, Boston, London. 714pp.

Kazovsky, L.G., Kagelarakis, G. y Shaw, W. 2006. *“Homodyne phase-shift-keying systems: Past challenges and future opportunities”*. Journal of Lightwave Technology. 24(12): 4876-4833 p.

Lambert, S.G., y Casey, W.L. 1995. *“Laser communications in space”*, Artech House, Boston, London. 390 pp.

Meyr, H. 1990. *"Synchronization in digital communications"*, Vol. 1", John Wiley and sons, Inc., New York.

Osche, G. 2002. *"Optical detection theory for laser applications"*, John Wiley and Sons. USA. 412 pp.

Popoola, W. O., Ghassemlooy, Z., Allen, J.I.H., Leitgeb, E. y Gao S. 2008. *"Free space optical communication employing modulation and spatial diversity in atmospheric turbulence channel"*, IET Optoelectron. 2 (1). 16-23 p.

Puryear, Andrews. y Chan, Vincent. 2009. *"Coherent optical communication over the turbulent atmosphere with spatial diversity and wavefront predistorsion"*. IEEE "GLOBECOM" 2009 Honolulu, HI, nov 30-dec 4. 1-8 p.

Ryu, S. 1995. *"Coherent lightwave communications systems"*. Artech House. Boston. 283 pp.

Sanchez Lopez, JD, 2009. *"Estudio teórico-experimental de un sistema de comunicaciones ópticas homodino utilizando el canal inalámbrico turbulento"*, Tesis doctoral, CICESE, Ensenada, Baja California. 132pp.

Sánchez López, JD, Arvizu Mondragón, A., Mendieta Jiménez, F. J. y Nieto Hipólito, J. I. 2009. *"Trends of the optical communications"*. M. Khatib Editores. In Tech. 520 pp.

Shin, E. J. y Chan W. S. 2002. *"Optical communication over the turbulent atmospheric channel using spatial diversity"*, IEEE. GLOBECOM (3), 2055-2060 p.

Snyder, D. L. 1969. *"The state- variable approach to continuous estimation with applications to analog communication theory"*, Research monograph No. 51, The MIT press, Cambridge Mass. 114 pp.

Tang, X., Ghassemlooy, Z., Rajbhandari, S., Popoola, W. O., Lee, C. G., Leitgeb, E., Ahmadi, V. 2010. *"Free-space optical communication employing polarization shift keying coherent modulation in atmospheric turbulence channel"*, CSNDSP 7th International symposium, New Castle, U.K., 615-629p.

Tatarskii, V.I. 1971. *"The effects of turbulence atmosphere on wave propagation"*, The National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Department of Commerce. 472 pp.

Van Trees, H. L. 1967. *"Detection, estimation, and modulation theory Vol. 1"*, John Wiley and sons, Inc., USA, 697 pp.

Vilnrotter, V. y Lau, C. W. 2005. "*Optical array receiver for communication through atmospheric turbulence*", Journal of lightwave technology, 23 (4): 1664-1672p.

Wheelon, A.D. 2003. "*Electromagnetic scintillation Vol. II. Weak Scattering*", Cambridge University Press. Cambridge. 440 pp.

Willebrand, Heinz and Ghuman, S. Baksheesh. 2002. "*Free-Space Optics: Enabling Optical Conectivity in Today's Networks*", by Sams Publishing, 259 pp.

Zhu, X. y Kahn, J.M. 2002. "*Free space optical communication through atmospheric turbulence channels*", IEEE Transactions on Communications. 50 (8): 1293-1300p.

Apéndice A

Tablas de estimados

Tabla A.I Caso #1, esquema 2x2.

CASO #1, ESQUEMA 2X2										
Rama A				Rama B				S ₀ = PML _{0,A} + PML _{0,B}	S ₁ = PML _{1,A} + PML _{1,B}	D _k
P _{1,A} = 0.49868957				P _{1,B} = 0.50131042						
ML _{0,A}	ML _{1,A}	PML _{0,A}	PML _{1,A}	ML _{0,B}	ML _{1,B}	PML _{0,B}	PML _{1,B}			
2.09	2.12	1.042	1.057	2.06	2.11	1.032	1.057	2.074	2.114	1
3.7	3.65	1.845	1.820	2.64	2.59	1.323	1.298	3.168	3.118	0
3.99	4.01	1.989	1.999	3.84	3.9	1.925	1.955	3.914	3.954	1
4.73	4.77	2.358	2.378	1.79	1.84	0.897	0.922	3.256	3.301	0
4.21	4.18	2.099	2.084	1.72	1.68	0.862	0.842	2.961	2.926	0
3.91	3.88	1.949	1.934	1.65	1.61	0.827	0.807	2.777	2.742	0
2.61	2.76	1.301	1.376	2.13	2.19	1.067	1.097	2.369	2.474	1
4.03	4	2.009	1.994	3.88	3.81	1.945	1.909	3.954	3.904	0
5.7	5.63	2.842	2.807	4.58	4.54	2.296	2.275	5.138	5.083	0
4.85	4.84	2.418	2.413	3.75	3.69	1.879	1.849	4.298	4.263	0
3.66	3.71	1.825	1.850	2.1	2.18	1.052	1.092	2.877	2.942	1
3.88	3.93	1.934	1.959	2.55	2.61	1.278	1.308	3.213	3.268	1
3.79	3.82	1.890	1.904	2.3	2.35	1.153	1.178	3.043	3.083	1
3.79	3.76	1.890	1.875	3.85	3.8	1.930	1.904	3.820	3.780	0
2.67	2.71	1.331	1.351	2.48	2.52	1.243	1.263	2.574	2.614	1
3.31	3.28	1.650	1.635	3.68	3.61	1.844	1.809	3.495	3.445	0

Calculo de la intensidad total y los pesos:

$$I_{T1,2x2} = I_A + I_B$$

$$I_{T1,2x2} = I(D\alpha) + I(M\beta)$$

$$I_{T1,2x2} = 3.9768 + 3.9977 = 7.9745$$

$$P_{1,A} = \frac{I_A}{I_{T1,2x2}} = \frac{3.9768}{7.9745} = 0.498689$$

$$P_{1,B} = \frac{I_B}{I_{T1,2x2}} = \frac{3.9977}{7.9745} = 0.501310$$

Tabla A.II Caso #2, esquema 2x2.

CASO #2, ESQUEMA 2X2										
Rama A				Rama A				S ₀ = PML _{0,A} + PML _{0,B}	S ₁ = PML _{1,A} + PML _{1,B}	D _k
P _{1,A} = 0.50277257				P _{1,A} = 0.49721485						
ML _{0,A}	ML _{1,A}	PML _{0,A}	PML _{1,A}	ML _{0,B}	ML _{1,B}	PML _{0,B}	PML _{1,B}			
2.09	2.12	1.050	1.065	2.06	2.11	1.024	1.049	2.075	2.115	1
3.7	3.65	1.860	1.820	2.64	2.59	1.323	1.287	3.183	3.108	0
3.99	4.01	2.006	1.999	3.84	3.9	1.925	1.939	3.931	3.938	0
4.73	4.77	2.378	2.378	1.79	1.84	0.897	0.914	3.275	3.293	1
4.21	4.18	2.116	2.084	1.72	1.68	0.862	0.835	2.978	2.919	0
3.91	3.88	1.965	1.934	1.65	1.61	0.827	0.800	2.793	2.735	0
2.61	2.76	1.312	1.376	2.13	2.19	1.067	1.088	2.380	2.465	1
4.03	4	2.026	1.994	3.88	3.81	1.945	1.894	3.971	3.889	0
5.7	5.63	2.865	2.807	4.58	4.54	2.296	2.257	5.161	5.064	0
4.85	4.84	2.438	2.413	3.75	3.69	1.879	1.834	4.318	4.248	0
3.66	3.71	1.840	1.850	2.1	2.18	1.052	1.083	2.892	2.934	1
3.88	3.93	1.950	1.959	2.55	2.61	1.278	1.297	3.229	3.257	1
3.79	3.82	1.905	1.904	2.3	2.35	1.153	1.168	3.058	3.073	1
3.79	3.76	1.905	1.875	3.85	3.8	1.930	1.889	3.835	3.764	0
2.67	2.71	1.342	1.351	2.48	2.52	1.243	1.252	2.585	2.604	1
3.31	3.28	1.664	1.635	3.68	3.61	1.844	1.794	3.508	3.430	0

Calculo de la intensidad total y los pesos:

$$I_{T2,2x2} = I_A + I_B$$

$$I_{T2,2x2} = I(D\beta) + I(F\alpha)$$

$$I_{T2,2x2} = 3.9985 + 3.9543 = 7.9528$$

$$P_{2,A} = \frac{I_A}{I_{T2,2x2}} = \frac{3.9986}{7.9528} = 0.50277257$$

$$P_{2,B} = \frac{I_B}{I_{T1,2x2}} = \frac{3.9543}{7.9528} = 0.49721485$$

Tabla A.III Caso #3, esquema 2x2.

CASO #3, ESQUEMA 2X2										
Rama A				Rama A				S ₀ = PML _{0,A} + PML _{0,B}	S ₁ = PML _{1,A} + PML _{1,B}	D _k
P _{1,A} = 0.50221024				P _{1,A} = 0.49778975						
ML _{0,A}	ML _{1,A}	PML _{0,A}	PML _{1,A}	ML _{0,B}	ML _{1,B}	PML _{0,B}	PML _{1,B}			
2.36	2.39	1.185	1.200	6.81	6.88	3.389	3.424	4.575	4.625	1
1.33	1.31	0.668	0.653	3.06	3	1.534	1.491	2.202	2.144	0
0.918	0.921	0.461	0.459	1.81	1.85	0.907	0.919	1.368	1.379	1
1.34	1.36	0.673	0.678	1.3	1.36	0.651	0.676	1.325	1.354	1
3.72	3.69	1.870	1.840	3.52	3.48	1.764	1.730	3.634	3.570	0
3.86	2.85	1.940	1.421	3.76	3.69	1.884	1.834	3.825	3.255	0
2.8	2.82	1.407	1.406	2.64	2.7	1.323	1.342	2.731	2.748	1
3.06	3.01	1.538	1.501	4.33	4.29	2.170	2.133	3.709	3.634	0
3.37	3.29	1.694	1.640	3.08	3	1.544	1.491	3.238	3.132	0
4.05	3.98	2.036	1.984	3.69	3.6	1.849	1.789	3.886	3.774	0
3.24	3.27	1.628	1.630	2.59	2.62	1.298	1.302	2.927	2.933	1
3.61	3.68	1.815	1.835	1.54	1.58	0.772	0.785	2.587	2.620	1
3.37	3.39	1.694	1.690	1.19	1.25	0.596	0.621	2.290	2.312	1
2.73	2.65	1.372	1.321	2.22	2.19	1.112	1.088	2.485	2.410	0
3.3	3.34	1.659	1.665	6.5	6.56	3.258	3.261	4.917	4.927	1
3.23	3.19	1.623	1.590	1.55	1.51	0.777	0.750	2.400	2.341	0

Calculo de la intensidad total y los pesos:

$$I_{T3,2x2} = I_A + I_B$$

$$I_{T3,2x2} = I(m\alpha) + I(F\beta)$$

$$I_{T3,2x2} = 3.9877 + 3.9526 = 7.9403$$

$$P_{3,A} = \frac{I_A}{I_{T3,2x2}} = \frac{3.9877}{7.9403} = 0.50221024$$

$$P_{3,B} = \frac{I_B}{I_{T3,2x2}} = \frac{3.9526}{7.9403} = 0.49778975$$

Tabla A.IV Caso #1, esquema 4x4.

CASO #1, ESQUEMA 4X4								S ₀ = PML _{0,A} +PML _{0,B} +PML _{0,C} +PML _{0,D}	S ₁ = PML _{1,A} +PML _{1,B} +PML _{1,C} +PML _{1,D}	D _k
Rama A		Rama B		Rama C		Rama D				
P _{1,A} = 0.24984136		P _{1,B} = 0.25120464		P _{1,C} = 0.25052615		P _{1,D} = 0.24842781				
PML _{0,A}	PML _{1,A}	PML _{0,B}	PML _{1,B}	PML _{0,C}	PML _{1,C}	PML _{0,D}	PML _{1,D}			
0.527	0.529	0.512	0.532	0.591	0.598	0.511	0.511	2.142	2.185	1
1.900	1.870	1.854	1.814	0.333	0.328	0.655	0.655	4.744	4.656	0
1.699	1.690	2.000	1.993	0.229	0.230	0.953	0.953	4.8835	4.8839	1
2.056	2.044	2.371	2.371	0.230	0.340	0.444	0.444	5.102	5.214	1
2.468	2.418	2.110	2.078	0.931	0.924	0.427	0.427	5.938	5.838	0
1.945	1.919	1.960	1.929	0.967	0.713	0.409	0.409	5.282	4.963	0
1.427	1.436	1.308	1.372	0.701	0.706	0.529	0.529	3.966	4.059	1
2.086	2.039	2.020	1.988	0.766	0.754	0.963	0.963	5.837	5.729	0
2.820	2.737	2.857	2.799	0.844	0.824	1.137	1.137	7.660	7.489	0
2.478	2.433	2.431	2.406	1.014	0.997	0.931	0.931	6.856	6.753	0
1.845	1.835	1.834	1.844	0.811	0.819	0.521	0.521	5.013	5.040	1
2.016	2.039	1.945	1.954	0.904	0.921	0.633	0.633	5.499	5.564	1
1.910	1.949	1.899	1.899	0.844	0.849	0.571	0.571	5.226	5.282	1
1.930	1.900	1.899	1.869	0.683	0.663	0.956	0.956	5.470	5.377	0
1.080	1.092	1.338	1.347	0.826	0.836	0.616	0.616	3.862	3.902	1
1.654	1.610	1.659	1.630	0.809	0.799	0.914	0.914	5.036	4.937	0

$$I_{T1,4x4} = I_A + I_B + I_C + I_D$$

$$I_{T1,4x4} = I(D\alpha) + I(D\beta) + I(M\alpha) + I(F\alpha)$$

$$I_{T1,4x4} = 3.9768 + 3.9985 + 3.9877 + 3.9543 = 15.9173$$

$$P_{1,A} = \frac{I_A}{I_{T1,4x4}} = \frac{3.9768}{15.9173} = 0.249841$$

$$P_{1,B} = \frac{I_B}{I_{T1,4x4}} = \frac{3.9985}{15.9173} = 0.251204$$

$$P_{1,C} = \frac{I_C}{I_{T1,4x4}} = \frac{3.9877}{15.9173} = 0.250526$$

$$P_{1,D} = \frac{I_D}{I_{T1,4x4}} = \frac{3.9543}{15.9173} = 0.248427$$

Tabla A.V Caso #2, esquema 4x4.

CASO #2, ESQUEMA 4X4								S ₀ = PML _{0,A} +PML _{0,B} +PML _{0,C} +PML _{0,D}	S ₁ = PML _{1,A} +PML _{1,B} +PML _{1,C} +PML _{1,D}	D _k
Rama A		Rama B		Rama C		Rama D				
P _{1,A} = 0.25090201		P _{1,B} = 0.25022432		P _{1,C} = 0.25085181		P _{1,D} = 0.24802183				
PML _{0,A}	PML _{1,A}	PML _{0,B}	PML _{1,B}	PML _{0,C}	PML _{1,C}	PML _{0,D}	PML _{1,D}			
0.511	0.531	0.590	0.600	1.153	1.176	0.510	0.523	2.767	2.832	1
0.928	0.915	0.332	0.329	1.163	1.151	0.654	0.642	3.079	3.038	0
1.001	1.006	0.229	0.231	0.930	0.948	0.952	0.967	3.113	3.152	1
1.186	1.196	0.230	0.341	0.900	0.918	0.443	0.456	2.761	2.912	1
1.056	1.048	0.930	0.926	0.900	0.888	0.426	0.416	3.314	3.280	0
0.981	0.973	0.965	0.715	1.261	1.251	0.409	0.399	3.617	3.340	0
0.654	0.692	0.700	0.708	0.536	0.549	0.528	0.543	2.420	2.493	1
1.011	1.003	0.765	0.756	1.166	1.148	0.962	0.944	3.905	3.853	0
1.430	1.412	0.843	0.826	1.625	1.605	1.135	1.126	5.034	4.970	0
1.216	1.214	1.013	0.999	1.565	1.547	0.930	0.915	4.725	4.677	0
0.918	0.930	0.810	0.821	1.136	1.156	0.520	0.540	3.386	3.449	1
0.973	0.986	0.903	0.924	1.296	1.311	0.632	0.647	3.806	3.869	1
0.950	0.958	0.843	0.851	1.349	1.364	0.570	0.582	3.714	3.757	1
0.950	0.943	0.683	0.665	1.236	1.224	0.954	0.942	3.825	3.775	0
0.669	0.679	0.825	0.839	1.166	1.181	0.615	0.625	3.277	3.325	1
0.830	0.822	0.808	0.801	1.224	1.201	0.912	0.895	3.775	3.721	0

$$I_{T2,4x4} = I_A + I_B + I_C + I_D$$

$$I_{T2,4x4} = I(D\beta) + I(M\alpha) + I(M\beta) + I(F\beta)$$

$$I_{T2,4x4} = 3.9985 + 3.9877 + 3.9977 + 3.9526 = 15.9365$$

$$P_{2,A} = \frac{I_A}{I_{T2,4x4}} = \frac{3.9985}{15.9365} = 0.25090201$$

$$P_{2,B} = \frac{I_B}{I_{T2,4x4}} = \frac{3.9977}{15.9365} = 0.25022432$$

$$P_{2,C} = \frac{I_C}{I_{T2,4x4}} = \frac{3.9977}{15.9365} = 0.25085181$$

$$P_{2,D} = \frac{I_D}{I_{T2,4x4}} = \frac{3.9526}{15.9365} = 0.24802183$$

Tabla A.VI Caso #3, esquema 4x4.

CASO #3, ESQUEMA 4X4								S ₀ = PML _{0,A} +PML _{0,B} +PML _{0,C} +PML _{0,D}	S ₁ = PML _{1,A} +PML _{1,B} +PML _{1,C} +PML _{1,D}	D _k
Rama A		Rama B		Rama C		Rama D				
P _{1,A} = 0.25172214		P _{1,B} = 0.24898938		P _{1,C} = 0.24888234		P _{1,D} = 0.25040613				
PML _{0,A}	PML _{1,A}	PML _{0,B}	PML _{1,B}	PML _{0,C}	PML _{1,C}	PML _{0,D}	PML _{1,D}			
1.157	1.180	0.512	0.525	0.512	0.525	0.528	0.530	2.711	2.761	1
1.167	1.155	0.657	0.644	0.657	0.644	0.946	0.939	3.428	3.383	0
0.933	0.951	0.956	0.971	0.955	0.970	0.846	0.848	3.692	3.742	1
0.903	0.921	0.445	0.458	0.445	0.457	1.024	1.026	2.819	2.864	1
0.903	0.891	0.428	0.418	0.428	0.418	1.229	1.214	2.989	2.941	0
1.266	1.256	0.410	0.400	0.410	0.400	0.969	0.964	3.056	3.021	0
0.538	0.551	0.530	0.545	0.530	0.545	0.711	0.721	2.310	2.362	1
1.170	1.152	0.966	0.948	0.965	0.948	1.039	1.024	4.141	4.073	0
1.631	1.611	1.140	1.130	1.139	1.129	1.404	1.374	5.316	5.246	0
1.570	1.553	0.933	0.918	0.933	0.918	1.234	1.221	4.672	4.612	0
1.140	1.160	0.522	0.542	0.522	0.542	0.918	0.921	3.104	3.167	1
1.301	1.316	0.634	0.649	0.634	0.649	1.004	1.024	3.575	3.640	1
1.354	1.369	0.572	0.585	0.572	0.584	0.951	0.979	3.450	3.518	1
1.240	1.228	0.958	0.946	0.958	0.945	0.961	0.954	4.119	4.074	0
1.170	1.185	0.617	0.627	0.617	0.627	0.538	0.548	2.943	2.988	1
1.228	1.205	0.916	0.898	0.915	0.898	0.823	0.808	3.884	3.811	0

$$I_{T3,4x4} = I_A + I_B + I_C + I_D$$

$$I_{T3,4x4} = I(m\beta) + I(F\alpha) + I(F\beta) + I(D\alpha)$$

$$I_{T3,4x4} = 3.9977 + 3.9543 + 3.9526 + 3.9768 = 15.8814$$

$$P_{3,A} = \frac{I_A}{I_{T3,4x4}} = \frac{3.9977}{15.8814} = 0.25172214$$

$$P_{3,B} = \frac{I_B}{I_{T3,4x4}} = \frac{3.9543}{15.8814} = 0.24898938$$

$$P_{3,C} = \frac{I_C}{I_{T3,4x4}} = \frac{3.9526}{15.8814} = 0.24888234$$

$$P_{3,D} = \frac{I_D}{I_{T3,4x4}} = \frac{3.9768}{15.8814} = 0.25040613$$

Tabla A.VII Caso #4, esquema 4x4.

CASO #4, ESQUEMA 4X4								S ₀ = PML _{0,A} +PML _{0,B} +PML _{0,C} +PML _{0,D}	S ₁ = PML _{1,A} +PML _{1,B} +PML _{1,C} +PML _{1,D}	D _k
Rama A		Rama B		Rama C		Rama D				
P _{1,A} = 0.25092025		P _{1,B} = 0.25154949		P _{1,C} = 0.24881861		P _{1,D} = 0.24871164				
PML _{0,A}	PML _{1,A}	PML _{0,B}	PML _{1,B}	PML _{0,C}	PML _{1,C}	PML _{0,D}	PML _{1,D}			
0.592	0.599	1.157	1.179	0.512	0.525	0.512	0.524	2.774	2.829	1
0.333	0.328	1.167	1.154	0.656	0.644	0.656	0.644	2.814	2.771	0
0.230	0.231	0.933	0.950	0.955	0.970	0.955	0.969	3.074	3.122	1
0.231	0.341	0.903	0.920	0.445	0.457	0.445	0.457	2.024	2.177	1
0.933	0.925	0.903	0.890	0.427	0.418	0.427	0.417	2.692	2.652	0
0.968	0.715	1.265	1.255	0.410	0.400	0.410	0.400	3.054	2.771	0
0.702	0.707	0.538	0.550	0.529	0.544	0.529	0.544	2.300	2.348	1
0.767	0.755	1.169	1.152	0.965	0.947	0.965	0.947	3.867	3.802	0
0.845	0.825	1.630	1.609	1.139	1.129	1.139	1.129	4.754	4.694	0
1.016	0.998	1.569	1.552	0.933	0.918	0.932	0.917	4.451	4.386	0
0.812	0.820	1.139	1.159	0.522	0.542	0.522	0.542	2.997	3.064	1
0.905	0.923	1.300	1.315	0.634	0.649	0.634	0.649	3.475	3.537	1
0.845	0.850	1.353	1.368	0.572	0.584	0.572	0.584	3.343	3.388	1
0.685	0.664	1.240	1.227	0.957	0.945	0.957	0.945	3.840	3.783	0
0.828	0.838	1.169	1.184	0.617	0.627	0.616	0.626	3.231	3.276	1
0.810	0.800	1.227	1.204	0.915	0.898	0.915	0.897	3.868	3.801	0

$$I_{T4,4x4} = I_A + I_B + I_C + I_D$$

$$I_{T4,4x4} = I(M\alpha) + I(M\beta) + I(F\alpha) + I(F\beta)$$

$$I_{T4,4x4} = 3.9877 + 3.9977 + 3.9543 + 3.9526 = 15.8923$$

$$P_{4,A} = \frac{I_A}{I_{T4,4x4}} = \frac{3.9977}{15.8923} = 0.25092015$$

$$P_{4,B} = \frac{I_B}{I_{T4,4x4}} = \frac{3.9543}{15.8923} = 0.25154949$$

$$P_{4,C} = \frac{I_C}{I_{T4,4x4}} = \frac{3.9526}{15.8923} = 0.24881861$$

$$P_{4,D} = \frac{I_D}{I_{T4,4x4}} = \frac{3.9768}{15.8923} = 0.24871164$$

Apéndice B

Antenas ópticas y tarjetas de adquisición

Antenas ópticas

Uno de los trabajos en los que está basado este documento [Arvizu et al, 2010] propone el uso de antenas ópticas de dimensiones específicas basadas (figura B.1) en los niveles de turbulencia que la señal experimentaría; para la antena receptora se tiene:

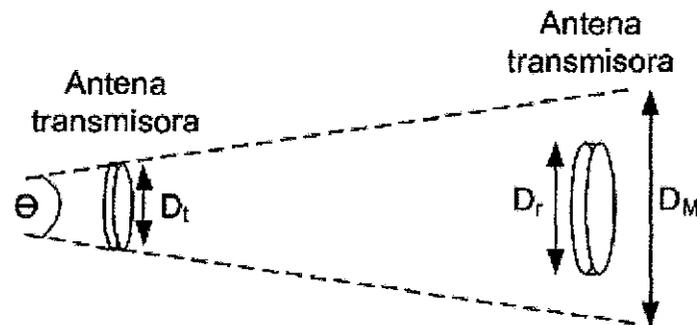


Figura B.1. Antenas ópticas y dimensiones involucradas.

El requisito de las dimensiones en la antena receptora es que $D_r < r_0$, r_0 es el parámetro de Fried y es dependiente de la variable de estructura del índice de refracción, de tal modo se determina que $D_r = 2.5\text{cm}$, dadas las características del enlace a establecer ($\lambda = 1550\text{nm}$ y $L = 1.5$) se determina la ganancia de la antena receptora:

$$G_{Rx} = \left(\frac{\pi D_r}{\lambda} \right)^2 = \frac{\pi 0.025\text{cm}}{1550 \times 10^{-9}\text{m}} = 94\text{dBi} \dots \dots \dots (B.1)$$

Posteriormente, basándose en consideraciones geométricas se determino el tamaño de la mancha al incidir en la etapa receptora $D_M \leq 7.7\text{cm}$, esto también está asociado a la separación mínima que debe existir entre las antenas receptoras

para suprimir la correlación espacial de intensidad. Al requerir una mancha de tal dimensión se elaboró el cálculo del ángulo de divergencia de transmisión requerido para satisfacer dicha condición:

$$D_M = 2L \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = 7.7 \text{ cm} \dots \dots \dots (B.2)$$

Por tanto el ángulo de divergencia Θ , está dado por:

$$\theta = 2 \tan^{-1}\left(\frac{D_M}{2L}\right) = 51.33 \mu\text{rad} = 2.941 \times 10^{-3} \text{ }^\circ \dots \dots \dots (B.3)$$

El paso siguiente consiste en determinar la ganancia de la antena transmisora la cual esta dado por:

$$G_{Tx} = \frac{16}{(51.33 \mu\text{rad})^2} = 98 \text{ dBi} \dots \dots \dots (B.4)$$

En función de este dato es posible determinar la dimensión de dicha antena:

$$G_{Tx} = 98 \text{ dBi} = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \dots \dots \dots (B.5)$$

$$\Rightarrow A = \frac{G_{Tx} \lambda^2}{4\pi} = \frac{98 \text{ dB} 1550 \times 10^{-9} \text{ m}}{4\pi} = 1.256 \times 10^{-3}$$

$$A = \pi r^2 \Rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 0.019 \text{ cm} = D_l \dots \dots \dots (B.6)$$

En función de los cálculos anteriormente mostrados se dio a la tarea de diseñar un arreglo óptico que cumpliera con estas características, pero que además fuera posible su implementación con lentes de carácter comercial. El arreglo diseñado es mostrado enseguida (figura B.2), la primera lente (NT68-005) es utilizada para expandir el haz proveniente de una lentilla de GRIN y así cubrir en su totalidad a la lente transmisora (NT67-589), la divergencia de dicha lente permite tener en la

etapa receptora una mancha del tamaño requerido, por último la antena receptora (NT67-542) permite la recolección de la luz recibida.

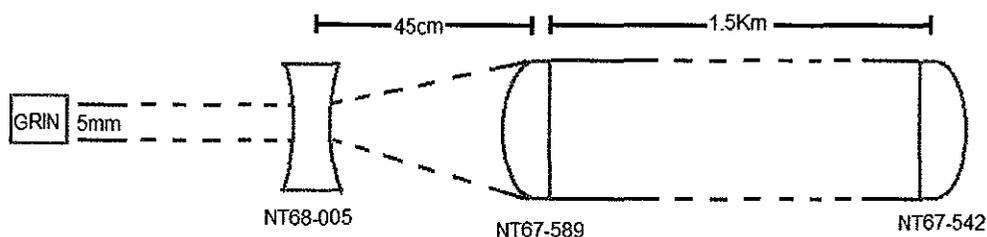


Figura B.2. Arreglo óptico propuesto.

Las principales características de las lentes empleadas en dicho arreglo son desplegadas en la siguiente tabla:

Tabla B.I. Principales características de las lentes seleccionadas.

Características	NT68-005	NT67-589	NT67-542
Diámetro (mm)	6.0	50.0	25.0
Tolerancia diámetro (mm)	+0.0/-0.1	+0.0/-0.1	+0.0/-0.1
Longitud focal efectiva (mm)	-6.0	500.0	25.0
Anchura central (mm)	1.5	5.0	8.0
Anchura bordes (mm)	2.29	3.79	2.43
Radio (mm)	9.74	258.4	16.82
Substrato	N-SF11	N-BK7	N-SF5
Longitud de onda de diseño (nm)	587.6	587.6	587.6
Recubrimiento	NIR II R<0.7%@750-1550nm	NIR II R<0.7%@750-1550nm	NIR II R<0.7%@750-1550nm

Con los parámetros reportados en la tabla anterior fue posible realizar una simulación del arreglo óptico diseñado en la plataforma de software ZEMAX (figura B.3), dicha simulación arrojó resultados congruentes con la estimación teórica.

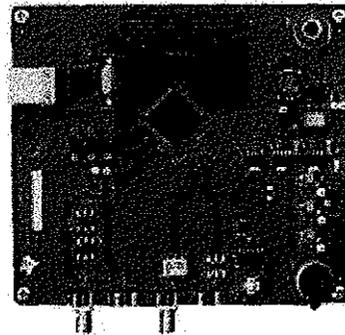
Interfaz de datos: serial
 # de puertos de entradas por ADC: 1 diferencial
 Rango de voltaje de entrada: 2.2 Vpp

800Msps \$2039 USD

<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=ADS5474>
ADX-EVM-ND

ADS5400EVM evaluation module (modulo de evaluación)

Fabricante: texas instruments
 Número de ADC's: 1
 Número de bits: 12
 Tasa de muestreo: 1Gsps
 Interfaz de datos: serial
 # de puertos de entrada por ADC: 1 diferencial
 Rango de voltaje de entrada: 1.5-2Vpp



1Gsps \$1529 USD

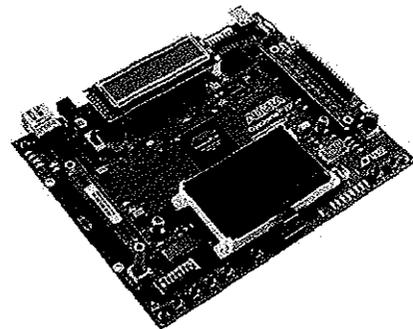
<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=296-25235-ND>

AD9122-M5375-EBZ-ND (modulo de evaluación)

Fabricante: analog devices
 Número de ADC's: 2
 Número de bits: 16
 Tasa de muestreo: 1.2G
 Interfaz de datos: serial
 # de puertos de entrada por ADC: 1 diferencial
 1.2Gsps \$538 USD

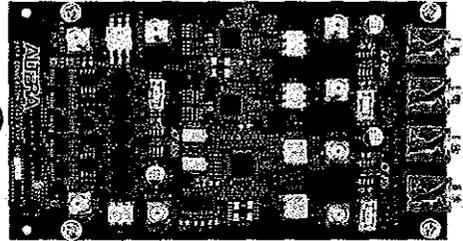
DSP Development Kit, Cyclone III Edición

El kit de Cyclone III es una completa plataforma para el procesamiento digital de la señal. El kit facilita el proceso de diseño, desde la concepción del diseño hasta la implementación hardware del sistema. El kit de desarrollo DSP Cyclone III Edición incluye la tableta de desarrollo, la tarjeta de conversión de datos HSMC (High Speed Mezzanine Card), el software Quartus® II, el software de evaluación con MATLAB/Simulink. Para aplicaciones mas avanzadas puede incluirse la herramienta DSP Builder.



El kit DSP Cyclone III Edición incluye:

- Procesador Cyclone III
 - Dispositivos
 - Cyclone III EP3C120F780 FPGA
 - LCD 128 x 64
 - Interruptores sencillos, dip-switches, LEDs, displays de 7-segna
 - Memoria
 - 256 Mbytes de canal dual DDR2 SDRAM con ECC
 - 8 Mbytes SRAM síncrona
 - 64 Mbytes de memoria flash
 - Componentes e interfaces
 - 10/100/1000 Ethernet (RGMII)
 - USB 2.0 (Type B)
 - Dos conectores HSMC
- Conversión de datos HSMC
 - Dual 14-bit, 150-MSPS A/D convertidor
 - Dual 14-bit, 250-MSPS D/A convertidor
 - Audio in/out/mic
- Cyclone III FPGA Development Kit, CD-ROM
 - Ejemplos diseñados para el Cyclone III FPGA
 - Documentación completa
 - Guía de usuario
- MATLAB/Simulink software de evaluación



\$1595USD

<http://www.altera.com/products/devkits/altera/kit-cyc3-dsp.html#contents>

De manera general se mostraron tres diferentes alternativas para la adquisición de la señal, la primera opción es representada por un par de tarjetas que funcionan exclusivamente como convertidor analógico-digital; al ser de propósito específico sus prestaciones tales como la velocidad de muestreo y la resolución son mayores pero igualmente el costo, sin mencionar que su única funcionalidad es proporcionar una señal de naturaleza digital sin permitir el procesamiento de la misma. En segundo lugar se plantea el uso de alguna tarjeta o módulo de evaluación, este tipo de plataformas son diseñadas por el fabricante de los integrados que realizan la conversión analógica-digital, la limitante de dichos módulos es el acondicionamiento que la señal requiere para ser insertada y las características de la señal digital de salida, su costo es relativamente accesible. La

tercera opción contempla el uso de toda una plataforma digital, un kit de desarrollo, este tipo de plataformas son más completas en el sentido de las funciones con las que cuenta, pues no sólo realizan la conversión del dominio analógico al digital A/D y viceversa, sino que permite el procesamiento digital de la señal dentro del mismo dispositivo, facilitando la implementación completa de un sistema mediante el uso de herramientas tales como un lenguaje de software de más alto nivel, es decir una interfaz más sencilla para el usuario. Otro punto a favor de esta opción es la diversidad de proyectos que pueden valerse de una plataforma de procesamiento para ser solventados; como es de esperarse kits de desarrollo como el planteado tienen sus limitantes, al ser tan completos en cierto sentido pueden no ofrecer altas tasas de muestreo o resolución de conversión, al menos no tan altas como las dos primeras opciones comentadas.

En función de todo lo anteriormente citado el presente trabajo plantea como sugerencia el uso de un kit de desarrollo. Sin dejar de lado lo mencionado en el apartado referente al trabajo futuro, donde contemplando el desarrollo del proyecto futuro la decisión debe ser tomada basándose en diversas circunstancias tales como el o los proyectos específicos que harán uso del equipo seleccionado y dicha decisión debe tomarse bajo la asesoría de un experto en la materia.